

UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **génie industriel**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Bertrand NICQUEVERT

Thèse dirigée par **Jean-François BOUJUT**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**, Grenoble – Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production
dans **l'École Doctorale IMEP-2**, Ingénierie Matériaux Mécanique Énergétique Environnement Procédés Production

et du **CERN**, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire
Laboratoire Européen de Physique des Particules, Genève

Manager l'interface

Approche par la complexité du processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation : modèle transactionnel de l'acteur d'interface et dynamique des espaces d'échanges

Thèse soutenue publiquement le **23 novembre 2012**,
devant le jury composé de :

Mme Marie-José AVENIER
Directeur de recherche au CERAG (CNRS–UPMF Grenoble), Membre
M. Pierre BONNAL
Chargé de cours à HEC Genève, Université de Genève, Membre
M. Jean-François BOUJUT
Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Directeur
M. Benoît EYNARD
Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, Rapporteur
M. Markus NORDBERG
Coordinateur des ressources d'ATLAS, CERN, Membre
Mme Julie STAL-LE CARDINAL
Professeur à l'École Centrale Paris, Rapporteur
M. Dominique VINCK
Professeur à l'Université de Lausanne, Président

Manager l'interface

Thèse soutenue le 23 novembre 2012 à partir du mémoire provisoire v7r11 du 04 octobre 2012

Mémoire définitif v8r84 publié le 13 février 2013

Le mémoire de thèse définitif, ainsi que le support de présentation de la soutenance, sont disponibles sous forme de fichiers .pdf sur le serveur EDMS du CERN, sous le n° 1227183
https://edms.cern.ch/document/1227183/3

CERN-THESIS-2012-238, https://cds.cern.ch/record/1511891

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE GRENOBLE

Spécialité : **génie industriel**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Bertrand NICQUEVERT

Thèse dirigée par **Jean-François BOUJUT**

préparée au sein du **Laboratoire G-SCOP**, Grenoble – Sciences pour la Conception, l'Optimisation et la Production
dans **l'École Doctorale IMEP-2**, Ingénierie Matériaux Mécanique Énergétique Environnement Procédés Production

et du **CERN**, Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire Laboratoire Européen de Physique des Particules, Genève

Manager l'interface

Approche par la complexité du processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation : modèle transactionnel de l'acteur d'interface et dynamique des espaces d'échanges

Thèse soutenue publiquement le **23 novembre 2012**,
devant le jury composé de :

Mme Marie-José AVENIER
Directeur de recherche au CERAG (CNRS–UPMF Grenoble), Membre
M. Pierre BONNAL
Chargé de cours à HEC Genève, Université de Genève, Membre
M. Jean-François BOUJUT
Professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, Directeur
M. Benoît EYNARD
Professeur à l'Université de Technologie de Compiègne, Rapporteur
M. Markus NORDBERG
Coordinateur des ressources d'ATLAS, CERN, Membre
Mme Julie STAL-LE CARDINAL
Professeur à l'École Centrale Paris, Rapporteur
M. Dominique VINCK
Professeur à l'Université de Lausanne, Président

Avance sur ton chemin, car il n'existe que par ta marche.

SAINT-AUGUSTIN

Sommaire

Manager l'interface.....3

Préambule.....11

Introduction ”kantique”.....13

Chapitre 0. Premiers cheminements.....15

Partie I –
Genèse(s).....27

Chapitre 1. Les fils d'un parcours.....31

Chapitre 2. Le CERN, une trame 41

Chapitre 3. Quel rôle pour le manageur technique ?.....77

Chapitre 4. La méthode.....99

Partie II -
Agir sans trop penser.....117

Chapitre 5. Gestion d'espaces (1). Enveloppes.....121

Chapitre 6. Gestion d'espaces (2). Négociation de marges.....149

Chapitre 7. Gestion de projet.
Les pieds d'ATLAS et la Russie.....177

Chapitre 8. Gestion de données techniques 227

Partie III -
Repenser avant d'agir.....251
Chapitre 9. Émergence du manageur technique.....257
Chapitre 10. Pour une complexité féconde.....279
Chapitre 11. Acteur d'interface.....305
Chapitre 12. Jusqu'aux frontières des espaces d'échanges.....339

Partie IV -
Agir et penser à la fois.....369
Chapitre 13. Périmètres ?.....373
Chapitre 14. Équipement de l'équipage.....387
Chapitre 15. Intégration de l'intégration.....407
Chapitre 16. Pro-cube et hypercompas.....427

Coda.....447
Chapitre 17. Bouclages et ouvertures.....449

Bibliographie.....463

Index et tables.....491

Des *Remerciements* sont exprimés à la *Coda*, p. 457.
Une *Table des matières* détaillée est proposée à la p. 503.

Préambule

Sommaire du Préambule

Introduction "kantique" 13

Chapitre 0. Premiers cheminements 15
0.1 Partie I – Genèse(s) : déjà entre action et recherche.....17
0.2 Partie II – Agir sans trop penser : un parcours, un marcheur, des étapes.....18
0.3 Partie III – Repenser avant d'agir : que faire de la complexité.....19
0.4 Partie IV – Agir et penser à la fois : vers un hypercompas.....20
0.5 Un itinéraire de lecture, une carte du territoire.....21

Premier clamot . Penser cathédrale 25

Introduction ”kantique”

Cette thèse est le fruit de quelque vingt ans de travail d'ingénieur et de manageur [1] technique dans des projets qui sont dits *complexes*. La structure comme la nature de cette thèse se veulent originales. Ce n'est ni un parti pris ni une pétition de principe ; c'est à l'inverse la prise en compte d'un constat très simple : l'on n'écrit pas la même chose, l'on ne pense pas de la même manière et l'on n'agit pas avec les mêmes approches une fois acquises quelques années d'expérience, après s'être frotté à quelques épineux obstacles et avoir franchi quelques profonds fossés. Je m'abreuve à un terrain de vingt ans d'âge, la maturation est à son apex, c'est le moment de mettre en bouteille.

Le présent mémoire de thèse s'articule en quatre parties, intitulées respectivement *Genèse(s)*, puis *Agir sans trop penser*, suivi de *Repenser avant d'agir*, et enfin d'*Agir et penser à la fois*. Cette structure est inspirée des trois questions fondamentales auxquelles le philosophe Emmanuel Kant s'applique de tenter de répondre dans chacune de ses trois *Critique* [2] : « *Que puis-je connaître ? Que dois-je faire ? Que m'est-il permis d'espérer ?* » Au travers de ces trois questions sont jetées les bases de quelques-unes des branches les plus fondamentales de la philosophie : épistémologie et phénoménologie, morale, métaphysique. Si ces questions m'ont paru heuristiques, autrement dit inspirantes, c'est que, formulées à la première personne, elles offrent un dévidoir particulièrement adapté au fil constitué par les interrogations successives ou simultanées d'un manageur technique évoluant dans des projets complexes, ce qui constitue le thème de la thèse.

Dans la première partie introductive, *Genèse(s)*, je m'attacherai à clarifier *ce que je puis connaître*, en tant que chercheur aussi bien qu'en tant que manageur technique. Autrement dit, je préciserai quel est le contexte à la fois théorique et opérationnel dans lequel se déploie la présente étude ; et ayant explicité le regard interrogateur que je porte sur ledit contexte, j'exposerai la méthode que je mets en

1. Nous adoptons ici la forme francisée du terme anglais *“manager”* (lequel vient du français *main, manège*).

2. *Critique de la raison pure* (1781-1787), *Critique de la raison pratique* (1788), et *Critique de la faculté de juger* (1789).

[Le système de référencement bibliographique employé dans la thèse est double :

• pour les citations de nature littéraire ou philosophique, comme celle-ci, j'emploierai des références *in extenso* en note infra-paginale, et l'ouvrage ne sera pas repris dans la *Bibliographie* générale ;

• pour toutes les autres citations, nous suivons les recommandations de la norme ISO 690:2010, sous forme de citation dans le texte adapté du *“Harvard style”* : « [Auteur Année, page ou autre élément de situation optionnel] » [ISO 2010, 25]. Le détail de la référence est alors donné dans la *Bibliographie* en fin de volume, p. 463 sqq.

Ce double système permet de distinguer les éléments d'enrichissement stylistique de la bibliographie de fond.]

œuvre pour y répondre, avec quelle approche et quels présupposés épistémologiques.

La deuxième partie, *Agir sans trop penser*, expose les cas retenus pour cette étude. Faisant le constat d'un certain nombre d'obstacles – peut-être épistémologiques eux aussi, pour faire un clin d'œil à Bachelard [2000] –, c'est à proprement parler le manageur technique lui-même qui s'interrogera sur ces/ses tranches de vie : et maintenant, *que dois-je faire ?* Entendu : mais que dois-je donc faire pour accomplir mon devoir de manageur technique ; voire : pour m'accomplir en tant que manageur technique.

Quant à la troisième partie, *Repenser avant d'agir*, elle entend élaborer des outils, des éléments de méthode pour accompagner le manageur technique dans son dessein de mieux maîtriser son destin. Ayant accepté de « *s'asseoir pour se regarder marcher* » [3], il saura ensuite mieux discerner *ce qu'il lui est permis d'espérer*, quels obstacles il pourra escompter contourner, quels succès emporter et comment s'y prendre pour cela. Le propos s'élargira quelque peu jusqu'à proposer quelques éléments d'une ingénierie complexe de la collaboration.

Pourquoi une quatrième partie, quand Kant s'arrête à trois ? En premier lieu, il ne faut pas surestimer l'intérêt de l'analogie en trois questions, qui n'est en définitive qu'heuristique. Surtout, il s'agit de dépasser le chiasme entre agir et penser, de cesser de les concevoir comme deux phases indépendantes et au mieux séquentielles. Or elles ne le sont pas. Elles sont liées, elles sont emmêlées, intriquées, comme le fil et la trame d'un tissu : elles sont « *pliées ensemble* », autrement dit, elles sont « *com-plexées* » [Morin 2005, 21]. Il s'agit de rendre cette com-plexité. Je propose donc une quatrième partie en forme d'épilogue, intitulée *Agir et penser à la fois*, où l'on suivra en action comme en pensée quelques moments du manageur technique "complexe". Et l'on pourra comparer l'évolution depuis l'ère du manageur technique "pré-complexe" qui fait l'objet de la seconde partie *Agir sans trop penser (complexe)*. Et puis, Kant avait lui-même formulé une quatrième question, plus fondamentale encore que les trois précédentes : *Qu'est-ce que l'homme ?* [4] C'est la question de base de l'anthropologie. Et c'est bien aussi l'objet de cette quatrième partie que de donner quelques premiers éléments permettant de saisir ce que pourrait être un manageur technique "recomplexifié".

L'on verra au chapitre 4 que la structuration en quatre parties s'appuie également sur une autre approche méthodologique, celle de la DRM (*Design Research Methodology*) ; cette seconde approche, en se superposant à la structure basée sur les questions de Kant, éclairera un peu plus l'articulation du présent mémoire.

3. Allusion à l'ouvrage éponyme de M. Lecointe, Syros – La Découverte, 1981.

4. Kant, *Logique*, 1800, traduction L. Guillermit, Vrin, 1970, p. 25-26.

Chapitre 0. Premiers cheminements

Où l'on se met en quête de repères pour savoir vers où l'on va

Les premières phrases, les premières idées, sont rudimentaires, chaotiques, approximatives. À partir de ce premier matériau, il faut creuser et l'on creuse vers plus de clarté possible. Au fond du trou il y a la clarté. On ne monte pas, on creuse ! La clarté est au fond.

Daniel Pennac [5]

5. À propos de l'écriture du *Journal d'un corps*, Gallimard, 2012.

Il neigeait. La route toute droite semblait mener dans les nuages. Les montagnes du Jura avaient-elles été abolies ? Au volant depuis deux heures dans ces contrées qu'il ne connaissait pas, dans cette ville étrangère bien étrange, il ne savait plus où aller, il naviguait à l'estime. Le CERN, ça doit pourtant être facile à trouver, se disait-il.



C'est alors qu'il avait repéré une voiture blanche, avec ce drôle de logo tout rond avec des petites pattes qui semblaient vouloir s'en échapper. Et il l'avait suivie. Après tout, avec un peu de chances, elle allait sans doute rentrer au bercail ; et lui, en la suivant, il parviendrait ainsi à bon port.

C'était en janvier 1992. C'était il y a vingt ans.

Il était arrivé finalement au bout de la route, juste avant la douane qui filtrait alors soigneusement les véhicules et leurs occupants. L'on se préoccupait encore de l'identité des voyageurs, Schengen n'avait pas encore étendu sur la Suisse son blanc manteau de liberté de circulation des personnes. « Vous quittez le secteur helvétique », *semblait souffler la sombre guérite. Heureusement, l'entrée du CERN se trouvait juste avant. Il lui suffit de glisser au gardien le nom de son contact, et il pénétra dans l'enceinte, muni d'un petit viatique que lui avait confié l'homme en uniforme : un plan du site.*

Bâtiment 25, où donc est-ce ? Voyons. Carroyage J25-j8 ! Il n'avait pas pensé à regarder sur la Toile. C'est normal, il venait à peine d'être inventé, le fameux World Wide Web. *Ici-même d'ailleurs. Mais il en ignorait encore l'existence, et de toute façon il n'y aurait encore trouvé ni* Mappy *ni* Google maps. *Quant au GPS…*

Ah oui, le 25, c'est ici, entre le bâtiment 166 et le 70. (Logique !?) Il se dirigea sur la route toujours plongée en plein brouillard, longeant les bâtiments blafards, les ateliers, les parkings. C'est donc si grand que ça, le CERN !

Comment s'orienter ?

Il trouva enfin. Puis chercha encore, une fois entré dans le bâtiment. Son viatique l'abandonnait là : pas assez précis. Pour parvenir au 25, il fallait entrer par le 166, et traverser un genre d'atelier. Heureusement, les bureaux étaient peu nombreux et il trouva rapidement son contact.

Cinq mois plus tard, il recevait sa proposition de contrat ; quatre mois encore, et il s'installait dans ce bâtiment 70, aux allures de petit chalet. Bienvenue en Helvétie, bienvenue au CERN.

0.1 Partie I – *Genèse(s)* : déjà entre action et recherche

Voilà que déjà le récit va trop vite. Car cette arrivée au CERN en octobre 1992, c'était après un aiguillage, et je n'en ai rien montré. Car si j'ai bien reçu, fin juin 1992, une proposition de poste de boursier (*fellow*) au CERN, l'historiette en introduction ne dit pas que, quelques jours plus tôt à peine, j'en avais reçu une autre : une proposition de bourse de thèse. Mon entrée au CERN fut donc le fruit d'un aiguillage, d'un choix crucial : se lancer dans une thèse de génie industriel au profil pas encore bien défini mais stimulant, avec peut-être même des sociologues, un passionnant chemin constitué de lectures, d'élaborations de concepts, de confrontations d'idées ? Ou bien accepter ce prestigieux contrat au CERN pour travailler sur la « *délamination de couches minces* [métalliques] *sur substrat épais* [en composites carbone époxy] *en forme de coque* » ?

Cette thèse est le fruit de quelque vingt ans de travail au CERN, en tant qu'ingénieur mécanicien et ingénieur projet. C'est donc que j'ai privilégié la seconde voie,

du moins au départ, celle de l'action. Et qu'elle m'a fourni un terrain exceptionnel, duquel se nourrit cette thèse. Cette **partie I** en décrit *la* (ou les) *genèse(s)*.

Le premier fil de genèse, développé au **chapitre 1**, sera celui de mon parcours et de la démarche qui m'a conduit au projet de thèse qui aboutit aujourd'hui : il décrira les motivations, les préoccupations et les questionnements qui en ont déclenché le processus. (L'on pourra sans dommage ne pas le lire.)

Le **chapitre 2** relèvera le défi de synthétiser les activités menées au CERN, un univers que l'on s'imagine volontiers peuplé d'hypothèses, d'équations, d'essais, de montages, de calculs et de mesures. Nous exposerons la complexité du monde de la physique des particules, de la "*Big Science*" (la science dite *lourde*), de l'ingénierie au service de la recherche, et d'autres curiosités assez uniques.

À la croisée des deux voies (recherche ou action) émerge une question fondamentale que formulera le **chapitre 3**. L'ingénieur et le manageur technique que je suis peu à peu devenu a forgé son expérience, mûri ses analyses, aiguisé ses constats. Il s'est posé bien des questions, pratiquant assidûment la réflexivité, c'est-à-dire la réflexion sur ses propres pratiques. Il s'est interrogé sur les meilleures manières de tenir son rôle de manageur technique. Il a réfléchi aux moyens qui lui étaient donnés ou qu'il devait élaborer pour instrumenter son action. Cette question opérationnelle s'est transformée au fil du présent travail de thèse en une question de recherche plus formalisée : quel est **le rôle du manageur technique dans les processus de conception et d'intégration au sein de projets complexes.**

Cette thèse est en définitive l'histoire d'un choix jamais vraiment assumé. « *Choisir c'est renoncer* », a écrit Gide [6]. Or, renoncer n'est pas dans ma nature ; je n'ai donc pas choisi, je n'ai jamais tranché entre ces deux voies parallèles, celle de l'action et celle de la recherche. Le présent travail constitue donc l'aboutissement d'une convergence, la concrétisation d'une démarche de recherche-action que je qualifierai d'immergée. Cette démarche et la méthode suivie pour parvenir à formuler quelques éléments de réponse à ces questions sur la nature du rôle du manageur technique seront explicitées au **chapitre 4**.

A l'issue de cette première partie, c'est donc la *genèse* de la thèse qui aura été mise au jour, première boucle complexe où la recherche se nourrit de l'action qui s'en trouve enrichie et éclairée à son tour.

0.2 Partie II – *Agir sans trop penser* : un parcours, un marcheur, des étapes

Le prologue du jeune ingénieur en quête du lieu de rendez-vous contient en germe les éléments qui jalonneront le présent voyage d'écriture. On y suivra un individu en marche, au cours d'un récit assumé à la première personne. On y rencontrera d'autres personnages, on y vivra des situations réelles, et on y cherchera sa route, puisque mener un projet, c'est tout autant viser un but que tenter de l'atteindre par les voies les plus efficaces. Quelles sont ces voies, telle est la question. Des hypervoies dans un hyperespace de projet, en quelque sorte. Et comment se procure-t-on les hypercartes qui guideront le chemin ? De quelle hyperboussole, de quel hypercompas doit-on se munir pour naviguer sans divaguer ?

La **partie II** de la thèse est donc le récit de ces cheminements variés, où un jeune manageur technique sera en situation d'*agir sans trop penser* (la complexité). Fort de ses certitudes initiales, il s'engagera résolument dans l'action. Il se demandera souvent : que dois-je faire ; et il fera. Il jouera son rôle dans une pièce dont le texte n'est pas écrit à l'avance : il se devait d'en être l'auteur associé. Et il s'observera, à la manière d'un Bucciarelli qui écrivait :

6. « *Choisir, c'était renoncer pour toujours, pour jamais, à tout le reste – et la quantité nombreuse de ce* reste *demeurait préférable à n'importe quelle unité.* » Gide, *Les Nourritures terrestres*, Gallimard, 1921, p. 68.

> *We would do best to enter the firm in « real time », to break free of the hold of instrumental rationality and see what goes on in the day-to-day, often dreary and mundane, but frequently exciting, process of design.* [7]

Entrons donc dans cette entreprise particulière qu'est le CERN ; et regardons. Cette partie II se déroulera dans le décor du détecteur ATLAS. La nature même de ce détecteur et de son statut aux yeux des différents personnages impliqués sera au centre de l'intrigue appelée *intégration géométrique*. On y verra tout d'abord, au cours du **chapitre 5**, le manageur technique en position et en devoir de gérer des espaces, de coordonner des interfaces, de collaborer avec les sous-systèmes d'un arrangement complexe dans toutes ses dimensions socio-techniques. Dans l'étude détaillée de l'épisode dit des “lattes” présentée au **chapitre 6**, nous retrouverons un personnage croisé au chapitre 1 : Pascal Lécaille, ethnographe sociologue, qui troquera pour l'occasion son petit carnet orange pour le clavier d'une station de travail CAO dans une mémorable séquence de recherche-action. Ce sera l'occasion d'une nouvelle boucle, celle du croisement de l'observateur observé avec l'observé observateur : nous aurons l'occasion de discuter le travail d'analyse [Lécaille 2003] qu'il avait effectué au cours de cette phase d'intégration du détecteur ATLAS.

Le troisième acte de la partie II montrera au **chapitre 7** le manageur technique *sur le chantier*, les outils à la main ou presque : on le trouvera un été au beau milieu du gué, un pied dans l'eau bien bouillonnante de l'innovation perpétuelle de certains physiciens des particules, et l'autre pied dans l'eau encore bien froide du processus de production d'une usine russe. En fait de pieds, il s'agira de suivre une séquence du *projet de conception et de réalisation de la structure support du détecteur ATLAS*. Nous y constaterons que la gestion de projet sur le terrain ne suit pas franchement des logiques séquentielles bien instrumentées : le manageur technique y fera donc (sans en avoir bien conscience) de la conception intégrée, de l'ingénierie concourante, de la gestion logistique et de l'analyse de risques.

Pour compléter l'observation des terrains qui précèdent et qui ont suscité le présent travail de thèse, il nous restera à observer au **chapitre 8** le manageur technique en col blanc, mettant en place la gestion des données techniques au sein d'ATLAS ainsi que dans son bureau d'études. Le manageur technique aura fort à faire pour contribuer à *déployer cet outil de gestion des données techniques du produit*, et comprendre encore davantage ce que complexité veut dire, tout en découvrant et assimilant quelques bases de PLM [8].

0.3 Partie III – *Repenser avant d'agir* : que faire de la complexité

L'analyse de chacun de ces cas exigerait de mobiliser les littératures correspondant aux champs différents disciplinaires, variés et souvent distincts. L'objet de la partie III est de prendre le recul nécessaire. À travers ces cas de gestion d'espace, de gestion de projet et de gestion de données, c'est l'ensemble du cycle de vie d'un produit complexe qui est couvert. En agissant sans trop penser (à) la complexité de ses actions et de ces situations, le manageur technique aura inventé, adapté ou déployé quelques outils propres pour la gestion et l'exploitation des enveloppes géométriques, et il se sera heurté à des situations difficiles. Au cours de cette **partie III**, le manageur technique va donc *repenser avant d'agir*, afin de forger quelques savoirs actionnables et tenter de les transformer en outils opérationnels.

7. « Nous ferions bien d'entrer dans l'entreprise en "temps réel", de nous libérer de la contrainte de la rationalité instrumentale et de voir ce qui se poursuit dans le processus de conception au quotidien, souvent morne et banal, mais bien souvent excitant. » [Bucciarelli 1996, 20]

[C'est moi qui traduis, ainsi que **toutes** les autres citations en langue étrangère, sauf mention.]

8. PLM : *Product Lifecycle Management*, gestion du cycle de vie du produit.

[On trouvera p. 493 une *Table des acronymes* utilisés dans le présent mémoire.]

Le **chapitre 9** propose une *synthèse* des cas précédents de la partie II. À l'issue de ces plongées dans ces mondes variés et complexes, il sera temps pour le manageur technique de s'asseoir *face au miroir* : rien de tel que de s'asseoir pour se regarder marcher. Des actions passées, quelles leçons tirer pour les projets à venir ? L'on commencera à boucler, à trouver des dimensions communes à chacun de ces cas, et à en tirer des conclusions sur les limites des approches que notre manageur technique aura suivies. Un premier modèle du manageur technique sera alors proposé.

Au vu des différentes leçons tirées de chaque cas, il paraîtra pertinent de mobiliser une grille de lecture plus générale, plus transdisciplinaire, plus englobante. On retrouve en effet dans les différents cas exposés les caractéristiques et les concepts principaux de la complexité, abordés au **chapitre 10**. Ce paradigme offre une autre façon de considérer l'interdépendance entre les différents acteurs des situations observées, et la *complexité* permet d'élargir notre vision et de compléter d'autres approches sur l'étude des processus de conception et de management. Considérer la complexité comme une simple grille de lecture serait toutefois bien réducteur. Je veux y voir une autre façon de considérer les relations entre acteurs et les relations de ceux-ci avec les entités et les concepts manipulés. Il s'agira donc de savoir que faire de la complexité.

Dans cette approche par la complexité, je m'appuierai donc sur les concepts développés dans la littérature, aux multiples et parfois pléthoriques développements. Il s'agit de ne pas tomber dans le piège d'une simplification excessive, car tel est le paradoxe de la complexité qu'on ne peut pas en parler simplement. Il est donc nécessaire de clarifier le paysage de la complexité, et de dégager les conditions d'une fécondité du paradigme complexe pour l'action opérationnelle – en d'autres termes, donner à ces savoirs une « *intention d'actionnabilité* » [Avenier 2009]. En quoi l'approche par la complexité offre-t-elle au manageur technique des perspectives pour qu'il se forge des outils efficaces dans son action ? L'enjeu est important, et l'ambition de relever ici un tel défi serait démesurée. N'étant pas en mesure de placer nos petits pas dans les pas de ces géants qui nous ont précédés, c'est fièrement juchés sur leurs épaules que nous cheminerons dans des espaces plus conceptuels et plus philosophiques, en quête d'une méthode qui nous permettra de forger les outils dont le manageur technique a besoin.

À partir de *la Méthode* de Morin [2008] et de son « *écologie de l'action* », nous retiendrons trois principes des systèmes complexes : les principes dialogique, hologrammique et d'auto-éco-organisation. Au cours des **chapitres 10, 11 et 12**, qui constituent le cœur de la thèse, nous étudierons l'adéquation de ces principes à l'analyse des cas exposés, pour élaborer un modèle descriptif pertinent des situations vécues. Nous développerons un modèle transactionnel du manageur technique comme acteur d'interface, nous mettrons en évidence l'importance et l'opérationnalité du concept d'espace d'échanges entre acteurs et de leur dynamique, utile à l'équipement d'un processus englobant conception, intégration et réalisation.

0.4 Partie IV – *Agir et penser à la fois* : vers un hypercompas

À l'orée de cette ultime **partie IV**, le manageur technique s'est forgé quelques outils et éléments de méthodes actionnables, issus de la fécondation par la pensée complexe des questions de recherche sur le rôle du manageur technique et sur les processus de conception et d'intégration. La besace ainsi chargée, le manageur technique va retourner sur le terrain pour y éprouver sa méthode. Il va se mettre à *agir et penser à la fois* [9]. Nous en montrerons quelques premières mises en actes.

9. Autrement écrit, *Agir* ↔ *Penser*, pour reprendre la notation récursive retenue par Le Moigne [2010] ; ou encore *Ω (Agir, Penser)*, voire *Agir Ω Penser*, selon d'autres notations que j'aurai proposées au chapitre 10.

Ce retour au terrain s'effectue dans un nouveau cadre, lié au CERN sans y être totalement intégré. Le manageur technique plus expérimenté que je suis devenu en 2009 se voit confier la responsabilité de la coordination technique d'un nouveau projet, l'accélérateur hadronthérapique oncologique *Med*Austron, présenté au **chapitre 13**. Le périmètre de responsabilité dépasse celui de l'intégration proprement dite (au sens du cas d'ATLAS exposé aux chapitres 5 et 6), pour inclure le déploiement des outils de gestion de données techniques (tels que celui explicité au chapitre 8), ainsi d'ailleurs que la conception des supports (tels qu'au chapitre 7), et s'étend même jusqu'à la coordination de l'installation. C'est donc un cadre global idéal qui récapitulera les cas de notre étude initiale de cas multiples, et permettra de commencer à éprouver l'approche élaborée au cours de la partie III. Le manageur technique va déployer sa stratégie dans plusieurs directions, conformément au processus de conception, d'intégration et de réalisation.

Il s'agira d'abord de débloquer le travail des opérateurs de conception, les projeteurs, en travaillant sur l'équipement des données permettant leur gestion et leur approbation (**chapitre 14**). Le concept d'article (*item*) sera ainsi mis en avant comme l'élément fédérateur de la gestion de données techniques tout au long du cycle de vie du produit. Le manageur technique mobilisera ensuite les outils de modélisation de processus BPMN, et les enrichira au passage quand il s'agira de saisir les phases de conception synchrones comme dépassement du mythe rationnel [10] d'une démarche séquentielle linéaire : nous procéderons à la mise en œuvre, grâce aux espaces d'échanges, de zones d'autonomie coordonnées au sein d'un processus articulant phases globales séquentielles et phases locales synchrones.

Au **chapitre 15,** le manageur technique s'attellera à *intégrer l'intégration* au processus de conception. C'est la notion de squelette qui se fera le porteur, en tant qu'objet-frontière attaché à l'article, de cette approche réconciliant conception et intégration. Nous proposerons un processus de conception et d'intégration basé sur la double dynamique des flux de données et des flux de contexte.

Il manque encore à l'édifice un étage pour que la vision globale obtenue par l'approche centrée sur l'article aboutisse à un outil de pilotage global de projet. C'est en effet à l'articulation entre le PLM et l'ERP [11] que se situent des zones de frictions en termes d'échanges, de management et de suivi de la configuration. Seule une approche globale unifiée fondée sur le paradigme de la complexité permet de dépasser ces frictions. Une telle approche conférerait au manageur technique, acteur d'interface, la capacité de fonctionner selon chacune de ses interfaces. Elle favoriserait la mise en place d'une intégration globale des produits, des processus et des projets, ainsi que l'émergence d'une navigation dynamique de projet dans un espace généralisé Ω (*Conception, Intégration, Réalisation*). Nous esquisserons au **chapitre 16** un outil d'aide à ce pilotage : un *hypercompas*, que nous élaborerons en nous appuyant sur les travaux particulièrement stimulants de la "trialectique" de Gigand [2010].

0.5 Un itinéraire de lecture, une carte du territoire

Le présent chapitre constitue une mise en marche (un pré-ambule), ou une mise en route, c'est-à-dire, au sens étymologique, une initiation : "*in itis*". Notre jeune manageur technique avait trouvé le début de son chemin. Nous sommes ici à l'orée du mémoire de thèse ; et nous en évoquons déjà la fin, où le chercheur à la recherche de lui-même aura bouclé une "boucle étrange" que nous évoquerons dans le **chapitre 17** : ce qui donne une richesse au modèle proposé, c'est aussi qu'il fait du manageur technique un acteur conscient de lui-même, un observateur

10. « *Comment penser l'action collective ? Théorie des mythes rationnels* » [Hatchuel 1998].

11. ERP : *Enterprise Resource Planing*, logiciel de planification des ressources de l'entreprise.

conscient d'observer. Il s'agit de procéder à la « *réintroduction du sujet connaissant dans la connaissance* » [Morin 1996, 123b]. C'est ce que l'ensemble de la thèse se sera attaché à effectuer.

Le tout jeune ingénieur du prologue s'était désespéré dès sa première visite au CERN de l'absence de boussole. Afin d'éviter pareil tourment au lecteur de ce mémoire, je lui propose à la Figure 0.1 une carte de la thèse. Modeste instrument de navigation dynamique, elle jalonnera quelques parcours possibles de lecture. Poser d'emblée cette carte d'un territoire conceptuel en gestation, c'est aussi mettre le cartographe au défi d'écriture de ne pas s'y égarer, et le placer dans la situation de l'auteur oulipien d'un « *rat qui construit lui-même le labyrinthe dont il se propose de sortir* » [12]. Nous voici à l'entrée dudit labyrinthe.

Quelques mots sur l'élaboration de cette carte : elle s'inspire des constructions de type flocon de Koch [Von Koch 1906] ou château de Cantor [1884], en prenant pour élément initiateur la forme bien connue de la lettre grecque oméga, Ωμεγα. Je l'ai qualifiée de "fractale en oméga d'or", car le nombre d'or entre pour une grande part dans sa conception graphique et dans l'ajustement des proportions respectives des différents éléments géométriques. L'oméga lui-même est un symbole très riche. On pourrait évoquer l'oméga de l'expression "*l'alpha et l'oméga*", qui désigne la prise en compte globale de tous les tenants et aboutissants d'une situation donnée, le principe et la fin, avec une certaine connotation religieuse. Je me contenterai d'y voir le symbole ouvert d'une progression non linéaire s'autorisant des boucles. Entrant par l'un des pieds, l'on en sort par l'autre en ayant au préalable parcouru un cycle complet de bouclage. C'est une image de l'itinéraire que je propose : Pennac, dans le texte cité en épigraphe, suggère qu'il faut creuser pour trouver la clarté.

De manière fractale, ou selon le principe complexe *hologrammique* [13], le tout se retrouve dans chacune des parties. Il en va de même pour les quatre parties de la thèse, puis pour chacun des quatre chapitres constituant chaque partie [14]. Chaque élément, à tous les niveaux, reste ouvert sur chaque autre, l'annonce ou le récapitule, l'éclaire ou l'enrichit. La forme ouverte de l'oméga est celle qui offre une mise en regard de tout à tout. L'oméga offre une image, une modeste représentation iconique de ce que je nommerai boucle dialogique complexe [15]. L'espace d'ouverture entre les jambes de l'oméga est essentiel. C'est l'espace de bouclage(s), un espace d'échanges : il s'agit d'y favoriser les circulations « intratextuelles » [16].

La structure est fractale : à chaque échelle, l'élément initiateur (l'oméga) est répliqué. L'oméga global de la thèse est doté de quatre plus petits omégas en forme de parties (des sortes d'*o-mésos*), chacune étant équipée de ses propres omégas-chapitres (pas encore ramenés au stade d'*o-millis*). On pourrait s'amuser à poursuivre jusqu'à l'intérieur de chaque chapitre, mais c'eût été alourdir à l'excès la cartographie : point n'est besoin d'*omicrons*. À l'inverse en élargissant, cet oméga global de la thèse est lui-même constitutif d'un oméga encore plus grand – un « *o-giga* » – qui

12. Jacques Roubaud et Marcel Bénabou, in *Oulipo : pièces détachées*, Mille et Une Nuits, 2007, p. 8. L'*OuLiPo*, *Ou*vroir de *Li*ttérature *Po*tentielle, est un mouvement littéraire qui prône l'écriture sous contraintes.

13. Voir le chapitre 11, § 11.1 p. 307 sqq.

14. C'est Georges Perec qui aimait structurer ses écrits par des contraintes formelles extrêmement rigoureuses en termes de nombre de chapitres, de sous-chapitres, voire nombre de caractères. Cf. par exemple *Cahier des charges de "La vie, mode d'emploi"*, Paris, Zulma, 1995, ou sa description, dans une lettre datée du 7 août 1958 à Jean Lederer (Paris, Flammarion 1997, p. 337), de la structure d'un roman « *obéissant à un plan très strict avec 4 parties, 16 chapitres, 64 "sous-chapitres", 256 paragraphes* ». Je ne pousserai pas la contrainte aussi loin, ne serait-ce que parce que cette thèse n'est pas une œuvre littéraire ; et j'introduirai le nombre de sections nécessaires pour exposer au mieux les idées.

15. Elle sera introduite au chapitre 10, § 10.4 p. 297.

16. J'ose ce néologisme, en écho au concept d'intertextualité, outil critique utilisé pour les études littéraires [Kristeva 1969].

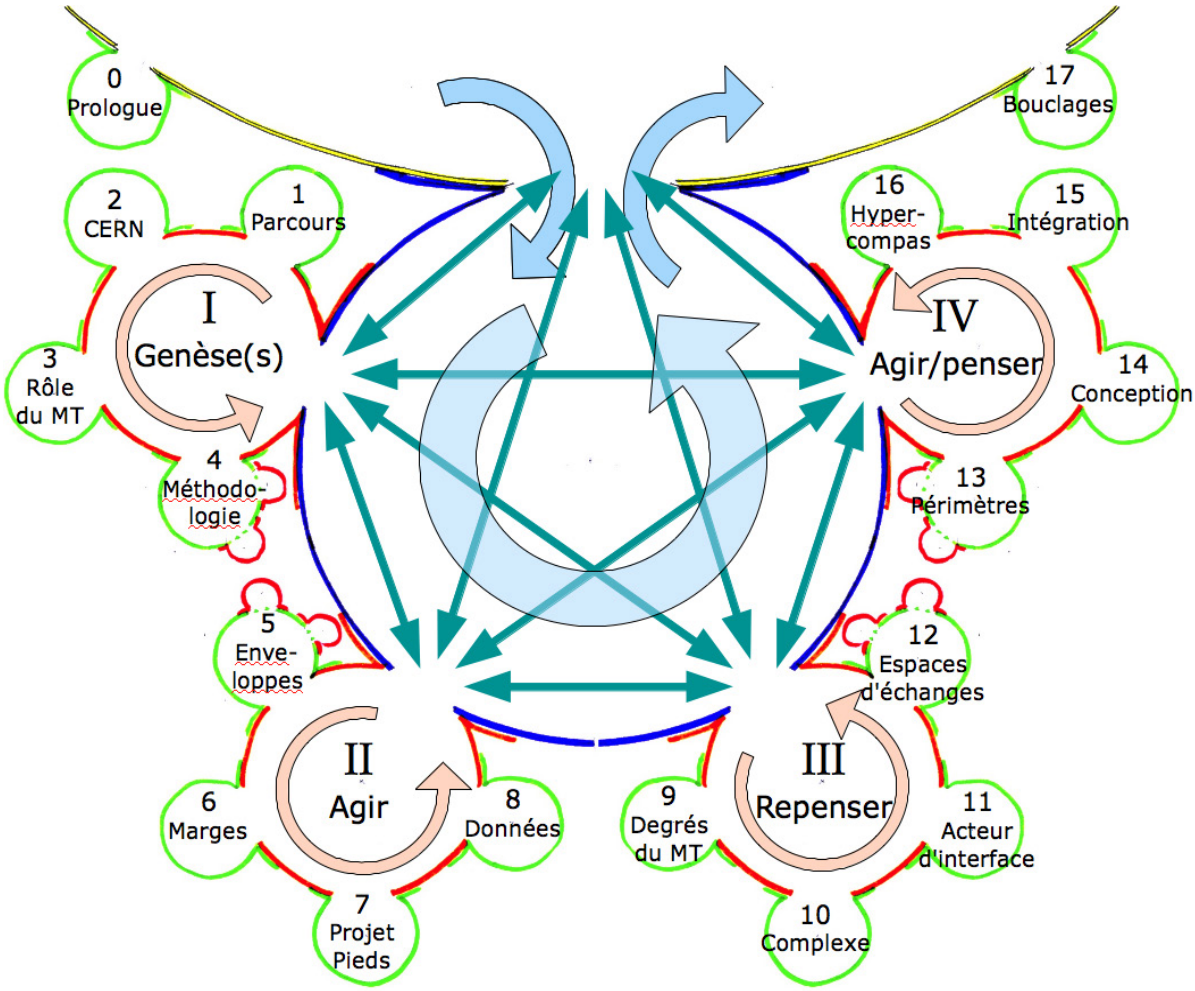


Figure 0.1: Carte de navigation dans la thèse « en oméga d'or », la *cartomegador*

figurerait la démarche de toute une communauté de recherche. Laquelle serait elle-même un élément d'un encore plus gros oméga (un « *o-téra* »…), celle de tous les chercheurs, de tous les cherchants ?

∴

Interrompons notre élan face à cette mise en abyme, avant que d'y sombrer. Et entreprenons de parcourir le(s) chemin(s) annoncé(s), en commençant par une question en écho à l'interpellation courante des années 1960 : « *D'où parles-tu, camarade ?* » (et puis aussi : pourquoi ?). Quels sont les éléments de genèse(s) de ce travail de thèse, et comment sera-t-il mené ?

C'est l'objet de notre première partie.

Premier clamot [*]. *Penser cathédrale*

Les pierres du chantier ne sont en vrac qu'en apparence, s'il est, perdu dans le chantier, un homme, serait-il seul, qui pense cathédrale. […] Quiconque porte dans le cœur une cathédrale à bâtir, est déjà vainqueur.

Antoine de Saint-Exupéry [17]

Ainsi me parlait mon père :

« *Force-les de bâtir ensemble une tour et tu les changeras en frères.* » […]

« *Erreur de l'un, réussite de l'autre, ne t'inquiète point de ces divisions. Il n'est de fertile que la grande collaboration de l'un à travers l'autre. Et le geste manqué sert le geste qui réussit. Et le geste qui réussit montre le but qu'ils poursuivaient ensemble à celui-là qui a manqué le sien. […] Mon empire est semblable à un temple et j'ai sollicité les hommes à le bâtir. Ainsi c'est leur temple. Et la naissance du temple tire d'eux-mêmes leur plus haute signification.* »

Antoine de Saint-Exupéry [18]

« *Ma cathédrale, qui est une, est issue de ce que celui-là qui est plein de scrupules sculpte un visage de remords, de ce que cet autre qui sait se réjouir se réjouit et sculpte un sourire. De ce que celui-là qui est résistant me résiste, de ce que celui-là qui est fidèle demeure fidèle. […] Quand vous entrerez dans mon temple vous serez saisi par son unité et la majesté de son silence, et quand vous y verrez côte à côte se prosterner le fidèle et le réfractaire, le sculpteur et le polisseur de colonnes, le savant et le simple, le joyeux et le triste, n'allez point me dire qu'ils sont exemples d'incohérence car ils sont un par la racine, et le temple, à travers eux, est devenu, ayant trouvé à travers eux toutes les voies qui lui furent nécessaires.* »

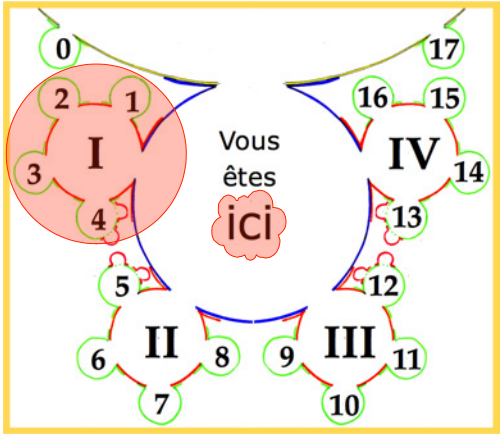
Antoine de Saint-Exupéry [19]

* Terme technique : outil ou pièce servant à la mise en place d'assemblages de charpente.

17. [1942]. *Pilote de guerre*, Pléiade, Gallimard, 1986, chap. XXIV, p. 365.

18. [1943]. *Citadelle*, Pléiade, Gallimard, 1986, IX, p. 541 et p. 543.

19. [1943]. *Citadelle*, Pléiade, Gallimard, 1986, LXXV, p. 687.



Partie I – Genèse(s)

Où l'on tisse la structure dynamique de la thèse

« – Le métier à tisser est un enseignement à lui tout seul. La chaîne montre qu'en ce monde toutes les choses sont reliées les unes aux autres. Si tu tends ou relâches l'un des fils, ton action se répercute sur tous les autres fils. La navette, elle, représente ton esprit et la motivation de tes actes. C'est elle qui crée la beauté ou la laideur de la trame de ton existence. Selon que ton esprit est bien ou mal intentionné, selon qu'il fait passer dans la chaîne de tes actes les fils de soie de l'altruisme ou le crin de l'égoïsme, il fera de ta vie une magnifique étoffe aux couleurs resplendissantes ou une toile rêche tout juste bonne à faire une camisole.

– Oui mais je ne suis pas seul au monde, les autres interviennent dans mon tissage, ils m'aident ou ils m'entravent.

– C'est à toi, le maître d'œuvre, d'intégrer dans ton travail leurs actions, leurs espoirs et leurs craintes, afin de fabriquer un tissu suffisamment grand pour tous les vêtir. »

Matthieu Ricard [20]



Figure I-1: Un métier à tisser en Russie

Source : journal « Ростов – большой город », mars 2011

20. *La Citadelle des Neiges*, NiL éditions, 2005, p. 37-38.

Sommaire de la Partie I

Chapitre 1. Les fils d'un parcours.....31
1.1 Le fil de la démarche : l'attrait pour la recherche-action.....33
1.2 Le fil de la thématique : la figure de l'interface.....35
1.3 Le fil du terrain : intégrer.....36
1.4 La présente thèse en gésine : le fil de la coopération.....38
1.5 Le projet de thèse, les fils conceptuels.....39

Chapitre 2. Le CERN, une trame 41
2.1 Deux ou trois infinis.....44
2.2 Le CERN, un système complexe.....45
2.3 Complexité géopolitique : un laboratoire international.....48
2.4 Complexité scientifique : théories, expériences et instruments.....50
2.5 Complexité technologique : la science lourde.....54
2.6 Complexité organisationnelle : gérer de grands projets scientifiques.....64

Chapitre 3. Quel rôle pour le manageur technique ?.....77
3.1 Une étude de cas : le rôle du Bureau technique.....79
3.2 Premiers enseignements.....87
3.3 Caractéristiques de la complexité perçue.....91
3.4 Trois questions de recherche entrelacées.....92
3.5 Une triple réponse 96

Chapitre 4. La méthode.....99
4.1 Une recherche-action immergée.....102
4.2 Étude de cas multiples.....106
4.3 La Design Research Methodology.....109
4.4 Quelques cas sur la ligne du temps.....111

Deuxième clamot. Trois tailleurs de pierre.....115

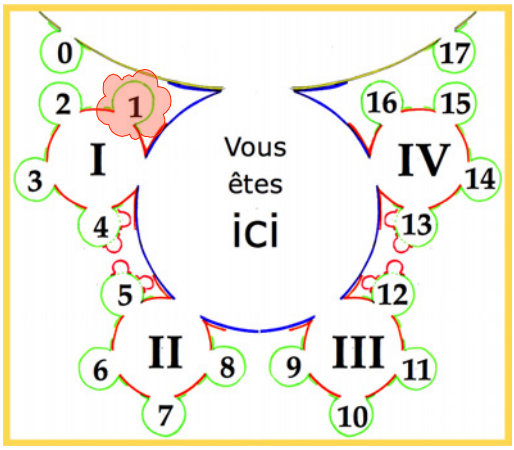
A l'image du très beau texte de Matthieu Ricard placé en épigraphe, je conçois le travail de recherche comme un écheveau de liens, de fils divers qui s'entrelacent vers l'infini de l'œuvre collective et jamais terminée. Un seul fil ne mène nulle part, il a besoin d'être filé, tressé, guidé et mélangé à d'autres, jusqu'à s'assembler avec d'autres fils d'autres matières. La richesse et la valeur de la toile ainsi tissée sera supérieure à la somme de tous ses composants, ces simples fils bien ténus tant qu'ils restent isolés.

Partant de ce présupposé, qui sonne déjà comme le début d'un plaidoyer pour la transdisciplinarité, cette première partie introductive exploitera cette métaphore inspirée du tissage : le métier à tisser, la navette, la toile et l'ardeur à la tâche sont autant d'éléments qui expriment métaphoriquement des gestes et des phrases adaptés au travail déployé au cours et autour de la thèse. Edgar Morin a également filé cette métaphore à plusieurs reprises, que ce soit dans la *Méthode* [2008], dans son *Introduction à la pensée complexe* [2005, 21] ou dans *Science avec conscience* [1990, 175].

Explicitons l'analogie. Le métier à tisser est le cadre offert aux activités de recherche. Les fils de chaîne, ce sont les différentes motivations, idées, théories de celui qui s'attelle à un travail de recherche ; la trame, c'est le contexte dans lequel se déploie le travail, autrement appelé "le terrain" par les ethnologues et sociologues ; le tissu est le résultat du croisement de ces deux écheveaux ; quant à la navette, ce petit fuseau de bois, c'est la méthode qui permet d'élaborer ce tissu, de réunir tous ces fils pour former le motif, pour achever l'ouvrage. La question de recherche est alors en quelque sorte le nœud dans le tissu, qu'il s'agit d'exprimer au sens propre du terme : du latin *exprimere*, "faire sortir en pressant".

Cette partie introductive est constituée d'autant de chapitres que le métier de tisserand comporte d'éléments. Nous tirerons au chapitre 1 les fils de chaîne de mon propre parcours de recherche(s), chapitre que l'on pourra aisément ignorer en première lecture. Nous exposerons ensuite au chapitre 2 la trame dans lequel se glissent lesdits fils, celle du CERN. Nous exhiberons alors, dans le tissu qui s'ébauche au chapitre 3, le nœud de la première question de recherche : le rôle du manageur technique comme acteur (complexe) d'interfaces (complexes), laquelle question donnera naissance à deux autres, intimement liées. Nous terminerons au chapitre 4 en élaborant la navette, autrement dit la méthode utilisée pour aplanir ledit nœud, ou pour mieux dire, pour en préserver la nature sans pour autant qu'il constitue un obstacle au chercheur-tisserand [21].

21. L'analogie vaut ce qu'elle vaut, et je n'en méconnais pas les vertiges [Bouveresse 1999].



Chapitre 1. Les fils d'un parcours

Où l'on expose quelques éléments biographiques explicitant le contexte d'émergence de la thèse

L'univers ressemble à un cerveau, pas à une machine. La vie est une histoire en train de se raconter. La toute première réalité, c'est cette histoire. Voilà ce que m'a appris le métier de mécanicien.

John Berger [22]

22. *De A à X*, trad. K. Berger Andreadakis, Éditions de l'Olivier, 2009, p. 15.

Mon métier, au départ, c'est mécanicien. Et comme le souligne John Berger en épigraphe de ce premier chapitre, il m'a appris que la toute première réalité, c'est l'histoire de la vie. Je vais donc en évoquer quelques éléments.

« *Raconter ta vie dans ta thèse ? Cela va exiger du travail fin – et parfois acrobatique. Je crains que le passage par le "je" n'induise trop le genre du récit, voire du simple témoignage, donc rende douteuse aux yeux de certains sa valeur scientifique.* » [23] D'emblée dans ce premier chapitre introductif, je souhaite affronter cet avertissement si pertinent. À celui qui voudrait répliquer sur l'objectivité nécessaire de l'observateur scientifique, je rappellerai avec Thoreau : « *Nous oublions ordinairement qu'en somme, c'est toujours la première personne qui parle.* » [24] Mon propos étant d'établir les conditions dans lesquelles le manageur technique peut se saisir de la complexité, il est essentiel d'en intégrer immédiatement l'une des dimensions principales : il doit être un observateur incluant l'observateur dans son champ d'observation, un observateur conscient d'observer ; il se co-construit avec son environnement.

Je souhaite ici retracer les fils tendus qui concernent ma vie professionnelle et mon évolution intellectuelle. J'en tirerai trois : celui de la thématique, celui de la démarche, et celui du terrain. Ils donneront le contexte préalable et sous-jacent à ma démarche de thèse. En tirant ces fils, en sortant de leur boîte tous les projets de thèse que j'ai un à un élaborés, puis abandonnés – jusqu'à celui-ci qui enfin aboutit –, je traverserai plusieurs disciplines, depuis la mécanique et l'acoustique jusqu'au management et à la sociologie des organisations, en passant par le génie industriel bien entendu, et aussi l'histoire des sciences, le tolérancement géométrique, la philosophie et la physique des particules. Car la vie (la mienne, en tous cas) est ainsi faite qu'elle se présente comme un continuum qui, allègrement, franchit les frontières entre disciplines.

Reprenons ces trois fils un à un, celui de la démarche, celui de la thématique, celui du terrain. Ces trois fils tressés engendrent la thèse.

1.1 Le fil de la démarche : l'attrait pour la recherche-action

Il est de ces couples de concepts que le sens commun ne sait qu'opposer. Abstrait et concret, théorie et pratique, action et pensée, intellectuel et manuel, analytique et synthétique. Je n'avais pas dix ans que je m'agaçais déjà que l'on me cataloguât "abstrait" quand j'adorais aussi courir après les moutons. J'ai chevillé au corps ce désir de dépasser l'antinomie des contraires. Il en fut naturellement de même quand il s'est agi de construire un parcours professionnel après l'agrégation. Recherche ? Oui mais, et le plaisir de l'opérationnel ? Ingénieur ? Oui mais, et le temps de réfléchir ? Comment concilier les deux, dépasser la contradiction apparente, réduire le chiasme comme on réduit une fracture inacceptable ? Comment garder un pied dans la recherche tout en travaillant comme ingénieur ? Par exemple, en faisant de la recherche-action.

C'est le fait de ne pas parvenir à concilier désir de recherche et appel de l'opérationnel qui fit capoter mon tout premier projet de thèse. C'était en 1991, je terminais les cours de mon DEA d'acoustique appliquée [25], et j'accomplissais un stage dans le domaine de l'acoustique des salles. Devant le flou des mesures expérimentales en la matière, et l'effet pour le moins écrasant de la fonction logarithme sur

23. Xavier, courriel à Bertrand, 7 février 2011.

24. Henry David Thoreau, *Walden ou la vie des bois*, trad. Louis Fabulet, 1854, p. 4.

25. Suivi avec beaucoup d'intérêt en 1990/1991 à l'Université du Maine sous la direction du Pr Bruneau.

les erreurs commises, je renonçais vite à mon idée d'appliquer la technique des "éléments frontières" (*boundary elements*) aux calculs à basse fréquence. Je conservais toutefois de mon passage dans l'acoustique, outre la trace de ma toute première publication [Martin et al. 1991], le concept d'adaptation d'impédance, et peut-être une première exposition au thème de la frontière…

Le goût et l'envie de faire une thèse ne m'avaient pourtant pas quittés. Entré au CERN en 1992, j'attendis mon tour pour trouver matière, dans mon travail de boursier, puis d'ingénieur, à élaborer un projet de recherche. C'est en 1998 que l'occasion se présenta, quand il fut question de théoriser un peu plus les concepts d'enveloppe et d'analyse système que j'avais introduits en 1996 sur le détecteur ATLAS. Cette approche fondée sur le torseur du petit déplacement [Clément et Bourdet 1988] était l'occasion de faire de la recherche appliquée : j'arrivais avec un problème bien réel, et avec des pistes de solutions nécessitant une approche globale du tolérancement. Et le projet *Geocom* (Géométrie communicante) était sur le point d'être lancé à Cachan, avec des partenaires industriels comme Peugeot et Renault. Ce fut pour moi l'occasion de participer à un premier projet de recherche en partenariat avec l'industrie, en tant que partenaire « industriel » !

En parallèle, Pierre Bourdet et moi avions discuté dès l'été 1997 pour déterminer s'il y aurait matière à ce que je sois également l'un des prestataires universitaires du projet, en prenant en charge, en tant que thésard cette fois, le développement de certaines idées qui lui tenaient à cœur autour du tolérancement 3D [Legoff, Villeneuve et Bourdet 1999], et qui rejoignaient mes préoccupations d'alors : mon concept d'enveloppe comme « *état virtuel généralisé au sens du maximum de matière* » s'y intégrait assez bien [26]. Et il était même envisagé d'aborder la question sous un angle sociologique [27]. Cependant, faire cohabiter en une même personne tant de prescriptions disparates était trop ambitieux. Ma capacité de synthèse, ne serait-ce qu'en termes de temps de travail, n'y suffisait pas. En outre, l'analyse système d'ATLAS s'achevait en 1999, et je cessais début 2001 mon travail d'intégration géométrique. La motivation opérationnelle disparaissait donc, et avec elle s'éteignait à la fois et l'intérêt que le CERN en tant qu'organisation pouvait encore lui porter, et la perspective que l'on m'accordât du temps pour en approfondir l'élaboration.

Un troisième exemple de rapprochement entre activités de terrain et de recherche peut sembler au premier abord moins immédiat. En 1997, j'entrepris la traduction de *How Experiments End* de Peter Galison [1987]. Ce livre passionnant, à la croisée de l'histoire et de la sociologie des sciences d'une part, et du traité de physique d'autre part, est truffé de références aux sciences et aux techniques : on y trouve par exemple une description de la mise en place de techniques de gestion de projet pour la conception et la construction du détecteur Gargamelle dès la fin des années 1960 au CEA [28]. En traduisant l'ouvrage, je découvris avec intérêt les efforts de mes homologues de cette époque pour instiller un peu d'organisation industrielle dans le contexte d'innovation scientifique.

Ce travail de traduction, *a priori* découplé de mon activité quotidienne d'ingénieur, se nourrissait en fait de ce quotidien qui constitue le sujet du livre, tout en l'éclairant en retour de ces expériences antérieures. Il me permit d'obtenir mon deuxième DEA [29], et m'offrit l'occasion de présenter mes travaux à Harvard [30].

26. Voir le chapitre 5, § 5.4.1 p. 131 sqq.

27. B. Nicquevert, « *Avant-projet de thèse(s) sur les enveloppes* », 23.09.1998, révisé le 10.05.1999.

28. Commissariat à l'Énergie Atomique. Voir chapitre 4, p. 148-150, de l'édition française [Galison 2002].

29. B. Nicquevert, « "Ainsi s'achèvent les expériences" *de Peter Galison. Essai introductif à la traduction de* "How Experiments End" », mémoire de DEA de Philosophie, Université de Bourgogne, novembre 1999, sous la direction du Pr Jean Gayon. Le jury était constitué du Pr Peter Galison, du Pr Dominique Pestre, historien des sciences et contributeur à *Histoire du CERN* [Hermann et al. 1987, 1990] et du Dr Étienne Klein, physicien et philosophe des sciences au CEA.

La traduction a paru aux éditions de la Découverte début 2002, sous le titre *Ainsi s'achèvent les expériences* [Galison 2002]. Elle est précédée d'un « *Avant-propos du traducteur* » qui, pour la petite histoire, me donna en septembre 2002 l'occasion d'un autre projet de thèse : dans le cadre d'une thèse de linguistique avec John Humbley à Paris VII, et sur le thème du vocabulaire spécifique de la physique et des *sciences studies*, il se serait agi de traduire *Image & Logic* [Galison 1997], le second, volumineux et précieux ouvrage de Peter Galison. Ce projet fut vite abandonné, non sans qu'il en restât quelque chose : c'est en effet dans *Image & Logic* que se trouve développé le concept de *trading zone*, dont il sera question à la partie III.

Terminons-en par deux anecdotes illustrant la porosité de mon parcours entre CERN et recherche universitaire. Lors d'une intervention effectuée en école d'ingénieur en 2003, je suis arrivé en cours de management de projet avec les chaussures de sécurité et le bleu de travail : nous avions le matin même réceptionné les pieds d'ATLAS dont il sera question au chapitre 7, et je n'avais pas eu le temps de me changer… Et puis, en plein congrès de l'EGOS à Berlin, entre deux sessions de la conférence [31], je m'abstrayais pour m'emparer d'un de ces rares ordinateurs mis à la disposition des participants et pouvoir établir à distance, puis communiquer mon plan du lendemain de la logistique pour les cryodipôles du LHC. Superposition de tâches de nature, de temporalité et de profondeur bien différentes.

Cette section [32] aura illustré le continuel échange, la perpétuelle circulation entre mon travail d'ingénieur et de manageur technique, et mon activité parallèle de chercheur. Et ce quels que soient les domaines abordés, dont la variété est tout simplement à l'image de la complexité du réel qu'il s'agit de saisir.

1.2 Le fil de la thématique : la figure de l'interface

Après avoir déroulé le fil de la démarche, nous trouvons dans la pelote celui de la thématique. J'ai intitulé ce fil “figure de l'interface” pour souligner combien le plus important à mes yeux est de relier. Certains sont plus à l'aise pour créer, pour approfondir un domaine, pour enrichir le savoir d'une discipline : ceux-là creusent plus profond un sillon plus étroit. Je suis de ceux qui préfèrent ratisser large, créer du lien, relier, rassembler ce qui est épars. Être l'intermédiaire – voire le médiateur ; être à l'interface. C'est ainsi que je considère le rôle du manageur technique.

Cette thématique de lien et d'interface a été la première fois abordée dans le cadre de travaux consacrés à la simulation numérique [33]. Il s'agissait de réfléchir au statut ontologique du modèle numérique, comme « *une nouvelle couche de représentation* », intermédiaire entre la théorie et l'objet réel de l'expérience. Il y est question des interfaces entre les théoriciens élaborateurs de théories, et les expérimentateurs désireux de les éprouver [Merz 1999]. Je soulignai alors que les uns et les autres exploitent les modèles numériques de manière épistémologiquement très distinctes, mais qu'elles leur offrent la possibilité de parler ensemble sur un objet commun. Je n'étais pas loin du concept d'objet intermédiaire, que j'ignorais encore.

Ces travaux sur la simulation numérique ont en fait une histoire qui compte, car c'est bien le fil de cette thématique-là qui mène non seulement au sujet de la présente thèse, mais également à son cadre. Au printemps 1992, je prenais contact avec

30. B. Nicquevert, « *Constraints in original* How Experiments End, *constraints on French* Ainsi s'achèvent les expériences », séminaire de la faculté d'histoire des sciences de la *Harvard University*, 7 octobre 1999.

31. J'y présentai la communication S. Yami, B. Nicquevert and M. Nordberg, “ *Agglomerate collective strategy and co-evolutionary dynamics in the research field: the case of the ATLAS Collaboration at CERN* ”, 21st EGOS Colloquium, Berlin, 30 juin-2 juillet 2005.

32. Le cadre méthodologique de cette recherche-action immergée sera approfondi au § 4.1 p. 102.

33. B. Nicquevert, « *La simulation numérique, un nouvel outil d'investigation entre l'expérience et la théorie. Application à la physique des particules* », mémoire de maîtrise de philosophie, Université de Bourgogne, sous la direction du Pr Gayon, novembre 1994.

le Pr Serge Tichkiewitch pour envisager une thèse dans son laboratoire grenoblois 3S – Sols solides structures. C'était à une époque où se lançait tout juste un certain réseau Primeca, et où une toute nouvelle équipe de recherche de 3S se constituait sous l'étiquette « Conception intégrée ». Nous nous mettons d'accord sur une thématique, dont le titre était « *Simulation numérique et conception intégrée. De nouveaux outils d'investigation, pour une nouvelle démarche de conception des systèmes mécaniques* » [34]. Mon idée était de rapprocher les réflexions sur la conception intégrée avec les travaux sur la réalité virtuelle, qui étaient alors émergents [Quéau 1986 ; Burdea et Coiffet 1993 ; Quéau 1993 ; Lévy 1995] et les interrogations qu'ils allaient ultérieurement susciter [Boutot 1993 ; Zimmer 1994 ; Granger 1995 ; Cohen-Tannoudji 1995]. Serge Tichkiewitch était alors en passe de nouer des contacts avec un laboratoire de sociologie qui travaillait sur des questions connexes : CRISTO [35]. C'est ainsi que je rencontrais Alain Jeantet, qui acceptait de me co-encadrer sur un sujet résolument transdisciplinaire. Ma thèse serait l'occasion d'ancrer concrètement la collaboration entre les deux équipes [36].

La proposition simultanée et concurrente du CERN d'un poste de boursier m'a conduit à devoir, avec bien des regrets, renoncer à cette collaboration. Les regrets étaient réels, à l'égard aussi bien de la thématique que des partenaires. J'ai apaisé ces regrets en reprenant une partie de la thématique dans le mémoire sur la simulation numérique évoqué plus haut, qui s'appuie essentiellement sur la physique des particules dans lequel je me trouvais immergé. Quant au projet avec Serge Tischkiewitz, ce n'est qu'au printemps 1997 qu'il se concrétisera avec la collaboration entre le CERN, 3S et CRISTO autour de la thèse de Pascal Lécaille.

Cette thématique du médiateur, cette figure de l'interface est un fil assez solide pour tenir bon depuis vingt ans. Cela tient sans nul doute à la capacité heuristique du concept d'objet intermédiaire introduit en 1995 [Vinck et Jeantet 1995 ; Jeantet 1998 ; Vinck 1999a], et qui a éclairé dès 1996 la mise en place de la gestion des données techniques ainsi que la circulation et la validation des informations de conception au sein de l'expérience ATLAS. Vu ensuite comme un cadre de coopération [Boujut 2001], et enrichi de l'approche par l'acteur d'interface, on verra que ce fil apporte à la thèse quelques solides éléments.

1.3 Le fil du terrain : intégrer

En mai 1997, les contacts se renouent donc entre Genève et Grenoble, entre le CERN et 3S, en y intégrant CRISTO. C'est que, sur le terrain, au CERN, et au sein d'ATLAS en particulier, l'activité de conception dépasse largement le cadre traditionnel de la conception d'équipements, et s'étend à celle d'intégration. Les équipements ne sont pas seulement conçus pour eux-mêmes, mais dans la dynamique systémique qui les inclut dans un ensemble global complexe qu'ils définissent et qui les définissent. Il s'agit d'en réaliser l'intégration, géométrique et mécanique, et d'en établir la validation. Or, s'agissant en particulier de validation, l'on se rend compte bien vite de la velléité d'un processus déterministe. « *Concurrent design happens at interfaces* » [37]. C'est là que l'approche socio-technique va venir éclairer le terrain d'un jour plus subtil.

34. Projet de thèse 3S, 12 juin 1992.

35. CRISTO - Centre de recherche sur l'innovation socio-technique et les organisations industrielles – était une unité de recherche de l'Université Pierre Mendès France (Université des Sciences sociales de Grenoble), associée au CNRS depuis janvier 1992. Il fut une UMR autonome du CNRS jusqu'au 31 décembre 2006.

36. C'est ainsi que j'ai failli devenir le *premier* thésard de 3S/CRISTO. Et c'est ainsi que j'en suis en quelque sorte le *dernier*, maintenant que CRISTO est dissous dans le PACTE, et 3S dans G-SCOP.

37. Selon le titre de l'article éponyme [Finger, Konda et Subrahmanian 1995].

En fait de rencontre, celle entre Pascal Lécaille et moi fut déterminante. Pascal s'apprêtait à démarrer sa thèse [Lécaille 2003] sur le thème initial de « *l'analyse socio-technique et ethnographique des outils et des usages de la simulation numérique dans les processus de recherche et dans la conception industrielle* » [38]. Quant à moi, à la tête du bureau d'études du département de physique expérimentale, en charge de l'intégration mécanique au sein de la Coordination technique d'ATLAS, je ne savais pas très bien regarder "socio-techniquement" aux bons endroits pour savoir ce qui se passait en termes organisationnels, et ce qu'il convenait de mettre en place pour assurer la réussite des projets qui m'étaient confiés. La proposition que Pascal apporte son regard ethnographique [39] arrivait donc particulièrement à point. Le stage de projet de fin d'études et de DEA de Grégoire Pépiot a servi de catalyseur à la venue de Pascal sur le terrain du CERN. Le montage même de ce DEA est assez représentatif de notre approche collective, tant au niveau de la démarche de recherche-action que de la thématique et du terrain : projet de fin d'études d'ingénieur sur un sujet de conception – un disque de blindage – servant de terrain à une étude sur les pratiques de conception dans le cadre d'un DEA de génie industriel.

> *Le travail proposé est une étude à caractère ethnographique, sur les pratiques de conception. Plus précisément, on s'intéressera aux négociations et aux jeux d'acteurs autour de l'allocation des différentes zones du détecteurs. Comment ce jeu de contraintes évolue-t-il ? Quelles forces sont en présence ? Qui décide ? […] Comment se gèrent les flux d'information et de données techniques ? Comment s'introduisent, parfois inconsciemment, des techniques d'ingénierie de la concourance [40] ? Pratiquement, on propose une immersion dans un bureau d'étude et un travail aux côtés d'un responsable du projet, ingénieur mécanicien.* [41]

Une synthèse des travaux issus de cette étude de terrain a été publié dans *Ingénieurs au quotidien* [42]. La conception et l'intégration du disque de blindage nécessitent des simulations (d'encombrement et de déplacement) qui intriguent Pascal. Grégoire repère des questions qui dépassent l'acception habituelle que l'on se fait de la conception, et comprend la nécessité de mieux appréhender les interfaces et les frontières, ainsi que la gestion des données techniques : « *Le ton a monté de temps en temps, surtout lorsque BN a reproché à ZOL 2 plans ayant le même numéro pour des contenus différents. Les standards et la codification de tout document semblent être pris à la légère par certains des acteurs de la conception.* » [43] Pascal note alors : « *Bertrand souhaite inclure la question de la Gestion des Données Techniques dans le travail, ce que je ne refuse pas puisque cela semble une dimension non négligeable à propos des données issues de la simulation.* » [44] Il fit si bien que cette thématique deviendra centrale

38. Projet de thèse de doctorat en génie industriel, option sociologie et économie, sous la direction de Dominique Vinck. Projet déposé le 11 juillet 1997. Thèse soutenue le 5 novembre 2003 [Lécaille 2003].

39. L'ethnographie est une branche de l'ethnologie qui se donne pour objet l'observation et la restitution de ces observations. C'est en quelque sorte l'activité pourvoyeuse en documents et en données expérimentales sur lesquels se basent les travaux comparatifs et analytiques ultérieurs. Voir le chapitre 4 p. 99.

40. Concourance : caractéristique de ce qui concourt, qui converge. On dit ainsi de deux droites qu'elles concourent en un point. L'*ingénierie concourante* [Bossard, Chanchevrier et Leclair 1997 ; Charue-Duboc et Midler 2002] est cette approche de l'ingénierie qui suscite la parallélisation des tâches auparavant strictement séquentielles dans le processus de conception d'un produit (voir le début du chapitre 7 p. 177). Elle ne doit pas être confondue avec une prétendue "ingénierie de la concurrence", confusion entretenue par la désignation anglaise : *concurrent engineering*. La traduction du français *concurrence* est *competition*.

41. Sujet de DEA, J.-F. Boujut et B. Nicquevert, 27 avril 1997.

42. Chapitre 1, « *La complexité socio-technique. Le cas de la re-conception d'une paroi de blindage* » [Vinck, Pépiot et al. 1999, 2003].

43. G. Pépiot, *Rapport [interne] d'activités 2.0*, 01 avril 1998.

44. P. Lécaille, notes de terrain, 23 avril 1998.

dans sa thèse. Dès le mois de novembre 1998, la réflexion se concrétise d'ailleurs par une contribution à trois voix à un colloque Primeca. [45]

1.4 La présente thèse en gésine : le fil de la coopération

Ce chapitre est le premier de la première partie de la thèse. Il est donc prématuré de plonger dans une discussion approfondie. Il est toutefois intéressant de constater que dès 1998, les fils tissés offrent déjà l'essentiel des ingrédients de la présente thèse : la problématique de l'intégration, la figure de l'interface et de la frontière, la dynamique de la concourance [46], la question de la gestion des données techniques, l'évolution vers une approche système, et même le rôle du manageur technique. Ma thèse était en gésine, et nous en entrevoyions déjà certaines perspectives globales [47]. Quant à la démarche de porosité entre terrain et recherche, le double exemple de Pépiot et de Lécaille l'illustre bien, et dans les deux sens.

Dans le cas du DEA de Grégoire Pépiot, nous avons affaire à un jeune ingénieur, dont le parcours initiatique sert de fil conducteur à notre contribution à *Ingénieurs au quotidien* [Vinck, Pépiot et al. 1999]. L'un des faits intéressants à relever, dans la démarche de jeune chercheur qui fut la sienne, est sa difficulté à expliquer et argumenter son hypothèse sur la logique de coordination par le compromis. Or, pour expliquer et argumenter, il faut avoir des éléments ; et dans un tel contexte, l'élaboration de solutions prend une autre dimension, stratégique cette fois. J'avais alors pris l'initiative de relancer la conception de l'un des éléments voisins de l'objet qu'il avait à concevoir, bien que je ne sois pas directement responsable du développement de cet élément ! En tant que responsable de l'intégration de cette région du détecteur (en l'occurrence, la *"small wheel"*), j'avais besoin de connaître cet élément pour pouvoir négocier avec d'autres acteurs et en fixer les interfaces. Et en tant que chercheur, je cherchais un terrain favorable pour étudier avec Grégoire et Pascal ces dynamiques de coordination par le compromis. Faire exister l'objet pour donner prise et permettre à d'autres acteurs de s'en saisir et réagir sur la conception nous a ainsi permis d'atteindre ce double objectif. C'est là une dimension stratégique et délicate de la recherche-action immergée, l'adaptation du terrain aux besoins de l'observateur.

Dans le cas de l'immersion de Pascal Lécaille, c'est l'inverse : on plonge le sociologue-ethnographe dans le terrain, et on lui propose d'effectuer des tâches pour lesquelles il n'est pas formé, afin qu'il vive de l'intérieur les contraintes auxquelles sont soumis les acteurs du terrain dont il partage le travail. En retour, avec des interrogations qui ne sont pas réduites à celles des acteurs du terrain, il jette la lumière sur leur façon de fonctionner et propose des pistes pour réduire leurs dysfonctionnements éventuels. En ce qui me concerne, le jeu du miroir a pris des proportions considérables. Je lui renvoyais mon avis sur les pistes proposées, mais également sur ses questionnements de recherche, et j'ai partagé avec lui les affres du chercheur en quête de son objet ; un objet dans lequel il est tellement immergé qu'il craint parfois de s'y diluer.

Achevons ce premier chapitre introductif en évoquant brièvement l'histoire ultérieure de cette collaboration entre 3S, CRISTO et le CERN, ou plutôt (car ce sont les

45. Nicquevert Bertrand, Petit Stephan et Lécaille Pascal, "*Un système de gestion de dessins sur le projet scientifique ATLAS: motivation, implantation, exploitation*", séminaire Primeca « Systèmes de Gestion de Données Techniques - Offres, expérience et choix », Grenoble, octobre 1998.

46. B. Nicquevert, « *Ressources, contraintes et difficultés dans les pratiques de conception d'un grand projet scientifique. Témoignage et réflexions sur l'ingénierie distribuée et la co-conception* », in [Cartonnet, Lebeaume et Vérillon 2002].

47. « *Les SGDT sont (ou seront très bientôt) des outils incontournables, et je prédis des révolutions au niveau de celles que l'on a connues pour la CAO, mais à une autre échelle, car là, c'est toute l'entreprise qui est touchée. Une sorte de mixte entre la GPAO et la CAO.* » J.-F. Boujut, courriel à B. Nicquevert, 29 septembre 1997.

hommes qui collaborent, pas les organisations) entre Jean-François (Boujut), Dominique (Vinck), Pascal (Lécaille) et Bertrand, et ce jusqu'à la présente thèse incluse. Mon projet de thèse connut un deuxième avatar sérieux (après la tentative de 1992 sur la simulation numérique) : dès le mois de mars 1999 est évoquée l'éventualité d'une thèse orientée « *sciences sociales de la conception* » qui serait le complément d'une autre thèse de mécanique avec Pierre Bourdet à Cachan. La réflexion sur le projet, concomitante à la traduction d'*Ainsi s'achèvent les expériences*, aboutit à une proposition dont le terrain est essentiellement celui des enveloppes d'ATLAS, et dont la question de recherche porte sur la question de la contrainte. L'idée de la double thèse ayant été entre-temps abandonnée, son sujet n'étant plus d'actualité (voir § 1.1), la thèse s'engage officiellement en septembre 2000, dans un tissu serré d'activités un peu trop intenses [48]. En décembre, c'est l'implosion de mon fragile équilibre, professionnel et familial, bien trop malmené ; la thèse est abandonnée.

Suivons un tout dernier fil, celui des concepts tournant autour de la question de la coopération et de la coordination, qui émergent dans les années qui s'écoulent entre la mise en sommeil de la thèse fin 2000 et sa résurgence en octobre 2007. Ce sont autant de strates qui s'accumulent pour nous amener à notre propos. Le concept d'*objet intermédiaire*, emblématique du travail commun entre 3S et CRISTO, en constituera assurément une pierre de touche.

• Dès 1999 et l'essai introductif à *Ainsi s'achèvent les expériences* [Nicquevert 1999], le concept de *trading zone* développé par Galison dans *Image & Logic* [1997] s'impose comme un concept clé, et j'envisage de considérer le travail sur les enveloppes comme une application au génie industriel de ce concept : « *Ces documents serviront alors d'objets intermédiaires entre ces deux acteurs de la conception, afin de laisser place à la tractation : ce sont des véritables zones d'échange, les* trading zones *introduites par Peter Galison, entre les différents acteurs métiers et projet.* » [49] On y verra volontiers cet espace d'échanges (selon ma traduction) comme un cadre de coopération.

• En juin 2001, Jean-François Boujut synthétise ses travaux sur les cadres et les entités de coopération [Boujut 2001]. La thèse que je défends aujourd'hui en fournit, dix ans après, une forme d'opérationnalisation.

• En novembre 2003, c'est au tour de Pascal Lécaille de soutenir sa thèse sur la "trace habilitée" [Lécaille 2003], qui développe entre autres un concept nouveau, celui d'espace de conception. Par la suite, le concept sera repris et enrichi [Blanco, Grebici et Rieu 2007] dans le cadre de travaux sur la maturité de l'information dans les contextes de conception collaborative. Par effet boomerang, en bouclant une autre boucle, nous reprendrons dans le cadre de la thèse le fil de ce concept, élaboré à l'origine au cours du séjour de Pascal au CERN. Ce concept servira à son tour à la mise en place opérationnelle de la gestion des données techniques exposée au chapitre 14. Car si les outils sont des instruments pour l'action, alors il faut mettre ces outils en action pour en faire des instruments. Ainsi sera constituée la boucle globale agir ↔ penser (partie IV).

1.5 Le projet de thèse, les fils conceptuels

Pendant ces années de réflexion active sur la question, il m'était apparu que tous les fils se nouent autour du rôle du manageur technique dans la mise en place des outils pour la coordination et la coopération. Et si l'on évoque le terme de *mana-*

48. Qu'on en juge : « *Je lance officiellement le bateau [i. e. la thèse] le 18 [octobre]. En attendant, je serai allé à Moscou (demain) [pour le financement des pieds d'ATLAS], à Seattle (la semaine prochaine) [pour l'intégration de la* Small Wheel*] et à Minsk (début octobre) [pour la fabrication des semelles], et j'aurai fêté avec tout un tas de bonnes gens la fin du LEP [cérémonie officielle]... Ouf !* » B. Nicquevert à P. Lécaille, 10 septembre 2000.

49. B. Nicquevert, « *Ressources, contraintes et difficultés dans les pratiques de conception d'un grand projet scientifique.* », op. cit., p. 5.

geur, c'est que celui de *projet* n'est pas loin : il ne sert pas seulement à définir un vague contexte, il est lui aussi acteur des processus en jeu. Il convient donc selon moi de le convoquer de manière beaucoup plus concrète dans les études sur la conception collaborative. C'est pourquoi, dès 2003, un nouveau fil apparaît, au gré de la rencontre avec Saïd Yami, chercheur en management stratégique à l'université de Montpellier : le fil du *management*. J'ai ainsi progressivement fait évoluer la perspective initiale d'intégration (géométrique et mécanique) d'éléments dans un système pour envisager une démarche d'intégration conjointe élément / système (en analogie avec les travaux sur l'intégration produit / process), et enfin de là, proposer une intégration globale produit / processus / projet. Le projet est en effet plus que sous-jacent, à la fois dans le processus de conception et de validation et dans la démarche d'intégration globale, et les enjeux stratégiques exercent une influence sur l'organisation même de cette intégration. Tout est lié, en un enchevêtrement complexe. C'est cet élargissement de la perspective que la thèse se propose de donner à voir, en s'attachant à saisir la complexité de l'écheveau.

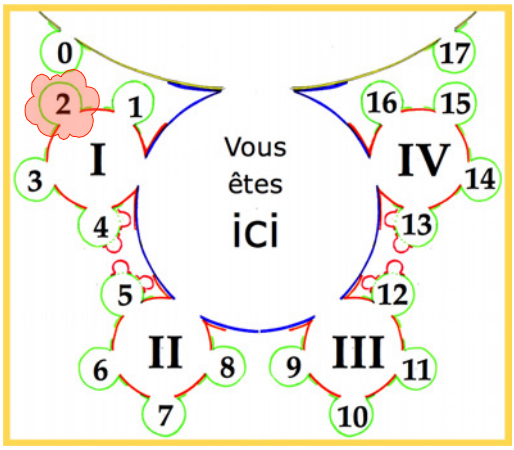
En conclusion de ce chapitre introductif qui retrace un itinéraire conceptuel global, je souhaite souligner la cohérence de ma démarche, intuitive et tâtonnante, « *chemin faisant* » [50]. Refusant toujours de découper en petits morceaux l'analyse de mon terrain, je m'y suis souvent égaré. Or, c'est non pas en réduisant le champ de l'analyse, mais bien en élargissant et en englobant progressivement de nouvelles perspectives et de nouvelles grilles de lectures, que j'ai commencé à enfin appréhender mon sujet. Et c'est grâce à cette approche complexe, permettant d'embrasser tous les axes de recherche, le terrain, les thèmes, les outils, les objets, les processus, les méta-processus, les organisations, les acteurs et les interlocuteurs, et aussi les accidents de la vie (professionnelle et personnelle) que j'ai co-construit ma démarche de recherche et mon action sur le terrain. Face à ce fatras apparent, c'est ce qui m'a permis de trouver un fil rouge, de dégager la voie, de faire converger ce qui semblait si disparate, bref d'appliquer une sorte d'*ingénierie complexe de la concourance*.

C'est ce à quoi s'attache cette thèse elle-même, avec un thésard conscient de sa place dans la thèse – et c'est en cela qu'elle contient une dimension personnelle et subjective. J'espère avoir ainsi répondu à la crainte exprimée au tout début de ce chapitre sur la pertinence à « *raconter [ma] vie* » : loin de rendre douteuse la valeur scientifique de mon approche, je suis convaincu que le passage par le "*Je*" participe au contraire à son établissement. Il est en effet incontournable pour le chercheur qui a pour ambition d'utiliser la réflexivité dans un cadre de recherche-action comme méthodologie de recherche.

∴

Outre les concepts et interrogations que nous venons d'évoquer dans ce chapitre, le lancement effectif de la thèse s'explique conjointement et indissociablement avec l'autre direction des fils de notre métier à tisser qui en constitue la trame : mon travail au CERN d'ingénieur et de manageur technique, figure que l'on commencera à définir au chapitre 3. C'est l'objet du chapitre 2, introductif des fils de ma vie professionnelle : une *« vie à fil tendu »*, pour reprendre le titre des mémoires d'un ancien physicien du CERN [Charpak 1993].

50. Référence explicite à « *La stratégie chemin faisant* » [Avenier 1997].



Chapitre 2. Le CERN, une trame

Où se déploie le contexte complexe du CERN, de ses accélérateurs et de ses détecteurs de particules, et de leur organisation

Se passionner pour l'infiniment petit précautionne d'une existence infiniment moyenne.

Sylvain Tesson [51]

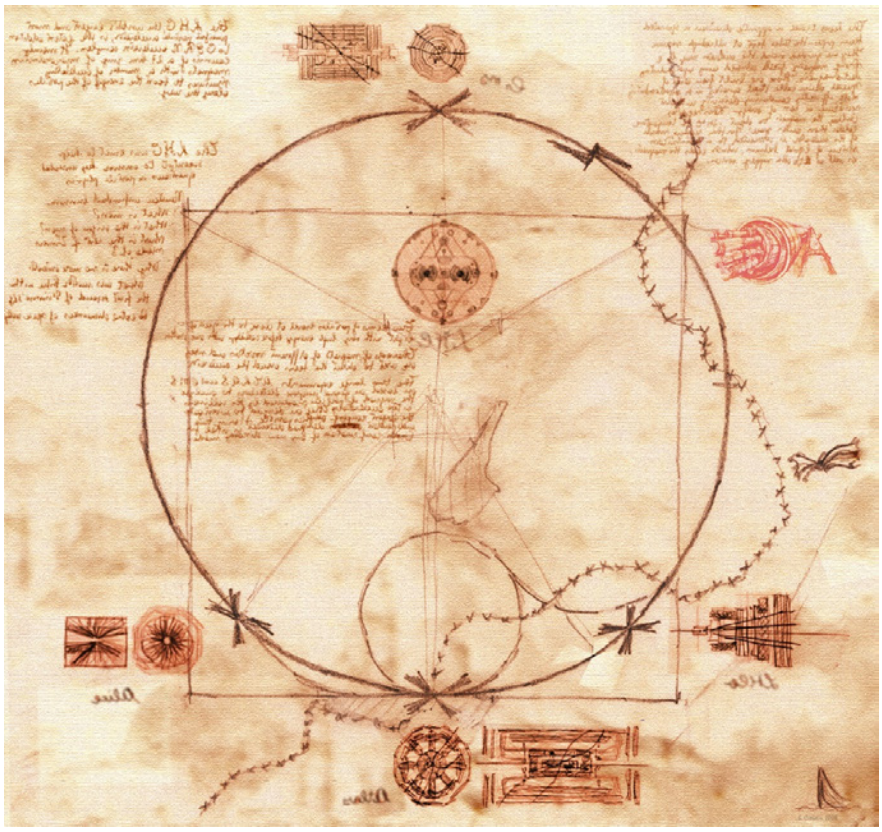


Figure 2.1: le LHC *à la manière* de Léonard de Vinci

© Sergio Cittolin

51. *Dans les forêts de Sibérie*, Gallimard, 2011, p. 246.

Le CERN, c'est le *Laboratoire européen de physique des particules*. Historiquement, ce fut le *Conseil européen pour la recherche nucléaire*, dont il a gardé l'acronyme après être devenu l'*Organisation européenne pour la recherche nucléaire*. Or, il n'est aucunement question de nucléaire au CERN, au sens où on l'entend couramment – ni réacteur ni bombe, ni arme [52] – ce qui explique sa dénomination officielle. Le contexte historique était en effet très différent en 1954 à sa création à Genève [53].

Il serait hors de propos de retracer ici dans sa globalité l'histoire du CERN, d'en décrire toutes les activités et tous les projets, d'en analyser le fonctionnement global. Une excellente, savante et volumineuse *Histoire du CERN* en trois volumes comblera le lecteur souhaitant approfondir ces questions. Le premier volume [Hermann et al. 1987] couvre le lancement de l'Organisation ; le deuxième volume [Hermann et al. 1990] relate la construction et le début de l'exploitation (1954-1965) [54] ; le troisième [Krige 1997] décrit l'extension en territoire français et le projet SPS (jusqu'à la fin des années 1970). Quant au lecteur curieux, il aura un panorama global tout à fait abordable (jusqu'au début de l'installation du LHC en 2004) en parcourant l'ouvrage *Infiniment CERN* [CERN 2004], très illustré, et qui présente de nombreux témoignages des acteurs de cette aventure sans équivalent.

L'on s'en tiendra dans le présent chapitre 2 au strict nécessaire pour donner des repères globaux, tenter de faire sentir la complexité de l'aventure, et permettre d'expliciter le contexte des cas présentés dans la partie II. Il se trouve toutefois que ledit "strict nécessaire" n'est pas mince, et justifie ce chapitre à part entière. En outre, exploiter les cas dans leur généricité suppose de savoir en identifier la spécificité, celle qui est précisément donnée par le contexte. L'objet de ce deuxième chapitre introductif est donc d'expliciter la trame dans laquelle les fils du précédent chapitre sont amenés à s'insérer, et de donner les éléments de contexte pour comprendre les études de cas qui seront développées dans la partie II. Au cours du chapitre 3, nous verrons comment se croisent les fils du chapitre 1 avec cette trame très particulière qu'est le CERN, et nous ferons émerger la problématique du manageur technique en contexte de projet complexe. Le chapitre 4 décrira la méthode utilisée pour aborder cette problématique dans le reste de la thèse.

Outre l'*Histoire du CERN* en trois volumes, il existe une abondante littérature sur le rôle du CERN, son histoire, son exemplarité géopolitique et morale, son organisation, ses productions, son apport scientifique, ses retombées techniques, voire sociétales. Et puis, à la suite de la mise en œuvre finalement réussie du LHC le 10 septembre 2008 avec le premier faisceau, et surtout en mars 2010 avec les premières collisions, le CERN a défrayé la chronique, et le LHC a été l'objet d'un nombre important d'articles grand public ou spécialisés. Relevons ici le défi d'en tenter une synthèse, et aussi d'en dépasser les limites. Car il s'agit également de parler de ce dont on ne parle pas dans cette littérature, de nous donner quelques outils pour être en mesure, dans la partie II, d'ouvrir la boîte noire, de voir la science en action [Latour 1995], et aussi, de redonner toute sa place à la technique et à l'ingénierie pour la science [55] : observer « *how experiments begin* », pour reprendre l'expression utilisée [Nicquevert 1999] pour commenter *How Experiments End* [Galison 1987].

52. Quoi qu'en aient pensé certains dans l'ouvrage polémique *La quadrature du CERN* [Grinevald et al. 1984] peu après la découverte des bosons intermédiaires en 1983.

53. Site choisi, entre autres, pour des raisons de neutralité et de tradition à la fois diplomatique et scientifique de la ville de Genève [Lacki 2007, 250-251].

54. On trouvera un résumé des deux premiers volumes dans [Pestre et Krige 1992].

55. C'était l'ambition de la conférence « *Science sans ingénierie: péril de l'expérience* » donnée en juin 2008 à l'Université de Genève (http://www.unige.ch/communication/archives/2008/lhc.html).

Le CERN est une organisation intergouvernementale de recherche en sciences fondamentales. Cette simple définition attribue déjà trois dimensions à la trame contextuelle que nous souhaitons étudier : scientifique, organisationnelle, politique. À laquelle s'ajoutera bien vite la dimension technologique, dès que nous aurons franchi la porte de ce grand laboratoire. Commençons par évoquer le contexte scientifique, avant d'exposer la façon dont le CERN s'organise et agit pour contribuer à cette aventure.

2.1 Deux ou trois infinis

L'histoire des sciences, et tout particulièrement de la physique, s'est constituée autour de deux voyages d'exploration. L'un, initié grâce aux télescopes dès le XV^{ème} siècle, nous a menés vers l'extérieur, et jusqu'aux confins de l'Univers, il nous a permis de remonter le temps en franchissant des distances toujours plus grandes, et il a mené à toutes les découvertes de l'astrophysique en direction de l'infiniment grand et des puissances de dix astronomiques : une année-lumière, c'est tout de même dix mille milliards de kilomètres, et la taille de l'Univers est estimée à plus de dix milliards d'années-lumière, ce qui fait beaucoup de zéros avant la virgule… Au rang de ces découvertes figure le célèbre *Big Bang*, qui postule que l'Univers serait né dans une immense explosion qui serait due à une fluctuation quantique du vide. Aujourd'hui fait scientifiquement démontré en particulier par l'existence du rayonnement dit fossile, le *Big Bang* permet d'expliquer la genèse des atomes, des molécules, puis des cellules, des animaux dont l'être humain – et des galaxies, des étoiles, des planètes et autres objets interstellaires.

L'autre voyage nous emmène vers l'intérieur, vers l'infiniment petit, ce monde fait d'atomes et de particules. Ce voyage commencé avec les microscopes au milieu du XIX^{ème} siècle a permis l'observation directe des cellules, puis des bactéries. Cette observation visuelle est limitée par la nature même de la lumière : il est impossible d'observer des objets dont la taille est inférieure à sa longueur d'onde, soit environ le micron. En utilisant d'autres ondes que la lumière visible, on poursuit le voyage avec le microscope électronique permettant d'atteindre le nanomètre, et au-delà, avec les accélérateurs de particules. C'est ainsi que furent progressivement découvertes la structure des atomes, constitués d'un noyau et d'un nuage électronique, puis la structure des noyaux, constitués de protons et de neutrons (de la famille dite des hadrons), puis la structure de ces hadrons, constitués de quarks. Au fil des années s'est élaboré un modèle, baptisé *Modèle Standard*, qui décrit l'ensemble de la matière par un ensemble réduit de particules, rangées en familles dont il a été démontré au LEP [Feldman et Steinberger 1991] que leur nombre est limité à trois. D'un côté les quarks, au nombre de six (le dernier ayant été découvert en 1995), qui constituent les hadrons et les mésons ; et de l'autre les six leptons, regroupés en trois familles, celle de l'électron, celle du muon et celle du tau, avec leur neutrino correspondant. Ces douze briques de base suffisent pour reconstruire toute la matière connue. Autrement dit, « *les particules sont les graines du jardin qu'est notre Univers* » [Kane 1996, 149] [56].

Ces deux voyages, celui de l'astrophysique et celui de la physique des particules, se rejoignent. En effet, l'astrophysique est impuissante à « *accéder à la connaissance de l'origine de l'univers, si origine il a eu* » [Klein 2010, 54]. Dans les quelques fractions de secondes après l'instant zéro, l'Univers était une sorte de soupe primordiale que les lois de la physique des particules savent bien décrire ; jusqu'à un certain point limite en remontant vers l'instant zéro, le mur de Planck, au-delà duquel l'aventure scientifique entre astrophysique et physique des particules se poursuit conjointement. Et c'est l'un des objectifs du CERN que de partici-

56. On trouvera sur http://www.particlezoo.net/ une version assez originale de ce "zoo des particules".

per à cette aventure. Le bel ouvrage *À la recherche de l'infini* [Fraser, Lillestøl et Sellevåg 1996] en donne un panorama remarquablement clair.

L'infiniment grand et l'infiniment petit se conjuguent pour contribuer à décrire dans toute sa dynamique notre univers, qui tend à fabriquer une complexité croissante : à partir d'une énergie primordiale concentrée qui s'est partiellement transformée en particules, celles-ci se sont assemblées en atomes au cœur des étoiles [Weinberg 1980 ; Reeves 1984]. Constitués en molécules plus complexes, ces atomes ont donné naissance aux premières cellules, jusqu'à mener à l'être humain capable de s'intéresser à ces questions scientifiques (d'où venons-nous ? comment en sommes-nous arrivés là ?) et philosophiques (pourquoi y a-t-il quelque chose et non pas plutôt rien ? existe-t-il un grand dessein ?) conséquentes à cette explosion initiale. L'astrophysicien Trinh Xuan Thuan est allé jusqu'à écrire que « *l'existence de l'être humain est inscrite dans les propriétés de chaque atome, étoile et galaxie de l'Univers, et dans chaque loi physique qui régit le cosmos* » [57]. Le physicien Stephen Hawking résume de manière très synthétique les objectifs de la physique :

> *Depuis Newton, et tout particulièrement depuis Einstein, l'objectif de la physique a consisté à dégager des principes mathématiques simples analogues à ceux rêvés par Kepler, afin d'élaborer une théorie unifiée du Tout capable de rendre compte de chaque détail de la matière et des interactions que nous observons dans la nature. Au tournant du XX^{ème} siècle, Maxwell et Einstein ont unifié les théories de l'électricité, du magnétisme et de la lumière. Les années 1970 ont vu la création du modèle standard, cette théorie unique des interactions forte, faible et électromagnétique. La théorie des cordes et la M-théorie* [58] *sont ensuite apparues afin d'y incorporer l'interaction restante, la gravitation, l'objectif étant d'élaborer une théorie unique qui expliquerait non seulement l'ensemble des forces mais également les constantes fondamentales comme l'intensité des interactions et les masses et charges des particules élémentaires.* [59]

C'est au service de l'exploration expérimentale de cette formidable aventure scientifique, qui s'étend aussi bien vers l'infiniment *grand* et vers l'infiniment *petit*, que se met un autre "infiniment" : l'infiniment *complexe* [Rosnay 1975, 9], celui de ces grands instruments scientifiques que sont les accélérateurs et détecteurs de particules [Cesarsky 1995]. C'est cet infiniment complexe dont le CERN est une forme représentative. Il peut en effet pleinement être considéré lui-même comme un système complexe, une approche qui nous permettra d'éclairer notre contexte.

2.2 Le CERN, un système complexe

Ce n'est pas uniquement par figure de style ou pour le goût de la formule que je parlerai d'infiniment complexe à propos du CERN. C'est ce que je vais montrer dans les sections suivantes : nous allons y considérer le CERN comme un système complexe. En préalable, et c'est l'objet de la présente section, il convient de s'accorder sur ce que l'on entend par système, et particulièrement par système complexe.

Suivant les apports de la systémique [Le Moigne 1990 ; Morin 2008], et leurs tentatives d'application au domaine du management de projet [Vidal et Marle 2008], nous définirons un système comme une entité qui, dans un environnement donné, vise à atteindre certains objectifs (aspect *téléologique*) en effectuant une activité

57. *La Mélodie secrète*, Fayard, 1989.

58. La M-théorie est une extension de la théorie des cordes, parfois appelée théorie des membranes, mais la signification M n'est volontairement pas explicitée…

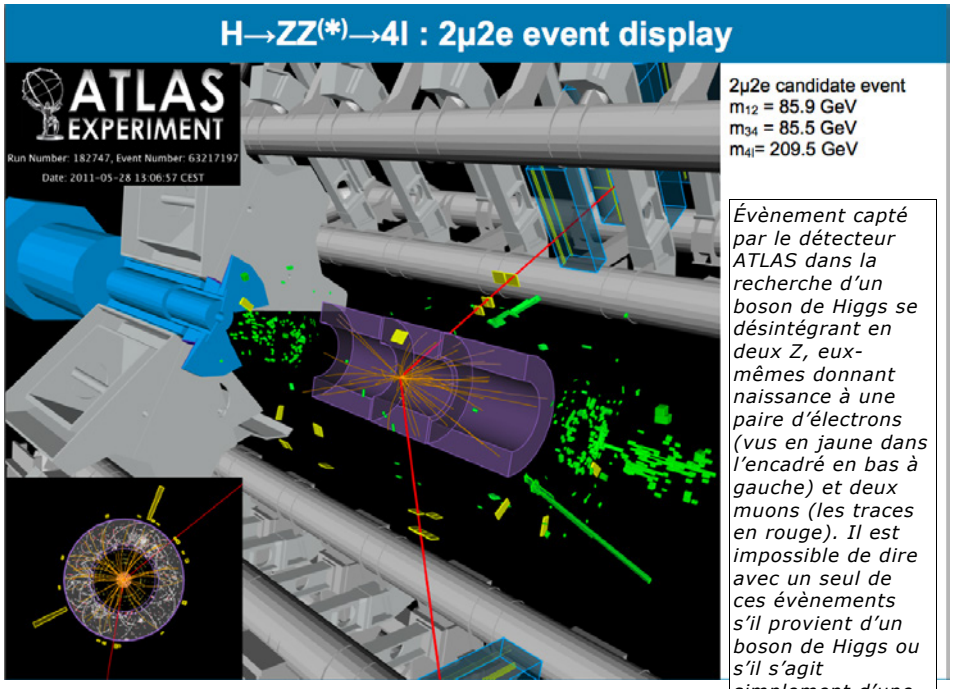
59. *Y a-t-il un grand architecte dans l'Univers ?* [Hawking et Mlodinow 2011, 202]. Titre original : *the Great Design*.

Depuis la parution en 1990 du manuel du chasseur de Higgs (*the Higgs Hunter's Guide* en anglais), on fait souvent référence à la « chasse au Higgs », comme si nous étions une bande de physiciens et physiciennes assoiffés de sang et prêts à tuer ce boson de Higgs. Si on doit associer cette traque à un safari, il s'agit tout au plus d'un safari photo ! Car cette recherche repose entièrement sur la statistique. Avec les détecteurs CMS et ATLAS, on recueille chaque jour des millions « d'évènements », chacun étant une photo captée à la suite d'une collision entre protons dans le Grand Collisionneur de Hadrons (LHC). Toutes sortes de particules sont créées à partir de l'énergie libérée par ces collisions, certaines plus souvent que d'autres. Tout ce qui se produit souvent est bien sûr le mieux connu puisqu'on a eu amplement l'occasion de les étudier dans le passé. Le plus difficile reste à faire : capter les évènements les plus rares comme ceux contenant un boson de Higgs par exemple. Pour y parvenir, il nous faut passer au peigne fin des quantités phénoménales d'évènements.

Les particules lourdes créées lors de ces collisions sont instables et se désintègrent rapidement en particules plus petites et stables. Chaque évènement ressemble donc à un mini feu d'artifice dont les débris volent dans toutes les directions. Si un boson de Higgs est créé, il se brisera aussitôt en particules légères. Pour l'identifier, on doit le reconstruire à partir de ses débris. Jusqu'à présent, le boson de Higgs reste introuvable et personne ne sait exactement à quoi il ressemblera. Mais s'il existe, et si c'est bien celui prédit par le modèle standard, alors on a une bonne idée comment l'attraper. On lui tend des pièges taillés sur mesure, chaque piège (ou « analyse ») étant une série de critères de sélection visant un aspect unique des évènements de notre signal, soit une désintégration spécifique du boson de Higgs. Par exemple, un boson de Higgs pourrait se désintégrer en deux bosons Z, qui eux mêmes produiront une paire d'électrons ou de muons. Il suffirait alors de ne sélectionner que les évènements qui contiennent deux de ces paires. Le problème, c'est qu'il est aussi possible de produire deux Z directement, et ceux-ci se désintègreront exactement de la même façon. Ou encore, certaines particules peuvent être incorrectement identifiées comme électrons ou muons, simulant encore une fois une désintégration semblable à celle d'un Higgs.

Toute la difficulté consiste donc à sélectionner autant d'évènements que possible contenant un Higgs tout en rejetant la vaste majorité des autres évènements, ce qu'on appelle le bruit de fond, qui sont aussi produits encore bien plus abondamment. C'est un peu comme si malgré le grand soleil, on veut prendre une photo d'une toute petite étincelle. On aura besoin de filtres spéciaux pour minimiser la lumière ambiante sans bloquer la lumière de cette étincelle. Fort heureusement, les prévisions du modèle standard sont très précises et nous permettent d'anticiper combien d'évènements viendront du bruit de fond. Il suffit donc de compter ces évènements et voir si on en récolte plus que ce qui est prédit seulement pour le bruit de fond.

Une fois la sélection faite, on étudie la distribution de certaines variables pour tous les évènements sélectionnés. Une des plus utilisées est la masse reconstruite à partir de tous les débris de la désintégration initiale. Pour les évènements du bruit de fond, ils ne formeront pas une masse particulière. Mais si ces évènements viennent tous d'une seule et même particule, un boson de Higgs par exemple, ils commenceront à s'accumuler au même endroit. Et là, on aurait la preuve de son existence. Mais même si un jour on déclare l'avoir trouvé, on ne pourra dire avec une certitude absolue si tel ou tel évènement correspond à un Higgs ou au bruit de fond. C'est seulement en regardant l'ensemble des évènements sélectionnés qu'on peut voir un excès, et pas avec un évènement en particulier.



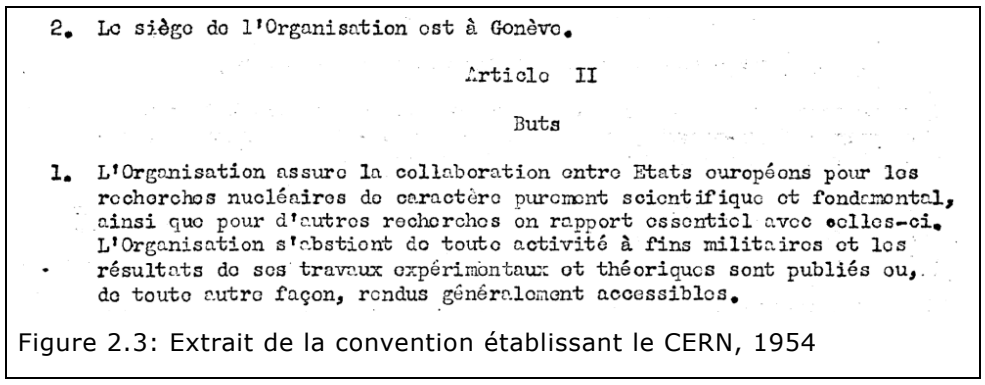
Évènement capté par le détecteur ATLAS dans la recherche d'un boson de Higgs se désintégrant en deux Z, eux-mêmes donnant naissance à une paire d'électrons (vus en jaune dans l'encadré en bas à gauche) et deux muons (les traces en rouge). Il est impossible de dire avec un seul de ces évènements s'il provient d'un boson de Higgs ou s'il s'agit simplement d'une paire de bosons Z, les deux types d'évènements étant identiques. Il faut donc en accumuler plusieurs pour pouvoir dire si oui ou non le Higgs existe ou pas.

Figure 2.2 : Cueilleuse de Higgs, pas chasseuse de Higgs !

Pauline Gagnon – 5 septembre 2011, Blog *Quantum diaries*

(aspect *fonctionnel*) tandis que sa structure interne (aspect *ontologique* [60]) évolue au cours du temps (aspect *génétique*) sans perdre sa propre identité.

Selon cette définition, il est aisé de considérer le CERN comme un système : il existe dans un environnement scientifique, politique et financier donné, et il a pour objectif, tel que défini à l'article II de sa convention fondatrice de 1954 (voir Figure 2.3), d'« *assurer la collaboration entre États européens pour les recherches nucléaires à*



2. Le siège de l'Organisation est à Genève.

Article II

Buts

1. L'Organisation assure la collaboration entre Etats européens pour les recherches nucléaires de caractère purement scientifique et fondamental, ainsi que pour d'autres recherches en rapport essentiel avec celles-ci. L'Organisation s'abstient de toute activité à fins militaires et les résultats de ses travaux expérimentaux et théoriques sont publiés ou, de toute autre façon, rendus généralement accessibles.

Figure 2.3: Extrait de la convention établissant le CERN, 1954

caractère purement scientifique et fondamental […] pour des recherches sur les particules de haute énergie » (aspect téléologique). Il développe et opère des accélérateurs de particules, et il effectue des expériences de physique des particules au moyen de détecteurs (aspect fonctionnel). Il possède une organisation interne qui permet de gérer les ressources, d'affecter le personnel qualifié requis et d'effectuer les tâches techniques et administratives nécessaires (aspect ontologique) [61]. Cette structure a évolué depuis 1954, et continue d'évoluer après près de 60 ans de développements, d'acquisition de connaissances, d'agrandissements de locaux, de projets nouveaux, d'élargissement géographique des pays membres, d'arrivées et de départs de personnel (aspect génétique), tout en conservant son identité de laboratoire de physique des particules.

60. Sur l'utilisation du terme « ontologique », il y aurait beaucoup à dire. Ce n'est évidemment pas l'objet de cette thèse. Je souhaite toutefois clarifier dans quelle acception l'ontologie est ici convoquée – dans une note succincte et nécessairement simplificatrice.

L'ontologie est un concept philosophique. Chez Aristote, il s'agit d'une science qui étudie « *l'Être en tant qu'être, et les attributs qui lui appartiennent essentiellement* » (*Métaphysique*, III, 1). Ultérieurement, le terme d'ontologie a désigné le travail de définition des modalités de la connaissance de l'être comme tel. C'est sans doute chez Kant que le concept se stabilise et pour ainsi dire s'éteint, lorsqu'il affirme que nous ne pouvons jamais connaître ce que les choses sont en elles-mêmes, mais seulement la manière donc ces choses nous apparaissent, qui sont propres aux formes de notre sensibilité et de notre entendement (*Critique de la raison pure*). Le terme reprend vigueur sous la plume d'Husserl, qui oppose ainsi l'ontologie à la phénoménologie : nous ne connaissons les choses, les « *étants* », qu'au travers des actes de conscience. À la fin du XIX^{ème} siècle, l'œuvre de Quine est en grande partie responsable du retour de l'ontologie dans la philosophie des sciences contemporaines, avec sa notion d'engagement ontologique, selon laquelle on ne devrait introduire d'entité dans une théorie qu'à la condition d'être en mesure de fournir un critère d'identité formulable dans la logique du premier ordre. Une ontologie est donc définie relativement à une théorie, Quine recommandant d'en user avec parcimonie. Par une sorte d'extension, le terme d'ontologie a été repris par les philosophies anglo-saxonnes du langage en diverses occasions, entre autre pour considérer l'ontologie comme l'ensemble des référents, selon la théorie sémantique et le triangle mot / concept / chose (Russel), ou en d'autres termes, signifiant / signifié / référent (Barthes, Jakobson).

C'est dans une évolution de cette dernière acception, quelque peu différente – pour ne pas dire excessive – que le terme est utilisé depuis, en particulier en informatique : il définit une conceptualisation du monde réel destinée à en partager la compréhension. Nous nous en tenons ici au sens employé par l'approche systémique (Le Moigne) : l'aspect ontologique d'un objet est celui qui décrit sa constitution propre (ce que l'objet *est*) par distinction avec ses manifestations (ce que l'objet *fait*) et avec son évolution (ce que l'objet *devient*) (*Théorie du système général* [Le Moigne 1990, 88]), s'articulant dans une "trialectique" sur laquelle nous reviendrons au chapitre 16.

61. L'on pourra rétorquer que les expériences de physique participeraient plutôt de l'aspect ontologique, et l'organisation et le personnel de l'aspect fonctionnel. Le flou sur la définition précise de ces aspects est une signature de la complexité systémique, ces aspects étant récursivement liés (voir le chapitre 10).

Établir le caractère complexe de ce système est une opération un peu plus délicate – cette question sera au demeurant assez lancinante tout au long de notre propos. À ce stade, nous nous contenterons de la sobre définition d'une entité complexe proposée par Besnier : « *ensemble de corps, qualités, états, … en relation de dépendance mutuelle et appartenant à des référentiels multiples* » [Besnier 2006, 48]. À chacun des aspects systémiques relevés, téléologique, fonctionnel, ontologique, génétique, il est possible d'associer une modalité de complexité intrinsèque (par différenciation avec la complexité perçue par l'être humain, sur laquelle nous reviendrons dès le chapitre 3). Ces complexités intrinsèques proposées élargissent la typologie proposée par Baccarini [1996], qui distingue dans tout projet la complexité organisationnelle de la complexité technologique. J'y ajoute d'une part la complexité scientifique, liée à la nature même de la mission du CERN, et la complexité historique et géopolitique, que je distingue de la complexité organisationnelle en ce que celle-ci est davantage tournée vers le fonctionnement interne de l'Organisation. On obtient ainsi l'équivalence simplifiée présentée dans le Tableau 2.1, sachant que par nature, chacune de ces complexités est liée aux autres et en situation de dépendance mutuelle – c'est bien le propre du complexe [62].

Aspect systémique	Complexité intrinsèque du CERN
Téléologique (finalité)	Scientifique
Fonctionnel (fonction)	Technologique
Ontologique (structure)	Organisationnelle
Génétique (comportement)	Historique et géopolitique

Tableau 2.1: Correspondances indicatives entre aspects systémiques et modalités de complexités intrinsèques du CERN

Cette grille de lecture, qui ne prétend à aucune exactitude absolue, constituera modestement notre *guide* pour compléter la présentation du CERN en tant que contexte de l'action de notre manageur technique. Nous commencerons par la dernière question, que j'ai qualifiée de géopolitique, et qui explicitera la dimension internationale du CERN et son contexte financier. Puis nous reprendrons l'ordre du tableau qui suit celui de Le Moigne, et nous suivrons le déroulement qui conduit de l'idée conceptuelle du physicien théoricien jusqu'au résultat scientifique publié, en passant par les phases de conception du dispositif expérimental, d'élaboration de l'accélérateur nécessaire pour effectuer les expériences voulues, ainsi que de leur construction, leur installation et leur mise en œuvre, et l'exploitation des données. Ceci nous permettra d'éclairer les nombreuses questions organisationnelles sous-jacentes, et de pointer quelques solutions originales.

2.3 Complexité géopolitique : un laboratoire international

Aujourd'hui, le concept de laboratoire international est devenu banal, au point que ce sont désormais les laboratoires cantonnés à un fonctionnement purement national qui font presque figure d'exception. C'est dire si le paysage scientifique, dans toute sa globalité, a considérablement évolué. En décembre 1949, 60 ans et deux générations plus tôt, cela n'avait rien d'évident quand le prix Nobel de physique français Louis de Broglie propose officiellement de créer un laboratoire européen appelant à une coopération scientifique entre les pays européens pour rassembler les ressources que les laboratoires nationaux seuls ne pourraient dégager. C'est que les physiciens sont à un tournant de leur histoire, l'ère des expériences réalisées sur un coin de table est désormais révolue ; et ce tournant coïncide avec l'idéal des

62. Nous l'illustrerons en particulier dans les cas de la partie II.

nations réconciliées. Ajoutez à cela l'émulation entre les États-Unis, l'URSS et l'Europe, et vous tenez tous les ingrédients qui mènent à cette proposition : rassembler ce qui est épars pour donner le jour à un laboratoire dont les moyens seraient suffisants pour faire de l'Europe une puissance scientifique à la hauteur. Cet élan est au reste impulsé dès 1947 par des physiciens américains (parfois originaires d'Europe, comme Robert Oppenheimer), qui souhaitent établir une saine compétition avec une Europe réunie en coopération scientifique. Il convient de ne pas négliger également qu'à cette époque, les questions de recherche scientifique sur le noyau des atomes (dont provient le qualificatif “nucléaire“) conservent une potentialité stratégique certaine – qu'elle a heureusement perdu depuis bien longtemps.

Remettons également en perspective le contexte politique de création du CERN. À l'époque, même l'embryon de ce qui est aujourd'hui devenu l'Union Européenne n'existe pas : ce n'est qu'en 1957 que naît la CEE, la Communauté Économique Européenne. Quant à la modeste CECA (Communauté Européenne du Charbon et de l'Acier), son idée ne voit le jour officiellement qu'en 1950, une année après le CERN ; et la CECA possédait à sa naissance en 1951 seulement six états membres, quand, dès l'établissement du Conseil provisoire du CERN en 1952, ce sont onze pays membres qui s'associaient, et douze au moment de la création effective en 1954 (dont la Yougoslavie, pourtant communiste). Il faut donc garder à l'esprit que le CERN a également été pionnier dans l'établissement des premières organisations internationales à l'échelon européen.

Le modèle politique du CERN a servi d'exemple pour une organisation équivalente de l'autre côté du rideau de fer : le JINR (*Joint Institute for Nuclear Research*), situé à Dubna, ville scientifique (наукоград) située au nord de Moscou. Le JINR [63] est fondé en 1956 et regroupe encore aujourd'hui 18 pays membres de la CEI et de l'Europe de l'Est. Il est intéressant de remarquer que certains de ces pays ont adhéré à la fois au JINR et au CERN : c'est le cas de la Pologne et de la Tchécoslovaquie (en un, puis deux constituants…) qui, fondateurs du JINR en 1956, ont rejoint le CERN dès 1991 sans quitter pour autant le JINR. La Roumanie et la Bulgarie ont fait de même plus récemment.

La neutralité et la non-applicabilité absolue des résultats scientifiques obtenus ont d'emblée été posées en principes dans la convention du CERN (voir la Figure 2.3). Ces principes ont permis, outre son établissement en Suisse, pays neutre par excellence, d'établir des relations entre scientifiques à un niveau sans équivalent. Nicolas Koulberg rapporte [CERN 2004, 76] comment se sont formées des relations scientifiques et personnelles entre employés du CERN d'une part, et spécialistes soviétiques originaires de Serpoukhov d'autre part. La Russie n'était pas un pays libre à cette époque-là, c'est dire le caractère exceptionnel des échanges entre Est et Ouest qui furent réalisés sous couvert du CERN, comme l'envoi en 1970 d'un ordinateur particulièrement performant. Cet envoi fut rendu possible dans le cadre de l'accord entre le CERN et le comité d'état à l'énergie atomique de l'URSS, signé en 1967 – Serpoukhov venait de démarrer le plus grand accélérateur de particules au monde de l'époque. Notre chapitre 7 traitera d'un projet réalisé en Russie : si ce projet a été rendu possible, c'est bien parce que, dès les années 1970, les expériences menées conjointement par le CERN et les Soviétiques à Serpoukhov avaient démontré que la collaboration scientifique pouvait surmonter les obstacles politiques et avait ouvert la voie à ces coopérations ultérieures. Au reste, la Russie est rentrée en 1995 comme état observateur au Conseil du CERN. (En 2012, la Russie vient d'annoncer sa pré-candidature.) Le LHC lui-même n'aurait sans doute pas pu être réalisé sans les relations personnelles établies entre scientifiques à l'époque !

En quoi le caractère international, diplomatique et géopolitique du CERN lui confère-t-il une dimension complexe ? Puisque nous traitons de géopolitique, il est

63. En russe, ОИЯИ, Объединённый институт ядерных исследований.

intéressant de se référer aux travaux touchant à l'application de la théorie de la complexité au domaine des sciences politiques. Il est évidemment hors de propos d'en envisager une étude systématique. Dans un ouvrage consacré à l'application de la théorie de la complexité à une grande région géopolitique et à la sécurité européenne, Clemens relève un certain nombre de marqueurs de complexité, et note qu'un nombre élevé de composants et de paramètres avec une interdépendance des éléments, un degré élevé d'intégration ainsi qu'une situation dynamique sont sources de ce qu'il appelle « *intransparence* » [Clemens 2001]. Avec vingt pays membres, chacun représenté au Conseil du CERN par un diplomate et un scientifique, avec des pays intégrés dans des superstructures inter-étatiques, mais aussi en relation de compétition économique et financière, avec des enjeux évolutifs de politique de la recherche tant au niveau national que supranational, le mode de gouvernance ne saurait être que complexe. À l'inverse, cette complexité peut être source de comportements émergents surprenants et imprévisibles, comme la collaboration avec les Soviétiques dès la fin de années 1960. Le CERN était sans doute alors l'un des très rares endroits sur la planète où Soviétiques et Américains collaboraient activement sur les mêmes projets !

2.4 Complexité scientifique : théories, expériences et instruments

Le CERN est une Organisation dont la mission est de faire de la physique. Nous allons donc partir des physiciens, afin de dresser une image de la démarche globale. Cette approche est extrêmement réductrice, et je ne méconnais pas la richesse des travaux sur la réalité de la science en train de se faire : Latour [1995],est l'un des premiers qui, dans *Science en action* a ouvert la « *boîte noire de Pandore* » ; Knorr-Cetina [1999] a éclairé le monde de la physique des particules ; sans oublier bien entendu les travaux de Galison et de bien d'autres.

Pour illustrer cette complexité, nous allons prendre un exemple, celui de la recherche autour du boson de Higgs. Partant de ce concept théorique imaginé par le physicien éponyme, nous allons remonter tout le processus de conception de l'énorme machinerie du LHC et de ses expériences, qui va entièrement peupler notre partie II (après avoir occupé l'essentiel de ma carrière, de 1992 à 2005…), et dont l'un des objectifs est d'enquêter sur l'existence de ce boson [Davier 2008].

Qu'est-ce donc que le boson de Higgs [64] ?

Nous avons laissé la présentation fort succincte du Modèle Standard au stade d'une série de briques, constituants élémentaires de la matière. Nous n'avons pas même évoqué les bosons, ces particules porteuses des interactions : électromagnétique avec le photon ; électrofaible avec les bosons W et Z ; nucléaire forte avec le gluon. Le boson de Higgs est un mécanisme théorique qui permettrait d'expliquer pourquoi les particules ont les masses qu'elles ont. En effet, dans les équations régissant le Modèle Standard, aucune particule élémentaire n'est dotée de masse. Or dans le monde réel, seuls le photon et le gluon n'ont pas de masse. Toutes les autres particules sont massives, certaines d'entre elles atteignant même la masse de noyaux de bonne taille. Il faut donc que la symétrie sous-jacente entre les différentes particules du Modèle Standard soit brisée, de manière à ce que certaines d'entre elles acquièrent une masse alors que d'autres en resteront dénuées.

L'article « *The elusive 'God particle'* » [Ramachandran 2011] relate très bien non seulement ce qu'est le boson de Higgs, mais tout le cheminement qu'a déclenché sa quête, et la situation de la recherche à la fin de l'été 2011. J'ai reproduit à la Figure 2.2 un article de la physicienne Pauline Gagnon, qui explique bien la stratégie des

64. Lederman l'a baptisé la « *particule de Dieu* » [Lederman et Teresi 1993], traduit en français par « *sacrée particule* » [Lederman et Teresi 1996]. Ce physicien réputé a ensuite remis dans le contexte et relativisé ce qualificatif éditorial [Lederman 2007].

expérimentateurs pour établir l'existence de ce boson. La section § 2.5 explicite l'instrumentation et la machinerie qui permettent de produire et d'observer les collisions de protons en question. Concentrons-nous ici sur l'articulation entre le travail des théoriciens, des expérimentateurs et des instrumentateurs.

C'est en 1964 que le théoricien écossais Peter Higgs publia [65] un article intitulé *Broken Symmetries and the Mass of Gauge Bosons* [Higgs 1964] décrivant un mécanisme permettant d'expliquer la brisure spontanée de la symétrie électrofaible. Il est basé sur des considérations mathématiques parfaitement absconses au commun des mortels. Un mécanisme similaire avait été suggéré indépendamment et simultanément par les belges Brout et Englert, et publié [66] sous le titre *Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons* [Englert et Brout 1964]. Pour y voir plus clair, ayons recours à la formulation explicative d'un autre théoricien, John Ellis :

> *In the Standard Model, the breaking of the symmetry is thought to be present already in the lowest-energy state, namely the so-called vacuum. This 'spontaneous' symmetry breaking is ascribed to a field that permeates all space, taking a specific value that can be calculated from the underlying equations, but with a random orientation in the internal 'space' of particles. […] An analogy may help the reader to visualize how this BEH [Brout-Englert-Higgs] mechanism works. Imagine a flat, featurless snowfield, extending uniformly throughout space. Now consider a skier crossing it: (s)he glides rapidly across the snow without sinking into it, much as a massless particle such as the photon (which does not interact with the BEH field) always travels very fast, namely at the speed of light. Consider next a snowshoer crossing the snowfield: (s)he sinks a bit into the snow and moves more slowly than the skier, rather like a massive particle that interacts with the BEH field, which thereby acquires a mass and always travels slower than light. Finally, consider a hiker: (s)he sinks deeply into the snow and moves very slowly, just like a particle with large mass that interacts strongly with the BEH field. Just as the electromagnetic field has a quantum particle associated with it, namely the photon, this vacuum BEH field would also have an associated quantum particle: a snowflake, if you like! This is the long-awaited Higgs boson, so called because Higgs was the first to notice that its existence is an inevitable consequence of the theory.* [67]

Le problème, c'est que le Modèle Standard ne permet aucune prédiction *a priori* de la masse possible du boson de Higgs. Les résultats du LEP en fournissent une borne inférieure à 114 GeV [68], tandis que, associés à ceux du Tevatron (l'accélérateur américain du FermiLab près de Chicago), ils suggèrent que sa masse ne dépas-

65. Reçu le 31 août, publié le 19 octobre 1964.

66. Reçu le 26 juin, publié le 31 août 1964 ! Les dates exactes sont importantes…

67. « La brisure de symétrie est dans le Modèle Standard supposée présente dès les niveaux d'énergie les plus bas, c'est-à-dire le vide. La brisure de symétrie "spontanée" est attribuée à un champ qui emplit tout l'espace, et qui prend une valeur particulière que l'on peut calculer avec les équations sous-jacentes, mais avec une orientation aléatoire dans l'"espace" interne des particules. […] Une analogie pourra aider le lecteur à visualiser la manière dont fonctionne ce mécanisme BEH. Imaginons un champ de neige plat, sans relief, qui s'étend uniformément à travers l'espace. Considérons maintenant un skieur qui le traverse : il/elle glisse rapidement sur la neige sans s'y enfoncer, tout comme une particule sans masse comme le photon (qui n'interagit pas avec le champ BEH) se déplace toujours très vite, en l'occurrence à la vitesse de la lumière. Considérons maintenant une personne en raquettes qui traverserait le champ de neige : il/elle s'enfonce un peu dans la neige et se déplace plus lentement que le skieur, tout comme une particule massive qui interagit avec le champ BEH, qui de ce fait acquiert une masse et voyage plus lentement que la lumière. Enfin, considérons un promeneur : il/elle s'enfonce profondément dans la neige et se déplace très lentement, exactement comme une particule de masse élevée qui interagit fortement avec le champ BEH. Tout comme le champ électromagnétique a une particule quantique qui lui est associée, à savoir le photon, ce champ BEH du vide serait également associé à une particule quantique : un flocon de neige, si l'on veut ! Il s'agit du boson de Higgs attendu depuis longtemps, ainsi baptisé parce que Higgs a été le premier à remarquer que son existence était la conséquence inévitable de la théorie. » John Ellis [in Evans 2009, chap. 2]

serait probablement pas les 180 GeV. C'est donc l'intervalle que le LHC et ses expériences s'étaient donnés pour mission d'explorer [69].

Mais nous anticipons : nous n'en sommes qu'à un modèle théorique, et il nous faut, deuxième étape, savoir en traduire le mécanisme en termes d'éléments observables. Le Modèle Standard prédit que le boson de Higgs est instable et qu'il se désintègre en d'autres particules, comme des photons, des quarks *bottom*, des leptons tau et des bosons W et Z. Il s'agit d'observer les différents canaux de désintégration, autrement dit les différents modes possibles, avec leur probabilité associée, et de les combiner pour obtenir un signal convaincant. La difficulté pour la conception des détecteurs, c'est que les canaux de désintégration dépendent de la masse du boson de Higgs – à supposer qu'il existe. Il s'agit donc d'être en mesure d'observer l'ensemble des modes possibles pour l'ensemble des masses possibles. Après tout, comme disent les physiciens d'ATLAS, « *we do experiments because we do not know the answers in advance* » [70].

Pour comprendre la complexité de la démarche, citons dans ses propres termes un physicien expérimentateur :

68. Le GeV, ou giga-électron-volt, est l'unité d'énergie utilisée en physique des particules. Un électron-volt (eV) est l'énergie (minuscule) acquise par un électron accéléré par une différence de potentiel d'un volt. Le MeV (million d'électron-volt), le GeV et le TeV (téra-électron-volt) sont les multiples de l'eV.

69. L'histoire de la physique des particules est en marche : après la rédaction initiale de ce chapitre (en mars 2011), quelques nouvelles **étapes vers la découverte du Higgs** ont été franchies. En voici les principales, avec mes ajouts progressifs comme un petit journal de bord.

En octobre 2011 (ajout du 10.10.2011) après les conférences de l'été, aucun indice concluant de son existence n'avait encore été décelé. C'est pourquoi l'on peut dire que le Higgs est « *traqué, mais pas découvert* » (voir le texte de la Figure 2.2). Qui sait si, d'ici la fin de la thèse, cette quête n'aura pas trouvé son épilogue, que ce soit dans la découverte effective ou dans l'établissement de sa non-existence ? Ces deux issues sont également stimulantes pour les physiciens, comme l'expliquent Ellis et Gagnon – et cela ne change de toute façon rien à notre propos.

En **décembre 2011** (ajout du 13.12.2011), l'analyse complète sur les données de l'année complète (7 femtobarns inverses, fb^{-1}) semble montrer un excès assez net d'événements autour de 125 GeV. Les physiciens ne sont pas encore en mesure de transformer cette observation en découverte, mais la courbe des résultats sort de la zone où les données devraient rester confinées si le boson de Higgs n'existait pas.

En **mars 2012** (ajout du 08.03.2012), les expériences CDF et D0 du Fermilab (dont les prises de données sont terminées depuis septembre 2011) annoncent « *avoir observé un petit excès d'évènements pour un Higgs se désintégrant en deux quarks b entre 115 et 135 GeV* », soit dans la même région de masse que pour CMS et ATLAS et de manière évidemment totalement indépendante. L'effet combiné pour ces deux expériences correspond à une déviation de 2,2 sigma, soit une probabilité de 1.4% que cela vienne du bruit de fond et non pas du boson de Higgs. « *Le Higgs ne jouera plus à la cachette bien longtemps* », titrait P. Gagnon. Tout début juillet le Fermilab annonce une déviation à 3,1 sigma.

En **juillet 2012** (ajout du 04.07.2012), les expériences ATLAS et CMS annoncent des signaux à 5 sigma pour une particule aux alentours de 126 GeV sur les données de 2011 et du premier semestre 2012, soit 11 fb^{-1}. La porte-parole de l'expérience ATLAS Fabiola Gianotti déclare alors : « *Nous observons dans nos données des indices clairs d'une nouvelle particule, au niveau de 5 sigmas, dans la gamme de masses autour de 126 GeV. La performance remarquable du LHC et d'ATLAS et les efforts considérables qui ont été déployés nous ont conduits à ce résultat exaltant.* » (Communiqué de presse du CERN « *Les expériences du CERN observent une particule dont les caractéristiques sont compatibles avec celles du boson de Higgs tant attendu* », 04 juillet 2012). *Sciences et Avenir* d'août 2012 titre : « *la découverte du siècle* »… Pour la science

En **septembre** 2012 (ajout *final* – pour cette thèse, car l'histoire se poursuit…), l'article confirmant cette découverte est publié (voir note 87 p. 60) : « *the observation has a significance of 5.9 standard deviations, corresponding to a background fluctuation probability of 1.7×10^{-9}, is compatible with the production and decay of the Standard Model Higgs boson. » (« l'observation à une signification de 5,9 sigma, correspondant à une probabilité de fluctuation du bruit de fond de 1.7×10^{-9}, est compatible avec la production et la désintégration du boson de Higgs du modèle standard. »)* [Aad et al. 2012, 1]

Merci à Pauline Gagnon et à ses *posts* sur *Quantum diaries* (http://www.quantumdiaries.org).

70. *« Nous faisons des expériences parce que nous ne connaissons pas les réponses à l'avance ». ATLAS Reaches Milestone: 5 Inverse Femtobarns of Data!* October 28, 2011.

http://atlas.ch/news/2011/ATLAS-reaches-milestone-5-inverse-femtobarns.html

> *The dominant decay mode into hadrons is difficult to isolate, because of the QCD* [71] *background. Therefore, the two-photon decay channel will be important, as will other channels, including associated productions such as ttH, WH, ZH, for which a lepton from the decay of the accompanying particle will be used for triggering and background rejection. Above 130 GeV, Higgs decay into ZZ (one Z being virtual when mH is below the ZZ threshold), with its four-lepton final state, will be the most interesting channel. Above 600 GeV or so, WW or ZZ decays into jets or into states involving neutrinos (leading to missing transverse energy because the neutrinos are undetected) are needed to extract a signal; for mH close to 1 TeV, it becomes necessary to tag 'forward' jets, in the region* $2 > |\eta| > 5$ [sic], *from the WW or ZZ fusion production mechanism.* [72]

On le voit, c'est assez technique, pour ne pas dire ésotérique ! Alors même que l'article cité est un article supposé de vulgarisation (toute relative, donc)… Et pourtant, chacun des éléments exposés a une implication directe sur la conception des expériences, y compris sur les éléments mécaniques les plus fondamentaux. On voit donc que la notion de cahier des charges fonctionnel, familière aux concepteurs, prend ici une forme assez particulière, et pas forcément directement utilisable. Une adaptation d'impédance est nécessaire entre la formulation de l'attente de l'expérimentateur et sa compréhension en termes de fonctions techniques et de service qui doivent être fournies par les instrumentateurs. [73]

L'objet de cette section n'est pas d'expliciter dans son intégralité toute la phénoménologie des canaux de désintégration du Higgs – une thèse en soi, et qui sort largement à la fois de mes compétences et de nos préoccupations. Je souhaite simplement donner une idée de la complexité scientifique, sous l'angle téléologique de l'approche systémique, et souligner combien les lignes sociologiques bougent. Galison, dans *Image& Logic*, résume très bien cette évolution :

> *Experimental groups beg[i]n to need their « own » theorists, theorists whose work lay, not in the outer speculative realms, but close enough to a machine's specificity that they could begin to put data into a form comparable to the output of models from theory. On the theory side too, one begins to see "phenomenologists", whose work [is] designed to generate experimentally testable consequences of QCD, its variants and its competitors. Schematically, instead of the simple comparison theory ↔ experiment one might have a string of comparisons: experiment ↔ experimentalist's theory ↔ theorist's phenomenology ↔ theory.* [74]

71. QCD = *Quantum ChromoDynamics*, la chromodynamique quantique, branche de la physique qui décrit les interactions entre quarks et gluons, en particulier au sein des protons et des neutrons.

72. « Le mode dominant de désintégration en hadrons est difficile à isoler en raison du bruit de fond de la QCD. C'est pourquoi le canal de désintégration en deux photons sera important, tout comme les autres canaux, y compris des productions associées comme ttH, WH, ZH, au cours desquels un lepton issu de la désintégration de la particule accompagnante sera utilisé pour le déclenchement et l'exclusion du bruit de fond. Au dessus de 130 GeV, la désintégration du Higgs en ZZ (un Z étant virtuel tandis que mH reste sous le seuil ZZ), avec son état final à quatre leptons, sera le canal le plus intéressant. Au dessus de 600 GeV environ, les canaux de désintégration WW et ZZ en jets ou dans des états impliquant des neutrinos (conduisant à une énergie transverse manquante parce que les neutrinos ne sont pas détectés) sont nécessaires pour extraire un signal ; pour mH proche de 1 TeV, il devient nécessaire de démarquer les jets "en avant", dans la région $2 > |\eta| > 5$ *[sic]*, du mécanisme de production de fusion WW ou ZZ. » [Stapnes 2007, 290]

73. Nous reviendrons dans la section III sur cette notion d'adaptation d'impédance, et aux chapitres 5 et 6 sur des exemples très concrets de liens entre fonctions techniques et exigences de physique (position des lattes de la bobine toroïdale d'ATLAS, et spécification du matériau des soudures des pieds d'ATLAS).

74. « Les groupes expérimentaux commencent à avoir besoin de leurs "propres" théoriciens, des théoriciens qui travaillent sur le concret, et non pas sur des considérations spéculatives extérieures, mais suffisamment près de la spécificité d'une machine pour qu'ils puissent commencer à mettre les données sous une forme comparable aux résultats des modèles issus de la théorie. Du côté de la théorie aussi, on commence à considérer les "phénoménologues", dont le travail consiste à générer expérimentalement des

À ce stade de notre compréhension de l'aventure intellectuelle que constitue le projet LHC, nous pouvons schématiquement résumer ainsi : des physiciens (théoriciens) imaginent des mécanismes théoriques sous-jacents au comportement du réel. D'autres physiciens en déduisent des phénomènes observables auxquels ces mécanismes devraient donner lieu, et les simulent. D'autres encore imaginent des expériences permettant d'observer lesdits phénomènes. Et d'autres encore se chargeront d'en spécifier les caractéristiques techniques, dimension du travail à laquelle nous allons nous intéresser maintenant. Inutile de préciser que chacune de ces interrelations entre groupes et sous-cultures est infiniment complexe, comme l'a observé Galison dans ses ouvrages, et il serait fallacieux et réducteur d'imaginer une relation linéaire et déterministe directe entre le processus mental du théoricien et la production d'un résultat expérimental éprouvé.

2.5 Complexité technologique : la science lourde

Reprenons le fil du boson de Higgs, et résumons l'attente des physiciens désireux d'en découvrir l'existence. Il leur faut deux éléments principaux : un dispositif capable de créer une densité d'énergie suffisante pour créer le boson par transformation énergie matière ; et un dispositif destiné à observer autour du lieu de cette création les traces que laissera le boson lorsqu'il se désintégrera. Nous avons défini deux des composants principaux : un collisionneur, et un détecteur. Reste ensuite à traiter les données. Le tout constitue ce que des journalistes exagérément enthousiastes ont parfois qualifié d'entreprise « *aux confins du génie humain* » [75].

C'est cette définition en trois dimensions distinctes qui nous a évoqué le recours au *spider graph* (ou graphe radar) reproduite à la Figure 2.4 [Boisot et al. 2011, 52]. Elle propose trois indicateurs globaux de performance indépendants : énergie de collision (liée aux performances de l'accélérateur) ; détection d'événements (liée aux performances du détecteur) ; et acquisition et traitement des données (liés aux performances de l'infrastructure de calcul). Étudions tour à tour ces trois aspects : collisionner, détecter, traiter.

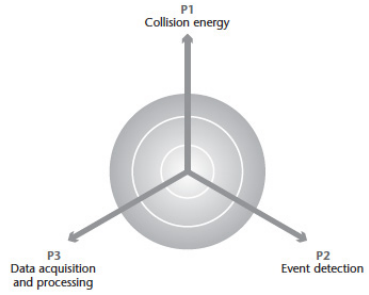


Figure 2.4: Graphe radar des performances d'un accélérateur

in Boisot et al. 2011, Fig. 2.9 p. 52

2.5.1 Collisionner

Le collisionneur accélère les particules, des protons au LHC [76], jusqu'à une énergie la plus élevée possible permettant de couvrir la gamme d'énergies évoquée (114–180 GeV) pour la masse du boson de Higgs. Il réalise des collisions à une fréquence suffisamment élevée pour permettre une accumulation statistique de données suffisante dans des laps de temps acceptables. Concrètement, c'est un croisement de paquets toutes les 25 nanosecondes nominalement (50 ns en 2012), soit 40 millions par seconde qu'il est prévu de fournir, susceptibles de générer jusqu'à 600 millions de collisions par seconde !

conséquences expérimentalement vérifiables de la QCD, de ses variantes et de ses concurrentes. Schématiquement, plutôt qu'à la simple comparaison théorie ↔ expérience, on a plutôt affaire à une chaîne de comparaisons : expérience ↔ théorie des expérimentateurs ↔ phénoménologie des théoriciens ↔ théorie. » [Galison 1997, sect. 1.5 p. 43]

75. C'est le titre même de l'article [Lefèvre 2009].

76. Le LHC est également en mesure d'accélérer des ions lourds, exploités tout particulièrement par une autre des expériences du LHC, l'expérience Alice.

Un autre paramètre caractéristique est celui de la luminosité, que l'on peut ramener à une densité de collisions. Le chiffre magique est la luminosité intégrée, autrement dit le nombre total de collisions enregistrées, et qui est exprimé dans une unité spéciale, le "femtobarn inverse". Sans entrer dans les détails, qu'il suffise de dire qu'à l'issue de l'année 2010, le montant était de 1, et fin 2011, il atteignait 5, ce qui correspond à un total de 340 millions de millions de collisions [77]. Chacune de ces collisions est effectuée à une énergie au centre de masse de 7 TeV (8 TeV dès 2012), ce qui ne représente rien de bien concret si ce n'est que c'est 7 fois plus que la machine précédente la plus puissante, à savoir le Tevatron du Fermilab (au fonctionnement duquel il a été mis un terme fin septembre 2011).

Donnons un bref aperçu de l'histoire des accélérateurs, basé entre autres sur la synthèse de Phil Bryant (1990) ainsi que sur l'introduction au LHC de son chef de projet Lyn Evans [2009, 9-12]. Le diagramme de Livingston montre l'évolution de la puissance de ces accélérateurs au fil du temps. La version initiale date de 1954 [Livingston 1954], et elle a été mise à jour en 2001 par le groupe de Snowmass [Chao et al. 2001]. C'est cette version francisée que nous reproduisons à gauche de la Figure 2.5. À droite est ajoutée la version du physicien américain Jim Rohlf [78], mise à jour après le (re)démarrage en 2010 du LHC [Rohlf 1994], et qui comporte

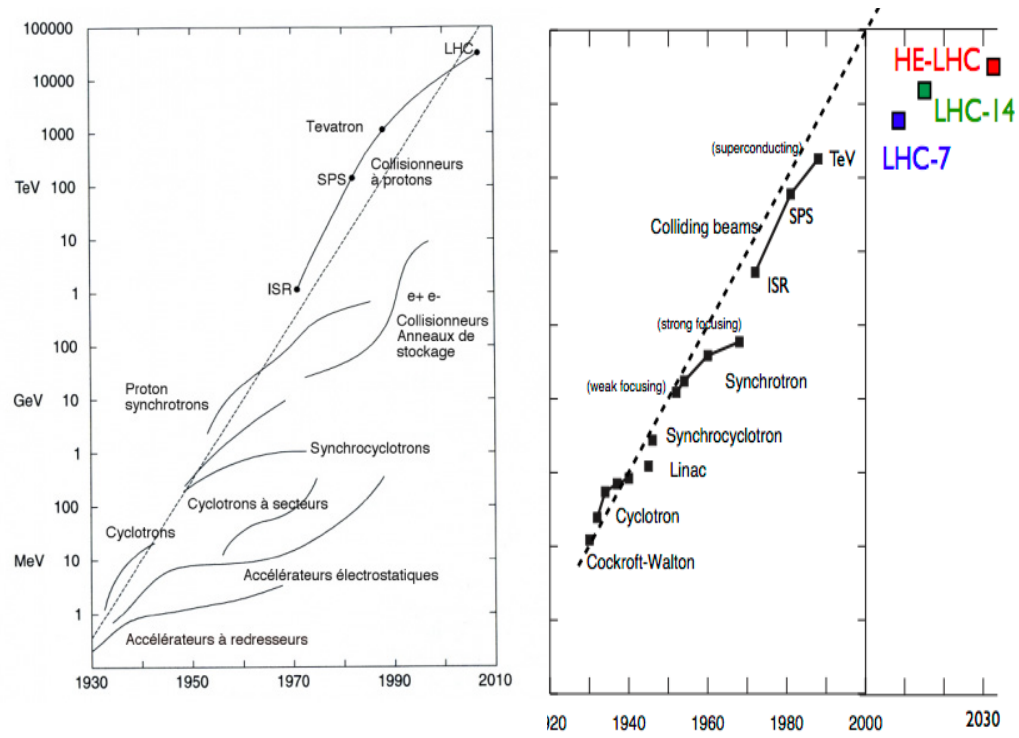


Figure 2.5: Diagrammes de Livingston, évolution des accélérateurs depuis 1930

trois points supplémentaires : LHC-7 (énergie effectivement disponible depuis 2010), LHC-14 (énergie nominale qui sera disponible en 2015 après le long arrêt LS1 de 2013-2014), et HE-LHC (énergie encore à l'état de projet très préliminaire d'un LHC "Haute Énergie" à 33 TeV pour 2033 [79]). La ligne en traitillés, dite ligne de Livingston, exprime l'accroissement observée en 1954 d'un doublement de

77. Fin septembre 2012, au moment de boucler ce manuscrit, nous avions atteint près de 18 fb^{-1}.

78. http://www.quantumdiaries.org/2011/11/05/the-ponderator-a-one-trick-pony/

79. Date à laquelle j'aurai fini par quitter le CERN pour cause d'âge de la retraite. Ce qui donne une petite idée de la durée de ces projets : ils dépassent la durée d'une carrière complète de 40 ans !

l'énergie tous les 6 ans, accroissement logarithmique qui a été maintenu jusqu'au Tevatron [Brissaud et Baron 2007]. On constate avec les valeurs effectives du LHC un fléchissement de cet accroissement, qui peut être lu comme un signe de l'essoufflement de la science lourde, ou en tous cas d'une technologie basée sur des aimants de courbure et une accélération par radio-fréquences.

J'ai parlé de science lourde sans avoir utilisé les chiffres qui en expriment la mesure : 14 TeV, c'est un chiffre qui ne parle pas trop au sens commun. 27 km, c'est déjà plus évocateur : c'est la longueur du tunnel construit au milieu des années 1980 pour le prédécesseur du LHC, le LEP (*Large Electron Positron*, grand collisionneur d'électrons et de positons), à des profondeurs sous le niveau du sol comprises entre 45 et 170 m [Picasso 2011, 559]. Le LHC est considéré comme la machine la plus complexe jamais construite, et il a même été qualifié de Behémoth [80] [Bruning et Collier 2007]. Cet article synthétise l'ampleur et l'ambition d'une telle réalisation :

- 22 km de sections courbes divisées en 8 secteurs, chacun peuplé de 46 cellules constituées d'une part de 6 aimants dipolaires supraconducteurs de 16 m de long, pesant chacun 35 tonnes, et destinés à courber les trajectoires des particules, et d'autre part de deux aimants quadrupolaires supraconducteurs destinés à focaliser le faisceau, soit un total de 1232 dipoles et plus de 400 quadrupoles, sans compter tous les correcteurs sextu-, octo-, déca-, dodécapolaires.
- 5 km de sections droites contenant des triplets d'aimants de focalisation fine, des alimentations supraconductrices, et selon les endroits, des cavités accélératrices créant un champ électrique pulsé à 400 MHz permettant d'accélérer des paquets de cent milliards de protons ; des collimateurs destinés à nettoyer le faisceau ; des dispositifs de diagnostics et de positionnement ;
- les 27 km offrant pour la circulation des faisceaux deux tubes parallèles à l'intérieur duquel, afin d'éviter les collisions avec les molécules de gaz et d'augmenter la durée de vie des faisceaux, règne un vide ultra-poussé inférieur au dix millième de milliardième de la pression atmosphérique, soit dix fois moins encore que sur la Lune ;
- le tout alimenté par une installation cryogénique de 144 kW permettant de porter 10'000 tonnes d'azote à 80 K (–193 °C) et 80 tonnes d'hélium à la température de 1,9 K avec une stabilité de 0,1 K le long de chaque secteur de 3,3 km, la masse refroidie par cet hélium à cette température étant de 37'000 tonnes (soit environ 5 fois le poids de la charpente métallique de la tour Eiffel), ce qui fait du LHC le plus grand réfrigérateur du monde.

Un seul exemple, un tout petit peu plus détaillé, donnera la mesure de la complexité technologique requise. Revenons un instant en arrière, sur les paramètres définis par les physiciens, qui désirent atteindre une énergie au centre de masse de 14 TeV. Ceci implique que les particules qui circulent dans l'accélérateur soient courbées. La formule de Lorentz impose de leur appliquer un champ magnétique suffisant, pour le LHC proche de 9 teslas. La formule de Laplace dit alors qu'il faut un courant de 20'000 ampères pour créer un tel champ. Un aimant conventionnel soumis à un tel courant fondrait immédiatement en raison de l'effet Joule (propor-

80. Pour le plaisir de gourmet de citer la *Bible* dans une thèse de génie industriel, voici comment y est évoquée cette bête mythique (que l'on peut assimiler à une sorte d'hippopotame géant, tout comme le Léviathan est une affabulation du crocodile du Nil) :

« Voici donc Behémoth devant toi ! Comme le bœuf il mange de la verdure.

Vois donc sa force en ses reins et sa vigueur dans les muscles de son ventre !

Il raidit sa queue comme un cèdre, les nerfs de ses cuisses sont noueux,

ses os sont des tubes d'airain, ses membres sont comme une barre de fer !»

(Livre de Job, XL, 15-18, trad. E. Dhorme, Pléiade, Gallimard, 1959, p. 1340.)

tionnel au carré de l'intensité). D'où le recours à la supraconductivité : en dessous d'une certaine température, certains alliages, en l'occurrence de niobium et de titane, acquièrent la propriété quantique particulière [Onnes 1911 ; Meijer 1994] de conduire l'électricité sans aucune résistance, donc sans aucune déperdition par effet Joule. Seul souci : cette température limite, dite de transition résistive, est de 4 K, soit –267 °C. Ce qui impose de créer autour des conducteurs un froid poussé, un vide d'isolation, ainsi qu'une structure mécanique capable de résister aux forces de Laplace tendant à faire exploser l'aimant par répulsion réciproque des conducteurs et atteignant la valeur considérable de 200 kN par mètre linéaire (l'équivalent de 20 tonnes pesant sur chaque mètre).

Il faudrait encore parler du complexe d'injection, qui remonte à la source, au synchrotron à protons de 1959, évoquer le pilotage du faisceau, les dispositifs de protection, et toute la dynamique de conception, de réalisation et d'installation. L'ouvrage *The Large Hadron Collider: a Marvel of Technology* [Evans 2009], ainsi que l'article de synthèse *The LHC* [Evans et Bryant 2008] donnent de très nombreux détails sur cette réalisation à la complexité considérable, qu'il serait vain de vouloir présenter et simplifier davantage. J'aurais également souhaité évoquer ici en détail les aimants dipolaires supraconducteurs, et en particulier tout le travail sur la logistique d'installation (non abordée dans la littérature citée), et montrant comment le plan de charge d'une grue de 220 tonnes de capacité peut dépendre d'un coefficient “bêta étoile” β* mesuré définissant la qualité du champ magnétique.

J'ai parlé plus haut de *re*démarrage du LHC. C'est qu'en effet, quelques jours seulement après son premier démarrage le 10 septembre 2008, le LHC a connu les affres d'un rodage douloureux. L'une des innombrables soudures d'interconnexion de deux aimants supraconducteurs (Figure 2.6) est passée au-dessus de la transition résistive, provoquant une vaporisation d'hélium qui a dépassé les capacités d'évacuation des soupapes prévues à cet effet. Il s'en est suivi une montée en pression, puis une explosion qui a provoqué des dégâts très importants.

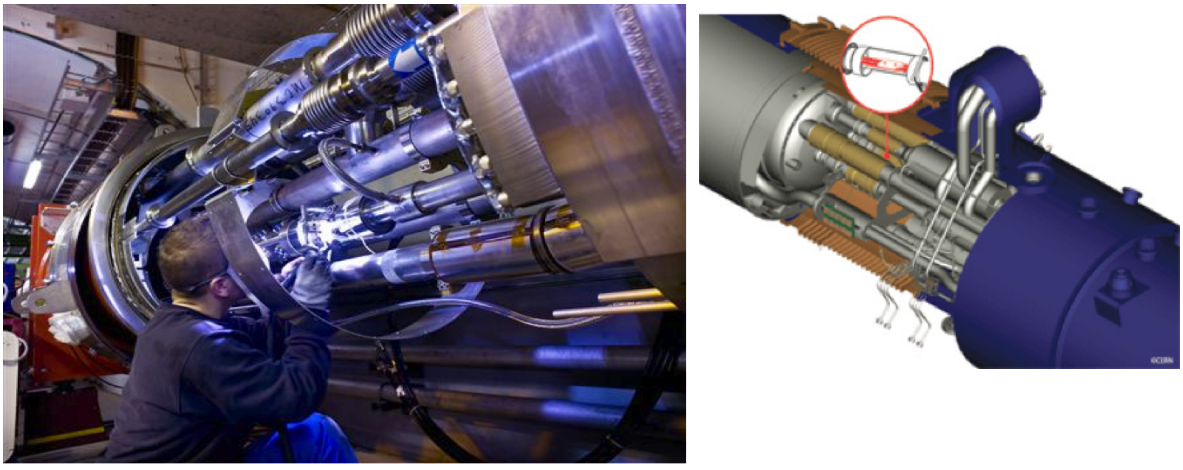


Figure 2.6: Photo et modèle CAO correspondant de l'interconnexion entre aimants du LHC

Communiqué de presse CERN PR14.08, 16.10.2008

Comme le signala le coordinateur du programme LHC : « *Around 11:30, there was a power cut at point 3 and a multi-magnet quench in sector 34. Certainly no beam today. Possibly a multi-day stop.* » [81]

81. « Vers 11:30, il s'est produit une coupure de courant au point 3 et une transition résistive de plusieurs aimants dans le secteur 3-4. Probablement pas de faisceau aujourd'hui. Possible que cet arrêt soit de plusieurs jours. » Courriel du *LHC programme coordinator* aux *LHC run coordinators*, “*Major event at point 3*”, 19.09.2008, 12:20, transmis à la collaboration ATLAS à 14:34.

Le « *multi-day* » a hélas tourné au *multi-months* [82], et entraîné un retard de plus d'une année sur le démarrage effectif des prises de données pour la physique : ce n'est qu'en mars 2010 que la physique a réellement commencé.

2.5.2 Détecter

Maintenant que nous avons entrevu la manière et le dispositif nécessaires pour provoquer la collision des protons, voyons justement l'exploitation qui en est faite, à savoir l'observation des résultats de ces collisions dans des détecteurs dédiés. Grâce au collisionneur LHC, on sait créer tous les 50 milliardièmes de seconde des collisions entre quelques-uns des cent milliards de protons que contiennent chaque paquet, et dont l'énergie est de 3,5 TeV. Pour peu que le faisceau soit assez concentré, on satisfait donc les deux principaux paramètres espérés par les physiciens : énergie et luminosité. Maintenant, il s'agit de détecter le résultat de ces collisions, donc de placer autour du point d'interaction un dispositif adapté : le détecteur.

Pour des raisons de validation scientifique des résultats, ce ne sont en fait pas un seul, mais deux détecteurs qui sont mis en place. Si le premier des deux trouve un résultat, celui-ci ne sera validé qu'à la condition que le deuxième le retrouve, et ce indépendamment. C'est ainsi que nous serons amenés à parler de stratégies collectives [Yami, Nicquevert et Nordberg 2006] et de *coopétition* [83] : une collaboration dans la compétition, aucun ne pouvant réussir sans l'aide de l'autre, même si chacun souhaite décrocher la primeur de l'obtention du résultat. L'histoire de la physique des particules est emplie d'anecdotes parfois croustillantes sur ces concurrences plus ou moins amicales : Ting, Richter et la découverte simultanée de la particule J/ψ dans les années 1960, Gargamelle et l'expérience américaine concurrente E1A dans les années 1970 [Galison 2002], la course entre UA1 et UA2 pour la découverte des bosons W et Z au début des années 1980 avec les « *rêves de Nobel* » de Carlo Rubbia [Taubes 1986]… ou plus récemment, la fièvre autour des premiers signes du Higgs en novembre 2000, lors des toutes dernières heures de fonctionnement du LEP. Voici le témoignage de Peter Igo-Kemenes, physicien allemand détaché au CERN sur l'expérience OPAL :

> *Poussés par un sain esprit de compétition, les équipes des différentes expériences s'observaient de près, notamment quand le LEP fut poussé vers des énergies de plus en plus hautes. De temps en temps, les données signalaient une anomalie ne correspondant pas aux prédictions. Ces observations déclenchaient une activité fébrile des quatre expériences, personne ne souhaitant « rater le coche ». La plupart de ces anomalies ne résistait pas à un examen poussé. Quelques-unes ont toutefois survécu et pourraient encore se révéler être les premiers signes d'une physique au-delà du Modèle Standard. C'est l'étude de ces anomalies qui a décidé à coopérer plus étroitement. Des groupes de travail communs ont été constitués pour assurer la combinaison statistique des données, et obtenir des résultats entérinés par l'ensemble de la communauté.* [CERN 2004, 186]

Pour le LHC, les deux expériences dites généralistes sont ATLAS et CMS, placées respectivement aux points 1 et 5 du LHC (respectivement aux points inférieur et supérieur de la Figure 2.1 p. 41, plus clairement repérables sur la Figure 2.7. Ces deux expériences sont indépendantes, basées sur des approches différentes, utili-

82. Cet épisode a été traité avec un humour assez impertinent dans un petit chant de Noël parodique, *The twelve days of LHC*, écrit par les physiciens du détecteur interne d'ATLAS (décembre 2008) : « *On the twelfth day of running Lyn Evans* [le chef du projet LHC] *sent to me / 12 months delay / 11 press releases / 10 magnets a leaping / 9 students crying / 8 months of cosmics / 7 splash events / 6 tons of Helium / 5 TeV / 4 collimators / 3 long shifts / 2 Telsa field / and* ***a*** *proton in the LHC.* »

83. Pour un développement de cette notion, voir § 10.4 p. 297.

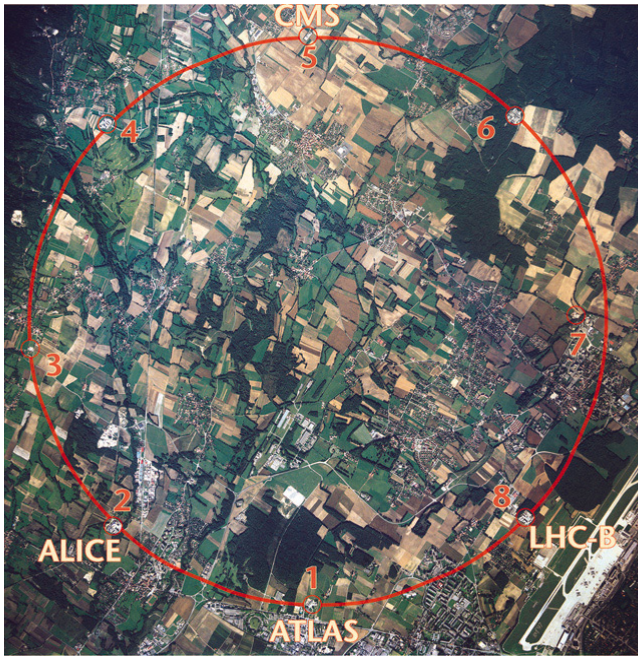


Figure 2.7 : Schéma en vue aérienne des zones expérimentales du LHC

En bas à droite, les pistes de l'aéroport de Genève

sant des technologies de pointe dans leur conception. Il faut donc souligner à quel point il est important que ces technologies soient complémentaires. Ainsi, la détection et la mesure des muons reposent sur un champ magnétique généré dans le cas d'ATLAS par un aimant toroïdal à air, alors que CMS utilise un solénoïde à culasse en acier. Pour ce qui est du trajectographe interne, ATLAS recourt à des détecteurs au silicium ainsi qu'à des détecteurs à gaz, alors que CMS n'exploite que des détecteurs au silicium. Quant à la mesure des énergies électromagnétiques, elle est basée sur une technologie avec argon liquide pour ATLAS, tandis que CMS a choisi des cristaux scintillants. Les erreurs systématiques de ces différentes technologies étant différentes, si les deux détecteurs voient un signal identique, la confiance en la réalité sous-jacente du phénomène détecté en est considérablement augmentée. [84]

ATLAS constitue notre terrain d'observation des cas de la partie II de la thèse ; nous allons donc nous concentrer sur ce détecteur, sachant que de nombreuses similitudes de principes persistent avec CMS [85] et avec les autres types de détecteurs de particules. Là encore, nous nous limiterons au strict nécessaire pour notre propos, renvoyant pour de plus amples informations à des ouvrages plus approfondis. On consultera ainsi le remarquable et très illustré *Exploring the Mystery of Matter* [Lowery, Marcelloni et Smith 2008], ainsi que l'original pop-up *Voyage to the Heart of Matter* / livre animé *Voyage au cœur de la matière* [Radevsky et Sanders 2010 ; Sanders et Radevsky 2011]. On trouvera enfin en français un petit livre assez synthétique sur l'expérience ATLAS [Vannucci 2007], qui parle toutefois davantage du contexte global en termes de physique que de la conception même du détecteur.

La principale source de synthèse sur le détecteur est constituée de l'article [ATLAS collaboration, Aad et al. 2008], article volumineux sobrement intitulé *The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider.* Je souhaite m'attarder un instant sur sa forme : un article de 437 pages, qui constitue en fait tout un volume d'une série spéciale [86] du *Journal of Instrumentation* consacré au LHC et à ses expériences. La liste de ses auteurs est bien représentative de l'évolution sociologique des collaborations de physique [Galison 2003 ; Biagioli et Galison 2003] : elle commence par la mention « *The ATLAS collaboration* », et se poursuit par l'énumération

84. Deux autres expériences importantes sont également placées respectivement aux points 2 et 8 : Alice (spécialisée dans la détection des collisions d'ions lourds), et LHCb (destiné à l'observation des quarks dits « beauté »). Pour plus de précisions, voir les § 5.4 et § 5.5 de [Evans 2009].

85. On pourra consulter *The Compact Muon Solenoid Experiment at the LHC. Images of Assembly and Installation*, disponible en ligne : https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=4593

86. http://iopscience.iop.org/1748-0221/focus/extra.lhc

des noms et affiliations des presque *trois mille* co-auteurs (2927 exactement), liste qui occupe les 22 premières pages de l'article ! [87] Cela en dit déjà long, sous l'angle bibliométrique, sur l'ampleur de l'entreprise [Fenoglio 2010b].

Pour se faire une idée de la complexité technologique de l'expérience ATLAS, on peut admirer la photographie présentée à la Figure 2.8. Comment décrire simplement pareil dispositif ? Comment faire ressentir la prouesse technique de concevoir, de construire et d'assembler pareille machine ? Comment en expliquer l'architecture, la structure, la finalité, l'articulation ? Ce qui suit (n')en donnera (qu')une (pâle) image [88].

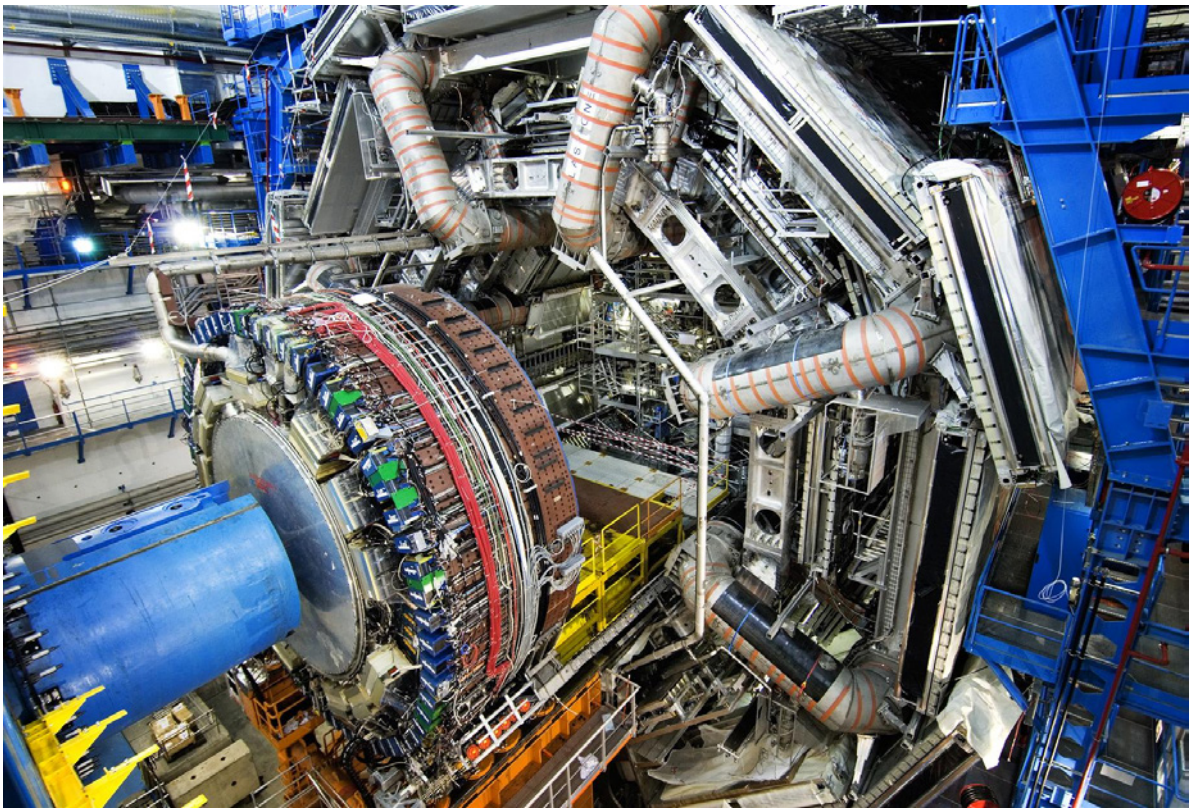


Figure 2.8 : Vue partielle du détecteur ATLAS en cours d'installation

Photo C. Marcelloni, CERN-EX-0702016_10, octobre 2007

Comme on l'a évoqué plus haut à propos de la complexité scientifique, un détecteur tel qu'ATLAS doit offrir des technologies capables de mesurer les trajectoires individuelles et multiples, ainsi que les énergies et les quantités de mouvement des particules. Afin de réaliser ces mesures, il faut courber les trajectoires de ces particules, ce qui exige des champs magnétiques puissants. Les critères de physique pour la conception d'ATLAS sont donc : haute précision, rapidité, redondance et herméticité (couverture de l'ensemble de l'angle solide). Ce dernier point impose des contraintes sur l'intégration [89] telles que la minimisation des points aveugles,

87. L'article « *Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC* » annonçant la découverte d'une nouvelle particule, a été soumis le 31 juillet 2012 aux *Physics Letters B* ; il comporte 25 pages, et il est suivi d'une liste de plus de 14 pages d'auteurs et affiliations. C'est évidemment pour moi un grand honneur d'y figurer. Il a paru le 17 septembre 2012 [Aad et al. 2012], juste à temps pour figurer ici…

88. Je remercie l'ancien porte-parole de la collaboration, Peter Jenni, pour ses synthèses excellentes, et je m'appuie ici sur celle qu'il nous a offerte pour le chapitre 1 « *What is ATLAS?* » de [Boisot et al. 2011].

89. Nous y reviendrons en détail aux chapitres 5 et 6.

ces zones dénuées de capteurs en raison par exemple des passages de câbles, ou la prédilection pour des matériaux peu denses à proximité du point d'interaction.

Le LHC est une machine dite de découverte, et non de confirmation de théorie. Il est donc important que les détecteurs puissent être également sensibles à l'émergence de phénomènes nouveaux. De façon à couvrir le plus large spectre possible de détection, le détecteur a été conçu pour maximiser son potentiel de découverte, sans pour autant sacrifier sa capacité à effectuer des mesures de très haute précision sur les particules déjà connues.

> *The detector is probably one of the most complex pieces of machinery ever built. Its design is the fruit of a slow process of scientific and technological evolution that was marked by many trials and errors. Sophisticated software engineering tools were used to produce over 3700 engineering assemblies and 10 million functional elements.* [90]

Le détecteur est représenté schématiquement à la Figure 2.9. Il est composé des sous-systèmes suivants :

- un *système magnétique* qui courbe les trajectoires de particules, en particulier les muons (cousin de l'électron, en plus lourd) afin de permettre leur identification et la mesure de leurs propriétés. Le système d'aimants supraconducteurs d'ATLAS est constitué d'un solénoïde qui fournit un champ magnétique de 2 tesla au trajectographe interne. Il est entouré par un système de trois grands toroïdes à air d'une intensité magnétique de 3 teslas sur une longueur de près de 26 m et un diamètre de plus de 22 m.
- un *trajectographe interne* qui enregistre les trajectoires directement issues du vertex, le point de collision. Ce sont près de mille particules qui émergent de chaque point de collision, avec plus de 15 collisions à chaque croisement de paquet toutes les 50 nanosecondes, ce qui crée une densité de traces extrêmement élevée. Il faut donc atteindre un niveau de résolution élevé, ce qui impose une granularité fine des détecteurs (typiquement inférieure au millimètre pour la première couche, et de quelques millimètres maximum sur l'ensemble du volume). Plusieurs technologies, au silicium ou avec détecteurs à pailles (par ionisation de gaz) sont utilisées ici [91]. Cet ensemble dont la structure est en composites [Nicquevert et Hauviller 1994] et très dense en canaux de détection, long de 7 m pour un diamètre de 2,8 m, ne pèse pourtant que 5 tonnes.
- un *calorimètre* qui mesure l'énergie des particules. Les gerbes électromagnétiques sont détectées par le calorimètre à argon liquide, contenu dans trois gros bidons de plus de 250 tonnes, contenant un total de 175'000 canaux de lecture. Les gerbes hadroniques sont détectées et absorbées par les calorimètres à tuiles, constitués d'un entrelacs de tuiles d'acier et de matériau scintillant. Les calorimètres complets sont extrêmement lourds : plus de 1600 tonnes pour la partie centrale, près de 950 tonnes pour chacun des deux calorimètres latéraux.
- enfin, un *spectromètre à muons* dont l'objectif est de mesurer les trajectoires des muons, seules particules capables de traverser les mètres d'acier qui ont précédé. Il est constitué de près de 1500 chambres, de quatre types différents, avec des chambres de déclenchement et des chambres de mesure basées pour l'essentiel sur une technologie à ionisation de gaz semblable à celle des détecteurs à paille du trajectographe (la paille de polyimide Kapton® étant ici rempla-

90. « Le détecteur est probablement l'une des machines les plus complexes qui ait jamais été construite. Sa conception est le fruit d'un long processus d'évolution scientifique et technologique qui a été marqué par de nombreux essais et erreurs. Des outils d'ingénierie assistée par ordinateur sophistiqués ont été utilisés pour produire plus de 3700 assemblages d'ingénierie et 10 millions d'éléments fonctionnels. » [Jenni, in Boisot et al. 2011, 14]

91. Pour plus de détails, voir notre publication sur la question de la vibration des fils de ces détecteurs à paille [Lucas et al. 2002]. C'est le tout premier système sur lequel j'ai travaillé, dès fin 1992.

cée par un tube en aluminium très fin). Le champ magnétique fourni par le système toroïdal délivre un champ approximativement orthogonal aux trajectoires des muons. Les chambres sont alignées entre elles à mieux que 30 microns sur des longueurs de plus de 40 m, ce qui n'est pas non plus un mince exploit.

Intégrer et installer un pareil monstre n'est pas non plus des plus simples [92]. Ainsi que le déclare son coordinateur technique Marzio Nessi, « *ses dimensions et sa complexité sont impressionnantes – 47 mètres de long* [93]*, 25 mètres de diamètre pour un poids de 7 000 tonnes. Une fois entouré de son système de support, il sera difficile de l'insérer dans la caverne souterraine de 53 mètres de long, 30 mètres de large et 33 mètres de haut. En tant que coordinateur technique d'ATLAS, il m'incombe d'organiser cet effort et de m'assurer qu'il est mené à bien en toute sécurité et dans les temps impartis.* » [CERN 2004, 203].

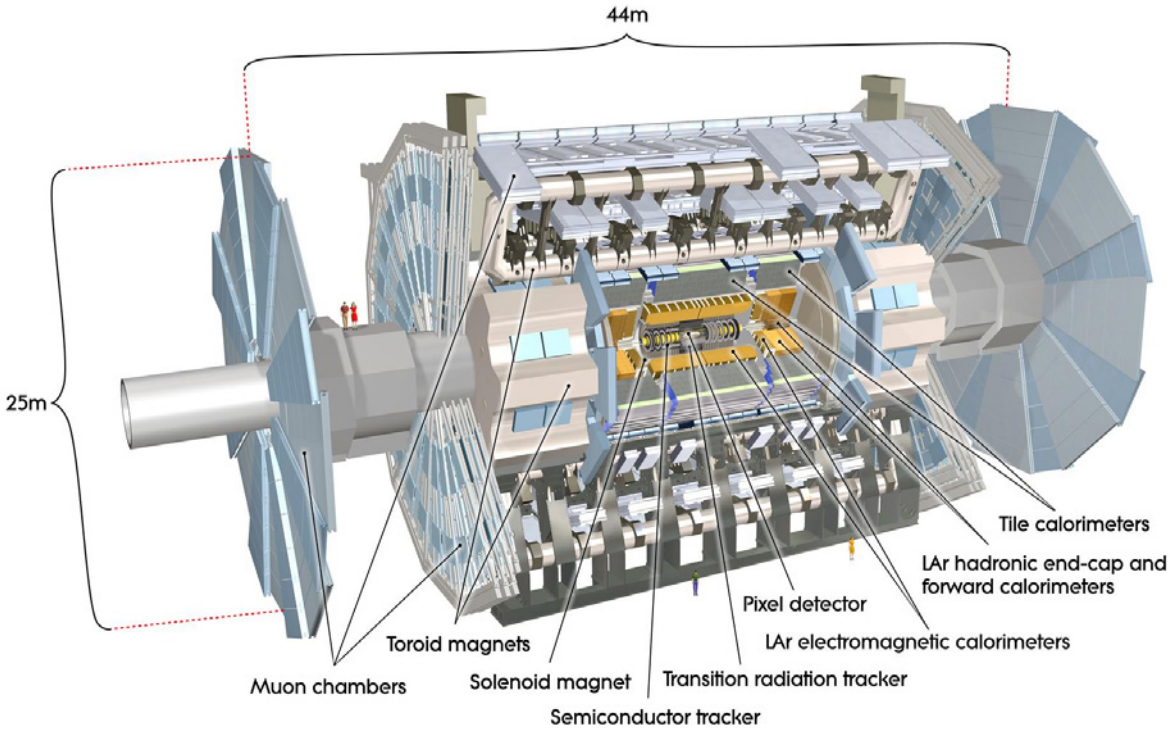


Figure 2.9 : Vue schématique du détecteur ATLAS

Photo J. Pequenao, CERN-GE-0803012_01, image CAO 3D issu des bureaux d'études du CERN

En conclusion (et en écho au Premier clamot, p. 25), citons l'opuscule *ATLAS, le nouveau défi des particules élémentaires*, qui synthétise élégamment la finalité, l'organisation et la constitution d'ATLAS :

> *Les cathédrales médiévales résumaient la connaissance de l'époque : la zoologie dans la statuaire, la mécanique dans l'équilibre des structures, l'astronomie et les mathématiques dans les horloges. On exposait ainsi la synthèse du savoir scientifique le plus avancé alors. ATLAS représente aussi une culmination des connaissances actuelle : le détecteur met en œuvre les technologies les plus performantes pour une recherche qui frise l'ésotérisme.* [Vannucci 2007, 119]

92. Nous verrons dès le chapitre 3, mais surtout aux chapitres 5 et 6 (pour ce qui est de l'intégration et de l'installation) et 7 (pour la structure support) comment se décline cette mission sur le terrain.

93. La vue schématique de la Figure 2.9 indique 44 m, qui est le chiffre officiel.

2.5.3 Traiter les données

Il ne suffit pas de détecter les trajectoires des particules, encore faut-il enregistrer et traiter les gigantesques quantités de données. Qu'on y songe : chaque collision génère près de mille particules (voir la Figure 2.10). Chacune des trajectoires va rencontrer plusieurs dizaines de canaux de détection, dont le déclenchement doit être synchronisé à bien mieux que la picoseconde (millième de milliardième de seconde). Et il survient près de quinze collisions à chaque croisement de paquets toutes les 50 nanosecondes… Les flux de données sont considérables, le temps réel n'y suffit pas. La reconstruction de la mesure présentée à la Figure 2.10 donne une petite idée de la complexité de ce traitement.

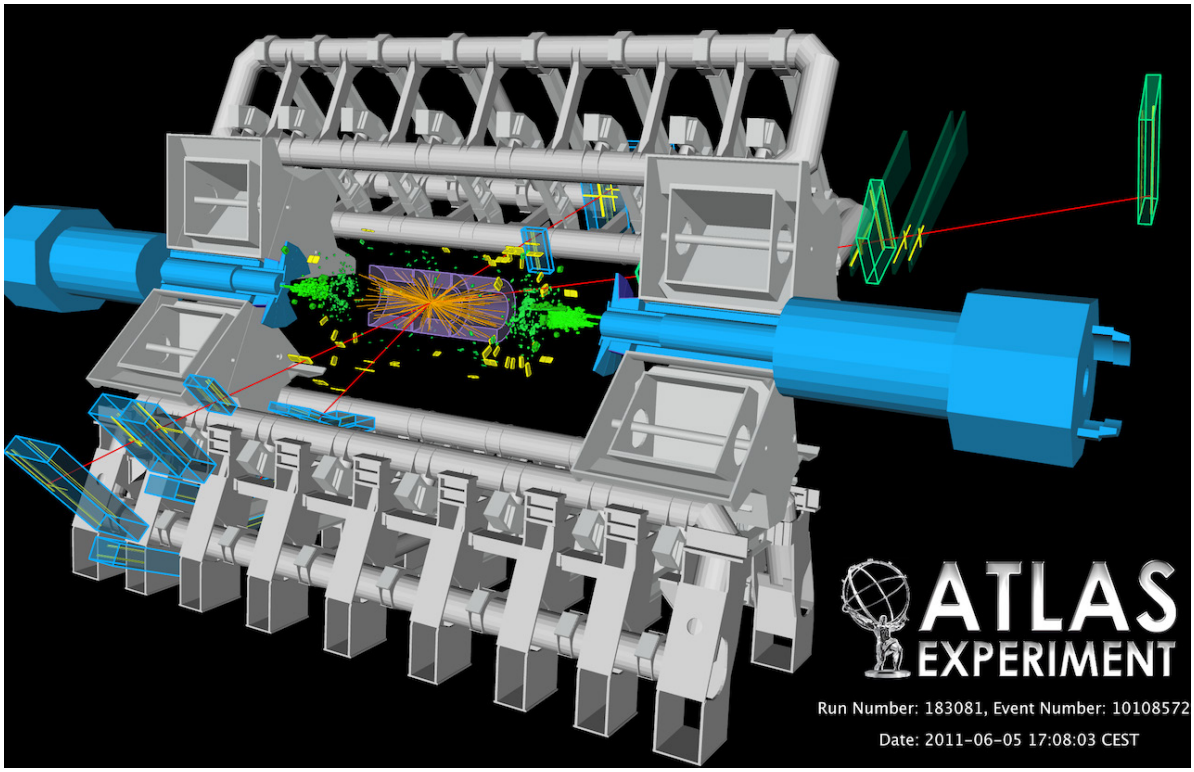


Figure 2.10 : Reconstruction d'un événement réel

Ici, un événement candidat de désintégration d'un boson de Higgs en quatre muons. Document atlas2011_4mu_run183081_evt101085723 du 5 juin 2011.

Cette image est très riche. Elle correspond à ce que l'on appelle un *golden event*, un événement en or (encore candidat, à ce stade). On notera l'accumulation des traces issues du point d'interaction (en orange) dans le trajectographe interne, les gerbes électromagnétiques (en vert) et hadroniques (en jaune), puis les reconstructions des traces rouges, qui viennent déclencher chacune trois couches de chambres bleues (une série de chambres se trouve en bas à gauche dans les pieds support, bien visibles sur cette image).

Ces préoccupations de traitement des données n'étant pas au cœur de notre sujet, nous ne faisons que les évoquer brièvement. Retenons qu'une grande partie des signaux est analysée par l'électronique embarquée (qui doit être résistante aux rayonnements ionisants), et que seuls 10 % environ des signaux sont transmis aux niveaux d'acquisition supérieurs. Dans ce système se trouvent donc incorporées un grand nombre d'hypothèses *a priori*, qui sont parfois la source d'exclusions non désirées d'événements qu'il aurait fallu conserver [Galison 2002, chap. 4]. En fin de

compte, le flux de données se trouve réduit à 1,3 Mo par événement 200 fois par seconde (ce qui fait encore un débit honorable et constant de 350 Mo/s). Le dépouillement se fait ensuite hors ligne.

Un dernier mot. Comment mettre instantanément à disposition de l'ensemble des collaborateurs d'une expérience les résultats ainsi recueillis ? C'est simple : en inventant le Web… Une formidable aventure [Berners-Lee 1999], qui a porté les retombées de la physique des particules loin de ses bases ! Il faudrait aussi parler de la *worldwide computing Grid*, offrant à chacun, où qu'il se trouve, des capacités de traitement identiques à celles disponibles au CERN même [94].

2.6 Complexité organisationnelle : gérer de grands projets scientifiques

Dans la section précédente, nous avons présenté la considérable complexité technologique d'un grand projet tel que le LHC et ses détecteurs. Tout est couplé dans ce projet… Un détecteur sans accélérateur ne peut guère observer que quelques rayons cosmiques, et un accélérateur sans détecteur présenterait bien peu d'intérêt.

Nous allons nous intéresser à la quatrième et dernière des complexités annoncées au Tableau 2.1 p. 48, la complexité organisationnelle, correspondant à l'aspect ontologique de notre système. Car de même que LHC et détecteurs ne vont pas l'un sans l'autre, CERN et Collaborations ne peuvent se passer les uns des autres. C'est la raison d'être du CERN que de produire et de fournir des faisceaux de particules aux expériences, et les Collaborations de physique ne peuvent pas mettre en œuvre leur détecteur sans l'appui logistique et le statut juridique du CERN.

L'une des complexités particulières à ces projets est leur durée : on parle ici de dizaines d'années, c'est-à-dire d'une proportion importante d'une carrière de collaborateur. L'impact humain individuel de tels projets est donc considérable, et en retour influe sur le mode d'organisation. Nous allons présenter quelques éléments de cette articulation entre l'organisation du CERN, relativement stable, et la structuration des expériences, relativement dynamique.

Commençons par le CERN, que nous allons observer du point de vue de sa structure hiérarchique, en répondant à quelques questions élémentaires. Comment s'organise la hiérarchie, en combien de niveaux ? Qui est superviseur de quelles unités ? Qu'est-ce qu'un groupe par rapport à une section ou un département ? Quelles sont les relations entre les différentes unités organisationnelles ? Comment s'articulent-elles pour remplir la mission globale du CERN ? Quelles sont les entités extérieures au CERN avec lesquelles les Cernois sont amenés à collaborer ? Quels sont les types d'emplois ? Comment s'opèrent les réorganisations structurelles, à quelle fréquence et selon quelle dynamique ? La structure du CERN connaît une évolution régulière, en particulier parce que, tous les cinq ans [95], un nouveau Directeur Général est nommé, et qu'il introduit à son entrée en fonction une nouvelle organisation. Il existe toutefois des constantes : si leur périmètre évolue, ce sont toujours les mêmes types d'unités organisationnelles qui constituent les éléments de base : divisions (devenus départements en 2004), groupes et sections.

2.6.1 Organigramme du CERN

Le CERN, organisation intergouvernementale, est géré par un Conseil où sont représentés chacun des gouvernements des pays membres. Les membres de ce Conseil sont au nombre de deux par pays, l'un étant un diplomate, l'autre un haut

94. Voir Hoffmann et al., chap. 12 « *ATLAS and e-Science* », in [Boisot et al. 2011].

95. Des exceptions sont possibles. La plus récente est survenue lors de la rédaction de cette thèse : le DG actuel (2012) a été prolongé de deux ans lors du Conseil du CERN de mars 2012, son mandat s'étendant donc jusqu'à la fin 2015, soit à la reprise du fonctionnement du LHC après le LS1 (*Long Shutdown* n°1).

scientifique. C'est ce Conseil qui nomme le DG (le Directeur Général), qui entérine la structure organisationnelle proposé par le DG, et qui nomme le personnel aux postes supérieurs.

La plupart du temps, la structure comporte des secteurs : scientifique, accélérateurs, technique, administratif. Pour illustrer le propos, on donne à la Figure 2.11 l'organigramme du CERN à la date du 1er janvier 2009. À la tête de ces secteurs figurent des Directeurs. Selon les mandats, le nombre de Directeurs varie de 3 à 8. Les chefs de très grands projets peuvent également émarger à ce titre. Chaque secteur est ensuite organisé en unités opérationnelles globales, appelées divisions jusqu'en 2003, et départements par la suite [96]. Chaque département est constitué d'un ensemble de groupes, subdivisés en sections. Les effectifs d'un département sont typiquement (pour donner un ordre de grandeur) de quelques centaines d'employés, les groupes de quelques dizaines, et les sections de 5 à 20 personnes. L'unité opérationnelle homogène la plus représentative sociologiquement est le groupe : on demande volontiers à quelqu'un à quel groupe il appartient.

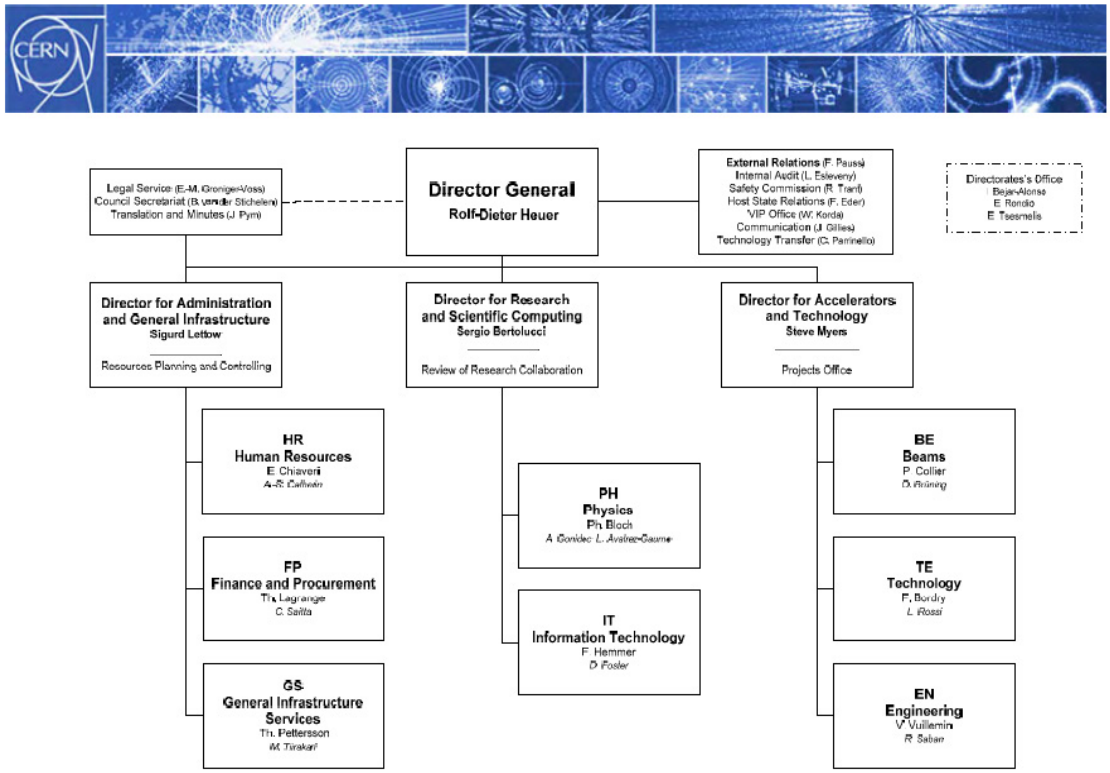


Figure 2.11: Organigramme global du CERN pour le mandat 2009-2013

La liste des divisions et départements concernés est donnée dans le Tableau 2.2. Les données à l'origine de cette synthèse proviennent du site « *Internal Organization of CERN - Historical Chart* » [97]. Ce site fournit des informations très précieuses sur l'historique de l'évolution organisationnelle du CERN, sans toutefois descendre, la plupart du temps, jusqu'au niveau du groupe. Or, c'est là que commencent à s'articuler l'histoire de l'organisation et l'histoire des acteurs. C'est un hiatus entre l'approche descendante globale (la manière dont le CERN est organisé) et l'approche montante locale (à quelle unité opérationnelle chacun appartient) :

96. Dans les années 1970, l'équivalent des secteurs ont été dénommés départements. Le contexte historique était différent, il évitera la confusion.

97. Archives CERN, http://library.web.cern.ch/library/Archives/internorg/internalorganization.html. Consulté en particulier en mars et en novembre 2011.

comment réconcilier les deux approches pour saisir une image complète et évolutive de cette structure, tout un champ reste ici à explorer. Lorsque cela sera utile à la compréhension des cas, j'y procéderai dans la mesure des données disponibles.

Sigle	*Nom de la division ou du département*	*Période d'existence*	*Sigle*	*Nom de la division ou du département*	*Période d'existence*
300G	300 GeV	1969–1975	LHC	Large Hadron Collider	1996–2002
AB	Accelerators & Beams	2003–2008	MI	Management Information	2000–2000
ADM	Administration	1955–1963	MPS	Machine Proton Synchrotron	1961–1975
AR	Accelerators Research	1961–1966	MSC	Machine Synchro-Cyclotron	1961–1975
AS	Administrative Support	1990–2003	MT	Mechanical Technologies	1990–1995
AT	Accelerator Technology	2003–2008	NP	Nuclear Physics	1961–1975
BE	Beams	2009–	NPA	Nuclear Physics Apparatus	1961–1968
CN	Computing & Networks	1990–1997	PE	Personnel	1964–1999
DD	Data Handling	1960–1996	PH	Physics	2004–
DSU	Directorate Services Units	2008–	PPE	Particle Physics Experiment	1990–1997
ECP	Electronics and Computing for Physics	1990–1997	PS	Proton Synchrotron	1955–1960, 1976–2002
EF	Experimental Physics Facilities	1976–1989	SB	Technical Services & Buildings	1955–1985
EN	Engineering (Department)	2008–	SC	Synchro-Cyclotron	1955–1959
ENG	Engineering (Division)	1961–1963	SC	Safety Commission Unit	2004–2008
EP	Experimental Physics	1976–1989, 1998–2003	SI	Synchrotron Injector	1968–1972
EST	Engineering Support and Technologies	1996–2003	SL	SPS + LEP & SPS + LHC	1990–2002
ETT	Education Technology Transfer	2000–2004	SPL	Supplies Procurement & Logistics	1997–2003
FI	Finance	1961–2008	SPS	Super Proton Synchrotron	1976–1989
FP	Finance and Procurement	2009–	ST	Soutien Technique / Technical Support	1986–2003
GS	General Infrastructure Services	2004–	STS	Scientific & Technical Services	1955–1959
HR	Human Resources	2000–	TC	Track Chambers	1960–1975
HS	Health Safety	1975–1982	TE	Technology	2009–
ISR	Intersecting Storage Rings	1966–1982	TH	Theory	1955–2003
IT	Information Technology	1998–	TIS	Technical Inspection & Safety Commission	1983–2003
LEP	Large Electron-Positron	1983–1989	TS	Technical Support	2004–2008

Tableau 2.2: Liste des divisions et départements du CERN depuis sa création

L'organisation peut être regardée selon deux axes : sa structure à un instant donné (axe synchronique), et son évolution dans le temps (axe diachronique). Afin d'illustrer mon propos, j'ai représenté graphiquement à la Figure 2.12 selon ces deux axes la structure du CERN, en se limitant au niveau de granularité division / département.

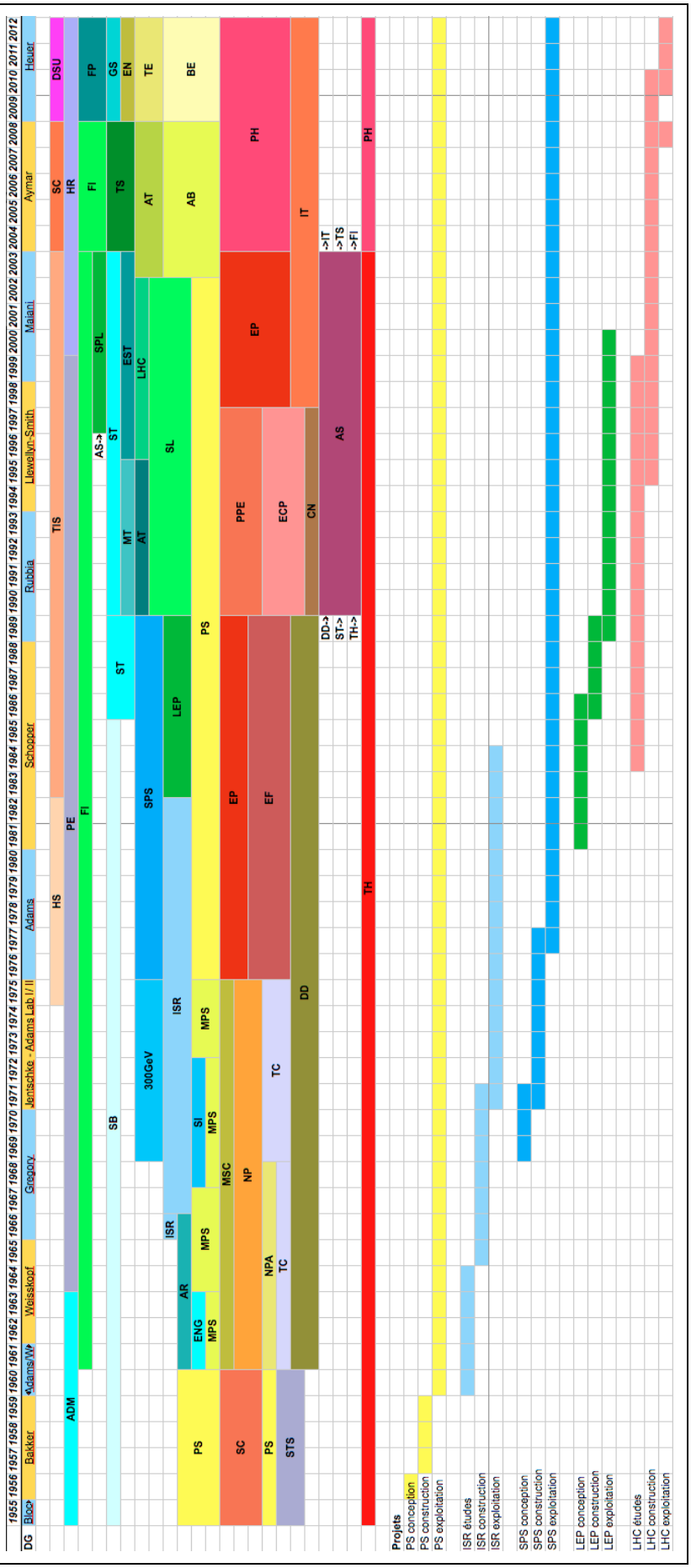


Figure 2.12: Évolution de la structure organisationnelle du CERN, de 1955 à 2012

Hypercarte établie à partir des archives du CERN http://library.web.cern.ch/library/Archives/internorg/internalorganization.html.

Cette représentation graphique est une sorte d'hyper-boussole en son genre. Elle sert en l'occurrence à tout acteur ou observateur de la structure pour connaître la position dans le temps et dans l'espace organisationnel des différentes unités opérationnelles impliquées dans l'action ou l'observation. Elle permet de s'y reporter pour repérer des trajectoires individuelles ou des évolutions organisationnelles [98].

J'ai ajouté aux informations sur la structure organisationnelle les repères temporels pour les projets principaux menés par le CERN depuis sa création en 1954 : PS (*Proton Synchrotron*, synchrotron à protons), ISR (*InterSection Rings*, anneaux d'intersection), SPS (super synchrotron à protons), LEP (*Large Electron Positron collider*, grand collisionneur d'électrons et de positons), et enfin LHC (*Large Hadron Collider*, le grand collisionneur de hadrons). Le CLIC (*Compact Linear Collider,* Collisionneur linéaire compact) est également mentionné. Il n'est pas rendu compte de la multitude d'expériences qui se sont déroulées (surtout jusqu'au démarrage du LEP), sans qu'on en trouve forcément d'inscription structurelle dans l'organisation. J'ai retenu pour la périodisation les définitions suivantes : l'étude (définition fonctionnelle et avant-projet) s'étend depuis l'accord de procéder (parfois difficile à dater) jusqu'à l'acceptation du projet par le Conseil du CERN ; la réalisation (incluant la conception détaillée, la construction et l'installation) s'étend jusqu'à la date du premier faisceau ; et enfin l'exploitation, qui s'étend jusqu'au dernier faisceau.

Quelques remarques apparaissent au vu de cette synthèse. Tout d'abord, une continuité depuis les origines, et une structuration sous-jacente ou explicite en trois grands pôles (qui constituent d'ailleurs les trois secteurs de la dernière restructuration de 2009) : accélérateurs, physique (détecteurs), et administration. Au travers même de la structure organisationnelle, on voit également apparaître les trois types principaux d'activités : activités de projets (conception, construction et installation) ; activités d'exploitation d'accélérateurs existants ; et activités de support. Et l'on constate qu'au fil des ans la structure évolue dans ses modes de regroupements, tantôt intégrant tel service à tel projet, tantôt regroupant telles ou telles activités. Cette évolutivité progressive de l'organisation associée à des facteurs de constance importants est liée au fait que le CERN produit en définitive exactement la même chose depuis sa création : des faisceaux et des détecteurs.

Il serait intéressant de s'interroger sur la rationalité qui préside à ces évolutions structurelles. Pestre, dans son étude sur les premières années du CERN, souligne les luttes d'influences entre les « *barons du CERN* », et le fait que le pouvoir du DG est largement contrebalancé par une communauté de *senior staff* :

> *Confronted with the Senior Staff, the successive CERN directions appear rather weak. More precisely, they seem to have avoided any head-on opposition, preferring systematically to abandon projects than to resort to authoritative measures. In some cases, one might argue, the direction should have imposed its choices against the particular interests of the Senior Staff or a part thereof. The usual answer at CERN to claims of this kind is of the dialectic of master and slave type, arguing that no one can rule against those whose task it is to carry out the orders, that the authority of a leader has to be based, first and foremost, on its voluntary acceptance by his men.* [99]

98. Idéalement, j'aurais souhaité représenter cette évolution en trois dimensions, afin que la coupe à une date donnée puisse fournir l'organigramme. La complexité de la représentation est hors de proportion avec l'intérêt de l'outil pour mon propos.

99. « Dans leur confrontation avec le personnel supérieur, les directions successives apparaissent plutôt faibles. Plus précisément, il semble qu'elles aient évité toute opposition frontale, préférant systématiquement l'abandon des projets plutôt que de recourir à des mesures autoritaires. Dans certains cas, on pourrait arguer que la direction aurait dû imposer ses choix contre les intérêts particuliers du personnel supérieur ou d'une partie d'entre eux. La réponse habituelle au CERN à des requêtes de ce type est celle de la dialectique du maître et de l'esclave, affirmant que personne ne peut s'imposer contre ceux dont la tâche est de d'exécuter les ordres, que l'autorité d'un chef doit être basée, en premier et avant tout, sur l'accord volontaire de ses troupes. » [Pestre 1988, 386]

Il convient donc de garder en tête que l'organisation structurelle du CERN, une "*adhocratie*" [100] en son genre, ne suffit pas à décrire les lignes de force qui animent son management : les influences sont mutuelles, multi-directionnelles et bien plus complexes que ce diagramme pourtant déjà complexe pourrait le suggérer.

2.6.2 Les organisations transversales (dites "*CERN-wide*")

L'organigramme présenté à la Figure 2.11 p. 65, et qui pourrait se décliner jusqu'à totale expansion, prend classiquement la forme d'un arbre. Il ne laisse donc pas apparaître les organisations transversales plus ou moins formelles, qui s'appuient simultanément sur différentes branches. On en distingue plusieurs types : les superstructures organiques, les organisations de projet, les comités interdépartementaux, et les *task forces*.

Les *superstructures organiques* couvrant plusieurs départements en constituent le premier type. On mentionnera en particulier la commission de sécurité, en charge de définir et appliquer la politique de sécurité au CERN. Le cas du *Project office*, structure au périmètre évolutif et dont le rôle est en particulier de définir des règles en termes d'assurance qualité qui soient homogènes pour l'ensemble des projets ou de promouvoir des bonnes pratiques, pourrait en constituer un autre.

Les *organisations de projet* elles-mêmes sont typiques de ces organisations transversales. Lorsqu'un projet prend des proportions telles qu'il mobilise des ressources importantes, ou qu'il représente une certaine criticité pour l'avenir du CERN, la tendance est de constituer une structure organique dédiée : dès 1955 pour le PS, en 1966 pour les ISR et en 1969 pour le projet intitulé "300 GeV" qui deviendra le SPS, et enfin en 1983 pour le LEP (avec des équipes largement originaires du projet ISR, qui venait de s'achever). Le LHC, qui constitue désormais le vaisseau amiral du CERN, a quant à lui bénéficié d'une structure organique dédiée dès janvier 1996, un peu plus d'une année après son approbation en décembre 1994. Il existe également de nombreux autres projets dont l'ampleur n'est pas telle, et qui néanmoins nécessitent de s'appuyer sur un éventail de compétences multidisciplinaires ; ils prennent alors la forme d'une structure transversale. L'émergence d'organisations de projets transverses formalisés sur plusieurs départements semble toutefois une évolution assez récente : c'est seulement à la fin des années 1990 qu'elles émergent en tant que telles [101].

Les *comités interdépartementaux*, organes de coordination réunissant, sur une thématique définie de type communauté de métier, les représentants de chaque département, constituent le troisième type d'organisations transversales. C'est à ce type qu'appartient le CAEC : *Computer Aided Engineering Committee*, comité en charge des questions stratégiques, financières et pratiques concernant le choix, la mise en œuvre et l'utilisation des logiciels d'ingénierie assistée par ordinateur.

Les *task forces* enfin, au périmètre très variable, sont des groupes *ad hoc* à durée de vie limitée, constitués pour résoudre rapidement un problème particulier, en général lié à une crise ou à un besoin urgent. Quelques-unes d'entre elles seront ont traité de la GDT : l'EDMS-TF (*task force* sur la définition du système de gestion de données techniques au CERN) en 1996-1997 : CAD-2000 (pour la spécification fonctionnelle du système de CAO) ; et la E2C-TF (*task force* pour la transition Euclid → Catia, en 2008-2009).

100. [Mintzberg 2004, 77].

101. P. Ninin, M. Vanden Eynden, « *Project Management as a Breakthrough at CERN* », Note ST-98-011, 1998.

2.6.3 Les expériences et les Collaborations de physique

L'hypercarte de la Figure 2.12 p. 67 ne rend compte que de l'organisation interne du CERN. Or, dès les années 1960 (et au plus tard avec la chambre à bulles Gargamelle), un nouveau type d'organisation se superpose, celui des Collaborations de physique. Il est important de détailler la nature de ces collaborations, en commençant par quelques éléments factuels et historiques [102].

a. Évolution vers les "mégacollaborations"

Dès les expériences du SPS (UA-1 et UA-2) à la fin des années 1970, la taille, la complexité et le coût des expériences ont dépassé la capacité du CERN à en assumer seul la conception et la construction. Ce sont donc des collaborations qui ont été mises en place, structures formelles légères qui permettent de fédérer les efforts de différents laboratoires et instituts au travers de l'ensemble de la communauté européenne de physique des particules. Ugo Amaldi, célèbre physicien italien, introduit, dans ses *Considerazioni sulla sociologia delle grandi collaborazioni in fisica delle alte densità di energia,* le terme de mégacollaboration :

> *Le spinte principali verso l'aggregazione di sperimentatori sempre più numerosi in megacollaborazioni sono state la necessità – imposta dai risultati di fisica accumulati degli anni – di aumentare la densità di energia delle collisioni, e la possibilità – aperta dal continuo sviluppo delle tecniche di accelerazione – di ridurre il costo per unità di energia impartita dagli acceleratori.* [103]

La structure des expériences a en effet considérablement évolué au cours du XX^{ème} siècle [104]. Dans les années 1920, c'était encore une physique « de la paillasse » avec un physicien assisté d'un ou deux techniciens. Déjà dans les années 1930 (avec Anderson, par exemple), on constitue de petites équipes. Après la seconde guerre mondiale, les équipes grossissent, et passent de quelques dizaines de personnes (Gargamelle), à une centaine (SPS), pour atteindre quelques centaines sur le LEP, et dépasser plusieurs milliers sur le LHC. Ainsi que le formule Amaldi, « *l'evoluzione cinquantennale delle aggregazioni di ricercatori – questa moderna forma di tribù – è stata di tipo tipicamente darwiniano, cioè lento e adattivo* » [105]. Nous retrouvons d'ailleurs ce terme de *tribu* dans l'analyse proposée par Boisot en termes de *Social Learning Cycles* [Boisot et al. 2011 chap. 2].

Au départ européenne, puis ouverte ponctuellement à des équipes plus larges, la communauté cernoise de physiciens expérimentateurs est devenue réellement mondiale. À cela deux raisons : d'une part la dissolution de l'Union soviétique fin 1991, entraînant une désorganisation de la science russe et la migration progressive de la communauté de physique des particules sur les expériences du CERN ; et

102. On se référera à la synthèse proposée par Knorr-Cetina [1999], *Epistemic Cultures*, chap. 7 « *HEP Experiments as Post-Traditional Communitarian Structures* », en particulier p. 159-166 (HEP signifie *High Energy Physics*).

103. « L'argument principal en faveur de l'agrégation d'expérimentateurs toujours plus nombreux en mégacollaborations vient de la nécessité – imposée par les résultats de la physique accumulés au fil des ans – d'augmenter la densité d'énergie des collisions, et de la possibilité – offerte par le développement continu des techniques d'accélération – de réduire le coût par unité d'énergie produite par les accélérateurs. » [Menzinger 1995, 52]

104. Lire à ce sujet *Ainsi s'achèvent les expériences. La place des expériences dans la physique du XX^{ème} siècle* [Galison 2002].

105. « L'évolution sur les cinquante dernières années du regroupement des chercheurs – cette forme moderne de tribu – est un état de type typiquement darwinien, à évolution lente et adaptative. » [Menzinger 1995, 53]

d'autre part l'abandon du projet SSC [106] en 1993 aux États-Unis. Il y aurait beaucoup à dire sur ces questions. Nous reviendrons au chapitre 7 sur le cas de la Russie, où ont été fabriqués les supports d'ATLAS. Quant au cas des États-Unis, ils fournissent en quelque sorte une borne supérieure au développement de la science lourde. Peter Galison résume ainsi la fin de l'évolution :

> *Given the spiraling size of detectors, from tabletop to bench, from the industrial worker to the cottage industry, from the physics factory to the national and international TPC/PEP-4/PEP-9, LEP and Fermilab machines, one can be forgiven for asking whether there is an end to the process of expansion. There is. […] Never built, the SSC detectors are the asymptote of scientific instrumentation, the limiting case of particle energy, collaboration size, budgetary expenditure, political commitment, and brute square mileage. […] There will not be projects of 100 000 scientists.* [107]

b. Organisation interne des collaborations

Même avec "seulement" quelques milliers de collaborateurs, la question de la gestion de tels projets qui s'étendent sur plusieurs dizaines d'années et sur plusieurs dizaines de pays se pose de manière tout à fait particulière et complexe. Nous aurons l'occasion d'illustrer dans la partie II la dynamique propre de ces Collaborations. Dans cette section consacrée à la complexité organisationnelle du CERN, nous nous limiterons à quelques éléments d'organisation interne de ces expériences nous permettant de définir les relations formelles et informelles entre ces entités. Nous parlerons ici d'ATLAS, ce qui s'en dira étant largement valable pour CMS et dans une large mesure pour les deux autres expériences du LHC, Alice et LHCb.

ATLAS est une entreprise globale. Comme le notent avec une certaine malice son ancien porte-parole Peter Jenni et son coordinateur des ressources Markus Nordberg, « *it is often quipped that, since, at any one time, somewhere in its vast and scattered realm, there will always be people working on the project, the sun never sets* [108] *on ATLAS* » [109]. La structure organisationnelle représentée schématiquement à la Figure 2.13 p. 72 reflète les trois axes qui ont façonné la Collaboration : la physique de l'expérience, le détecteur lui-même en tant qu'objet physique, et la culture de collaboration, autrement dit la manière dont les différents membres de la communauté travaillent ensemble et interagissent avec les partenaires de la Collaboration.

Chaque sous-système et chaque activité sont représentés à l'*Executive Board*, sorte de gouvernement d'ATLAS qui se réunit au moins mensuellement avec le management (porte-parole/*spoke-person*, coordinateur technique et coordinateur des ressources) pour discuter et prendre des décisions concernant les questions opérationnelles. Le coordinateur technique anime par ailleurs (à partir de 2001 – voir § 5.7.2 p. 146) un *Technical Management Board* qui réunit les représentants tech-

106. *Superconducting Super Collider*, le super collisionneur supraconducteur, projet américain alors concurrent du LHC. Pour plus de détails, voir [Kevles 1995] dont la préface entièrement consacrée à la question du débat politique autour du SSC, ainsi que le chapitre « *Armageddon in Texas* » [Fraser 1997, 159-174]. La fin du SSC est également l'objet d'un roman d'Herman Wouk, *A Hole in Texas*, Back Bay Books, 2004.

107. « Compte tenu de la taille sans cesse croissante des détecteurs, du bureau à la paillasse, de l'installation artisanale à la moyenne industrie, de l'usine de physique aux machines nationales et internationales du type de TPC/PEP-4/PEP-9, du LEP et du Fermilab, on nous pardonnera de demander s'il existe une fin à ce processus d'expansion. Il y en a une. […] Jamais construits, les détecteurs du SSC sont l'asymptote de l'instrumentation scientifique, le cas limite de l'énergie des particules, de la taille des collaborations, des dépenses budgétaires, de l'engagement politique et de la surface brute des terrains. […] Il n'y aura pas de projet avec 100 000 scientifiques. » [Galison 1997, 671-672]

108. Allusion à la formule : « *En mi imperio, no se pone nunca el sol* » : « *Sur mon empire, jamais le soleil ne se couche* ». Charles Quint, début du XVI^{ème} siècle.

109. « On plaisante souvent sur le fait que, vu qu'à tout instant, quelque part dans son vaste domaine disséminé, il y a toujours quelqu'un qui travaille sur le projet, le soleil ne se couche jamais sur ATLAS. » [Jenni, Nordberg et Boisot 2011, 23]

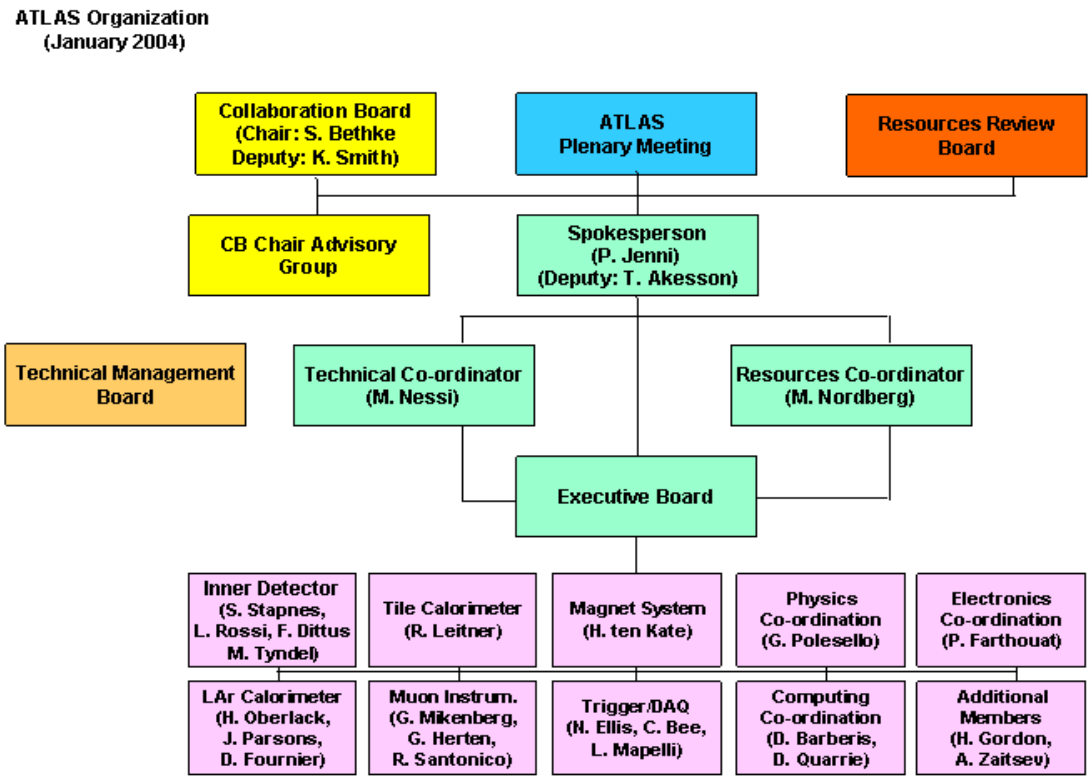


Figure 2.13 : Schéma de l'organisation d'ATLAS en 2004, période de construction

niques des sous-systèmes (chefs de projet ou ingénieurs projets), et le coordinateur des ressources prépare la réunion trimestrielle des représentants des « *funding agencies* » pour traiter des affaires financières. ATLAS est encore géré (au niveau politique des relations entre instituts) par un *Collaboration Board*, sorte de parlement, tandis que le *Plenary meeting* est la réunion qui rassemble l'ensemble des collaborateurs, sous forme d'un genre de forum en démocratie directe.

La collaboration ATLAS ne comporte ni président ni PDG ni même, encore plus étonnant, de chef de projet. Il est très révélateur de l'esprit même de ces collaborations que le titre officiel de la personne qui est élue chef (*leader*) de la Collaboration est un-e “porte-parole”. Celui ou celle-ci n'a en effet aucun pouvoir hiérarchique direct sur les quelques milliers de scientifiques (et ingénieurs) qui travaillent sur le projet. Chacun-e d'eux rend des comptes à son institution d'origine. Le rôle du porte-parole est de déléguer, de guider souplement, et sur demande des chefs de sous-systèmes ou des coordinateurs d'activités, d'arbitrer. Le style de leadership du porte-parole consiste avant tout à organiser des délibérations et des justifications rationnelles plutôt qu'à commander et ordonner. Les décisions importantes sont toujours prises de manière collégiale.

L'esprit qui anime la Collaboration fait que les manageurs de projet sont dénommés coordinateurs. Les scientifiques qui se succèdent sur ces positions de management les occupent pour favoriser la coordination horizontale entre les nombreux instituts et les activités au sein de la collaboration, plutôt que d'établir des sortes de liens de supervision avec leurs collègues.

> *In the project's construction phase, the working style was rather decentralized, emphasizing the self-management and consensus seeking that is made possible by the pursuit of commonly shared scientific goals and a shared understanding of how*

> *to achieve them. The latter is made easier by the fact that the architecture of the ATLAS detector reflects the physics that participating scientists are engaged in and committed to. The detector consists of several subsystems, each with its own internal structure. The structure of the ATLAS Collaboration's global organization broadly replicates in a* ***fractal fashion*** *that of each subsystem.* [110]

La complexité organisationnelle d'ATLAS tient donc non pas au formalisme, qui est en effet assez épuré, mais bien à la dimension informelle assumée de ce style de management dont la stratégie consiste à ne pas en avoir – ce qui n'est qu'apparence. On notera d'autre part les termes de self-management et de structure fractale, qui sont très évocateurs, nous y reviendrons au cours de la partie III.

Les expériences du LHC sont définies par un simple *Memorandum of Understanding* (*MoU*), document de quelques pages à peine qui donne le cadre de la collaboration, et définit la contribution de chaque partenaire institutionnel [111]. Pour ATLAS, ce sont plus de 140 laboratoires, universités et organismes de recherche, appartenant à près de 40 pays différents et dotés par plus de 40 agences de financement "*funding agencies*", qui apportent leur contribution à la collaboration [112].

c. *Relations entre CERN et collaborations*

Il est à noter que, dans la Figure 2.13 décrivant la structure organisationnelle de la collaboration, aucune relation explicite n'est mentionnée avec le laboratoire-hôte, le CERN. C'est une relation en partie informelle, par exemple entre le management d'ATLAS (constitué du porte-parole et des deux coordinateurs) et le Directeur de la recherche du CERN, et semi-informelle avec le chef du département de physique. En effet, en tant que partie prenante, le CERN est considéré comme un organisme comme un autre et parmi les autres [113] ; et les membres d'ATLAS qui sont également cernois dépendent d'un département, en général le département de physique.

Le CERN possède cependant des responsabilités propres, liées à son statut de laboratoire-hôte tel que défini par le *MoU* (article 7, se référant au document reproduit à son Annexe 11 : « *General Conditions for Experiments performed at CERN* » [114] datant de 1989) : il doit assurer gracieusement (sur son budget propre) la fourniture des infrastructures nécessaires, à commencer par le faisceau de particules lui-même, bien entendu, ainsi que les cavernes souterraines et installations de base, bâtiments et tous réseaux techniques. Le CERN conserve également une responsabilité et un droit de regard sur les questions de sécurité. En dehors de ces questions, la Collaboration jouit d'une liberté d'organisation interne. Toutefois, comme le font remarquer Jenni et Nordberg, « *as ATLAS is not itself a legal entity but a collaborative network bound together by MoUs, it has to rely heavily on the many technical,*

110. « Durant la phase de construction du projet, le style de travail était assez décentralisé, mettant en valeur l'autogestion et la recherche de consensus qui est rendue possible par la poursuite d'objectifs scientifiques partagés en commun et une compréhension partagée de la façon de les atteindre. Ce dernier point est facilité par le fait que l'architecture du détecteur ATLAS reflète la physique auxquelles les scientifiques participants croient et pour laquelle ils s'engagent.. Le détecteur consiste en plusieurs sous-systèmes, chacun possédant sa propre structure interne. La structure de l'organisation globale de la Collaboration ATLAS reproduit **de manière fractale** celle de chaque sous-système. » [Jenni, Nordberg et Boisot 2011, 24] (C'est moi qui souligne).

111. En raison de son intérêt particulier, ce document sera analysé au chapitre 7, où nous montrerons à l'œuvre le mécanisme de contribution au fonds commun.

112. C'est dans le dessein de donner un simple ordre de grandeur, et non par méconnaissance, que je laisse de l'imprécision dans ces chiffres. En effet, les participations fluctuent, avec une tendance à l'augmentation maintenant que le détecteur est construit et fonctionne.

113. Tout au plus *primus inter pares*.

114. « Conditions générales pour les expériences réalisées au CERN ».

financial, procurement-related, and other administrative services provided by CERN as the host laboratory » [115].

Les expériences sont donc présentes au sein de l'organigramme du CERN à trois titres : en raison des activités de laboratoire-hôte qui impliquent un personnel dédié pris sur les effectifs du CERN (en particulier les départements et groupes support) ; à travers les équipes CERN travaillant pour la conception des expériences, au même titre que n'importe quel autre institut de la Collaboration ; et enfin, en tant que projet devant rendre compte de ses activités et se coordonner globalement avec l'accélérateur et les autres expériences.

> *ATLAS is not embedded in the host laboratory's organization structures. In contrast to what happens in other scientific establishments, the Collaboration is viewed as a separate project entity that is hosted by CERN, a status that is reflected in the independence that it is granted by its governance structure.* [116]

Comment rendre compte alors des liens informels qui se tissent entre les équipes ? Nous approfondirons ces liens complexes dès le chapitre 3, sur un premier cas concret.

∴

Nous avons exploré de manière assez globale et succincte (ce chapitre pourrait constituer une thèse en soi) les quatre grandes dimensions du système constitué du CERN et de ses expériences. Nous avons pour cela adopté l'altitude du niveau stratégique, qui permet de poser les grandes lignes du contexte, un contexte dont on aura mesuré la complexité : géopolitique, scientifique, technologique et organisationnelle (voir le Tableau 2.1 p. 48). À chaque fois, nous avons pu constater que tous les éléments s'imbriquaient, se liaient, sur un mode résolument complexe et à ce stade encore un peu confus [117].

Pour cela, nous sommes un peu trop loin du terrain, et nous n'avons pas atteint le niveau où il est possible de discerner les individus dans leur action quotidienne. Rapprochons-nous, croisons la trame du CERN et d'ATLAS déployée dans ce chapitre 2 avec les fils que notre manageur technique a dévidés au chapitre 1, et observons le textile ainsi produit. Ce tissage conduira, au chapitre 3, à cerner les nœuds et à formuler les questions de recherche que cette thèse souhaite aborder. Au chapitre 4, nous hisserons cette voile tissée afin de traverser les cas de la partie II.

> *Pour clore sur une touche d'humour ce tour d'horizon du CERN, du LHC et de ses expériences, je propose de répondre à quelques questions fréquemment posées :*

115. « Comme ATLAS n'est pas en elle-même une entité légale mais un réseau collaboratif lié par des MoUs, elle doit fortement compter sur les nombreux services techniques, financiers, liés aux achats et autres services administratifs fournis par le CERN en tant que laboratoire-hôte. » [Jenni, Nordberg et Boisot 2011, 25]

116. « ATLAS n'est pas intégré dans les structures organisationnelles du laboratoire hôte. Contrairement à ce qui se fait dans d'autres établissements scientifiques, la Collaboration est considérée comme une entité de projet séparée qui est accueillie par le CERN, un statut qui se reflète dans l'indépendance qui est accordée à sa structure de gouvernance. » [Jenni, Nordberg et Boisot 2011, 26]

117. Nous n'en sommes encore qu'au début, et il nous reste encore quelques chapitres à traverser pour rendre plus claire la situation.

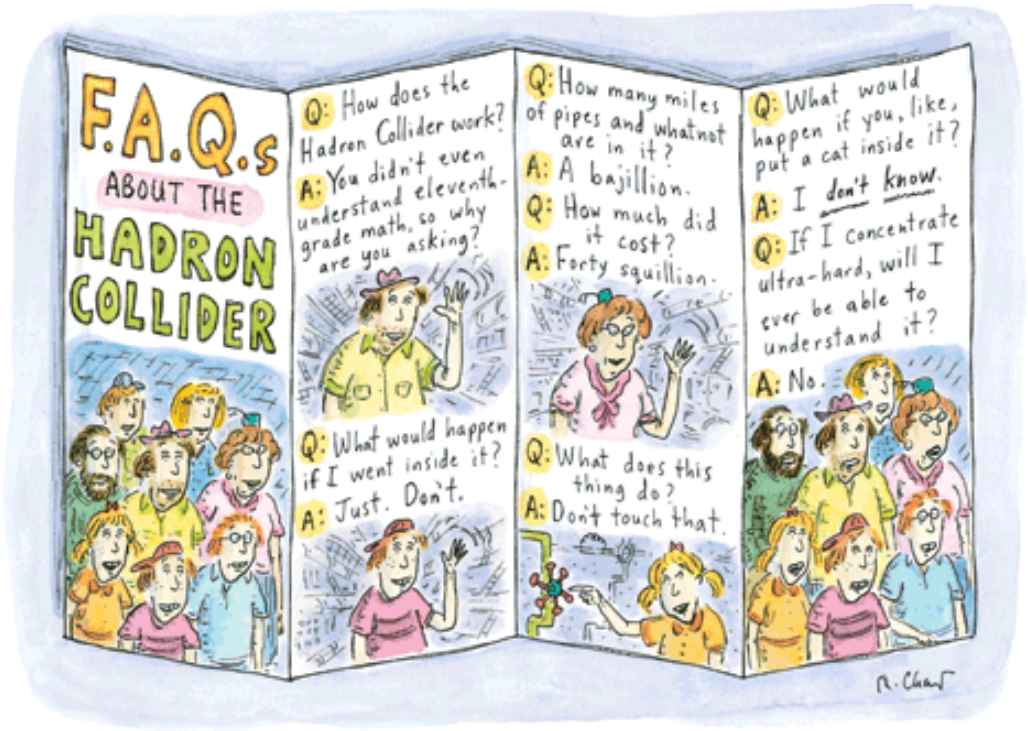
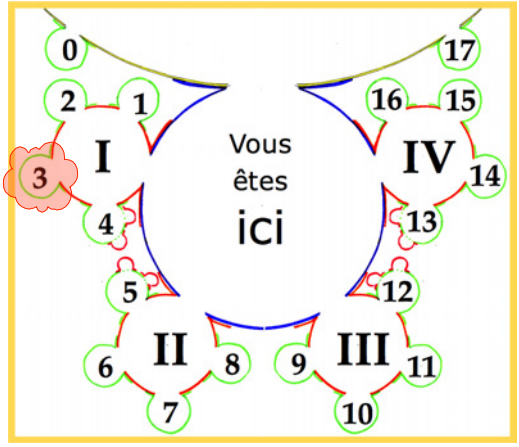


Figure 2.14: Questions fréquemment posées sur le LHC

Ron Chart, New Yorker, 26 avril 2010

Q : Comment marche le collisionneur de hadrons ?
R : Vous ne comprenez même pas les maths de la classe de première, alors pourquoi vous posez la question ?
Q : Qu'est-ce qui se passerait si j'entrais dedans ?
R : N'essaie même pas.
Q : Il y a combien de kilomètres de tubes et de je ne sais pas quoi dedans ?
R : Un bajillion.
Q : Et combien ça coûte ?
R : Quarante squillions.
Q : Et ça, ça sert à quoi ?
R : N'y touche pas.
Q : Qu'est-ce qui se passerait si disons, on mettait un chat dedans ?
R : Je n'en sais rien.
Q : Si je me concentre super-fort, est-ce que j'arriverai à comprendre ?
R : Non.



Chapitre 3. Quel rôle pour le manageur technique ?

Où surgissent quelques questions sur l'ingénieur et son rôle, sur les processus de conception, et d'autres plus complexes encore

Il y a des hommes qui disent : Cela sera *; et il y a d'autres hommes qui disent :* Voici comment.

Victor Hugo [118]

118. *Le Rhin*, Eugène Hugues Éditeur, 1842, « Conclusion, XVII », p. 272.

Au chapitre 1, nous avons extirpé les fils constitutifs de mes interrogations propres. Nous allons maintenant les insérer dans la trame particulière que constitue le contexte du CERN décrit au chapitre 2. Le tissage n'est pas immédiat, et il arrive que, coincés dans la trame, les fils fassent des nœuds. Plongez un jeune ingénieur dans un bain de réalité, il en ressortira tout chaud (voire échaudé ?).

C'est qu'il y a loin de la coupe aux lèvres, c'est que le chemin qui mène au but n'est pas tracé d'emblée. Ainsi, alors que je me trouvais fin 1994 propulsé en charge de l'intégration mécanique d'ATLAS, l'on m'avait dit que « *cela* » devait être, et je m'étais bravement attelé à la tâche ; je ne savais malheureusement pas que « *je ne savais pas* comment » [119]. J'ignorais alors quel devait être mon rôle, comment l'investir, comment en préparer la démarche, comment en instrumenter l'action.

La question à laquelle s'attache la présente thèse, c'est celle du « *voici comment* » de Victor Hugo : comment un ingénieur impliqué dans la conduite et la gestion de projets complexes du type de ceux évoqués au chapitre précédent peut-il et doit-il se comporter pour contribuer utilement et efficacement à leur réussite.

3.1 Une étude de cas : le rôle du Bureau technique

Au cours du chapitre 2, nous avons mis en évidence la complexité intrinsèque des grands projets scientifiques, avec les quatre modalités par lesquelles elle se manifeste : géopolitique, scientifique, technologique, et organisationnelle. Ces quatre modalités renvoient aux quatre catégories systémiques associées, les aspects génétique, téléologique, fonctionnel et ontologique. Nous avons brièvement évoqué que cette complexité intrinsèque ne rendait pas intégralement compte de la complexité globale de ces projets. Il convient en effet de prendre également en considération la *complexité perçue*. Autrement dit, indépendamment de la complexité intrinsèque, et à la limite, même si celle-ci n'est pas établie comme véritablement complexe, il se peut que l'on se retrouve dans une situation de complexité par le seul fait qu'elle soit perçue comme telle [120].

C'est en décrivant la façon dont se glissent les fils d'un parcours (chapitre 1) dans la trame d'un contexte (chapitre 2) que nous montrerons au mieux d'où émerge cette complexité perçue, et quelles en sont les premières caractéristiques. C'est pourquoi, à l'orée de ce chapitre 3, je présente une toute première étude de cas. Elle porte sur le positionnement de notre manageur technique agissant selon

119. Cette phrase, outre qu'elle fait écho à l'épigraphe de Victor Hugo, se réfère à ce proverbe attribué à Confucius : « *La véritable science est de savoir ce que l'on sait, et de savoir que l'on ne sait pas ce que l'on ne sait pas.* »

120. (J'ouvre une parenthèse, un peu plus philosophique.

Est-il pertinent de parler de complexité intrinsèque ? La complexité n'est-elle pas « *dans l'œil de celui qui regarde* », pour paraphraser Wilde à propos de la beauté ? Existe-t-il une réalité indépendante du regard que l'on porte sur elle – position réaliste – ou bien n'est-elle que constructions de l'esprit – position idéaliste ? Ou ni l'un ni l'autre ? Ce qui apparaît complexe à l'un le sera-t-il à l'autre ? Peut-on parler de "complexité intersubjective" ? Ce faisceau de questions présente assurément un grand intérêt. À ce stade, il serait prématuré de plonger dans ces arcanes. Je pose donc en principe, et dans le cadre qui est le nôtre ici et maintenant, qu'il existe une certaine complexité intrinsèque, et qu'il s'y rajoute une certaine complexité perçue par l'observateur. Et ce noyau de complexité intrinsèque est résiduel, une fois ôté du complexe perçu *a priori* tout ce qui apparaît ultérieurement de l'ordre du compliqué. Une fois ce principe posé comme jalon pour le parcours ultérieur, je me propose d'y revenir au cours de la partie III. Dans le présent chapitre, nous allons mettre en suspens les catégories systémiques de la complexité, nous centrer sur la complexité perçue, et commencer à repérer où passe la délicate distinction entre le compliqué et le complexe.

Je referme la parenthèse).

ses compétences (mécanique et gestion de projet) au sein d'une organisation (le CERN) et d'un projet (ATLAS). Cette étude de cas sera la seule du genre à entrer dans des détails fins d'organisation. Les intrications exposées donneront à voir ce qui sera par la suite plus ou moins diffus dans les cas de la partie II.

En résumé, l'objectif de cette étude de cas consiste à faire le lien : nous avons parlé d'un ingénieur (chapitre 1), nous avons parlé du contexte de son travail (chapitre 2) ; nous parlerons plus loin de cet ingénieur en action dans le contexte (partie II). Il nous faut ici ébaucher la figure de manageur technique, déjà souvent évoquée, et en marquer les premières spécificités. Nous serons ainsi menés à formuler les questions de recherche de la thèse.

3.1.1 Un Bureau d'études sur la sellette

Cette étude de cas n°0 [121] porte sur un épisode évoqué au chapitre 1 p. 39, celui de l'implosion potentielle fin 2000 du Bureau technique de la division de Physique expérimentale (EP), bureau dont j'étais en charge depuis mi-1996. Ce cas présente à mes yeux plusieurs avantages. Il montre que les données brutes sont difficiles à appréhender sans éléments de contexte, et que leur analyse dépend de chaque observateur. Il montre aussi que le contexte évolue du fait même de la présence de l'observateur. Il présente également des faits qui s'étendent dans suffisamment de directions pour faire vibrer une large étendue de la toile organisationnelle. Et enfin, il éclaire d'un jour intéressant la position de notre manageur technique. Ce qui en fait un joli condensé de complexités intrinsèques et perçues, et un terrain pertinent pour distinguer dans cette complexité perçue ce qui ressort de l'ordre du compliqué de ce qui constitue un complexe irréductible.

De quoi est-il question [122] ? Nous sommes fin 2000. Le manageur technique, ingénieur à la tête depuis mi-1996 du bureau d'études dit “Bureau technique” de la division de physique expérimentale, se voit proposé par sa hiérarchie de se concentrer sur un projet au sein du détecteur ATLAS plutôt que de continuer à animer ce bureau d'études, dont la dissolution est suggérée. Le projet ATLAS souhaite que chacun des projeteurs du bureau soit directement affecté aux projets correspondants, et la division ne souhaite plus conserver dans ses rangs la gestion d'un tel bureau. C'est donc la place même du manageur technique qui est remise en cause, ainsi que l'intérêt d'un travail de coordination métier entre projets. Que doit donc devenir le manageur technique : l'ingénieur d'un seul projet ? Le coordinateur de l'activité sur plusieurs projets ? Avec des ressources regroupées, ou disséminées ? Ou sans ressource ? À cette interrogation de positionnement et de restructuration, le manageur technique réplique par une contre-proposition : le transfert du bureau

121. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 0, on traitera de plusieurs cas au cours de la thèse, ce que nous exposerons au § 4.4 p. 111. Le cas présent, une sorte de prototype, prend le n°0.

122. L'étude de ce cas s'appuie sur plusieurs documents d'archives. Le premier document (Bertrand, courriel à D. Vinck et P. Lécaille, *Thèse : mous et remous*, 11.12.2000) est l'observation *in situ* de la situation par l'un de ses acteurs, manageur technique placé en situation réflexive et qui présente la situation à des personnes extérieures au CERN ; le deuxième document (Wilfried, courriel à G. Goggi, *Draft memo*, 8 mars 2001) est le rapport de synthèse préparé par le superviseur du manageur technique à destination de son propre superviseur, le chef de la division de physique expérimentale PPE de l'époque. Une série d'échanges de courriels (Claude M., courriels à Bertrand, 15.11.2000, 30.11.2000 et 19.02.2001, et courriel à Mark, 12.02.2001) témoigne enfin du constat établi par l'un des membres d'une autre division de la difficulté de mener à bien la restructuration pourtant endossée par le deuxième document pour dépasser le problème mentionné et la solution évoquée par le premier document.

Précisons la *règle d'anonymisation* adoptée : les noms apparaissent en clair pour les membres du personnel supérieur, qui occupent leur poste de notoriété publique ; pour les autres membres du personnel, seul le prénom est donné, parfois complété par l'initiale du nom.

d'études dans une autre division, où il se mettrait, avec une position métier renforcée, au service de l'ensemble des projets concernés [123].

L'ambition de ce chapitre n'est pas d'analyser en détails les péripéties organisationnelles rapportées. Il est toutefois nécessaire, en s'appuyant sur les éléments du chapitre 2, d'apporter ici des clés de lecture complémentaires, mieux expliciter le contexte organisationnel, et en ébaucher une cartographie. Parce que ledit contexte a une influence sur les activités des uns et des autres, lesquelles exercent en retour une influence sur le contexte organisationnel, dans une dynamique complexe que nous allons rapidement exhiber. Pour analyser le cas, nous allons préciser les trajectoires individuelles à superposer aux évolutions structurelles, abandonnant les hauteurs confortables de la contemplation au niveau stratégique pour adopter une posture plus ethnographique, dans ce contact direct avec le terrain dans lequel nous nous immergeons.

Procédons à un exposé organisationnel de la situation à la charnière 2000/2001. Ils relatent la superposition de restructurations à plusieurs niveaux différents : une évolution de la structure de la division EST (*Engineering Support and Technology*), avec une fusion des différents groupes recouvrant l'ensemble des bureaux d'études de la division ; le changement du coordinateur technique d'ATLAS, et de l'organisation et du positionnement de son équipe ; et enfin, une réorganisation de l'unité de supports aux détecteurs de la division de physique expérimentale (EP). Le manageur technique appartient hiérarchiquement à cette dernière, fonctionnellement à la seconde, et s'appuie sur des ressources appartenant aux premiers. Ces trois niveaux entraînent des évolutions multiples de périmètres pour notre manageur technique. Il est donc question entre les différents acteurs de profiter de la concordance de ces trois évolutions pour optimiser les forces de travail.

Or, ces changements ne sont pas uniquement liées à des questions de personnes, mais correspondent bien à des dates clé, que ce soit au sein du projet ATLAS (voir § 4.4. « Quelques cas sur la ligne du temps » p. 111) ou dans l'évolution de la structure même de l'organisation du CERN. Pour y voir un peu plus clair, j'avais à l'époque créé une version partielle de l'organigramme du CERN, représentée à la Figure 3.1. On y retrouve le découpage du CERN en quatre secteurs : Recherche, Accélérateurs, Technique et Administratif. Seul le secteur Recherche y a été développé. La division EST (*Engineering and Support for Technologies*), non figurée ici, appartient au secteur Technique, en compagnie de la division ST (Support Tech-

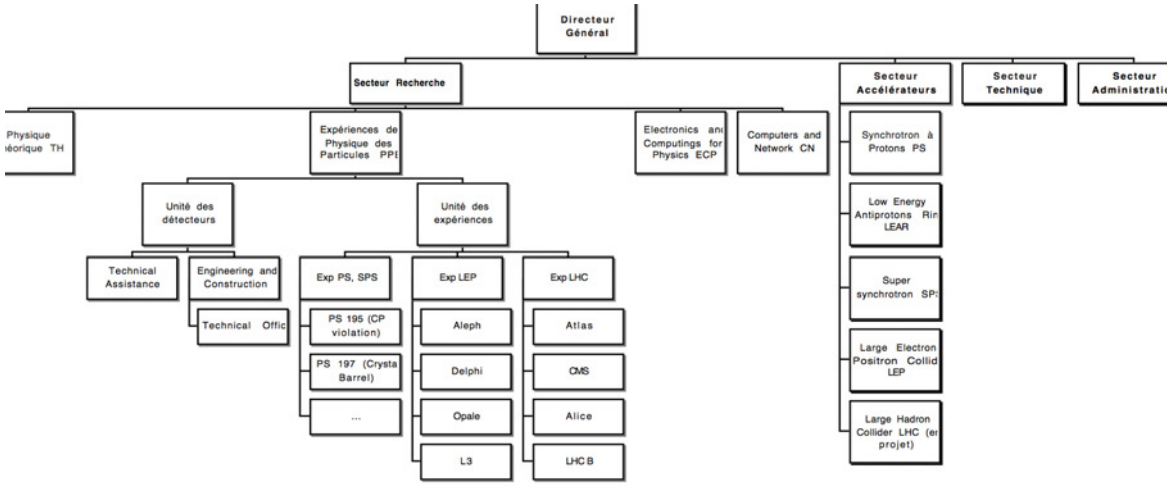


Figure 3.1: Organigramme partiel du CERN en 1996

123. Les documents cités à la note 122 fournissent des détails de la situation, où se mêlent différentes restructurations de différentes unités organisationnelles entretenant des rapports de nature différente.

nique). Reprenons le fil du jeune ingénieur de notre prologue (chapitre 0), et retraçons son parcours jusqu'en 2000, date de la situation rapportée dans l'étude de cas : j'entre en 1992 dans la division PPE (*Particle Physics Experiments*) du secteur de la Recherche, au sein d'un groupe d'assistance technique aux détecteurs. En 1994, le coordinateur technique de l'expérience ATLAS, Hans Hoffmann, souhaite renforcer son équipe et me sollicite. Je le rejoins début décembre : la Collaboration vient de publier sa *Technical proposal* [ATLAS Collaboration, Armstrong et al. 1994] et débute la conception détaillée du détecteur. C'est également à cette date que le Conseil du CERN approuve la réalisation de l'ensemble du projet LHC.

De décembre 1994 à juin 1996, j'appartiens formellement au groupe PPE/ATD (ATD pour ATLAS Detector), qui est l'un groupe de l'unité "*Expériences*" de la division. J'y travaille au sein de la Coordination technique nouvellement constituée, et je m'appuie pour cela sur des projeteurs qui sont mis à disposition soit par le Bureau technique (*Technical Office*, TO) du groupe *Engineering and Construction* (EC), qui appartient à l'unité "*Support*" de la division, soit par une autre division dépendant du secteur technique, la division MT (*Mechanical Technologies*). En juillet 1996, la direction de la division PPE me confie la responsabilité du Bureau technique. Suite à la fusion entre PPE et ECP, je deviens donc étiqueté EP/EC-TO. J'y coordonne les études de conception mécanique et d'intégration pour ATLAS (et pour quelques autres expériences, mais de manière beaucoup plus modeste). Je conserve en outre mes responsabilités au sein de la Coordination technique d'ATLAS, ainsi que mes propres relations de travail avec les projeteurs de la division MT, laquelle entre-temps (début 1996) est devenu EST. L'ancien chef de MT, Gérard Bachy, rejoint précisément la Coordination technique d'ATLAS. Je suis en outre chargé de la responsabilité du projet de la structure principale d'ATLAS (les "pieds" qui sont l'objet de l'étude de cas du chapitre 7). Cette description du contexte dynamique était un petit exercice de complication perçue : si tout cela paraît très interconnecté, c'est normal, c'est le reflet des mouvements dans les couches profondes des organisations entrelacées du CERN et de ses expériences… On s'en convaincra peut-être davantage encore en consultant le Tableau 6.1 p. 170.

3.1.2 Intrications organisationnelles

Superposons à la structure d'organigramme assez classique de la Figure 3.1 les différents acteurs mentionnés dans les documents : outre notre manageur technique, chef de la section TO, j'en ai relevé pas moins de quatorze, sans prendre en compte les membres du Bureau technique ou ceux de la Coordination technique non affectés par les changements discutés, ou non concernés par les projets mentionnés. Ces acteurs peuvent être représentés selon trois lignes hiérarchiques distinctes.

- La première est la ligne de la *division EP* de physique expérimentale : Giorgio Goggi (noté GGo sur l'organigramme complété de la Figure 3.2), chef de la division EP ; Dieter (DSc), son adjoint pour l'unité des détecteurs ; le chef du groupe EC, Wilfried (WFl) ; le chef de la section TO, Bertrand Nicquevert (BNi), au sein duquel on trouve, entre autres [124], le projeteur en charge de l'étude des pieds d'ATLAS, Olivier (OJa).
- La deuxième est la ligne de l'*expérience ATLAS*, avec le chef du groupe CAT, (*CERN ATLAS Team*) Vincent Vuillemin (VVu) (dont le superviseur est également GGo) ; le coordinateur technique Mike Price (MJP) ; l'ingénieur en chef Gérard Bachy (GBa) ; le chef du projet de calorimètre hadronique (et futur coordinateur technique) Marzio Nessi (MNe) ; et puis à nouveau Bertrand, membre de la coordi-

124. La section comptait à l'époque environ dix projeteurs, la plupart en fin de carrière. Le stagiaire G. Pépiot les avait amicalement dénommés « *le cercle des poètes en voie de disparition* » (*Notes de terrain*, 17.03.1998).

nation technique en charge de l'intégration mécanique ; et enfin Olga (OBe), ingénieur embauchée fin 2000 pour reprendre la tâche d'intégration mécanique.

• La troisième ligne est celle de la *division EST* d'ingénierie, dépendant de Jürgen May (JMa), le Directeur technique du CERN : Dietrich Güsewell (DGü), chef de la division ; Tadeusz (TKu), chef du nouveau groupe d'ingénierie mécanique ME ; Claude (CMe), l'un des responsables de bureau d'étude de ce groupe, et qui travaille en outre sur les routages de câbles du trajectographe interne d'ATLAS ; et Bernard (BJP), projeteur en charge de l'intégration d'ATLAS.

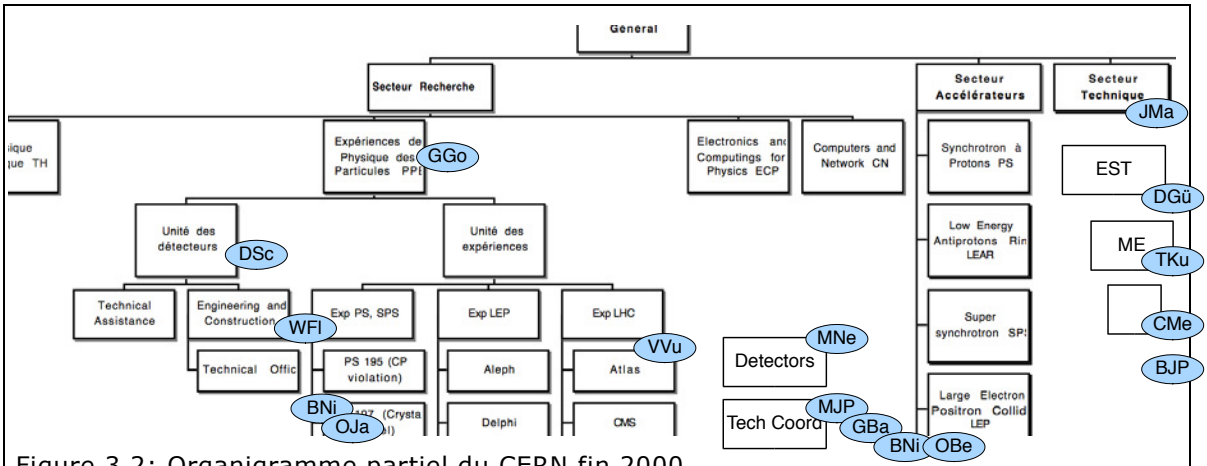


Figure 3.2: Organigramme partiel du CERN fin 2000

Avec positionnement des acteurs principaux de l'étude de cas n°0 sur le Bureau technique

Le positionnement de toutes ces personnes sur l'organigramme permet de bien faire vibrer de nombreuses ramifications de la toile : tout cela n'est pas simple, et les entités impliquées sont nombreuses. Mais au-delà, cet ajout ne résout toutefois pas deux carences de représentation. D'une part, les relations transversales ne sont pas rendues, alors qu'elles sont capitales : la structure semble pyramidale, alors qu'elle fonctionne avec un nombre considérable de passerelles, même du point de vue formel, et ce à tous les niveaux de l'Organisation (et pas seulement entre le DG et le Personnel supérieur). D'autre part, c'est une représentation un peu trop statique de la situation, alors même que la dynamique temporelle des évolutions nécessite d'être rendue avec davantage de précision.

Concernant la première carence, la profusion d'interrelations transversales entre ces différentes personnes et entités est heureusement relativement constante. Il faudrait préciser le détail des organigrammes des trois entités principales : la division EP, l'équipe CERN ATLAS (CAT) et la division EST [125]. Nous nous contenterons d'une version simplifiée, espérant restituer assez de la complexité du réel.

Le schéma rétrospectif que je propose à la Figure 3.3 représente les principales unités organiques évoquées, sous une forme concentrique : au centre, le DG du CERN, puis les directeurs et leurs secteurs : viennent ensuite les divisions, puis les groupes, les sections et enfin les personnes. On a spécifié trois types de relations : la dépendance *hiérarchique* (« à qui je rends des comptes, envers qui j'ai obligation de loyauté, qui décide de mon avancement ») est représentée par des flèches doubles; la relation de fourniture d'une *prestation* (obligation de résultats) est représentée par une flèche normale ; et la relation de fourniture de *ressources* (obligation de moyens) est indiquée par une flèche traitillée.

L'acteur BN est représenté trois fois, sur chacun de ces axes. La difficulté à modéliser la situation est bien visible, avec cette greffe de la grappe verte de l'orga-

125. D'autant plus que les organigrammes des autres entités n'existent pas, et n'ont peut-être d'ailleurs jamais existé.

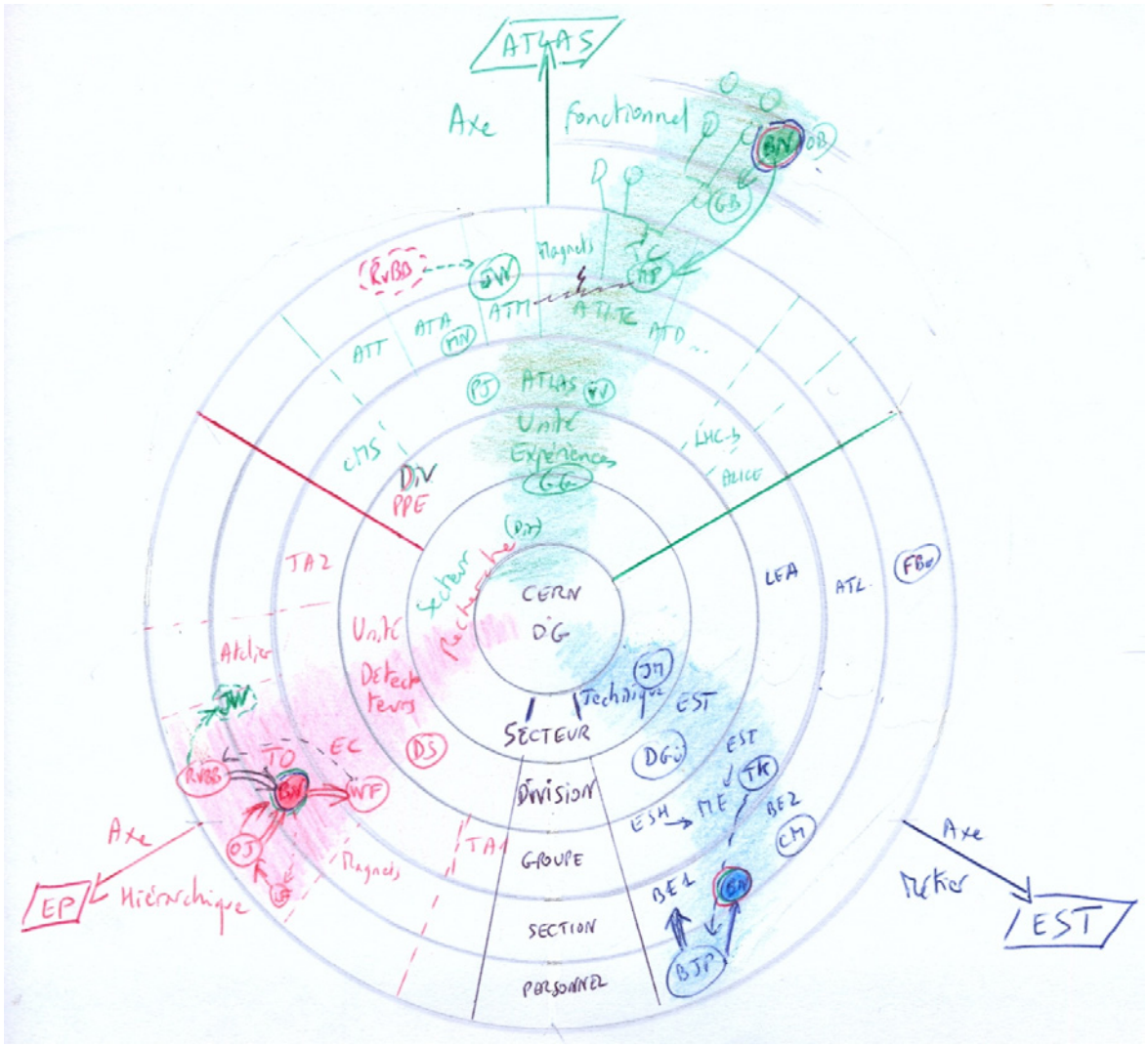


Figure 3.3 : Relations entre l'organisation de projet d'ATLAS et la structure du CERN

Proposition d'un premier modèle de type *concentrique*

nigramme de la Coordination technique, qui devrait correspondre à celui présenté à la Figure 3.4. Nous n'approfondissons pas, l'objectif ici n'étant pas d'élaborer un modèle exhaustif et fidèle, mais d'exhiber la complexité des relations entre les entités. Sans perdre de vue que la portion d'ATLAS visible ici ne concerne que le CERN ! Or, la Collaboration regroupe 140 instituts, dont bon nombre sont eux-mêmes en relation avec la Coordination technique…

Cette représentation met en valeur le rôle dual du CERN évoqué au chapitre 2 : à la fois membre de la Collaboration *et* laboratoire-hôte [126]. On voit en effet que les branches inférieures (rouges et bleues) fournissent des prestations pour ATLAS, via la structure organisationnelle du CERN, selon différents canaux. Ainsi le groupe LEA offre une prestation de laboratoire-hôte, via son manageur de la zone expérimentale, François (FBu). À l'inverse, la prestation offerte par Olivier et Bertrand (dans le secteur rouge), la conception des supports “Pieds et rails” (chapitre 7) correspond à une activité du CAT (CERN ATLAS *Team*). Celle de Robert (RvBB) est un peu plus complexe : mis à disposition de la division EP pour l'intégration des muons (chapitre 6), on pourrait penser que c'est dans le cadre d'une

126. Ce rôle sera détaillé au § 3.2.1.

activité CAT ; mais Robert travaille sous la supervision hiérarchique de Bertrand (secteur rouge), qui est d'ailleurs aussi l'intégrateur (secteur vert) d'ATLAS, l'intégration étant une prestation de laboratoire-hôte assurée par la Coordination technique avec l'appui des divisions techniques du CERN, dont Bernard (BJP) qui travaille pour Bertrand (secteur bleu, en liaison étroite avec EST du point de vue des méthodes CAO et mécaniques). La complexité de ces relations suscite des tensions délicates sur lesquelles nous reviendrons souvent.

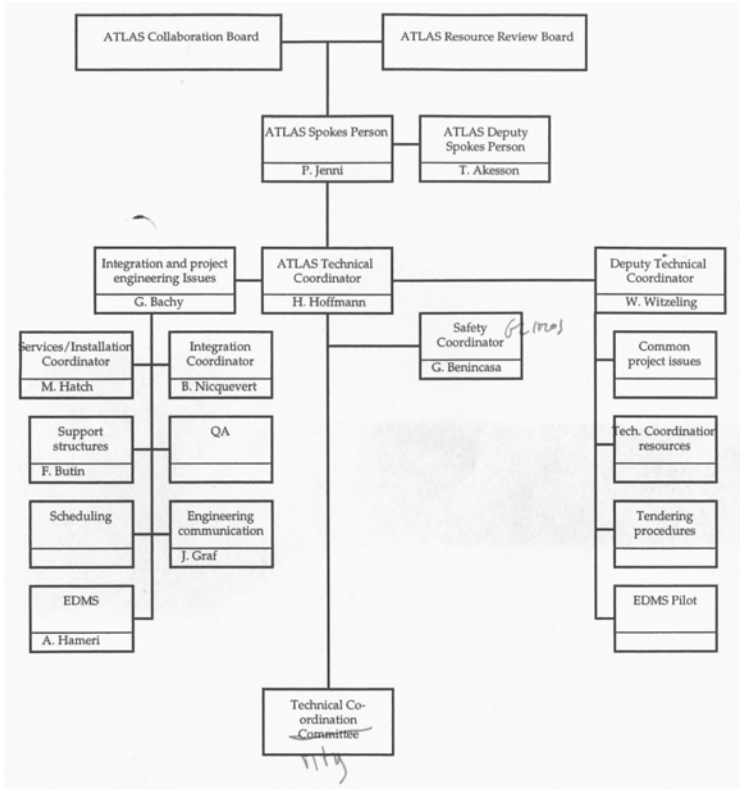


Figure 3.4 : Organigramme de la Coordination technique d'ATLAS, 01.1996–04.1999

Il resterait à améliorer, deuxième carence à pallier dans la représentation de la Figure 3.2, la dimension dynamique de l'évolution des positions des acteurs dans la structure. Une carte géographique ne suffit en effet pas pour constituer un atlas historique [127]. En effet, plusieurs de ces acteurs évoluent selon leur trajectoire personnelle en cette période 2000–2001 : c'est Marzio Nessi qui deviendra le coordinateur technique d'ATLAS en mars 2001 ; et Vincent Vuillemin prendra le poste d'adjoint au chef de division, poste qu'avait lui-même occupé Mike Price avant d'être élu coordinateur technique, fonction qu'il s'apprête alors à quitter pour reprendre un travail de “physicien de base” [128].

Nous pourrions reprendre l'hypercarte de la Figure 2.12 p. 67, qui montre l'évolution avec le temps de l'organisation globale d'ATLAS, et en faire un agrandissement local pour la période 1992–2002. Il faudrait toutefois en améliorer la granularité en y ajoutant les entités mentionnées à la Figure 3.3. L'axe du temps offrirait une vue paradigmatique un peu plus satisfaisante, et permettrait en particulier de bien visualiser les points de transition [129], et de constater l'abondance de changements en cette période agitée à tous points de vue. À ce stade, ces améliorations ne

127. Un atlas de l'histoire d'ATLAS !?

128. La deuxième partie du principe de Peter stipule que « *toute personne tend à s'élever jusqu'à son niveau d'incompétence et à y rester* » [Peter et Hull 1988]. Il ne s'applique pas nécessairement au CERN : indépendamment de savoir si l'on a investi un poste à responsabilité avec compétence, l'on peut parfaitement ensuite retourner en bas de l'échelle hiérarchique, avec un impact neutre sur la rémunération comme sur la reconnaissance et la progression de carrière.

129. Dix ans plus tard, recueillir des dates précises qui ne sont pas archivées relève parfois de l'archéologie. Par exemple, à ma demande de précisions, Vincent Vuillemin m'a ainsi récemment répondu : « *1998 – 2001 : Team leader of the CERN ATLAS Team. 2001 - 2005 : Deputy Division Leader of the EP Division. Mais ne me demande pas les mois, svp.* »

semblent pas nécessaires pour établir notre propos sur la complexité organisationnelle.

3.1.3 Réorganisations inabouties

J'avais conclu dans le courriel évoqué plus haut [130] : « *Où donc une simple petite thèse de socio même pas commencée nous emmène...* » Certes, il ne faut pas trop déformer la perspective : si mon projet de thèse initial a bien déclenché un certain nombre de réactions et d'ajustements, l'enjeu des discussions entre les différents responsables dépasse évidemment cette simple problématique. Le projet de thèse devient toutefois le prétexte ou le déclencheur d'une réorganisation ressentie comme nécessaire par plusieurs partenaires. Notre manageur technique va lui-même tenter de s'en emparer, en élaborant sa propre proposition d'organisation. Son objectif était de profiter de la dynamique ainsi initiée pour aboutir à une position plus confortable dans un cadre qu'il estimait plus favorable, pour lui et pour son équipe. C'est ainsi qu'il propose de créer un nouveau groupe de bureau d'études, au sein de la division EST, groupe qui reprendrait et réorganiserait l'ensemble des activités de conception et d'ingénierie au service de la Coordination technique d'ATLAS et des autres expériences.

La proposition présente un double intérêt : elle clarifie la relation entre donneur d'ordre et prestataire de services, puisque ce dernier se trouve ainsi dans une organisation indépendante ; et elle regroupe des activités similaires du point de vue du domaine de compétences, et des personnes qui ont à partager des expériences : c'est la création d'un pôle métier, pour ne pas dire une communauté de pratiques [Wenger 1999]. Bénéfice secondaire du point de vue managérial, ce pôle rassemble l'ensemble des projeteurs travaillant sur ATLAS au sein d'une même unité organisationnelle homogène. C'est aussi une tentative pour sortir de la zone d'inconfort telle qu'elle était exprimée dans le courriel : « *Je ne sais plus où j'en suis, ni de quoi l'avenir sera fait* » [131].

La proposition de fusion des bureaux d'études avec EST n'a finalement pas été retenue [132] malgré son intérêt et les soutiens dont elle bénéficiait en haut lieu – ce qui montre bien qu'un lieu n'est haut que s'il est reconnu comme tel, et que toute décision ne vaut que par l'assentiment qu'elle récolte – Pestre [1988, 386] l'avait déjà relevé lors des tentatives de restructuration du CERN au début des années 1960. La situation en est restée au *statu quo* : le Bureau technique a continué à travailler pour ATLAS jusqu'à la fin 2002, et j'ai été autorisé (puisque j'avais alors renoncé à poursuivre ma thèse) à continuer à le diriger, préservant ainsi un minimum de mon confort (en tous cas jusqu'à l'été 2002, où survint la crise du chargement des pieds dont nous parlerons au chapitre 7) ; quant à la division EST, elle n'a alors créé ni groupe ni même simple section dédiée aux expériences.

Il sort du cadre – voire de l'intérêt – de cette thèse de restituer en détails l'histoire ultérieure de la Coordination technique d'ATLAS, ou de l'organisation des bureaux d'études dans les divisions de support, et a fortiori de leurs relations respectives. Cette étude de cas illustre la complexité des situations, l'enchevêtrement des enjeux, les tensions entre rôles, et la question qui émerge au travers de ce cas, celle du rôle du manageur technique. C'est ce que nous abordons dans la section suivante.

130. Bertrand, courriel à D. Vinck et P. Lécaille, *Thèse : mous et remous*, 11.12.2000.

131. Et je concluais encore : « *… ni comment organiser ma thèse là-dedans (ceci dit, j'amasse du matériau...)* ». Dix ans plus tard, je ressors ce matériau de ma petite boîte, comme ce M. Bredoteau/Bretodeau du film *le Fabuleux destin d'Amélie Poulain* (2001, contemporain de cette époque).

132. Claude M., courriel à Bertrand, *Info*, 19.02.2001.

3.2 Premiers enseignements

Dans quelle situation se trouvait le manageur technique que j'étais alors fin 2000 ? Travaillant dans le cadre de la contribution du CERN à l'expérience ATLAS, assumant certaines responsabilités du CERN en tant que laboratoire-hôte, et d'autres comme membre de la Coordination technique au sein de la Collaboration. Je superposais ainsi trois responsabilités : celle d'intégrateur du détecteur ATLAS (en tant que membre de la Coordination technique), celle de chef de projet pour la structure support principale (en tant que membre de la Collaboration, dans le cadre de la contribution du CERN à ATLAS), et celle de responsable d'un bureau d'études du CERN travaillant non seulement pour la Coordination technique d'ATLAS, mais également pour d'autres sous-détecteurs d'ATLAS (la structure mécanique du calorimètre à tuiles, les accordéons du calorimètre à argon liquide, le layout, l'intégration et la conception de certains supports du spectromètre à muons, les blindages…), et aussi en outre pour d'autres expériences du LHC. Ces trois responsabilités complémentaires étaient parfois antinomiques : ingénieur projet – avec une exigence de production et de délais ; responsable de bureau d'études – avec une exigence de processus et de qualité ; intégrateur – avec une exigence de coordination et de compatibilité. Que faire si l'ingénieur projet exigeait que soient terminés dans l'heure des dessins que l'intégrateur n'était pas en mesure de valider aussi rapidement du point de vue géométrique, et dont le responsable de bureaux d'études souhaitait au préalable en réviser le tolérancement géométrique ? Réunies en une seule personne, ces trois tâches centrifuges avaient de quoi perturber.

(Et je souhaitais, inconscient que j'étais, rajouter à cela une quatrième dimension à mon travail, celle de la recherche-action ! Cette dimension, je la ressentais pourtant comme nécessaire pour comprendre les difficultés que j'éprouvais à arbitrer entre les tensions antinomiques des trois pôles de mon activité professionnelle. Mais comment remplir encore davantage un emploi du temps plus que plein, et augmenter encore davantage le niveau de stress déjà trop élevé ? Il n'est donc pas étonnant que la situation soit parvenue à une concentration de complexité telle qu'elle ait provoqué les remises en question évoquées dans l'étude de cas [133].)

L'idée est de tirer de cette étude de cas n° 0 quelques pistes pour illustrer l'émergence de la figure de manageur technique. Nous avons décrit le contexte dans lequel la complexité perçue atteint un niveau assez élevé – ce que nous allons établir de manière plus précise. Cette première approche nous permettra d'esquisser des pistes pour aborder la question du rôle du manageur technique – sans la développer outre mesure, puisque c'est en définitive l'objet de la thèse dans son entier.

Ces pistes sont les suivantes : le contexte organisationnel du manageur technique, la situation dans laquelle il se trouve, les caractéristiques de sa personnalité, la définition de la tâche qu'il doit accomplir, et les outils de gestion nécessaires ou utiles pour mener à bien sa mission. À chacune de ces dimensions s'attache une complexité perçue, autrement dit une complexité cognitive et psychologique qu'il lui faut intégrer dans son action et dans sa réflexion. Cette grille d'analyse, dérivée des travaux sur l'analyse de la fonction cognitive [Boy 1998], est inspirée du cadre d'analyse AUTOS [Boy et Bradshaw 2006]. Ce cadre d'analyse propose cinq complexités cognitives auxquelles fait face l'utilisateur : complexité cognitive de l'**A**rtefact (complexité de l'usage induit par l'artefact et donc d'utilisabilité) ; complexité

133. Rédiger ce chapitre, c'est se replonger dans ces périodes intenses, souvent stimulantes, parfois angoissantes. La recherche-action est une situation psychologiquement très exigeante, quand on est en outre ingénieur projet, responsable d'équipe, coordinateur – sans parler des répercussions sur la vie personnelle.

de l'**U**tilisateur (essentiellement liée à la personnalité, aux facteurs psychologiques et physiologiques comme la fatigue ou la frustration) ; complexité de la **T**âche (essentiellement algorithmique) ; complexité de l'**O**rganisation ; et enfin, complexité cognitive de la **S**ituation.

Nous chercherons simultanément à croiser cette grille avec les trois axes de l'activité du manageur technique mis en évidence à la section précédente : l'axe hiérarchique et organisationnel, l'axe managérial de projet, et l'axe de métier. L'on ne sera pas surpris que ces trois axes ne soient pas indépendants, et c'est selon moi une caractéristique même du fonctionnement complexe du manageur technique.

3.2.1 Le rôle dual du CERN

Nous avons placé ce chapitre 3 à l'aune du tissu fabriqué par le croisement des fils d'un parcours et de la trame d'un contexte. Le résultat est un "complexe", c'est-à-dire un ensemble de choses pliées (*-plexe*) ensemble (*com-*). Filons la métaphore : il arrive parfois que dans les meilleurs tissus apparaissent des nœuds. C'est l'un de ces nœuds-là que notre étude de cas a exhibé – sans vouloir ni pouvoir le trancher.

L'élément de contexte dominant de cette étude de cas, outre tous les éléments déjà exposés au chapitre 2, est le rôle dual du CERN : à la fois partie prenante de la collaboration ATLAS – via son groupe CAT (CERN ATLAS Team), et laboratoire hôte, rôle défini par le *Memorandum of Understanding* (§ 2.6.3). Ainsi que le soulignent deux des plus hauts responsables d'ATLAS, le porte-parole et le coordinateur des ressources :

> *The CERN dual role is an occasional source of confusion both inside and outside CERN ATLAS. The Collaboration, for example, might expect CERN as the host laboratory to pay for certain services or support staff, whereas CERN or its Physics Department might expect other members of the Collaboration to share the burden. It takes talent and patience on all sides to manage such interactions constructively.* [134]

C'est exactement ce dont il s'agit ici. La position de notre manageur technique récapitule cette cascade de sources de confusions [135] : globalement, confusion entre ATLAS et CERN ; au sein de la division de physique, confusion entre ATLAS CAT et l'Unité des détecteurs ; au sein du CERN, confusion entre les bureaux d'étude respectifs de la division de physique et de celle d'ingénierie ; et au sein d'ATLAS, confusion entre les membres CERN et non-CERN de la Coordination technique. À l'époque, je cumulais toutes ces confusions : membre d'un groupe support de l'unité "Détecteurs" de la division de physique, appartenant au CAT dans l'unité "Expériences", travaillant pour la Coordination technique, avec des ressources appartenant à la division d'ingénierie du CERN.

Nous avons aussi évoqué le rôle du groupe EST/LEA, et la position de François, lui aussi à la fois membre de la Coordination technique en tant que manageur de la zone expérimentale, et dépendant d'une hiérarchie CERN, par ailleurs et en outre indépendante de la division de physique. Mon cas était donc loin d'être unique.

134. « Le rôle dual du CERN est occasionnellement source de confusion à la fois à l'intérieur et à l'extérieur de l'équipe ATLAS CERN. La Collaboration, par exemple, a pu escompter que le CERN en tant que laboratoire hôte finance certains services ou du personnel support, tandis que le CERN ou le département de Physique escomptait que ce soient d'autres membres de la Collaboration qui prennent en charge le fardeau. Il faut du talent et de la patience de chaque côté pour gérer de manière constructive ces interactions. » (Jenni, Nordberg, and Boisot 2011, 25–26)

135. En termes d'hydraulique, l'image vaut ce qu'elle vaut, je l'admets ; sans doute inspirée de manière subliminale par la *Chute d'eau ou le mouvement perpétuel* d'Escher (1961), un bel exemple de boucle étrange.

3.2.2 Recomposition du paysage organisationnel

À la période qui concerne notre étude de cas, fin 2000-début 2001, on a souligné le nombre de modifications en cours pour chacune de ces unités, et les passations de témoin multiples : changement de coordinateur technique (départ de Mike Price qui retourne au trajectographe, arrivée de Marzio Nessi du projet de calorimètre à tuiles) ; changement de chef de l'unité des détecteurs (prise de fonctions de Vincent Vuillemin, qui quitte son rôle de coordinateur du CAT) ; changement de l'organisation des bureaux d'étude à EST ; changement de l'ingénieur responsable de l'intégration (Olga B. reprenant la fonction) et départ en retraite de Bernard JP, le projeteur en charge. Cette période de transition a duré de juin 2000 (avec les premières discussions de réorganisation de la Coordination technique) jusqu'en avril 2001. C'est donc avec le sentiment d'une évolution radicale des choses, un passage progressif mais irréversible d'une phase du projet à l'autre – fin de la conception et de l'attribution des espaces, lancement de la fabrication des différents éléments du détecteur – que les différents acteurs investissaient de nouvelles positions.

Ces phases de transition sont également délicates en terme de positionnement personnel, et génèrent un stress qu'il faut souligner : toute l'énergie passée à se positionner et à faire bouger les lignes est une énergie qui n'est pas consacrée à la réalisation des tâches techniques. Ce rôle dual (et même "trial") du manageur technique en est assurément une caractéristique intrinsèque.

3.2.3 Personnalités et figures

Dans le décodage du cas, nous n'avons jusqu'à maintenant pas parlé des positionnements disciplinaires (de métier) et donc culturels des différents acteurs. Ces différences de positionnements sont toutefois sources de tension, ce que j'avais à l'époque appelé (en référence à Kuhn [1990]) une *tension essentielle* entre ingénieurs et physiciens :

> *Dans ces collaborations de physique existe une tension (que nous voudrions qualifier d'essentielle) entre physiciens et ingénieurs. Les physiciens cherchent à innover pour atteindre des domaines de physique, de précision, d'énergie jamais atteints (c'est l'objet d'une recherche fondamentale), dans une dynamique d'augmentation d'entropie ; les ingénieurs veulent être en mesure de réaliser ces rêves de physiciens, et ce faisant, tendent à limiter l'entropie du système pour rester en deçà de l'infaisable. Entre les deux s'instaure une tension dialectique.* [Nicquevert 1999, 88]

Dans le cas présent consacré à des questions organisationnelles la différence de point de vue est bien résumée par le chef du groupe support aux détecteurs :

> *Here at CERN we have a rather "collegial" hierarchy and not an "industrial" one with the boss sitting high up and the others far below him. The physicists at CERN can't do any experiment without engineers, designers, technicians & mechanics. On the other hand the technical staff is of no use for CERN without the physicists. Most times the applied physicists work directly in a "collegial" manner hand in hand with the technical staff on the experiment. It needs a bit of mutual respect and feeling for the professional proficiency of the others.* [136]

136. « Ici au CERN, nous avons une hiérarchie plutôt "collégiale" et non pas "industrielle", avec le patron assis tout en haut et les autres très loin en dessous. Les physiciens au CERN ne peuvent faire aucune expérience sans ingénieurs, sans concepteurs, sans techniciens et mécaniciens. D'autre part, le personnel technique n'est d'aucune utilité pour le CERN sans les physiciens. La plupart du temps, les physiciens appliqués travaillent directement de manière "collégiale" main dans la main avec le personnel technique de l'expérience. Cela nécessite un peu de respect et d'appréciation mutuels pour la qualité professionnelle des autres. » Wilfried (EC *Group Leader*), courriel à Bertrand, 17 mars 2001.

Cette approche collégiale, représentative de l'état d'esprit des physiciens, fait partie des points que nous revisiterons par la suite, selon deux pistes : la mettre à l'épreuve des faits, d'une part ; et regarder en quoi elle est respectueuse des pratiques métiers autres que celles de la physique. Nous avons mis en évidence trois axes distincts (quoique liés) selon lesquels se déploie l'activité du manageur technique : l'axe de l'organisation hiérarchique, l'axe du projet et l'axe du métier. Dans le contexte du CERN, la hiérarchie est dominée par les physiciens, les projets sont (au moins au niveau stratégique) définis par des physiciens, et il existe parfois une certaine tendance de certains physiciens à considérer que les ingénieurs sont des sortes de techniciens supérieurs qui en connaissent moins sur leur propre métier que les physiciens eux-mêmes, puisque beaucoup d'entre eux considérent que « *la physique est la mère de toutes les techniques* » [137].

C'est donc de différences culturelles vis-à-vis du projet qu'il s'agira : différences sur la définition initiale des projets, sur l'évolution de cette définition, sur les méthodes, techniques et outils de management, voire sur la nécessité même d'une stratégie de management de projet pour ATLAS [Hyppölä 2008 ; Marchand et Margery 2009]. Nous tâcherons de ne pas tomber dans le piège d'une opposition frontale entre groupes radicalement différents : tous les physiciens ne sont pas identiques, pas plus que la catégorie d'ingénieur ou de technicien n'est homogène. Il est toutefois des espaces d'échanges à créer entre sous-cultures.

3.2.4 Définition de tâche : le rôle du manageur technique

Derrière toutes les questions de positionnement organisationnel exposées dans l'étude de cas sur le bureau technique figure une question sous-jacente : la définition du rôle du manageur technique. À chaque source de tension évoquée au premier point correspond une acception différente de ce rôle, qui porte à la fois sur sa dimension managériale et technique, sur ses prérogatives, sur ses relations avec ses pairs, sur les ressources mises à sa disposition et sur l'attitude à adopter à leur égard, sur les comptes qu'il doit rendre, à qui et de quelle nature. La recherche de la bonne structure est liée à cette définition, laquelle est en retour liée à cette structure, aux interfaces qui se construisent et aux interrelations entre les différentes entités qui la composent. C'est tout cela que nous souhaitons démêler.

À cela aussi une motivation profonde, que la rédaction de cette étude de cas a fait remonter à ma mémoire sans pourtant qu'aucun des documents retrouvés ne le mentionne : la crainte de l'inutilité, le questionnement sur la valeur ajoutée. Ainsi, il a été envisagé pendant un temps assez long, aussi bien par la hiérarchie que par le projet ATLAS, que les dix à douze ingénieurs et projeteurs qui travaillaient au sein du Bureau technique pour le projet ATLAS soient dispersés et affectés chacun directement au sous-détecteur ou au projet pour lesquels ils fournissaient leurs études. Était-ce à dire que ma valeur ajoutée n'était pas perçue, que ce soit en termes de coordination entre les études, de conseils techniques, ou d'efforts d'homogénéisation des techniques de gestion des données, ou tout simplement de circulation des informations tacites au sein de l'ensemble des projeteurs travaillant pour ATLAS ? Et si *a contrario* cette valeur ajoutée était perçue, alors pourquoi n'était-elle pas reconnue, et avec elle l'intérêt de conserver une structure qui maintienne ensemble cette communauté de pratiques, qu'un manageur technique continuerait d'animer ? C'était une vraie question, et une vraie douleur.

De là proviennent mes questions sur le rôle du manageur technique et sur la visibilité de ce rôle pour l'ensemble de ses partenaires : hiérarchie ascendante et

137. Je me souviens d'une anecdote : face à mes réticences à faire usiner une pièce de forme gauche complexe avec une tolérance de forme générale inférieure au micron, un physicien m'avait rétorqué que lui, il savait ce que c'était, "*un micron*"! Sous-entendu qu'il arrivait sans souci à y caser 1000 nanomètres…

descendante, pairs et homologues, acteurs de projets, spécialistes. Cette question de l'utilité (non) perçue ressort de l'ensemble des cas de la partie II. De là à en faire une caractéristique intrinsèque du manageur technique, c'est un pas que je ne franchirai pas sans précaution ni étude complémentaire.

3.2.5 Quels outils, quelles ressources

Les questions organisationnelles mobilisées induisent celle des ressources mises à disposition, autrement dit, des arbitrages entre les différents projets menés conjointement au CERN. Pour un ingénieur devant effectuer une tâche donnée dans le cadre d'un rôle à jouer dans un projet, c'est une question cruciale : il doit pouvoir compter sur une équipe dont il définit l'activité, ainsi que sur les contributions de services spécialisés dont il va solliciter l'appui (ce sera particulièrement mis en valeur au chapitre 7). L'équipe d'un ingénieur représente l'extension de son action potentielle.

Les seuls outils mobilisés dans notre étude de cas sont des outils classiques de modélisation des organigrammes organisationnels. Les études de cas de la partie II seront l'occasion d'en étudier quelques autres, en particulier aux chapitres 5 (gestion d'espaces, enveloppes) et 8 (gestion des données techniques).

3.3 Caractéristiques de la complexité perçue

Nous avons mentionné les trois axes : projet, métier, organisation hiérarchique. Nous avons exhibé le nombre important d'entités organisationnelles en jeu et leurs interrelations. Si le nombre est un élément de complication de la situation, cela ne suffit pas pour établir son caractère complexe. Plus pertinente est l'entrée par les interrelations, et leur influence mutuelle. Pour le manageur technique, savoir se positionner dans cet hyperespace dynamique est un défi bien supérieur à celui du jeune ingénieur du chapitre 0 : il lui manque une hypercarte qui lui permettrait d'identifier les frontières, les interfaces entre son *"topos"*, à savoir le lieu de son activité, et celle des autres entités avec lesquelles il aura affaire, et un hypercompas pour s'orienter. C'est pourquoi nous avons ébauché – sans trop y plonger encore, nous avons besoin de nourrir la réflexion avec davantage de données de terrain – le croisement entre d'une part les cinq éléments (contexte organisationnel, situation donnée, personnalités des acteurs, rôle et tâches à accomplir, outils et ressources mobilisées) de la grille d'analyse AUTOS de Boy en cinq complexités cognitives [Boy et Bradshaw 2006], et d'autre part les trois axes projet / organisation / métier du manageur technique exhibés au cours de cette analyse de l'étude du cas du Bureau technique.

De tous ces éléments, nous pouvons extraire trois caractéristiques globales du cas : l'impossibilité de séparer l'acteur, l'observateur et le contexte ; une inscription des actions dans une temporalité non réversible – une équipe dissoute ne se refonde pas facilement, une restructuration menée à son terme ne se déstructure pas spontanément ; et la mutuelle influence des acteurs sur les structures, et des structures sur les acteurs – comme on l'a vu avec les circulations des propositions et contre-propositions de restructurations à travers les trois lignes hiérarchiques ATLAS, EP et EST, elles-mêmes en interrelation. Ces trois caractéristiques sont de surcroît liées entre elles – c'est une signature de la complexité. Ce constat induit trois réflexions principales. La première porte sur le processus de conception et d'intégration, la deuxième concerne le manageur technique, et la dernière soulève la question de la complexité.

Premièrement, l'activité technique du manageur technique, peu illustrée encore à ce stade, peut-elle être décrite par des processus linéaires et séquentiels ? Il ne

s'agit plus en effet simplement, dans cette activité, de trouver *la* solution optimisant des critères bien définis à un problème soigneusement posé au préalable dans un contexte proprement établi. En tant que responsable de bureau d'études, le manageur technique que nous avons commencé de voir à l'œuvre doit mener à bien la conception de produits, dispositifs ou systèmes techniques constitutifs d'un détecteur de particules. Ce bureau d'études, fort à propos dénommé Bureau technique, a en fait pour mission non seulement de concevoir, mais également d'assurer le suivi de la réalisation de ces produits. En outre, l'utilisateur final s'implique fortement dans le processus de conception [Von Hippel 1976]. Considérer qu'il suffirait de fournir une conception "optimale" répondant à un cahier des charges fonctionnel "défini" pour obtenir un système "satisfaisant" pose assurément problème [Garud, Jain et Türtscher 2008].

Deuxième réflexion : plongé dans un contexte et une situation tels que décrits, en particulier compte tenu de la première réflexion précédente, le manageur technique se trouve en recherche dialectique de définition de son rôle et des modes d'exécution des tâches qui en découlent. Et se définir, c'est définir les interfaces qui doivent être construites et entretenues avec le reste du monde. Nous avons déjà souligné le stress que de telles questions induisent, et nous reviendrons sur l'adaptation entre performance et niveau de stress [138]. Il nous faut d'ores et déjà souligner le caractère *réflexif* et *permanent* (à mes yeux) de cette recherche, dans des situations de projets et d'organisations hautement dynamiques, et en esquisser la dimension nécessairement globale et *systémique*. Chacun se définit dans une structure qui se définit elle-même en fonction de la façon dont chacun se définit.

La troisième réflexion, qui est en quelque sorte le reflet de la deuxième, est la nature de complexité perçue de ces situations. Les trois caractéristiques relevées ci-dessus se conforment en effet précisément à la formulation de Le Moigne :

> *Les trois caractéristiques de la modélisation de la complexité perçue (par un sujet ayant projet de représentation de ses perceptions, téléologique donc) aujourd'hui les plus généralement admises sont : a. l'inséparablilité, ou la contextualisation de l'observacteur ; b. l'irréversibilité temporelle ; c. la récursivité.* [139]

On notera l'utilisation du néologisme "observ'acteur" [140], néologisme qui veut souligner le rôle dual de l'observateur en action, de l'acteur en observation, ou encore de l'acteur conscient d'agir et de l'observateur conscient d'observer. Il s'agit donc d'aborder la question de la définition du rôle du manageur technique sous un autre angle, celui de la contribution des outils de la pensée complexe. En fait, il ne s'agit pas d'un autre *angle* ; il s'agit d'une toute autre *perspective*, d'une nouvelle *orientation* : le rôle du manageur technique est complexe, et c'est le complexe qui permet de définir le rôle du manageur technique. Cette situation de complexité appelle de nouveaux paradigmes pour les projets complexes, selon Williams [1999].

3.4 Trois questions de recherche entrelacées

C'est la nature profonde de la complexité qu'elle ne puisse être exposée simplement. De manière pragmatique, mettons un pas devant l'autre sur ce chemin qui se fait en marchant : les trois conséquences formulées ci-dessus induisent trois questions de recherche qui s'entrelacent de manière complexe. Il est temps de les formuler.

138. Voir le chapitre 9, § 9.1.2 p. 262.

139. Colloque AFSCET-MCX de la Presqu'île de Giens, 5-6 oct. 1998, « Stress et complexité », résumé de l'intervention de J.-L. Le Moigne, http://archive.mcxapc.org/docs/ateliers/stressjlm.htm.

140. C'est moi qui ajoute l'apostrophe, pour plus de clarté.

3.4.1 La question première du rôle du manageur technique

J'ai posé les premiers linéaments de cette question en conclusion de mon travail de DEA, lorsque j'ai étendu le cadre théorique des contraintes galisoniennes exposées dans *Ainsi s'achèvent les expériences* [Galison 2002] à la période contemporaine de la physique, à partir des années 1980 et de l'émergence des mégacollaborations. J'en arrivais à la conclusion suivante :

> *Entre [physiciens et ingénieurs] s'instaure une tension dialectique, qui s'exprime dans des zones d'échange par le biais d'objets intermédiaires, matériels ou non. Quels sont ces objets, comment et par qui sont-ils élaborés, et dans quel contexte ? Comment se constituent ces zones d'échange ? Quelles représentations des objets techniques sont mobilisées, par quels acteurs et dans quelles circonstances ? Quels sont les modes de décision ? Quelles responsabilités sont affectées à quels acteurs ? Comment les flux d'information, les demandes de modifications, les validités des documents sont-ils gérés ? N'a-t-on pas atteint un point de bifurcation dans la croissance en complexité de ces expériences, qui rendrait leur gestion sociotechnique difficilement maîtrisable ?* [Nicquevert 1999, 88]

J'annonçais alors m'atteler à ces questions en suivant l'exemple de l'élaboration et de la validation des enveloppes géométriques affectés à chaque système d'un détecteur de particules [141]. Une décennie plus tard, je souhaite m'en emparer à nouveau, constatant que le point de départ est resté le même, et que déjà la question de la complexité y était évoquée ! Le terme de manageur technique n'avait toutefois pas encore émergé dans ma formulation.

Entre 1995 et 2000, j'ai mené une assez longue réflexion, évoquée au chapitre 1, à la fois du point de vue professionnel et du point de vue conceptuel. Cette réflexion était simultanément nourrie d'une part par le terrain et le fruit d'une certaine évolution de carrière, et d'autre part par les réflexions et émergences d'idées autour du travail de thèse de Pascal Lécaille. J'en étais arrivé à la conclusion que quelque chose m'échappait, que je ne comprenais pas. Souhaitant alors m'asseoir pour me regarder marcher, en position méta-fonctionnelle, je voulais analyser les raisons des difficultés que je rencontrais ; j'en avais témoigné dans un article intitulé *Ressources, contraintes et difficultés dans les pratiques de conception d'un grand projet scientifique* [Nicquevert 2000]. Quelle est la part respective de ce qui était dû intrinsèquement à ma personne ? Quelle est la part de ce qui est dû à mon inexpérience et mon inadaptation ? Qu'est-ce qui est inhérent à ma fonction ? Qu'est-ce qui est induit par l'organisation plus ou moins adaptée de la Coordination technique d'ATLAS ? Qu'est-ce qui est imposé par la nature du projet ? Qu'est-ce qui est contingent à toute activité technique dans un contexte de « *grand projet, mais scientifique* » ? J'étais mûr pour une recherche-action immergée [142].

Au départ figure donc un questionnement personnel, en forme d'auto-questionnement : qui suis-je en tant que manageur technique ? Et d'ailleurs, qu'est-ce qu'un manageur technique ? Et est-ce approprié de désigner ainsi l'acception que recouvre cette expression ? De quels attributs est-il, ou doit-il être doté ? Les possédé-je, et sinon, comment puis-je me les approprier ? Et ce, dans quel but, pour accomplir quelles tâches, et avec quels résultats attendus ? C'est en quelque sorte une auto-boucle sur le rôle du manageur technique comme acteur d'interface dans le processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation (formulation que j'aurais alors été bien en peine d'articuler).

141. Ce sera précisément l'objet des chapitres 5 et 6.

142. La question sera approfondie au § 4.1 p. 102.

La formulation initiale de la question de recherche qui résume ces interrogations et qui a servi de guide pendant la préparation de la thèse, est : *le rôle du manageur technique dans le déploiement et l'exploitation d'outils de gestion, de coordination et de coopération dans des grands projets complexes*.

a. Le manageur technique, ébauche de définition

Ce sera l'objet du chapitre 9 (en ouverture de la partie III) de définir plus en détail le rôle du manageur technique, une fois exposés dans la partie II ses actions et ses tourments sur le terrain. Pour l'instant, je propose une première définition du manageur technique contenant la dualité qui le caractérise : manageur *et* technique. Il s'agit d'évoquer la position de manageur de niveau intermédiaire, situé à un certain niveau tactique entre des acteurs techniques de niveau opérationnel ou exécutif, et des dirigeants œuvrant au niveau stratégique d'un projet ou d'une organisation. Et il s'agit d'en souligner la dimension technique, c'est-à-dire qu'elle porte non seulement sur l'organisation du travail des acteurs opérationnels, mais aussi sur leur contenu technique et leur dimension cognitive. C'est typiquement, pour fixer les idées, un ingénieur (ou un technicien supérieur expérimenté) ayant en charge une ou plusieurs équipes, et dont la mission est de réaliser et piloter l'exécution d'un ensemble de tâches techniques établi par le management du projet ou la direction d'une organisation. Cette définition provisoire contient les trois dimensions importantes : management d'équipe, management de projet, contenu technique important des activités.

La question ainsi formulée, on pressent que le manageur technique aura assurément un rôle de médiateur qui devra gérer un certain nombre d'interfaces : avec son équipe, avec sa direction, avec ses pairs et homologues, avec les équipiers de ses pairs, avec des équipes support, avec des outils de gestion… Et que ces interfaces peuvent être de nature diverse : organisationnelle, technique, humaine… N'anticipons pas davantage, il nous faut accumuler du matériel et observer les faits sur le terrain avant d'aller plus avant.

En termes de *prescriptions* possibles ultérieures, les réponses à la question de recherche sur le rôle du manageur technique pourront tenter de satisfaire les sous-questions suivantes :

> *Quels sont les problèmes caractéristiques rencontrés par le manageur technique au cours des phases de conception et d'intégration, puis de construction et de mise en œuvre de grands projets scientifiques ? Comment accompagner le manageur technique dans la résolution de ces problèmes ? Quelles lignes de conduite promouvoir, quelles bonnes pratiques conseiller ?*

Une telle approche conduit naturellement à interroger la pertinence de la modélisation de l'activité ou du cycle de vie d'un projet par des processus linéaires et séquentiels. C'est l'objet de la deuxième question de recherche sous-jacente à la présente, et qui est décrite au § 3.4.2.

b. La place des outils de gestion

Afin de resserrer le spectre de l'observation – qui est mille fois trop vaste si l'on veut le considérer à 360° , ou selon un angle solide de 4 π stéradians –, nous allons nous concentrer pour commencer sur les modes selon lesquels le manageur technique contribue au déploiement des outils de gestion, et à leur exploitation afin d'améliorer coopération et coordination. C'est un resserrement qui enrichit le regard puisque, selon la principe complexe de récursivité, la question de la place des outils renvoie à l'ensemble des autres modes d'action du manageur technique en interrelation avec le contexte.

La sous-question de recherche est ainsi formulée :

Quels types d'outils le manageur technique est-il amené à déployer pour favoriser une gestion adaptée, une coordination adéquate et une coopération optimale des différents acteurs de projet ? Quelle stratégie de déploiement adopter ; ou encore, à l'ordre trois : quelle stratégie de stratégie de déploiement ?

c. Le contexte des grands projets scientifiques

La question de la généricité des réponses apportées mérite d'être abordée : qu'est-ce qui est spécifique au contexte particulier des grands projets scientifiques, et qu'est-ce qui peut se transposer *mutatis mutandis* à d'autres grands projets complexes, ou éventuellement à des projets considérés comme "non complexes", si tant est qu'il en existe ? Ceci pose la question de la frontière entre projet complexe et non complexe, et amène directement à la troisième question de recherche englobante formulée au § 3.4.3. Notre approche consiste, toutefois, non pas à prendre une dimension du manageur technique et à effectuer une étude comparative dans différents contextes, mais au contraire à saisir la globalité de l'action du manageur technique dans un contexte complexe particulier donné, et à en approfondir l'étude. Le modèle que nous élaborerons dans la partie III, basé sur ces observations actives, est d'une généralité suffisante pour s'appliquer ensuite à tout type d'activité de manageur technique. Le contexte de grand projet scientifique, par sa complexité particulière, aura eu le mérite d'avoir fait jaillir les questions dans toute leur profondeur et avec une particulière acuité.

3.4.2 La question sous-jacente des processus de conception et d'intégration

Nous avons retenu, dans les études de cas de la partie II, plusieurs modes d'activité du manageur technique : gestion d'espace, gestion de projet, gestion de flux (d'informations) et gestion de données. Ces quatre modes me semblent constituer le cœur de l'activité du manageur technique, hypothèse que nous éprouverons au regard des observations issue du terrain. De manière sous-jacente à ces modes, c'est l'activité d'intégration en général qui est particulièrement présente dans les cas exposés. On entend par *activité d'intégration* toute activité visant à *vérifier la mutuelle compatibilité des constituants d'un système, à identifier les frontières et interfaces pertinentes entre ces constituants, et à simuler le fonctionnement potentiel du système.* Cette activité d'intégration participe donc du processus de conception, sans toutefois ni s'y réduire ni l'englober. Cette activité nous permettra de faire un lien direct entre actions de terrain et rôle fonctionnel du manageur technique.

La problématique de génie industriel liée à ces processus est celle de la *conception collaborative*. Le chapitre 2 a suffisamment exhibé le caractère complexe du CERN et de ses projets pour que le caractère collaboratif de leur conception ne fasse pas de doute. C'est au point que les collaborations de physique en portent le nom même : des Collaborations. La question de la conception collaborative a été amplement travaillée dans la littérature, et certains des outils élaborés seront repris dans la partie III. Or, dans un processus de conception collaborative, le processus d'intégration est crucial. C'est celui qui est censé assurer la compatibilité mutuelle des différentes contributions simultanées, ou concourantes. Autrement dit, la question que doit régler le manageur technique est celle d'assurer la convergence temporelle de trois processus : définition du besoin, conception d'une solution, réalisation du projet, et ce à ressources (dynamiques) données. Il assure cette convergence à l'aide d'outils de gestion de projets et de processus de décision, tout en garantissant la qualité des solutions techniques, en suscitant une intégration des points de vue et des connaissances, et en animant sur un mode collaboratif l'élaboration conjointe de la spécification fonctionnelle et des solutions techniques.

On s'interrogera donc de la manière suivante :

Quelle est l'interrelation entre processus de conception, processus d'intégration, processus de projet ? Dans une logique de conception collaborative, ou intégrée, ou concourante, comment envisager le déroulement global et simultané des activités de conception, de réalisation et de coordination de projet ? Comment articuler une approche déterministe globale de tels processus avec des phases d'élaboration et de validation de certaines de ses phases ?

3.4.3 La question englobante d'une approche par la complexité

Au début de mes réflexions, j'imaginais cette question comme étant relativement spéculative, et inspirée davantage par mon cheminement conceptuel et philosophique que par les préoccupations plus directement opérationnelles qui motivent la question première sur le rôle du manageur technique. En fin de compte [143], c'est cette approche par la complexité qui permet de rattacher la question du rôle du manageur technique à la systémique, à la modélisation dynamique des processus, à la navigation dynamique de projet [Freisleben et Vajna 2002] et au champ académique foisonnant qui entoure ces questions.

La question préalable, à ce stade, est formulée de la manière suivante :

En quoi une approche par la pensée complexe et la systémique est-elle féconde pour aborder la question du rôle du manageur technique ? Quels résultats obtient-on en déclinant cette approche dans le domaine du génie industriel, du management de projet de de la gestion du cycle de vie du produit ?

Est-il possible de construire un outil, un hypercompas, qui éviterait l'errance ?

Ou bien devrait-t-on plutôt constater que cette question d'éviter l'erreur et l'errance est une fausse question, et que l'égarement est constitutif même de la trajectoire de projet complexe ? Plutôt que de vouloir réduire, voire exclure cette complexité, ne vaudrait-il pas mieux au contraire l'intégrer comme un facteur de sérendipité [144], voire une source de créativité ?

3.5 Une triple réponse

Ré-ordonnons ces trois questions, par ordre de généralité croissante :
Question n° 1 : les processus de conception / intégration (§ 3.4.2)
Question n° 2 : le rôle du manageur technique (§ 3.4.1)
Question n° 3 : l'approche par complexité (§ 3.4.3)

Dans ce contexte de triple question, nous soutiendrons la triple thèse suivante :

(1) la conception recouvre à la fois le résultat du processus et la définition de son propre processus, indéterminé par nature. Concevoir, c'est concevoir à la fois la conception et le processus de conception collaborative, y compris le processus d'intégration, et également y compris le processus de gestion de projet associé et de réalisation du produit ainsi conçu. Concevoir, c'est intégrer les exigences fonctionnelles, intégrer les exigences de production, intégrer les exigences de contexte de projet, et c'est intégrer les boucles qui lient ces trois pôles deux à deux, trois

143. Nous le verrons amplement dans la partie III, puis au chapitre 16.

144. Expression de Walpole tirée d'un conte de Ceylan. Selon Ancelin [2001, 166], la sérendipité est la « *faculté de faire des découvertes heureuses et inattendues par hasard* ». Selon les travaux de Dew [2009, 736] sur l'application du concept à l'entreprenariat, le terme de sérendipité « *combines the notions of (fortunate) 'accident' with 'sagacity', which means acute mental discernment and a keen practical sense* » : elle « associe les notions d'incident (heureux) et de sagacité, ce qui signifie une capacité mentale aiguisée de discernement et un sens pratique développé ». C'est avec regret que nous ne développerons pas outre mesure cette piste.

boucles dialogiques complexes interdépendantes, constituées en un *processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation*. Concevoir, c'est conserver actives ces boucles complexes fonctionnant selon (3), tout au long du cycle de vie du produit, qui n'est séquentiel qu'à un niveau macroscopique global (lié à la nécessaire convergence temporelle du processus). Concevoir, c'est *manager les interfaces* entre produits, entre projets, entre processus, entre protagonistes et équipes grâce à l'action (2) du manageur technique.

(2) Pour réussir l'intégration des différents acteurs de projet, des différents objets, des différents outils, et des différentes tâches, **le manageur technique** fonctionne comme le moteur des boucles dialogiques complexes, et donc **se constitue comme acteur d'interface.** Il doit structurer de manière adéquate les interfaces appropriées à chaque étape des processus simultanés, dont l'interdépendance est due à (1), et ***manager l'interface*** avec les autres acteurs du processus collaboratif afin de permettre l'émergence et d'animer la *dynamique des espaces d'échanges* entre acteurs, dans le respect du niveau critique de décomplexification imposé par (3).

(3) Pour gérer des projets complexes, il convient d'adopter un modèle complexe de niveau adapté, qui respecte **un niveau critique de décomplexification** en deçà duquel le simplisme l'emporte**.** Cela permet d'éviter la déliquescence de l'action managériale par décomposition excessive de problèmes en sous-problèmes exagérément découplés, et de conserver aux processus leur globalité tel que défini en (1), et donc de conserver, en *manageant l'interface* entre ces niveaux de représentation, les vertus opérationnelles de cette modélisation de la globalité systémique et des caractéristiques inhérentes à la complexité intrinsèque du projet telle que mise en œuvre par le manageur technique dans le cadre de (2).

Pour établir cette triple thèse, je vais affronter cet entremêlement, cette intrication, cette simultanéité, cette dépendance mutuelle, cette co-extensivité… bref, cette complexité. L'on n'éludera pas le caractère dialectique (ou pour ainsi dire trialectique [145]) des trois faisceaux de questions. Nous avons adopté une approche systémique, la pensée complexe est donc déjà à l'œuvre. La troisième question suscite la deuxième, qui permet d'illustrer la première tout en résonant avec la troisième, qui enrichit la première et la rend opérationnelle. Et vice-versa. Les trois questions sont en quelque sorte tressées, chacune adressant son propre niveau tout en s'ancrant aux deux autres. C'est ce tressage que nous traiterons en tant que tel dans la partie III [146].

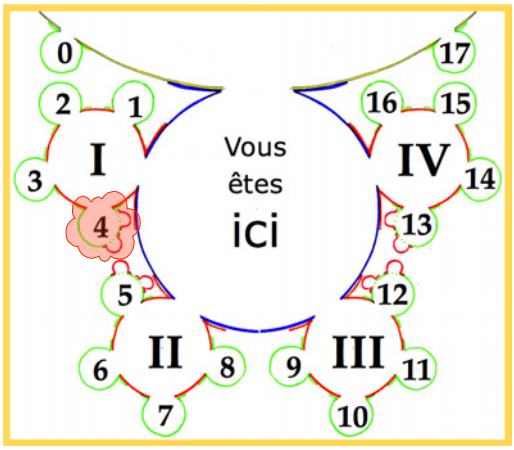
∴

Maintenant que nous voici munis d'une triple question de recherche, et d'une triple thèse à démontrer, il nous faut éclairer quelque peu le chemin qui nous mènera à l'établissement de ces résultats, et expliciter l'itinéraire méthodique que nous allons suivre. C'est l'objet du chapitre 4, qui achève la partie I, avant que la partie II nous donne véritablement l'occasion de voir à l'œuvre le manageur technique sur le terrain [147].

145. Nous anticipons sur le chapitre 16, qui présentera précisément une approche trialectique plus formalisée de ces trois questions, basée sur les travaux de Gigand [2010].

146. Voir la mise en place de la "matrice méthodologique", chapitre 10, § 10.3 p. 293 sqq.

147. Sans perdre de vue que chaque partie reste incomplète par nature, en raison de *l'espace de bouclage* de l'omega, c'est-à-dire de son ouverture aux autres parties, et de l'ouverture de l'ensemble des parties de la thèse aux autres thèses, et puis au reste du monde (c'est l'une des suggestions de la *cartomegador* exposée à la fin du chapitre 0, Figure 0.1 p. 23).



Chapitre 4. La méthode

Où sont exposées les quelques orientations méthodologiques qui seront suivies pour trancher autour du nœud complexe des questions de recherche auparavant esquissées

Les rapports « scientifiques » – c'est-à-dire basés sur l'observation des autres – sont faux et factices : pour connaître une population il faut à la fois la « vivre » et la « regarder ». C'est pourquoi ceux qui vivent doivent apprendre à regarder, ou ceux qui regardent doivent apprendre à vivre – au choix.

Germaine Tillion [148]



Figure 4.1: Observer le terrain ?!

Source : Arleston et Mourier, *Trolls de Troy*, t. 14, Ed. Soleil, 2010, p. 3.

148. [1963 (?)]. *Fragments de vie*, Le Seuil, 2009, p. 179.

Entre le « *vivre* » et le « *regarder* » de l'épigraphe de Germaine Tillion, ethnographe bien connue pour son immersion dans les milieux qu'elle étudiait, entre ces deux pôles de l'attitude scientifique, entre sujet d'étude et objet d'étude « scientifique », réside cette distance parfois réservée, parfois hostile, souvent au mieux aimable, que l'on retrouve entre les « hommes de terrain » et les « académiques » de disciplines comme le génie industriel, le management ou la sociologie. Avenier [2009] n'est pas la première à avoir insisté sur l'intérêt de combler ce fossé « *réputé infranchissable* » pour construire des savoirs scientifiques « *pertinents pour la pratique* ». C'est dans ce fossé-là que je creuse, ou plutôt que je m'efforce de construire. C'est même la *raison d'être* de cette thèse.

M'interrogeant sur ce qu'il convenait que j'apprenne, de vivre ou de regarder, j'assume que ma position est d'abord résolument d'être de ceux qui « vivent » (parmi) la population qu'ils étudient, pour en être un membre à part entière depuis près de vingt ans. Et d'un autre côté, pour avoir accompagné de très près parfois ceux qui venaient nous « regarder », j'ai appris à affiner mon regard pour prétendre construire quelques briques de savoirs scientifiques suffisamment fondés, et apporter ma pierre à l'édification du temple académique tout en dévoilant quelques tours de mains à mes compagnons de terrain. C'est dans ce va-et-vient dialectique que s'établissent lesdits savoirs : émergeant du terrain, les concepts élaborés et polis sur le métier, puis validés d'une part par leur contribution et leur légitimation académique, et d'autre part par leur utilité et leur actionnabilité sur le terrain. Né du terrain, un savoir « *actionnable* » [Avenier et Schmitt 2007] ne peut être validé que par le terrain, après qu'il aura été adoubé par la faculté.

J'ai assumé d'emblée, avec les risques et difficultés qu'il ne faut pas méconnaître, d'être moi-même au centre du terrain de la thèse. Au point que, lorsque je parle de manageur technique, cette figure se superposerait parfois excessivement au personnage que j'incarne. À cela, une seule justification, et Vico l'a exprimée en peu de mots : « *Verum esse ipsum factum* » [149]. Les observations les plus fines, les entretiens les plus précis, les enquêtes les plus fouillées, les statistiques les plus savantes, les synthèses de littérature les plus exhaustives, tout cela jamais ne restituera de manière satisfaisante la profondeur du vécu, dont la saveur est indicible. Sait-on décrire le goût d'une orange ? Aucun discours savant ne remplacera le jus qui coule dans la bouche, l'acidité qui stimule les papilles, le sucré qui emplit le palais. Le philosophe aristotélicien parlera de manière pédante d'un enseignement "*acroamatique*". Germaine Tillion exprime cette idée de manière plus évocatrice :

> *Il n'y a qu'une expérience valable pour chacun de nous, celle que nous avons sentie dans nos propres nerfs et nos propres os. Depuis l'expérience la plus banale que tout être humain connaît ou croit connaître – la faim – jusqu'à l'expérience la plus haute – celle de ces conflits déchirants dans lesquels une personnalité s'affirme ou se détruit –, rien, absolument rien ne s'invente. Comprendre, imaginer, deviner, c'est associer selon des modalités inépuisablement diverses des sensations acquises par l'expérience, et acquises seulement par l'expérience… Toute la mécanique de notre érudition ressemble aux notes écrites d'une partition musicale, et notre expérience d'être humain, c'est la gamme sonore sans laquelle la partition restera morte. Combien y a-t-il d'historiens, de psychologues, d'ethnologues – les spécialistes de l'homme – qui, lorsqu'ils assemblent leurs fiches, ressemblent à un sourd de naissance copiant les dièses et les bémols d'une sonate ?* [Tillion 2009, 48]

149. « L'on ne peut vraiment connaître que ce que l'on a fait soi-même. » (C'est moi qui traduis). G. Vico, *De Antiquissima Italorum sapientia,* 1710. Traduit en français [Vico 1993]. Fréquemment cité par Le Moigne.

Cette posture méthodologique qui consiste à s'immerger sur le terrain à travers sa propre expérience a été travaillée dans la littérature, et mon approche n'est donc pas dépourvue de garde-fous. C'est à cela que ce chapitre, ultime de la première partie consacrée aux genèses de ce travail de thèse, sera consacré. Je préciserai donc le cadre de la recherche-action mise en place, qui se déploie à travers une étude de cas multiples. Le dispositif méthodologique précis est inspiré de la DRM, la *Design Research Methodology* [Blessing et Chakrabarti 2009], qui m'a semblé la déclinaison la plus pertinente de la méthode de l'étude de cas pour les questions qui nous intéressent.

J'en terminerai par la présentation des quatre cas retenus et exposés dans la partie II, et de leur inscription dans une ligne du temps assez longue pour qu'il soit permis de parler de *co-construction* du manageur technique et de l'observateur :

> *Les événements vécus sont la clé des événements observés… À quelques âmes tourmentées et rares, il est parfois donné de comprendre d'emblée l'expérience des autres, mais la plupart des hommes ne connaissent et ne comprennent que ce dont ils ont fait, personnellement et très minutieusement, l'apprentissage. La réciproque est vraie aussi, et pour chacun, pour bien se connaître, il faut apprendre à considérer sa propre expérience avec des yeux étrangers.* [Tillion 2009, 276]

La scientificité de mon propos sera établie, je l'espère, à l'aune du regard « *étranger* » porté sur mes actions et réflexions de ces époques, et pour savoir en tirer des enseignements utiles et pertinents à d'autres que moi-même. La suite de ce chapitre va préciser de quelle « *propre expérience* » il s'agit – les études de cas –, et avec quels « *yeux étrangers* » nous la considérerons – la méthode.

4.1 Une recherche-action immergée

Qu'est-ce qui peut motiver un manageur technique à vouloir se lancer dans une telle recherche ? À quelles questions souhaite-t-il chercher des éléments de réponse ? Quelles sont les retombées attendues, pour lui-même et pour son organisation, ainsi que pour le progrès de la recherche dans son ensemble ? Nous avons évoqué au § 3.4.1 p. 93 le processus d'élaboration du questionnement sur le rôle du manageur technique, à l'issue duquel je me suis retrouvé mûr pour la recherche-action immergée, terme que j'utilise au sens de *recherche-action (en étant en fonction) dans ma propre organisation*. Cette formulation correspond assez bien à ce que Coghlan et Brannick appellent une « *insider action research* » [150].

4.1.1 Différents types de recherche-action

D'emblée à l'orée de ce chapitre se pose une question de vocabulaire. Et l'on sait à quel point un inopportun choix de mots peut entraîner des maux de choix : « *mal nommer un objet, c'est ajouter à la misère de ce monde* » [Camus 2006, 908]. La littérature sur la recherche-action est abondante [Avenier 2009] : on y parle bien entendu de recherche-action [Avison et al. 1999 ; Stephens, Barton et Haslett 2009], ou parfois d'action-recherche, avec une nuance dans l'ordre des mots [Gérard 2006], voire de recherche-action-formation. On parle également de recherche-intervention [David 2000], de recherche interactive, de recherche engagée [Van de Ven et Johnson 2006], de recherche collaborative, de recherche réflexive [Schön 1995] ou de « *insider research action* » déjà évoquée [Coghlan et Brannick 2009]. Il s'agit de trouver quelques repères dans des méthodes qui cherchent parfois artificiellement à se distinguer, alors que les pratiques sont étonnamment proches [Albaladejo et Casa-

150. « Recherche-action de l'intérieur ». In *Doing Action Research in Your Own Organization* [Coghlan et Brannick 2009].

bianca 1997], et de déceler parmi les déclinaisons au champ du génie industriel [Bender et al. 2002 ; Penaranda et al. 2010] celle(s) qui semble(nt) la (les) plus adaptée(s).

Il n'est pas question ici de procéder à une analyse fine des différents types de recherche-action, mais uniquement de préciser en quel sens nous l'entendons ici. Il ne s'agit pas de procéder à une recherche *sur* l'action, ou *pour* l'action, mais bien une *recherche dans l'action*. Ceci n'exclut pas, bien au contraire, que l'aboutissement souhaité et que les résultats attendus soient utiles à l'action et pertinents pour la pratique, mais ceci n'en constitue pas l'essence méthodique : il s'agit non pas, comme le dénonce Bourdieu [1997], de « *se retirer du monde et de l'action dans le monde pour les penser* », mais d'ouvrir la démarche de recherche aux acteurs eux-mêmes. Historiquement, cette démarche conduit à « *penser l'action-recherche en terme de consultation mettant en rapport deux systèmes : un système présentant un désir de changement sur lui-même et une demande d'assistance […] ; et un système d'intervention constitué des "agents de changement professionnels"* » [Albaladejo et Casabianca 1997, 130].

Qu'en est-il quand le système demandeur et le système d'intervention sont constitués d'une seule et même personne ? Les critères de démarcation entre les différents types d'intervention des chercheurs et les différents modes participatifs des acteurs dans la recherche-action prennent alors un tour particulier. La participation de l'acteur est constitutive même du projet, et l'intervention du chercheur nécessairement faite à la demande de l'acteur. Et vice-versa, serait-on tenté de dire. C'est pourquoi l'on pourrait mieux parler ici de recherche-action-formation, avec une dimension manifeste d'auto-formation [Pineau et Michèle 1983].

Et quand la personne en question décide d'effectuer dans le cadre d'un doctorat son travail de recherche-action-formation dans sa propre organisation, c'est encore une problématique spécifique. Aussi pointu ce sujet soit-il, la littérature l'aborde, dans un article parfaitement ciblé : *Insider Action Research Doctorates: Generating Actionable Knowledge* [Coghlan 2007]. Dès le titre, l'enjeu est posé, celui pour des doctorants travaillant dans leur propre organisation à la création de connaissances actionnables. Il souligne qu'un tel projet de recherche-action dans sa propre organisation est « *political and might even be considered subversive* » [151], puisqu'il renforce l'écoute, encourage le questionnement, nourrit le courage et incite à l'action, et en définitive s'inscrit dans une participation démocratique.

Coghlan dégage plusieurs pistes méthodologiques. D'abord, les programmes de recherche-action doctoraux ont selon lui le potentiel de mettre en valeur la qualité des trois voix / pratiques : la pratique à la première personne (enquête sur ses propres pratiques, développement de la posture réflexive et de l'auto-apprentissage) ; la pratique à la seconde personne (recherche-observation avec d'autres sur des sujets d'intérêt mutuel, développement à l'aptitude au dialogue, et surtout, pratique collaborative avec des parties prenantes multiples : que ce soit d'une part en interne – avec ses homologues, son propre management, les membres de son équipe ou les consultants et membres d'autres organisations –, ou d'autre part avec les superviseurs académiques et équipes de recherche) ; et enfin, la pratique à la troisième voix, qui à partir des deux premières, constitue la contribution apportée par la recherche à une audience impersonnelle grâce à la dissémination et l'extension des leçons tirées et de la connaissance actionnable élaborée. Il conclut sur ce point : « *the integration of first, second and third inquiry and practice is what gives insider action research doctorates their integrity* » [152].

151. Un tel projet est « *politique et peut même être considéré comme subversif.* » [Coghlan 2007, 298]

152. « L'intégration des pratiques et des recherches à la première, à la seconde et à la troisième [personne] est ce qui confère aux doctorants en recherche-action dans leur propre organisation leur intégrité ». L'emploi du terme d'*intégration* et d'*intégrité* entre en résonance avec le modèle d'acteur d'interface (§ 11.2.6 p. 332).

Ensuite, cette question de la connaissance actionnable issue du travail de réflexivité est évidemment particulièrement importante : « *reflection is the process of stepping back to process what the experience means, with a view to planning further action. It is the critical link between the concrete experience, the interpretation and taking new action* » [153]. Coghlan insiste sur les trois formes de réflexion, selon lui également critiques : réflexion sur le contenu, réflexion sur les processus, et réflexion sur les prémisses, critiquant les hypothèses et perspectives sous-jacentes. C'est un « *meta-learning* » [Coghlan et Brannick 2009], un méta-apprentissage : comme le développe Argyris [2005], la dynamique de cette *réflexion sur la réflexion* qui intègre le processus d'apprentissage du cycle de recherche-action, et lui permet de représenter davantage qu'une résolution de problèmes quotidiens.

Coghlan conclut sur les cinq attributs du mode de recherche-action ainsi adopté, qualifié de « *Mode 2* » [Gibbons et al. 1994] : 1- connaissance produite dans le contexte d'application ; 2- recherche transdisciplinaire ; 3- hétérogénéité et diversité organisationnelle ; 4- responsabilité et réflexivité sociales ; et 5- contrôle de la qualité structuré dans le contexte d'application et défini par un ensemble étendu de critères. Autant d'attributs qui s'appliquent tout à fait à notre projet de recherche : 1- nous produirons de la connaissance dans le contexte du CERN et des grands projets de recherche scientifique ; 2- nous étendrons le champ disciplinaire initial du génie industriel à la mécanique, à la physique (des particules), à la conception, à l'histoire (des sciences et géopolitique), au management des organisations, au management de projet, à la sociologie, et même à la philosophie ; 3- déjà illustrée dans le cas n° 0, la diversité organisationnelle sera encore enrichie à l'univers très vaste des Collaborations de physique (chapitres 5 et 6), et aux entreprises qui leur fournissent leurs instruments (chapitre 7) ; 4- les analyses développées ici se fondent sur des projets réels où j'ai eu des responsabilités concrètes, et leur publication est sensible à l'impact qu'elle peuvent avoir sur les terrains de l'organisation qui m'emploie ; et 5- c'est bien l'activation et l'application effective qui sont la mesure du résultat de ma recherche-action décrite à la partie IV.

Ainsi que conclut Coghlan, et dans l'esprit de l'évolution vers un mode d'agir ↔ penser dont nous aborderons les premiers éléments à la partie IV, l'approche par la recherche-action immergée développe « *the skills of reflection-in-action from reflection-on-action* » [154].

4.1.2 Une épistémologie constructiviste ? Une perspective constructionniste ?

Le courant déterministe est aujourd'hui dominant dans les disciplines des sciences pour l'ingénieur (et dans une moindre mesure, en économie et en gestion). Les travaux entrant dans ce cadre sont souvent des modélisations basées sur les outils de l'automatique ou informatiques (représentations objet, avec les formalismes d'analyse et de représentation associés). Ces travaux, qu'ils soient issus d'un travail de laboratoire ou d'une expérience industrielle, sont fondés sur une vision *a priori* du processus de conception, selon laquelle tout est explicitable et verbalisable, donc modélisable d'une manière ou d'une autre, et *in fine* optimisable. Tout écart est analysé en terme de dysfonctionnement qu'il convient d'éliminer. L'une des figures principales de ce courant est représentée par les travaux de Pahl et Beitz [2007]. L'intégration de nouveaux outils, méthodes ou processus est souvent posée en

153. « La réflexion est le processus de faire un pas en arrière à partir de l'expérience pour se faire une idée de ce que signifie cette expérience, dans la perspective de planifier une action future. C'est le lien crucial entre l'expérience concrète, l'interprétation et l'entreprise d'une nouvelle action. » [Coghlan 2007, 301]

154. « Les compétences de réflexion-dans-l'action à partir de la réflexion-sur-l'action » [Coghlan 2007, 303].

termes de pédagogie, d'explication ou d'organisation : sont intégrés ceux qui adhèrent, et écartés (par le management ou par le groupe) ceux qui résistent au changement. Or l'introduction de nouveaux outils implique, fait souvent occulté, une réinvention des pratiques individuelles et collectives : l'outil est l'objet d'une phase d'appropriation et d'incorporation, un processus loin d'être marginal et au moins aussi important (en temps et en investissement de la part des acteurs), voire davantage parfois, que la phase d'élaboration de l'outil : le développement se poursuit en fait avec un simple changement de modalité [Jeantet et Boujut 1998].

D'où l'intérêt d'une autre approche que l'on pourrait qualifier de *constructiviste* (y compris dans la dynamique d'apprentissage et d'appropriation des outils), ou de *pragmatique* (dans la mesure où elle se fonde sur l'observation empirique et l'analyse des pratiques effectives) [155]. Tout en respectant – et en prenant en compte dans l'analyse – la propension au réductionnisme, au déterminisme et au positivisme du "scientifique" (avec tous les guillemets que réclame une telle catégorisation par trop généralisante), je soutiens la position que la création de connaissances nouvelles est le résultat d'une construction (je n'ai pas rajouté : sociale) à travers les actions des acteurs, que l'observateur est un constructeur qui ne considère pas le monde étudié comme étant prédéfini, et que la démarche de modélisation de la réalité phénoménologique est un constituant même dudit modèle. Comment qualifier cette position ? Est-elle à ranger sous la bannière d'une *épistémologie* constructiviste [Le Moigne 2007] ?

> *Pour l'épistémologie constructiviste, la connaissance n'est ni une copie du monde ni une prise de conscience de formes prédéterminées, mais une construction perpétuelle fondée sur les échanges entre l'organisme et son milieu biologique, et entre la pensée et l'objet cognitif* (R. Campan [in Couvelaire et Demay 2005, 2:190]).

Elle en adopte sans aucun doute certains traits. Il nous semble en définitive plus juste de considérer ma position comme étant *constructionniste*. Nous la qualifierons également de "réflexivité épistémique", car la recherche-action immergée n'implique pas l'adoption d'une position constructiviste radicale. Cette position constructionniste, davantage ontologique qu'épistémologique sans doute, s'applique bien au domaine du génie industriel. L'espace me manque pour approfondir avec le soin nécessaire ces questions de positionnement épistémologiques pourtant passionnantes. Et nous ne pousserons pas plus avant la subtile distinction, tournant parfois à la confusion méthodologique, entre ces deux positions qui ne se placent de toute façon pas sur le même plan et sont selon moi complémentaires [156].

C'est probablement de l'attitude du praticien réflexif [Schön 1995] que ma démarche d'acteur se rapproche le plus : une réflexion dans l'action. C'est sur cette idée que s'est élaborée ma démarche de chercheur conceptualisant cette réflexion de praticien réflexif, et partant, que se sont construits les trois temps de la suite de la thèse : partie II *Agir sans trop penser*, partie III *Repenser avant d'agir*, puis partie IV *Agir et penser à la fois*. Et j'en reviens à la figure de l'observ'acteur proposée par Le

155. L'emploi du terme de *constructivisme* renvoie à tout un champ parfois violemment polémique et manquant parfois de rigueur dans son traitement. Le philosophe Ian Hacking traite du construc*tionnisme* (en particulier social), qu'il ne faut pas confondre avec le constructivisme, : « *By constructionism […] I shall mean various sociological, historical, and philosophical projects that aim at displaying or analyzing actual, historically situated, social interactions or causal routes that led to, or were involved in, the coming into being or establishing of some present entity or fact.* [Hacking 1999, 48]. « Par constructionnisme […] j'entendrai différents projets sociologiques, historiques et philosophiques ayant pour but de montrer ou d'analyser des interactions sociales ou des chaînes de causalité réelles, historiquement situées, ayant conduit à, ou ayant été impliquées dans la mise en évidence ou l'établissement de quelque entité ou fait présent ». [Hacking 2008, 74, trad. Jurdant]

156. À cet égard, les synthèses de Le Moigne [2007] sur les épistémologies constructivistes introduisent bien des nuances, que nous ne pouvons restituer ici. Nous évoquerons la question au § 10.2.2 (p. 288 sqq.), lors de la discussion sur le dépassement par la pensée complexe du holisme et du réductionnisme.

Moigne, qui est une figure de la complexité. Je me construis en tant qu'observ'acteur parce que je me construis en tant qu'observateur de mon action, et en tant qu'acteur de mon observation. Cette dialectique se construit au fil du temps et s'élabore au fil des pages, et elle illustre le principe complexe de Morin [1996] de « *réintroduction du sujet connaissant dans la connaissance* ». Dans le tome 3 de la *Méthode*, intitulé *La connaissance de la connaissance* [Morin 1986], il rétablit l'origine philosophique de cette réintroduction : c'est à Kant que nous la devons, qui opère une véritable révolution copernicienne de la connaissance.

> *Nous ne connaissons* a priori *des choses que ce que nous y mettons nous-mêmes.* [157]

La mise en évidence du rôle actif du sujet connaissant dans l'élaboration du savoir a ainsi radicalement transformé la vision de l'épistémologie : non pas seulement contemplative (Platon) ni déductive (Descartes), mais résolument constructiviste.

4.2 Étude de cas multiples

Il ne suffit pas de se poser comme “chercheur-acteur-auto-formateur” ou comme “réflexif épistémique” pour définir une méthode de recherche. Une posture n'est pas une méthode. Et celles proposées dans les cadres de recherche-action sont si variées que, dans le cadre qui nous est imparti, il est délicat d'y puiser la panacée. C'est pourquoi, afin de traiter efficacement et aussi scientifiquement que possible la matière du terrain et du vécu, nous avons opté pour une étude longitudinale de cas multiples, en suivant la méthode développée par Robert Yin dans *Case study research : design and methods* [Yin 2009]. Cette section résume les raisons de ce choix, ainsi que les grandes lignes de la démarche.

Pourquoi recourir à des études de cas ? C'est que nous sommes dans des situations où, compte tenu de la nature de l'objet, il s'agit d'étudier les phénomènes dans un contexte véritable, réel, pour lequel il n'est pas envisageable de construire des protocoles expérimentaux avec des paramètres contrôlables. D'autant plus, nous l'avons souligné à plusieurs reprises, que la séparation entre objet d'étude et contexte est impossible, leur mutuelle influence et leur dépendance au regard qu'on leur porte rendant toute tentative de démarcation velléitaire.

En outre, seule l'étude empirique donne accès à l'observation, et elle est particulièrement adaptée quand la recherche est motivée par le désir de « *understand complex social phenomena* » [Yin 2009, 4], compte tenu du grand nombre de variables intéressantes et de la multiplicité des sources d'information. Yin distingue différents types d'études de cas : explicatif, exploratoire ou descriptif ; avec cas unique ou multiples ; selon des méthodes qualitatives, quantitatives ou mixtes. Nous procéderons ici à une *étude de cas multiples, exploratoire et qualitative*.

Cette approche exploratoire par « *la méthode des cas utilisée n'est pas seulement illustrative, elle permet d'abord de décrire une réalité organisationnelle complexe en faisant émerger un questionnement, dont le traitement ensuite peut conduire à la production d'un modèle de compréhension. C'est ainsi qu'une recherche qualitative, s'appuyant sur cette méthodologie, participe au processus de théorisation* (Grounded Theory – [Glaser et Strauss 1977]) » [Yami, Nicquevert et Nordberg 2006].

L'observation du terrain sera souvent de style *ethnographique*, dans la lignée des travaux de Bucciarelli [1996] et Henderson [1999]. C'est une méthode de recherche qui a prouvé son efficacité pour les *Design Studies* [Jagodzinski, Reid et Culverhouse 2000], et qui a été utilisée en de nombreuses occasions [Perry et Sanderson 1998 ; Boujut et Laureillard 2002], en particulier dans le cadre des travaux de thèse de la collaboration entre les laboratoires grenoblois 3S et Cristo [Mer 1998 ; Lau-

157. *Critique de la raison pure*, Préface de la seconde édition (1787) [Kant 1944, 19, trad. Tremesaygues et Pacaud].

reillard 2000 ; Blanco 1998 ; Legardeur 2001]. Un cas très particulier est constitué des travaux de thèse [Lécaille 2003] portant en particulier sur le Bureau technique de la division EP du CERN, précisément celui dont il a été question lors de l'étude de cas n° 0. Nous en exploiterons bien entendu abondamment les résultats.

Afin de ne pas trop biaiser les résultats, Yin [2009] recommande de procéder à un relevé systématique de *tous* les éléments. Nous ne suivrons toutefois pas cette recommandation à la lettre. D'abord en raison du nombre considérable de ces éléments, et ensuite du fait qu'ils ne sont pas tous accessibles. Enfin, j'assume le filtre subjectif en l'intégrant dans le procédé réflexif : c'est à travers le vécu du manageur technique comme source primaire qu'il sera procédé à l'observation. Et cette observation particulière implique que ce qui est observé est le résultat d'un choix. Certains paramètres de choix sont sans doute involontaires – et ce que j'ai oublié ne possède pas le même statut que ce que j'écarte en conscience. Je fais l'hypothèse que si certains éléments sont omis involontairement, c'est soit qu'ils ne sont pas pertinents dans le cadre d'observation que je choisis, soit qu'ils sont trop dérangeants et écartés inconsciemment. Je constate aussi à l'inverse que, dans le travail de reconstruction *a posteriori* des cas, certains éléments absents de tout document remontent à ma mémoire, ce qui montre à nouveau que, en "observ'agissant", j'ai accès à des éléments qui n'auraient pas été accessibles à des observateurs extérieurs, ni même à des participants, puisque ces éléments sont purement personnels et non documentés en tant que tels.

C'est un défi selon moi d'« *écrire les cas* » de la manière « *neutre et objective* » prônée par Yin sans avoir défini *a priori* au minimum un cadre théorique, ou à tout le moins une grille de lecture en arrière-plan (c'est un mythe rationnel : celui – pour aller vite – de l'empirisme logique du cercle de Vienne [158]). Et ce pour une raison bien simple, exprimée par une métaphore bien connue : la carte n'est pas le territoire [159], et la description du cas n'est pas le cas. Comme l'a si bien narré Bruno Latour, la seule façon de construire une carte qui raconte tout le territoire, c'est de reconstruire le territoire… ce qui, on le reconnaîtra, n'est pas très aisé à faire entrer dans un volume de papier d'environ 21 x 29,7 x 2 (ou même 3) cm^3 ! Et de surcroît statique ! Et ce n'est pas aisé pour au moins deux raisons. D'une part de manière qualitative : le passage d'un phénomène du monde à l'expression qui le représente est produit par des médiations langagières, et l'on n'en sous-estimera pas les conséquences. Latour en appelle au terme de « *référence circulante* » [160] pour évoquer cette chaîne de médiateurs entre mon esprit et le monde. D'autre part, sous peine de crouler sous l'abondance de données exhaustives, il faut faire des choix, et ces choix doivent être guidés par une interrogation et un cadre d'analyse.

C'est pourquoi, avant que de plonger dans la description des cas, nous avons formulé une première version de nos questions sur le rôle du manageur technique, et nous avons souhaité les analyser par le paradigme de la complexité. Ce sont les premiers filtres assumés de cette description des cas. Le filtre suivant est celui de l'entrée par les outils, qui sera privilégiée au départ par rapport aux quatre autres possibles évoquées (organisation, situation, personnalité, tâche) ; mais ces entrées n'étant ni découplées ni découplables, le résultat restera très riche, et l'on verra bien vite qu'à travers l'outil, c'est l'ensemble qui tombe dans l'escarcelle.

Nous avons choisi une étude basée sur quatre cas initiaux, et un cinquième ultérieur. Cela permet de balayer différents champs d'actions du manageur technique,

158. Parfois connue sous la dénomination de positivisme logique, cette école philosophique postule que tout énoncé de connaissance doit être vérifiable par l'expérience, et distingue radicalement les "faits" des "valeurs". Voir par exemple l'ouvrage collectif *De Vienne à Cambridge* [Jacob 1996].

159. Avant qu'un certain littérateur contemporain s'en saisisse, il semble d'après Jean Caune [2010] que l'image ait été proposée initialement dès 1933 par Alfred Korzybski [2007].

160. « Le "pédofil" de Boa Vista, montage photo-philosophique », in *Petites leçons de sociologie des sciences* [Latour 1996].

de se placer à différents niveaux et d'identifier quels sont les invariants. La réflexion proposée croisera d'autres regards d'autres intervenants par rapport à l'objet d'analyse, avec un effort constant de distanciation et de réflexivité. Partant du contexte général du CERN et de celui de la Collaboration ATLAS présentés au chapitre 2, nous avons concentré peu à peu le regard au chapitre 3, avec la toute première étude de cas consacrée à l'évolution organisationnelle du Bureau technique de la division EP. Le regard va se concentrer encore davantage, sur des pratiques de coordination de projet global (chapitre 5 : intégration d'ATLAS), d'interfaces entre sous-projets (chapitre 6 : étude d'une négociation technique), de gestion d'un sous-projet (chapitre 7 : supports d'ATLAS), et de tâches et de procédures au service de projets (chapitre 8 : gestion de données techniques), avant de remonter à une synthèse globale des analyses au chapitre 9 embrassant ces différents niveaux. À chaque niveau, j'ai procédé autant que possible à la triangulation de différentes sources d'information. Ces sources dépendent des cas, tout comme les regards extérieurs, et les dispositifs spécifiques sont explicités dans la dernière section de ce chapitre.

Dans l'analyse ultérieure, à partir du chapitre 9 qui ouvre la partie II, nous montrerons à quel point ces différents niveaux, loin de fonctionner de manière autonome, sont imbriqués les uns dans les autres. Je m'attacherai par distanciation réflexive à faire la part des choses entre d'une part ce qui appartient en propre à "l'observ'acteur", et d'autre part ce qui caractérise la figure du manageur technique de manière générale. L'approche toutefois ne se soucie pas avant tout de généraliser à tout prix des résultats établis dans un contexte donné. Et l'on n'insistera jamais assez pour dire que ledit contexte n'est pas indépendant de l'observateur : le cas est *construit*. Illustrons ce point.

Nous avons évoqué au chapitre 1 (§ 1.4 p. 38) la question de « *l'adaptation du terrain aux besoins de l'observateur actif* » [161]. Je faisais alors allusion à une anecdote qu'il est plus facile de commenter maintenant, alors que nous avons décrit les principales caractéristiques de notre méthode de recherche. J'avais alors relancé l'étude technique de conception et d'intégration de la structure support dite *Small wheel* d'ATLAS, voisine du système qui nous intéressait (le disque de blindage) pour les besoins de notre étude ethnographique. Je m'étais inspiré du précepte de faire exister pour donner prise : « *le seul fait de travailler sur un élément comme le blindage conduit à attirer l'attention sur lui* » [Vinck 1999b, 29]. Quand les *desiderata* de la recherche (sociologique) dictent les priorités du projet (industriel) : « *ce terrain était,* a priori, *rêvé pour étudier la dynamique d'un processus de conception autour d'une expérience de physique* », précisais-je alors [*Ibid.*]. La question sous-jacente est presque d'ordre éthique, et m'avait troublé à l'époque : de quel droit moi, acteur de terrain, responsable de bureau d'études, puis-je me permettre de profiter de ma position décisionnelle pour lancer une étude pour la simple raison que je souhaitais qu'elle fût étudiée sous l'angle sociologique, même si cette étude, quoique nécessaire, n'avait pas été considérée jusque-là comme prioritaire par le projet lui-même ? Quelques années plus tard, mon sentiment de culpabilité s'est tout à fait dissipé. Considérer l'influence de l'observateur du terrain dans une attitude réflexive, c'est prendre en compte cette réflexivité et l'intégrer dans le dispositif, sans s'en émouvoir. Quelles que soient l'origine et la motivation de l'étude, même extrinsèques, si elle a ensuite été acceptée par le terrain, c'est qu'elle répondait à un besoin intrinsèque. Les retombées positives en termes de recherche sont un bénéfice collatéral supplémentaire, et parfois sur une longue période, puisqu'elle est encore exploitée plus de douze ans plus tard [Vinck 2011].

Pour résumer, notre démarche de recherche sera donc élaborée autour de ces quatre axes : action-recherche immergée, étude de cas multiples exploratoire,

161. Posture que j'avais dénommée « *posture de l'ogre* » (Séminaire CRISTO, juin 1999).

approche ethnographique, perspective constructionniste. À partir de ces études de cas ainsi instrumentées, et que nous présenterons pour l'essentiel dans la partie II, nous serons en position de tirer des enseignements : entre autres, considérer le manageur technique comme un acteur d'interface, en proposer un modèle transactionnel indépendant du contexte qui aura présidé à son émergence, et analyser l'instrumentation nécessaire pour le rendre opérationnel grâce à la construction des espaces d'échanges. C'est ainsi que nous aurons élaboré des éléments de théorie à partir d'études de cas [Eisenhardt 1989].

4.3 La *Design Research Methodology*

Une fois élaborés des éléments de théorie, c'est-à-dire des savoirs, encore faut-il s'assurer qu'ils sont actionnables. Il nous faut donc un peu mieux caractériser notre méthode. Précisément, la méthode DRM (*Design Research Methodology*, ou "Méthodologie de Recherche sur la Conception") décrite ci-après explicite l'articulation globale au cours d'une étude de cas entre phase d'observation, phase d'analyse et de conceptualisation, et phase d'expérimentation. Cette articulation a servi de guide initial au présent travail. Plusieurs auteurs ont travaillé sur l'adaptation de la méthode d'étude de cas au champ du génie industriel et de *l'engineering design*. Sans prétendre avoir procédé à une analyse fine des solutions proposées, nous avons adopté la méthode DRM développée à partir des travaux de Blessing [Blessing, Chakrabarti et Wallace 1998 ; Blessing et Chakrabarti 2002 ; Teegavarapu, Summers et Mocko 2008], synthétisés dans un livre [Blessing et Chakrabarti 2009].

Cette méthode offre une démarche systématique en trois phases principales. Au préalable figure l'établissement d'un certain nombre de critères mesurables de la situation, du processus ou du système étudiés. La première phase proprement dite de la DRM est une étude descriptive dite de type I, consistant en une analyse des paramètres du système influant sur les critères d'évaluation, et une observation de ces paramètres sur le terrain. La deuxième phase est une étude prescriptive qui, basée sur l'expérience et sur un certain nombre d'hypothèses formulées à partir des résultats de l'étude descriptive initiale, permet de définir un certain nombre de méthodes à appliquer et de scénarios d'observation à mettre en place afin de mettre en évidence l'amélioration des processus ou du fonctionnement du système. Enfin, la troisième phase est une nouvelle étude descriptive de type II, qui mesure le résultat des applications issues de la phase prescriptive sur le système étudié, et qui encourage un retour vers la définition de la méthode et de la mesure. Le schéma de la Figure 4.2 synthétise la démarche proposée par la DRM. Il y manque selon nous bien des boucles encore…

Pour construire notre démarche globale, nous nous sommes inspirés en partie de cette méthode. La suite de la thèse s'articule en effet selon ce schéma : la partie II correspond à l'étude descriptive de type I de nos cas

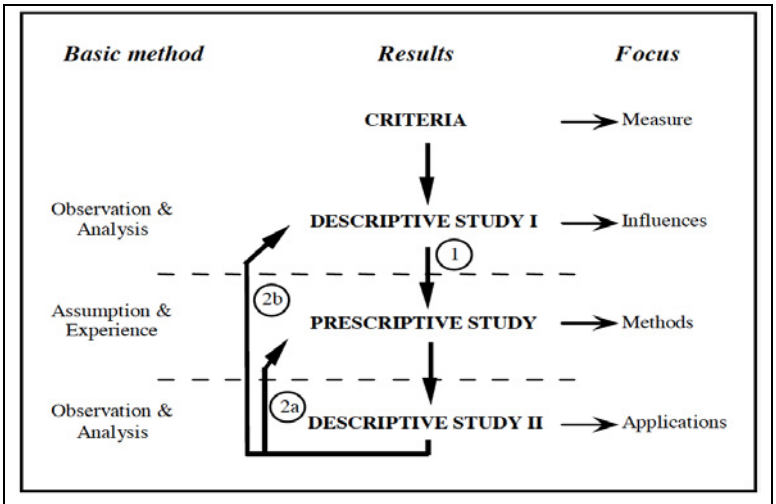


Figure 4.2: Le cadre général de la DRM

[Blessing and Chakrabarti 2002]

multiples, les premiers cas étant antérieurs à la thèse elle-même. La partie III est une forme d'étude prescriptive au sens de la DRM. Quant à la partie IV, réalisée pendant la thèse, elle est inspirée de l'idée d'une étude descriptive de type II selon la DRM.

Pour que cette méthode s'applique, elle impose un préliminaire, celui de la définition des critères d'évaluation. La question est délicate. Et ce n'est pas seulement un problème pour le chercheur, mais aussi sur le terrain : à quoi se fier pour définir des facteurs clé de réussite, des *key success factors* ? Surtout quand il s'agit de critères comme l'acceptation par l'utilisateur, le confort ou l'efficacité ? Dans chacun des cas, certains critères seront proposés. Au cours du cas n° 5 (déploiement d'un logiciel de PDM brièvement évoqué au chapitre 13 – voir le Tableau 4.1 p. 113), on a même observé que la « *métrique* » était une question âprement débattue sur le terrain. Il s'agirait ici d'associer à nos questions de recherche des critères mesurables. Or comment mesure-t-on l'utilité d'un manageur technique, sa contribution à un projet, son efficacité ? Comment évalue-t-on le degré de complexité d'un projet, les difficultés de sa conduite ? Nous touchons peut-être là aux limites d'une approche qui, même qualitative, exige des critères évaluables. Je défendrai plutôt une co-construction des critères d'analyse avec l'analyse elle-même : c'est à travers la description des cas que sont mises en lumière les caractéristiques (qualitatives le plus souvent) qui, une fois réifiées, servent de grille d'analyse ; en un mot, une méthode récursive, et pour tout dire, *complexe*.

Dans le même ordre d'idée, je souhaite ici évoquer le souci que la méthode n'évacue pas le sujet – en particulier celui de notre question de recherche sur la complexité. Prenons une image, inspirée du chapitre 4 d'*Ainsi s'achèvent les expériences* [Galison 2002]: il s'agit de savoir retrouver, au milieu d'un certain nombre de signaux détectés par un dispositif expérimental, celui qui nous intéresse. Or, à vouloir « *épanneler le bruit de fond* » [162], c'est le signal que l'on risque d'éliminer. Et le signal, pour nous, c'est la complexité. Notre préoccupation est donc de déployer une méthode qui soit compatible avec l'observation de la complexité. Le complexe implique de savoir saisir des contraintes dialogiques (au sens de Morin), c'est-à-dire à la fois contradictoires et consubstantielles [163] ; et avec des imbrications de niveaux récursives. Et puis observer et analyser, c'est modéliser, c'est-à-dire simplifier, là où il faudrait seulement décomplexifier, en restant en deçà du point où la nature complexe de l'objet modélisé se dissout dans le modèle. Je pressens donc un niveau critique de décomplexification, une sorte de seuil au-delà duquel ce que je souhaite observer disparaît soudainement en raison même du dispositif d'observation que je déploie, à la manière des bifurcations des catastrophes de la théorie du même nom [Thom 1989, 60 sqq.], ou des phénomènes de percolation [De Gennes 1976 ; Guyon et Hulin 1997, 78]. Comment voir la complexité si l'on place devant les yeux de l'observateur une grille réductrice, voire réductionniste, qui ne permette pas de saisir ces circulations récursives et dialogiques ?

La question de la méthode est donc cruciale – et intraitable dans l'état de nos connaissances sur la pensée complexe. C'est sans doute d'ailleurs en ce sens qu'il faut entendre le titre même et le propos tout entier de l'œuvre majeure de Morin : la *Méthode* [2008]. C'est dire si cette question dépasse le cadre de cette thèse. Bachelard apaisera, dans le cadre de ce chapitre, notre émoi à tant d'incapacité : « *un discours sur la méthode scientifique sera toujours un discours de circonstance, il ne décrira pas une constitution définitive de l'esprit scientifique* » [Bachelard 1934, 139].

162. Terme technique de sculpture rendant le terme « *carving away* » [Galison 2002, 264]. Voir dans cet ouvrage mon *Avant-propos du traducteur*, p. xxi.

163. La question sera reprise et développée au § 10.4 p. 297.

∴

Un brin d'auto-dérision sur le paragraphe qui précède : il est permis de craindre que Martinet m'aurait qualifié de « *métasophiste "sophistiqué", ceux qui parmi les chercheurs théoriciens, techniciens, ont acquis l'art de faire compliqué quand on peut faire simple* » [Martinet 1990, 15]. C'est le risque avec la complexité que d'ignorer comment s'y prendre pour s'en emparer simplement. C'est là que la démarche pragmatique des principes de la pensée complexe va nous sortir de l'ornière. Nous allons donc faire ce que nous savons faire quand nous ne savons pas faire : développer notre démarche *chemin faisant* ! Nous savons déjà que nous allons étudier plusieurs cas, dans une démarche de recherche-action immergée, et avec un regard ethnographique réflexif épistémique. C'est un premier viatique.

4.4 Quelques cas sur la ligne du temps

Revenons aux territoires que nous nous apprêtons à traverser, ainsi équipés. Et résumons sur la ligne du temps quelques tranches de vie du manageur technique qui sert de fil rouge aux cas, à savoir mon propre parcours de 1992 à 2012 dans le contexte du CERN et de l'expérience ATLAS.

Au cours de la première étude de cas n° 0 du chapitre 3 sur le Bureau technique (§ 3.1.3 p. 86 sqq.), nous avons évoqué la période charnière de l'année 2000–2001. Le premier changement de direction de ma carrière est la cessation de ma participation à l'activité d'intégration dès mars 2001 (de manière concomitante au départ de Mike Price comme coordinateur technique). Cette position que j'occupais depuis décembre 1994 est évoquée aux chapitres 5 et 6. Je me concentre alors sur le projet des Pieds d'ATLAS, ainsi que sur la gestion du Bureau technique, finalement dissous fin 2002 [164]. Quant au projet des Pieds d'ATLAS que mon prédécesseur Noël D. me confie dès la mi-1996, il s'étend jusqu'à la livraison au CERN début 2004 de l'ensemble des composants. La responsabilité de leur installation avait auparavant été confiée à l'équipe des aimants, et cette période se clôt par un montage à blanc complet en avril 2004 [165], puis par l'installation de la première bobine en novembre 2004 [166] (voir la photo correspondante, Figure 6.4 p. 153).

Le deuxième changement de direction sera intervenu entre-temps, à l'automne 2002, après la crise de la révision du chargement des pieds dont il sera question au chapitre 7. Elle correspond en fait également à l'évolution naturelle du projet des Pieds, qui entre alors dans la phase de production stabilisée, et ne nécessite plus d'investissement en temps aussi important. Je suis alors invité à rejoindre un groupe en constitution au sein du département EST, le groupe IC (*Installation Coordination*). Pendant plus d'une année, je vais donc superposer ces nouvelles responsabilités avec le suivi de la production des pieds d'ATLAS, qui se termine en Russie à la toute fin 2003 avec l'acceptation du dernier lot. Je me consacre ensuite pleinement aux études de manutention ainsi qu'à la coordination logistique des aimants cryogéniques du LHC, dans un contexte de plus en plus tendu jusqu'en octobre 2005, date d'une crise majeure (voir le § 9.1.2 p. 262).

En 2006, c'est au sein du groupe d'ingénierie EST/MME que je rejoins le projet CLIC, structure de projet sans entité organisationnelle propre. Je retrouve dans

164. Tout simplement en raison d'un nombre important de départs en retraite : sept projeteurs sur dix en l'espace de quelques mois.

165. Voir « *Le printemps d'ATLAS* », CERN weekly bulletin n°24, 14 juin 2004.
https://cdsweb.cern.ch/journal/CERNBulletin/2004/24/News%20Articles/739090?ln=fr

166. Voir « *Les grandes manœuvres d'ATLAS* », CERN weekly bulletin n°47, 22 novembre 2004.
https://cdsweb.cern.ch/journal/CERNBulletin/2004/47/News%20Articles/802458?ln=fr

cette activité quelques anciennes amours autour du tolérancement de systèmes assemblés particulièrement exigeants [167]. Ce sont deux années de transition au cours desquelles mûrit le présent projet de thèse, qui est lancé en octobre 2007.

Début 2008, j'intègre la section *Intégration*, ce qui boucle la boucle par rapport à mon premier poste dans ATLAS. Cette section, dont le périmètre correspond à celui que j'avais souhaité créer en 2000 (voir le cas n° 0 du Bureau technique), passe de groupe en groupe au gré des réorganisations, jusqu'à trouver sa place actuelle (2012) dans le groupe EN/MEF (département *d'Engineering*, groupe *Machines and Experimental Facilities*) qui avait été nouvellement créé après la réorganisation de 2009 : ce groupe réunit les activités de coordination des machines, de planification, de coordination des zones expérimentales et d'intégration [168].

Si je m'occupe alors d'intégration, c'est pour contribuer à mettre en place une méthodologie et un processus d'intégration systématiques, avec en particulier la formalisation du concept de squelette et son association avec les modèles 3D complets issus des bureaux de conception, approche dont nous parlerons au chapitre 15. La problématique de gestion des données techniques est alors celle qui occupe la majeure partie de mon temps : il s'agit d'accompagner le déploiement d'une nouvelle CAO et d'un nouveau logiciel de gestion des données du produit (PDM : *Product Data Management*). Vis-à-vis de mon sujet de thèse, défini alors comme « *le rôle du manageur technique dans le déploiement et l'exploitation d'outils de gestion, de coordination et de coopération dans des grands projets innovants* », cette évolution offre un terrain nouveau et vivant, objet du cas n° 5, à la démarche de recherche-action (au sein duquel je me retrouve en l'occurrence davantage du côté du « *système d'intervention* »). C'est un rebondissement inattendu et nourrissant pour la thématique, qui donnera lieu à deux articles [Nicquevert, Boujut et Yami 2009, 2010] et offrira quelques leçons exploitées dans le dernier cas n° 6.

En effet, en novembre 2009, suite aux péripéties de ce projet de déploiement de l'outil de gestion des données techniques du produit, survient un nouveau changement de direction de ma carrière – l'avant-dernier en date : tout en restant dans le même département, le même groupe et la même section, c'est une nouvelle responsabilité de projet qui m'est confiée : l'intégration de *Med*Austron, une intégration au périmètre très élargi que j'aurais plutôt qualifié, eu égard au référentiel des activités d'ATLAS, de « *Coordination technique de* Med*Austron* » [Nicquevert, Hauviller et Benedikt 2011]. La partie IV portera sur cette mission de près de deux ans, achevée en octobre 2011. Cet achèvement en déclenche un autre : le temps m'est enfin donné de mener à bien la rédaction du présent mémoire. Parallèlement, j'intègre le *Projects Support Office* (Bureau d'appui aux projets), attaché au Directeur du secteur Accélérateurs et Technologie (voir l'Organigramme de la Figure 2.11 p. 65), et c'est un autre volet qui s'ouvre…

Les différents cas traités sont repris dans le Tableau 4.1. La plupart sont antérieurs à la thèse elle-même, ils sont alors traités dans la partie II. Les deux derniers cas sont concomitants à la thèse, et abordés à la partie IV. L'ensemble des informations sur le déroulé des cas dans le contexte du CERN et de la thèse est synthétisé sous forme d'un tableau chronologique (Tableau 4.2) où figurent les colonnes suivantes : phases et événements au CERN, sur les projets LHC et ATLAS ; phases de ma carrière ; et identification des périodes couvertes par les différents cas étudiés. Cette sorte de frise est donc une synthèse de la partie I intitulée *Genèse(s)*, qui s'achèvera sur cette "presque-hypercarte".

167. B. Nicquevert, *Le tolérancement des cellules accélératrices du CLIC au CERN*, JET'06, Annecy.
http://www.virtual-plm.com/fr/conferences/view/choice/auteurs/item/Bertrand+Nicquevert
http://www.virtual-plm.com/fr/conferences/play/id/41

168. Ce groupe pourrait ainsi constituer l'entité opérationnelle complémentaire du *projects support office*, mais j'anticipe sur les années 2015 – ou au-delà !

Cas n°	Dénomination	Dates	Chapitre de thèse
0	Place du Bureau technique	Fin 2000 - début 2001	3
1	Enveloppes	Mars 1995 - Mars 2001	5
2	Négociation de marges	Novembre 1999 - Février 2000	6
3	Le projet des Pieds et la Russie Crise et reconception	Projet de mi-1996 à début 2004 Crise : printemps-été 2002	7
4	Gestion des données techniques ECR sur la position des pieds	Janvier 1995 – Mars 2001 Avril 1998 – Mars 1999	8
	Logistique aimants	*Octobre 2003 – Octobre 2005*	*Cas non retenu* mentionné au 9
5	Coordination PDM	Février 2008 – Septembre 2009	(Évoqué au 13)
6	*Med*Austron	Février 2010 - Octobre 2011	13 à 16

Tableau 4.1: Les différents cas traités

Dates	CERN, LHC, ATLAS	BN au CERN	Étude des cas			
Octobre 1992	Charpak prix Nobel	Arrivée comme boursier	Prologue du chapitre 0			
1993			4 cas fondés sur ATLAS			
1994	Approbation du projet LHC ATLAS *Technical proposal* H. Hoffmann TC d'ATLAS	Octobre : poste de staff Décembre : Coordination technique d'ATLAS	Cas n° 1	Cas n° 2	Cas n° 3	Cas n° 4
1995	Atomes d'antimatière	Début comme intégrateur				
1996	G. Bachy à ATLAS	Lancement projet Pieds Début au bureau technique				
1997						
1998						
1999	*Technical Design Reports* M. Price TC d'ATLAS					
2000	Arrêt du LEP	Cas n° 0				
2001	M. Nessi TC d'ATLAS	Fin comme intégrateur				
2002		Fin au bureau technique				
2003	ATLAS : début de l'installation dans la caverne	En / /, coordination de l'installation LHC				
2004	LHC : premier cryo-aimant	Fin projet Pieds				
2005		Octobre : fin transport LHC	Cas non retenu			
2006		CLIC				
2007	LHC : dernier cryo-aimant	CLIC				
2008	10 septembre : 1er faisceau 19 septembre : incident	Coordination PDM	Cas n° 5			
2009	Réparation du LHC	Coordination PDM	Cas n° 5			
2010	Octobre : redémarrage LHC	*Med*Austron	Cas n° 6			
2011	Mars : début physique LHC	*Med*Austron	Cas n° 6			
2012	Juillet : annonce du Higgs	DG *Projects Support Office*	Rédaction des cas			

Tableau 4.2: Une frise chronologique des cas – 1992 à 2012

Les cas ont été traités avec des protocoles légèrement différents selon leur position chronologique vis-à-vis de la thèse. Ce traitement méthodologique est résumé au Tableau 4.3. On y a ajouté quelques indicateurs approximatifs de la quantité d'acteurs et de données impliqués, pour se figurer la taille des cas concernés. Il est à noter, pour la petite histoire de la pérennité des données, 15 ans après, que les fichiers natifs *FrameMaker* ne sont lisibles qu'avec quelques acrobaties, que les fichiers natifs *Word* le sont rarement, et que le format pdf était peu répandu – mais resté parfaitement lisible. Quant aux fichiers hpgl, ils ont exigé une reprise graphique intégrale. Cela a parfois demandé un travail de retraitement des fichiers de type paléographique : passer un pinceau sur les os de ces mammouths !

Cas	**N° 1, 2 et 4**	**N° 3**	**N° 5**	**N° 6**
Titre	ATLAS TC	Pieds	PDM	*Med*Austron
Phase DRM	Descriptive I		Prescriptive	Descriptive II
Type de recherche	Étude de cas, observ'action réflexive		Recherche-action	"Agir ↔ penser"
Partenaires académiques	3S/Cristo J.-F. Boujut / D. Vinck, P. Lécaille	M. Boisot, M. Nordberg, S. Yami	G- SCOP / ERFI J.-F. Boujut / S. Yami	G-SCOP J.-F. Boujut
Durée	Six ans	Huit ans	Deux ans	18 mois
Recul en 09.2012	Douze ans	Huit ans	Trois ans	< Un an
Nombre d'acteurs	Plusieurs centaines	Plusieurs dizaines	Environ 50	Environ 50
Nombre de courriels archivés	Plus de 2000	Près de 1500 + 50 fax de/à IZ	Plus de 1000	Plus de 1000
Compte rendus analysés	TCM, TCSG : 50 TIE : 30 Ad-hoc : >100	> 50 internes > 20 protokoli russes	Internes : > 30 Task force : 16 + Revue	Mambo : > 40

Tableau 4.3: Traitement des cas : quelques indicateurs

Chaque cas traité au cours des chapitres de la partie II se présentera selon un canevas plus ou moins similaire, analogue à celui utilisé pour l'étude du cas n° 0 sur le Bureau technique (chapitre 3) : présentation d'une situation de crise ; explicitation du contexte d'émergence et des acteurs impliqués ; explicitation du dysfonctionnement éventuel ; leçon complexe qui sera tirée lors de l'analyse globale du chapitre 9, où nous justifierons également le recours méthodologique à l'observation de la crise (§ 9.1 p. 260).

∴

Et maintenant, en route vers le terrain !

Deuxième clamot. *Trois tailleurs de pierre*

Christian JACQ [169]

Un homme, qui déambulait dans les rues de sa ville, passe devant le chantier de sa cathédrale en construction. Trois ouvriers étaient en train de ranger leurs outils. Intrigué depuis longtemps par ces constructeurs dont il ne savait pas grand-chose, il les observa. Puis il s'approcha et osa poser la question qui lui brûlait les lèvres.

– À quoi es-tu occupé ?

– À gagner ma vie, répondit le premier.

– Et toi ?

– À tailler la pierre, répondit le second.

– Et toi ?

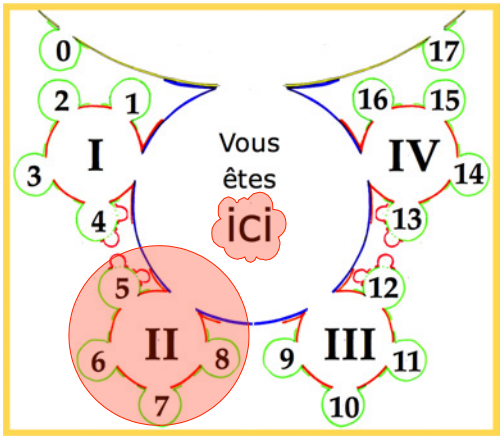
– À bâtir une cathédrale, répondit l'artisan initié.

L'homme qui posa les questions comprit qu'il avait en face de lui trois êtres très différents. Le premier assurait sa subsistance et ne prêtait pas attention au monde des symboles où, pourtant, il passait sa journée. Le second était un bon technicien qui ne s'interrogeait pas sur la signification de l'Œuvre, mais y participait avec toutes les vertus de sa conscience professionnelle.

Le troisième était sans doute un futur Maître d'Œuvre […] . Sur l'épure, il discernait les lignes du chef-d'œuvre. Sur le chantier, au cœur de la matière, il voyait déjà la cathédrale se dressant vers le ciel.

Notre homme remarqua le sourire de l'initié. Cela, il s'en doutait depuis longtemps. Cet homme-là portait la sérénité en lui. Le questionneur eut le désir de devenir, lui aussi, Maître d'Œuvre.

169. *Le message des constructeurs de cathédrales*, Éditions du Rocher, 1980, p. 5.



Partie II - Agir sans trop penser

Où l'on observe à l'œuvre un manageur technique et quelques-uns de ses homologues, peu préoccupés de penser la complexité de leur tâche

Le tigre ne parle pas de sa tigritude, il bondit sur sa proie et la dévore.

Wole Soyinka [170]

170. *African Writers' Conference*, Makerere University, 1962.

Sommaire de la Partie II

Chapitre 5. Gestion d'espaces (1). Enveloppes.....121
5.1 Mettre ATLAS en bouteille.....124
5.2 Un processus qui ne converge pas.....125
5.3 Sous-détecteurs et Coordination technique.....127
5.4 « Emballez, c'est pesé » : l'enveloppe comme outil de définition.....130
5.5 Origines d'une non-convergence.....138
5.6 D'Eilat aux lattes (I) : tensions au Proche-Orient.....141
5.7 Réorganisations stratégiques.....144

Chapitre 6. Gestion d'espaces (2). Négociation de marges.....149
6.1 D'Eilat aux lattes (II) : feuille de route pour une résolution de conflit.....151
6.2 Lattes, chambres, corridors et pieds.....152
6.3 Une contrainte technique : « We MUST increase the size » 157
6.4 Construire un espace d'échanges : « play the same team game » 160
6.5 Formalisations des décisions.....165
6.6 Intégration : frontières et voisins.....172

Chapitre 7. Gestion de projet.
Les pieds d'ATLAS et la Russie.....177
7.1 Un chargement changeant, une production changée.....180
7.2 La Russie, le CERN et ATLAS.....182
7.3 Le projet Pieds et rails d'ATLAS.....190
7.4 Simuler le comportement.....196
7.5 Un pied dans le chaudron, l'autre dans le glacis.....204
7.6 Concevoir, c'est convaincre.....213

Chapitre 8. Gestion de données techniques 227
8.1 Besoin de gérer des données techniques.....230
8.2 Créer et structurer les données.....232
8.3 Valider et partager les données.....236
8.4 Gérer les demandes de modifications.....243

Troisième clamot. Les tailleurs de pierre quelques mois plus tard….....249

Le manageur technique qui serait comme le tigre de Soyinka évoqué en épigraphe ne parlerait pas de sa nature de manageur technique ; il bondirait sur sa mission et l'accomplirait. Sans réflexion. Sans être réflexif, donc. Et sans percevoir la complexité qui l'entoure et dont il participe pourtant. Cette seconde partie de la thèse va présenter notre manageur technique à la tâche, en train d'agir sans trop penser, entouré de quelques-uns de ses congénères. Essentiellement préoccupé de répondre à la question de Kant (voir l'*Introduction "kantique"* p. 13) : « *Que dois-je faire ?* » Un manageur technique qui ne sait pas encore (ce) qu'il ne sait pas faire, et qui va donc apprendre sur le tas.

Les cas proposés sont tirés d'épisodes plus ou moins longs que j'ai vécus au cours de la première partie de ma carrière au CERN. Ils ont été choisis pour être représentatifs de différentes facettes du métier d'ingénieur, et de sa déclinaison managériale restant au contact profond avec la dimension technique du terrain. Et au sein des cas retenus, seuls quelques épisodes clé seront étudiés : résumer quinze ou vingt ans de carrière en 15 ou même en 100 pages, cela ne peut pas se faire si l'on veut descendre jusqu'au niveau de détail ethnographique que nous cherchons à atteindre. Bien d'autres cas auraient pu être choisis : on n'évoquera guère le travail sur l'intégration de la zone dite des *Small wheels* et du disque de blindage, le projet évoqué dans *Ingénieurs au quotidien* [171]. Au chapitre 5, on ne mentionnera guère le *gap*, ni les services à $z = 0$, ni non plus les canaux d'alignement ; et le chapitre 6, pourtant détaillé, ne donnera que quelques-uns des détails ethnographiques de la production des données, couverts par ailleurs par la thèse de Pascal Lécaille (2003). Au chapitre 7, les aspects sismiques, les risques cryogéniques ou les interfaces avec le système de traction seront largement passés sous silence, tout comme la crise du WBS des structures, ou les essais de soudure sous flux. Nous avons procédé à des choix, en fonction de la grille de lecture et des questions que nous nous sommes proposé de traiter : le rôle du manageur technique dans des grands projets complexes. Je ne parviendrai malheureusement pas à rendre les innombrables linéaments de ces projets, même en se cantonnant aux périmètres restreints qui furent les miens.

D'autres épisodes entiers ont été mis de côté – l'objectif n'est ni de constituer une histoire de vie [Vassilef 1999 ; Pineau et Le Grand 2007] ou de rédiger une autobiographie, ni de constituer une histoire détaillée du projet ATLAS. Ainsi ne seront mentionnés que dans la présente introduction mon implication parfois considérable dans des projets aussi passionnants que les *Big Wheels* d'ATLAS ; le comportement hygrothermique dans les composites [Kanoute et al. 1998, 1997], et la réponse aux vibrations environnementales des détecteurs à paille [Lucas et al. 2002] ; ou encore la création et l'animation du GrACQ (Groupe d'Aide à une Cotation de Qualité) ; ou bien le tolérancement des systèmes assemblés [Samper et al. 2007] , et quelques autres travaux sur le CLIC, avec en particulier le joli projet "Mu2010", un programme de recherche pour des usinages de formes complexes de très haute précision [Chatain et al. 2010]. Si je les mentionne tout de même ici (outre que cela renvoie à quelques éléments de ma propre bibliographie), c'est encore une fois pour illustrer une proposition de loi dérivée de celle de Hofstadter [172]: *le réel est toujours plus complexe qu'il nous semble, même en tenant compte du fait que le réel est toujours plus complexe qu'il nous semble.*

171. Chapitre 1 : « La complexité sociotechnique. Le cas de la re-conception d'une paroi de blindage. » [Vinck 1999b, 19-31]

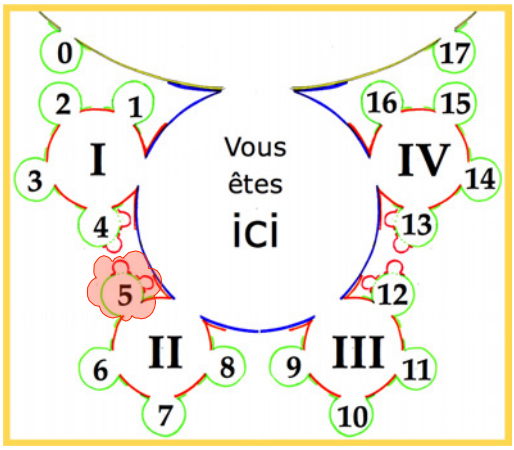
172. « *Loi de Hofstadter : il faut toujours plus de temps que prévu, même en tenant compte de la loi de Hofstadter.* » [Hofstadter 1985, 170]

Le traitement des différents cas retenus respecte un certain principe de symétrie, inspiré en un sens de celui de Bloor [173] : on essaie d'y parler au moins autant de ce qui n'a pas marché que de ce qui a marché. La loi naturelle des choses fait qu'on a tendance à davantage parler des succès que des échecs, voire à escamoter les difficultés ou à les maquiller en démarche d'essais et erreurs. Je tâcherai d'être honnête, parce que c'est en affrontant ses échecs que l'on trouve les voies qui permettent de construire les outils d'une meilleure compréhension. C'est la première boucle réflexive de Schön [1995] : préparons son déploiement lors de la partie III.

Les différents cas, par ailleurs liés entre eux, correspondent également dans notre approche par la DRM (voir le chapitre 4) aux études descriptives initiales, au cours desquelles nous allons déterminer par l'observation quels sont les paramètres définissant l'action du manageur technique. Dans la démarche de pensée complexe que je tente de déployer, une définition *a priori* de ces paramètres n'est pas imaginable : nous devons procéder à une co-construction progressive de la problématique et des paramètres qui la définissent, et des éléments de réponses qui l'éclairent. C'est à cet exercice que nous allons nous atteler.

Bondissons sur la proie. En nous remettant dans la peau de notre candide ingénieur du chapitre 0, désormais à peine dégrossi par deux années de calcul des structures : c'est avec une naïve inconscience de la complexité de la tâche qui m'incombait que je me lançais dans des ténèbres où j'allais errer quelque temps.

173. Le principe de symétrie est l'un des principes du programme dit « *fort* » de sociologie des sciences, qui stipule qu'il doit être fait appel au même type d'explications pour analyser les échecs ou les succès, au lieu d'invoquer des causes d'ordre social pour les premiers, et d'ordre naturel pour les seconds : « *The sociology of scientific knowledge […] would be symmetrical in its style of explanation. The same types would explain, say, true and false beliefs.* » [Bloor 1976, 7] (« La sociologie de la connaissance scientifique […] doit être symétrique dans son style d'explication. Les même types de causes expliqueront, disons, les croyances vraies comme les fausses. ») (C'est moi qui traduis ; voir aussi en français [Bloor 1983]).



Chapitre 5. Gestion d'espaces (1). Enveloppes

Où l'on suit le manageur technique dans ses velléités à tracer des frontières entre systèmes et introduire des interfaces entre projets

Quand l'espace sans limite s'unifie au point de devenir tout entier zone frontière, alors le monde entier devient une zone irritable.

Daniel INNERARITY [174]

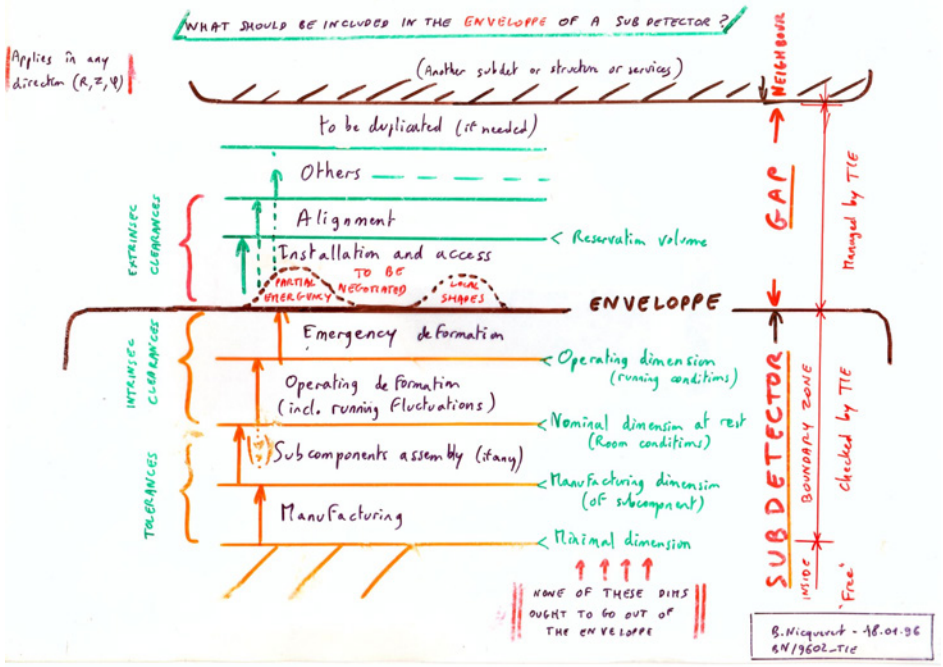


Figure 5.1 : L'outil "Enveloppe", gestation et émergence

B. Nicquevert, transparent manuscrit, BN/9602_TIE, janvier 1996

174. *La Démocratie sans l'État*, Flammarion, 2006.

Décrire ce premier cas est un défi. Et j'ai longtemps cherché le bon angle d'attaque, tel le mareyeur muni de son couteau à huître fourrageant jusqu'à trouver le point de rupture dans lequel enfoncer la lame, et qui va séparer les deux coquilles, laissant apparaître à ses yeux émerveillés la perle qu'elle contenait. Et si je n'ai pas trouvé d'emblée le bon angle, j'ai désormais compris pourquoi : c'est qu'il n'y en a pas. Ou plutôt, c'est que tous le sont. C'est pourquoi je vais une à une exposer les couches du millefeuilles, et relever le défi narratif de raconter en quoi elles constituent un tout. L'image de la couche n'est au demeurant pas vraiment satisfaisante. Peut-être serait-il plus éclairant d'évoquer la multiplicité des points de vue qui attribue à un objet donné des statuts ontologiques tellement variés qu'ils ne permettent pas une réduction intersubjective satisfaisante : je pense ici à la description du projet de métro Aramis [Latour 1993].

Ce préliminaire forcément incomplet le serait davantage encore s'il n'évoquait pas à nouveau la question de l'observateur qui, revenant longtemps après sur le lieu des événements, en modéliserait après coup le déroulement. Même dans le choix de ne pas choisir l'angle d'attaque, donc la direction du regard, il y a un choix sur-jacent : celui de choisir un regard multiple, qui toutefois jamais ne saura saisir le tout dans sa totalité. Ce qui suit est donc le fruit incomplet d'un regard subjectif sur un objet aux limites imprécises. Il s'agit d'en faire tout de même un récit un tant soit peu clairement formulé, qui permette dans les limites de la forme du déroulé linéaire du discours, d'en donner une image aussi claire que possible. Et en assumer la dimension humaine, c'est-à-dire émotionnelle : une excessive rationalisation *a posteriori* qui évacuerait « *la peine, le sang, la sueur et les larmes* » [175] passerait à côté de son objet.

Ceci étant dit, plongeons dans le récit. De quoi sera-t-il question ici ? D'espaces, d'enveloppes et de frontières, de ces frontières qui, quand elles viennent à manquer, rendent le projet entier irritable, pour paraphraser l'épigraphe du chapitre. De pièces, de sous-systèmes et de détecteurs. De physiciens, d'ingénieurs et de projeteurs. De CAO, de simulations et de GDT. De concepts, d'objets, d'acteurs, d'outils. De dynamiques de projet, de processus de conception et de savoirs métier. De tout ce qui constitue les différents niveaux, imbriqués à souhait, du processus global de conception, d'intégration et de réalisation d'un projet. Et ce, tel que je le vois aujourd'hui, de la position confortable – du point de vue de l'ingénieur acteur – qui sait que « *cela a marché* » puisque le détecteur ATLAS fonctionne, et que le but a été atteint ; mais aussi de la position moins confortable du chercheur observateur qui doit rendre compte ici et maintenant des raisons pour lesquelles cela a marché, des facteurs clé du succès, tout en identifiant ce qui, quoique facteur d'échec potentiel, a pu être contourné ou dépassé.

Dans ce chapitre, nous allons nous centrer essentiellement sur la description du cas, en s'efforçant d'en préserver la complexité. Partant d'une situation bloquée à un moment donné du projet, nous allons analyser les enjeux et acteurs en présence, puis les outils et concepts, parfois incompatibles ou en friction manifeste, qui sont déployés aux différents niveaux d'action impliqués. Nous verrons les différends sociotechniques sur les évolutions organisationnelles ultérieures. Nous remonterons ensuite pour tirer quelques leçons spécifiques du cas présenté. La partie III sera l'occasion d'approfondir l'analyse des dynamiques sociotechniques et managériales en jeu, une fois mises en perspective avec les autres cas.

175. Pour reprendre la formule bien connue de Churchill, le sang étant heureusement ici à prendre dans un sens parfaitement figuré.

5.1 Mettre ATLAS en bouteille

J'ai eu bien des occasions d'exposer l'enjeu de l'intégration d'un détecteur dans sa caverne [Nicquevert 2010]. Cette section reprend les grandes lignes de mon approche, afin de fixer les idées et le contexte du cas traité dans ce chapitre.

Concevoir de manière collaborative un système technique complexe, au sein d'un projet dans lequel chaque sous-système est développé par une équipe distincte, cela implique de définir clairement l'espace attribué à chacun, et les interfaces qui relient entre eux les différents composants. Cela exige également que cette conception soit "remontée", c'est-à-dire assemblée virtuellement, intégrée dans l'environnement parfois complexe dans lequel fonctionneront les équipements. C'est le cas, nous l'avons vu au chapitre 2, d'ATLAS installé dans sa caverne en béton à 100 m de profondeur. C'est un peu comme construire un bateau en bouteille (Figure 5.2). Cela impose une activité d'attribution et de gestion des espaces, et de contrôle dès le stade de la conception des interférences et des conflits éventuels. Ces espaces sont dénommés *enveloppes*, et cette activité l'*intégration* mécanique. J'ai été en charge de cette activité pendant toute la phase de conception d'ATLAS, qui a commencé immédiatement après le dépôt de la *Technical Proposal* [ATLAS Collaboration, Armstrong et al. 1994] en décembre 1994, et s'est étendue jusqu'au lancement de la production des principaux composants (mars 2001).

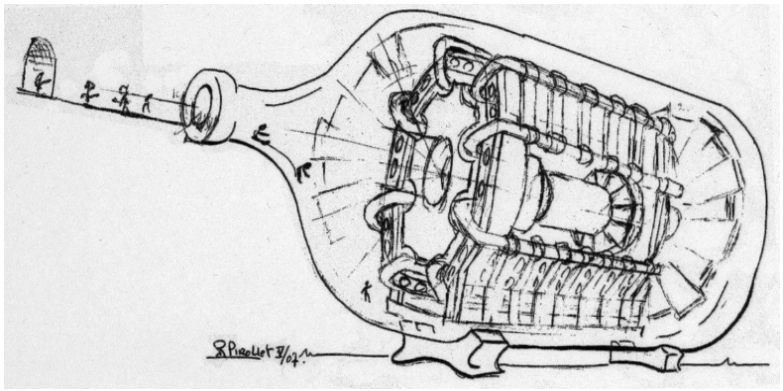


Figure 5.2: ATLAS en bouteille, vue d'artiste

© B. Pirollet

Au départ du projet, rien n'était fixé, si ce n'est l'axe et le point d'interaction (lieu de collision des faisceaux de particules, au centre géométrique du détecteur). En première approche, on peut se représenter la conception d'un système technologique d'une telle complexité par un processus de choix dans un espace de conception multi-dimensionnel. Cette tâche n'a rien de trivial, puisque les différentes options sont interdépendantes, et qu'un choix de paramètre sur un composant donné peut affecter d'autres paramètres ou les composants voisins. Le développement initial de l'architecture [Türtscher 2008a] a dû être organisé comme un processus non-linéaire, car chaque option une fois sélectionnée a pu se révéler infaisable ou exiger plusieurs itérations qui ont amené à revoir les décisions de conception à un stade ultérieur [176].

Dans ce processus complexe de nature récursive, l'allocation d'espaces joue un rôle crucial, en imposant un critère d'exclusion extrêmement simple et pourtant terriblement exigeant : une portion donnée de l'espace global ne peut être attribuée qu'à un seul composant. Cette allocation est dynamique, dans le sens où elle doit également prendre en compte les exigences d'installabilité. La problématique générale de l'intégration peut donc être ainsi résumée : *prévoir la montabilité sur modèles*

176. Nous y reviendrons en particulier au chapitre 7.

virtuels des éléments d'un dispositif (expérience ou accélérateur) dans un contexte (caverne ou tunnel) donné.

Pour ATLAS, la caverne n'était pas définie au préalable (seule sa largeur maximale était imposée par la pré-existence de galeries techniques du tunnel du LEP). La définition de l'architecture du détecteur était donc concomitante à celle du génie civil, et les paramètres géométriques des puits d'accès ont ainsi été déterminés par les dimensions des bobines de l'aimant toroïdal (voir § 2.5.2 p. 58 sqq.). On touche là aux limites du procédé : une fois le bâtiment construit, il est beaucoup plus difficile à modifier. Or, le processus d'intégration est long et itératif, alors que les contraintes de projet ont exigé le démarrage des travaux de génie civil bien avant la fin de ce processus, dès 1998 en l'occurrence. L'étude de la montabilité sur modèles virtuels était donc elle aussi évolutive : au fur et à mesure du processus concourant, certains paramètres devenaient irrémédiablement figés, sans pour autant que tous les autres soient définis : de paramètres, ceux qui devenaient figés devenaient donc contraintes pour ceux qui ne l'étaient pas encore.

C'est l'enjeu du processus, qui doit être convergent. D'un côté, chaque système souhaite garder ouverts aussi longtemps que possible les différents paramètres, en fonction des résultats des études de recherche et développement, ou de faisabilité industrielle ; de l'autre, il est indispensable de figer peu à peu les définitions des systèmes : architecture globale, zones de circulation des services, caverne englobante… Chaque sous-système, à partir de ces premiers paramètres, doit alors développer et affiner sa conception, et redéfinir ses interfaces avec le monde extérieur. À chacune de ces itérations, l'intégration doit vérifier la compatibilité mutuelle de ces paramètres, et s'attacher à capitaliser l'information une fois obtenu l'accord des différents acteurs impliqués. Ce sont de véritables négociations, de nature quasi géopolitiques, qui sont menées. Elles nécessitent un support synthétisant les différents paramètres géométriques. Ce support, ce sont les enveloppes. C'est ce que nous illustrons dans ce chapitre.

Des exemples détaillés de ces négociations, j'aurais pu en choisir de nombreux. J'en ai des cartons pleins, et même des armoires entières, avec des titres aussi peu explicites pour le profane que : *axial force transfer*, *service gap*, *inner detector patch panel*, interface « tile/LArg », installation du JD dans le SX1, *solenoid chimney*, *alignment paths*… La liste pourrait occuper trois pages, elle m'a occupé six ans. L'exemple choisi et approfondi dans le chapitre 6 est celui des lattes du toroïde. Mais avant de détailler ce cas, il convient au préalable de le placer dans un contexte plus général, celui de l'activité de coordination technique, et tout particulièrement de l'intégration mécanique. Nous nous intéressons dans le présent chapitre à une phase de cette activité qui connaît des difficultés sérieuses à converger.

5.2 Un processus qui ne converge pas

Nous sommes en novembre 1999. La phase de conception détaillée du détecteur ATLAS touche bientôt à sa fin, tous les TDRs [177] sont maintenant publiés, et le planning impose de bientôt lancer la production des principaux composants. Les travaux de la caverne ont été lancés depuis une année déjà, et les dimensions du contenant sont désormais figées. Quant à la date du premier faisceau, alors fixée au 1er juillet 2005, elle approche dangereusement ! La pression monte donc pour finaliser les « *layouts* », c'est-à-dire la position et la taille des différents éléments. Pour cela, un préalable s'impose : figer les enveloppes.

177. *Technical Design Report*. Les TDRs constituent une série de rapports techniques soumis au LHCC (Comité pour le LHC) et rendant compte de la conception technique détaillée de chacun des sous-détecteurs, ainsi que de la physique, de l'acquisition des données, et de la Coordination technique.

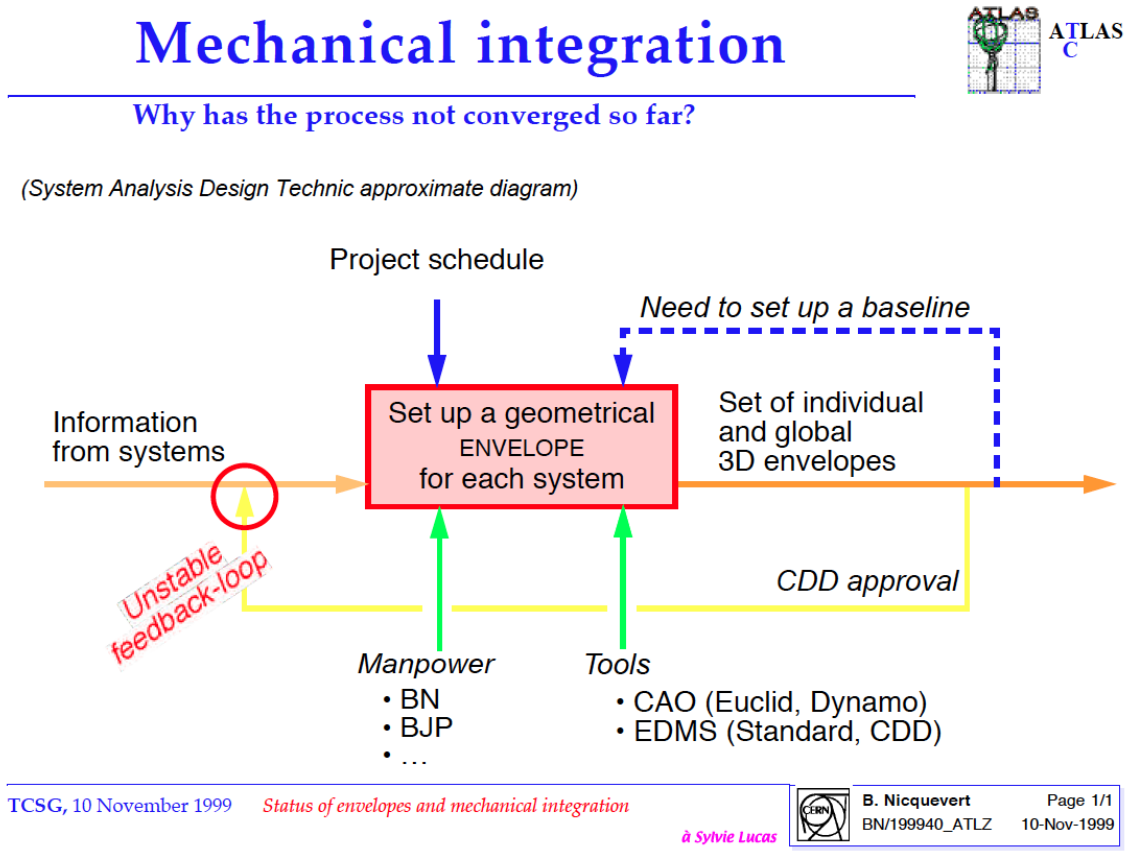


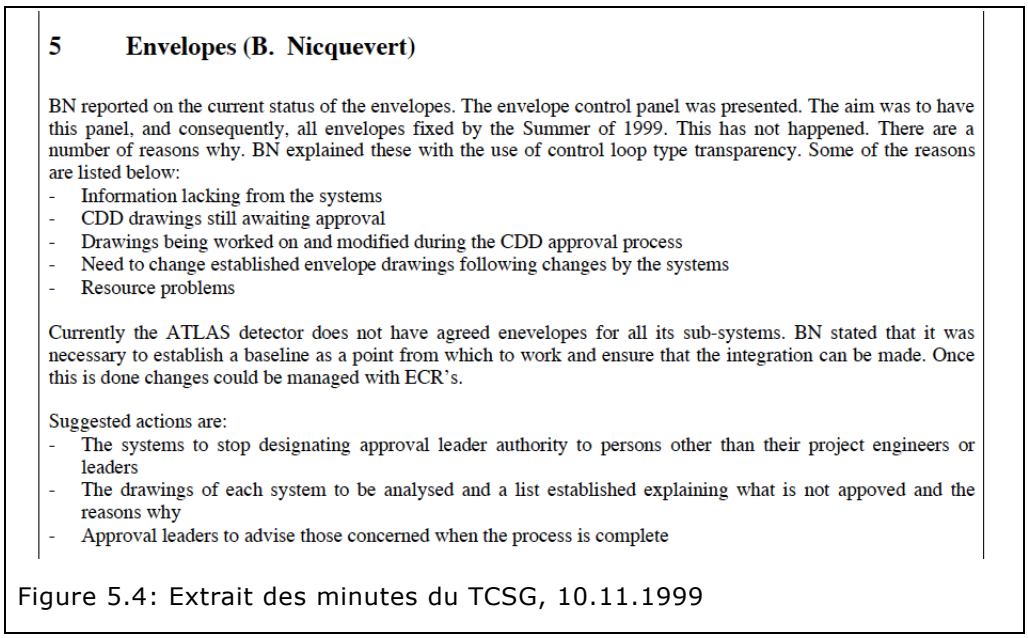
Figure 5.3: La situation : *pourquoi le processus n'a-t-il pas encore convergé ?*

Ce préalable toutefois ne s'impose pas à tous. Lors du TCSG (*Technical Coordination Steering Group*) du 10 novembre, le responsable en charge de l'intégration mécanique rapporte une situation insatisfaisante, au cours d'une brève présentation exceptionnellement réduite à un seul transparent [178] reproduit à la Figure 5.3. Les minutes du TCSG n° 4 rapportent l'intervention (extrait reproduit à la Figure 5.4) de la manière suivante : [179]

> *BN a donné rapport de la situation actuelle des enveloppes. Le tableau de bord des enveloppes a été présenté. L'objectif était que ce tableau, et par conséquent toutes les enveloppes, soient complétés avant la fin de l'été 1999. Cela n'est pas le cas. Il y a un certain nombre de raisons à cela. BN les a explicitées à l'aide d'un transparent de type boucle de contrôle. Parmi ces raisons, on trouve : un manque d'information des systèmes ; des dessins toujours en approbation dans CDD ; des dessins qui sont retravaillés et modifiés au cours du processus d'approbation de CDD ; nécessité de modifier les dessins d'enveloppes réalisés en fonction des modifications par les systèmes ; problèmes de ressources.*
>
> *Actuellement, le détecteur ATLAS ne possède pas d'enveloppes approuvées pour tous ses sous-systèmes. BN a déclaré que c'était nécessaire pour établir une* baseline [180] *qui serve de repère à partir duquel travailler et garantir que l'intégra-*

178. Ce transparent comporte une dédicace, elle aussi exceptionnelle : Sylvie Lucas avait fait partie du Bureau technique où elle avait commencé à préparer une thèse sur les vibrations dans les fils des détecteurs [Lucas et al. 2002]. Elle venait de disparaître d'une fulgurante maladie ; c'était un modeste hommage qui lui était rendu, et que je réitère ici.

179. *ATLAS Minutes - Technical co-ordination steering group - Minutes of the 4th meeting held at CERN on the 10th November* – ATC-GE-EM-0042 – 12.11.1999.



5 Envelopes (B. Nicquevert)

BN reported on the current status of the envelopes. The envelope control panel was presented. The aim was to have this panel, and consequently, all envelopes fixed by the Summer of 1999. This has not happened. There are a number of reasons why. BN explained these with the use of control loop type transparency. Some of the reasons are listed below:

- Information lacking from the systems
- CDD drawings still awaiting approval
- Drawings being worked on and modified during the CDD approval process
- Need to change established envelope drawings following changes by the systems
- Resource problems

Currently the ATLAS detector does not have agreed enevelopes for all its sub-systems. BN stated that it was necessary to establish a baseline as a point from which to work and ensure that the integration can be made. Once this is done changes could be managed with ECR's.

Suggested actions are:

- The systems to stop designating approval leader authority to persons other than their project engineers or leaders
- The drawings of each system to be analysed and a list established explaining what is not appoved and the reasons why
- Approval leaders to advise those concerned when the process is complete

Figure 5.4: Extrait des minutes du TCSG, 10.11.1999

tion peut être effectuée. Une fois cela fait, des changements pourront être gérés avec des ECRs.

Les actions suggérées sont :
– les systèmes doivent cesser d'accorder l'autorité de responsable d'approbation à des personnes autres que leurs ingénieurs projets ou chefs de projet ;
– les dessins de chaque système doivent être analysés, et une liste doit être dressée qui explique ce qui n'est pas approuvé et pourquoi ;
– les responsables d'approbation doivent informer les personnes concernées quand le processus est achevé.

Tout ce matériau nécessite, afin d'être analysé, un certain nombre d'explications qui se situent à différents niveaux. Les connaissances sur le détecteur exposées au chapitre 2 ne suffisent pas, il nous faut plonger davantage dans le cœur du fonctionnement de la Collaboration ATLAS :

- quels sont les sous-détecteurs mentionnés dans le tableau de bord ;
- quel est le cadre organisationnel : qu'est-ce que le TCSG, qui y siège, qui est impliqué par les décisions qui y sont prises, quel est l'enjeu de ce rapport ;
- quels sont les objets considérés : tableau de bord, enveloppes locales et globales, *baseline* (configuration de référence) ;
- quels sont les processus évoqués : approbation, CDD, ECR .

C'est seulement munis de ces quelques éclaircissements, qui seront apportés au cours des deux prochains chapitres, que nous pourrons commencer à décortiquer la boucle de la Figure 5.3 et mieux saisir la situation de crise.

5.3 Sous-détecteurs et Coordination technique

Le tableau de la Figure 5.5 dresse une liste d'enveloppes, terme dont nous expliciterons bientôt la définition. Cette liste correspond en fait à la liste des sous-détecteurs d'ATLAS [181]. Elle fait en cela écho au schéma de l'organisation d'ATLAS de la

180. Quoique non français, ce terme est utilisé couramment en français, comme nombre d'autres. Il serait artificiel de les traduire alors que, sur le terrain, ils ne sont pas usités. J'en donnerai lors de leur première occurrence l'équivalent adapté.

181. Les acronymes sont adaptés à l'arborescence retenue pour la gestion des données : voir le chapitre 8, en particulier la Figure 8.4: Le « Master PBS », arborescence produit globale du détecteur ATLAS, p. 235.

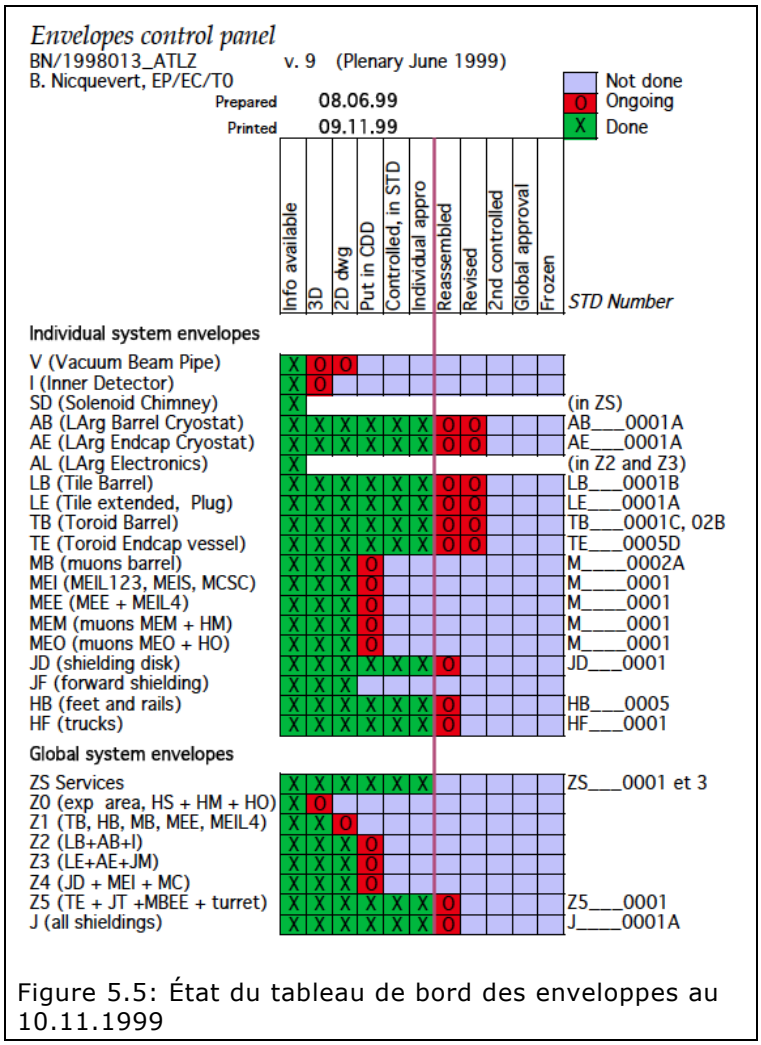


Figure 5.5: État du tableau de bord des enveloppes au 10.11.1999

Figure 2.13 p. 72 : chaque sous-détecteur constitue un projet en soi, et ATLAS peut être considéré comme sorte de fédération de projets. L'organe qui pilote le projet, évoqué au chapitre 2, est l'*Executive Board* (EB), présidé par le porte-parole, et au sein duquel siègent des représentants de chaque sous-projet ainsi que les coordinateurs technique et des ressources. Les sous-projets les plus importants sont : pour les sous-détecteurs, le détecteur interne, le calorimètre à argon liquide, le calorimètre à tuiles, et le spectromètre à muons ; pour les autres sous-systèmes : le système d'aimants, les blindages, les structures, le tube à vide, le système d'acquisition de données, et d'autres sous-projets liés à des activités non liées à des objets (simulation, coordination de physique). Chaque sous-projet est lui-même à son tour organisé de manière fractale et réplicante (§ 2.6.3 p. 70), avec un chef de projet (équivalent du porte-parole), un ingénieur projet (équivalent du coordinateur technique), et constitue lui-même une fédération de sous-sous-projets. L'organe qui pilote chaque niveau est un *Steering Group* (comité de pilotage).

Qu'est-ce que le TCSG ? Le mandat complet avait été défini dans le message de Mike Price « *Organisation des réunions de coordination technique : message aux chefs de projet du 19 mars 1999* ». Le TCSG est le groupe de pilotage pour la Coordination technique (*Technical Coordination Steering Group*). Il est présidé par le coordinateur technique, et y siègent des représentants de chaque sous-projet. Le mandat de ce groupe consiste à piloter les projets dont la TC a la responsabilité directe (voir au chapitre 7 l'exemple des pieds support), à étudier les questions techniques concernant plus d'un système et leurs interfaces, et à statuer sur les ECRs.

Sous le mandat de Hans Hoffmann, la forme de la réunion de la TC était plus informelle, et désignée sous le terme de TCM (*Technical Coordination Meeting*). J'en avais été le secrétaire depuis sa création en 1995 jusqu'à son remplacement par la formule du TCSG, après la prise de fonction de Mike Price en 1999. Par la suite (nous l'évoquerons à la fin du présent chapitre), c'est un *Technical Management Board* qui sera institué, et que l'on voit apparaître comme tel dans le schéma de l'organisation de 2004 donné à la Figure 2.13 p. 72. La formule organisationnelle suit donc les évolutions et les phases du projet, chacun des coordinateurs techniques apportant également sa propre personnalité dans le style de leadership qu'il

applique. La phase qui s'étend de 1994 (date de mise en place d'une Coordination technique) à 1999 correspond pour l'essentiel à une phase de définition de l'architecture du détecteur et de conception globale et plus ou moins détaillée, avec stabilisation progressive des architectures et des solutions. La phase ultérieure à 2001, que l'on peut historiquement lier à l'avènement de Marzio Nessi comme coordinateur technique, correspond à la fabrication des composants, puis à l'installation du détecteur dans la caverne qui débute en 2003 avec l'installation des *bedplates*, semelles situées sous les pieds [182]. La phase charnière 1999-2001 du mandat de Mike Price, superposée à l'influence déterminante de l'ingénieur en chef Gérard Bachy (en fonction sur ATLAS de janvier 1996 à juin 2001) correspond donc à cette évolution progressive d'une phase à l'autre.

Une étude consacrée au leadership dans la collaboration ATLAS [Marchand et Margery 2009] propose une analyse de l'interaction entre la discipline de collaboration et la discipline de projet, et la résume en une courbe portant en ordonnées la « *project configuration* ». En dépit des erreurs factuelles qui entachent la précision des données qu'elle intègre (par exemple, le repère temporel « *Nessi TC* » est avancé de près d'une année et demie), et des questions qu'elle suscite [183], cette courbe de la Figure 5.6 illustre notre propos et résume l'évolution du projet ATLAS selon cette perspective.

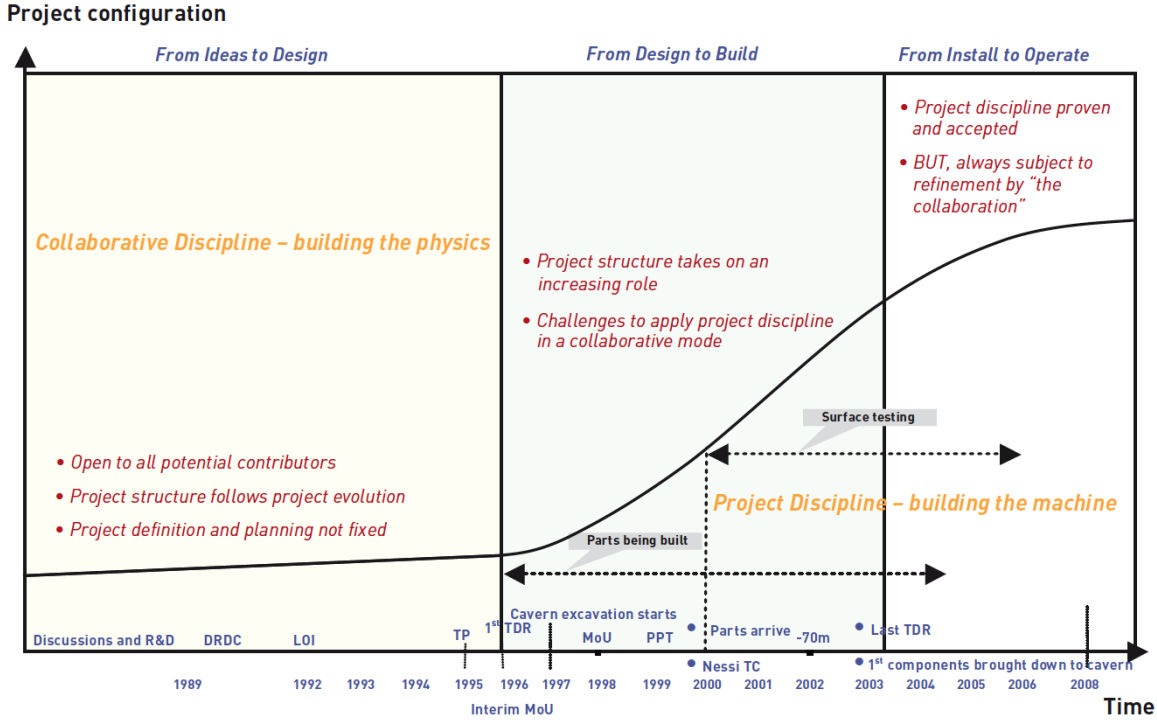


Figure 5.6: Évolution de la configuration du projet ATLAS

In Marchand et Margery 2009

Pour éclairer cette évolution, je propose d'exploiter notre étude de cas sur le fonctionnement de la Coordination technique, avec comme indicateur le processus d'approbation des enveloppes. La période fin 1999-début 2000 que j'ai sélectionnée pour l'étude de cas se situe en effet au milieu de la période charnière qui fait basculer du monde virtuel au monde réel « *From Design to Build* » selon la terminologie de Marchand et Margery, et pour ainsi dire, à la période charnière de la période

182. Voir le chapitre 7, Figure 7.4 p. 192.

183. Nous en proposerons au chapitre 12 (§ 12.1.2 p. 343) une discussion critique.

charnière, une sorte de nœud temporel. Nous avons l'avantage du regard long… De 1994 jusqu'à 2004, la période que j'ai vécue au sein d'ATLAS couvre l'intégralité de cette charnière cruciale. Nous allons voir dans les prochaines sections comment se frottent ces deux disciplines, la discipline de projet et la discipline dite collaborative (expression qu'il conviendrait de nuancer), et nous aurons ainsi davantage d'éléments pour discuter et améliorer la modélisation proposée dans cette courbe.

5.4 « *Emballez, c'est pesé* » : l'enveloppe comme outil de définition

Lors de la présentation au TCSG du 10 novembre 1999, il est question (§ 5.2) d'un processus non convergent d'approbation d'enveloppes. Avant de parler de cette non-convergence, présentons le processus évoqué ; et au préalable, explicitons ce terme d'enveloppe, à travers cette mise en situation rédigée par un ethnographe :

> *Bertrand est membre de la Coordination technique en tant que responsable de l'intégration d'ATLAS, c'est-à-dire que son travail est de s'assurer que les conceptions des différents sous-ensembles de l'expérience se font harmonieusement, d'un point de vue géométrique, et n'empiètent pas les unes sur les autres. Il emploie une méthodologie qu'il a créée pour le contexte du CERN et qui se fonde sur la création et l'utilisation de modèles CAO spécifiques dénommés "enveloppes" […]. Ces enveloppes sont une base d'échanges, ou pas, entre les différentes équipes qui conçoivent les sous-ensembles du détecteur ATLAS. [Lécaille 2003, 34]*

L'enveloppe est à la fois un outil technique pour définir la géométrie des composants du détecteur, et un outil de gestion de leur mutuelle compatibilité et de leur statut. La démarche est résumée dans l'article de synthèse [184] qui résume toute la conception d'ATLAS :

> *The mechanical integration process defined the overall experimental layout, where each nested sub-system has its well-defined shape and position and has no overlaps with any other subsystem. This integration process started from an initial input for the positioning of the sub-systems and for the space needed for access and services. It then defined mechanical envelopes and the overall three-dimensional layout of the ATLAS detector.* [185]

Cette section présente la définition des enveloppes établie pour le projet ATLAS, en commençant par l'enveloppe dite *individuelle* d'un sous-système, c'est-à-dire intrinsèque à un sous-ensemble préfabriqué, avant installation et assemblage dans la caverne, et donc définie dans un repère local attaché au sous-système. L'approche est ensuite étendue à la notion d'enveloppe *globale*, prenant en compte les assemblages dans la caverne et définie cette fois dans un repère lié à la caverne et au faisceau. L'ensemble des marges entre enveloppes a été traité par une "analyse système" qui est ici brièvement résumée – le propos n'étant pas de plonger dans les détails géométriques et mécaniques.

Notre objectif est ici de présenter les outils développés pour répondre à la mission principale de l'intégration : assurer la compatibilité géométrique des différentes pièces du puzzle [186], c'est-à-dire garantir qu'aucune portion de la caverne

184. Il s'agit de l'article présenté au chapitre 2, § 2.6.3 p. 70.

185. « Le processus d'intégration mécanique a défini la répartition globale de l'expérience, au sein de laquelle chaque sous-système logé possède une forme et une position bien définie et n'empiète sur aucun autre sous-système. Ce processus d'intégration a été lancé à partir d'une information initiale sur le positionnement des sous-systèmes et sur l'espace nécessaire pour les accès et les services. Les enveloppes mécaniques et la répartition globale tridimensionnelle du détecteur ATLAS ont ensuite été définies. » [ATLAS collaboration, Aad et al. 2008, 259]

186. Pour les amateurs de puzzle, précisément, il existe désormais une version d'ATLAS en Lego®… À l'échelle 1:50ème, cela fait encore un bel objet d'un mètre de long et de 50 cm de diamètre.

n'est virtuellement occupée par deux composants différents, que les interfaces sont bien définies et communes, et que les amplitudes de réglage de positions relatives sont suffisantes. Le deuxième volet principal de cette mission consiste à s'assurer que les transferts de charge sont correctement établis, elle ne sera abordée qu'au chapitre 7 à propos des interfaces entre les pieds et le toroïde.

5.4.1 Les enveloppes géométriques individuelles

Dans un séminaire consacré en 2009 à la question des repères et des espaces [187], j'écrivais : « *La définition des enveloppes a été introduite par la Coordination technique du projet dans une phase relativement préliminaire de la conception du détecteur, peu après que le choix de l'architecture globale eut été entériné et avant la préparation des rapports techniques détaillés* » [Nicquevert 2010]. Cette définition répond à un besoin de terrain apparu début 1996. Elle constitue une contribution personnelle, définie et formalisée dans une note technique [188] co-signée avec Hans, le coordinateur technique de l'expérience. La version publiée de mars 1996 est donnée à la Figure 5.7.

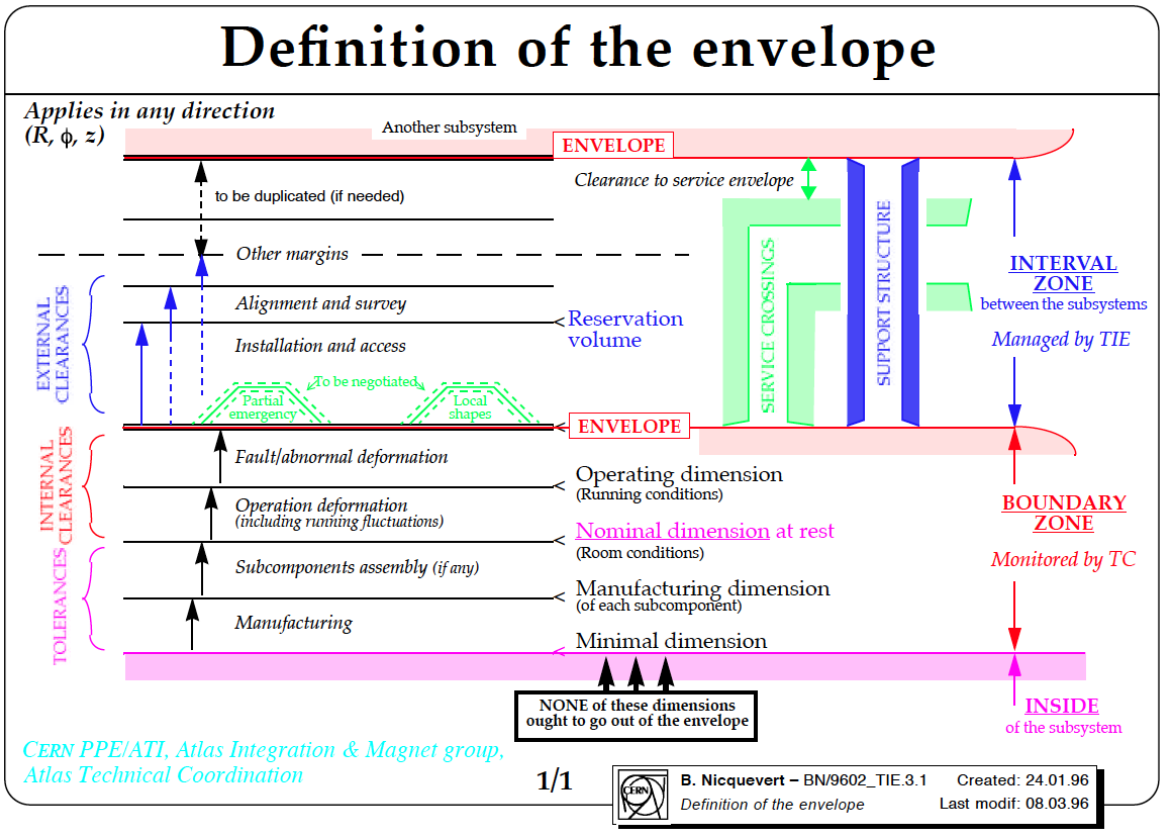


Figure 5.7: Définition de l'enveloppe géométrique d'un sous-système

Un bref mot sur sa genèse : en janvier 1996, sur les bords de la Tamise non loin d'Oxford se tenait une réunion du MPG (le *Magnet Project Group*) d'ATLAS. Hans m'avait demandé en cours de réunion d'expliciter pour le lendemain comment je prévoyais de définir les enveloppes, en particulier pour les différents éléments des

Voir http://www.atlas.ch/img/lego-atlas.jpg.

187. *Repères et espace(s)*, colloque des doctorants moniteurs de Grenoble, Maison des sciences de l'homme, avril 2009. Actes parus aux PUG [Aiosa, Naït-Bouda et Thévenon 2010].

188. *Dimension Milestones* [Hoffmann et Nicquevert 1996].

toroïdes *barrel* et *end-cap*. J'avais besoin d'élaborer rapidement (en quelques heures tout au plus) un outil efficace qui permette de définir pour chaque composant ce qui serait contenu dans une enveloppe et ce qui ne le serait pas. Le principe apparut sous forme d'un empilement de facteurs (inspiré des chaînes de cotes) qui ont une influence sur la géométrie des sous-systèmes. Le principe permet d'expliciter les différentes zones allouées respectivement soit à chaque sous-système, soit aux besoins communs. J'aboutis donc au transparent manuscrit original présenté dès le lendemain et reproduit en tête de ce chapitre (Figure 5.1 p. 121).

Si l'on analyse cette définition de l'enveloppe, l'on y découvre en effet deux volets : un volet géométrique, le principal (qui occupe les trois quarts de la surface de la définition), qui donne la signification technique des différentes contributions volumiques ; et un volet davantage gestionnaire (qui figure dans la zone la plus à droite), indiquant la répartition des rôles et responsabilités dans la définition et l'approbation de ces deux zones distinctes. Le rôle de l'enveloppe est donc dual.

a. Volet géométrique

Sur le schéma, on voit apparaître deux zones : tout d'abord, en partant du bas (de l'intérieur du système considéré), la zone frontière ; puis la zone intervalle.

La première zone *frontière* (*boundary zone*, en rouge en bas à droite) est la zone la plus extérieure d'un sous-système. Elle est attribuée aux excursions et variations de dimensions du sous-système considéré : partant d'une dimension minimale correspondant aux cotes théoriques avant fabrication, on ajoute les tolérances de fabrication des composants, et les écarts dus à leur assemblage (montage). On obtient ainsi la cote "nominale" (le terme de cote résultante serait plus approprié) de l'assemblage au repos. On ajoute enfin les déformations en fonctionnement : c'est d'autant plus important que les objets initiaux dont il est question sont des enceintes à pression, donc susceptibles de changer de dimensions en cours d'utilisation. On définit ainsi par empilage cette surface rouge, limite de l'enveloppe, interface formelle du sous-système avec le reste du monde. Et comme le précise l'encadré en noir tout en bas, « *aucune de ces dimensions n'est autorisée à sortir de l'enveloppe* » : quelle qu'en soit la raison (fabrication, assemblage, déformation normale ou accidentelle, la surface extérieure du sous-système doit respecter la limite ainsi définie.

La deuxième zone *intervalle* (*interval zone*, en bleu en haut à droite) définit l'espace extérieur situé au voisinage à l'enveloppe. Elle est située entre deux sous-systèmes, contient des éléments collectifs qui ne sont propres ni à l'un ni à l'autre des deux systèmes voisins considérés : ce sont les circulations de services (tuyaux, câbles et tubes en tous genres), supports intermédiaires, dispositifs d'alignement et autres objets techniques d'intérêt général. La structure support intermédiaire a aussi comme fonction d'assurer le positionnement relatif des deux sous-systèmes, et joue donc un rôle prépondérant dans leur interface.

L'enveloppe d'un sous-système est donc l'espace contenant la première zone frontière (et tout l'intérieur, bien entendu), et séparée de l'un de ses voisins par la deuxième zone intervalle. « *En condensé, l'enveloppe est la réunion du volume englobant et de l'épure d'interface* », notais-je en 2009. Le "condensé" est hâtif et mérite deux mots [189]. Une telle approche est originale à ma connaissance : l'enveloppe peut être considérée pour l'assemblage comme un *état virtuel* ***généralisé*** *au maximum de matière* au sens de la norme ISO 2692:2006 [ISO 2006] sur l'exigence du maximum de matière [190]. L'enveloppe constitue un volume défini dans un système

189. Ce point de vue est une évolution ultérieure, qui n'est pas contenue dans la définition de 1996. Je renvoie donc au chapitre 8, puis au 15, pour le développement de ces idées.

190. Le maximum de matière est un concept de tolérancement qui permet de définir un volume global dans lequel les variations de la pièce peuvent être indifféremment attribuées à la dimension ou à la géométrie. Cela permet une allocation dynamique de ces deux contributions, et ainsi de maximiser le nombre

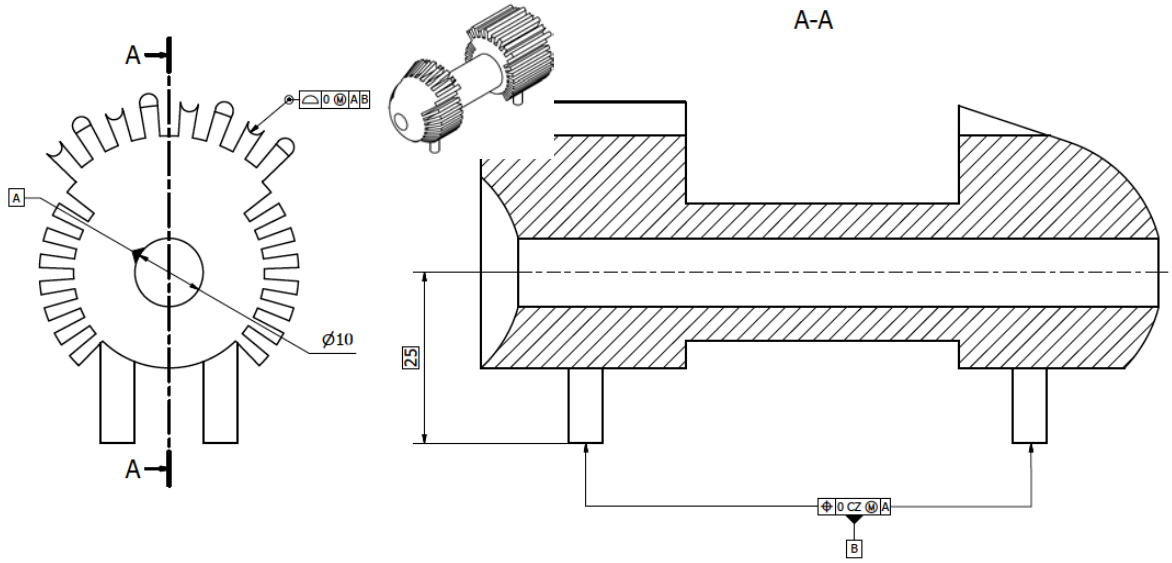


Figure 5.8 : Proposition de définition d'un volume enveloppe au maximum de matière

Forme quelconque, imaginée et mise en plan par P. Landrot, 2012

de références ordonnées associé au sous-système, et englobant l'ensemble des variations de taille ou de dimension et des écarts géométriques des éléments ainsi assemblés.

Je propose de définir ce volume enveloppe de la manière exprimée à la Figure 5.8 : on construit un système de références ordonnées en partant d'un volume fonctionnel interne (le cylindre A) et d'un plan de pose de quatre pieds en zone commune définissant l'interface ; on positionne ensuite dans ce système un volume enveloppe (avec tolérance 0 au maximum de matière) qui définit l'excursion maximale possible de la surface volumique externe tolérancée (la peau de l'assemblage). C'est donc une proposition de généralisation de la norme qui est ainsi formulée [191], car cette écriture n'est pas conforme aux normes actuelles : elles limitent l'indication au maximum de matière non seulement à une seule pièce, mais aussi uniquement à des éléments dimensionnels, cylindres ou bi-plans parallèles en vis-à-vis ; et elles ne permettent pas de l'étendre à *l'ensemble* de la surface extérieure avec un symbole "*Tout autour volumique*" (et non pas limités à un élément simple), avec un petit disque noir additionnel (Figure 5.9) tel que proposé dans une norme expérimentale [192].

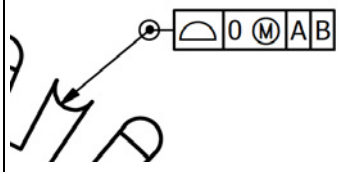


Figure 5.9 : Symbole du « Tout autour volumique »

Une telle écriture impose également de clarifier la question de la rigidité des pièces, et de bien définir la notion de dimension nominale d'un assemblage, qui seule permet de construire ensuite proprement la dimension au maximum de matière.

d'assemblages fonctionnellement acceptables, tout en donnant aux fabricants la liberté de répartir leur marge de manœuvre entre variabilités dimensionnelle et géométrique selon la "capabilité" des différents procédés de fabrication impliqués.

191. Cette idée a été présentée en substance en mai 2004 au Groupe de Recherche sur le Tolérancement [Mathieu et Villeneuve 2007] ; elle mérite assurément une formalisation adéquate plus détaillée, ce qui sort du cadre du présent travail de thèse même s'il en constitue une perspective.

192. Norme XP E 04-562:2000 « *Surfaces complexes, prismatiques et de révolution* », § 4.3.2, Tableau 5 p. 7. La proposition n'a pas encore été reprise dans le projet de révision de la norme PR NF EN ISO 1101:2012 soumis à enquête publique (octobre 2012) ; j'ai demandé au comité technique de l'AFNOR à ce qu'elle le soit, et il semblerait que ce soit une omission qui sera rectifiée.

b. Volet gestionnaire

Le deuxième volet gestionnaire, quant à lui, donne des indications assez précises sur le statut pour ainsi dire "juridique" des différentes zones : à qui elles appartiennent, par qui elles sont gérées. Car l'un des objectifs est de définir une jauge (un calibre virtuel, pour parler le langage du tolérancement) qui permette de définir l'espace occupé de manière intrinsèque par un objet donné. Un tel outil permet ainsi de valider la conformité de n'importe quelle instance fabriquée de cet objet. Ces statuts sont ainsi définis :

> *The boundary zone is managed by the subsystem and monitored by the Technical Coordination […], whereas the interval zone is managed by the Technical Coordination, in close collaboration with the adjacent subsystems.* [193]

La zone intervalle est en fait gérée centralement par le TIE, *Team for Integration and Engineering* (Équipe pour l'intégration et l'ingénierie), constitué des projeteurs réunis sous la houlette de l'intégrateur. La définition de l'enveloppe individuelle prévoit la possibilité d'exceptions locales tant géométriques que temporelles, indiquées en vert « *to be negotiated* » [194]. Cette expression souligne bien la dimension politique de cette approche, et elle allait être l'occasion d'âpres interprétations diplomatiques [195] : l'étude du cas des lattes, développée au chapitre 6, en donnera une illustration détaillée [196].

5.4.2 Enveloppes globales et repères multiples : l'enveloppe comme outil d'intégration

La définition des enveloppes implique pour chaque sous-système d'analyser ses propres contributions géométriques, ce qui permet de considérer plus systématiquement son influence sur le positionnement de ses voisins : si un réglage est possible, cette approche permet de prévoir la gamme du support réglable introduisant les degrés de liberté nécessaires à la bonne mise en position finale ; et pour les cas fréquents ou le *gap*, l'espace entre voisins, n'est pas directement réglable mais résulte des positionnements préalables des sous-systèmes, l'empilage de proche en proche des défauts de positionnement et d'alignement permet de déterminer (ou de simuler) la position d'un sous-système dans la caverne.

Car il ne s'agit pas seulement d'attribuer un volume intrinsèque à chaque sous-système, mais de le positionner dans le *repère global* de l'expérience, tel que défini par les géomètres topographes en relation avec la position du faisceau, et de le faire avec la précision requise par le processus de reconstruction ultérieure des trajectoires des particules issues des collisions [197]. C'est une distinction simple au premier abord, mais qui s'est révélée beaucoup plus complexe que prévue, et qui est incomplètement traitée par la définition de l'enveloppe individuelle. Plusieurs repères sont en effet à superposer, selon la procédure schématique suivante (partiellement synthétisée à la Figure 5.10) : définir le repère associé à l'enveloppe indi-

193. « La zone frontière est gérée par le sous-système et contrôlée par la Coordination technique […] tandis que la zone intervalle est gérée par la Coordination technique, en collaboration étroite avec les sous-systèmes adjacents. » [Hoffmann et Nicquevert 1996, §2.1 p. 2].

194. «*Doit être négocié.* »

195. Je fais ici allusion à la controverse sur les territoires occupés par Israël en Palestine (résolution n°242 du Conseil de Sécurité de l'ONU, 22 novembre 1967). Version anglaise : « *withdrawal from occupied territories* ». Version française : « retrait *des* territoires occupés »… ou bien retrait *de* territoires occupés ?

196. Quant à la question générale de la frontière, elle sera reprise au chapitre 12 (§ 12.2 p. 347 sqq.).

197. Le processus est assisté par la présence de systèmes d'alignements qui permettent de déterminer avec une grande précision (typiquement 30 μm dans le repère global) la position effective des détecteurs. Le rôle de l'ajustement de position consiste donc essentiellement en un pré-alignement de façon à rendre fonctionnels les systèmes d'alignement, dont la gamme de mesure est restreinte à très peu de millimètres.

viduelle (locale) d'un sous-système ; caler les différents locaux entre eux, en agissant sur l'interface (supports réglables, ou résultat d'un empilage dimensionnel maîtrisé) dans le respect du volume réservé (*reservation volume)*, et en fonction des contraintes d'installation et d'accès ; régler la position de cette enveloppe globale dans le repère de la caverne et de l'infrastructure ; et enfin, ajuster le tout selon le repère défini physiquement par le faisceau provenant de l'accélérateur.

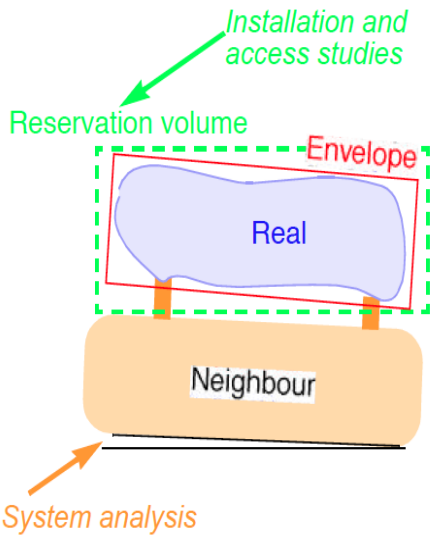


Figure 5.10: Enveloppe individuelle et volume de réservation

BN, présentation au LHCC, 25 mars 1999

L'intégration virtuelle s'est effectuée sur modèles numériques à partir des enveloppes théoriques. L'installation dans la caverne a constitué une phase d'intégration réelle. Elle ajoute la prise en compte de la dimension réelle de chaque composant, dont on vérifie au préalable qu'elle est bien contenue dans l'enveloppe théorique définie lors de la phase d'intégration virtuelle. Une “analyse système”, prenant en compte l'ensemble des mouvements et déviations possibles, avait permis de définir *a priori* les gammes de réglages nécessaires pour chaque interface, et donc d'imposer un cahier des charges aux dispositifs mécaniques assurant la jonction entre les différents sous-systèmes. Elle a été principalement développée par François Butin [198] sur la base du principe des enveloppes globales et des volumes de réservation.

En guise de conclusion, reprenons l'article de synthèse sur ATLAS dans lequel nous présentons trois types d'enveloppes (la troisième étant rendue nécessaire par la prise en compte des scénarios d'ouverture) :

> *§ 9.3.1 Envelopes (individual, global, dynamic)* [199]
>
> *Envelopes define the space allocated to each part of each sub-system. Three types of envelopes have been created, individual, global and dynamic, and they are defined as follows:*
>
> • *The individual envelope is the space allocated for the manufactured object, including some space added to the nominal design drawing envelope, in order to take into account fabrication and assembly tolerances.*

198. Deux notes de référence : F. Butin, « *Support Structures System Analysis* », ATL-H-EN-0001, Juin 1997 ; et « *Support structures System Analysis: Results of the Second Iteration* », ATC-T-ER-0002, Mai 2000.

199. « § 9.3.1 Enveloppes (individuelles, globales, dynamiques)

Les enveloppes définissent l'espace alloué à chaque partie de chaque sous-système. Trois types d'enveloppes ont été crées, individuelles, globales et dynamiques, et elles sont définies comme suit :

• l'enveloppe individuelle est l'espace allouée à un objet fabriqué, incluant de l'espace additionnel à l'enveloppe du dessin de conception nominale, de façon à prendre en compte les tolérances de fabrication et d'assemblage ;

• l'enveloppe globale inclut, en plus de l'enveloppe individuelle, de l'espace consacré aux imprécisions de positionnement à l'intérieur du détecteur et aux déformations qui surviennent au cours de l'installation et de l'opération ;

• l'enveloppe dynamique inclut, en plus de l'enveloppe globale, de l'espace pour les déviations et les déformations au cours des déplacements (par exemple durant les accès) de l'objet à l'intérieur du détecteur. »

[ATLAS collaboration, Aad et al. 2008, 259]

> • *The global envelope includes, in addition to the individual envelope, some space dedicated to the inaccuracy of the positioning inside the detector and the deformations applied during installation and operation.*
>
> • *The dynamic envelope includes, in addition to the global envelope, space for deviations and deformations during displacements (e.g. during access) of the object inside the detector.*

Il est intéressant de comparer notre approche avec celle du détecteur CMS, l'expérience cousine d'ATLAS installée au point 5. L'architecture de CMS, avec son aimant à bobine solénoïdale et à culasse en acier, impose aux chambres à muons des limites beaucoup plus solides et tangibles que pour ATLAS : ces frontières sont en acier ! L'approche est alors la suivante :

> *Within the CMS collaboration we agreed on the definition of two types of volumes :*
>
> *1/ Envelopes for Detectors, Infrastructure, Alignment and Services.*
>
> *2/ No-Go zones.*
>
> *Detector envelopes are shown as "Outside dimensions" ; they include : the Sub-Detectors own cables, services, infrastructure, clearance and tolerances. Other envelopes have been determined the same way, including installation tooling, access and safety equipment.*
>
> *No-Go zones are "guaranteed free" and no envelope is allowed inside the No-Go zone. Only exception is the interface between envelopes like supports and Alignment systems. The No-Go zone are determined by a Risk analysis and derived from past experience. With a better understanding of some Sub-Detectors, envelopes have been changed. This happened in both directions, smaller less risk / bigger more risk involved.* [200]

C'est somme toute une approche similaire à celle d'ATLAS, avec la différence importante que les volumes interdits (*No-Go zones*) sont explicitement définis, et non pas par défaut considérés comme « *la place qu'il reste entre deux détecteurs* » [201].

La place : c'est précisément ce qui manque dans le présent chapitre pour entrer dans les détails de tous les principes [202], et en particulier la délicate gestion des interfaces. Quand il sera rendu nécessaire de s'y intéresser d'encore un peu plus près [203], je préciserai certains détails au fil du propos, dans la mesure où les discussions, les négociations, les désaccords, voire la controverse qui est apparue lors du processus, portent précisément sur les détails de mise en œuvre, et parfois même contestent ses principes globaux.

---

200. « Au sein de la collaboration CMS, nous nous sommes mis d'accord sur la définition de deux types de volumes :

1/ Enveloppes pour les Détecteurs, l'Infrastructure, l'Alignement et les Services.

2/ Zones interdites.

Les enveloppes de détecteur sont indiquées comme “Dimensions extérieures” ; elles comprennent les câbles, services, infrastructure, marges et tolérances propres à chaque sous-détecteurs. Les autres enveloppes ont été définies de la même façon, y compris l'outillage d'installation, les accès et les équipements de sécurité.

Les zones interdites sont “garanties libres” et aucune enveloppe n'est autorisée à l'intérieur de la zone interdite. La seule exception est l'interface entre enveloppes comme les supports et les systèmes d'alignement. La zone interdite est déterminée par une analyse de risque et issue des expériences passées. Avec une meilleure compréhension de certains Sous-Détecteurs, les enveloppes ont été modifiées. C'est arrivé dans les deux directions, plus petit moins de risque / plus gros plus de risque impliqué. »

Gerard Faber (en charge de l'intégration de CMS), courriel à Bertrand, 23.11.1998.

201. Nous verrons au § 6.6 p. 172 qu'une telle différence est tout à fait capitale en pratique.

202. Je renvoie au Chap. 11 *Mechanical Integration*, in *Technical Coordination Technical Design Report*, p. 91-116 [ATLAS Technical Co-ordination Team 1999], ainsi qu'à la présentation au LHCC le 25 mars 1999,

203. Ce sera le cas au chapitre 6.

5.4.3 Représentation des enveloppes

Les formes que prennent les enveloppes en tant qu'objets sont multiples. Elles sont d'abord modélisées en tant que modèle numérique 3D de CAO, et stockées selon la procédure particulière dite des “standards STD” [204]. Puis cet objet 3D est mis en plan pour donner forme à ce que nous avons appelé un *plan vecteur* : le sens de cette appellation est que le plan est le vecteur, le porteur, le représentant de l'objet 3D dans le système d'information qui permet de gérer les approbations, le système CDD (*CERN Drawings Directory*).

Revenons au processus qui ne converge pas dont il est question au début du chapitre et résumé à la Figure 5.11. C'est le processus d'approbation des enve-

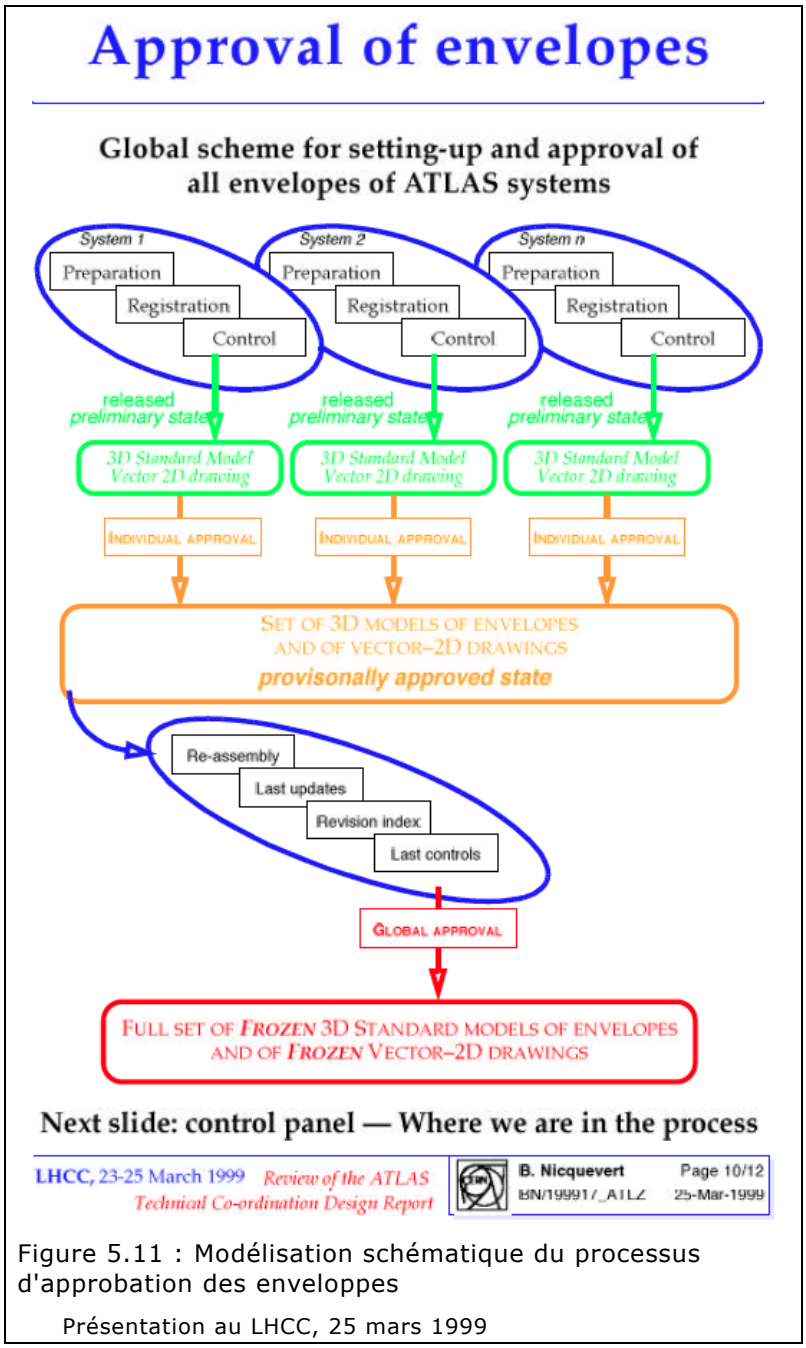


Figure 5.11 : Modélisation schématique du processus d'approbation des enveloppes

Présentation au LHCC, 25 mars 1999

204. Voir § 8.3.3 p. 241.

loppes en tant qu'objets 3D modélisés, traités par la procédure des standards, à travers leur projection sur un plan vecteur, et gérés par CDD. C'est cela, la réalité du terrain ! Et l'on en méconnaît la complexité quand on se contente de dire que les enveloppes ont été simplement « *approuvées* » [205]. Pour ce qui concerne les détails du cas présenté dans ce chapitre (dont l'objet principal ne porte pas sur ces questions), je renvoie au *Technical Coordination Technical Design Report* [206] pour une présentation du contexte tel qu'il se présentait à l'époque – et qui était alors assez bien connu des différents acteurs.

5.5 Origines d'une non-convergence

Le schéma global du processus d'approbation des enveloppes est donné à la Figure 5.11. Il est constitué de plusieurs étapes, qui correspondent à celles qui sont listées dans le tableau de la Figure 5.5 . Ces étapes sont regroupées en deux phases [207] : l'établissement et l'approbation des enveloppes individuelles (une pour chaque sous-système) dans une approche *bottom-up* partant des géométries des sous-systèmes ; puis la vérification systématique et simultanée de la compatibilité de l'ensemble de ces enveloppes individuelles, une fois assemblées (vérification *top-down*). L'objectif global du processus est de parvenir à un ensemble complet d'enveloppes figées (*frozen*), basées sur un ensemble d'objets CAO (modèles 3D et dessins 2D) complètement approuvés.

Lors du TCSG de novembre 1999, le constat (Figure 5.3 p. 126) est que le processus ne converge pas. En effet, l'enveloppe individuelle de plusieurs sous-systèmes n'a pas encore été finalisée pour atteindre le stade de « *provisionally approved state* » [208]. Or, l'activité de ré-assemblage virtuel ne peut aboutir que lorsque toutes les enveloppes sont disponibles. C'est donc une situation insatisfaisante dont je dresse alors le bilan, dans un mémorandum destiné au coordinateur technique [209].

> ***Intégration et enveloppes : demi-échec ?***
>
> *À ce jour, sont partis en fabrication ou en passe de l'être : cryostats LArg (ABC* [210] *et AEC); tiles; TB cryostat; TE cryostat. Le* layout *des muons ne changera plus, sauf volonté politique majeure (voir la gestion du gap Z=0* [211]*). Or, depuis février 1999, le travail d'intégration est bloqué par la question du* layout *des muons, qui déjà était*

205. C'est ce long cheminement de la gestion des données qui sera étudié plus en détails au chapitre 8 pour le cas du CERN, puis repris au chapitre 14 dans le cadre du déploiement du système de gestion des données techniques du projet *Med*Austron.

206. Chapitre 4 *The Tools*, p. 31-38, et Chapitre 5 *The Processes*, p. 39-54, en particulier la section 5.2 (que j'ai rédigée) « *Drawings Management* », et tout particulièrement la sous-section 5.2.4 « *A special case: the CAD models* », et encore plus spécifiquement, la sous-sous-sous section 5.2.4.2 *Euclid models, so-called 'standards'* p. 46-47 [ATLAS Technical Co-ordination Team 1999].

207. Voir le § 11.3 du TC TDR.

208. « État approuvé à titre provisoire ».

209. B. Nicquevert, Mémorandum [en français, titre en anglais] à M. Price, copie aux membres de la Coordination technique concernés, *My view on responsabilities* [sic] *of Atlas TC and my role, BN/199936_ATLTC*, 3 octobre 1999. Douze ans après, je ne parviens pas à établir si ce document a été réellement envoyé ou non – j'en ai même retrouvé dans mes archives une version papier, barrée d'un bandeau « *Ne pas diffuser* ». Il y a désormais prescription, et le statut effectif de ce mémo n'a en l'occurrence pas d'importance ici : ce document conserve la valeur d'une trace de mon appréciation des choses à ce moment-là.

210. Ces codes désignent les différents sous-systèmes dans l'arborescence produit (*PBS name*). Ces questions seront discutées au chapitre 8. Voir également le § 3.2 *Project/Product Breakdown Structure (PBS)* [ATLAS Technical Co-ordination Team 1999, vol. 13:17-21], et pour des considérations plus générales, [Bachy et Hameri 1997].

211. Zone où sortent la plupart des services, dans une tranche perpendiculaire au faisceau et contenant le point d'interaction (dont la distance z au point d'interaction est nulle : z=0).

> *en retard d'un an (au bas mot). Autrement dit, 90% des frontières matérielles des master enveloppes est gelé, quand 10% sont confirmées. C'est un échec patent, d'abord pour moi, mais aussi pour les PRR* [212] *et la gestion de configuration, et donc pour la TC. Les conséquences à terme sont potentiellement désastreuses (et nous sommes incapables de le montrer aujourd'hui).*
>
> *Raisons : retards dans l'établissement des enveloppes, et dans le développement des outils permettant leur gestion (BN, BJP* [213]*) ; retards ou absence de transmission des données et dessins permettant leur établissement, et désintérêt de la plupart des PE* [214] *(sauf* tile *et AEC) (systèmes) ; absence de volonté claire d'établir une* baseline *cohérente et les interfaces, premier élément d'un TC management plan (TC) ; absence ou retards de prise de décision sur des sujets essentiels (muon* layout *essentiellement) (Atlas management) ; impossibilité de convergence sur les procédures d'approbation CDD, qui ne sont pas suivies.*

Les causes avancées sont donc de plusieurs ordres: des questions managériales, que ce soit au niveau stratégique ou au niveau opérationnel, et des questions sur les processus des questions liées aux outils. D'autres, non mentionnées dans ce mémorandum, apparaîtront dans le déroulé du cas décrit dans le chapitre 6 : questions scientifiques, et questions techniques [215].

Commençons par les causes d'ordre managérial. La critique la plus virulente du mémorandum porte sur les questions d'implication et de motivation, aussi bien du côté des systèmes que de la Coordination technique, voire du management du projet au plus haut niveau. C'est que le style de management par « *consensus-driven* » [216] recherche l'accord général par élaboration progressive, et qu'il reporte la décision au dernier moment. Ce style est ainsi résumé par deux de ses plus fervents défenseurs, le porte-parole et le coordinateur des ressources :

> *The relevant expertise resides at the level of individuals and contributing institutions, not at that of the ATLAS management: people know what to do and they get on with it; they do not need to be told. Only if subsystems run into conflicting requirements might higher-level arbitration be required and the Spokesperson be called in to help. But, even then, the Spokesperson does not impose technical solutions but rather* ***attempts to persuade****. In such an environment, then, the key technical decisions are taken at the sub-project level in consultation with the different executive bodies within ATLAS. They are, however, subject to meticulous peer-review processes and are taken* ***only when the time is ripe.*** [217]

À l'époque, et c'est seulement avec le recul de plusieurs années que je suis en mesure de le formuler, les ingénieurs de la Coordination technique avaient quelques difficultés à accepter ce style de management, ou en tous cas, à être en mesure de s'y adapter efficacement. Ils avaient en effet besoin de temps pour effec-

212. *PRR : Production Readiness Review*, des revues destinées à donner le feu vert pour la production.

213. Membres de l'équipe en charge de l'intégration géométrique.

214. *PE : Project Engineers*, ingénieurs projet des sous-systèmes, agissant en général comme coordinateurs techniques locaux.

215. Les raisons du blocage relèvent bien des quatre catégories systémiques évoquées au chapitre 2.

216. « Guidé par le consensus » (Nordberg, in [Marchand et Margery 2009, 3]).

217. « L'expertise pertinente se situe au niveau des individus et des institutions participantes, et non pas à celui du management d'ATLAS : chacun sait ce qu'il a à faire et il s'en occupe ; on n'a pas besoin de le leur dire. Ce n'est que si des sous-systèmes arrivent à des exigences incompatibles qu'un arbitrage de niveau supérieur peut être requis, et le Porte-parole peut être appelé à l'aide. Mais, même dans ce cas, le Porte-parole n'impose pas de solutions techniques mais **préfère tenter de persuader**. Dans un tel environnement, les décisions techniques clé sont alors prises au niveau du sous-projet en consultation avec les différentes instances exécutives au sein d'ATLAS. Elles sont cependant soumises à des processus méticuleux de revue par les pairs et sont prises **uniquement quand le moment est mûr**. » [Jenni, Nordberg et Boisot 2011, 25]. C'est moi qui souligne.

tuer leur travail d'intégration, de routage des services, de conception des supports. Et engagés dans une dynamique plutôt séquentielle, ils attendaient donc que les données soient raisonnablement stabilisées avant de lancer ces études longues et délicates. Cette approche n'était pas en phase avec celle des physiciens. C'est ce que nous avons appelé la tension essentielle, nous y reviendrons lors de l'exposition de la controverse.

Il apparaît dans le mémorandum de Bertrand à Mike que le manque d'intérêt même pour la procédure d'intégration, à tous les niveaux (management de projet, ingénieurs des systèmes, et même les coordinateurs techniques successifs eux-mêmes, dans une certaine mesure) constituait pour les personnes en charge une source de démotivation certaine, allant jusqu'à un questionnement sur la légitimité de la démarche, voire de l'activité même d'intégration géométrique [218].

Deux autres grandes causes de blocage peuvent être évoquées, avant qu'on les voie à l'œuvre plus en détails dans le chapitre 6 : les contraintes techniques, qui imposent que soient définies des marges suffisantes autour de chaque objet telles que prescrites par la définition des enveloppes ; et la motivation scientifique fonctionnelle, qui induit quant à elle que les marges soient minimisées, afin d'augmenter autant que possible l'acceptance du détecteur [219]. C'est de cette tension entre contraintes techniques et exigence fonctionnelle que va naître la controverse conceptuelle.

L'une des enveloppes est particulièrement critique : celle du spectromètre à muons. En janvier 1999, on trouve déjà trace dans le TDR des difficultés à établir cette enveloppe (difficultés qui étaient apparues en fait dès 1996) :

> *Figure 11-13, 3D view of the envelope of all muon chambers (M). The envelope of the muon spectrometer, because of the numerous chambers, is the most difficult to prepare. Starting from assumptions about assembly tolerances made together with the muon system, a first 3D model has been set up and is shown in this drawing. Dimensions are available, but are still at the discussion stage and not ready for publication.* [220]

Ces difficultés vont s'accroître encore tout au long de 1999 (comme en témoigne le mémorandum cité du 3 octobre 1999 au coordinateur technique). Elles vont culminer peu après le TCSG de novembre 1999, au cours de la crise dite *d'Eilat* décrite dans la section suivante. La sortie de crise partielle et progressive sera illustrée par la résolution du problème dit « *des lattes* », un élément de l'aimant toroïdal dont l'évolution au cours de la conception va provoquer un conflit frontalier avec ses voisins. Cette séquence spécifique (qui sera l'objet du chapitre 6) constitue un volet fondamental de notre étude du cas, qui illustre la controverse sur les enveloppes et le sens même de l'activité d'intégration.

---

218. En mai 1997, j'avais demandé au coordinateur technique, Hans Hoffmann, à être relevé de mes fonctions, estimant déjà ne pas avoir les moyens de mener à bien une mission qui me dépassait, et pour laquelle j'estimais ne pas recevoir le soutien nécessaire. La seule trace écrite que j'ai retrouvée de cet épisode est indirecte : « *Je ne vois pas très clair sur la suite de l'organisation [de la gestion des données CAO], ayant suspendu mes activités d'intégrateur. J'attends donc des instructions en haut lieu sur la suite des opérations. Je réoriente sur G. Bachy, responsable de l'intégration générale, ainsi que de la gestion des données, de l'ingénierie, etc.* » Bertrand, courriel à Eric v. U. et Samy, 05 juin 1997.

219. L'acceptance d'un détecteur représente sa couverture géométrique en angle solide : aucun chemin libre ne doit être laissé aux particules, quelle que soit la direction qu'elles prennent après leur création. On parle aussi de couverture (*coverage*).

220. « Figure 11-13, vue 3D de l'enveloppe de toutes les chambres à muon (M). L'enveloppe du spectromètre à muons, en raison des nombreuses chambres, est la plus difficile à préparer. En partant des hypothèses sur les tolérances d'assemblage estimées avec le système des muons, un premier modèle 3D a été élaboré et est montré dans ce dessin. Les dimensions sont disponibles, mais elles sont encore au stade de la discussions et ne sont pas prêtes à être publiées. » [ATLAS Technical Co-ordination Team 1999, vol. 13:100].

5.6 D'Eilat aux lattes (I) : tensions au Proche-Orient

Cette section présente en pleine action l'activité de la Coordination technique. Elle se centre sur le cas du spectromètre à muons, parce que c'est le sous-système le plus complexe d'ATLAS pour les questions d'intégration et de coordination, donc le plus révélateur des dynamiques sociotechniques à l'œuvre.

5.6.1 Discussions à l'ATLAS Muon Workshop

Le TCSG du 10 novembre 1999 a bien pris note du blocage du processus d'approbation, et décidé qu'il était nécessaire de parvenir rapidement à une définition acceptable de l'enveloppe des muons. L'étape suivante se déroule dans un cadre très différent, celui d'un *ATLAS Muon Workshop* : c'est une sorte de colloque qui réunit la plupart des collaborateurs du projet des muons, soit plus d'une centaine de personnes venues du monde entier. La collaboration des muons est en effet très vaste, et mobilise outre de nombreux pays européens, entre autres, allemands du MPI (*Max Planck Institut*), néerlandais de NIKHEF (*Nationaal instituut voor subatomaire fysica*), italiens de l'INFN (*Istituto Nazionale de Fisica Nucleare*), français du CEA (*Commissariat à l'énergie atomique*), ainsi que des équipes américaines de l'*University of Washington* (Seattle), de la *Brandeis University* et de Harvard (Boston), du *Brookhaven National Laboratory* (Long Island, près de New York), des équipes russes (IOAO Dubna, voir le chapitre 7), des équipes japonaise du KEK (*Kō Enerugī Kasōki Kenkyū Kikō*) et israélienne (*Weizmann Institute of Science*).

En 1999, le *Workshop* est organisé dans la cité balnéaire israélienne d'Eilat, au bord de la mer Rouge, sous la houlette du nouveau chef de projet Giora Minkenberg. Le *Workshop* se tient sur plusieurs jours, et programme, entre discussions informelles et moments sociaux de détentes, de très nombreuses réunions spécialisées : sur l'alignement, sur la fabrication de chambres de précision, sur l'électronique d'acquisition, sur la conception des chambres de déclenchement, sur les procédures de contrôle qualité, sur les logiciels de simulation… Le *Workshop* se termine par une réunion plénière (le matin du dernier jour), puis par les réunions des comités formels du projet (le tout dernier après-midi).

La délégation du CERN comprend plusieurs représentants de la Coordination technique, dont le coordinateur technique Mike Price et l'ingénieur en chef Gérard Bachy. Au cours des cinq jours du *Workshop*, nous allons donc enchaîner réunions et discussions informelles. Nous allons participer essentiellement à la réunion du mardi matin animée par Jörg W., intitulée *Layout & Integration meeting*, et à la réunion sur l'alignement du mardi soir. Et le mercredi soir, nous sommes chargés d'animer une réunion intitulée *TC meets muon*. La plénière est l'occasion de discussions animées. Le résultat de ces réunions peut se lire à travers quatre strates de documents : les compte-rendus officiels au niveau d'ATLAS (rapport à l'*Executive Board* ou au TCSG) ; les compte-rendus propres au projet des muons : réunion plénière, réunions formelles ou thématiques ; les notes internes à la TC ; et enfin, mes notes personnelles de terrain.

Une analyse historique détaillée de ces archives sortirait du cadre de cette thèse. Nous allons donc suivre uniquement ce qui a trait à la controverse sur les enveloppes, notre fil rouge. Toutefois, comme j'espère l'avoir désormais établi, ce fil n'est rien sans les autres fils qu'il entrecroise, que ce soit sur le contexte organisationnel, sur l'ambiance relationnelle, sur les enjeux scientifiques ou sur les contraintes techniques. Pour définir des enveloppes, une équerre et un compas ne suffisent pas… Il faut aussi beaucoup discuter. Et les discussions autour des enveloppes vont avoir des conséquences en retour sur l'organisation de la collaboration

entre TC et projet des muons, et même sur le mode de management de la Coordination technique, conséquences que nous évoquerons au § 5.7.2.

La troisième strate de documentation est constituée du rapport de voyage (*travel report*) interne à la TC rédigé à notre retour. La dernière strate enfin est apportée par les notes de terrain personnelles. Ces deux strates, qui ne sont pas (ou qui sont moins) soumises à la nécessité diplomatique d'être politiquement correctes, soulignent les divergences de vue entre les membres de la TC et les concepteurs du spectromètre à muons.

5.6.2 Divergences

Entre les différents interlocuteurs de ces discussions apparaissent des divergences stratégiques ou conceptuelles importantes. Qui sont ces interlocuteurs ?

D'un côté, on constate l'attitude de Jörg, le physicien en charge du *layout*, qui affirme : « *we can put things on drawings only when they are stable enough* » [221]. C'est une approche qui semble peu propice à des échanges collaboratifs permettant une ingénierie concourante – et c'est une attitude que l'on ne retrouve pas seulement chez les physiciens, nous le verrons aussi au chapitre 8 : grande est la frilosité de partager des données non stabilisées, alors que c'est précisément dans le partage et la confrontation avec les contraintes des voisins que s'élabore peu à peu une solution stable.

Et de l'autre côté, on voit à la manœuvre (pas toujours délicatement, il faut le reconnaître) une équipe de la TC qui souhaite prôner une approche système, c'est-à-dire non pas uniquement centrée sur la taille et la position des chambres, mais également sur les questions liées à l'ensemble de leur cycle de vie (supportage, installation, accessibilité, connexion, maintenance). Car le *layout* ne peut pas être finalisé tant que ces questions ne sont pas traitées, puisqu'elles ont fatalement une influence sur la dimension des chambres : l'affirmation de Jörg selon laquelle « *chambers dimensions will not change* » [222] est donc en contradiction avec cette approche globale.

C'est donc une situation de blocage paradoxal qui se révèle au cours des nombreuses discussions (pas moins de trois réunions spécifiques aux questions d'ingénierie se tiennent à Eilat). En effet, pour parvenir à des enveloppes ré-assemblables incluant une définition des interfaces, il faut finaliser le *layout* ; or pour finaliser le *layout*, il faut étudier les supports et les stratégies d'installation ; et pour les étudier, il faut connaître les interfaces (en particulier avec l'aimant toroïdal barrel, TB) ; donc il faut des enveloppes. Le cercle vicieux ne peut être rompu que si le projet des muons non seulement diffuse (ce qui était tout de même à peu près le cas) une version provisoire de son *layout* sans chercher à le perfectionner, mais surtout s'il accepte d'en partager l'élaboration avec la TC et de la confronter à titre provisoire avec une version des enveloppes de ses voisins. En retour, la TC doit accompagner l'effort en acceptant de travailler sur des données instables par nature, sans exiger qu'elles soient suffisamment stabilisées.

La bonne volonté est pourtant présente des deux côtés : « *We are trying hard to stabilize the layout as quickly as possible and it is first of all the muon system itself who suffers from things not yet being frozen* » [223], écrivait Jörg, auquel Bertrand répondait : « *I have no doubt that you do your best in order to stabilise the layout. Bet[ter] than your best would be*

221. « Nous ne pouvons mettre les choses sur les dessins que lorsqu'elles sont assez stables ». *Travel report*, p. 5.

222. « Les dimensions des chambres ne vont pas changer. » *Travel report*, p. 7, § « *PC plenary meeting* ».

223. « Nous travaillons dur pour stabiliser le layout aussi vite que possible et c'est en tout premier lieu le système des muons lui-même qui souffre du fait que les choses ne soient pas gelées. » Jörg, courriel à Bertrand, 25.01.1999.

that this be done in close collaboration with TC. » [224] L'acrimonie monte cependant au fil des mois. En effet, le *layout* présenté par l'équipe des muons persiste à montrer des zones intervalles de quelques millimètres seulement. Ce *layout* est d'ailleurs contesté en interne du projet des muons : un physicien américain, peut-être plus réaliste, réclame une marge de vingt millimètres quand le *layout* en propose seulement deux [225]. Un physicien autrichien réclame que la question de l'accessibilité soit considérée, quand Jörg affirme : « *this is not important* » [226].

(Une année plus tard, il est amusant de constater que le débat en interne de la collaboration des muons sera resté vif. À un fabricant de chambre qui déclarait : « *the sliding clearance for the BOS chambers will be about 4 mm. Still we consider leaving out tubes the better solution* », un physicien répliquait vertement : « *pushing this kind of reasoning a little further, we might notice that leaving out all the tubes would definitely solve all installation problems !!!* » [227])

Et puis la question de la circulation des informations, lancinante, ressort régulièrement. Des changements sont effectués, par exemple sur la position des rails support de chambres, entraînant un déplacement des barres servant à l'alignement des détecteurs. Mais ces changements de position entraînent une réduction de l'espace réservé pour les services. Or, comme les enveloppes ne sont pas approuvées, ces réservations ne sont pas considérées comme étant définitives, et sont donc annexées à l'enveloppe potentielle des muons [228]. Le responsable élude d'un laconique « *we will find a solution* », s'appropriant ainsi de manière exclusive à la fois le problème et la recherche de solutions, de la même façon qu'il s'approprie l'ensemble du volume supposé disponible. Or, c'est en principe le rôle, la mission et la responsabilité de la TC d'assurer la recherche de solutions en tenant compte de l'ensemble des contraintes, et non pas seulement des seuls critères d'optimisation d'un seul système. L'opposition est inévitable, et la conclusion s'impose : à des problèmes globaux mais non perçus comme tels, une recherche de solutions locales ne suffira pas.

> *Chambers working individually are not chambers working in position as a whole system. Engineers [in charge of chamber productions] assume that integration problems are covered, and commit themselves only in production. They are sometimes even not aware of the questions of access, supports, integration, services, …* [229]

Mes notes de terrain sont encore plus nettes : « *Redéfinition de l'objectif du projet à refaire : il ne s'agit pas seulement de fabriquer des chambres, mais aussi de s'assurer qu'elles s'installent, fonctionnent et sont maintenables en place. Et on va lancer les enveloppes !* » Pas si simple cependant… Un mois à peine avant le *Workshop* d'Eilat, le 18 octobre 1999 exactement, était survenue une nouvelle donne. Elle va offrir l'occasion aux équipes de tenter de dépasser leurs oppositions et d'approfondir la mutuelle compréhension de leurs contraintes respectives : l'équipe en charge de la conception de l'aimant toroïdal (TB) demande que la dimension des lattes soit revue, afin de garantir le bon fonctionnement de l'aimant. Dans la dynamique de la "crise d'Eilat", c'est la "crise des lattes" qui s'ouvre.

224. « Je n'ai aucun doute que tu fais de ton mieux pour stabiliser le *layout*. Mieux que ton mieux, ce serait que ce soit fait en étroite collaboration avec la TC. » Bertrand, courriel à Jörg, 25.01.1999.

225. *Travel report*, p. 5, § « *Muon layout meeting* ».

226. *Travel report* p. 6, § « *Access and connections* ».

227. Marc V. , courriel circulaire, 12 octobre 2000.

228. *Travel report*, p. 7,§ « *Informal discussions* ».

229. « Des chambres fonctionnant individuellement ne sont pas des chambres qui fonctionnent en situation dans un système global. Les ingénieurs [en charge de la production des chambres] supposent que les problèmes d'intégration sont résolus, et ils s'impliquent uniquement dans la production. Ils ne sont parfois même pas au courant des questions d'accès, de supportages, d'intégration, de services, …». *Travel report*, p. 8, § « *Integration of muons and relationship with TC* ».

Cette crise fait l'objet d'un chapitre en soi, le chapitre 6 : nous y plongerons dans les détails techniques et relationnels d'une négociation spécifique autour d'un sujet bien précis : la taille et la position des lattes du toroïde. Ce cas nous donnera une vision plus détaillée de l'activité d'intégration au quotidien, et montrera à nouveau l'intrication complexe entre les questions techniques, scientifiques, organisationnelles et dans leur évolution temporelle, questions correspondant peu ou prou aux quatre catégories systémiques au sens de Le Moigne [1990] que nous avons mobilisées au chapitre 2 : fonctionnel, téléologique, ontologique et génétique.

5.7 Réorganisations stratégiques

La survenue fin 1999 de cette crise des lattes n'a fait qu'accentuer un mouvement qui était déjà à l'œuvre dans la crise d'Eilat, et même bien avant, dès 1998 : les difficultés à élaborer les enveloppes des muons, et plus généralement à établir une collaboration efficace et fructueuse entre le système du spectromètre à muons et la Coordination technique, sont perçues comme révélatrices d'un dysfonctionnement stratégique. Elles vont donc conduire à une redéfinition progressive de l'organisation même de la Coordination technique. Il nous paraît important, pour conclure notre propos sur le cas de ce chapitre 5, de souligner comment les difficultés de déploiement d'un outil de gestion des espaces, les enveloppes, entraînent la refonte du contexte organisationnel dans lequel il est amené à être exploité.

Cette réorganisation se fait en deux temps : une évolution des relations entre la TC et la collaboration des muons, dans un premier temps ; puis une refonte complète du fonctionnement de la TC lié au changement de coordinateur technique au printemps 2001 [230].

5.7.1 Des relations révisées entre système des muons et Coordination technique

Dans le droit fil des discussions et des difficultés rencontrées à Eilat sur l'approbation des enveloppes et la prise en compte des contraintes d'ingénierie, une révision des relations s'impose. En effet, comme le synthétise le coordinateur technique, la problématique de cette intégration est cruciale pour la réussite de l'ensemble du projet : « *The muon system is special w.r.t. the other ATLAS subsystems in the sense that it encloses all other subdetectors and thus all services of those have to pass through the muon system.* » [231]

Dès février 2000, Mark, l'un des ingénieurs de la TC propose un nouveau schéma de collaboration, qui est discuté avec les principaux protagonistes à plusieurs reprises, et en particulier dans une réunion mi-mars dont un très instructif compte-rendu est disponible [232]. La révision proposée met en avant « *la responsabilité de la TC de s'assurer de l'assemblage, que chaque élément rentre (“* fit together *”)* », en transférant les activités d'intégration du spectromètre à muons à la TC, un « *exercice d'ingénierie distinct des aspects de physique* ». La nouvelle organisation mettrait en avant les questions techniques, dans l'objectif « *de réaliser une intégration d'ingénierie et d'améliorer le degré de formalisation.* »

230. Au chapitre 12, nous reviendrons sur l'interprétation de [Marchand et Margery 2009] de la « *transition vers la discipline de projet* ».

231. « Le système des muons est particulier par rapport aux autres sous-systèmes d'ATLAS, en ce sens qu'il enoure tous les autres sous-détecteurs et que donc tous leurs services doivent passer à travers le système des muons ». M. Price, « *Future collaboration between TC and muon system* », in *Minutes of Muon Layout Meeting, avril 2000*.

232. Bertrand, *Discussions à propos du « TC/Muon share of work », compte-rendu interne*, 13 mars 2000. Toutes les citations suivantes sont extraites de ce compte-rendu.

Le système des muons est très défavorable à ce que les aspects de physique soient considérés comme secondaires, et insiste : « *toute solution élaborée doit être excellente pour la TC et aussi en même temps excellente pour les mu.* » Francesco, l'ingénieur projet des muons est plus mesuré : il « *oppose la "TC (engineering) approach" (à laquelle il adhère, quoique étant côté muon) à la "physicists' approach", qu'il qualifie de "théorique"* ». Il soutient que « *la collaboration des muons doit admettre de faire des compromis.* » Il existe des cas où une concession du système, coûteuse pour les muons, l'est bien moins qu'une solution au niveau global qui l'épargnerait. « *Quid s'il s'agit d'économiser dix fois plus au total ?* » La recherche de l'équilibre entre l'intérêt individuel d'un système vis-à-vis de l'intérêt global de l'ensemble du projet ATLAS est bien délicate, tout comme les compromis techniques (sur le plan fonctionnel) qu'il faut envisager au détriment de la performance (sur le plan téléologique).

La discussion porte beaucoup sur la « *reporting line* » de la nouvelle équipe « *muon integration* » : d'abord au *muon management*, ou bien d'abord à la TC ? ou bien à un seul des deux ? ou encore aux deux à la fois en parallèle ? Il convient de ne pas être trop radical : « l*e fait que le* muon management *ne puisse pas approuver seul l'action de la* muon integration *n'implique pas que le* muon management *doit être écarté de cette approbation : il s'agit de l'effectuer dans un cadre paritaire* », prône le responsable de l'intégration globale d'ATLAS. Cette proposition de « *cadre paritaire* » que je faisais alors n'a pas abouti à une solution concrète, bien qu'elle ait été en phase avec la position d'un responsable des muons qui affirmait que « *la méthode du "*common understanding*" est le seul moyen raisonnable de résolution des problèmes* ». C'est cette proposition que je reprendrai et mettrai en pratique dans la partie IV.

Un autre aspect intéressant de cette discussion porte sur l'art de l'influence dans sa dimension de « *négociation créatrice* » [Midler 2004, 80]. La TC se plaint en effet de ne pas avoir de pouvoir sur le système des muons, comme nous l'avons rapporté dans la section précédente. Or, on semble assister à un combat de "managements sans pouvoir". Giora, le chef de projet des muons s'interroge ainsi « *sur sa capacité à pouvoir endosser une décision à ce niveau [de la TC], et insiste qu'il doit convaincre la collaboration de modifier ses lignes de production, quand cela risque éventuellement de mener à devoir dépenser plus.* » Contestant la validité d'un lieu de décision qui serait le TCSG et s'imposerait à la collaboration des muons, il en appelle même à des arguments formels se rapportant au fonctionnement de la Collaboration ATLAS dans son ensemble : « *[pour le projet des muons], le "*decision taking body*" unique est l'*Institute Board*. En cela, il souligne le parallèle avec ATLAS en général : le porte-parole de la Collaboration ATLAS s'en remet au* Collaboration Board*.* » Seule la négociation permet de convaincre les instituts qui sont parties prenantes de la Collaboration, car ils ne sont en effet liés que par un simple *Memorandum of Understanding* (voir le chapitre 2). « *GM [le chef du projet des muons] rappelle que le Muon management n'a pas de pouvoir, et qu'il a besoin de leviers pour convaincre les gens (de la collaboration).* » En fait, en étant privé de la responsabilité de l'intégration des muons, le management craint visiblement de perdre le contrôle du *layout* et de se retrouver sans armes face aux instituts s'il s'agit de leur imposer des décisions venant de la Coordination technique.

La discussion révèle une véritable controverse sur les rôles respectifs de la Coordination technique d'ATLAS et du système des muons. Elle constitue une sorte de continuation par d'autres moyens de la controverse [233] sur les frontières et voisins : la TC estime que c'est elle qui « *est habilitée à discuter et régler les problèmes d'intégration avec les voisins, et non (comme par le passé) les mu directement* », et souhaite « *procéder à la collecte d'informations de manière radicalement différente, en contact direct avec la collaboration [des muons]* ». À l'inverse, le management du système des

233. Nous l'étudierons au chapitre 6 (§ 6.6 p. 172).

muons estime que c'est son rôle d'assurer l'intégration de son propre système, de gérer les relations avec les membres de sa propre collaboration, et de s'adresser directement à ses voisins pour régler ses conflits frontaliers. Au chapitre 6, nous verrons comment se sont déployées les négociations dans le cas des lattes, illustrant ainsi le rôle possible de la Coordination technique, et les tensions qui se sont formées autour de ce rôle.

C'est toute la question du rôle et des moyens de la coordination technique pour mener à bien ses missions et ses responsabilités qui est posée par ce débat. Nous sommes pris dans la fractalité de l'organisation de la Collaboration, qui en fait à la fois la force et la faiblesse. Nous verrons au chapitre 12 comment cette particularité organisationnelle, mieux incorporée à un fonctionnement de la Coordination technique plus adapté, a constitué l'un des atouts de la Collaboration dans son ensemble au cours des phases ultérieures du projet. Pour cela, il nous faut auparavant évoquer la deuxième phase de réorganisation de la Coordination technique.

Juste avant cela, concluons brièvement sur la fin de la révision des relations entre muons et TC. En avril 2000, le coordinateur technique annonce le cadre de la future collaboration :

> *Integration aspects become now the major issue. We are going through a transition phase going from the conceptual stage to the realization of the various projects and that therefore a stronger involvement of engineers is required. Technical coordination will help with the integration aspects of the muon chambers into the overall ATLAS system.* [234]

La nouvelle organisation est ainsi mise en place sans délai, et se superpose au cadre du *Muon Layout Meeting*, devenu plus informel mais néanmoins essentiel du point de vue de l'appréciation des performances. Fin 2000, le dernier *layout* est diffusé, et la main passe à la TC.

5.7.2 La nouvelle organisation de la Coordination technique

La transition vers une Coordination technique au pouvoir affermi se poursuit avec la mise en place d'une nouvelle organisation en mars 2001, date de l'entrée en fonction de Marzio Nessi. La nouvelle équipe propose, dans un document [235] discuté au sein de la Collaboration dès juillet 2000 (donc immédiatement dans la foulée de la précédente révision), de revisiter non pas la mission et la fonction des sous-systèmes, mais la manière dont ils interagissent entre eux et avec la Coordination technique, ainsi que les mécanismes et les processus de prise de décision.

Le document propose la mise en place d'un TMB, le *Technical Management Board*, qui remplace le TCSG. Cet organe est un « *outil de management* » destiné à soutenir le management d'ATLAS dans la conduite et l'exécution de tous les aspects techniques du projet. Il a l'autorité de prendre les décisions techniques, qui sont ensuite rapportées à l'*Executive Board*. Selon les termes du document, « *for all technical aspects in the construction this new board will be the only one able to steer the work, monitor problems and progress and act with corrective actions* » [236]. Le changement de ton par rapport aux discussions précédentes est très net, en particulier concernant les relations entre la TC et les sous-systèmes, même si une certaine prudence est de

234. « Les aspects d'intégration sont devenus la question majeure. Nous traversons une phase de transition entre l'étape de conception et la réalisation des différents projets, ce qui exige une implication plus forte des ingénieurs. La Coordination technique va contribuer aux aspects de l'intégration des chambres à muons dans le système ATLAS global ». Mike Price, in *Minutes of Muon Layout Meeting*, avril 2000.

235. M. Nessi, D. Lissauer, *Technical Co-ordination organization proposal*, 27 juillet 2000.

236. « Pour tous les aspects techniques de la construction, ce nouveau comité sera le seul à être en mesure de piloter le travail, de contrôler les problèmes et les progrès, et d'agir avec des actions correctives. »

mise : « *The (sub)systems need to accept the oversight role of the Technical Coordination. This has been discussed in some of the ATLAS management meetings with the (sub)systems but we feel that this is still not universally accepted in the experiment.* » [237]

Il sort du cadre de la présente étude d'approfondir la suite de la transition. L'objet de cette section était de montrer comment le cas présenté ici, et la crise de la non-convergence du processus d'approbation des enveloppes, a sans doute servi de déclencheur à la prise de conscience des difficultés de la TC de remplir sa mission. Je n'irai pas jusqu'à affirmer qu'elle a déclenché la nouvelle organisation de la TC. Je suis néanmoins certain qu'elle a nourri la réflexion sur la révision des relations entre TC et système des muons, laquelle a inspiré la nouvelle organisation, en une évolution progressive. C'est ainsi, comme nous l'avons souligné, que l'outil de management des enveloppes, développé dans un contexte organisationnel, a en fait induit l'évolution dudit contexte organisationnel pour permettre son propre fonctionnement.

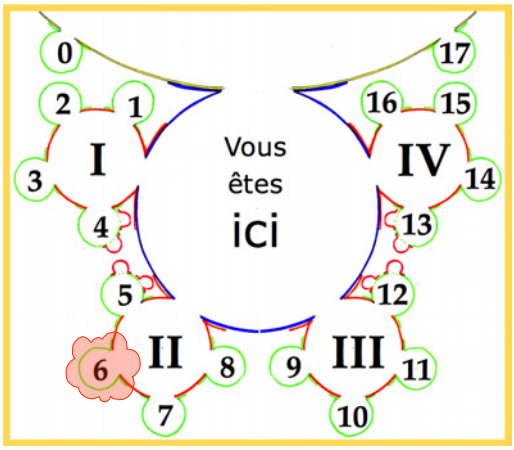
∴

Si mon expérience de manageur technique en charge des enveloppes et de l'intégration mécanique a nourri cette réflexion sur le rôle de la Coordination technique au sein de la Collaboration ATLAS, elle a en retour été grandement nourrie de cette réflexion. Elle a contribué à forger les concepts que je défends ici, que ce soit sur le processus d'intégration (et la fonction des enveloppes dans ce processus), sur le rôle que doit jouer un manageur technique et une Coordination technique, et sur les relations complexes et dynamiques qui se tissent entre ces différents niveaux, jusqu'au niveau stratégique le plus élevé. C'est une des caractéristiques du manageur technique tel que je le conçois que de devoir sans cesse s'interroger sur le contexte de son action, s'y adapter et l'adapter (voir le chapitre 9, § 9.2 p. 265), et de privilégier l'intérêt du système dans lequel il évolue à son intérêt propre : le manageur technique complexe n'est pas un "gêne égoïste" [238], et il cherche à inciter chaque acteur de projet à acquérir cette vue d'ensemble, seule à même de permettre à chaque partie de se situer dynamiquement dans le tout. N'est-ce pas au reste le but même de la gestion d'espaces ?

L'intégration géométrique serait-elle alors comme une métaphore du management technique ? Pour donner des éléments de réponse à cette question, nous allons étudier avec davantage de détails une opération concrète de négociation autour des espaces : la crise des lattes.

237. « Les (sous-)systèmes doivent accepter le rôle de supervision de la Coordination technique. Cela a été discuté dans quelques réunions de management d'ATLAS avec les (sous-)systèmes, mais nous avons le sentiment que ce n'est pas encore universellement accepté dans l'expérience. »

238. Pour faire allusion à l'ouvrage éponyme de Richard Dawkins, Oxford University Press, 1976.



Chapitre 6. Gestion d'espaces (2). Négociation de marges

Où le manageur technique utilise l'enveloppe comme outil de négociation pour résoudre des conflits frontaliers

L'espace de notre vie n'est ni continu, ni infini, ni homogène, ni isotrope. Mais sait-on précisément où il se brise, où il se courbe, où il se déconnecte et où il se rassemble ? On sent confusément des fissures, des hiatus, des points de friction. […] Nous passons d'un endroit à l'autre, d'un espace à l'autre sans songer à mesurer, à prendre en charge, à prendre en compte ces laps d'espaces.

Georges Perec [239]



Figure 6.1: Dieu, architecte de l'univers

Source : *Bible moralisée*, Codex Vindobonensis 2554, folio I verso, Paris ca. 1226–1234, Österreichische Nationalbibliothek, Vienne.

239. *Espèces d'espaces*, Galilée, [1974] 2000, *"Prière d'insérer"*.

L'on s'interrogerait volontiers, à voir l'image contenue dans le disque de la Figure 6.1, sur l'époque effective à laquelle remonte l'ensemble de Mandelbrot [240] ! La question est plutôt ici : pourquoi placer ce chapitre sous tel sceau divin. Ce n'est assurément pas pour assimiler le manageur technique à un *deus ex machina*, mais pour souligner justement toute la différence entre d'une part un Dieu tout puissant dont la Parole serait écoutée avec vénération et le Tracé scrupuleusement respecté à la lettre, et d'autre part les difficultés de notre manageur technique à faire passer le trait au bon endroit et à se faire entendre au bon moment.

Les enveloppes géométriques, outil de définition et de gestion d'espaces présenté au chapitre 5, ont été introduites de manière à allouer au mieux l'espace disponible dans la caverne d'ATLAS. Nous avons vu le processus global d'intégration mécanique dans lequel elles s'inscrivent. Afin de se faire une image encore plus précise du fonctionnement, de l'utilisation et de l'utilité de cet outil, nous allons étudier dans ce chapitre 6 le cas des lattes. Ce sera l'occasion de voir comment se définissent ces « *laps d'espaces* », pour reprendre l'astucieuse expression de Perec, en analogie avec les laps de temps bien plus familiers. Ces laps d'espaces, ce sont donc ces marges qu'il faut préserver pour assurer un montage sans (trop de) risque, ces marges que l'on peut diminuer au fur et à mesure qu'augmente le degré de fiabilité de la solution, le degré de maturité de l'information. Ces marges feront ici l'objet d'âpres discussions. Comme si ces négociations de marges étaient nécessaires pour se conserver une marge de négociation ultérieure.

Ce cas des lattes présente selon moi les caractéristiques d'un bon cas, d'un *golden case* pour ainsi dire – comme on parle de *cas en or* pour les événements de la physique des particules (voir la Figure 2.10 p. 63). En effet, le cas implique plusieurs sous-systèmes, sur une durée assez longue de plusieurs semaines, avec des problématiques qui ne sont bien entendu pas uniquement techniques, mais qui ont également trait à la fonctionnalité scientifique, lesquelles rejaillissent sur le mode de gestion et d'organisation, le tout sur un fond politique sous-jacent très particulier. On retrouve donc condensés les quatre aspects systémiques évoqués au chapitre 2 : téléologique, fonctionnelle, ontologique et génétique. Et l'on y ajoutera bien entendu le jeu des acteurs dans leurs logiques d'intérêts, les oppositions parfois assez virulentes, ainsi que le déploiement des outils et les stratégies associées d'occupation du terrain de négociation comme du terrain géométrique.

6.1 D'Eilat aux lattes (II) : feuille de route pour une résolution de conflit

Cette section constitue le cœur de l'étude de cas, à savoir la présentation du problème technique qui surgit en ce mois d'octobre 1999. Lécaille, confronté au même défi de décrire le « *problème de conception à traiter* » à propos du même cas des lattes, écrivait : « *le récit des pages suivantes, un peu "*technique*", ne vaut pas pour lui-même. Il ne vise pas à montrer que je suis devenu un "*mécanicien*"* [241] » [Lécaille 2003, 109]. Je cherche quant à moi à témoigner dans cette section de la superposition et de l'entrelacement des strates d'actions et d'échanges entre différents sous-projets, et entre différents niveaux de responsabilité, donc entre différentes sous-cultures ; et à montrer que la résolution du problème de conception est de nature complexe, liant logiques de projet, définition de produits et clarification de processus, dans

240. Ensemble fractal montrant la vitesse de divergence de l'itération d'un polynôme complexe de deuxième degré [Mandelbrot 1982].

241. En ce qui me concerne, il ne viserait pas davantage à montrer que je le suis resté…

une dynamique qui doit prendre en compte simultanément et trouver un équilibre entre les exigences fonctionnelles espérées, les solutions géométriques et mécaniques possibles, les contraintes anticipées de fabrication, d'assemblage et de fonctionnement, et les conditions imposées par le contexte de projet en terme de ressources et de délais.

Pour témoigner de cet entrelacement, il nous faut donc visiter chacune de ces strates et chacune de ces interactions. C'est pourquoi il nécessite un exposé étendu. Et avant d'observer la crise proprement dite, il convient d'apporter quelques éléments techniques à la compréhension de la situation, et de préciser les termes utilisés pour décrire les éléments de l'aimant. Nous expliciterons ensuite par quelle démarche se construit une compréhension mutuelle de la crise qui émerge fin 1999. Cette démarche permet peu à peu la construction d'une solution acceptable, différente de chacune de celles proposées initialement par les acteurs en présence. Nous mettrons ensuite en évidence les étapes du processus de formalisation et de validation de la solution, depuis le courriel informel qui déclenche la crise jusqu'à la diffusion d'une ECN, *Engineering Change Notification*.

6.2 Lattes, chambres, corridors et pieds

La région qui nous intéresse est celle de l'extrémité des bobines inférieures du toroïde barrel (pour se repérer globalement, on pourra revenir à la Figure 2.9 p. 62). Dans cette région, le nombre de composants est important, les marges sont serrées, et ces composants appartiennent à plusieurs sous-systèmes différents.

> *L'une des difficultés, abondamment évoquée par Lécaille (il en fait même le propos principal de son chapitre 4) est de trouver la bonne image « pour convaincre ».[Un tel] objet me semble être le plus adéquat pour expliquer le problème de conception auquel j'ai eu à me confronter, en espérant que le lecteur comprenne non seulement avec les mots que j'emploie mais un peu mieux avec une image.* (Lécaille 2003, 109).

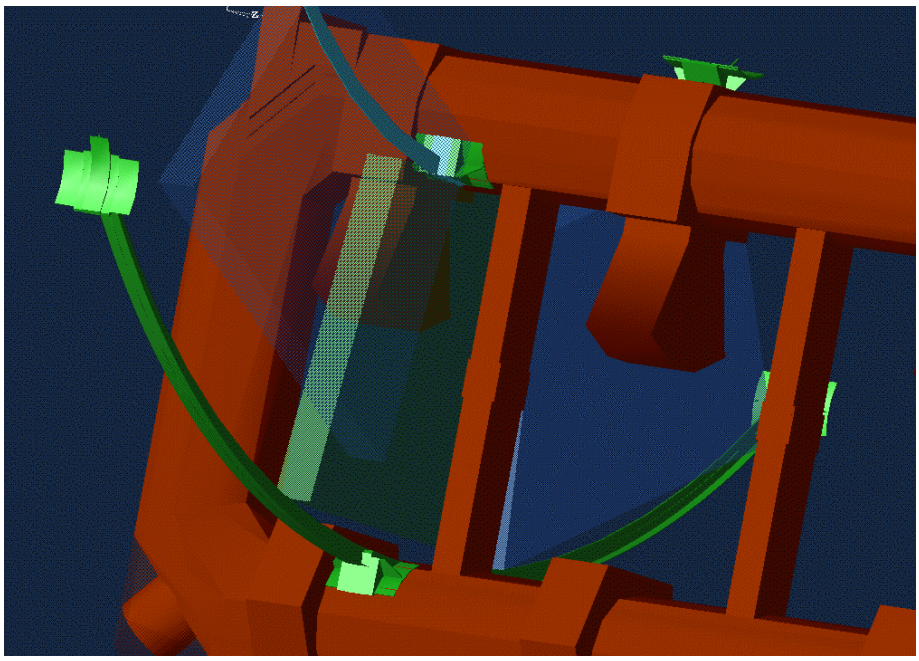


Figure 6.2 : Image 3D de la région concernée de l'extrémité des bobines toroïdales

Image produite avec le logiciel de simulation dynamique Robcad par Pascal Lécaille et Jean-Pierre, 01.2000

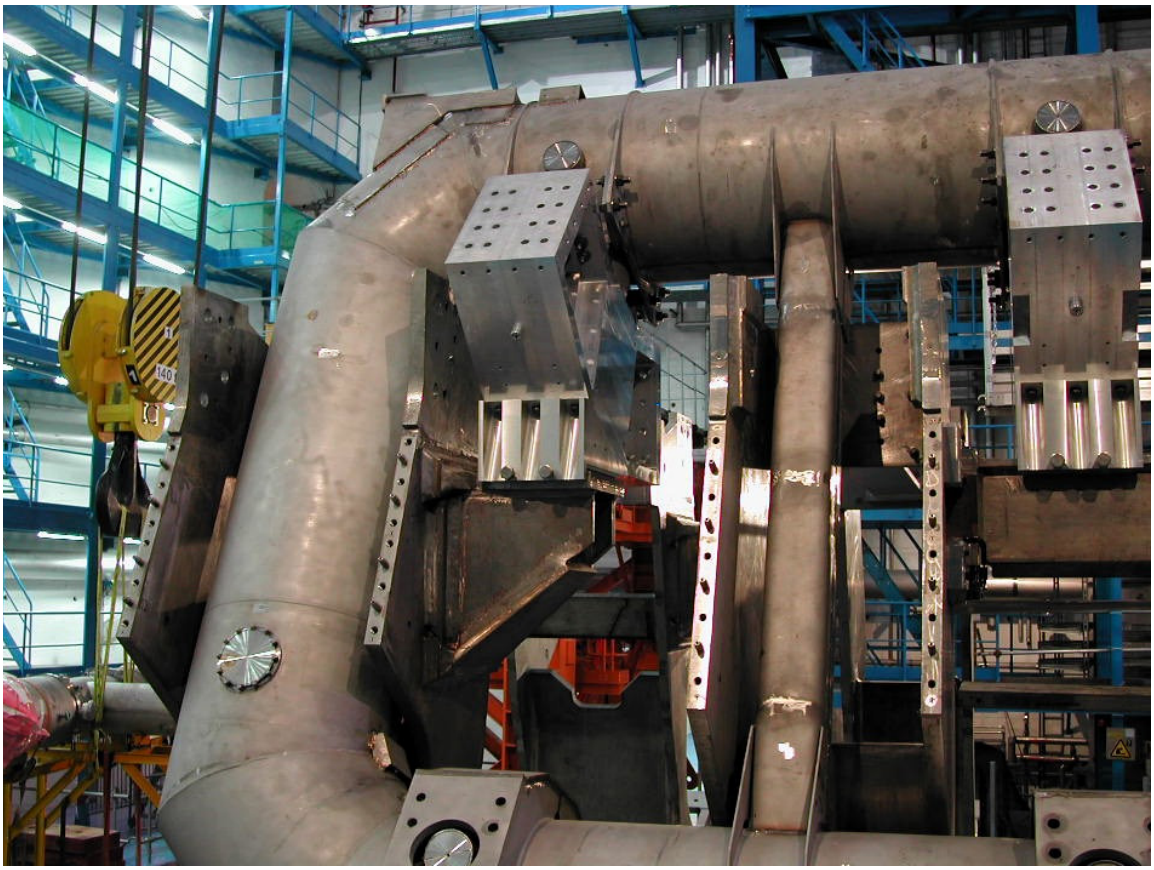


Figure 6.3 : Région de la latte n°3 après installation de la bobine du toroïde dans les pieds

Soucieux de présenter les choses au mieux, Pascal Lécaille avait choisi alors la représentation d'une modélisation 3D ; c'était sans doute aussi en raison de la fierté bien légitime qu'il l'avait produite lui-même, avec un logiciel assez compliqué de simulation dynamique, *Robcad*, lors du volet action [Lécaille et al. 2000] de sa recherche-action au bureau technique. C'est l'objet n° 16 de sa thèse, reproduit ici à la Figure 6.2, en couleur pour plus de clarté.

Écrivant ce document en 2012, soit plus de douze ans après les faits rapportés, près de neuf ans après la rédaction de la thèse de Pascal, et plus de sept ans après l'installation de la bobine dans les pieds en novembre 2004, je m'inscris dans une durée supérieure, qui me permet de produire des photographies de la région, très ultérieures à la phase de conception rapportée par Pascal. La Figure 6.3 propose donc une image

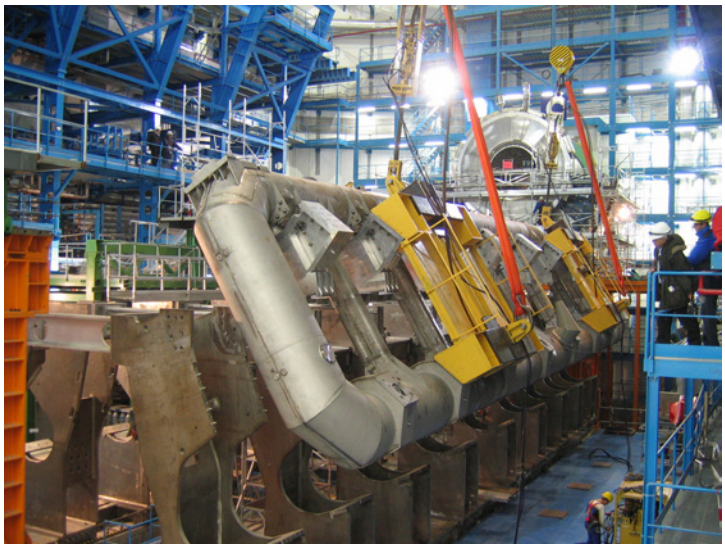


Figure 6.4 : Installation de la première bobine du toroïde dans les pieds, novembre 2004

L'opérateur en bas à droite donne une idée de la taille

réelle de la même région, dans un angle sensiblement équivalent. On y voit les pieds ouverts : les couvercles n'ont pas encore été installés, ce qui permet de bien voir les lattes. Les chambres à muons n'ont évidemment pas encore été mises en place, puisqu'à cette date, seule la toute première bobine était installée.

La Figure 6.4 représente cette bobine au moment de son installation dans les pieds. La photographie permet de se rendre compte de la difficulté de la tâche : mettre en place un objet de plus de 100 tonnes et de plus de 25 m de long, avec des marges de l'ordre de quelques centimètres à peine. Pour ce qui est d'expliquer la crise des lattes proprement dite, je fais le choix d'une image 2D, reproduite à la Figure 6.5, et présentée lors de la réunion du 12 janvier 2000 pour exposer la situation après l'émergence de la crise. Son avantage est de représenter presque tous les éléments impliqués (à l'exception des corridors d'alignement). Elle est complétée par l'image 3D de la Figure 6.2, les photos et le schéma de la Figure 6.6. Le point d'interaction, hors du champ de ce dessin, se situerait en haut à droite.

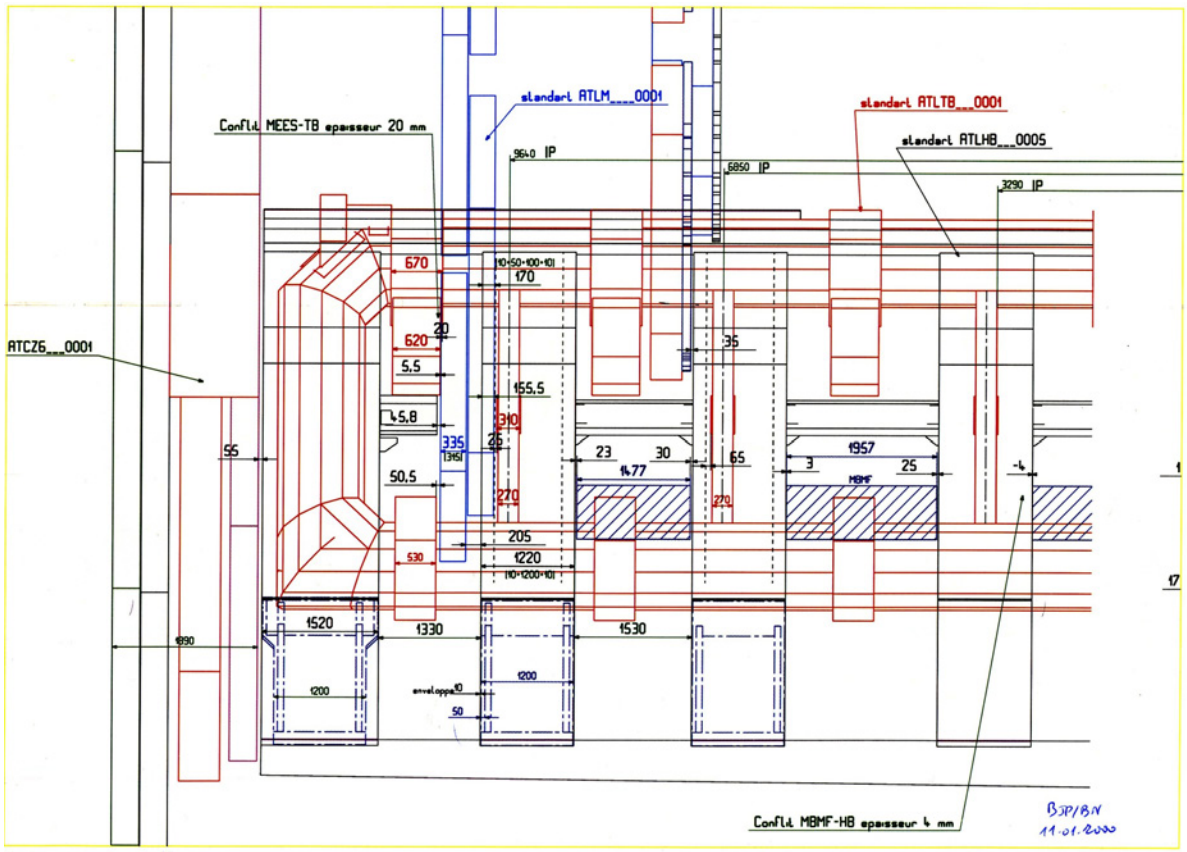


Figure 6.5 : Dessin de la région de la bobine inférieure, moitié gauche, d'ATLAS

Plan Euclid AT712480PL, Bernard JP, décembre 1999

Détaillons les éléments de la Figure 6.6. Ce sont, par ordre de taille décroissante : la bobine du toroïde, en rouge ; les pieds support, en jaune ; et les chambres à muons figurées en bleu, clair pour les verticales, et foncé hachuré pour les horizontales. La distance (chiffre encerclé) entre la boîte de connexion et la chambre verticale est de 20 mm ; celle entre la latte et le pied est de 25 mm ; et celle entre le pied et la chambre horizontale de 23 mm. Rappelons que la longueur du toroïde est 1000 fois plus élevée, et que le problème est symétrique : les marges sont donc inférieures à 0,1 %. Chacun de ces éléments impliqués possède en outre un certain nombre de composants constitutifs internes. Nous allons les détailler un à un, jusqu'à en savoir assez pour être en mesure de saisir l'objet de la crise.

6.2.1 La bobine de l'aimant toroïdal

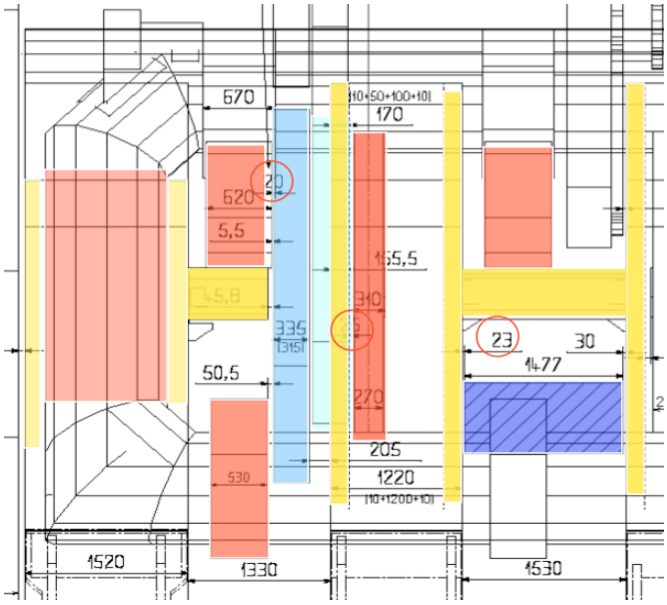


Figure 6.6 : Détail des éléments

La conception de l'aimant toroïdal est expliquée en détail dans les TDRs correspondants [242]. Nous n'en donnerons ici que quelques éléments nécessaires pour la compréhension du cas. La finalité de l'aimant toroïdal, partie dite tonneau (*barrel toroid*), est la suivante : produire un champ magnétique par circulation d'un courant électrique. C'est en fait un gigantesque électro-aimant. Compte tenu des intensités magnétiques recherchées, liées aux exigences de reconstruction des traces des particules (voir chapitre 2), les intensités électriques sont trop élevées pour que l'on puisse recourir à un conducteur traditionnel, qui fondrait en raison de la chaleur dissipée par effet Joule. Il faut donc faire appel à un matériau supraconducteur, en l'occurrence un alliage de niobium et de titane. Ce matériau doit être porté en dessous de sa température de transition résistive afin de perdre totalement toute résistance électrique. Or, cette température est de l'ordre de quelques kelvin, soit près de –270 °C. Il est donc nécessaire de placer ce conducteur dans une enceinte thermique isolante : l'enceinte à vide, constituée d'une paroi chaude (extérieure) et d'une paroi froide, entre lesquelles règne le vide.

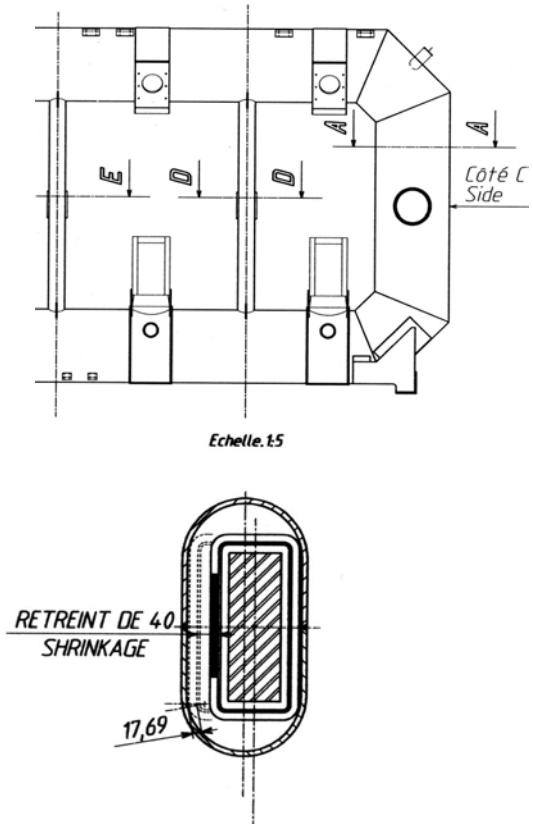


Figure 6.7: Position et coupe d'une latte

Extrait d'un dessin du CEA Saclay

L'aimant toroïdal complet est constitué de huit bobines placées à 45 ° les unes des autres (voir les figures du chapitre 2), les enceintes à vide des bobines étant reliées entre elles par des voussoirs et des étais, visibles sur la photo de la Figure 2.8 p. 60: l'enceinte à vide est le composant entouré de bandes orange, le voussoir est le composant percé de deux trous, et l'étai est la poutre

242. *ATLAS Magnet system*, Technical Design Report n°6, CERN-LHCC-97-018, 1997 ; *ATLAS Barrel toroid*, Technical Design Report n°7, CERN-LHCC-97-019, 1997.

visible tout en haut. L'ensemble de ces huit enceintes et des étais et voussoirs qui les relient constitue la structure dite chaude (autrement dit : non cryogénique, à température ambiante).

Chaque bobine est composée d'une enceinte à vide (*vacuum vessel*), de huit boîtes de connexion (*connection box)* logeant les interfaces pour les voussoirs, de sept lattes (*ribs*), ainsi que de plaques de renforts sur ces boîtes et ces lattes. À l'intérieur de chaque bobine, on trouve une deuxième enceinte à vide froide abritant le conducteur (*coil*), lui-même enroulé dans une boîte en aluminium, la boîte à bobine (*coil casing*). Cette énorme masse, de 22 m de long est reliée à la structure dite chaude par huit biellettes (*rods*) : fabriquées en alliage de titane, elles transmettent le poids de la masse froide (environ 80 tonnes) tout en assurant la transition chaud / froid, et elles encaissent le "rétreint" (*shrinkage*) de la boîte à bobine, c'est-à-dire sa contraction thermique lors de sa mise à froid, en offrant un degré de liberté en rotation au niveau des boîtes à biellettes. Ce rétreint atteint une valeur proche de 200 mm pour l'ensemble de la boîte.

Ce dernier point est très important pour le cas qui nous intéresse : la latte (*rib*), cette poutre qui relie la partie inférieure et la partie supérieure de la bobine (Figure 6.7), est solidaire de la masse froide, c'est elle qui évite l'implosion de la bobine sous l'effet des forces considérables qui sont induites par le champ magnétique sur le conducteur lui-même. Cette latte est entourée d'une enceinte chaude (*vessel tube*). On peut se représenter ces deux éléments sur la coupe D-D du dessin reproduit à la Figure 6.7. Il faut donc laisser suffisamment de marge entre la section de la latte froide et la paroi chaude pour que le mouvement dû à la dilatation différentielle (figuré en traitillés sur le dessin) puisse s'effectuer librement – sans oublier la place pour l'isolant.

C'est de là que partira la crise.

6.2.2 Les pieds

Leur étude sera approfondie au chapitre 7, auquel nous renvoyons pour les détails. La Figure 7.4 p. 192, reproduite également dans [Boisot et al. 2011] *(plate 12)* donne une vue d'ensemble du système des Pieds et rails. On y voit clairement tous les éléments qui nous intéressent ici : une paire de pieds d'extrémité ainsi que des pieds standards, tous constitués d'une base et d'un couvercle ; des voussoirs (semblables à ceux du toroïde) ; et des poutres entre pieds, supportant les boîtes à biellettes. On notera que les poutres relient un pied standard à un autre, tandis que la poutre supportée par le pied d'extrémité est en porte-à-faux, afin de laisser la place pour le mur de chambres à muon verticales MEES (voir-ci-dessous) [243].

Il suffit de savoir, pour comprendre l'enjeu de conception du présent cas, que les pieds sont constitués de plaques d'acier inoxydable de 80 mm à 100 mm d'épaisseur, soudées entre elles.

6.2.3 Le spectromètre à muons

Dans le cas qui nous concerne, trois éléments sont impliqués : les chambres verticales dites MEE, les chambres horizontales MBM, et le système d'alignement.

243. La crise rapportée au chapitre 7 détaille abondamment cette question de supportage des boîtes à biellettes (voir en particulier le § 7.4 p. 196), nous n'anticiperons pas davantage pour l'instant.

Les chambres MEE sont des chambres de précision de mesure des traces, de type MDT (*Monitored Drift Tubes*). Elles sont en forme de trapèze et fabriquées à base de tubes en aluminium collés. Ce sont elles qui sont représentées ombrées sur la Figure 6.2. Au nombre de seize, elles sont de deux types : grandes MEEL (L, *large*) et petites MEES (S, *short*). C'est ce qui est explicité sur la Figure 6.8 (une vue de bout du dessin de la Figure 6.5). Le plan dans lequel les chambres MEES sont installées est donc décalé vis-à-vis de celui des chambres MEEL.

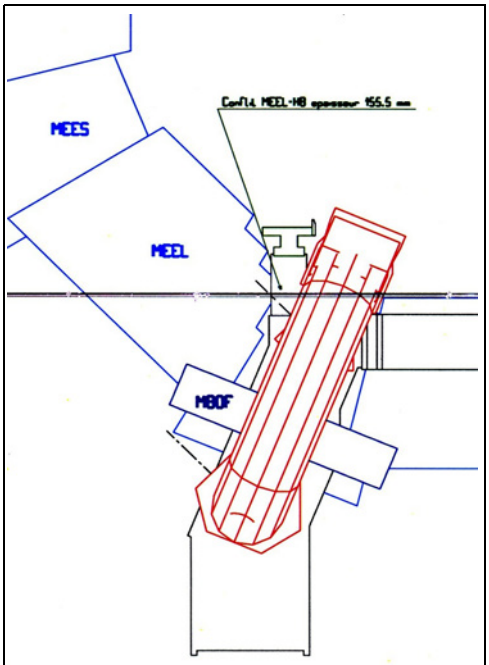


Figure 6.8 : Position des chambres à muon MEE par rapport aux pieds

Plan Euclid AT712480PL

Quant aux chambres MBM, elles sont également de deux types : les chambres MBMS (dites courtes) placées entre les lattes ; et les chambres spéciales MBMF (F comme *foot ;* noter que l'indication sur le dessin est erronée) installées entre les pieds. Ces deux types sont constitués d'un sandwich d'une chambre de précision du même type MDT que les chambre MEE, et d'une chambre de déclenchement de type RPC.

Le troisième composant du spectromètre à muons qui intervient dans le cas des lattes est le système d'alignement. Il est constitué de corridors d'alignement (*alignment paths*) permettant le repérage optique de la position respective des chambres entre elles. Ces corridors doivent évidemment rester libres pour autoriser le passage des faisceaux lumineux. Ils constituent donc des zones d'exclusion pour tout objet matériel, que ce soit un élément de détecteur, un support ou un passage de service.

6.3 Une contrainte technique : « *We MUST increase the size* » [244]

En octobre 1999, l'équipe en charge de la conception de la bobine prépare le lancement en production de la bobine prototype. Une revue détaillée sur les marges à l'intérieur des enceintes à vide conduit le chef du projet des aimants à demander. le 18 octobre, davantage de marge.

> *We have at a few locations only 0 to few mm which is not acceptable for a 25 m object. Thermal contact between the vessel and the cold mass would be a disaster for the assembly and moreover the system will not work. So it is everybody's interest to have a realistic and safe margins on the clearances. It is still possible that we keep the diameter of the main vessel […]. However, this is certainly NOT the case for the vessel tubes around the ribs. So in any case we MUST increase the size. I (and I hope you too) want to see a safe 20 mm clearance.* [245]

244. « Nous DEVONS augmenter la taille ».

245. « Nous avons en un petit nombre d'endroits seulement 0 à peu de mm ce qui n'est pas acceptable pour un objet de 25 m. Un contact thermique entre l'enceinte et la masse froide serait un désastre pour l'assemblage et surtout, le système ne fonctionnerait pas. Il est donc de l'intérêt de tout le monde d'avoir des marges de sécurité réalistes sur les jeux. Il nous est encore possible de conserver le diamètre de l'enceinte principale […]. Toutefois, ce ne sera certainement PAS le cas pour les tubes d'enceintes autour des lattes. Donc dans tous les cas nous DEVONS augmenter la taille. Je veux (et j'espère que vous aussi) voir un jeu de sécurité de 20 mm. » Herman, courriel à Jörg, Giora et Robert, *Clearances in BT vac vessel*, 18.10.1999.

Au vu de la coupe du dessin de la Figure 6.7, on se rend bien compte du problème soulevé : à froid comme à chaud, la latte touche presque le tube d'enceinte. Le projeteur en charge des muons, ainsi saisi de la demande de modification [246], dresse un état des lieux. Cet état de la « *situation actuelle* » prend la forme d'un dessin [247] dont un détail est reproduit à la Figure 6.9, il ne prend en compte à ce stade que les chambres principales et le toroïde.

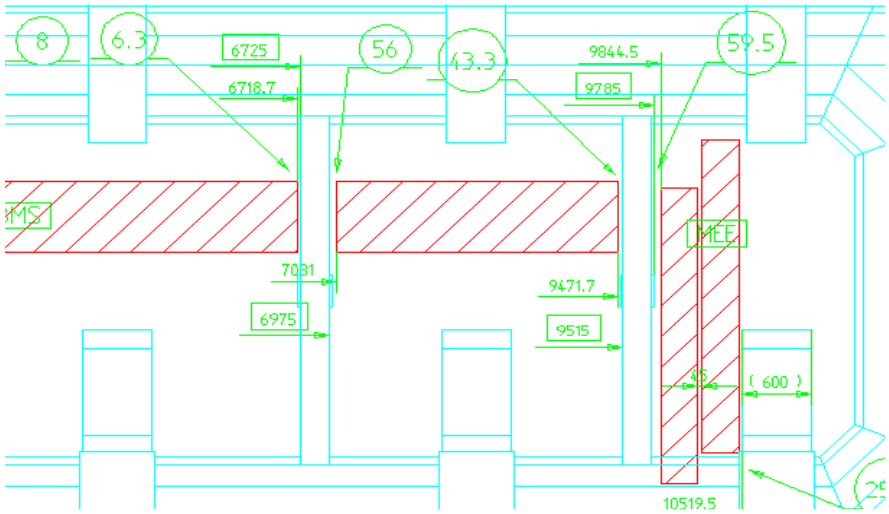


Figure 6.9: L'état des lieux selon l'équipe du *layout* des muons

Document Euclid AT641137PL, Robert, 19.10.1999

Le dessin est envoyé à l'ingénieur en charge des pieds le 20 octobre, qui demande son avis à l'un des projeteurs du Bureau technique travaillant entre autres sur le supportage des chambres. La réponse cingle :

> *Un gap à 6.3 mm est toujours à mon sens un poil incongru, vu qu'on peut au moins « l'arrondir » au plus près, soit zéro… en étant optimiste…* [248]

L'ingénieur en charge des pieds étant également en charge de l'intégration, partage évidemment ce point de vue que les marges sont beaucoup trop étroites. Il réagit donc au message initial pour sensibiliser les autres parties prenantes (aimant, muon et Coordination technique) à la nécessité d'une approche globale : « *This deserves a dedicated study with all people involved, and might lead to non-minor changes* [249] ». Il rappelle que l'enveloppe du toroïde [250] a été gelée et approuvée depuis plusieurs mois, ce dont témoigne le tableau de bord des enveloppes (Figure 5.5 p. 128), après une analyse poussée de la région effectuée en janvier 1998 avec l'équipe du toroïde et celle des muons [251]. La dimension nominale des lattes était alors fixée à 300 mm [252], mais la mise à jour des documents ne suit pas toujours.

246. Nous analyserons au § 6.5 les circuits formels et informels empruntés par cette demande.

247. Robert, dessin AT641137PL du 19.10.1999.

248. Jean-Pierre, courriel à Bertrand, 21 octobre 1999.

249. « Cela mérite d'y consacrer une étude spécifique avec toutes les personnes impliquées, et il se pourrait qu'elle conduise à des changements non mineurs. » Bertrand, courriel à Herman *et al.*, *On the request to change the TB strut*, 20.10.1999.

250. Dessins ATLTB___0001 version AD [alors en cours d'approbation], et ATLTB___0002 version AB, approuvée le 15.02.1999.

251. *Compte rendu des réunions CERN-CEA des 29 et 30.01.1998*, Rapport CEA 9B2900R-700001098, 04.02.1998. Et *Compte rendu de la réunion sur les enveloppes du 10 février 1998*, Rapport CEA 9B2900R—700001198, 19.02.1998.

Ce quiapparaîtra lors de l'analyse ultérieure des processus formels que nous effectuerons au § 6.5, c'est qu'une ECR [253] (ATL-TC-EC-0008) avait été créée dès février 1998 [254] par Jörg, le responsable du *layout* des muons, qui demandait que cette dimension passe de 300 à 240 mm afin d'améliorer la performance du spectromètre et de réduire quelques conflits mineurs entre certaines chambres et les rails support principaux. Le traitement de cette ECR fut tel [255] que, bien qu'elle n'ait pas été approuvée par la Coordination technique (et peut-être même pas traitée, je ne suis pas en mesure d'en reconstituer le traitement), elle a toutefois été implantée par l'équipe du toroïde. C'est ce qui sera pointé d'entrée de jeu dans la réunion du 12 janvier 2000 : « *Initial design was with ribs of 300 mm nominal. An ECR was issued but was never formally approved* » [256].

Cette modification non uniforme et non conforme entraîne une certaine confusion dans la compréhension de l'état des choses : parle-t-on tous de la même chose quand on parle de la taille des lattes ? Est-il question de la valeur nominale, de la valeur maximale, de la valeur enveloppe individuelle, ou bien encore de la valeur enveloppe globale ? Et pour corser le tout, la valeur de cette dimension fluctue selon les lieux et les documents ! Lors du processus d'approbation de la version AC de l'enveloppe ATLTB___0001, Jörg avait d'ailleurs déjà exprimé cette remarque en janvier 1999.

> **Rejected by user** : **JOERG W.** on 29-JAN-1999
> Comment: it should again be stressed that the envelopes for the coil ribs are numerically incompatible with the BMS muon chambers to be installed in the coil 'windows'. The coil rib width was defined to be 240mm; the concept of envelopes is misleading when defining the width of the coil windows. [257]

L'enveloppe induit-elle donc en erreur ? Cette confusion conceptuelle est-elle effective ? Le concept d'enveloppe est-il si compliqué, l'ingénieur en charge de l'intégration mécanique a-t-il négligé d'expliquer et de vérifier la compréhension de cet outil ? Y a-t-il eu des erreurs dans l'application du concept ? Ou bien, derrière une apparente complexité perçue par les muons, est-ce une réelle divergence de vues qui apparaît ? C'est une controverse qui s'ouvre, dont témoigne en termes directs l'ingénieur en charge du toroïde barrel, Pierre du CEA. Le 25 novembre 1999, il avait défini dans la première version de l'ECR [258] les paramètres qu'il souhaitait pour la taille et la position des lattes. Les muons y répondent dans un message (hélas perdu) qui fait référence à un nouveau dessin. Dans ce dessin, le *layout* est mis à jour, et les marges (*clearances*) sont calculées : « *Values in circles are clearance between BT envelope and MDT nominal dimensions* » [259].

À cela, Pierre réagit immédiatement :

252. Il est frappant, douze ans plus tard, de constater à quel point les documents ne sont pas cohérents entre eux, et combien il est difficile (la mémoire à court terme s'étant évidemment évanouie) de reconstruire le processus d'évolution des données et leur valeur effective à un moment donné. Les outils de gestion de configuration font défaut : décalages temporels, décalages de version, …

253. *Engineering Change Request*, demande de modification technique.

254. Jörg, ECR ATL-TC-EC-0008, *Modification of cryostat rib dimensions*, 17.02.1998.

255. Nous y reviendrons au § 6.5.1 p. 166.

256. « Le design initial était avec des lattes de 300 mm nominal. Une ECR a été émise, mais elle n'a jamais été approuvée formellement. » Bertrand, Présentation *ECR on TB ribs*, BN/2000002_ATLZ, 12.01.2000, p. 1.

257. « Rejeté par l'utilisateur Joerg W. le 29-JAN-1999

Commentaire : il faut à nouveau souligner que les enveloppes pour les lattes de la bobines sont incompatibles numériquement avec les chambres à muon BMS qui doivent être installées dans les “fenêtres” de la bobine. La largeur de la latte de la bobine a été définie comme devant être à 240 mm ; le concept d'enveloppes induit en erreur pour ce qui est de la définition de la largeur des fenêtres de la bobine. »

258. Antoine et Pierre, ECR ATL-TB- [N° incomplet], *Increase of the size envelope of the TB vacuum vessel around the ribs*, 25.11.1999.

> *It seems that the notion of envelope as defined in the Figure 11.2 of the TC TDR* [260] *is not the same for all sub-systems. For the vacuum vessel ribs you have required an internal clearance of 20 mm and we have also allocated 10 mm external clearances from the nominal outer dimension of the vessel to the envelope. […] For the muon system, it seems that the envelope is in fact the nominal dimension and that the clearances between the nominal dimension and the old rib envelope (250 mm) is less than 8 mm. This 8 mm must be understood, in my mind, as tolerances and internal clearances of the muon envelope. Means that the interval zone required for the mounting and the installation (and managed by TC) is not existing and may even already be negative. With the increase of the outer dimension of the vacuum vessel around the ribs, the situation is even worse and impossible to manage.* [261]

À la confusion sur les statuts s'ajoutait une confusion conceptuelle. Et voilà que Pierre relève que s'ajoute en outre une confusion sur les valeurs, sans doute induite par les deux premières :

> *On the drawing of the « Global TB envelope and location of interface – ATLTB___0001 ind D » the dimension of the rib envelope is already 270 mm for all the ribs (and 290 mm on the ind B)! […] It is time to define what are envelopes so as to play the same team game.* [262]

Il est effectivement temps fin 1999 de remettre les choses à plat. Il est temps de construire une compréhension commune autour de ces questions. Le 7 décembre, l'ingénieur en chef Gérard Bachy convoque une réunion générale pour début janvier :

> *To conclude on the various changes to be implemented on the toroid barrel in order to improve the clearance situation, I propose to held a meeting […] [which] will address in particular the implications of the planned changes on the Muon and the Feet systems.* [263]

6.4 Construire un espace d'échanges : « *play the same team game* » [264]

Les muons parlent d'acceptance ; les toroïdes, de *clearance* ; les pieds, de résistance. Et si nous adaptions les impédances ? Les projeteurs produisent des modèles géométriques ; les ingénieurs, des modèles mécaniques ; les physiciens, des modèles phénoménologiques. Et si nous partagions ces modèles ? Dans cette sous-section, nous allons voir comment les différents manageurs techniques vont parvenir à se comprendre, à construire un espace d'échanges qui leur permette d'élaborer une

259. « Les valeurs entourées sont l'espace libre entre l'enveloppe du BT [barrel toroïde] et les dimensions nominales des MDT [les chambres à muon]. » Robert, indication manuscrite sur plan AT642199PL, 01.12.1999.

260. Cette figure est la définition officielle de l'enveloppe, reproduite à la Figure 5.7 p. 131.

261. « Il semble que la notion d'enveloppe telle que définie à la Figure 11.2 du TDR de la TC ne soit pas la même pour tous les sous-systèmes. Pour les lattes de l'enceinte à vide tu as demandé un espace libre interne de 20 mm et nous avons également alloué 10 mm d'espace libre externe entre la dimension nominale extérieure de l'enceinte et l'enveloppe. […] Pour le système des muons, il semble que l'enveloppe soit en fait la dimension nominale et que l'espace libre entre la dimension nominale et l'ancienne enveloppe de la latte (250 mm) soit inférieure à 8 mm. Ces 8 mm doivent être compris, à mon sens, comme des tolérances et des marges internes à l'enveloppe des muons. Signifie que la zone intervalle requise pour l'assemblage et l'installation (et gérée par la TC) n'existe pas et pourrait même être déjà négative. Avec l'augmentation de la dimension extérieure de l'enceinte à vide autour des lattes, la situation est encore pire et impossible à gérer. » Pierre, courriel à Herman, *BT vac vessel, position of ribs*, 02.12.1999.

262. « Dans le dessin " *Global TB envelope and location of interface – ATLTB___0001 ind D* " la dimension de l'enveloppe de la latte est déjà 270 mm pour toutes les lattes (et 290 mm sur l'ind B) ! […] Il est temps de définir ce que sont les enveloppes de façon à jouer au même jeu collectif. » (*ibid.*)

263. « De manière à conclure sur les différents changements à implémenter sur le toroïde barrel pour améliorer la situation des marges, je propose une réunion […] [qui] abordera en particulier les implications des changements prévus sur les systèmes des Muons et des Pieds. » G. Bachy, courriel, *Toroid Magnet ECR*, 07.12.1999.

264. « Jouer au même sport collectif ».

solution satisfaisante au problème de la « *clearance situation* », la situation des marges : comment définir ensemble une compréhension commune de ce que sont les enveloppes, de manière à faire respirer les espaces libres juste nécessaires, ni plus ni moins. L'outil enveloppe va servir de support aux discussions, en incluant l'ensemble des paramètres avancés par chacun : perturbation du champ magnétique, risque de modification des trajectoires de particules côté physiciens, acceptance optimisée limitant la taille des lattes après qu'a été imposée en 1998 leur nombre et leur matériau ; résistance mécanique, répartition des contraintes et marges de montage côté ingénieurs, imposant une section de lattes minimales, une distance maximale entre la dernière latte et le conducteur, et des jeux suffisants tant internes qu'externes ; et enfin, coût et délais côté manageurs, imposant une décision rapide pour autoriser le lancement en fabrication de l'enceinte à vide du prototype.

Dans l'intervalle de temps entre la convocation et la réunion finalement fixée au 12 janvier 2000, chaque équipe prépare ses données, et les contacts se nouent. Je suis incapable d'en rendre l'intégralité, puisque nombreux auront été les contacts informels, pas forcément partagés entre tous, ni archivés d'aucune manière. On en voit des traces dans la correspondance [265] par exemple : les discussions entre ingénieurs vont bon train, les calculs tournent à partir de la proposition d'associer l'augmentation de la taille des lattes n° 3 (lattes les plus extérieures) à un changement de leur position. Mais cela implique des confirmations par le calcul, pour déterminer si les résistances mécaniques et les champs magnétiques sont compatibles, et des vérifications géométriques nombreuses, car les paramètres modifiés sont multiples et interconnectés. Changer un seul paramètre de jeu entre deux composants internes, c'est parfois rouvrir un dossier entier, allant jusqu'à remettre en cause l'infrastructure technique de la caverne ! La présentation [266] faite à la réunion du 12 janvier 2000 synthétise l'ensemble de ce travail de préparation.

Comment se prépare une telle réunion, dans les coulisses des bureaux d'étude ? Comment se prépare-t-on à convaincre ? C'est ce que contribue à établir la précieuse étude ethnographique déjà évoquée [Lécaille 2003]. Cette étude, en contrepoint de la nôtre, présente en particulier l'intérêt d'un regard autre sur l'action du manageur technique, jetant ainsi la lumière sur le point aveugle de l'observ'acteur. Ainsi, Pascal a relevé:

> *Pour [les] concepteurs du BE, les ingénieurs sont des "facteurs", c'est-à-dire qu'ils prennent les papiers, produits par les projeteurs, pour aller les porter hors du BE, dans des réunions. En entendant cela, Bertrand a été surpris et me répondit que c'était justement là son "*point aveugle*" : il ne pouvait effectivement pas savoir précisément comment les projeteurs se représentent l'action des ingénieurs.* [Lécaille 2003, 48]

L'élaboration progressive des documents et des images qui vont être mobilisées comme « *pièces à conviction* » se fait en effet essentiellement entre projeteurs, avec leurs problématiques d'outils de CAO, d'inscriptions grapho-numériques, de représentation et de modélisation. Elle se fait toutefois dans une perspective définie par les ingénieurs. On assiste plutôt à une dynamique constructive où chacun a besoin de l'autre, et c'est aussi ce que montre le chapitre 4 de la thèse de Pascal Lécaille. Nous nous intéressons ici au rôle du manageur technique : relevons les points saillants de la période préparatoire, à commencer par la réunion du 5 janvier 2000, qui rassemble autour de Bertrand quatre projeteurs : Bernard pour l'intégration, Olivier pour les pieds, Jean-Pierre pour l'étude d'installation des chambres à muon, et Pascal, « *l'apprenti-intégrateur* » en recherche-action.

265. Yves (CEA) et Bertrand (CERN), lettre à Gérard Bachy (ATLAS), *Réunion du 4 janvier*, 15.12.1999.

266. Bertrand, Présentation, *ECR on TB ribs*, BN/2000002_ATLZ, 12.01.2000.

> *L'objectif de cette réunion est de faire le point pour préparer la réunion encadrée par la Coordination technique en vue de décider l'ECR. Cette réunion, prévue le 12 janvier, est destinée à trouver une solution entre tous les partenaires : responsables de l'intégration du détecteur nommés ci-après les intégrateurs, équipe en charge de la conception du toroïde, équipe en charge de la conception et de l'installation des chambres à muons, et des représentants de la Coordination technique d'ATLAS. Bertrand s'intéresse de près aux conflits de la zone et aux problèmes d'installation des chambres à muons qui en découlent en fonction des différentes solutions proposées pour les modifications des lattes.* [Lécaille 2003, 111]

Bertrand a défini une stratégie qui consiste, en partant de la proposition de l'ECR initiale [267], à définir les objets impactés et les distinguer de ceux qui peuvent ne pas l'être [Lécaille 2003, 111, objet n° 17]. Il la synthétisera ensuite dans sa présentation du 12 janvier [268]. Changer la taille de la latte, analyser l'installation de la chambre MEE, faire une proposition pour la position de la latte n° 3, la plus critique, ainsi que du pied n° 3, analyser la situation autour de la latte n° 2, puis analyser les conséquences sur le *layout* des muons.

> *Ce qui ressort de nos discussions, c'est que la grande incertitude vient de l'installation des chambres dans la zone. C'est déjà une première conclusion de la réunion. Bertrand s'exclame :* « C'est pas un design de 500 kg [les chambres à muons] qui va diriger une structure de 500 tonnes [la bobine] ! » [Lécaille 2003, 114]

Comment se mobilisent les projeteurs autour de cet enjeu ? Tout d'abord Bernard, vieux briscard, travailleur acharné et passionné :

> *Bernard, qui fabrique les modèles pour l'intégration, connaît son affaire. Il arrive à cette première réunion avec un ensemble de dessins. Pour parler d'un problème ou le définir plus précisément, ces dessins se révèlent vite indispensables. Bernard a imprimé de multiples supports sous forme de plans avec cotes, le plus souvent portées à la main, afin de montrer les éléments en conflit et les impossibilités pour le montage des chambres à muons. Bertrand regarde chacune des vues et demande à Bernard de lui en fournir de plus précises, ce qu'il fera dans les jours suivants.* [Lécaille 2003, 111]

Il y a ensuite Olivier, solide mécanicien, qui apporte une contribution déterminante en améliorant subtilement la conception des pieds :

> *Nous nous retrouvons le lendemain, le 6 janvier. Olivier, qui travaille sur les "pieds", nous a amené un dessin sur lequel sont indiquées les nouvelles dimensions de cette structure, tant en nominal que pour les enveloppes (objet n° 21, page précédente [269]). Cette étape était essentielle pour pouvoir avancer sur les différentes possibilités de modification des autres pièces du détecteur. Cela était possible aussi rapidement, car l'ingénieur-projet est Bertrand et le projeteur Olivier, membre de son BE. La modification intervient dans le cadre de l'enveloppe et ne vient nullement empiéter sur les autres sous-ensembles d'ATLAS. […] Ce sera donc une décision unilatérale qui devra être confirmée.* [Lécaille 2003, 114]

Quant à Jean-Pierre, qui pilote habilement les débuts de Pascal sur ROBCAD, il prend le relais opérationnel de la décision de Bertrand : « *Les personnes présentes émettent différentes solutions et évoquent les différentes collisions qui peuvent en découler. Après une première ébauche faite oralement, Bertrand tranche :* "On contrôlera ça avec ROBCAD."» [Lécaille 2003, 117]

267. Antoine et Pierre, ECR ATL-TB- [N° incomplet], *Increase of the size envelope of the TB vacuum vessel around the ribs*, 25.11.1999.

268. Bertrand, Présentation, *ECR on TB ribs*, BN/2000002_ATLZ, 12.01.2000, p. 2.

269. Dessin AT322733PL du 06.01.2000.

> *Par une série de croquis réalisés à la main, il [Jean-Pierre] m'explique [à Pascal] le scénario qu'il entrevoit. Il cherche aussi des objets EUCLID utiles pour ce scénario, qui ne figurent pas tous nécessairement dans les "standards" (modèles CAO pour l'échange direct et coordonnés entre les projeteurs […]), les seuls modèles utilisés dans le cadre de ROBCAD et qui dans le cas d'ATLAS sont aussi des enveloppes. […] Le lendemain, Bertrand, en regardant toutes les impressions, s'intéressera plus particulièrement à une vue parce qu'elle montre les marges entre les chambres, les pieds et le rail. Et c'est particulièrement ce simple dessin qui lui permet de montrer à l'équipe des muons que leur solution retenue n'est pas valide en l'état actuel (objet n° 30)* [270]. [Lécaille 2003, 118]

Les intégrateurs doivent également obtenir les informations sur les « *voisins* ». Et c'est parfois tendu. Bien qu'ils soient installés dans le même bureau, ce grand espace ouvert du bâtiment 26, les projeteurs ont parfois du mal à communiquer. Un jour, Jean-Pierre explose : « *All we need is information !* » [271], proteste-t-il auprès de Vlad, projeteur russe de Dubna détaché au CERN pour travailler sur les supports des muons au sein du bureau technique sous la responsabilité de Robert et de Jörg. Ce cri du cœur montre combien les interactions entre systèmes sont aussi des interactions, tendant à "l'interfriction" entre les hommes.

On voit comme, au fil des jours, des raffinements, des propositions de visualisation, les problèmes émergent et se complexifient. Partis avec une taille de latte à modifier, il a fallu étudier l'installation des chambres MEE, puis réviser la géométrie des soudures des pieds pour mieux accommoder les chambres et permettre un déplacement de la latte afin d'éviter de déplacer la boîte de connexion (paramètre délicat à modifier pour l'aimant), puis enfin contester le principe de l'installation des chambres MEE par rotation, la marge de jeu au cours du mouvement se révélant négative.

> *L'outil CAO sert d'outil de simulation pour tester les différentes solutions imaginées par les intégrateurs. Les différents paramètres (positionnement des axes des lattes le long de l'axe faisceau, largeurs des lattes, épaisseur des tôles des "pieds", déplacement de l'axe d'un pied, etc.) sont inclus dans la simulation par Bernard. Il produit une quantité importante de plans 2D qui permettent de visualiser les positions de tous les éléments impliqués en fonction des différentes possibilités à tester.*
>
> *Bertrand acquiert une vision de plus en plus claire du problème sur la base des plans cotés de plus en plus précis au fil des réunions et des entrevues.* [Lécaille 2003, 119]

La complexité de l'opération d'installation de ces chambres est rendue par l'observation de la photographie représentée à la Figure 6.10. Un œil acclimaté retrouve dans ce capharnaüm apparent la paire de pieds d'extrémité (le pied de gauche est situé au centre de la photo), surmonté des rails que l'on aperçoit juste au dessus du casque blanc de l'opérateur dans la nacelle. Au-dessus est installé le toroïde d'extrémité (*end-cap toroid*), centré sur le blindage bleu. On aperçoit la bobine du secteur 14 (à l'intérieur du pied) grâce aux petites chaufferettes oranges identiques à celles du secteur 16 un peu plus haut. L'ensemble des chambres à muon de type MB a été mis en place, aligné, câblé et mis en œuvre, on les voit au premier plan à gauche, les deux opérateurs en harnais rouge et jaune se tiennent sur l'une d'entre elles. Il ne reste donc qu'une petite fenêtre pour insérer la chambre trapézoïdale MEEL et la déplacer jusqu'à sa position finale, l'une de celles qui est l'objet des discussions ce 12 janvier 2000. On comprendra sans doute un peu mieux, au vu de

270. Ce document, un peu complété, a ensuite été présenté le 12.01.2000, sous le titre « *Mise en place pied N°3 et latte N°3* », juste avant la page 8 de la présentation.

271. « La seule chose qu'il nous faut, c'est de l'information ! » Anecdote rapportée par Lécaille [2003, 139]. Inspiré du *All you need is Love* des Beatles ?

cette photo, l'importance d'anticiper plus de *neuf ans plus tôt* l'opération de manutention fine que représente cette installation.

Muni d'un certain nombre d'objets sélectionnés dans le processus de préparation et « *produits pour convaincre* », l'équipe d'intégration et des pieds est prête à alimenter la discussion avec les trois autres équipes présentes le 12 janvier : l'équipe du toroïde, celle des muons, et les responsables des projets et de la Coordination technique.

> *Le constat est mis sur la table : il y a un conflit entre une pièce de la bobine et une des chambres à muons. […] Un premier transparent est présenté, la discussion s'engage. […] Ces dessins sont destinés à confronter Jörg, le physicien en charge de l'intégration des chambres à muons, aux résultats de l'intégration. Il semble contester directement les ajouts de "marges" qui sont inclus dans l'enveloppe. Bernard souligne que Robert, dans l'intégration de toutes les chambres, n'a pas utilisé les enveloppes mais les dimensions nominales. Il y a là des points de vue différents qui se confrontent.* [Lécaille 2003, 125]

La réunion permet aux partenaires de mieux comprendre la globalité de ces problèmes d'installation, de se mettre d'accord sur les paramètres pertinents, et de définir les limites dures de variation desdits paramètres. Il reste à faire un choix de paramètres. « *The output of the meeting is that we will try to find the best solution within the domain defined by the boundaries* » [272], conclut le compte rendu, diffusé le soir même du 12.01.2000. Une liste d'actions précises est définie, portant sur l'acceptabilité de ces limites pour la conception de l'aimant (deux actions), sur l'étude approfondie des différents cas par l'intégration (une action), et de l'estimation des conséquences sur le *layout* des muons et de la précision de l'installation des chambres (quatre actions). Pascal note :

> *La réunion n'a pas permis de faire ces choix, car il fallait avant tout avoir une idée claire du problème. Il était impossible de décider de modifications importantes qui réclament une étude plus approfondie. Une seconde réunion sera nécessaire et est programmée neuf jours plus tard.* [Lécaille 2003, 126]

Qu'en est-il de la controverse sur les enveloppes ? Elle a conduit à un relâchement, à savoir que les enveloppes globales ne sont utilisées que pour les distances résiduelles avec les chambres MEE. En revanche, un compromis est trouvé sur l'utilisation des enveloppes individuelles pour les chambres MBMS et les pieds, dans la mesure où ce sont des éléments sans mouvement relatif nécessaire. Mais la question demeure sur le jeu nécessaire permettant leur alignement vis-à-vis d'une position absolue définie par le faisceau et le point d'interaction, question qui constitue le point d'achoppement principal des discussions. Quant à l'enveloppe des muons, elle reste à ce stade impossible à obtenir : les chambres à muon semblent avoir la peau dure. La semaine qui suit entraîne de nouvelles études de même nature. Nous ne les détaillons pas ici, laissant le soin à la restitution de Pascal de compléter l'histoire jusqu'à la réunion finale du 21 janvier :

> *L'équipe des chambres à muons a bien voulu envisager de couper un peu ses chambres et les déplacer légèrement, de telle façon qu'il devenait possible d'imaginer une nouvelle position de tous les éléments.* [Lécaille 2003, 127]

Au cours de cette réunion finale, on parvient à déterminer les paramètres d'un commun accord avec les parties en présence. Cette convergence est obtenue en particulier grâce au recours à une chaîne de cotes géante :

272. « Le résultat de la réunion est que nous allons essayer de trouver la meilleure solution à l'intérieur du domaine défini par les limites. » Bertrand, courriel général, *Ad-hoc TC mtg on TB ribs size and position*, 12.01.2000.

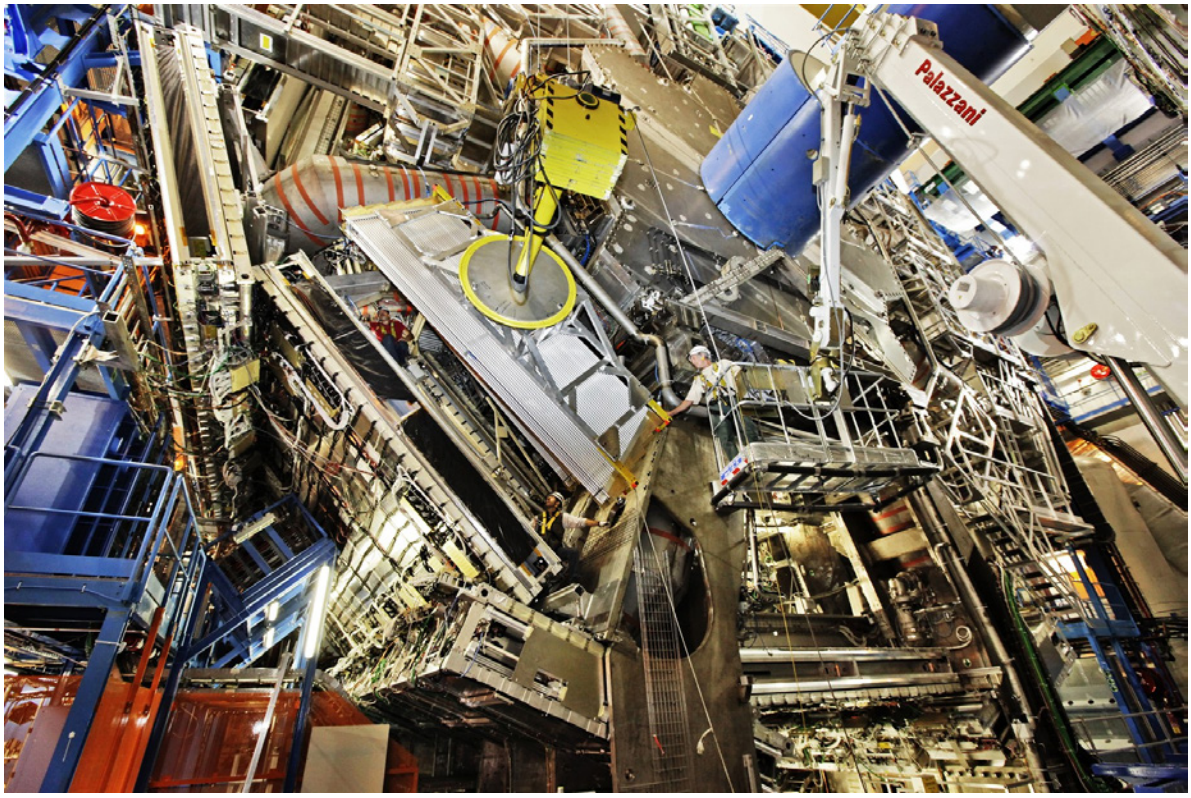


Figure 6.10 : Installation d'une chambre trapézoïdale MEES

Photo C. Marcelloni, CERN-EX-0907238_07, juillet 2009.

> *Lors de la réunion, Bertrand place les hypothèses afin de voir combien il reste d'espace entre les chambres et les lattes. L'empilage de cotes est ainsi facilité. Bertrand a fait faire un croquis clair et explicite pour ma recherche mais, avant tout, pour lui-même, pour convaincre et pour avoir un bilan des décisions.* (*idem*)

La décision finale prend partiellement en compte les corridors d'alignement, qui apparaissent peu à peu dans les dessins [273]. Les modifications (découpes locales de chambres) se poursuivront bien au-delà, mais un grand pas a été effectué : ces modifications sont des adaptations à une définition claire et communément partagée des paramètres globaux et locaux d'intégration, définition qui servira de base aux évolutions futures. En quelque sorte, une *baseline* (une configuration de référence) a été établie, plus ou moins à l'insu des protagonistes…

6.5 Formalisations des décisions

Pour conclure cette présentation détaillée d'une démarche d'intégration, et avant de tirer au § 6.6 des conclusions plus générales du cas ainsi présenté, il nous reste à rapporter la façon dont la solution a été formalisée suite aux réunions rapportées ci-dessus. Ceci nous permettra de souligner quelques dysfonctionnements (formels et informels) dans les dispositifs de gestion de configuration (les ECRs) qui étaient encore en cours de déploiement dans le cadre du projet ATLAS à l'époque.

273. Robert (CERN), dessin AT642215PL du 20.01.2000, version annotée lors la réunion du 21.01.2000. Patrick (CEA), dessin « *Alignment path* » [sans numéro], 02.02.2000.

6.5.1 La procédure des *Engineering Change Requests*

Nous avons évoqué l'ECR créée en février 1998 et dont le traitement n'avait pas été effectué de manière que son résultat soit communément partagé : selon les uns elle a été approuvée, alors que selon d'autres elle a bel et bien été rejetée, ce qui est d'ailleurs son statut dans la liste des ECR dites “closes”, reproduite à la Figure 6.11. On trouve également dans cette liste l'ECR de novembre 1999, qui porte le processus de formalisation de la crise des lattes que nous venons de décrire. C'est ce processus de gestion des ECRs que nous allons étudier maintenant.

Qu'est-ce qu'une ECR ? C'est une requête officielle demandant un changement par rapport à une *baseline*. En gestion de configuration, ces notions sont bien connues, et connaissent généralement quatre grandes phases : la requête initiale, le traitement et l'analyse, conduisant à la décision, suivie de la notification (ou de l'ordre, selon les formulations). La procédure pour ATLAS était définie dans le QAP (*Quality Assurance Plan*, Plan d'Assurance Qualité) d'ATLAS, et disponible en ligne pour les acteurs [274].

			EC-0002	EC-0005	
Toroid Barrel - Increase of the size envelope of the TB vacuum vessel	Mar 2000	P. Vedrine	ATL-TB-EC-0003		Approved
Toroid Barrel - Reduction of size of TB coils by 25mm	Nov 1999	P. Vedrine	ATL-TB-EC-0001		Approved
Toroid End Cap - Axial Disposition of TE relative to IP	Feb 1998	E. Baynham	ATL-TC-EC-0001		Approved
Toroid Barrel - Modification of cryostat rib dimensions	Feb 1998	J. Wotschack	ATL-TC-EC-0008		Rejected
Muon Chambers					
Change in the BML chamber Layout	Aug 2004	Olga BELTRAMELLO	ATC-OC-EC-0045	Layout R supersede	Rejected
Change in diameter for EIL4 support frame holes in Ring 3 of Toroid Barrel Voussoirs	Mai 2004	O.Beltramello	ATC-OC-EC-0041		Approved

Figure 6.11 : Liste des ECRs closes

http://atlas.web.cern.ch/Atlas/TCOORD/Activities/TcOffice/Quality/ECR/ecr_closed.html

Nous avons décrit la requête initiale [275] qui avait été déclenchée par la demande informelle du chef de projet des aimants [276]. Nous avons observé la phase de traitement et d'analyse, qui a conduit à une décision le 21 janvier 2000, sous la forme d'un certain nombre de valeurs pour les paramètres retenus : taille et position des lattes, impact sur les pieds, impact sur les chambres à muons. Il reste à formaliser cette décision, qui aurait pu rester à l'état de compte-rendu [277]. Il s'agit donc de faire endosser cette décision par les autorités de chacun des projets concernés. C'est l'objet de la procédure déclenchée par l'envoi du message de Kathy, en charge de la gestion des ECRs pour ATLAS aux trois chefs de projet concernés.

> *Please find as attachement the Engineering Change Request submitted by Antoine and Pierre on "Increase of the size envelope of the TB vacuum vessel arounds the ribs". Your approval or rejection and your comments must be added to the document and return to me as soon as possible.* [278]

274. Kathy, page Web, *ECR process*, [non accessible en ligne], 24.06.1999. Une version ultérieure équivalente à celle qui valait en 1999 est disponible en ligne .

http://atlas.web.cern.ch/Atlas/TCOORD/Activities/TcOffice/Quality/ECR/

275. Antoine et Pierre, ECR ATL-TB- [N° incomplet], *Increase of the size envelope of the TB vacuum vessel around the ribs*, 25.11.1999.

276. Herman, courriel à Jörg, Giora et Robert, *Clearances in BT vac vessel*, 18.10.1999.

277. Bertrand, courriel général, *TB ribs size and position: conclusions*, 21.01.2000.

Pour les muons, la procédure passe par une discussion dans les réunions habituelles, *Muon Layout Meeting* et *Muon Steering Group*. La première étape, le 7 février, se passe sans souci : Bertrand présente les résultats de la réunion du 21.01.2000, et contrairement à son attente et aux prédictions de Jörg, les producteurs des chambres impactées MBMS (que ce soit MDT ou RPC) ne protestent pas : « *Absolutely no complains on MBMS red[uction] of size !?* » [279]. Gérard, présent à cette réunion, en profite pour suggérer que la controverse soit définitivement tranchée, et que les dimensions proposées dans le *layout* soient considérées comme les frontières de l'enveloppe. Cette idée est considérée par Jörg « *to be clarified* » [280], et n'est pas même mentionnée dans les minutes, reproduites ci-dessous :

> *1.1 Toroid rib size and position changes (B. Nicquevert)*
>
> *B. Nicquevert explained the reasons for the ECR for the size and positions of the barrel coil ribs: movements and clearance between cold mass and cryostat when cooling down the barrel toroid. In addition clearance problems between the coil cryostats and the rail feet require rib#2 and rib#3 be moved towards the IP.*
>
> *In a series of meetings between TC, magnet system, and muon system an agreement was found for the new rib sizes and positions.*
>
> *The new rib dimensions in z are for rib#0-3: 240, 270, 270, 290 mm; the positions: z=0, 3490, 6760, 9540 mm. The new position of rib#3 would also provide for more space for the installation of the EE muon chambers. In this context Bertrand also addressed shortly the installation scheme for the EE chambers. Although he agrees with the scheme as proposed by V[lad] he pointed to some tight clearances and pointed out that also a radial movement of the chambers during installation is required. J[örg] said the installation of the EE chambers is planned to be discussed in more detail in the next Layout & Integration meeting in April, if possible.* [281]

Quant au *Muon Steering Group*, il approuve la décision après que les conséquences sur le système d'alignement (ci-dessous désigné RASNIK) ont été mentionnées, et que la perte en acceptance (2.5% pour les seules chambres MBMS, et beaucoup moins au total) aura été quantifiée.

> *Changes of magnet ribs and chamber layout (J[W])*
>
> *JW introduced the proposed changes of the magnet ribs and consequences for the chamber layout. TC and the Magnet Group have requested an increase in the ribs size,*

278. « Veuillez trouver ci-joint l'ECR soumise par Antoine et Pierre, intitulée "*Increase of the size envelope of the TB vacuum vessel arounds the ribs*". Votre approbation ou rejet et vos commentaires doivent être ajoutés dans le document et m'être retournés dès que possible. » Kathy, courriel à Herman, Georges et Bertrand, 22.01.2000.

279. « Absolument aucune plainte sur la réduction en taille des MBMS !? » Bertrand, note griffonnée en anglais sur une copie papier de l'agenda de la réunion, 07.02.2000.

280. « À clarifier ».

281. « 1.1 Changements de la taille et de la position des lattes du toroïde (B. Nicquevert)

B. Nicquevert a expliqué les raisons de l'ECR pour la taille et les positions des lattes de la bobine du toroïde : les mouvements et l'espace libre entre la masse froide et le cryostat lors du refroidissement du toroïde barrel. De plus, les problèmes de marges entre les cryostats de la bobine et les pieds du rail exigent que la latte n°2 et la latte n°3 soient déplacées en direction du point d'intersection.

Dans une série de réunions entre la TC, le système des aimants et le système des muons, un accord a été trouvé pour les nouvelles tailles et positions des lattes.

Les nouvelles dimensions des lattes en z sont pour les latte n°0 à 3 : 240, 270, 270, 290 mm ; les positions : z=0, 3490, 6760, 9540 mm. La nouvelle position de la latte n°3 fournit également plus de place pour l'installation des chambres à muon EE. Dans ce contexte, Bertrand a aussi brièvement traité le principe d'installation des chambres EE. Bien qu'il soit d'accord avec le principe proposé par Vlad il pointe quelques marges très serrées et souligne aussi la nécessité d'un mouvement radial des chambres pendant l'installation. Jörg dit qu'il est prévu que l'installation des chambres EE soit discutée plus en détails dans la prochaine réunion, en avril si possible. »

Muon Chamber Layout Meeting #61 at CERN, 7 February 2000, Minutes, §1. *Layout issues*.

> *reducing the available space for the BMS. The resulting reduction of coverage for these chambers is of 2.5%. Accepting these changes could lead to some problems to the RASNIK system, if the optical path is changed, since the lenses have been ordered. It was agreed to accept these changes and submit them to the MUON-IB for approval.* [282]

L'approbation du chef de projet est donc obtenue à la suite de ce *Steering Group* et communiquée par courriel [283]. C'est ensuite Kathy, la personne en charge du traitement au sein du *project office*, qui insère cette décision. Il en est fait de même pour les commentaires de l'ingénieur projet des Pieds [284].

Il est intéressant de relever que la procédure en 2000 n'est pas encore tout à fait opérationnelle. Ainsi qu'en témoignent les questions [285] posées par les ingénieurs Pierre et Bertrand, la procédure n'est pas forcément claire, en ce sens qu'elle n'explicite pas la forme à donner aux décisions et commentaires. Mais ce ne sont que questions de rôdage somme toute secondaires, et la procédure conduit à un document final approuvé [286], et à une ECR close transformée en ECN (*Notification*) [287].

6.5.2 La fin d'une époque

Concernant les enveloppes, qui sont notre fil rouge, l'ensemble des enveloppes précédentes intitulées ATLTB% [288] est annulé, et remplacé par un ensemble d'enveloppes entièrement nouvelles, désignées sous le code ATCZTB%. Leur approbation progressive se poursuivra longtemps, très longtemps, car la controverse ne s'éteint pas avec la crise des lattes. En juin 2000, les enveloppes ne sont toujours pas approuvées. Il faudra attendre avril 2001, avec l'entrée en fonction du nouveau coordinateur technique Marzio Nessi, pour qu'elles le soient enfin. Profitant de la réorganisation de la Coordination technique déclenchée par la crise d'Eilat (que nous avons exposée au § 5.7.1 p. 144), l'ingénieur en charge de l'intégration mécanique annonce, au cours de l'*ATLAS week* à Dubna, en juin 2000 qu'il jette l'éponge. Il a décidé de se consacrer désormais principalement au projet des Pieds d'ATLAS, dont nous reparlerons dès le chapitre 7.

> *This last talk is the opportunity for the engineer in charge to thank all who believed in envelopes as a management tool and helped in the process; announcing that he will devote his ATLAS energy to the feet and rail system (specification and follow-up of the russian in-kind contribution), he wishes good luck to those who shall have to manage the actual (not virtual) assembly.* [289]

---

282. « Changement des lattes de l'aimant et du layout des chambres (JW)

JW a présenté les changements proposés des lattes de l'aimant et les conséquences pour le *layout* des chambres. La TC et le groupe des aimants ont demandé une augmentation de la taille des lattes, qui réduit l'espace disponible pour les BMS. La réduction en couverture qui en résulte pour ces chambres et de 2,5%. Accepter ces changements pourrait poser quelques problèmes au système RASNIK si le chemin optique est modifié, car les objectifs ont été commandés. Il est décidé d'accepter ces changements et de les soumettre au Muon-IB [*Institution Board]* pour approbation. »

DRAFT minutes of the MUON Steering Group of February 9th, 2000.

283. Giora, courriel général, *Rép: ATLM-SG minutes*, 15.03.2000.

284. Bertrand, courriel à Kathy, *ECR ATL-TB-EC-0003*, 21.02.2000.

285. Bertrand, courriels à Pierre, *ECR: traitement*, 15.02.2000 et 21.02.2000. Kathy, courriel à Herman, Giora et Bertrand, *ECR*, 21.02.2000.

286. Kathy, courriel, *ECR « Increase of the size envelope of the TB vacuum vessel around the ribs* », 17.03.2000.

287. Nous reviendrons naturellement sur ces questions au chapitre 8 consacré à la gestion des données techniques. Dans la partie IV, nous mettrons en application ces principes de vérification et de validation (inspirée de l'expérience avec ATLAS) mis en place pour *Med*Austron.

288. Le caractère « % » est utilisé dans les systèmes de gestion des données du CERN CDD et EDMS comme caractère joker (*wildcard*) – en bon français, "métacaractère".

Dans le même temps, son "adversaire préféré" des muons annonce également qu'il abandonne la gestion du *layout* à la fin de l'année 2000 (épisode relaté au § 5.7.1 p. 144). Ils vont l'un et l'autre gérer les affaires courantes jusqu'à la fin de l'année 2000, avant de passer la main.

> *Just in time […] I have approved the last two outstanding muon system layout drawings (version O) in the muon internal approval cycle in CDD. This marks the end of my involvement in the Muon System Layout activities. It was a long way to get to this point […]. This step finished I am glad to hand drawings and MDT parameter book over to the new team.* [290]

La suite est une autre histoire, que nous n'aborderons pas en détail. À l'heure du bilan de mon action comme intégrateur d'ATLAS, je conclus à un succès mitigé. La crise des lattes est un exemple de crise plutôt bien gérée et avec efficacité : le processus a permis d'avancer sur la résolution de problèmes tout en faisant progresser la définition, la compréhension et l'application des enveloppes comme outil de gestion. Toutefois, à voir l'évolution de la situation en juin 2000, on peut raisonnablement se poser la question de la portée des avertissements professés. Ainsi, quelques mois plus tard, Marc V., un physicien des muons bien connu pour ses prises de positions engagées, écrivait à la collaboration :

> *From the physicist point of view it is actually extremely worrying to see that, each week, for a lot of so called « good reasons » (services, access, security, installation easiness, simplification of construction, maintenance, whatever…) our chamber coverage is slowly but steadily decreasing !!! Let me remind you that our primary goal is NOT to make chambers that will be easy to install but to be able to study some PHYSICS with the ATLAS experiment.* [291]

En guise d'épilogue, douze ans plus tard, nos prévisions se sont confirmées, comme en témoigne Laurent, physicien de Saclay impliqué dans la spécification fonctionnelle de l'aimant toroïdal et dans la reconstruction des traces des muons, et proche collègue de Marc (hélas disparu peu après) :

> *Durant le "design" d'ATLAS (1994-1999), en particulier pour la partie spectromètre à muons, je me souviens que tu as à de nombreuses reprises alerté la communauté de physique sur le manque de réalisme des enveloppes géométriques des différents composants du spectromètre : détecteurs de précision (MDT, CSC), de déclenchement (RPC, TGC), des supports, des câbles et autres conduites d'alimentation (argon liquide pour le calorimètre). Les hypothèses quant à l'acceptance géométrique du futur spectromètre utilisées dans les simulations ont souvent été très optimistes. En particulier à eta=0 où longtemps la place réservée aux services a été sous-estimé d'un facteur 3. En fait c'est factuel, on a sous-estimé les pertes d'acceptance géométrique très longtemps, mais à part cela on survit avec les data. Le problème a été nettement plus*

289. « Cette dernière présentation est l'occasion pour l'ingénieur en charge de remercier tous ceux qui ont cru aux enveloppes comme outil de management et qui ont contribué au processus ; annonçant qu'il va consacrer son énergie ATLAS au système des pieds et rails (spécification et suivi de la contribution en nature russe, il souhaite bonne chance à ceux qui vont avoir à gérer l'assemblage effectif (non virtuel). » B. Nicquevert, *Status of envelopes and critical issues of the detector integration*, ATLAS Week plenary meeting, BN/200017_ATCZ, juin 2000, dernier transparent.

290. « Juste à temps […] je viens d'approuver les deux derniers dessins restants du *layout* du système des muons (version O) dans le cycle d'approbation interne des muons dans CDD. Cela marque la fin de mon implication dans les activités de *Layout* du Système des Muons. Il a fallu un long chemin pour en arriver là. […] Cette étape achevée, je suis heureux de transmettre les dessins et le livre des paramètres des MDR à la nouvelle équipe. » Jörg W., courriel à la Collaboration des muons, *Muon system layout version O finished*, 08.01.2001.

291. « D'un point de vue de physicien, c'est en fait extrêmement inquiétant de voir que, chaque semaine, pour tout un tas de "bonnes raisons" (services, accès, sécurité, facilité d'installation, simplification de la construction, maintenance, et je ne sais quoi encore…) notre couverture de chambre décroît lentement mais constamment !!! Je vous rappelle que notre but principal n'est PAS de faire des chambres faciles à installer mais d'être capables d'étudier un peu de PHYSIQUE avec l'expérience ATLAS. » Marc, CEA Saclay, courriel, 12.10.2000.

critique avec le ID et les services non prévus qui nous ont coûté de grosses boîtes dans le spectro (PP2). [292]

6.5.3 Remarques sur le fonctionnement effectif

Avant de clore cette étude du cas, terminons par quelques remarques sur la circulation effective des informations, et sur les lignes selon lesquelles les décisions se prennent en réalité, indépendamment des responsabilités officielles des uns et des autres. Nous avons observé ci-dessus le déroulement officiel de la formalisation des ECR, et avons noté que la procédure avait encore besoin de rodage. Au delà du fonctionnement effectif de cette procédure, j'aimerais faire quelques remarques sur d'autres comportements. Elles sont personnelles, et s'appuient sur une lecture des faits évoqués. Douze années après, il n'est pas question de régler des comptes, mais plutôt de s'interroger sur les éléments factuels qui m'ont à l'époque donné parfois l'impression d'avoir été court-circuité, ignoré ou oublié dans mon rôle de responsable de l'intégration. Et ce sentiment contribue à un certain stress, dommageable au-delà d'un certain seuil à la performance, voire à la santé des manageurs techniques concernés [293]. Ce sentiment a indéniablement joué un rôle dans ma décision en juin 2000 de cesser progressivement l'intégration d'ATLAS, effective fin mars 2001 [294].

Tentons tout d'abord de dresser un état des lieux des “forces en présence”. Une première proposition est de positionner les différents acteurs du cas dans un tableau, chaque colonne correspondant à un sous-projet ou une équipe d'ATLAS, et chaque ligne à un rôle fonctionnel ou managérial : projeteurs (ici, producteurs d'études, de modélisations géométrique et de dessins) ; ingénieurs (ici, vérificateurs, donneurs d'ordre pour les bureaux d'études, calculateurs) ; physiciens (spécificateurs fonctionnels, avec souvent un rôle de coordination superposé) ; et enfin ingénieur projet (PE, *Project Engineer*) et chef de projet (PL, *Project Leader*), deux rôles comportant des responsabilités officielles dans le projet ATLAS. Cette approche est évidemment simplificatrice, mais le tableau permet d'ébaucher une sorte de matrice.

	Muon layout	**Muon supports**	**μ Barrel alignement**	**Barrel toroid**	**Pieds**	**Intégration mécanique**
Projeteurs	Robert	Jean-Pierre, Vlad	Patrick	Projeteur CEA	Olivier	Bernard, Jean-Pierre + PL [295]
Ingénieurs	Robert	Francesco	Patrick	Yves	Bertrand + calcul	Bertrand
Physiciens	Jörg	Jörg	Claude	Laurent	–	–
PE	–	Francesco	Claude	Antoine (B0) Pierre (BT) [296]	Bertrand	Gérard
PL	Giora	Giora	Giora	Herman	Gérard	Mike Price

Tableau 6.1: Proposition de répartition des rôles par équipe (vue très simplifiée…)

292. Laurent, *Marges*, courriel à Bertrand, 18.11.2011.

293. Voir le chapitre 9, § 9.1.2 p. 262.

294. Voir la frise chronologique, Tableau 4.2 p. 113.

295. Pascal Lécaille, pendant le déroulement effectif de cette étude de cas, a en effet travaillé quelques semaines au sein de l'équipe d'intégrateurs, en produisant des scénarios d'installation avec Robcad, logiciel de maquettage numérique dynamique.

296. Antoine était ingénieur projet (chef de projet pour le CEA) pour la bobine prototype B0, Pierre prenant le relais pour le projet de l'aimant final BT.

Dans ce tableau, les colonnes correspondent donc aux lignes de *reporting* au sein d'un sous-projet, et ne se superposent pas aux lignes hiérarchiques, qui sont variées ! Nous l'avons vu lors de l'étude du cas n° 0 sur le Bureau technique (chapitre 3), auquel nombre de ces acteurs appartiennent d'ailleurs : Robert, Olivier et Jean-Pierre (ainsi que Pascal en ce qui concerne son activité d'apprenti-intégrateur) sont placés sous la supervision de Bertrand, ainsi que Vlad, détaché de Dubna. Paradoxalement, l'un de ses plus proches collaborateurs pour l'intégration, Bernard, ne l'est pas (on pourra à nouveau se référer à la Figure 3.2 p. 83). Et Bertrand, placé sous l'autorité de projet de Gérard ainsi que du coordinateur technique Mike Price, appartient à un groupe hors ATLAS, comme nous l'avons vu au chapitre 3. C'est également le cas pour les personnes travaillant à Saclay : le projeteur CEA et Patrick font partie d'un bureau d'études supervisé par Yves, au sein d'un groupe de support ; Pierre fait partie d'un autre groupe du CEA, chargés des aimants au sein du même département ; quant à Claude et Laurent, ils appartiennent encore à un autre département de physique. Ils sont tous placés (sauf ces deux derniers) sous la responsabilité de projet de Herman, qui appartient quant à lui au même groupe CERN (ATI) que les membres de la Coordination technique, tandis que Jörg et Francesco sont rattachés au groupe ATLAS des muons (ATM). Enfin le chef du projet des muons, Giora, est lui ressortissant du *Weizmann Institute* en Israël, et il a été élu début 1999 à ce poste en succédant au cernois et chef du groupe ATM (Chris). Ce sont des considérations qu'il faut garder à l'esprit, car elles façonnent les lignes de force au sein du projet. Déjà qu'il serait vain d'y chercher un quelconque fonctionnement pyramidal (voir § 2.6.3 p. 70), on constatera ci-dessous que le modèle de management qui s'applique est seulement régi par la recherche pragmatique de l'efficacité.

Ce qui favorise certaines circulations d'information, c'est aussi l'appartenance aux différents *Steering groups*, comités de pilotage. Ainsi, Jörg fait partie du MPG (le *Magnet Project Group*) pour représenter les muons, mais pas Bertrand, qui est pourtant à la fois en charge de l'intégration et des Pieds ! Or, les interactions mécaniques avec le toroïde sont très intimes, comme nous le verrons au chapitre 7. C'est sans doute ce qui explique que le message de Herman à l'origine de la crise des lattes ne soit bizarrement pas adressé à la Coordination technique, mais bien à Jörg, considéré à ses yeux comme en charge de l'intégration des muons. *In absentia*, le message arrivera au chef de projet (Giora), puis à l'ingénieur technique en charge (Robert).

L'on peut s'interroger sur la raison pour laquelle l'intégration n'est pas destinataire de cette information. Deux membres éminents de la Coordination technique étaient en copie du courriel, le coordinateur technique lui-même et son ingénieur en chef ; or, ce n'est pas par et grâce à eux que Bertrand est informé en tant qu'ingénieur en charge de l'intégration, mais par Robert. Et encore, celui-ci l'interpelle en tant qu'ingénieur en charge des Pieds [297]. C'est en tant qu'intégrateur mécanique d'ATLAS que Bertrand réagit immédiatement le 20 octobre [298], s'alarmant d'une remise en cause hâtive d'un *statu quo* pas encore vraiment stabilisé, où la résolution de gré à gré d'un conflit supposé local prendrait le pas sur une analyse plus globale des conséquences mécaniques de la décision (ce qui se révélera exact : le conflit géométrique avec les chambres verticales n'avait en effet été décelé ni par les muons ni par le toroïde).

Pendant un mois, les choses en restent là (c'est la période du *workshop* d'Eilat relaté au chapitre 5), avant que l'officialisation de l'ECR le 25.11 ne relance le processus. Et là encore, le message pourtant crucial de Pierre [299] est envoyé à son chef

297. Ce qui souligne aussi quelques aspects positifs de la multiplicité des rôles, en termes de redondance.

298. Bertrand, courriel à Herman et al., *On the request to change the TB strut*, 20.10.1999.

299. Pierre, courriel à Herman, *BT vac vessel, position of ribs*, 02.12.1999.

de projet (ce qui est légitime), les personnes en copie étant (outre ses collaborateurs du CEA) uniquement les personnes en charge du *layout* des muons (Jörg et Robert) et le coordinateur technique. Le courriel parviendra à Bertrand par un canal encore différent : renvoyé à Gérard et à son adjoint Mark, c'est ce dernier qui le transmet à Bertrand, avec le bref commentaire « *for info in case you do not already have it* » [300]. La réaction de Bertrand, envoyée le 3 décembre à Mike Price et Gérard, assez véhémente, est bien révélatrice du malaise de l'époque [301].

Je me dois de prendre de la distance par rapport à ce message, assez critiquable. Un petit peu de mauvaise foi, ou un sincère trou de mémoire (je ne me souviens plus) quand il est affirmé : « *I did not receive anything official / officious so far* » [302]. Car si en effet rien d'officiel n'avait été envoyé, Bertrand était tout de même informé du courriel de Herman, depuis que Robert le lui avait transmis le 20 octobre. Par ailleurs, la critique personnelle contre Jörg est excessive et malvenue [303]. Bertrand clame : « *The envelope definition applies to everybody BUT the muons, just because W. […] refuses to use any envelope on his chambers.* » [304] Cette analyse est erronée : si Jörg refuse d'utiliser les enveloppes, c'est pour des raisons étayées, avec des arguments solides, qui alimentent une controverse intéressante.

Toutefois, quelques éléments sont à retenir dans ce cri du cœur quasi existentiel qui se termine par le déchirant (un tantinet mélodramatique) : « *Who at the end, is in charge of the mechanical integration of Atlas ?* » [305] : en tant qu'ingénieur projet des Pieds, Bertrand pouvait légitimement s'attendre à être impliqué dans les discussions dès le début – alors que le message de Herman indique que la question a déjà été abordée (probablement dans un MPG ?). Et Bertrand pouvait rétrospectivement s'interroger sur les raisons qui faisaient qu'il n'était pas informé directement de la situation, et du fait que le forum de discussion n'était pas approprié – on ne résout pas un problème de frontières de gré à gré entre deux systèmes, telle était sa conviction. Mais le fil normal du processus est repris et réaffirmé comme tel par Gérard dès le 7 décembre 1999, et c'est bien Bertrand qui, conforté dans son rôle, a orchestré les réunions de janvier 2000, apportant un soin particulier [306] à leur préparation (avec son équipe d'intégrateurs, mais aussi au travers des nombreuses discussions préalables et préparatoires avec les autres partenaires), puis à la rigueur de leur exploitation ultérieure et de la formalisation du processus d'ECR.

6.6 Intégration : frontières et voisins

De manière plus globale, c'est la question du supposé « *management sans pouvoir* » de la Coordination technique qui est à nouveau posée.

> *Les acteurs vont d'un monde à l'autre, étant eux-mêmes ce qui permet de les relier, tout en mobilisant des objets qui mettent en présence différentes logiques d'action. […] Un des acteurs importants dans ce projet est la "Coordination technique" [qui] joue un rôle de courroie de transmission entre les différents mondes déjà mentionnés: "*Oui et non, la Coordination technique coordonne, sauf qu'elle n'a pas de pouvoir ... *", me dira Bertrand le 27 août 2003.* [Lécaille 2003, 34]

300. « Pour info, au cas où tu ne l'aurais pas déjà ».

301. Bertrand, courriel à Mark, Mike Price, Gérard Bachy [*Fwd: BT vac vessel, position of ribs*], 03.12.1999.

302. « Je n'ai jusqu'ici reçu aucune information officielle / officieuse. »

303. De plus, ce genre de critique n'a rien à faire dans un message, fût-il privé. Ne le regrettons pas totalement, puisque c'est cela qui me permet d'avoir gardé trace de cette colère.

304. « La définition des enveloppes s'applique à tout le monde SAUF aux muons, uniquement parce que W. […] refuse d'utiliser les enveloppes pour ses chambres. »

305. « Qui donc, à la fin, est en charge de l'intégration mécanique d'ATLAS ? ».

306. L'implication personnelle joue un rôle crucial dans la réussite de ces phases particulières.

Le cas que nous venons d'étudier, avec la controverse sur la signification des enveloppes, illustre cette problématique déjà abordée au § 5.7 p. 144. Dans cette section, nous allons expliciter cette controverse sur les enveloppes, et écouter ce qu'elle nous dit sur la question de la nature du processus de management dans ATLAS. Nous avançons ici la thèse, déjà esquissée à la fin du chapitre 5 et qui sera approfondie au chapitre 12, que le mode de management sans pouvoir est un mode de management plus efficace qu'il n'en avait l'air à mes yeux à l'époque, et qu'il est sans doute de nature à réduire au mieux ce que j'ai appelé la tension essentielle (§ 3.2.3 p. 89).

Reprenons la controverse en termes plus généraux – ou bien doit-on l'appeler querelle ? C'est ce que fait Lécaille :

> *Ta querelle [est] d'un intérêt flagrant avec JW sur le statut des enveloppes. Si, bien sûr on en est là avec ces soucis importants d'intégration et d'installation, l'enveloppe se retrouve au centre des enjeux. Pour JW, il s'agit simplement de « savoir où se trouvent les voisins (pour en mettre le plus possible partout) », alors que toi, tu as créé par ces enveloppes des espaces d'intervention bien délimités pour chacun. Deux points de vue qui auront à discutailler demain.* [307]

Le 19 novembre 1999 déjà, nous avions discuté de la question, et nous étions parvenus à définir la différence entre ces deux points de vue avec un petit croquis reproduit à la Figure 6.12.

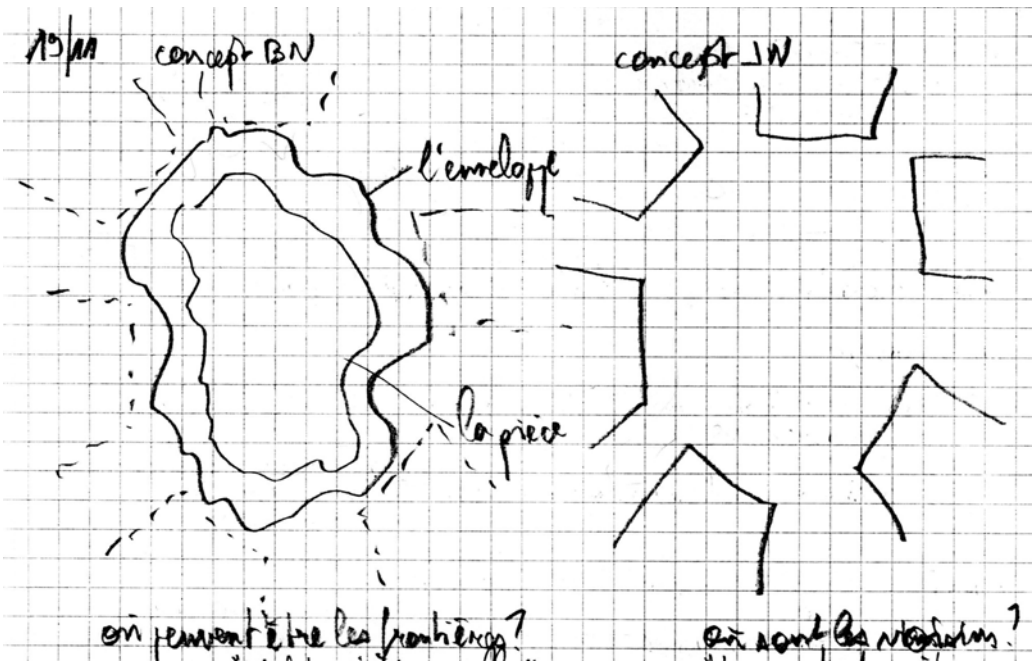


Figure 6.12: Deux concepts de gestion des espaces

Pascal, notes de terrain, novembre 1999

Le « *concept BN* » est ainsi dénommé « *Où peuvent être les frontières* ». Ainsi, un système sait jusqu'où il peut aller. Tant qu'il reste à l'intérieur de l'enveloppe qui lui a été attribuée, il est libre de placer ses surfaces où bon lui semble, mais il ne se permet pas d'en franchir la limite. Le « *concept JW* » serait plutôt du type « *Où sont les voisins* », de façon à pouvoir aller se mettre aussi loin que possible. Dans ce cas, le système va tenter de placer sa surface aussi près que possible de celle de son voisin. L'enveloppe comme frontière vient donc s'interposer comme obstacle contesté

307. P. Lécaille, courriel à Bertrand, 11 janvier 2000.

à la tendance naturelle des muons d'occuper tout l'espace disponible comme le ferait un gaz.

Pascal analyse cette controverse en y incluant le point de vue de Bertrand [308] :

> *Ce problème souligne des points de vue divergents sur le choix des modèles adéquats pour l'intégration qui se déroule entre Bertrand et Jörg, le physicien responsable de l'intégration des "*chambres à mu*". Cette controverse traverse tout le problème de la reconception des lattes, d'où l'insistance pour Bertrand de recourir à ROBCAD pour montrer les incompatibilités dans le montage des chambres. Deux mois plus tôt, en novembre 1999, Bertrand et moi en avions déjà discuté. Il me parle d'une réunion du TCSG (le Technical Coordination Steering Group, l'exécutif de la Coordination technique d'ATLAS) :*
>
> > Tu aurais été là, tu aurais noté pour moi, car les remarques ont fusé. Il y a eu l'émergence d'un autre concept par Jörg : son approche est opposée à la mienne et néanmoins intéressante. Sa question est : où sont les voisins ? C'est parce qu'il veut mettre des trucs partout, c'est-à-dire pour lui, les enveloppes ne lui indiquent que l'espace qu'il peut occuper, alors qu'il voudrait connaître l'espace qu'il pourrait occuper. Le concept d'enveloppe en plus des dessins détaillés est pour lui une perte de temps, c'est inutile. Il voudrait une interaction directe, c'est-à-dire pas de frontières.
> >
> > Bertrand, novembre 1999
>
> *La controverse peut se résumer de la manière suivante : le point de vue de Bertrand est de savoir* Où mettre les frontières ? *afin de délimiter l'action de conception de chacun des projeteurs; le point de vue de Jörg se résume de la façon suivante :* Où sont les voisins ? [Lécaille 2003, 146-147]

On sent bien la tension dans la controverse – que je reformulerais juste un tout petit peu différemment : cela me semble insuffisamment clair de parler de la distinction entre l'espace qu'il *peut* occuper et celui qu'il *pourrait.* Car le problème est plus complexe : quel est véritablement l'espace disponible, s'il ne tient compte d'aucun des effets inclus dans la définition de l'enveloppe ? Sur quelle base se décide le « *pourrait* » ? Et que se passe-t-il quand mon voisin bouge ? Il s'agit donc de discriminer l'espace *autorisé* (au premier sens du mot pouvoir – le *dürfen* allemand) de l'espace *potentiel* (au deuxième sens, celui de *können*). Il s'agit d'introduire une règle sociale qui agisse comme principe de réalité face à un appétit dévorant et pourtant constitutif même de la finalité scientifique du détecteur !

L'enveloppe permet de factoriser cet ensemble de questions, grâce à une approche globale non pas centrée sur chacun des sous-systèmes, mais préoccupée par leur compatibilité mutuelle et prenant en compte les besoins collectifs (supports, services, alignement, etc). Nous l'avons vu en action : l'enveloppe peut donc être considérée comme un outil de gestion, en ce qu'elle définit *a priori* l'espace attribué à un sous-système, qui peut donc travailler sans se coordonner à tout instant avec ses voisins. À ce titre, l'approche par les « *No-go zones* » de CMS (§ 5.4.2 p. 134) est encore plus radicale. L'approche « *où sont les voisins* » implique *a contrario* une synchronisation permanente avec les changements et évolutions. D'un autre côté, elle présente l'avantage d'optimiser l'acceptance [309] du détecteur – et c'est bien l'une des motivations profondes des physiciens – minimiser les espaces perdus.

Comment réagissent ces « *voisins* » potentiels ? Pas toujours avec bienveillance, ainsi qu'en témoigne cette demande qui m'est parvenue en pleine phase de négociation de la crise des lattes, et non dénuée d'un peu d'ironie dans sa formulation :

308. C'est l'occasion formelle d'une jolie mise en abyme : Bertrand 2012 citant Pascal 2003 citant Bertrand 1999 interpellant Pascal 1999.

309. La couverture angulaire en trois dimensions.

> *Enfin quelque chose de facile: pourrais tu lancer la réalisation des plans d'enveloppe du TX1S* [310]*, afin qu'on se le fasse approuver rapidement et que les muons ne viennent pas me casser les bonbons à piquer de la place avec les grandes roues ?* [311]

Ceci démontre l'insécurité provoquée par l'approche selon le « *concept JW* », perçu comme un prédateur potentiel de la marge que chaque système estime devoir s'attribuer pour mener à bien son propre travail de conception, de fabrication, d'installation et de mise en œuvre. L'enveloppe constitue ainsi une frontière symbolique derrière laquelle le sous-système concerné se sent protégé et en paix.

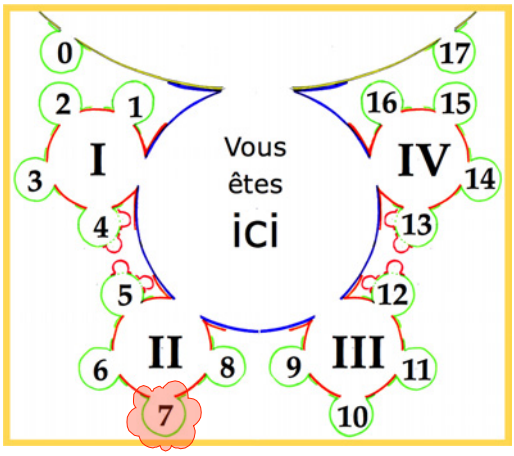
Cette différence conceptuelle se traduit par une appréciation assez radicalement différente du mode de gouvernance autour des questions d'attribution d'espace. Le concept d'enveloppe impose un processus *a priori* de type *top-down*, descendant, assez contraignant, voire perçu comme coercitif. Mais puisque c'est un processus, alors il peut être géré, et on peut en envisager la convergence et l'issue temporelle. Le concept du « *voisin* » semble plus agile, plus adaptatif, mais il est aussi plus insécurisant puisqu'il n'a pas de fin prévisible : tant que l'un des partenaires bouge, chacun des autres est également susceptible de devoir bouger pour s'adapter, et la boucle ne boucle pas. C'est ce qui a été relaté au début du chapitre 5 : un processus qui ne converge pas.

Faut-il alors envisager de se diriger vers un mode hybride ? C'est déjà de l'anachronisme puisque, dans le cadre de l'étude de cas de la gestion d'espaces pour ATLAS, les protagonistes en sont restés au mode de la querelle et n'ont pas su la dépasser. Nous pouvons toutefois en repérer les germes [312].

310. Le TX1S est le nom de code d'un gros blindage en fonte, visible en bleu sur la photographie de la Figure 6.10 p. 165. Pesant plusieurs centaines de tonnes, il est installé à la sortie du tunnel et protège les premiers aimants de l'accélérateur contre les rayonnements ionisants créés par la diffusion du faisceau après la collision. Ce blindage est fixé au mur, et placé au centre des grandes roues évoquées dans le message.

311. François, courriel à Bertrand, *Enveloppe*, 14.01.2000.

312. Ils s'épanouiront plus tard, comme nous le présenterons au chapitre 15.



Chapitre 7. Gestion de projet. Les pieds d'ATLAS et la Russie

Où le manageur technique, sur le chantier, s'applique à transcender les antinomies de la concourance

Ce qui caractérise ce peuple [russe], c'est quelque chose de gigantesque en tout genre : les dimensions ordinaires ne lui sont applicables en rien. Je ne veux pas dire par là que ni la vraie grandeur, ni la stabilité ne s'y rencontrent ; mais la hardiesse, mais l'imagination des Russes ne connaît pas de bornes ; chez eux tout est colossal plutôt que proportionné, audacieux plutôt que réfléchi, et si le but n'est pas atteint, c'est parce qu'il est dépassé.

Germaine DE STAËL [313]

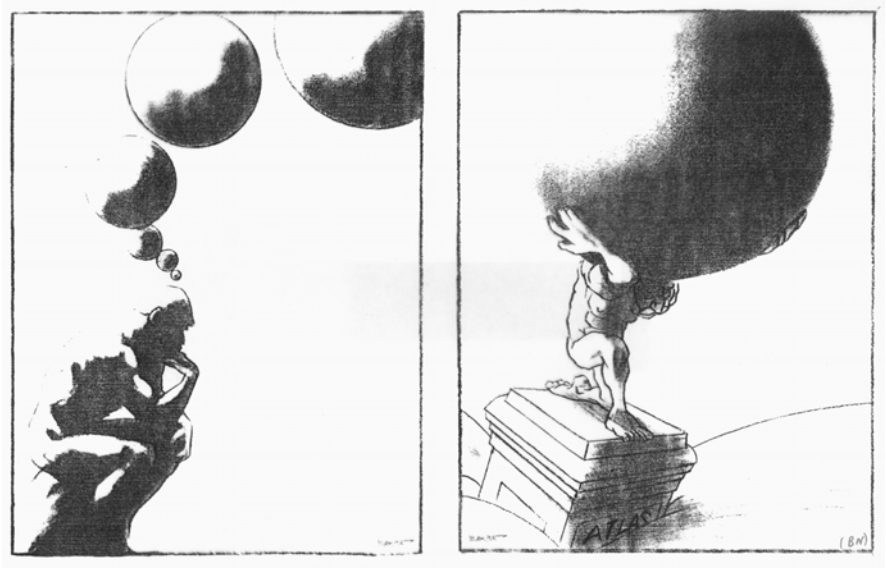


Figure 7.1: Un penseur, Atlas, Sisyphe…

313. *Dix années d'exil* [1818], Seconde partie, chap. XII p. 147.

Le cas présenté dans ce chapitre est celui d'un projet de mécanique : celui de la conception et de la fabrication des pieds supports d'ATLAS, ceux-là mêmes qui étaient impliqués dans la controverse des lattes rapportée au chapitre 6. L'illustration en tête de chapitre évoque la difficulté de gérer en pratique les conséquences dans le réel des penseurs avisés. J'avais pensé l'intituler : « *Il faut imaginer Sisyphe heureux* », allusion à la célèbre phrase de Camus [314] ; c'eût été sans doute exagérément insister sur la pénibilité du travail du manageur technique, vu comme l'esclave de ces dieux de la physique (des particules). Sans aller jusqu'à ces visions extrêmes, nous allons voir dans l'épisode de crise retenu que les moments de tension ne manquent pas, et qu'on frise parfois la tragicomédie.

Ce chapitre est l'histoire de la façon dont un manageur technique, chef d'un projet de mécanique, doit transcender les "antinomies de la concourance". Qu'est-ce que j'entends par là ? L'ingénierie de la concourance est cette approche de l'ingénierie [Darses 1997] qui suscite la parallélisation de tâches auparavant strictement séquentielles dans le processus de conception d'un produit : par exemple, au lieu d'attendre que la définition d'un produit soit complètement achevée pour démarrer la fabrication, on va lancer en production certains de ses composants. Ce lancement fige en retour la conception de ces composants (et impose des contraintes à la conception des composants non figés), mais il permet d'achever le lancement final du produit plus rapidement. Dans le cas qui nous intéresse, nous allons nous trouver dans une situation extrême où, alors que le produit est entièrement défini par le bureau d'études du CERN, et que la production bat son plein dans l'usine en Russie, c'est la spécification technique qui est revue, en raison d'une évolution de la conception d'un voisin et utilisateur des pieds, en l'occurrence le toroïde.

> *The project faced its most difficult challenge in the summer of 2002, when the production of the steel was almost complete, and the first components were nearly ready for delivery. The trigger, an event external to the feet and rails project, arose in another part of the collaboration and illustrates the complex interdependencies and the resulting uncertainties that had to be managed.* [315]

Nous retrouverons donc certains protagonistes des deux chapitres précédents, pour vivre l'aventure de la révision de conception urgente d'un système de quelques centaines de tonnes en cours de fabrication en Russie. Comment l'équipe du projet parvient-elle à prendre le temps de penser, alors que l'inertie des processus de l'usine empêche d'interrompre la production, ce qui s'allie à la stimulation de l'ensemble de la collaboration ATLAS pour mettre le planning de la reconception sous pression ? Avoir un pied dans la bassine gelée du processus de production validé d'une usine sidérurgique russe, et l'autre dans le chaudron bouillonnant de l'innovation permanente, est-ce la meilleure manière d'être en moyenne à la bonne température ?

Ainsi que nous avons procédé dans les cas précédents, nous allons décrire la situation de crise. Puis nous en expliciterons le contexte d'émergence, dans sa complexité avec laquelle nous commençons à nous familiariser : à la fois technique et scientifique, mais aussi organisationnelle et historique, en l'occurrence géopoli-

314. *Le mythe de Sisyphe* [1942], Pléiade, Gallimard, 2006, T. 1, p. 304.

315. « Le projet a affronté son défi le plus difficile dans l'été 2002, alors que la production d'acier était presque terminée, et que les premiers composants étaient quasiment prêts à être livrés. Le déclenchement, un événement externe au projet des pieds et rails, est provenu d'une autre partie de la collaboration et illustre les interdépendances complexes et les incertitudes qui en résultent qu'il fallait gérer. » [Nicquevert et al. 2011, 193].

tique [316]. La crise, comme auparavant dans les chapitres 5 et 6, s'explique par tout ce contexte, lequel n'est pas un simple contexte mais un élément couplé, car en retour, la réussite du projet influe sur le contexte : pour la firme qui a une réputation à défendre, pour ATLAS dont c'est le premier maillon du processus d'installation dans la caverne, et pour chacun des acteurs dont les engagements antérieurs sont mis ou remis en cause. Quant aux outils de management, ce sont ici des outils classiques – pas d'innovation à ce niveau – mais c'est leur exploitation, leur mise en situation opérationnelle qui nous intéressera au passage. Nous tirerons ensuite quelques leçons du cas, tant concernant les processus que le rôle du manageur technique dans ce contexte complexe.

Un mot de méthode pour terminer cette introduction. La quantité de documents en ma possession concernant le projet des Pieds est considérable : plus de 1500 fichiers, sans compter les milliers de messages électroniques et les huit cents photos, et plus de trois mètres de rayonnages de documents papier. Si nous nous restreignons uniquement à l'épisode de la révision de conception que nous traitons ici, qui s'étend de mars à octobre 2002 pour l'essentiel, ce sont plus de 200 échanges électroniques consacrés explicitement à cette question (qui se superposent à autant de messages concernant la gestion courante du projet pendant la même période) ; trois versions de documents de spécification et une bonne vingtaine de rapports de calculs, sans compter les résultats intermédiaires portant sur deux versions de berceaux, cinq versions de poutres standard et trois versions de poutres d'extrémité [317] ; la documentation et les très nombreux modèles CAO concernant toutes ces itérations de la révision ; sans compter les dizaines de compte-rendus de réunions aussi bien au CERN qu'au CEA ou en Russie… Réunir les principaux documents d'archives permettant de se faire une idée complète de la résolution du cas, ou se contenter d'y faire référence systématique comme je l'ai fait au chapitre 6 pour le cas des lattes, serait certes faire œuvre d'historien méticuleux, mais cela dépasse le cadre du présent travail. Nous ne pourrons pas (et je ne souhaite même pas) prétendre à une exhaustivité comparable, qui exigerait un volume complet de thèse rien qu'à lui : seuls les repères les plus importants seront donc donnés. L'essentiel n'est d'ailleurs pas d'assurer une recension intégrale du cas ; c'est d'en établir le caractère complexe, de faire sentir le rôle des manageurs techniques impliqués et d'en tirer quelques possibles leçons en terme de savoirs actionnables sur les processus de conception et de gestion de projet.

7.1 Un chargement changeant, une production changée

Après avoir couvé dès la fin 2001, la crise éclate en avril 2002, sous la forme d'une carte postale d'un genre un peu spécial, reproduite à la Figure 7.2. Un message codé à l'ironie [318], qui dix ans après nécessite quelques opérations de décryptage. Si je l'ai retenu, c'est qu'il me paraît refléter la crise dans toutes ses dimensions : il évoque non seulement les aspects techniques et l'avancement du projet, mais fait allusion à des questions organisationnelles, et dénote un malaise certain de son auteur. Avec le recul, le malaise est bien entendu passé, la prescription peut sans aucun doute être décrétée, et il est loisible d'exploiter pleinement ce document comme un bon indicateur d'entrée dans la crise.

316. La présentation générale du contexte s'appuie en partie sur le chapitre 9 « *From Russia with Love: A Contributing Country Perspective* » [Nicquevert et al. 2011, 182-200] de l'ouvrage déjà cité *Collisions and Collaborations* [Boisot et al. 2011]. La perspective du livre étant légèrement différente, nous présentons ici de nombreux éléments nouveaux et complémentaires, tant dans la partie technique – le cas est ici beaucoup plus détaillé – que dans la partie géopolitique.

317. La nomenclature du projet, et donc la désignation des composants, est explicitée au § 7.3.1 p. 191.

318. Le titre reprend celui d'un célèbre film éponyme, et la signature fait allusion au titre du livre de John Le Carré, *L'espion qui venait du froid*, Gallimard, 1964.



Figure 7.2 : « Bons baisers de Russie »

Pièce jointe à un courriel de Bertrand, 22.04.2002

Le message est en fait une pièce jointe à un courriel envoyé le 22 avril 2002 (de retour de Russie, où il était alors bien difficile de se connecter au réseau). Parmi les douze destinataires figurent quelques-uns des principaux protagonistes de notre cas : le coordinateur technique (Marzio Nessi, en poste depuis mai 2001), et trois ingénieurs de la Coordination technique : Olga, qui m'a succédé une année auparavant pour l'intégration mécanique d'ATLAS, Dimitar, ingénieur calcul, et Geoff, en charge de l'installation du détecteur ; quatre ingénieurs du CEA, dont Yves, ingénieur en charge de la conception de l'aimant toroïdal, Zhihong, ingénieure chinoise en charge des calculs ; et Olivier, projeteur pour la conception des pieds. Ce sont les principaux protagonistes de la crise côté Collaboration ATLAS.

De quoi parle ce message ? Encore presque explicite est la première partie du texte, au-dessus d'une photo qui montre une meuleuse en action sur des plaques d'acier. Ce texte relate le degré d'avancement de la production des pieds – dont le projet sera présenté plus en détails à la section 7.3. La suite du texte mentionne le gel d'une partie de la production, et fait une allusion cryptique à une « *excursion à Paris* » qui en serait la cause. Le temps ayant passé, il m'a fallu plonger dans les archives pour me remémorer de quoi il est question, même si c'est moi qui ai griffonné ladite carte postale. Retraçons sans nous appesantir [319] les événements qui ont précédé ce voyage à Saint-Pétersbourg (quant au choix de cette destination, il sera explicité au § 7.2).

Pourquoi cette allusion à Paris ? C'est en effet de Paris (plus exactement, du CEA à Saclay) que surgit la crise. Elle concerne les calculs de comportement global de la structure chaude du toroïde (décrite au § 6.2.1 p. 155). Le message évoque un déficit de concertation avec l'équipe parisienne, en raison d'une sous-estimation par le management de projet de l'importance de cette concertation. Fin avril, il

319. Sans nous perdre ici dans les détails des relations interpersonnelles, ni des états d'âmes ou blessures d'amour propre, il convient de ne pas non plus les escamoter complètement, dans la mesure où ils ont une influence effective sur le cours des projets.

apparaît inévitable que le chargement mécanique sur les pieds dû au toroïde doit être revu de manière importante. Dans le doute sur les conséquences possibles de cette révision de la conception, j'avais donc été amené dès la fin mars à suspendre la production des éléments potentiellement impactés par de possibles modifications majeures. J'écrivais ainsi à Alexandre, mon interlocuteur russe principal : « *Due to several major modifications, I will certainly have to put in stand by the rails and the girders, and maybe the feet themselves. Project life is so strange...* » [320]

L'état du projet à la fin avril est résumée dans le rapport déposé sur le système de suivi de projet du CERN PPT [321] :

> *Production of HBF (standard feet) started; cradles on hold, plus plates to connect girders. All other elements are put on hold (rails, rail supports, extremity feet), waiting for a decision on the ECR of 25mm radial move, plus revision on loads. Delays are unknown so far.* [322]

Le 2 mai, peu après ma présentation au TMB [323], je confirme la gravité de la situation à Alexandre : « *Not encouraging. Cradle will most probably NOT be released, due to an increase of the effort in* x *by 345%. Needs much more care than I would have hoped.* » [324] Et ce n'est qu'un début : d'autres composants vont vite devoir être révisés, tout particulièrement les poutres (*girders*).

Comment en est-on arrivé là ? Et quelles sont les conséquences sur le projet ? Pour répondre à ces deux questions, préalables pour aborder les questions de recherche qui nous intéressent dans le cadre de cas, il est nécessaire d'en traiter d'autres : tout d'abord, expliciter pourquoi la production se déroule en Russie, ce qui est l'objet du § 7.2 ; et ensuite, présenter le projet dans son ensemble (§ 7.3). Munis de ces deux éléments de contexte préalables, contingents et dynamiques, il nous sera alors possible, en remontant dans l'histoire du projet, de prendre la mesure de la difficulté technique survenue (§ 7.4). Tout ceci nous permettra de suivre globalement au § 7.5 la démarche de sortie de crise déployée par le manageur technique, dans un épisode de re-conception pressuré d'un côté par une spécification difficile à stabiliser – le chargement changeant – et de l'autre par la nécessité de maintenir une activité de fabrication optimale – la production changée. Nous verrons enfin (§ 7.6) le mode de sortie de crise dans ce contexte de diversité culturelle, institutionnelle et politique entre les différents acteurs du projet.

7.2 La Russie, le CERN et ATLAS

Le soleil ne se couche jamais sur ATLAS, comme nous l'avons remarqué à propos de l'organisation des collaborations de physique (§ 2.6.3 p. 70). Et si les pieds du projet ATLAS sont fabriqués en Russie, c'est que la Russie, qui est l'un des 38 pays participant à la Collaboration ATLAS, contribue *"in kind"* au *"Common Fund"* – nous verrons sous peu ce dont il s'agit. Cela a été rendu possible par les liens histo-

320. « En raison de plusieurs modifications majeures, il va certainement me falloir mettre en attente les rails et les poutres, et peut-être même les pieds eux-mêmes. La vie des projets est si étrange… » Bertrand, courriel à Alexandre, 25.03.2002.

321. *Project Progress Tracking*, suivi de progression de projet.

322. « Production des HBF (pieds standards) démarrée ; berceaux en suspens, plus plaques pour connecter les poutres. Tous les autres éléments sont mis en pause (rails, supports de rails, pieds d'extrémité), en attendant la décision sur l'ECR du mouvement radial de 25 mm, plus la révision des chargements. Les retards ne sont pas connus pour l'instant. »

323. *Technical Management Board* : a pris la suite du TCSG après la restructuration de la TC évoquée au § 5.7 p. 146.

324. « Pas encourageant. Le berceau ne sera très probablement PAS validé, dû à une augmentation de l'effort en x de 345%. Cela exige bien plus d'attention que je ne l'aurais espéré. » Bertrand, courriel à Alexandre, 2 mai 2002.

riques entre la Russie et le CERN, laboratoire-hôte d'ATLAS, ce dernier comptant dans ses missions celle de préserver et de développer le caractère international de ses activités. Nous nous appliquons dans cette section à expliciter successivement ces relations et ces contributions, en les situant dans l'évolution géopolitique et historique mouvementée de la Russie de ces vingt dernières années. Cet avant-propos historique, géographique, économique, politique et financier n'a rien d'une digression. Ce contexte géopolitique (la dimension génétique de la complexité décrite au chapitre 2) agit directement sur le management même du projet, voire sur sa conception technique. C'est donc un élément de complexité intrinsèque qu'il nous faut davantage détailler pour que le cas soit ensuite pleinement compréhensible.

7.2.1 La situation de la Russie au tournant du siècle

La période dans laquelle prend place notre cas se situe au sein d'une transition dite démocratique de la Russie, selon le modèle utilisé par les chercheurs en sciences politiques. Dès les années 1990, peu après l'implosion de l'Union soviétique en décembre 1991, des observateurs avisés notent les turbulences probables dans lesquelles s'engagent l'économie et la société russes. Le contexte global est celui de la privatisation des entreprises d'état par bons (ou *vouchers*) lancée en 1992 :

> *Dans les grandes entreprises, des processus de reconversion sont à l'œuvre. Les directeurs soviétiques organisent à leur profit la privatisation des actifs, profitant des dispositions législatives favorables aux* insiders*. L'administration des entreprises, et notamment des plus productives d'entre elles, reste entre les mains de la* nomenklatura. [Daucé 2008, 37]

Il a fallu chiffrer le capital, créer des titres divisant ce capital en parts sociales, puis la plupart du temps, ces titres sont cédés selon une formule de rachat par le personnel en place. « *En laissant le plus souvent en place le "directorat rouge", elle n'est évidemment pas faite pour répandre le sens du marché et le souci de la rentabilité parmi les opérateurs économiques de base* » [Sokoloff 2003, 285]. La période de 1992 à 1994 est cruciale, et la société post-soviétique, tant au niveau macro que micro-économique connaît une période de transition mouvementée.

> *The economy needs time to create new economic and industrial policies and institutional preconditions for a market economy, or more properly perhaps, a Russian type of mixed economy. On the other hand it is politically and economically impossible to wait for too long and let the traditional industrial potential collapse. This latter alternative would have unpredicted consequences for Russian society; even the well known tolerance of the Russian people would hardly be enough to stand it.* [325]

Daucé rappelle que « *dans le cas de la Russie, la transition est complexe. Claus Offe* [326] *parle ainsi d'une triple transition : de l'autoritarisme à la démocratie, de l'économie planifiée à l'économie de marché, d'un État multi-ethnique centralisé à une autre forme d'organisation territoriale* » [Daucé 2008, 11]. Dans le domaine de la production industrielle qui nous intéresse ici, il nous semble que la deuxième transition implique une transition d'un mode de production industrielle planifiée de masse à un mode de gestion par projet — sans doute analogue à celle qu'a vécue notre industrie automobile dans les années 1980, comme le relatent *L'auto qui n'existait pas* [Midler

325. « L'économie a besoin de temps pour créer de nouvelles politiques économiques et industrielles et les préconditions institutionnelles pour une économie de marché, ou peut-être plus exactement, un type russe d'économie mixte. D'un autre côté, il est politiquement et économiquement impossible d'attendre trop longtemps et de laisser imploser le potentiel industriel traditionnel. Cette dernière alternative aurait des conséquences imprévisibles sur la société russe ; même la tolérance bien connue du peuple russe aurait bien du mal à le supporter. » [Kaukonen 1994, 25].

326. [Offe 1991, 2004]

2004], ainsi que les travaux sur l'industrie automobile occidentale [Moisdon et Weil 1992a, 1992b]. C'est cette transition qui constitue le mouvement d'évolution sous-jacente de l'entreprise évoquée dans notre cas au tournant des années 2000.

En ce qui concerne plus spécifiquement le domaine de la science, les restrictions budgétaires induisent bien des soucis, et les scientifiques russes appellent à l'aide la communauté internationale. Celle-ci prend différentes formes, et suscite quelques déceptions face aux obstacles bureaucratiques tant en Russie que de la part des pays occidentaux : « *The sponsoring nations didn't agree until late last year on the details of the plan, by which time [science] had become a pawn in the domestic battle in Russia between hard-line conservatives and Yeltsin loyalists.* » [327] En outre, cette aide n'est pas sans provoquer quelques tensions, dont nous trouverons trace dans notre cas : « *Some scientists have felt that a new colonial relationship is emerging […]. Instead of the originally proclaimed purpose, the system may turn into a means for the West to monitor Russian science and reap its profits.* » [328] Les partenaires russes, s'ils demandent de l'aide, restent particulièrement vigilants à rester maîtres à bord de leurs projets. Ils ont en outre particulièrement à cœur de mener à bien leur mission. C'est donc avec une infinie tristesse que la communauté scientifique de physique des particules doit renoncer en 1992 à son projet phare, l'accélérateur UNK, faute de moyens.

> *En 1987-1991, le plus grand projet de construction de toute l'URSS n'était ni une nouvelle station hydro-électrique ni un oléoduc, mais un synchrotron (ou accélérateur de protons), en chantier dans la petite ville scientifique de Protvino […]. L'accélérateur devait commencer à fonctionner en 1993. Il appartenait à l'Institut de physique des hautes énergies, qui faisait partie de l'empire nucléaire militaro-industriel connu sous le nom de Minsredmash – abréviation de ministère soviétique des industries mécaniques moyennes. […] Ainsi serait mis en place un collisionneur de particules pouvant permettre aux physiciens soviétiques d'effectuer des expériences sans précédent, laissant leurs rivaux loin derrière (le projet américain équivalent ne devant pas être achevé avant 1999). Le travail à Protvino a commencé à se ralentir à la fin de 1991, avant de s'arrêter totalement en 1992. Le Minsredmash a sombré avec le gouvernement du président Gorbatchev et l'Union soviétique, et la Russie est désormais incapable de financer de grands projets de science fondamentale, qui ne produisent pas de bénéfices immédiats.* [Medvedev 1993]

La crise financière de 1998 survient au pire moment pour la communauté scientifique. Elle entraîne une réduction drastique des budgets publics, et sonne le glas d'une politique propre ambitieuse en matière de recherche fondamentale. La science russe a pu heureusement bénéficier du soutien de la communauté internationale, en particulier la communauté de physique des particules. « *Le potentiel scientifique et technologique russe s'est émoussé sur la décennie 1990, mais il s'est ouvert à des partenariats internationaux, notamment dans les domaines d'excellence de la Russie (spatial, physique nucléaire, science des matériaux…), ce qui est un gage de meilleure valorisation de l'effort de recherche* » [Bénaroya 2006, 73]. L'absence de toute politique propre d'envergure après l'abandon du projet de collisionneur UNK de Serpukhov pèse toutefois lourd, au bilan :

> *Pendant ces vingt dernières années, il y avait à la fois une conjoncture économique et des libertés émanant de la Perestroïka qui auraient dû permettre de résoudre tous*

327. « Les nations qui financent ne sont pas parvenues à un accord avant la fin de l'an dernier sur les détails du plan, et entre-temps [la science] est devenue un pion sur l'échiquier de la querelle intérieure entre les conservateurs de la ligne dure et les loyalistes eltsiniens. » [Anderson 1993]

328. « Certains scientifiques ont eu le sentiment de l'émergence d'une relation néo-coloniale […] Au lieu de l'objectif initialement proclamé, le système pourrait se transformer en un moyen pour l'Occident de contrôler la science russe et d'en tirer profit. » [Kaukonen 1994, 32]

> *les problèmes. On a perdu les vingt dernières années et dans certains domaines [comme] la science et la technologie par exemple, on a atteint le point de non retour. Vous imaginez que du temps de l'Union soviétique, la Russie était en deuxième place dans ces domaines, derrière les États-Unis, et qu'aujourd'hui elle est en septième ou huitième position. Je viens du milieu scientifique et vois toutes les potentialités qui ont été perdues.* [329]

La situation tourne, si l'on peut dire, à l'avantage du CERN : après l'abandon du dernier projet russe, qui avait été lui-même précédé de l'arrêt du projet américain SSC en 1993 [330], le CERN est devenu le dernier grand laboratoire mondial de physique des particules. La fin de l'exploitation du Tevatron au Fermilab en octobre 2011 a encore accusé ce sentiment. C'est donc au CERN que l'on trouve désormais une bonne partie de la communauté russe (et également de la communauté américaine – ce qui relativise l'apparent échec russe).

7.2.2 La Russie et le CERN

La collaboration effective entre le CERN et les physiciens russes remonte aux années 1960, le premier accord important d'échanges scientifiques avec l'Union soviétique datant de 1967 [Lock 1975]. Les scientifiques soviétiques collaboraient bien entendu également avec les américains – par exemple au Fermilab, tout près de Chicago –, mais leurs liens avec le CERN ont toujours été particulièrement intenses. À l'apogée de la guerre froide, l'IHEP (*Institute for High Energy Physics* [331]) déjà évoqué avait été créé pour les physiciens par l'Union soviétique dans les environs de Protvino, à 100 kilomètres au sud de Moscou. En 1984, cette communauté avait commencé à construire ce qui devait être le collisionneur de protons le plus puissant du monde, l'UNK (Complexe d'accélération et de stockage [332]), avec une énergie de 3 TeV par faisceau (soit presque autant que l'énergie disponible pour les expériences du LHC en 2011, qui a atteint 3,5 TeV). Mais après les tentatives de réformes économiques de M. Gorbatchev et la perestroïka, l'économie soviétique s'est mise à décliner fortement, et le projet a été finalement abandonné – somme toute assez tard, en 1996 seulement. La communauté russe de physique des particules était donc chancelante, et les contributions importantes de la Russie aux activités du CERN ont contribué à aider le pays à préserver sa communauté. Bien que la Russie ne figure pas parmi les vingt pays membres du CERN, nombreux sont les physiciens russes à travailler sur le projet LHC, et on a pu [333] dénombrer que près de cinq cents d'entre eux ont, à un moment ou un autre, contribué au projet ATLAS.

Comment la Russie a-t-elle été impliquée dans la Collaboration ATLAS à une époque particulièrement turbulente de son histoire ? Il nous faut, pour le comprendre, remonter à l'époque de la guerre froide. À cette période, le CERN était l'un des très rares endroits, si ce n'est le seul au monde, où les scientifiques soviétiques avaient la possibilité au quotidien de collaborer librement et ouvertement avec leurs homologues européens et américains. C'est ce qui rendit possible l'engagement du CERN dans une certaine éthique de la collaboration internationale en

329. Oksana Dmitrieva, députée de Saint-Pétersbourg, *Le Courrier de Russie*, 18.012012.

330. Voir § 2.6.3 p. 70.

331. En russe, ИФВЭ (Институт физики высоких энергий), devenu depuis la dissolution de l'Union soviétique un centre scientifique national : Государственный научный центр Российской Федерации Институт физики высоких энергий (ГНЦ ИФВЭ).

332. En russe, Ускорительно-накопительный комплекс (УНК). Voir [Gurov et Dernovoï 1995], ainsi que le site http://www.rustunnel.ru/articles/20.html.

333. Merci au coordinateur des ressources Markus Nordberg et au secrétariat ATLAS d'avoir établi ces statistiques.

recherche fondamentale [334] : interdisant toute forme d'implication militaire, elle vise à « *l'encouragement de la coopération internationale dans la recherche nucléaire* », et à « *l'encouragement de contacts entre chercheurs, l'échange de chercheurs, la diffusion d'informations* ». Pour bien comprendre de quelle manière le CERN fut en mesure d'honorer ses engagements dans le cas de l'Union soviétique, décrivons brièvement quel était alors le fonctionnement de la communauté russe de physique des particules.

En 1956, l'institut commun pour la recherche nucléaire JINR (*Joint Institute for Nuclear Research* [335]) est fondé à Dubna, à 120 km au nord de Moscou, grâce à une convention qui est clairement inspirée du modèle du CERN. Tout comme le CERN, le JINR est aujourd'hui encore une institution réellement internationale constituée de dix-huit états membres de l'ancien bloc de l'Est, et elle entretient des liens étroits avec le CERN. La collaboration entre les institutions scientifiques soviétiques et occidentales était parfaitement dans l'esprit des fondateurs du CERN, et la création en 1958 à Protvino / Serpukhov de l'IHEP, l'établissement phare de la recherche en physique des particules soviétiques, avait pour objectif dès ses débuts de renforcer la collaboration internationale. L'un des projets de collaboration fut la construction et l'opération d'un synchrotron à protons de 70 GeV, dénommé U-70, qui était à l'époque le plus grand du monde. Des accords de coopération scientifique et technique furent signés par le Comité d'état sur l'utilisation de l'énergie atomique soviétique, d'une part le 11 octobre 1966 avec le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) français, et d'autre part le 4 juillet 1967 avec le CERN [Tyurin 2003]. L'accord de 1966 prévoyait la construction et la livraison à Protvino d'une grande chambre à bulles baptisée Mirabelle [336]. Celle-ci était la sœur jumelle de la chambre à bulles Gargamelle fournie au CERN par le CEA en 1968, et qui est célèbre pour avoir permis la découverte des courants neutres en 1973 [Galison 2002, chap. 4]. L'accord avec le CERN comprenait la conception et la construction conjointe d'éléments de détecteurs, ainsi que la préparation et la mise en œuvre d'expériences communes. L'une des expériences qui fonctionna sur U-70 fut menée par une équipe commune de physiciens IHEP–CERN, et les données qu'elle enregistra furent exploitées à la fois au CERN et aux États-Unis.

Nicolas Koulberg, un Cernois qui fut longtemps la personne de contact entre le CERN et la Russie, consacra les années 1968 à 1973 à aider les scientifiques et ingénieurs soviétiques et du CERN à s'adapter mutuellement à l'environnement des autres – les scientifiques soviétiques et leur famille vivant à Genève, et le personnel du CERN et du CEA [337] et leur famille vivant à Serpukhov.

> *La situation politique en Union soviétique était très difficile. […] La Russie n'était pas un pays libre en ce temps-là. Nous étions derrière le Rideau de fer et les règles étaient strictes. Mais les Soviétiques ont vite compris que la collaboration exigeait plus d'ouverture de leur part. La situation a vraiment progressé quand nous sommes parvenus à convaincre les autorités que les gens étaient invités au CERN pour y partager leur savoir, et non pour y être espionnés. Officiellement, les règles étaient toujours en vigueur. Mais en pratique elles s'appliquaient plus souplement.* [338]

334. Voir l'article 2 de la Convention pour l'établissement de l'Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire (1953). Disponible en ligne, http://council.web.cern.ch/council/fr/strategieeuropeenne/convention.html

335. En russe, Объединенный институт ядерных исследований (ОИЯИ).

336. Les chambres à bulles sont des détecteurs électroniques précurseurs des détecteurs électroniques modernes. Elles contenaient du gaz sur-pressurisé dans lequel les particules incidentes créaient des traces de vapeur "sursaturée" en traversant le volume de la chambre. Des caméras optiques spéciales enregistraient alors ces traces, qui étaient ensuite analysées visuellement.

337. Pour la petite histoire, Yves, l'ingénieur en charge du bureau d'étude au CEA pour le toroïde d'ATLAS, est l'un de ceux qui avaient accompagné la chambre à bulles Mirabelle à Protvino.

338. http://public.web.cern.ch/Public/fr/People/Koulberg-fr.html, interview datant de septembre 2008.

Les expériences conjointes initiales n'ont pas été uniquement menées avec le CERN. Elles ont regroupé d'autres instituts européens. Ainsi, par le biais du CERN, tous les physiciens européens ont trouvé porte ouverte à l'Est et ont pu rencontrer en URSS des savants qui sont à leur tour venus à Genève, au cours des décennies suivantes, apporter leur contribution intellectuelle, financière et matérielle. Les collaborations entre le CERN et la Russie ont donné de bons résultats scientifiques. « *Nos premiers travaux en Russie*, poursuit Koulberg, *nous ont permis de comprendre les gens et leurs façons de travailler. Nous partagions le même esprit, travaillant pour la science et pour améliorer les connaissances. Mais nous devions nous assurer de cette base commune avant de devenir de véritables partenaires travaillant sur un pied d'égalité.* » Depuis, les Russes participent à toutes les étapes des expériences, et certains groupes formés à l'époque ont travaillé ensemble pendant plus de trente ans. « *Sans ces contacts de longue date et la compréhension mutuelle qui s'est progressivement construite, les collaborations actuelles, notamment pour le grand collisionneur de hadrons (LHC), n'auraient pas été possibles.* » Et en effet, mon partenaire russe Alexandre, plus que sexagénaire en 2000, fait partie de ces scientifiques russes qui ont activement contribué à ces échanges.

Les instituts de recherche russes ont participé à plus de la moitié des soixante-sept programmes de R&D pour les détecteurs du LHC. C'est d'autant plus remarquable que cette phase correspond à la période qui a suivi l'implosion de l'Union soviétique en 1991. Cette époque a en effet conduit à un renforcement des liens entre le CERN et les instituts de recherche russes en physique des particules. En juin 1993, le président du Conseil du CERN, Hubert Curien, passait en revue les perspectives de coopération scientifique et technique avec la Fédération de Russie nouvellement promue au premier plan. Le gouvernement russe avait alors manifesté un « *vif intérêt* » [339] pour la poursuite et le renforcement de la coopération de longue date avec le CERN dans le domaine de la physique des hautes énergies. Le représentant spécial de M. B. Saltykov, ministre de la science de la Fédération de Russie, le professeur A. Skrinsky, avait déclaré : « *Les instituts de recherche russes, aidés par les secteurs de grande classe de notre industrie, ont la ferme intention d'apporter une importante contribution à la construction et à l'utilisation de cette nouvelle installation.* » L'accord existant a été mis à jour et signé le 30 octobre de la même année à Protvino. À cette occasion, le ministre Saltykov et le Pr Carlo Rubbia, Directeur-Général du CERN, ont « *exprimé leur satisfaction devant cette excellente collaboration et manifesté leur souhait d'une participation accrue dans les expériences menées au CERN comme en Russie.* » En effet, depuis le milieu des années 1960, cette collaboration ne s'est pas limitée à l'utilisation des installations du CERN, et les instituts russes ont plusieurs fois concouru avec leurs compétences au développement d'installations fondamentales du CERN. De plus, un certain nombre d'expériences internationales auxquelles ont participé des personnes du CERN ont été effectuées en Russie, et en particulier à IHEP (Protvino). Les autorités russes déclarent enfin que « *les instituts de recherche russes, aidés par des secteurs particulièrement performants de l'industrie russe, ont la ferme intention d'apporter une importante contribution à la construction et à l'utilisation du Grand collisionneur de hadrons (LHC)* » [340].

Au cours la période de transition entre l'époque soviétique et la fin des années 2000, l'implication des physiciens russes dans les projets du CERN a donc été d'une importance primordiale pour maintenir une présence russe dans le domaine de la physique des hautes énergies. À cette fin, plusieurs accords de collaboration concernant le projet LHC – dénommés « Protocoles » – ont été signés entre le

339. http://press.web.cern.ch/Press/PressReleases/Releases1993/PR06.93FJuneCouncil.html, communiqué de presse du CERN, juin 1993.

340. http://press.web.cern.ch/Press/PressReleases/Releases1993/PR10.93FRussiesigne.html, communiqué de presse du CERN, octobre 1993.

CERN et la Russie. L'objectif de certains de ces accords consistait à accompagner la réorientation du complexe militaro-industriel russe vers des applications pacifiques civiles. Ces efforts ont été supportés par l'Union Européenne à travers un certain nombre de programmes comme l'*International Science and Technology Centre* (ISTC [341]) et l'*International Association* (INTAS [342]). Les relations entre la Russie et le CERN sont donc gérées au plus haut niveau à la fois du CERN et de la Russie, à travers des réunions périodiques du comité « *5+5* » auxquelles participent des membres du Directoire du CERN ainsi que des représentants du ministère de la Science et du Minatom (le ministère en charge de la physique nucléaire et des particules au sein de la Fédération de Russie).

Compte tenu des turbulences politiques et économiques qui ont prévalu en Russie pendant les années 1990, ce n'est qu'à partir de 1998 que le gouvernement put formellement initier sa contribution au projet ATLAS. Et c'est à travers une contribution *in kind* (en nature) que pouvait être assuré un rôle visible et actif de la Russie dans le projet, tout en minimisant l'exigence de mettre sur la table de trop rares devises. De plus, la contribution en nature nourrit l'activité de l'industrie russe en des temps économiquement difficiles. Avec son expérience dans l'exploitation de grandes usines sidérurgiques et dans la production de gros composants mécaniques, si les projets pour lesquels le pays était sélectionné étaient judicieusement choisis, l'industrie russe pouvait espérer assez aisément respecter les critères de sélection imposés par ATLAS à ses fournisseurs potentiels. Dans cet esprit, le livrable “Pieds et rails” constituait un excellent candidat pour la Russie.

7.2.3 Un “*Common Fund Item*”

Nous allons maintenant expliciter ce que signifie cette contribution en nature de la Russie au projet ATLAS. Nous avons présenté au § 2.6.3 p. 70 le MoU, *Memorandum of Understanding*. Ce document de sept pages à peine définit les principes de base de fonctionnement de la Collaboration. Ils sont au nombre de trois [Jenni, Nordberg et Boisot 2011, 20].

Le premier de ces principes est contenu dans le concept de *livrable* : le MoU définit pour chaque institution (université, institut de recherche ou regroupement) un livrable pour une valeur budgétaire donnée (la valeur CORE). Chaque institution s'engage alors à construire et livrer ces composants du détecteur. L'idée sous-jacente du principe du livrable est que les risques techniques et financiers soient aussi décentralisés que possible, chaque agence de financement s'assurant que les institutions qui en dépendent sont suffisamment dotées. C'est pour cette raison qu'il n'existe pas de *central contingency fund* (fonds central de compensation), même pour les projets communs dont le management d'ATLAS a la responsabilité directe (voir le deuxième principe). Un projet est toujours vulnérable aux risques technologiques ainsi qu'aux variations de prix des matériaux et des composants. Ainsi que le précisent le porte-parole et le coordinateur des ressources d'ATLAS, « *working within a fixed financial framework forces the community as a whole to absorb the resulting uncertainty and to be inventive in its use of available, scarce resources* » [343]. Cette approche décentralisée exige naturellement – nous l'avons vu en particulier au cha-

341. http://www.istc.ru

342. INTAS était une association internationale indépendante dont les membres comprenaient l'Union Européenne, les états membres de l'Union Européenne et d'autres pays. L'objectif principal d'INTAS était la promotion de la coopération scientifique entre les pays membres d'INTAS et les membres de la Communauté des États Indépendants (CEI). Elle a été fondée en 1993 en tant qu'association de droit belge, mais elle a été mise en liquidation en janvier 2007.

343. « Le fait de travailler à l'intérieur d'un cadre financier prédéfini oblige la communauté dans son ensemble à absorber l'incertitude résultante et à être inventive dans son utilisation des ressources disponibles qui sont limitées. » [Jenni, Nordberg et Boisot 2011, 21]

pitre 6, et nous le reverrons ici – un coût supplémentaire de coordination qui doit être pris en compte.

Le deuxième principe définit les *Common Projects*, ces composants pour lesquels aucun institut soit ne souhaite, soit n'est techniquement en mesure de se proposer d'en être le porteur. Ce peut être parce que le projet est trop coûteux, trop complexe, trop innovant ou trop risqué, ou tout cela à la fois. Ils sont alors déclarés propriété commune. Ces composants sont directement gérés par le management d'ATLAS, avec la philosophie de la valeur budgétaire prédéfinie CORE. Cette valeur des *Common Projects items* (composants des projets communs) est ensuite répartie entre les agences de financement en proportion de la valeur CORE de l'ensemble des livrables pris en charge par les institutions qui en dépendent financièrement. Les objets des *Common Projects* peuvent être fournis soit comme des contributions *in kind* des institutions participantes, et sont alors à ce titre directement financés par leurs agences de financement respectives ; ou bien c'est une contribution financière qui est versée *in cash* au *Common Fund* (le fonds commun). À la date de la signature du MoU en 1998, ce sont plus de deux cent millions de francs suisses de contre-valeur qui étaient classifiés comme *Common Projects*, pour un total un peu inférieur à cinq cent millions. On y retrouve les toroïdes, le solénoïde et les installations cryogéniques afférentes, ainsi que les blindages et, ce qui nous intéresse ici, les structures de support du détecteur.

Quant au troisième principe, il consiste à accorder à chaque institution des droits égaux au sein du *Collaboration Board*, et à organiser les principes de désignation par vote des principaux responsables de la Collaboration. Retenons sans détailler que c'est le *Collaboration Board* qui endosse les contributions en nature pour les *Common Projects*.

Le projet des Pieds et rails est crédité d'une valeur CORE de quatre millions huit cent mille francs suisses. La Russie fait part en 1999 au *Collaboration Board* d'une « *déclaration d'intérêt* » au titre de sa contribution *in kind* au *Common Fund* d'ATLAS. La motivation de la décision de la Russie à s'intéresser au projet des Pieds et non pas par exemple aux composants clé que sont les aimants, est révélatrice des différences à l'époque entre les contributions des différents acteurs et leur capacité réelle. Alors que certains pays comme la Grande-Bretagne, par exemple, ont préféré contribuer aux *Common Projects* sous la forme de versements financiers, d'autres, compte tenu de leurs compétences et de leurs capacités industrielles particulières, ont souhaité faire des contributions *in kind* de composants de haute technologie – c'est le cas du Japon par exemple, qui fournit le solénoïde pour une valeur supérieure à 10 millions de francs suisses. Pour ce qui est de la Russie, compte tenu de la vulnérabilité du rouble après la crise de 1998, ainsi que des faiblesses de ses compagnies de haute technologie essentiellement orientées vers les industries aérospatiales, il semblait pertinent de s'appuyer sur les capacités de son industrie lourde. C'était un bon choix, à la fois pour la Russie elle-même et pour ATLAS, dans la mesure où cette contribution complétait utilement et de manière pertinente celle d'autres pays.

La décision est prise au plus haut niveau (que ce soit par le *Collaboration Board*, organe suprême d'ATLAS, ou par le comité « *5+5* » CERN / Russie réunissant le Directoire du CERN et des représentants des ministères russes) d'attribuer à la Russie le projet des Pieds comme contribution *in kind* en tant que *common fund item*. Elle implique deux conséquences pour le projet : d'une part, il sera géré par le management d'ATLAS – qui en délègue la responsabilité au chef du Bureau technique de la division de physique des particules du CERN, lequel met ainsi à disposition d'ATLAS des ressources dont la Collaboration ne dispose pas ; et d'autre part le projet est directement financé par la Russie – en l'occurrence des contributions des deux ministères impliqués, celui de la science (qui finance le JINR de Dubna) et celui des affaires atomiques, le *Minatom* (dont dépend l'IHEP de Protvino). C'est

dans le cadre de la sécurisation de ce financement que j'ai eu l'occasion, le 12 septembre 2000, de me rendre à Moscou dans l'un de ces ministères pour présenter le projet en détails aux autorités russes. Sans vouloir complexifier davantage, ni entrer dans des arcanes diplomatiques, il convient de prendre en compte que le financement russe de ce projet bénéficiait en outre en partie d'une aide provenant du fonds central du Directeur Général du CERN dans le cadre du partenariat de développement CERN–Russie. Autrement dit le CERN aide la Russie à contribuer à ATLAS. Une pléthore d'entités impliquées et concernées au premier chef par la réussite du projet…

7.3 Le projet *Pieds et rails* d'ATLAS

Tout ceci explique la complexité de la structure de management du projet. Lors de la réunion à Moscou, le coordinateur des ressources Peter Schmid avait précisé :

> *Project Organization – P.S. recalled that in ATLAS the responsibility for Common Projects lies with the Technical and the Resources Coordinators. On the question of A.Z. if ATLAS would appoint a Project Leader for the "Feet&Rails" project P.S. replied that he preferred the project leadership to be jointly executed by the following four persons: by the Resources Coordinator (P.S.) and the Project Engineer (B.N.) for ATLAS and by the Russian National Contact Physicist (A.Z.) and the Russian Project Engineer (A.F.) with the following sharing of responsibilities: P.S. and A.Z. would jointly handle all matters of funding, contracting, payments and other organizational matters. P.S. would ask the Technical Coordinator (M.Price) to delegate his authority to B.N. who, together with A.F. would be responsible for all technical matters. Formally, final technical responsibility would remain with B.N. who would also report to the Technical Coordinator. As long as any impact on costs remained within 5% of any contract value B.N. and A.F. could take decisions without further approval by P.S. and A.Z.* [344]

La Figure 7.3 présente la vision de cette structure managériale, adaptée par le nouveau coordinateur technique Marzio Nessi lors de son entrée en fonctions. C'est cette structure que j'ai présentée au TMB (*Technical Management Board*) en avril 2001 [345], peu après que le choix du producteur russe avait été officialisé après la phase de vérifications techniques : le protocole de lancement de la production avait été signé une semaine plus tôt, on en trouvera les signataires dans le Tableau 7.2 p. 226 à la fin du chapitre.

Le comité de pilotage avait pour mission d'assurer le suivi technique du projet, sous la responsabilité du coordinateur technique. Le manageur technique que nous observerons principalement dans le cas présent est l'ingénieur projet, promu Chef de Projet par délégation du coordinateur technique, dans une structure de management de type collégial. Le rôle fondamental d'un autre manageur technique, l'ingé-

344. « Organisation du projet – P.S. rappelle que, au sein d'ATLAS, la responsabilité des projets communs incombe au coordinateur technique et au coordinateur des ressources. À la question d'A. Z. de savoir si ATLAS allait nommer un chef de projet pour le projet « Pieds & Rails », P. S. répond qu'il préfère que le projet soit mené par quatre personnes : par le coordinateur des ressources (P. S.) et l'ingénieur projet (B. N.) pour ATLAS, et par le physicien de contact national russe (A. Z.) et l'ingénieur projet russe (A. F.), avec le partage de responsabilités suivant : P. S. et A. Z. géreront toutes les questions de financement, de contrats, de paiements et autres questions organisationnelles. P. S demandera au coordinateur technique (M. Price) de déléguer son autorité à B. N. qui, avec A. F., sera responsable de toutes les questions techniques. Formellement, la responsabilité finale restera à B. N, qui répondra également devant le coordinateur technique. Tant que les impacts sur les coûts resteront inférieurs à 5% de toute valeur contractuelle, B. N. et A. F. pourront prendre des décisions sans approbation supplémentaire de P. S. et A. Z. » Extrait des minutes, *2nd F&R WG meeting*, Moscou, 12.09.2000.

Ces minutes comportent d'autres informations qui restent confidentielles, même douze ans après.

345. Bertrand, présentation au TMB, avril 2001, p. 4.

nieur-projet russe, sera également observé, et en particulier les relations entre pairs qui s'instaurent entre eux.

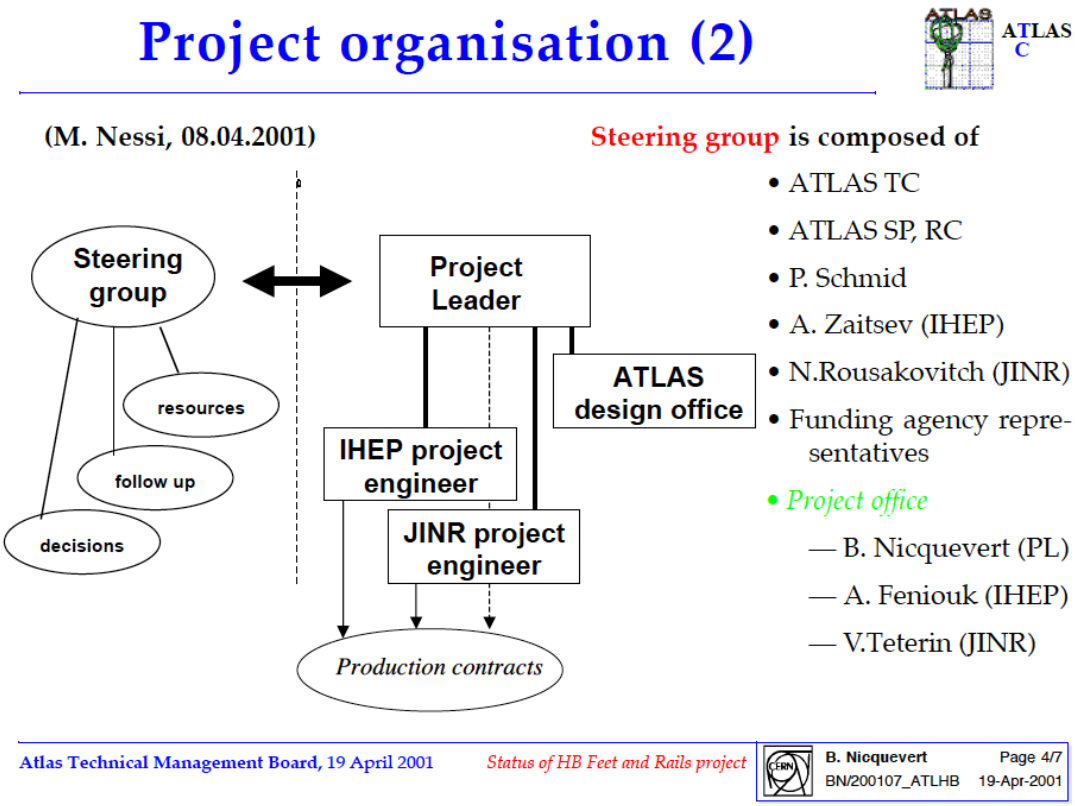


Figure 7.3 : Structure de management (simplifiée) du projet des Pieds et rails

Une version descriptive (et non pas prescriptive, comme la précédente) de l'organisation de projet montrerait la complexité réelle des interfaces et des interactions entre les différentes parties prenantes. La description du cas en donnera une bonne idée.

7.3.1 Le périmètre technique du projet

Nous avons présenté au chapitre 2, et commenté au chapitre 5 l'architecture du détecteur ATLAS (voir la Figure 2.8 p. 60). Cette architecture, avec un spectromètre à muons doté d'un immense toroïde à air d'une part, et de calorimètres extrêmement massifs dans la partie centrale d'autre part, exige une structure pour supporter l'ensemble du système des bobines toroïdales et des chambres à muon qui y sont montées. Il fallait également procurer à l'expérience un système de rails sur lesquels les composants internes puissent être déplacés, que ce soit pour leur mise en place initiale ou pour les accès ultérieurs : calorimètres, disques de blindage avec une partie du spectromètre à muons, et toroïdes bouchons. Le plus lourd de ces composants atteint la bagatelle de 1600 tonnes, il demeure heureusement en permanence à sa place une fois installé. Parmi ceux qui doivent être rétractés en position de maintenance, le plus lourd, le calorimètre étendu, atteint tout de même près de 1000 tonnes pour plusieurs mètres de diamètre. Quand on ajoute encore l'exigence que la flexion des rails au cours du mouvement de ces charges ne doit pas dépasser 1 mm afin de ne pas détruire la chambre à vide qui reste en place le

long de l'axe du détecteur, on prend un peu plus la mesure du défi : c'est ce que je me suis plu à appeler de la « *grosse mécanique… de précision* ».

De toutes ces contraintes dérive le choix d'une conception illustrée à la Figure 7.4, en neuf paires de pieds parallèles contenant les deux bobines inférieures du toroïde, et supportant deux rails en leur sommet. Les contraintes ayant amené à ce design, qu'elles soient géométriques, mécaniques ou physiques, sont très nombreuses, et nous en verrons quelques-unes à l'œuvre dans le déploiement du cas. Nous renvoyons au chapitre correspondant du TDR de la TC [ATLAS Technical Coordination Team 1999, vol. 13:chap. 15, p. 235-247] pour une description et une justification du design. L'on retiendra la contrainte du matériau non magnétique afin de ne pas perturber les lignes de champs de l'aimant, mais qui soit suffisamment résistant compte tenu des charges en jeu (plus de 7000 tonnes au total), ce qui impose le choix d'un acier amagnétique [346]. Le défi de la conception consistait à trouver l'optimum entre un ensemble de contraintes contradictoires : minimiser la quantité de matériau pour éviter les interférences avec le processus d'identification des particules ; tout en maximisant cette quantité pour éviter les déflexions structurelles.

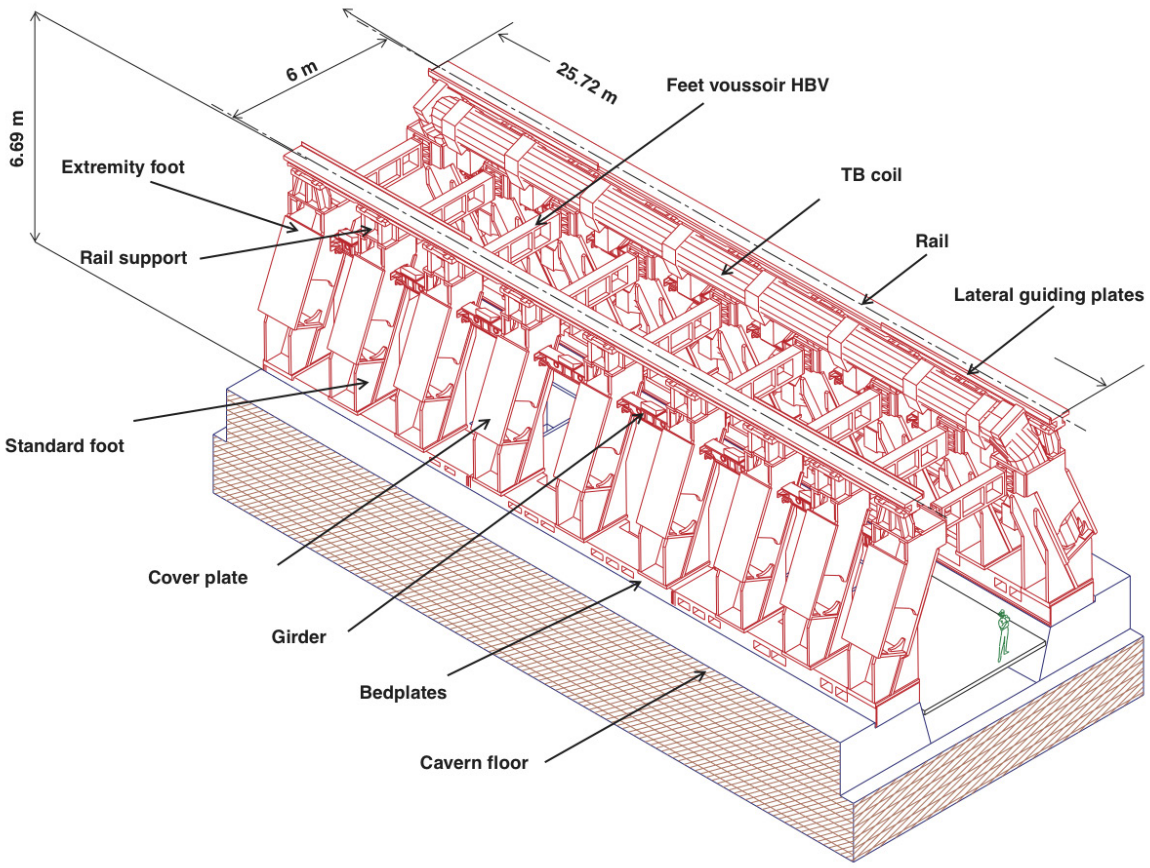


Figure 7.4 : Vue d'ensemble des délivrables du projet « Feet & Rails »

Modèle 3D Euclid, Olivier J.
Vue publiée à l'origine dans le TDR de la TC, Figure 15-1, janvier 1999.

346. Pour les amateurs : c'est un acier inoxydable dit austénitique, fortement allié au nickel et au chrome, à base teneur en carbone, nitruré, de type EN X5CrNi18-10, proche du grade américain AISI 304 LN.

Le résultat est une structure en acier soudé et boulonné, dont on trouve une image à la Figure 7.5. Sur cette photo, outre l'évolution de la forme des pieds par rapport à la version 1999 présentée à la Figure 7.4, on peut observer le design final des poutres, ainsi que la présence des berceaux dans la partie inférieure des pieds.

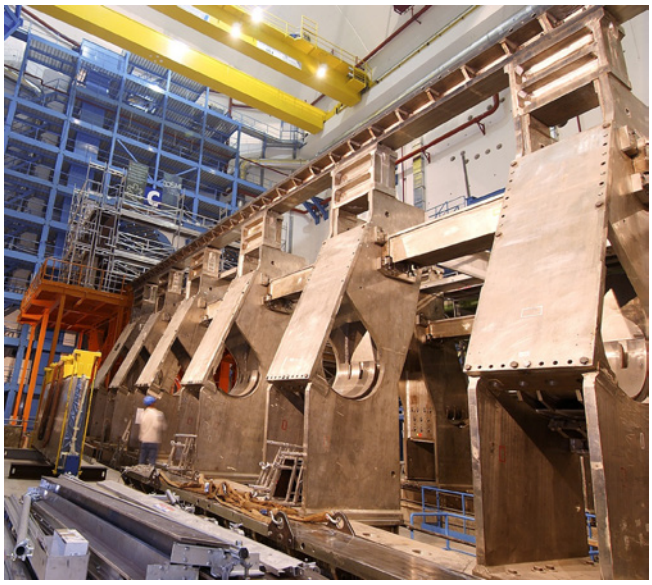


Figure 7.5 : Montage à blanc dans la caverne

Photo CERN ATL-PHO-INST-2004-103, mai 2004

Quelques chiffres pour finir : les pieds et rails représentent une masse de plus de 400 tonnes, les pieds font plus de 5 mètres de haut, et exigent des précisions de fabrication de l'ordre de quelques millimètres. Quant aux rails de plus de 25 mètres de long, constitués de trois morceaux d'environ 9 mètres, ils exigent une planéité inférieure au millimètre. Ajoutons que le délai de fabrication accordé par le planning global du détecteur était d'à peine un peu plus de deux ans : on en déduit que le choix du fabricant était un élément clé du succès du projet… et de tout ATLAS, puisqu'il se situait en tout premier de la longue chaîne d'installation du détecteur !

Le séminaire technique « *Le projet "Pieds et rails" du détecteur Atlas et les contributions des divisions techniques* » du 17 novembre 2004 [347] fournit une description de l'ensemble du projet. Organisé de manière séquentielle, il donne une bonne synthèse de toutes les phases du projet, depuis la définition du besoin jusqu'à l'installation, et explicite le fait que les différentes parties prenantes avaient des objectifs très variés. Au sein même de la collaboration ATLAS, les physiciens voulaient minimiser l'impact des pieds sur la performance des détecteurs, alors que la Coordination technique souhaitait assurer la fonctionnalité de supportage pour le meilleur prix et en un temps le plus réduit possible. En interne même d'ATLAS, l'équipe projet des Pieds et rails se trouvait donc prise entre deux feux. Quant aux objectifs de la firme, ils étaient évidemment très différents : relever le défi technique (principalement celui de soudures sur plaques d'acier inoxydable épaisses de 10 cm pour certaines, et avec une teneur en ferrite très réduite), en tenant les délais globaux, et en minimisant les coûts de production. Précisons maintenant de quelle firme il s'agit, et dans quelle contexte elle a été introduite dans le projet.

7.3.2 Contribution *in kind* et choix d'une firme

Qui dit contribution *in kind* de la Russie dit production sur le territoire national russe, donc passation des contrats de production avec des firmes russes. La procédure qui a mené au choix de la firme *Izhorskie Zavody* [348] à Kolpino, dans la banlieue sud-est de Saint-Pétersbourg aura mis en concurrence plusieurs firmes proposées

347. Disponible en ligne, https://edms.cern.ch/document/524031/1.

348. En russe, Ижорские Заводы, les Ateliers d'Izhora (prononcer *iJora*), du nom de la rivière qui traverse la ville de Kolpino dans laquelle ils sont implantés, à une vingtaine de kilomètres au sud-est de Saint-Pétersbourg. C'est cette firme qui est désignée par le pseudonyme d'INGENIO dans [Nicquevert et al. 2011, 190].

par les autorités russes, sur la base de critères financiers, organisationnels (expériences similaires) et techniques – en particulier la soudure d'acier inoxydable. Cette phase de choix et de qualification est décrite plus en détails dans le chapitre « *From Russia with Love* » [Nicquevert et al. 2011, 189-190]. Je voudrais ici souligner le contexte dans lequel la production a été finalement lancée en 2001.

Dans les années 2000-2001, la Russie entre tout juste dans l'ère post-eltsinienne [349], avec une économie secouée et désorganisée en particulier par la crise financière russe de 1998. L'industrie offre une faible compétitivité sur le marché mondial, mais le gouvernement souhaite la relancer et diversifier les sources de recettes extérieures, qui restent beaucoup centrées sur l'exportation d'hydrocarbures. La procédure de contribution *in kind* est donc conforme à ce souhait.

Le choix entre les différentes entreprises [350] est empli d'incertitudes, et la gestion du risque n'est pas évidente. Nous penchons pendant longtemps pour un partage de la production entre deux sites différents, afin de minimiser les risques industriels de faillite ou d'incapacité technique survenant en cours de production. L'autre site complémentaire de l'usine pétersbourgeoise était localisé dans une grande usine de l'Oural, de taille comparable. Un troisième site biélorusse (sous financement par Dubna) est même envisagé pour la production des semelles (les *bedplates*) sous les pieds. Le management opte finalement pour un seul producteur en mesure d'assurer la chaîne complète, depuis la fourniture de l'acier jusqu'à la livraison des composants assemblés, après découpage, assemblage, soudure et usinage final. C'est un risque, puisque le projet dépend désormais d'un seul fournisseur. Mais l'autre ligne était également risquée, avec en outre une charge en terme de suivi qui aurait pu également être très dommageable au projet. Cette hésitation stratégique a toutefois une conséquence (mineure) sur le design : le nombre d'interfaces entre les composants avait été minimisé et simplifié, pour éviter une phase d'assemblage génératrice d'erreurs potentielles. Quand le choix est fait, il est naturellement trop tard pour revoir le design et en imaginer une version plus intégrée.

La firme sélectionnée, Ижорские заводы (abrégé ci-après IZ), est bien connue en Russie. Fondée sous Pierre le Grand en 1722 [Bourim et Efimova 1997], c'est l'une des usines les plus importantes dans le domaine de l'ingénierie lourde : chaudronnerie nucléaire, équipement pour les industries pétrochimiques et les mines, production d'aciers et d'équipements spéciaux de grande taille. C'est en fait un conglomérat de firmes, chacune d'entre elles se spécialisant dans un domaine. Ce n'est donc pas à un unique représentant d'IZ que les représentants d'ATLAS ont affaire, mais parfois à une douzaine simultanément, chacun dans leur domaine : chargé d'affaires, bureau d'études, fonderie, métallurgie, soudage, usinage, contrôle qualité… Chacune de ces entités possède un savoir-faire ancestral, tant du point de vue technique qu'organisationnel, qui opère dans un environnement économique et politique en pleine évolution, et de toute façon radicalement différent de celui dont les membres d'ATLAS sont familiers.

C'est tout l'intérêt de la présence des physiciens russes, surtout en provenance de l'IHEP de Protvino : ils vont ainsi servir de médiateurs entre l'une des plus grandes collaborations de physique des particules du monde (à laquelle ils appartiennent d'ailleurs) et l'une des plus grandes usines de Russie (pays dont ils sont d'ailleurs ressortissants). C'est à eux – et en tout premier au physicien et ingénieur Alexandre, visible sur la Figure 5.9 – qu'a incombé la tâche d'atténuer les différences politiques et culturelles qui n'ont pas manqué d'émerger, afin d'assurer la meilleure adéquation possible entre les capacités de production de la firme IZ et les exigences spécifiques de la Collaboration ATLAS.

349. Pour mémoire, Boris Eltsine a transféré le pouvoir à Vladimir Poutine le 31 décembre 1999.

350. Bertrand, rapport au TMB, Avril 2001, p. 3.

7.3.3 Un projet réussi ?



Figure 7.6 : Inspection sur site du premier pied

De gauche à droite, les responsables ATLAS, IZ (bureau d'études) et IHEP du projet
Photo Bertrand, DSCN1355, 30 septembre 2002

Dans la présentation de lancement d'avril 2001, la date annoncée de livraison des équipements était octobre 2003. À cette date, les premiers équipements (les semelles) ont effectivement été livrés, ainsi que les deux premiers pieds. Les autres équipements ont pris un peu de retard, en raison principalement de la révision de conception que nous allons maintenant décrire. Mais ce retard était en fait égal au retard pris sur le chantier de génie civil par la préparation de la caverne : la dérive était donc acceptable, et sans impact sur le chemin critique du projet global. Fin décembre 2003, tous les équipements étaient terminés en Russie, inspectés et validés. Fin janvier 2004, tout était disponible au CERN, à temps pour l'installation du détecteur. Côté échéances, le défi a donc été relevé avec succès.

Côté performance technique, en dépit de quelques déviations dimensionnelles mineures, les pieds et rails étaient conformes aux spécifications. L'installation des pieds proprement dite, puis la mise en place des bobines du toroïde (voir la Figure 6.4 p. 153), et enfin le chargement progressif par les composants internes se sont globalement déroulés conformément aux attentes, sans poser de problème particulier autre que les ajustements nécessaires et habituels à ce type de projet. Par ailleurs l'a-magnétisme (en particulier celui des soudures) est satisfaisant pour les physiciens, puisque aucune perturbation des trajectoires de particules n'a été relevée (voir la Figure 2.9 p. 62).

En ce qui concerne le coût, autre critère de réussite du projet, la *CORE value* était de 4,8 millions de francs suisses (estimation de 1995). Le total des facturations n'atteint pas le montant de 4,3 millions. C'est donc un demi-million de francs suisses qui ont été économisés au cours du projet, soit plus de 10% ! Qu'est-ce qui a permis cette économie, en dépit des surcoûts pourtant prévisibles liées à la révision assez importante du design en 2002 ? C'est en fait l'approche sur la question de l'évaluation du prix par la firme. Afin de réduire les coûts, la conception réalisée par le Bureau technique du CERN avait cherché à simplifier les formes afin d'optimiser les processus de production, et en particulier de minimiser les opérations d'usinage (longues et coûteuses, en particulier sur des plaques de plusieurs centimètres d'épaisseur), quitte à conserver ici ou là de la matière non structurellement nécessaire. Or, dès la phase de négociation, la firme russe avait proposé une formule basée sur le prix au kilogramme par pièce finie [351] ! Quoique surprenante pour un ingénieur occidental (formé à l'idée que c'est “faire du copeau” qui coûte cher), cette formule avait été acceptée par ATLAS, en partant du principe que les usinages complémentaires qui pourraient se décider après la signature du contrat n'auraient pas d'incidence sur le coût final. En fait, si l'on élaborait alors un design plus astucieux qui permettait de réduire le poids final des composants, on parvien-

351. L'un des partenaires russes du projet nous a confié un jour que la raison pour laquelle cette formule était utilisée tenait au fait que la firme n'était pas en mesure, faute d'une comptabilité analytique, d'estimer ses propres coûts internes…

drait même à en réduire le coût, en dépit du travail supplémentaire exigé. Or, c'est précisément ce qui s'est passé en 2002 : le nouveau design conduisit à une solution plus compliquée, imposant des usinages complémentaires plus importants, et impliquant en fait une réduction assez sensible du poids des éléments concernés – donc de leur coût final, selon la formule contractuelle. Ainsi, même en tenant compte des quelques surcoûts facturés au niveau du bureau d'étude d'IZ pour la préparation et l'adaptation de la documentation technique, le coût final des composants s'est révélé moins élevé que le coût initial. C'est donc une pratique héritée de la période soviétique, la formule du prix au kilogramme fini, qui a permis aux deux parties de s'adapter informellement au changement de situation. On trouvera dans l'étude du cas russe [Nicquevert et al. 2011, 195-200] une interprétation de ce cas par « *absorption de l'incertitude* » grâce à des négociations constructives et une adaptation mutuelle.

∴

Ces éléments de réussite objectifs incontestables n'effacent pourtant pas tout à fait, au niveau du manageur technique, le goût d'inachevé et la couleur un peu grisâtre que conservent dans sa mémoire certains aspects de ce projet à la fois stimulant et exigeant. Cela tient à des difficultés d'autres ordres rencontrées pendant cette phase de révision en 2002, et que l'interprétation du cas au niveau stratégique précédemment citée ne permet pas de saisir. Plongeons donc maintenant dans la description détaillée de cette phase, qui nous permettra de mieux voir le rôle des différents manageurs techniques impliqués.

7.4 Simuler le comportement

La crise survient début 2002, au cours du processus de lancement d'une vérification de la tenue mécanique de l'ensemble constitué de la structure chaude du toroïde et des pieds (Figure 7.7). Cette vérification est d'autant plus importante que, comme le notait le comité de revue en septembre 2000, « *the Barrel Toroid is a highly critical item for the ATLAS experiment. Any failure on this component could lead to catastrophic consequences.* » [352]

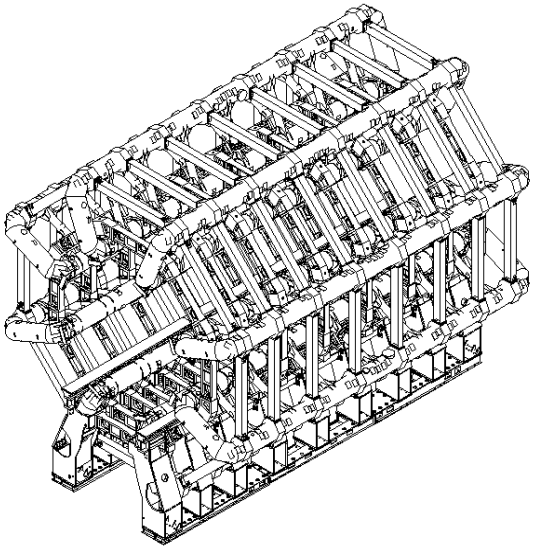


Figure 7.7: La structure chaude du toroïde avec les pieds

In Sun et al. (2004)

Dans cette section, nous allons expliciter la complexité de la tâche de calcul pour les objets mécaniques dont il est question, et retracer quelques éléments de l'histoire du projet qui expliquent l'origine de la crise. Nous soutenons ici la thèse que c'est un dysfonctionnement (collectif) de manage-

352. « Le Toroïde Barrel est un constituant hautement critique de l'expérience ATLAS. Tout échec sur ce composant pourrait conduire à des conséquences catastrophiques. » G. Bachy *et al.*, *Final Design Review of the Toroid Barrel – Report*, ATC-RT-ER-0001, 10 octobre 2000, p. 1.

ment qui en est à l'origine, due à une approche non systémique. C'est une gestion déficiente des interfaces mécaniques qui aurait, selon cette thèse, amené à une situation exigeant une redéfinition majeure du système des pieds, et une adaptation importante du système toroïdal, et ce à un stade avancé de chaque projet.

7.4.1 Interfaces entre modèles

Nous avons vu au chapitre 6 l'effet en retour de la conception des lattes sur la définition des enveloppes. La structure chaude est ici de retour, cette fois par son action mécanique, statique et dynamique. Quel est le problème du point de vue mécanique ? Il s'agit de modéliser un système soumis à un certain nombre d'efforts, pour en simuler le comportement et en quantifier les valeurs. Typiquement, il s'agit de déterminer les efforts intérieurs, les contraintes, déformations et déplacements, et de vérifier qu'elles ne dépassent pas d'une part les valeurs admissibles par les matériaux dont le système est constitué, d'autre part les limites imposées par le fonctionnement. C'est donc une démarche tout à fait classique de dimensionnement de systèmes mécaniques [353]. La difficulté n'est donc pas d'ordre globalement procédural, elle tient à plusieurs autres aspects :

1. la nécessité d'une *approche* dite *multi-physique*. Les calculs mécaniques doivent en effet prendre en compte trois sources d'actions mécaniques, qui ne sont pas indépendantes, mais couplées :
   - les poids des différents composants (1300 tonnes au total), avec le détail non négligeable que l'ensemble de la structure est légèrement incliné de 0,708 ° par rapport à la verticale ;
   - les actions dues aux champs magnétiques : en raison des forces de Laplace, les conducteurs subissent une attraction mutuelle, proportionnelle aux intensités respectives du champ magnétique et de l'intensité du courant. Ainsi chaque bobine subit une force radiale mutuelle équivalente au poids d'une masse de 1200 tonnes, à laquelle il faut rajouter l'effet aux extrémités (environ 240 tonnes) dû aux bobines du toroïde bouchon ;
   - les actions dues à la dilatation différentielle de la masse froide, dont nous avons

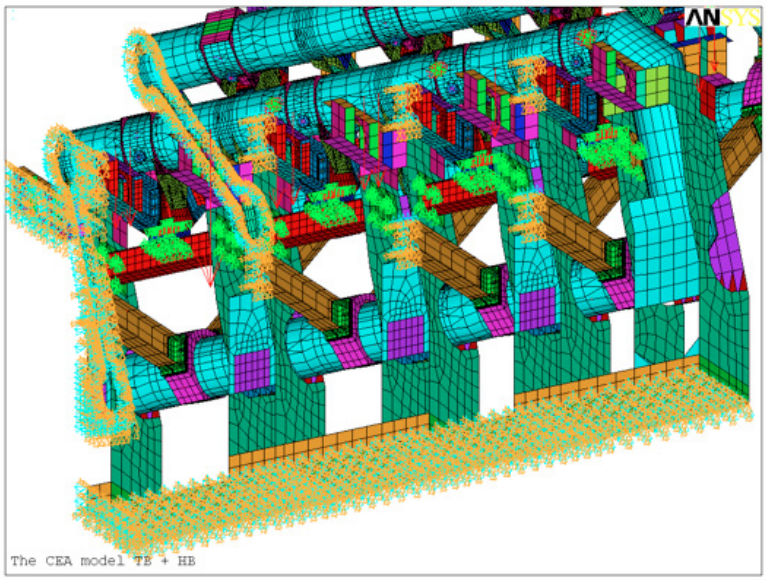


Figure 7.8: Le maillage du modèle global

Figure 1-3 du rapport technique Sun, oct. 2002

353. Voir par exemple, parmi la littérature abondante du domaine, le très didactique *Résistance mécanique des solides* [Lemaitre, Boucard et Hild 2007].

observé les effets dimensionnels notables lors de la crise des lattes relatée au chapitre 6 ;

- sans oublier l'effet de la pression atmosphérique sur l'enceinte à vide.

2. la taille et le nombre de *composants* qui entrent en compte dans le modèle, et les conséquences sur le type de maillage (Figure 7.8) et de choix d'éléments pour l'analyse par éléments finis. À titre indicatif, le modèle solide des pieds comporte près de 300 000 degrés de liberté. Quant au modèle du toroïde [354], il approche le million.

3. les différentes *configurations* de fonctionnement : quand l'aimant est en fonction ou non, partiellement ou non ; et avec différents scénarios de défaut – nous verrons que l'un d'eux contribua à la crise : le cas de la perte du vide d'isolation.

4. les *interfaces* et les *conditions aux limites*, c'est-à-dire la façon de prendre en compte les relations avec les voisins, qui sont en l'occurrence : les chambres à muons (qui chargent la structure chaude, et se comportent en première approximation comme des masses inertes) ; la structure froide (chargement interne au toroïde par l'intermédiaire des biellettes) ; et les pieds.

Les différents efforts cités induisent des déplacements relatifs entre certains éléments, en particulier au niveau des deux types de contacts entre les pieds et la structure chaude : au niveau des poutres (*girders*) qui supportent les boîtes de connexion, et au niveau des berceaux, qui supportent l'enceinte à vide au droit des étais (*struts*). Tout l'enjeu consiste à trouver la bonne façon de concevoir et de positionner ces interfaces. Déjà dans le rapport de revue finale de conception du toroïde, le comité relevait, concernant la question des enceintes à vide : « *An overview of the situation regarding the calculations and their validation is missing and requested. The review committee is worried about the loading in the saddle* [355] *area (120 MPa* [356]*) as it assumes an even loading over the 9 feet. It recommends to validate (cross-check) the calculation in this area.* » [357] Cette recommandation montre à la fois la criticité de la question des interfaces, le souci d'une bonne coordination avec le comportement des pieds et l'inquiétude que suscite le comportement mécanique de la structure chaude du toroïde.

Cette question des interfaces, celle qui nous intéresse au plus haut point de manière générale, est en effet à l'origine de la crise. Pour paraphraser Finger [1995] parlant de l'ingénierie de la concourance, « *crisis happens at interfaces* ». Rendre compte suffisamment en détails de cette crise pour en saisir la complexité implique de revenir à une autre crise, celle de mai 1998. Cette crise [358] avait été provoquée par une suggestion de l'ingénieur en chef d'ATLAS de déplacer les pieds dans le plan des boîtes de connexion pour réduire les efforts induits dans l'enceinte à vide de la structure chaude. La résolution de cette ECR avait conduit à la création des *girders*, ces poutres installées entre les pieds. Le berceau supérieur sur le pied avait alors disparu au profit d'une cale pentée entre la boîte de connexion et le *girder*, dont l'action était complétée par un berceau inférieur. La situation s'était alors stabilisée sur le design présenté dans le TDR début 1999 (Figure 7.9).

354. Z. Sun, Rapport technique CEA 9B 2900 T - # 7000 010 PA, *Global model computation (including the feet)*, 3 octobre 2002. Référence ATLAS ATL-TB-EA-0001.

355. *Sic* ; le bon terme est *cradle*.

356. Le MPa, ou mégapascal, est l'unité de contrainte utilisée en mécanique. Elle équivaut à un million de newton par mètre carré

357. « Il manque une vue d'ensemble de la situation concernant les calculs et leur validation, et elle est demandée. Le comité de revue est inquiet du chargement dans la région du berceau (120 MPa) dans la mesure où l'on suppose un chargement uniforme sur les 9 pieds. Il recommande de valider (contrôler) le calcul dans cette région. » G. Bachy *et al.*, *Final Design Review of the Toroid Barrel – Report*, ATC-RT-ER-0001, 10 octobre 2000, p. 5.

358. Sa recension sort du cadre de la présente étude de cas ; elle est décrite en détail au § 8.4 p. 243 sqq.

Il est important de noter que jusque là, les calculs de la structure chaude et ceux des pieds sont réalisés totalement indépendamment ; et c'est là que le bât blesse. Encore en 1999, le projet de calcul de vérification de la structure chaude est basé sur des hypothèses de contact rigide et statique avec les pieds. Ainsi que le précise le rapport de synthèse du CEA de septembre 2001, « *the aim […] was to validate the design of the warm structure by considering it as a mono-block shell structure without any bolted parts. The CERN feet behavior and their interaction on the warm structure were considered as boundary conditions (fixing the cradles in 3 rotations and 3 translations and letting the lowest connection box free in the horizontal translation and the 3 rotations).* » [359]

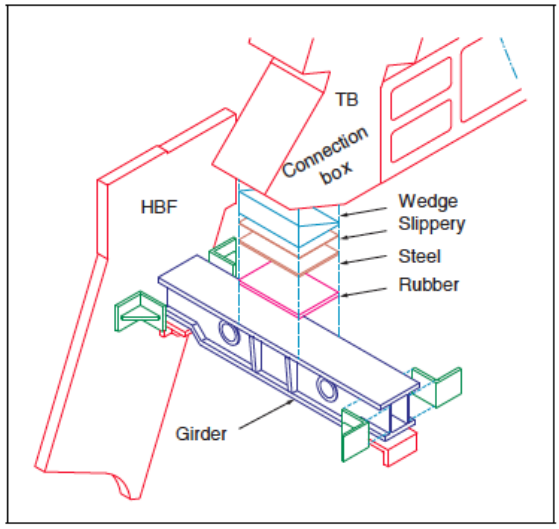


Figure 15-2 Detail (exploded view) of the contact between the TB connection box and the girder.

Figure 7.9: Schéma du supportage

Version du TDR de la TC, janvier 1999

La Figure 7.10 présente, pour illustration, un résultat de calcul des contraintes mécaniques équivalentes de von Misès [360] pour le calcul sans les pieds. Ce résultat montre en l'espèce la nécessité de la présence des berceaux inférieurs, sans lesquels les contraintes dans certaines zones de la structure chaude dépassent les valeurs admissibles

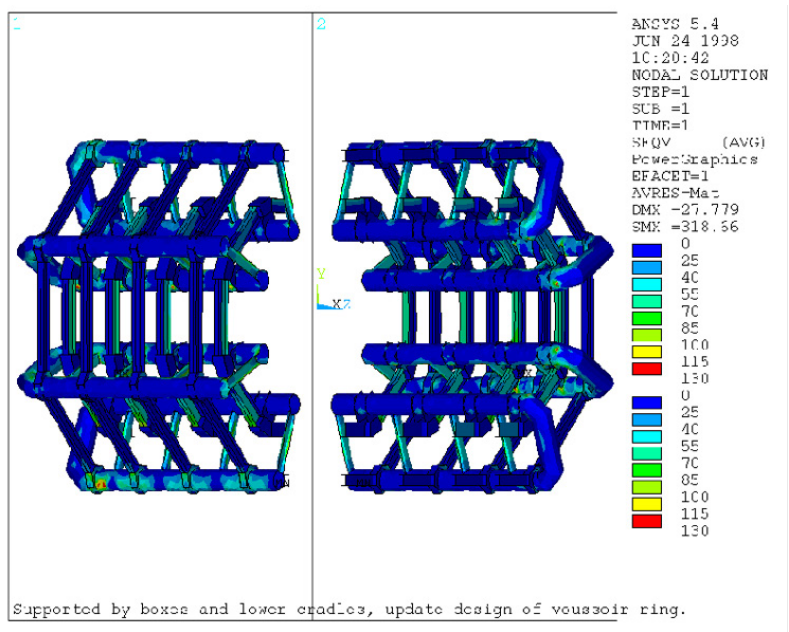


Figure 7.10 : Résultat de calcul

Rapport CEA 2001

359. « L'objectif […] était de valider la conception de la structure chaude en le considérant comme une coque monobloc sans pièces boulonnées. Le comportement du pied CERN et ses interactions avec la structure chaude ont été considérées comme des conditions aux limites (berceau fixé dans les 3 rotations et les 3 translations, boîte de connexion inférieur laissée libre en translation horizontale et pour les 3 rotations. » Note de synthèse « *ATLAS Toroid BT Warm Structure Calculation and Design* » ; ref. CEA : 5C 2900 T - 7000 008 PA, du 12 septembre 2001, ref. ATLAS ATL-TB-ER-0001, EDMS 324728, p. 4-5 ; commentaire portant sur le rapport « *Finite element analysis of the ATLAS Barrel Toroid, Warm structure by a complete model* » ; ref. CEA: 9 B 2900 T 7000 012 PA du 19 septembre 1998.

360. Précisons brièvement (à l'intention des novices en matière de mécanique des structures) que la contrainte de von Misès, exprimée en MPa, est un critère très employé en mécanique des structures, qui permet d'agglomérer en une seule valeur les différents niveaux de contraintes dans chaque direction (c'est une somme quadratique). Très schématiquement, le principe du dimensionnement de structures consiste à maintenir cette valeur en dessous d'une limite conventionnelle correspondant en général à la limite dite

– zones en rouge. Les pieds n'y figurent pas autrement que comme de simples conditions aux limites.

Nous n'entrerons pas dans le détail de l'analyse de ces résultats par ailleurs publiés [Sun et al. 2004] : notre propos n'est pas d'établir un rapport détaillé de la conception, mais de mettre en évidence les échanges et les relations sociales qui se tissent autour de ces calculs durant le processus de conception.

7.4.2 Flottements sur les conditions d'interfaces

En juillet 1999, suite à des premières difficultés de définir une interface propre du point de vue mécanique, le management du projet des aimants avait reçu de la part de celui des pieds et rails une demande explicite qu'un calcul couplé soit pris en charge dans le calcul de vérification que le projet s'apprêtait à commanditer à un bureau de calcul extérieur spécialisé.

> *I confirm my interest to include the Main Rail Structure HB of Atlas in the "*Calcul de vérification du dimensionnement de la 'structure chaude' du Toroïde Atlas*". For technical reasons, it is obvious that the barrel feet and rails are behaving together with the TB warm structure in order to contribute to its stability. This is of prime importance that the HB structure be correctly modelled and taken into account. In turn, the results regarding this HB structure will help the design team to consider any discrepancy with respect to our FEA models.* [361]

Cette demande ne sera pas suivie d'effet, et les calculs de vérification sont lancés avec pour seul objectif, concernant le couplage, de vérifier leur compatibilité avec les conditions aux interfaces préalablement établies. Au cœur de la crise de 2002, le chef du projet des Pieds se plaindra explicitement de cette restriction : « *Many coupling effects were kept hidden behind decoupled calculations (this was the decision of the management of that time – 1999! – for cost savings…)* » [362]. La spécification du calcul est finalisée début 2000, et les résultats obtenus en août 2000. Le rapport de synthèse de septembre 2001 commente ainsi la démarche de ces nouveaux calculs.

> *The model takes back the shell structure of [first] report with a simplified meshing. The main aim of the study is to validate the boundary conditions applied in the other calculations. This validation is made by comparing the horizontal displacements at the lowest connection boxes, with the boundary conditions and with the real integrated feet.* [363]

élastique du matériau, c'est-à-dire en deçà du niveau avec déformations rémanentes. La représentation de l'échelle des contraintes permet de visualiser par exemple en rouge les zones supérieures à cette valeur conventionnelle. Des documents appelés codes de calcul (c'est ici l'Eurocode 3 qui fut employé) définissent les règles imposées sur les coefficients appliqués à chaque type de chargement, ainsi que sur les critères d'évaluation.

361. « Je confirme mon intérêt d'inclure la structure de rails principaux HB d'Atlas dans le "Calcul de vérification du dimensionnement de la 'structure chaude' du Toroïde Atlas". Pour des raisons techniques, il est évident que les pieds et rails centraux ont un comportement qui est lié avec celui de la structure chaude du TB de façon à contribuer à sa stabilité. Il est donc d'une importance primordiale que la structure HB soit correctement modélisée et prise en compte. En retour, les résultats concernant cette structure HB aideront l'équipe de conception à repérer tout désaccord avec nos modèles d'analyse par éléments finis. » Bertrand, lettre à Herman, BN/199926_ATLHB, 01.07.1999.

362. « De nombreux effets de couplage sont restés occultés par des calculs découplés (c'était une décision du management de l'époque – 1999 ! – pour des raisons d'économie. » Bertrand, rapport au TMB, juin 2002, p. 7. Le même texte a été utilisé pour le rapport *Project Progress Tracking*, tâche TC-W027, mai 2002.

363. « Le modèle reprend la structure en coque du [premier] rapport avec un maillage simplifié. L'objectif principal de l'étude est de valider les conditions aux limites appliquées dans les autres calculs. Cette validation est effectuée en comparant les déplacements horizontaux dans les boîtes de connexion les plus basses, dans le cas de conditions aux limites et dans celui de pieds réels intégrés. » Note de synthèse « *ATLAS Toroid BT Warm Structure Calculation and Design* » , *op. cit.*, p. 5.

Ce commentaire appelle deux réflexions très différentes :

• La première, d'ordre organisationnel, porte sur le mode de diffusion des résultats : comment se fait-il qu'il ait fallu plus d'une année avant qu'ils soient portés à la connaissance de la Coordination technique d'ATLAS et à celle de l'équipe projet des Pieds, pourtant concernée au premier chef ? Nous y reviendrons.

• L'autre est d'ordre technique, et va en définitive être l'objet de multiples interrogations, qu'il nous faut expliciter pour nous permettre de comprendre le cas dans toute sa complexité. En parallèle de ces calculs effectués par l'équipe du toroïde au CEA, l'équipe de conception des Pieds a poursuivi ses calculs d'optimisation sur la version 9 du design des pieds, dont les résultats sont publiés à la même période en août 2001. Les conditions aux limites du chargement sont, dans ce cas, basées pour les berceaux sur les valeurs définies par le CEA [364]. Elles étaient restées inchangées pour les poutres.

La commission TIS (*Technical Inspection and Safety*) du CERN intervient alors dans le débat, en se proposant de construire rapidement un modèle complet simplifié : complet, car prenant en compte l'ensemble de la structure chaude et des pieds, et l'intégralité du chargement de manière globale ; simplifié, car basé sur une modélisation par éléments de type poutre [365]. Ce modèle permet de corroborer un certain nombre de résultats, comparés dans la Figure 7.11 à ceux de l'équipe des Pieds et à ceux du modèle révisé du CEA [366] :

Load case (in tons) (*in mm*)	Z1						Z2	Z3
	HBFD cradle		HBGx girder		HBG4 extr. g.			
	horiz	vert	horiz	vert	horiz	vert		
standard	0	20	80	80	38	48	1600	1000
CEA revised	8	55	*–1.04*	61	*–0.94*	53		
beam model				61	65	53	1680	990

?? equivalent load >> 1500 tons!

Figure 7.11: Chargement sur les interfaces: comparaison entre différents calculs

Bertrand, rapport au TMB, décembre 2001, p. 4.

Expliquons ce tableau en quelques mots, sa vocation initiale étant bien de faire partager la compréhension du problème aux membres du TMB. Il contient les valeurs des actions mécaniques obtenues par le calcul selon les différents modèles. Chaque ligne correspond à l'un des trois modèles comparés : le modèle dit "*standard*" est celui utilisé par l'équipe projet des Pieds, et basé sur les valeurs de chargement statique communiquées (en 1999) par le CEA ; le modèle dit "*CEA revised*" est celui résumé dans la note de synthèse de septembre 2001, et qui est l'objet de toutes les interrogations ; et la dernière ligne "*beam model*" donne les valeurs pour le modèle

364. Zhihong (CEA), courriel à Barbara (CERN ATLHB), 08.02.2001 ; et rapport ATL-HB-EA-0007, 12.06.2001.

365. Les raffinements de la méthode d'analyse par les éléments finis impliquent de devoir comparer les avantages respectifs des modèles par éléments poutres, éléments plaques et éléments solides, et de déterminer s'il est préférable de recourir par exemple à des éléments à 3 ou 6 nœuds, et de choisir quelle fonction de forme adopter. Nous ne pousserons pas le détail de la présentation de la complexité du cas jusqu'à ce niveau de détails. Ce sont toutefois des débats qui se sont déroulés, et qui ont permis à une communauté de pratique, celle des ingénieurs calcul, de se construire un référentiel commun de compréhension de la situation. J'aborderai pour cela à la partie III la notion d'espace d'échanges : je développerai au chapitre 11 celle d'espace d'échanges bilatéral, et j'exposerai au chapitre 12 l'agrégation de ces espaces d'échanges bilatéraux en un réseau cohérent constituant un espace d'échanges collectif.

366. Finalisés et publiés en octobre 2002, voir la note 354 p. 198.

complet simplifié de TIS. Chaque colonne correspond à l'une des zones d'interfaces considérées : *cradle* (berceau inférieur), *girder* HBG*x*, *x* compris entre 1 et 3 (poutre standard entre pieds standards) ; et *girder* d'extrémité HBG4 (poutre en porte-à-faux sur le pied d'extrémité). Les chargements dits Z1 sont ceux provenant du toroïde et de ses propres charges. Les chargements Z2 à Z5 sont ceux qui sont supportés directement par le rail ; quoique notamment plus importants, ils ne nous intéressent pas ici, car ils sont essentiellement quasiment verticaux.

On observe plusieurs différences entre les modèles successifs : une valeur notoirement accrue selon la direction verticale, et une valeur de l'effort horizontal sur les berceaux qui devient non nulle, un effet qui sera commentée dans un échange de courriels entre Bertrand et Olga rapporté ci-dessous ; et surtout, une approche des conditions aux limites dans le modèle révisé du CEA qui s'effectue par *déplacement* horizontal imposé, et non plus par *effort* imposé sur les *girders*. Comme le note Bertrand dans son transparent, un tel déplacement correspondrait, avec les raideurs connues, à des efforts tout à fait considérables. Pensant à une erreur d'interprétation de sa part, il concluait toutefois : « *no concern for global behaviour (to exception of barrel toroid warm structure…)* » [367]. Le souci allait pourtant se révéler justifié !

Le déficit de définition des interfaces est mis en évidence par le bref échange de courriels suivant, qui survient en novembre 2001 entre Bertrand et Olga, qui avait repris la tâche d'intégration mécanique au sein de la Coordination technique, et qui coordonnait donc l'effort de compréhension autour de tous ces calculs mécaniques. Olga s'interroge sur les scénarios de chargement qui ont été considérés.

> *Dear Bertrand, I discussed with Herman about TB faulty case - Vacuum loss (Herman mail 02.07.01). It appears that the shrinkage of Toroid Barrel vacuum vessel could be attenuated by using heaters which can prevent ice formation on the vessel. To define the required power for the heater, Magnets need to know which vessel displacement is acceptable by the girder and the connection to TB ?*
>
> *TB is submitted to thermal gradient in normal operation in the cavern (about 10-15 degrees C at installation and about 20-25 degrees C during operation) which creates already vacuum vessel thermoelastic expansion/shrinkage.*
>
> *For which maximum vacuum vessel thermal thermoelastic displacement have been designed the Feet-Girder/TB interface?* [368]

Surpris, Bertrand répond par retour :

> *Dear Olga, in answer to your question: it was always considered that there was no thermal displacement of the vacuum vessel. It seems now to me that this might not be the case, but the answer is: nothing was taken into account... Did you ask the same question to CEA people?* [369]

Cette nouvelle condition explique la valeur non nulle du tableau de la Figure 7.11 dans la colonne *"cradle horizontal"* pour le modèle CEA. Un constat s'impose donc

367. « Pas de souci pour le comportement global (à l'exception de la structure chaude du toroïde baril). » *In ibid.*

368. « Cher Bertrand, j'ai discuté avec Herman à propos du cas de défaut TB – perte du vide (courriel d'Herman du 02.07.01). Il apparaît que la contraction de l'enceinte à vide du Toroïde barrel pourrait être atténuée en utilisant des chaufferettes qui peuvent empêcher la formation de glace sur l'enceinte. Afin de définir la puissance requise pour la chaufferette, les aimants veulent savoir quel est le déplacement de l'enceinte qui est acceptable par la poutre et la connexion au TB ? / TB est soumis à un gradient thermique en opération normale dans la caverne (environ 10-15 degrés C à l'installation et environ 20-25 degrés C pendant l'opération) qui crée déjà une extension/contraction thermo-élastique de l'enceinte à vide. / Pour quel déplacement thermo-élastique thermique maximal de l'enceinte à vide l'interface Pied-Poutre/TB a-t-elle été conçue ? » Olga, courriel à Bertrand, « *TB load case* », 12.11.2001.

369. « Chère Olga, en réponse à ta question : on a toujours considéré qu'il n'y avait pas de déplacement thermique de l'enceinte à vide. Il m'apparaît désormais qu'il se pourrait que ce ne soit pas le cas, mais la réponse est : nous n'avons tenu compte de rien… As-tu posé la même question aux personnes du CEA ? » Bertrand, courriel à Olga, « *Re : TB load case* », 12.11.2001.

en cette fin d'année 2001 : les équipes n'ont pas travaillé avec les mêmes hypothèses. Elles ne se basent pas sur un référentiel commun d'interfaces.

Revenons sur la première remarque d'ordre organisationnel concernant la diffusion du rapport sur le calcul global, terminé en août 2000, et communiqué en septembre 2001 seulement aux autres partenaires du projet, soit plus d'une année plus tard. Il faut là encore s'en référer à l'organisation globale du projet. Ce rapport était considéré comme un rapport interne au projet des aimants, et mieux encore, au sous-projet du toroïde barrel, c'est-à-dire interne au CEA. Comme il semblait corroborer les hypothèses des calculs précédents, il n'appelait donc *a priori* pas communication particulière. C'est donc un dysfonctionnement organisationnel multiple qui est à l'origine de cette non-diffusion : l'interprétation de l'ingénieur calculs du CEA n'a probablement pas été vérifiée en détails en interne, et a donc été validée par sa hiérarchie ; le CEA n'a pas estimé utile de communiquer ce rapport, ce qui aurait pu – encore que sans certitude – amener d'autres ingénieurs à s'interroger sur cette interprétation ; le management du projet des aimants s'est contenté de l'information que ces calculs avaient bien été effectués ; la Coordination technique n'a pas eu d'attitude pro-active avant de lancer ce calcul global de vérification finale en 2001 ; et l'équipe projet des Pieds en est restée à des conditions aux interfaces définies dès 1999 et validées en février 2001 au moment du lancement de ses propres calculs de vérification finaux.

Nous pouvons émettre l'hypothèse, pour expliquer ce dysfonctionnement, qu'un excès d'interfaces organisationnelles a fait obstacle à une gestion satisfaisante des interfaces techniques. La discontinuité de périmètre à la frontière de deux sous-projets n'a pas été compensée par une entité supra, comme la Coordination technique, qui aurait pu rétablir la nécessaire continuité mécanique de part et d'autre de l'interface. C'est la problématique du travail collaboratif entre plusieurs entités organisationnelles distinctes : sous-projet du TB au CEA, projet des aimants et Coordination technique dans ATLAS au CERN ; et équipe des Pieds dans l'unité Détecteurs de la division de physique au CERN. C'est sans doute également les conséquences de la superposition de rôles : à l'époque où la Coordination technique aurait dû être pro-active, j'étais en charge de ces questions. Or, j'étais déjà suffisamment occupé d'une part par les questions purement géométriques (telles que la crise des lattes relatée au chapitre 6) et le souci de faire converger le processus de validation des enveloppes décrit au chapitre 5) – préoccupations qui se rajoutaient à la gestion du Bureau technique (évoquée au chapitre 3) et, bien entendu, à la bonne gestion du projet des Pieds et rails qui est au centre du présent chapitre. Le déficit en ressources dont la Coordination technique a souffert de manière chronique a eu aussi cette conséquence, celle de ne pas pouvoir détacher une personne indépendante en position supra.

7.4.3 Convergence autour des calculs

On a plutôt coutume de parler de convergence de calculs pour indiquer que les méthodes produisent un résultat de simulation dont la précision est estimée “correcte” en un temps “acceptable”. Ici c'est la convergence *autour* des calculs qui était à construire. Elle traverse en fait presque toute l'année 2002, un temps assurément peu acceptable eu égard aux contraintes du projet ATLAS.

Ce qui prend corps en 2002, c'est bien une construction sociale et cognitive en plusieurs phases : élaboration d'une compréhension mutuelle du problème, puis édification d'un accord sur une démarche commune de résolution, puis conception d'une solution commune, et enfin validation de cette solution. Ce processus s'effectue avec les contraintes imposées par le projet des Pieds, à savoir le contexte d'une production en cours qu'il est hors de question d'interrompre et qui impose une

convergence raisonnablement rapide. Nous rendrons compte dans la prochaine section de la manière dont ces phases de construction et de convergence autour des calculs de manière se sont couplées avec celles qui scandent le rythme de la gestion de la production.

Résumons la situation. Plusieurs partenaires en présence : l'équipe du CEA en charge de la conception du toroïde barrel – qui délègue une partie de ses calculs de vérification à un prestataire de services ; l'équipe ATLAS du projet des aimants ; l'équipe ATLAS de la Coordination technique ; et l'équipe CERN du projet ATLHB. Chacun est confronté à plusieurs approches de calcul : le CEA avec son « *Étude de la structure chaude et des interfaces avec les pieds CERN de l'expérience ATLAS* » d'août 2000 et sa note de synthèse de septembre 2001 ; son prestataire de service avec son « *Calcul de la structure chaude du Toroid ATLAS, avec berceaux et goussets modifiés* » de février 2001 [370] ; la Coordination technique, avec son modèle global et son travail de définition des différents scénarios de chargement [371] ; et l'équipe des Pieds, avec ses nombreux rapports de calculs correspondant aux jeunes ingénieurs calcul successifs, en général des coopérants ou des étudiants présents pour 12 à 18 mois dans le Bureau technique.

Il faut de nombreuses réunions à deux, trois, quatre, ou à tous pour parvenir à une compréhension commune des interfaces et à formuler ensemble un chargement cohérent, qui n'aboutit que début juin. La suspicion mutuelle est parfois poussée, puisque à ce moment naît même une petite polémique sur la valeur du module d'Young [372], située selon les sources entre 170 et 210 GPa : déclarations de la firme, détermination expérimentale contradictoire du service métallurgique du CERN, fourchettes normatives variées selon les références nationales (AISI, GOST, EN, DIN, BS, AFNOR), et croyances de chacun. Même ces valeurs-là, pourtant considérées comme objectives, demandent à être socialement construites…

En fin de compte, quelle que soit la façon dont on les fait parler, les chiffres indiquent tous une augmentation de plusieurs centaines de % de la charge transverse sur les *girders*, ce qui dépasse très largement la marge prise par l'équipe de conception, et mange tous les coefficients de sécurité prudemment pris en compte. Il faut donc re-concevoir les *girders* standards pour en augmenter l'inertie, revoir la géométrie des berceaux pour en augmenter la surface, et complètement repenser le supportage réalisé par le *girder* d'extrémité.

7.5 Un pied dans le chaudron, l'autre dans le glacis

En choisissant ce cas, j'avais le souvenir de questions complexes : en plongeant dans l'épaisse documentation qui permet de le décrire pour préparer sa recension, je le confirme : c'est encore bien plus complexe que dans mon souvenir. Ce cas est donc, à cet égard particulièrement illustratif pour nos questions de recherche, et représente un défi particulièrement stimulant pour la narration : « *Père, gardez-vous à gauche ! Père, gardez-vous à droite !* » [373]

Le manageur technique doit regarder où il met les pieds, avec des partenaires qui ne sont pas toujours tendres les uns envers les autres. Un pied dans le chaudron bouillonnant des modifications imposées par le processus de conception perpétuellement en mouvement d'ATLAS, et l'autre pied dans le glacis post-soviétique de pratiques et méthodes de production bien éprouvées, bien efficaces et dotées

370. Réf. CEA ITDS/DSM, DOSSIER/1424/A/00, daté du 28 février 2001.

371. « *Loading scenarios of the ATLAS detector Feet and Rails and Toroid Barrel* », ATC-TZ-EN-0044, septembre 2002.

372. Le module d'Young est le coefficient d'élasticité de l'acier, autrement dit sa raideur mécanique.

373. Attribué à Philippe (qui deviendra le Hardi), s'adressant à son père Jean II, roi de France, Poitiers, 19 septembre 1356.

d'une inertie les rendant impropres à des modifications au fil de l'eau : une fois planifié, un tel processus de production impliquant des équipements aussi lourds que des convertisseurs, des fours, des trains de laminoirs et ces sortes de gros équipements, cela ne se ralentit pas aussi facilement ; ne parlons pas de le stopper.

Ainsi que nous l'avons formulé, « *the Project Leader was thus led to ask the very people he had earlier been pushing so hard now to slow down and wait* » [374]. D'un côté, la Collaboration ATLAS qui, se souciant en permanence d'optimiser la performance de son détecteur, ne pouvait évidemment pas prendre le risque d'une rupture mécanique de sa colonne vertébrale, les pieds et rails. Et de l'autre côté le fournisseur, engagé comme il l'était à produire la qualité requise dans des délais les plus réduits possibles, voyait sa confiance envers le client quelque peu ébranlée par ce changement majeur de la spécification. Et coincé entre les deux, l'équipe projet des Pieds, de laquelle on exigeait qu'elle fît face à la crise avec ces nouvelles contraintes, qu'elle s'attelât à produire un nouveau design, tout en parvenant à maintenir le planning de production et le budget initiaux.

La prise de conscience se fait donc jour progressivement à partir de la fin 2001 que les calculs du toroïde sont probablement biaisés par des conditions aux limites définies de manière incomplète et indéterminée. À ce moment-là, le contrat de fabrication du projet des Pieds est dans sa phase finale de signature avec la firme Izhorskiye Zavody à Kolpino, en Russie. Autrement dit : son périmètre est entièrement défini ; l'ensemble du dossier de définition a été validé et communiqué à l'entreprise, qui en retour a envoyé son propre dossier de production ; le plan d'assurance qualité a été élaboré ; les dates clé de la production ont été entérinées, ainsi que le montant global du coût ; bref, la production est prête à démarrer. La conviction est donc que, si ajustement il y a, ils se feront à la marge. On envisage que ces ajustements soient de deux types : évolution de la spécification, ou adaptation aux exigences du process de réalisation.

Le premier type est l'adaptation à des fluctuations de spécifications fonctionnelles à la demande de la Collaboration : ajouter un trou par ci, déplacer une soudure par là. Ces demandes sont désormais assujetties à une procédure officielle : « *From now on, any modification [has] to go through an ECR procedure* », précise le chef de projet, « *Design modifications will be implemented only if they are proven to be necessary, and only through the ECR procedure* » [375]. C'est ainsi ce qui se produira avec la nécessité de rajouter, puis d'ajuster la position de trous oblongs dans les pieds, représentés à la Figure 7.12, et qui doivent permettre l'alignement optique des chambres verticales : Jim, le physicien américain responsable, prépare une ECR qui est traitée selon la procédure évoquée au § 6.5 p. 165 [376].

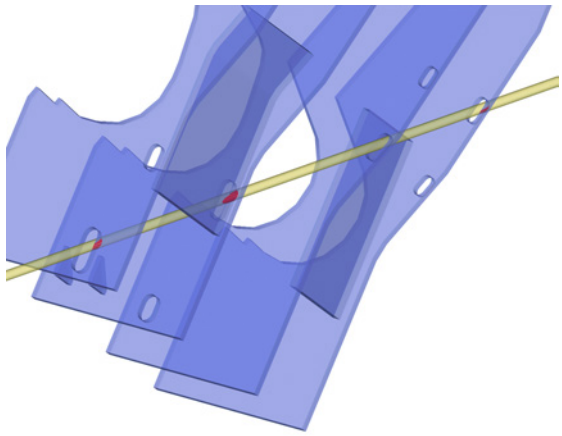


Figure 7.12 : Intégration des chemins optiques

Modèle envoyé par Jim, Brandeis University, Boston, pour justifier son ECR, septembre 2002

374. « Le chef de projet était ainsi amené à demander à ceux-là même qu'il avait tellement mis sous pression de bien vouloir désormais ralentir et attendre. » [Nicquevert et al. 2011, 194]

375. « À partir de maintenant, toute modification doit passer par une procédure d'ECR. » « Les modifications de design ne seront implantés que si leur nécessité est justifiée, et uniquement à travers une procédure d'ECR ». Bertrand, présentation au TMB, 13 décembre 2001, p. 2, resp. p. 6.

376. Nous en verrons un autre cas au chapitre 8 (§ 8.4 p. 243).

L'autre type d'ajustement possible serait à l'inverse à la demande de la firme, qu'il s'agisse de faciliter l'exécution d'une tâche, ou encore pour gérer une non-conformité de production (et il y en aura de nombreuses, toutes parfaitement gérables, et toutes d'impact limité, voire acceptables tel quel).

Nul ne se doute alors encore, fin 2001, que certains composants du projet des Pieds ne vont pas pouvoir satisfaire les nouvelles conditions de chargement. Nul n'est encore préparé à l'idée d'une remise en cause aussi vaste. Or, fin mars 2002, la conviction se fait voisine d'une certitude que le design de plusieurs composants clé doit être revu, que l'ajustement n'est pas marginal, et que la production sera massivement impactée. Dans l'intervalle de ce trimestre écoulé, la puissance de feu de la firme s'est déclenchée : une fois les processus définis et le contrat signé, tout s'enchaîne très rapidement. Et fin mars, la quasi totalité de l'acier (plus de 600 tonnes) est déjà coulée et en partie laminée, limitant d'autant le recours à d'autres épaisseurs de plaques que celles déjà disponibles sans risquer de devoir effectuer une nouvelle coulée. Or, une coulée, c'est au moins 50 tonnes et au moins 150 kCHF : de quoi faire réfléchir le concepteur à deux fois.

7.5.1 Dilemme : « *Shall I ask Izhora to stop production?* » [377]

Bertrand est en liaison permanente pour gérer le projet côté russe avec Alexandre, l'ingénieur-physicien russe de l'IHEP. Les échanges par courriel sont extrêmement nombreux (plus d'un millier sur l'ensemble du projet). Nous allons analyser l'un de ces échanges au moment où la crise surgit. Il montre, y compris dans sa complexité formelle (que je conserve ci-dessous à l'identique), la difficulté de gérer la situation à ce moment de flottement où l'évaluation de la gravité et de la criticité des modifications potentielles n'est pas encore correctement établie. Cet échange date du 25 mars 2002 :

> *4. Fabrication drawings for bed plates are sent to CERN (HPGL files 17.03.02, paper copies 21.03.01).* [378]
>
> > *[BN] Paper copies received this morning. We will look at them this week.*
> > *Planning for plates prod and 2 first feet received as well during the week-end. I will look at them this afternoon. Did you look at the fax I sent to IZ on thursday ?* [379]
> >
> > > *[AF] Yes I did. I've called them on the subject of production schedule definitely more than 5 times. The problem was in another IZ department administration change. D*** was replaced by I*** and G*** (who was actually the driving force during last half a year) is in the process of quitting. So when at IZ I did shortcut them obtaining the batch 1 schedule from the production manager.*
> > > *One particular thing in your fax I don't like. It is related to the forthcoming definition drawings change. See below (after the next par.)* [380]

377. « Dois-je demander à Izhora d'arrêter la production ? »

378. « 4. Les dessins de fabrication pour les semelles ont été envoyés au CERN (fichiers HPGL 17.03.02, copie papier 21.03.02). »

379. « [BN] On a reçu les copies papier ce matin. Nous allons les regarder cette semaine. J'ai également reçu pendant le week-end le planning pour la prod des plaques et des deux premiers pieds. Je vais le regarder cet après-midi. As-tu vu le fax que j'ai envoyé à IZ jeudi ? »

380. « [AF] Oui, je l'ai vu. Je les ai appelés à propos du planning de production véritablement plus de cinq fois. Le problème était dû à un nouveau changement administratif au niveau des départements d'IZ. D*** a été remplacé par I***, et G*** (qui était en fait le moteur durant les six derniers mois) est en train de quitter. Alors quand je me suis retrouvé à IZ je les ai court-circuités pour obtenir le planning du lot 1 auprès du responsable de la production. Il y a un point particulier que je n'aime pas dans ton fax. C'est relatif aux modifications à venir des dessins de définition. Voir ci-dessous (après le prochain par.). »

5. Fabrication drawings for feet and rails (IZ promise) will follow by 26.03.02. [381]

[BN] OK-
Due to several major modifications, I will certainly have to put in stand by the rails and the girders, and maybe the feet themselves. Project life is so strange... Today, I do not well know how to proceed... [382]

[AF] Look, I don't know the nature and amount of changes so have to put IF statement:
IF (forthcoming changes definitely affect plates dimensioning) THEN

The paragraph from your fax:
"Feel free to continue at your own risk the production of other plates, but please be prepared to be inspected according to point N-11 for all plates."
This is misleading because knowing about plates geometry change you saying to IZ to proceed nevertheless. So it is not risk but definite failure. Some plates will be of wrong dimensions.
We have to stop 304 LN plates production immediately.

ELSE

Once plates dimensioning is OK they may proceed, but from the tentative style of your info on the forthcoming change it is not the case.
Look you know what it is about so you have to decide fast to stop IZ plates production or not and if (even probably) yes to inform them asap.

END IF

It is probably difficult to explain by mail the nature of change.
Tell me would it help if we'll send IZ drawing girl(s) (1 or 2 of those who worked on the feet & rails and know the design) to CERN? To speed up changes implementation?

Tell me. [383]

En ces quelques échanges, la difficulté est, nous le pensons, bien résumée. Des difficultés techniques, doublées de difficultés organisationnelles, couplées de difficul-

381. « 5. Les dessins de fabrication pour les pieds et les rails (promesse d'IZ) suivront d'ici le 26.03.2002. »

382. « [BN] OK – En raison de plusieurs modifications majeures, je vais certainement devoir mettre en suspens les rails et les poutres, et peut-être les pieds eux-mêmes. La vie des projets est si étrange… Aujourd'hui, je ne sais pas très bien comment procéder… »

383. « [AF] Écoute, je ne connais pas la nature et la quantité des changements, alors il me faut mettre une condition SI:

SI (les changements à venir impactent sans aucun doute les dimensions des plaques) ALORS

Le paragraphe de ton fax:

“ Considérez-vous libres de continuer à vos risques la production des autres plaques, mais veuillez vous attendre à une inspection d'après le point N-11 [du plan d'assurance qualité] pour toutes les plaques. ”

Cela induit en erreur parce que alors que tu sais qu'il va y avoir des modifications de géométrie des plaques, tu dis à IZ de continuer quoi qu'il en soit. Ce n'est donc pas un risque, mais une faute. Certaines plaques vont avoir de mauvaises dimensions. Nous devons arrêter immédiatement la production des plaques en 304LN.

SINON

Dès que le dimensionnement des plaques est OK, ils peuvent procéder, mais d'après le style conditionnel de ton info sur les changements à venir, ce n'est pas le cas. Écoute, tu sais de quoi il s'agit donc tu dois décider rapidement d'arrêter la production des plaques à IZ ou non, et si (même si ce n'est que probable) oui, de les informer dès que possible.

FIN DU SI

C'est probablement difficile d'expliquer par courriel la nature des changements. Dis-moi, est-ce que cela aiderait si nous envoyions au CERN une ou deux dessinatrices d'IZ (une de celles qui ont travaillé sur les pieds & rails et qui connaissent le design) ? Pour accélérer l'implantation des changements ?

Dis-moi. »

tés politiques, associées à des enjeux relationnels. On dénote les tensions avec l'usine sur l'obtention des plannings de production, et les risques associés à une modification non maîtrisée de la production. Les malentendus inévitables sont nombreux : par exemple le point N-11 du plan d'assurance qualité ne portait pas du tout sur les dimensions, mais sur l'état de surface ! Il était en définitive tout à fait découplé de la question de la révision ; mais il s'est retrouvé en quelque sorte "pris dans la nasse". La phrase « *Considérez-vous libres de continuer à vos risques la production des autres plaques* » ne concerne que cette question relativement secondaire de l'état de surface. Comprise comme s'appliquant aux dimensions, elle devient surinterprétée.

Nous n'allons pas tout expliciter ici, ce n'est pas le propos. Toutefois ces difficultés de communication entre partenaires de bonne volonté mettent en évidence les superpositions multiples de sources de confusion possibles, qui ont le bon goût de s'additionner au plus mauvais moment quand la crise se déclenche. C'est ce que l'échange de courriels suivant démontre :

Alexandre to Bertrand and Marzio, 27.03.2002, 02:26

> *Dear colleagues, if not received by TOMORROW (27.03) NOON (Geneva time) a reply to the question from my previous mails, namely:*
>
> *IN VIEW OF FORTHCOMING CHANGES SHALL I ASK IZHORA TO STOP PRODUCTION?*
>
> *I'll send to IZ something like following:*
>
> *Being only quality checks IHEP representative I can't ask you to stop the production. Nevertheless please take note that the words from Mr. B. Nicquevert faxes of 21.03 and 25.03 "Feel free to continue at your own risk the production of other plates....." can as well have the following interpretation:*
>
> *"Once fabrication drawings are not yet approved by ATLAS you risk to roll plates which may NOT fit to cut all the pieces which you draw according to definition drawings."*
>
> *Regards. A. F.* [384]

Marzio to Alexandre, 27.03.2002, 09:40

> *NO. Please wait until tomorrow afternoon. I need to speak with Bertrand.* [385]

Bertrand to Alexandre, cc to Marzio, 27.03.2002, 12:44

> *Sacha, I would like you […] please to read what is written and not overinterpret what I write down. Very important things are under investigation, this is not time for polemic. So*

384. Alexandre, courriel à Bertrand et Marzio, 27.03.2002, 02:26

« Chers collègues,

Si je n'ai pas reçu d'ici DEMAIN (27.03) MIDI (heure de Genève) une réponse à la question de mes courriels précédents, à savoir :

COMPTE TENU DES CHANGEMENTS À VENIR DOIS-JE DEMANDER À IZHORA D'ARRÊTER LA PRODUCTION ?

J'enverrai à IZ quelque chose du genre de ce qui suit :

N'étant que le représentant IHEP pour les contrôles qualité, je ne suis pas en mesure de vous demander d'arrêter la production. Néanmoins, merci de prendre note que la formulation des fax du 21.03 et du 25.03 de M. B. Nicquevert « Considérez-vous libres de continuer à vos risques la production des autres plaques… » peut également être interprétée comme suit :

" Compte tenu du fait que les dessins de fabrication ne sont pas encore approuvés par ATLAS, vous risquez de laminer des plaques qui ne permettraient PAS de couper toutes les pièces que vous dessinez en fonction des dessins de définitions ".

Salutations. A. F. »

385. Marzio à Alexandre, 27.03.2002, 09:40

« NON. Attends s'il-te-plaît jusqu'à demain après-midi. Je dois parler avec Bertrand. »

> *please find below a long reply to your short emails. I hope this will improve you understanding of the situation, and avoid any misinterpretation of my own words.*
>
> *[…]* [386]
>
> *3) on this deadline of today noon, stated in your email: where does it come from? please keep calm. I am the project leader, Marzio is the technical coordinator, and we are the ones to take such decisions, in due time.* [387]
>
> *Now on the bulk of the question:*
>
> *4) shall you ask to stop production. The answer is: NO. You are not supposed to take such decision. And we did not take this decision so far.* [388]

Alexandre to Bertrand, cc to Marzio, 29.03.2002, 15:38

> *Bertrand at last I understood what had happened.*
>
> *On March 26 you have sent different texts to IZ and to me with the same ref. nb. (BN/200208_ATLHB). This enigma was the main root of my fuss. The fuss (if now one reads texts received by IZ only) was to a large extent excessive and I'm sorry for this. You have to understand though the complexity of the enigma: talking with IZ guy (with the knowledge of English between "very bad" and "practically nothing" marks) over the poor telephone connection I had a task to detect that we are looking into different texts (devoted to more or less the same subject). On top of this in IZ version few lines were smeared by fax machine. It is only today in the morning when IZ called me having prepared Russian translation and I have received the right file from you I understood what had happened.* [389]

Cet échange dénote toute la complexité relationnelle de la gestion de la crise, que ce soit dans son volet de communication (interne et externe), son volet organisationnel de mise en place des circuits de décision, et son volet de gestion de crise, avec établissement du diagnostic et prises de décision [390]. En préparant la recension de cette étude de cas, j'ai recherché dans mes deux mètres cube d'archives les fax en question. Et j'ai bien retrouvé sous forme papier le fax envoyé à IZ sous cette référence, mais je n'ai pas retrouvé cette version apparemment différente envoyée à Sacha, ni sous forme papier ni sous forme électronique. Le mystère demeure, et peu importe. Cet épisode d'un raté dans la numérotation et d'une duplication apparemment erronée d'un document [391] a pourtant failli créer un incident quasiment diplomatique entre les quatre protagonistes de cette phase animée : le corres-

386. Bertrand à Alexandre, copie à Marzio, 27.03.2002, 12:44

« Sacha, je souhaiterais […] que tu lises ce qui est écrit et que tu ne surinterprètes pas ce que j'ai écrit. On est en train d'examiner des points très importants, ce n'est pas le moment de polémiquer. Alors je te prie de trouver ci-dessous une longue réponse à tes brefs courriels. J'espère que cela va améliorer ta compréhension de la situation et éviter toute mauvaise interprétation de mes propos. […] »

387. « 3) à propos de l'échéance de ce midi, définie dans ton courriel: d'où provient-elle ? S'il-te-plaît, reste calme. Je suis le chef de projet, Marzio est le coordinateur technique, et nous sommes ceux qui prennent de telles décisions, en temps voulu. »

388. « Maintenant le fond de la question : 4) dois-tu demander l'arrêt de la production. La réponse est : NON. Tu n'es pas supposé prendre une telle décision. Et nous n'avons pas encore pris cette décision. »

389. Alexandre à Bertrand, copie à Marzio, 29.03.2002, 15:38

« Bertrand j'ai enfin compris ce qui est arrivé. Le 26 mars, tu as envoyé des textes différents à IZ et à moi avec le même numéro de référence (BN/200208_ATLHB). Ce mystère est la source principale de mon agitation. L'agitation (si l'on ne considère que les textes reçus par IZ) était pour une large part excessive et j'en suis désolé. Tu dois comprendre malgré tout la complexité du mystère : en discutant avec le gars d'IZ (dont le niveau d'anglais oscille entre « très mauvais » et « pratiquement inexistant ») au moyen d'une connexion téléphonique de mauvaise qualité, c'était un défi de détecter que nous avions affaire à deux textes différents (consacrés plus ou moins au même sujet). Par dessus le marché, dans la version IZ quelques lignes ont été déformées par le fax. Ce n'est que ce matin, lorsque IZ m'a appelé après avoir préparé une traduction en russe et que j'ai reçu le bon fichier de ta part, que j'ai compris ce qui s'était passé. »

390. Nous analyserons ce déroulement de la gestion de crise au chapitre 9 (§ 9.1.1 p. 260)

391. Au chapitre 8, nous étudierons de manière plus générale la question de la gestion des données.

pondant de la firme, le représentant de l'institut russe, le chef de projet et le coordinateur technique. Heureusement, le malentendu a été levé à temps, et la confiance mutuelle a été suffisante pour que la crise soit résolue. La décision de suspendre partiellement la production a été prise par la suite, et de manière concertée. La stratégie de gestion de la crise s'est donné pour objectif de favoriser la reprise progressive aussi rapide que possible de la fabrication des composants, au fur et à mesure que la liste des composants réellement impactés par la révision était définie, et l'ampleur de la modification pour chaque composant évaluée.

7.5.2 Phasage de la révision

Notre objet dans cette étude de cas est triple :

1) montrer la complexité du déroulement des processus de conception : objectif que j'espère avoir atteint, ayant montré que nous sommes loin des cas d'école. C'est cela, la vraie vie des projets ;
2) examiner le rôle du/des manageurs techniques dans des projets complexes ;
3) constater que ces deux questions ne peuvent être traitées avec sérieux sans un niveau minimal de recension de leur complexité.

Je propose dans le Tableau 7.1 une analyse globale du cas présent, basée sur les compte-rendus réguliers présentés par le chef du projet des Pieds au TMB (*Technical Management Board*). Nous en avons retenu sept, correspondant aux différentes phases de la crise. Chacun de ces compte-rendus fait le point sur l'avancement de la production, ainsi que sur l'état de la révision de la conception.

L'on pourra rétorquer que ce phasage est artificiel, puisque lié à une périodicité de réunion. Je répliquerai tout d'abord que ces réunions étaient mensuelles, donc d'une granularité assez fine et compatible avec notre niveau d'analyse. D'autre part, tout phasage est artificiel, quand il fait passer une ligne de démarcation entre des dizaines de tâches d'un côté et des dizaines d'autres d'un autre côté, sur un continuum qui ne se prête pas naturellement à tel phasage. Après tout, « *drawing a boundary is just that – drawing. […] The dividing line is a construction.* » [392] Je défends la thèse que c'est une vue de l'esprit d'imaginer un phasage naturel précis en ingénierie de la concourance en général, et sur ce cas en particulier. La valeur heuristique de l'exercice est toutefois positive : même si la démarcation n'existe pas, l'évolution est bien réelle.

	Phase de crise	**Organisation production**	**Avancement production**	**Conception et intégration**	**Analyse et calculs**
TMB avril 2001	Pré-crise	Choix du fournisseur en cours	Spécifications préliminaires	Dessins de définition terminés	Optimisation de la version 8
TMB décembre 2001	Prémisses : *« no concern to exception of… »*	Fournisseur choisi Contrat de fabrication prêt à être signé Quatre lots : 1. premiers pieds 2. *bedplates* 3. autres pieds 4. le reste	Production de l'acier prête à être lancée	Dessins de définition approuvés Dessins de fabrication en cours de validation	Calculs globaux terminés Calculs de la visserie en validation Questions sur la structure chaude

392. « Tracer une frontière, ce n'est que cela – tracer. […] La ligne de démarcation est une construction. » [Grey 2005, 123]. Voir le chapitre 12.

	Phase de crise	**Organisation production**	**Avancement production**	**Conception et intégration**	**Analyse et calculs**
TMB mai 2002	Déclenchement : « *much more complex* »	Lot 4 complètement à l'arrêt Lots 1 et 3 partiellement suspendus	Acier *bedplates* coulé, Lamination à 25%	ECR (indépendante du cas) de déplacement radial de 25 mm à l'étude	Suspicion d'une augmentation du chargement supérieure à 300% pour les berceaux et les poutres
TMB juin 2002	Évaluation : « *everything is coupled to everything else* »	Lot 1 relâché Berceau déplacé au lot 4	Acier pieds laminé à 23% *Bedplates* pré-assemblés Plaques pieds découpées	ECR 25 mm finalisée à 22 mm Liste des éléments impactés établie	Confirmation et quantification de la révision des charges
TMB juillet 2002	Plan de consolidation « *Baseline for final structural analysis* »	Berceaux ramenés au lot 3 Lot 4 coupé en 2 Nouveau lot 4 : rails Lot 5 : pieds d'extrémité et *girders*	Acier pieds laminé à 65% Lot 1 : pré-assemblage Lot 2 : soudage Lot 3 : découpage commencé	Berceaux : ouverture revue *Girder* standard : deux solutions en concurrence, “renforcé“ et “incliné“ *Task Force* et planning de travail établis	Procédure établie Calculs par la TC, premiers résultats après ajustement de la collaboration
TMB septembre 2002	Éléments de solution, et dénoue–ment : « *Redesign close to the end!* *Delay still compatible* »	Nouvelles dates contractuelles négociées avec IZ Délai de 3 mois annoncé	Tout l'acier est laminé Lot 1 : en mesure Lot 2 : phase finale Lot 3 : découpage à 50% Lot 4 : prêt à démarrer	Berceaux : solution validée en fabrication *Girder* standard : convergence sur solution hybride ECR sur les trous d'alignement et sur l'interface avec la traction	*Girder* 4 d'extrémité : recherche de solution
TMB octobre 2003	Situation d'après-crise : « *no major known problem ahead of us* »	Délai effectif de 4 mois	Lot 1 livré Lot 2 en cours d'installation Lot 3 en cours d'inspection Lot 4 et 5 en fabrication	Changement des voussoirs en étais	Certificat de sécurité délivré Points ouverts : goupillage et soudure du *girder* 4

Tableau 7.1 Proposition de phasage de la crise de 2002

Cette histoire d'une révision de conception est par ailleurs traversée d'un nombre considérable de péripéties, que je cite ici en guise de guirlande, ou de kaléïdoscope de morceaux de cas escamotés [393]. La re-conception est un processus qui, simultanément, intègre les effets de l'histoire passée du projet, s'adapte aux situations quotidiennement évolutives, et se doit d'anticiper les phases ultérieures du cycle de vie et les évolutions futures ou potentielles, sans oublier de prendre en compte les susceptibilités (qui ne sont pas toutes magnétiques [394]).

393. Simplement évoqués, ils ne sont pas assortis de références précises afin de ne pas alourdir le propos. Elles restent disponibles au lecteur vraiment curieux.

394. La susceptibilité magnétique est la faculté d'un matériau à s'aimanter sous l'action d'une excitation magnétique ; elle a servi de critère de validation de la qualité de soudures des pieds. (Toute ressemblance avec un comportement psychologique relationnel serait purement fortuite.)

Quelques aspects historiques et contextuels

- L'ECR d'avril 1998 (§ 8.4 p. 243), avec l'idée évoquée alors de suspendre la bobine sous les rails. L'idée sera écartée, même si elle aurait évité le recours aux *girders* et en particulier à celui d'extrémité ;
- La controverse sur la définition et la signification des chargements respectifs, largement évoquée au début du chapitre (§ 7.4.1 p. 197) ;
- La définition contractuelle du coût du projet, basé sur le prix unitaire du kilogramme fini – et cet élément était connu en 2002 : le projeteur n'a donc plus cherché à optimiser les temps d'usinage, bien au contraire ! Autant de copeaux en plus, autant de dollars en moins sur la facture finale.

Quelques contraintes imposées par la situation

- Les contraintes de conception du *girder* 4 (en août 2002) étaient liées à la disponibilité et à la récupération des chutes du découpage ;
- La pression de la concurrence des autres clients d'IZ imposait que la production soit maintenue : la firme devait démarrer début 2004 la fabrication d'une centrale nucléaire en Inde, et si la production pour ATLAS était arrêtée, ce serait pour une année ;
- Les discussions sur les propriétés du caoutchouc ;
- Les mesures du module d'Young effectif de l'acier, qui variaient de 20% selon les sources, et entraînaient une dispersion des résultats de calcul ;
- Les querelles sur le choix des matériaux des goupilles, exigés d'un grade rare, dont une barre avait « *disparu* » au cours du transport vers la firme (sans doute "tombée du camion"…), et qui n'était plus disponible en stock ; mais sur la composition desquelles la commission de sécurité TIS ne voulait pas transiger.

Quelques limitations dues aux phases ultérieures

- Les contraintes d'installation et d'alignement ont imposé un *girder* d'extrémité (non réglable) qui soit nominalement plus bas que les autres, laissant une marge de calage de 5 mm ;
- La nécessité d'installer la chambre MBMF sous le *girder* a exigé une modification de la couche de chambre de déclenchement de type RPC ;
- L'impossibilité de suspendre la bobine au rail, en raison du phasage de l'installation.

Quelques effets de susceptibilité

- J'ai cité en ouverture de ce chapitre celle de « *l'ingé revenu du froid* », contrarié de ne pas être assez impliqué dans les discussions avec le CEA.
- La règle administrative du CERN qui imposait alors que pas plus de deux personnes du CERN ne partent en mission au même endroit, sans se préoccuper des nécessités de projet, a largement contribué à cette limitation. (Une règle temporaire, établie en raison du dépassement de budget du LHC – tout est lié).
- Je rajoute la pression de la Coordination technique ; par exemple, au moment du choix de la solution : « *We have to move out from this situation of 2 solutions, if not these people [from CEA barrel toroid and from CERN feet] will never work out one in detail* » [395].
- La *task force* établie le 09.07.2002 par le chef de l'unité Détecteurs de la division de physique : dans quel but ? En 2012, plus personne ne s'en souvient vraiment, à commencer par Vincent Vuillemin qui l'avait pourtant instaurée. Pro-

395. « Il faut qu'on sorte de cette situation avec deux solutions, sinon tous ces braves gens [du toroïde barrel au CEA et des pieds CERN] ne vont jamais en étudier une en détail. » Marzio Nessi, courriel à Herman (chef du projet des aimants), 31.07.2002.

bablement pour attribuer officiellement une légitimité de décision aux personnes impliquées, indépendamment des relations hiérarchiques et des clivages organisationnels entre ATLAS et le Bureau technique… Une *task force* en écho à notre cas n° 0, en quelque sorte.

- Le sens de la responsabilité des manageurs russes, qui ne s'engagent à fournir un planning que lorsqu'ils sont convaincus de pouvoir le tenir (et donc à un stade où l'utilité d'un planning est moindre).
- La fermeté du physicien russe qui refusa de traduire la demande trop insistante du chef de projet d'obtenir un tel planning.
- La croyance du chef de projet de pouvoir imposer cette demande de par sa position hiérarchique, sans plus de succès.

Tout cela aussi, c'est la vie du projet.

Toute l'opération de suivi de la production est placée sous le sceau d'une certaine « *angoisse* » [396] ou en termes politiquement corrects, « *a major source of uncertainty* » [397] du management d'ATLAS face au risque d'une rupture avec IZ et aux difficultés d'obtenir des informations fiables sur l'avancement et surtout sur le planning (voir le courriel d'Alexandre du 25.03.2002 cité plus haut : « *I did shortcut them obtaining the batch 1 schedule from the production manager* »). Seul un contact direct personnel avec des personnes connues à titre personnel permet d'obtenir informellement cette information. Ainsi que le formule un spécialiste de l'économie soviétique : « *New kind of information transfer was not necessary. In a non-competitive situation the old ways of handling with administrative information were good enough.* » [398]

Quels sont les éléments parmi tous ceux-ci qui ont amené à converger ? Est-ce la réalité matérielle et matérialiste de la production de l'acier, et de sa temporalité quasi-inébranlable (à moins de prendre le risque d'un retard d'une année, un autre projet important étant déjà planifié à l'usine, qui n'aurait pas été décalé en cas de retard de la révision de la conception) ? Ou bien est-ce l'adaptation des processus de (re)conception et des cerveaux humains qui a permis d'accélérer le rythme et de rester dans l'épure temporelle imposée ? C'est ce que nous allons voir dans la section suivante, consacrée à la phase de décision sur la solution retenue, et au dénouement de la crise.

7.6 Concevoir, c'est convaincre

En écho au chapitre 4 de la thèse de Pascal au titre éponyme, nous allons dans cette section exhiber quelques-unes des pièces à conviction forgées par les uns et les autres pour tenter de convaincre du bien-fondé de chaque solution. À travers cette petite exposition de raffinements successifs des arguments et démonstrations, c'est le scénario de sortie de crise qui se précisera en éclairant l'ébauche constituée par le Tableau 7.1 p. 211.

7.6.1 Deux à trois solutions en lice

Sans entrer dans les détails de chacune des solutions, résumons les grandes lignes, en prenant le *girder* entre pieds comme guide au travers de l'espace des solutions.

396. L'expression a été employée lors du séminaire *ATLAS in the magnifying glass* en novembre 2008 par Markus Nordberg, coordinateur des ressources d'ATLAS depuis 2000.

397. « Une source majeure d'incertitudes » [Nicquevert et al. 2011, 197].

398. « Un nouveau genre de transfert d'information n'était pas nécessaire. Dans une situation non-compétitive, les anciennes méthodes de gestion des informations administratives étaient suffisamment bonnes. » [Kaukonen 1994, 30]

Le design de référence du *girder* est celui publié dans le TDR et montré à la Figure 7.9 p. 199, la seule modification ultérieure, mineure, étant une forme arrondie de la partie inférieure qui permettait de diminuer le nombre de soudures. Quoi qu'il en soit, la version validée et transmise à la firme est incompatible avec le chargement révisé, il faut donc le renforcer. Outre les critères de résistance mécanique intrinsèques, le nouveau design doit garantir un bon transfert des efforts entre le toroïde et les pieds eux-mêmes, et être compatible avec l'installation de la chambre MBMF toute proche, comme indiqué dans l'étude cinématique de la Figure 7.13.

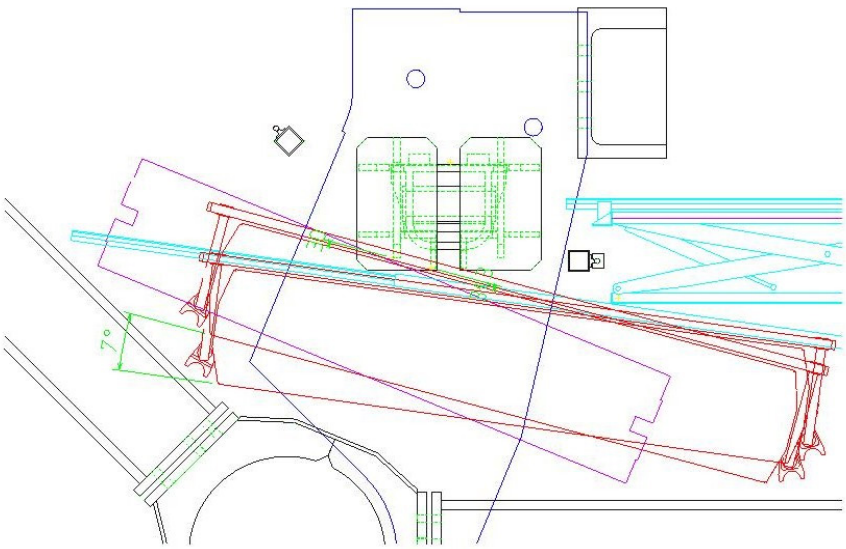


Figure 7.13 : Étude cinématique d'installation de la chambre MBMF sous le *girder*

Wim, CERN EP/TA3-TO, février 2002

Les contraintes imposées au concepteur sont donc, classiquement, à la fois mécaniques et géométriques. Il s'ajoute d'autres contraintes liées aux condition de la reconception : un temps d'étude réduit, et un choix dans la gamme d'épaisseurs de plaques restreint aux plaques déjà laminées – nous l'avons vu, il ne pourra pas y en avoir d'autres.

La phase de reconception mêle donc des calculs et des modélisations volumiques. L'un des soucis est dû à la torsion induite par le nouveau chargement. Une première idée consiste donc à libérer en rotation le mouvement du *girder* autour de son axe propre. Un croquis de principe établi par Bertrand, reproduit à la Figure 7.14, est transmis à Olivier, le projeteur en charge, qui y apporte sa touche, étudie le système de support du *girder* sur le pied, et réalise la modélisation CAO présentée à la Figure 7.15.

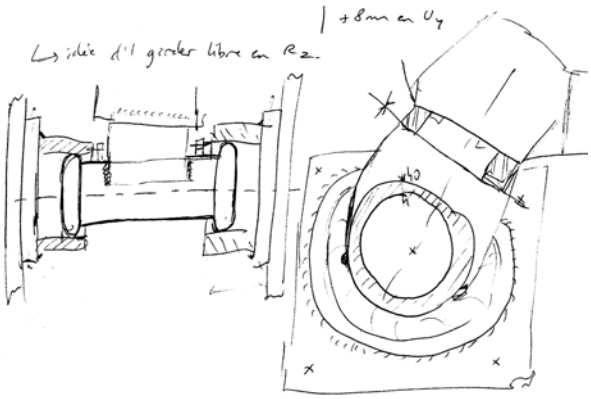


Figure 7.14 : Schéma de principe d'une solution libre en rotation

Bertrand, dessin manuscrit, juillet 2002

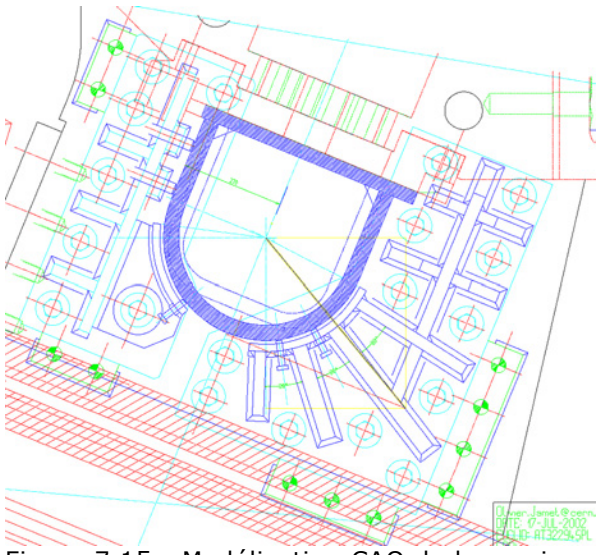


Figure 7.15 : Modélisation CAO de la version dite « *tiltée* »

Olivier, objet Euclid AT322945PL, 17.07.2002

Cette version supprime la cale pentée entre la poutre et la boîte de connexion, et garantit un espace d'installation confortable pour la chambre à muons. Cette supériorité sur ce dernier critère est confirmée par l'étude d'intégration montrée à la Figure 7.16. Par ailleurs, elle assure un positionnement transverse très résistant du toroïde, tout en optimisant le transfert de charge au pied, comme en témoignent les calculs de la Figure 7.17.

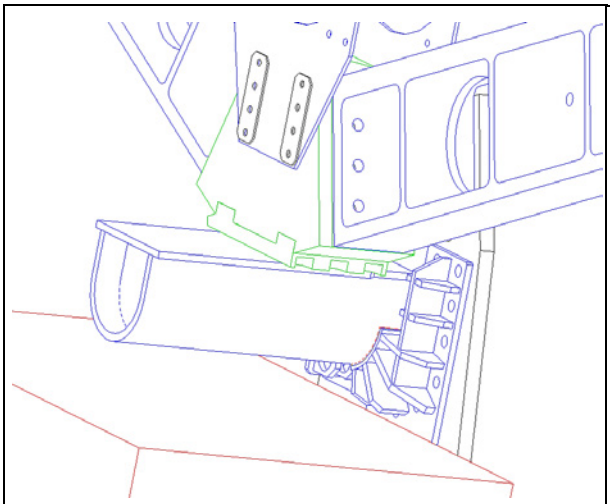


Figure 7.16 : Étude d'intégration

Olivier, 17 juillet 2002
En vert, la boîte de connexion du toroïde, en rouge, la chambre à muons MBMF

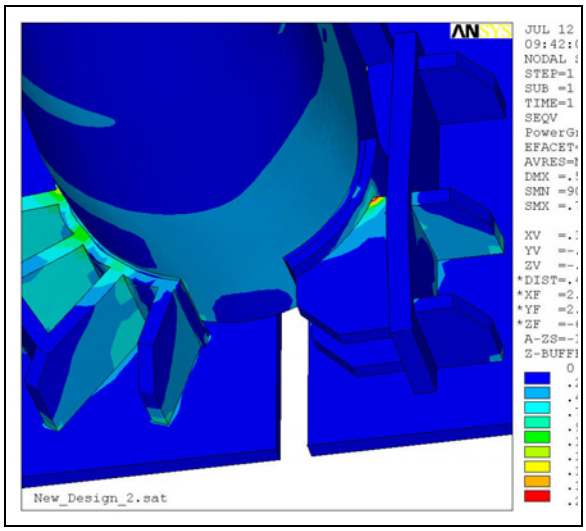


Figure 7.17 : Vérification du support de la version « *tiltée* »

Dimitar (TC), Analyse par éléments finis, 12.07.2002. Le modèle inclut une couche de caoutchouc entre le *girder* et le support

En parallèle se poursuit le travail initié dès le mois de mai, qui consiste à élaborer une version renforcée du design initial. C'est le retour à une version mécano-soudée pour la partie inférieure, entraînant une augmentation des épaisseurs de plaques et l'introduction de diverses autres dispositions constructives pour reprendre les efforts transverses qui sont apparus dans la révision du chargement.

L'ensemble de ces modification conduit à un design vérifié rapidement par le calcul présenté à la Figure 7.18.

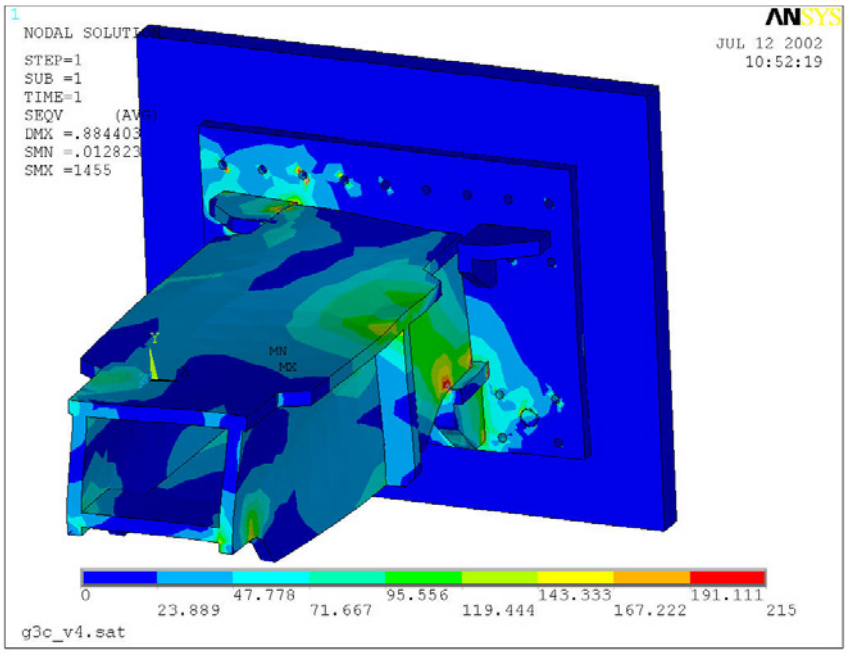


Figure 7.18 : Analyse par éléments finis de la version « *renforcée* »

Carte des contraintes équivalentes de von Mises, Dimitar, 12 juillet 2002

Puis ce design de poutre, une fois optimisé du point de vue du comportement mécanique, est adapté au design du pied existant, comme en témoigne l'étude d'intégration présentée à la Figure 7.19, et réalisée à la main : sur un plan papier en noir et blanc de la solution de référence, on vient coller un tirage papier en couleur,

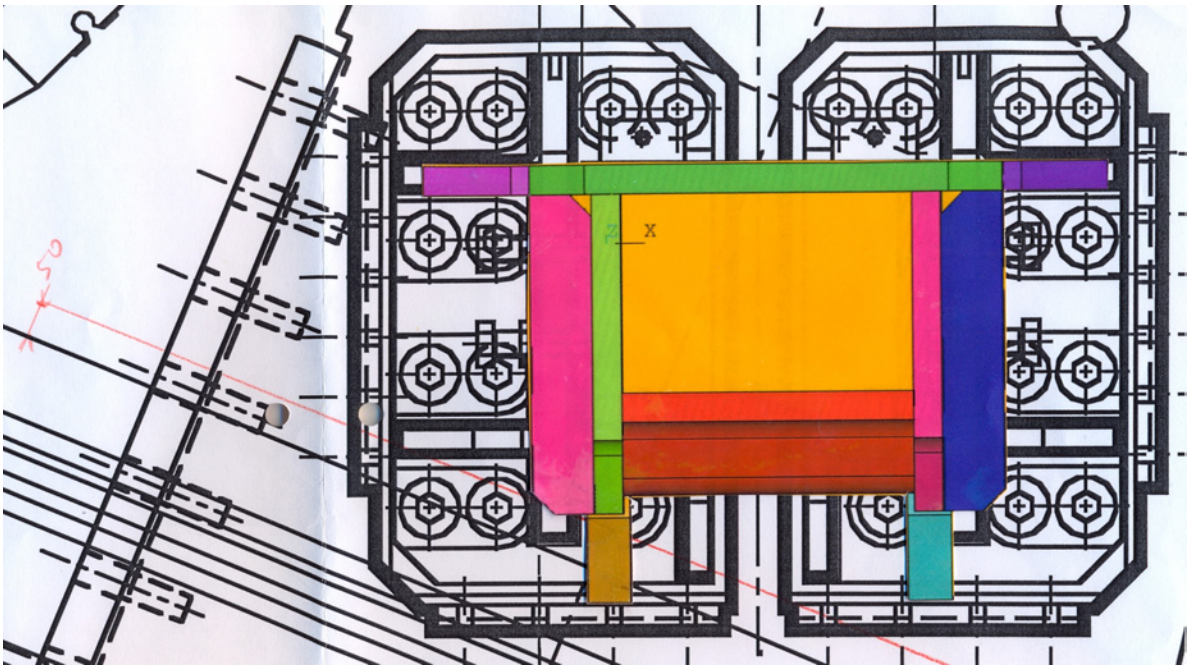


Figure 7.19 : Adaptation au pied de la version « *renforcée* »

Original : collage en papier, scanné.
Plan de fond, Olivier. Modèle couleur, Dimitar. Mise à l'échelle et collage, Bertrand.

à l'échelle adaptée, issu de la géométrie modélisée sous le logiciel de calculs présentée à la Figure 7.20. L'espace libre entre le coin inférieur gauche du *girder* et la chambre à muons peut alors être mesuré à l'échelle (cote en rouge de 50 mm).

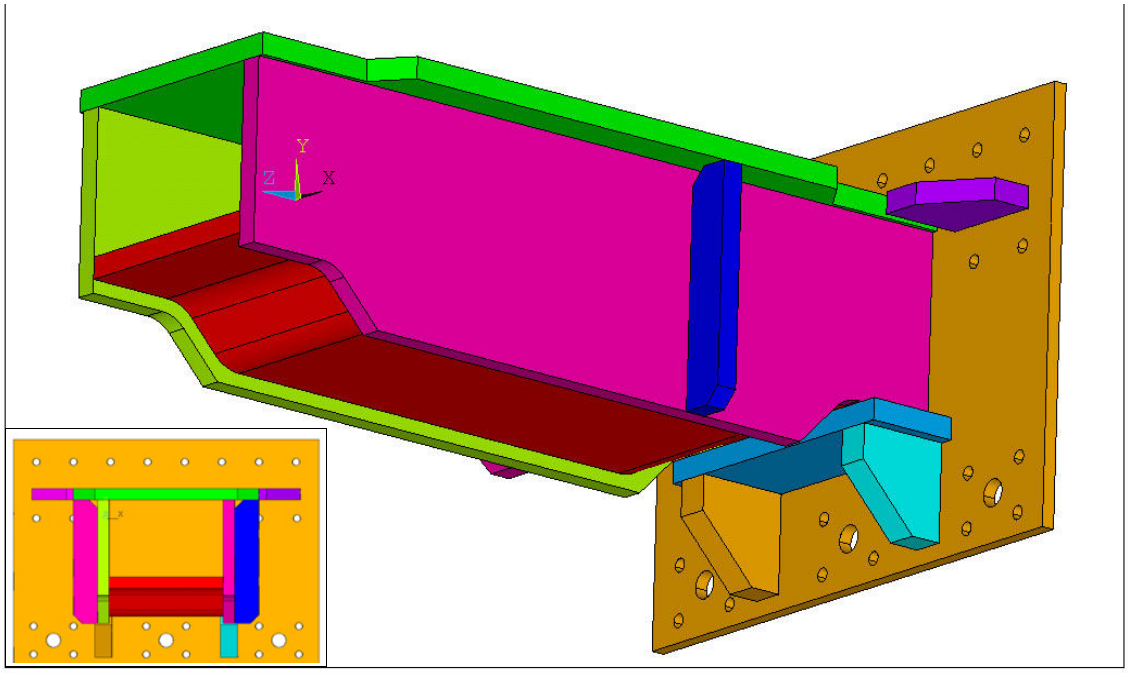


Figure 7.20 : Modélisation sous logiciel FEA de la géométrie « *renforcée* »

Analyse, Dimitar.
En vignette en bas, le tirage utilisé dans l'intégration à la main effectuée à la Figure précédente

7.6.2 Trancher le dilemme

À ce stade, trois solutions sont donc à comparer : la version initiale, la version dite « *tiltée* » défendue par l'équipe de conception des Pieds, et la version « *renforcée* » prônée par l'équipe de la Coordination technique. Une étude d'intégration des trois solutions vis-à-vis des critères d'intégration et d'installation de la chambre MBMF est alors réalisée, et présentée à la Figure 7.21, simultanément en vue de bout de côté. Plusieurs cotes sont nécessaires pour évaluer correctement les solutions.

Fin juillet, les discussions informelles entre les différentes parties prenantes s'intensifient pour définir laquelle des deux versions en lice doit être choisie pour étude détaillée. Le point de discussion est, comme depuis le début, la condition aux limites imposée sur le toroïde. Le chef du projet des aimants affirme :

> *The agreed policy so far is to design for a fixed connections and when found to introduce rubber in order to let the BT move on the feet on girder 3. […] The design idea of Bertrand for inclined girder-BT connection most likely violates this strategy. So I see this as a major change.* [399]

399. « La politique approuvée jusqu'à maintenant est de concevoir des connexions rigides et, une fois qu'on les aura trouvées, d'introduire du caoutchouc de façon à laisser le TB se déplacer sur les pieds au niveau du *girder* 3. […] L'idée de design de Bertrand d'une connexion inclinée girder–TB viole très probablement cette stratégie. Je la considère donc comme un changement majeur. » Herman, courriel collectif, 10.07.2002.

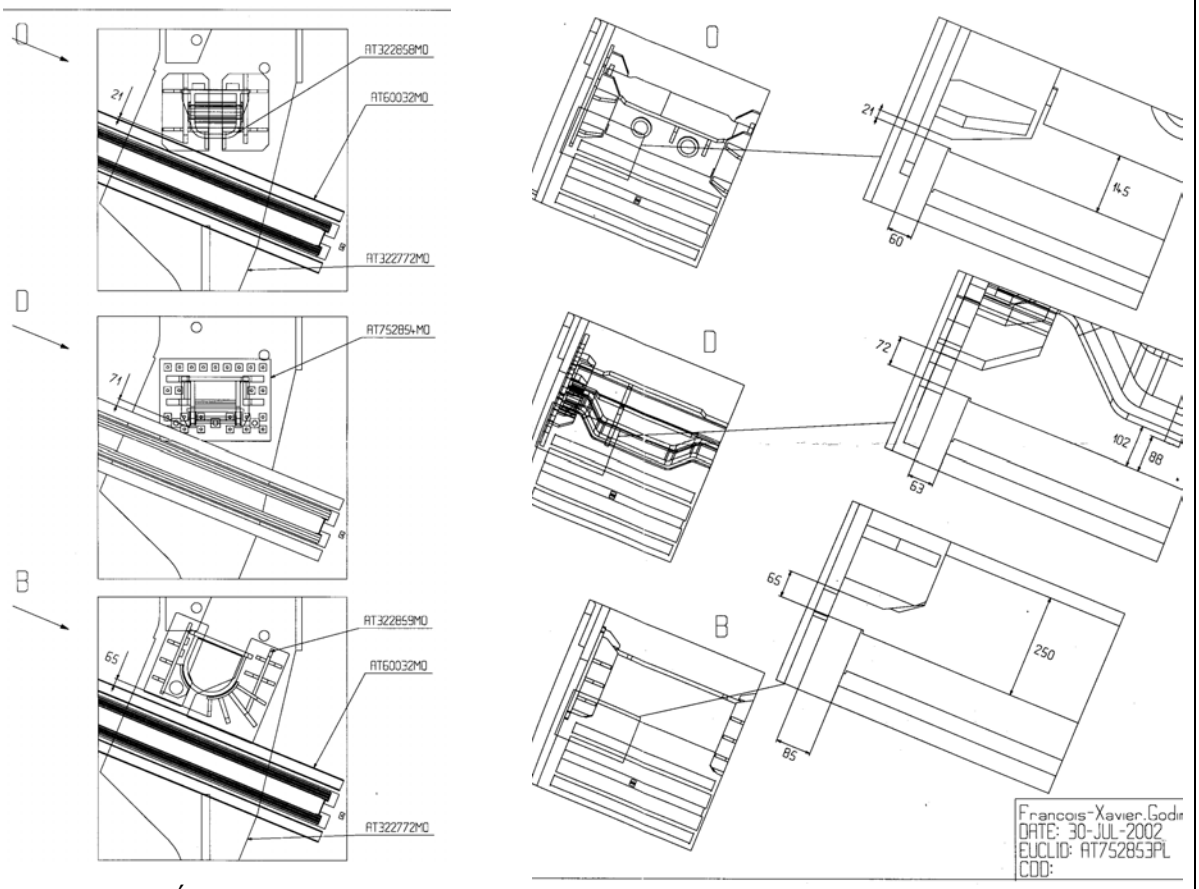


Figure 7.21 : Étude comparative d'intégration des trois solutions de *girder*

De haut en bas, solution de référence, version « *renforcée* », et version « *tiltée* »
François-Xavier, montage incluant certains modèles Euclid provenant d'Olivier (numéros AT72%)
Original: tirage papier format A3, scanné et réduit

Le chef du projet des Pieds réplique : « *In* x *the move will be prevented (and my understanding is that this is better), but no, in* z *the move is still possible.* » [400]

L'ingénieur de liaison du CEA émet des réserves sur le réglage : « *sur un plan incliné, il me semble plus difficile de jouer sur un calage.* » Concernant la raideur mécanique, il ajoute en résumant les avantages et les limites de la solution :

> *Je comprends bien dans ton design les renforts obliques (composantes inclinées x+y) mais le fait de transmettre les efforts de la boite vers ce renfort via un* girder *à section circulaire me semblait plus "diffus" en terme d'inertie. Ceci dit, je comprends bien le souci avec une section circulaire de répartir les contraintes à l'interface entre les girders et les renforts obliques. Dilem!* [sic] [401]

En réponse à la critique du chef de projet des aimants, il précise : « *Indeed the efforts in* x *in both structures are dependant on the rigidity ratio and it would be difficult to evaluate the variation of effort flux in both structures by softening in* x. » [402]

Le dilemme ne semble pourtant pas tel. Dans un message de synthèse, le chef du projet des Pieds résume la situation sur les deux points critiqués : conditions

400. « En *x*, le mouvement sera empêché (et selon moi c'est préférable), mais non, en *z* le mouvement est toujours possible. » Bertrand, courriel à Herman, 10.07.2002.

401. Marc, courriel à Bertrand, 10.07.2002.

402. « En fait, les efforts en *x* dans les deux structures dépendent du rapport de rigidité, et il paraît bien difficile d'évaluer la variation du flux d'effort dans les deux structures si l'on assouplit en *x*. » Marc, courriel à Herman, 11.07.2002.

aux limites et stratégie d'installation. Concernant le blocage des conditions aux limites, le mouvement en z est le seul requis, le CEA demandant que le mouvement en x soit bloqué, et la solution tiltée présentant en x une rigidité bien supérieure. Pour ce qui est de l'installation, Bertrand rend compte de discussions informelles avec plusieurs ingénieurs du CEA et qui convergent vers une fixation du *girder* sur la boîte de connexion, et d'un positionnement des supports sur le pied après la mise en place définitive.

Les échanges se poursuivent en particulier avec Arnaud, l'ingénieur en charge de l'installation de l'aimant au sein de l'équipe d'Herman, qui valide l'idée le 24 juillet. Le surlendemain, une réunion à trois (avec Geoff, *senior engineer* en charge de coordonner l'installation globale d'ATLAS) compare de manière systématique les avantages des deux solutions du point de vue de l'installation. Au cours de la discussion émerge une solution hybride (Figure 7.22). Comme le résume le compte-rendu :

> *The first design with square cross section and horizontal surface is called Design 1. The other with angled interface and cylindrical cross section is called Design 2. […] During the discussion, it was considered an "Hybrid solution" with horizontal interface like on design 1, and supporting adjustable end plates like on design 2. See if one will to study this case.* [403]

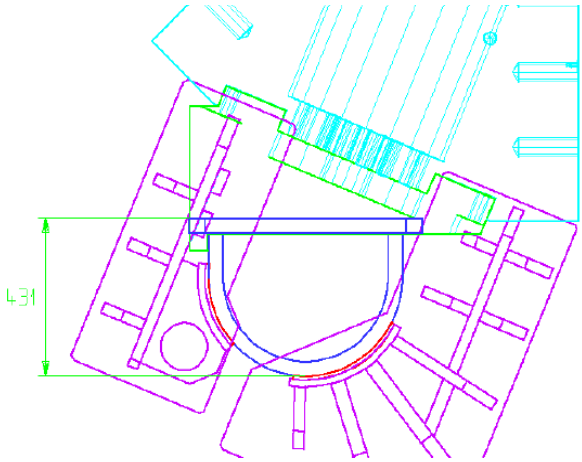


Figure 7.22 : Émergence d'une solution hybride

François-Xavier, 31.07.2002, à partir de maquettes d'Olivier et du CEA

Le principe d'une solution hybride semble validé par le chef du projet des aimants le 31.07.2002, puisque il diffuse le compte-rendu contenant la suggestion précédente. Et pourtant, le même jour, ledit chef de projet écrit au coordinateur technique : « *The flat, non inclined-girder is acceptable for the BT and in many sense easier to assemble when I follow the reporting of Arnaud.* » [404] Ce n'est pourtant pas ce qui est écrit dans le rapport… À la question de savoir si l'on souhaite étudier ce cas, la réponse implicite est donc : « *Non*. » Les convictions ont la vie dure, et la réticence du coordinateur technique et du chef du projet des aimants de revisiter la stratégie d'assemblage enterre *de facto* l'idée : « *What today bugs me is that the inclined solution will require the girder to be mounted with the coils and not before. It is a different scenario.* » [405] Différent, il l'est pourtant bien peu. Peut-être est-ce parce qu'il décalait l'interface tant discutée : elle aurait été localisée entre le *girder* (en bleu) et son support (en mauve),

403. « Le premier design avec la section carrée et la surface horizontale est appelée Design 1. L'autre avec l'interface inclinée et la section cylindrique est appelé Design 2. […] Pendant la discussion, une "solution hybride" a été considérée, avec une interface horizontale comme dans le design 1, et des plaques support ajustables comme dans le design 2. Reste à voir si l'on souhaite étudier ce cas. » Arnaud, *Minutes of meeting [26.07.2002] on implications of new girder design on TB installation*, 26.07.2002. Diffusées par courriel après contrôle par Herman, 31.07.2002.

404. « Le *girder* plat non incliné est acceptable pour le TB et pour beaucoup de raisons plus facile à assembler si je suis le rapport d'Arnaud. » Herman, courriel à Marzio Nessi, *Girders*, 31.07.2002

405. « Ce qui me contrarie, c'est que la solution inclinée implique que le *girder* soit monté avec les bobines et non pas au préalable. C'est un scénario différent. » Marzio Nessi, courriel à Herman, *Girders*, 31.07.2002.

avec une couche intermédiaire de caoutchouc (en rouge), et non plus entre le *girder* et la cale pentée (en vert) boulonnée sur la boîte à connexion (en cyan). Certaines frontières persistent, et sont parfois aussi difficile à déplacer qu'à construire.

Du point de vue organisationnel, après ces échanges informels tous azimuths, parfois en marge d'un *Magnet Project Group meeting* où pourtant toutes les parties prenantes ne sont pas représentées, les discussions se poursuivent plus ou moins dans le cercle plus restreint de la *Task Force* établie début juillet par le management de la division de physique du CERN. Cette *Task Force* ne trouve en fait jamais ses marques, et ne parvient pas à s'affirmer comme le lieu privilégié des discussions, qui continuent à jaillir au fil des opportunités, des rencontres et du hasard. Il est intéressant de noter qu'aucune réunion globale évaluant de manière systématique les deux solutions à partir de critères bien établis n'est organisée.

Le chef du projet des Pieds, soucieux de finaliser le design pour ne pas bloquer outre mesure la production en Russie, sollicite fin juillet une réunion avec les ingénieurs du CEA. Il se voit obligé, dans l'ambiance un peu suspicieuse du moment, de justifier la nature de cette réunion : « *This meeting is TECHNICAL, that is : no decision taken, only meeting between design offices, to better understand each other and design in common what has to be designed in common.* » [406] Compte tenu des congés, cette réunion est programmée pour septembre, ce qui n'est pas du goût du coordinateur technique (voir la note n° 395 p. 212), qui pousse pour un choix immédiat entre les trois solutions maintenant envisagée (la solution hybride s'ajoutant aux deux précédentes). La pression s'accentue de toute part, comme en témoigne ce message privé et confidentiel :

> I've looked at the girder designs and still feel the modified version of your old scheme is best. You refer to it as TC design but its not really. It has an advantage that it can work with x movement and there is more space between the top of the girder and the connection box for any movement system. Both designs could be made to work. I think its time we should go forward and make the design work and lets start looking at other issues like assembly and survey. There just is not time to develop two versions. This sort of discussion might be OK if held some years ago. So I think you should back off pushing your new version and lets go forward. Think about it Bertrand. [407]

Il ne mentionne curieusement pas la solution hybride, alors qu'il était l'un des présents de la réunion du 26.07 qui lui avait donné naissance. C'est comme si les solutions adoptées étaient aussi vite oubliées, ou qu'elles ne parvenaient pas à percer la couche de résistance au changement. Suivant le conseil de Geoff de renoncer, le chef de projet baisse finalement les bras début août, mais en posant toutefois ses conditions et en émettant des réserves sur la résistance de la solution prônée par la TC, en particulier celle des supports de *girder* :

> *The baseline seems to be almost unanimously for reinforced design. Well... no comment.*
>
> *(I might tell later and elsewhere what I think of the "decision-making" process, and all issues which were not paid attention to. I do not want to polemic here.)*

406. « Cette réunion est TECHNIQUE, ce qui veut dire : aucune décision prise, ce n'est qu'une réunion entre bureaux d'études, pour mieux se comprendre mutuellement et concevoir en commun ce qui doit être conçu en commun. » Bertrand, courriel collectif, 30.07.2002.

407. « J'ai regardé les designs des girders, et j'estime encore une fois que la version modifiée de ton ancien principe est la meilleure. Tu la désignes comme étant le design TC, mais ce n'est pas réellement le cas. Elle a un avantage, celui d'être compatible avec un mouvement en *x* et il y a davantage de place entre le sommet du *girder* et la boîte à connexion pour le système de mouvement qu'on veut. On peut faire en sorte que les deux designs fonctionnent. Je pense qu'il est temps d'aller de l'avant et de concrétiser le design et de commencer à prendre en compte d'autres questions comme l'assemblage et l'alignement. On n'a juste pas le temps de développer deux versions. Ce genre de discussion aurait été OK si elle avait eu lieu il y a quelques années. Alors je pense que tu devrais arrêter de pousser ta nouvelle version et allons de l'avant. Penses-y Bertrand. » Geoff, courriel à Bertrand, 02.08.2002.

> *[…] My understanding is that the responsibility of this design must be endorsed by the TC; we will of course act as fair executives, for preparation of drawings and technical documentation, and follow-up of manufcaturing. But I do not wish to take any responsibility on the dimensioning of this solution; I hope that you can understand the reasons.* [408]

Il informe également son projeteur :

> *La solution penchée [tiltée] a été écartée. Je préfère ne pas te raconter comment (j'y vois pas mal de dissimulation, de mauvaise foi, de distorsion), ni pourquoi (essentiellement à cause du mouvement en x de la bobine); je n'ai pas envie de m'énerver pour la n-ième fois, et je préfère conserver intacte (si si) ta foi pour ce projet. […]*
>
> *On se transformera donc en exécutants de base (frustrant, idiot, tout ce que tu veux, mais c'est la vie): on prend le design pondu (et dimensionné) par nos chers collègues, on le détaille, et on le fabrique. Je décline ma responsabilité sur la résistance, comme tu peux le lire.* [409]

Avec le recul, et tout comme dans le cadre de la controverse sur les enveloppes, je ne suis pas absolument certain que ces critiques étaient toutes justifiées. Et il serait intéressant de déterminer la part d'aveuglement que donne l'envie tenace de convaincre ses partenaires de projet. Quant à l'interprétation de mauvaise foi, elle est assurément elle-même formulée avec une certaine mauvaise foi… Toutefois, la frustration est manifeste, avec le sentiment de n'avoir pas su se faire comprendre sur les avantages de la solution, ni qu'un accord puisse se construire sur une solution hybride qui, pourtant, répondait objectivement aux critiques, demandes et suggestions du projet des aimants – du moins à mes yeux.

7.6.3 Sortie de crise

L'affaire semble donc réglée, voire pliée, lorsque, suite à une nouvelle réunion déclenchée par les réserves émises dans le message du 7 août, un nouveau compromis est enfin trouvé !

> *Après avoir annoncé à la TC que je jetais l'éponge pour le* girder *(voir email de mercredi), on a eu une longue (comme d'hab) réunion hier. On est arrivé à un compromis. En gros: on adopte le principe du bas de notre solution (en la rendant rectangulaire, et non pas arrondi); et on fait un décaissé horizontal au niveau de la connexion de la boîte à bobine. Je laisse sur ton bureau quelques dessins de pré-pré-étude que j'ai esquissés histoire de voir de quoi cela aurait l'air.* [410]

Le premier de ces dessins, esquissé aux crayons, est reproduit à la Figure 7.23 aux côtés du deuxième dessin, constitué d'une surcharge à la main sur le dessin de la Figure 7.15 p. 215. Cette surcharge superpose la forme rectangulaire à la forme arrondie précédente, et indique la position de la surface supérieure horizontale visible dans la Figure 7.22, nouvelle interface avec la cale pentée qui avait réintroduite pour l'occasion fin juillet. Le troisième dessin présenté à la Figure 7.24 avec la modélisation CAO correspondante est une esquisse en perspective de l'évolution du *girder* hybride.

408. « La configuration de référence semble être presque unanimement pour le design renforcé. Bon… pas de commentaire. (Je dirai peut-être plus tard et autre part ce que je pense de ce processus de "prise de décision", et toutes les questions auxquelles il n'a pas été prêté attention. Je ne veux pas polémiquer ici.) […] Ce que je comprends, c'est que la responsabilité de ce design doit être endossée par la TC ; nous nous comporterons bien entendu en exécutants loyaux pour la préparation des dessins et la documentation technique, ainsi que le suivi de fabrication. Mais je ne souhaite prendre aucune responsabilité dans le dimensionnement de cette solution ; j'espère que vous comprendrez les raisons. » Bertrand, courriel à la *Task Force* (Olga, Geoff et Balasz), 07.08.2002.

409. Bertrand, courriel à Olivier, 07.08.2002.

410. Bertrand, courriel à Olivier, 10.08.2002.

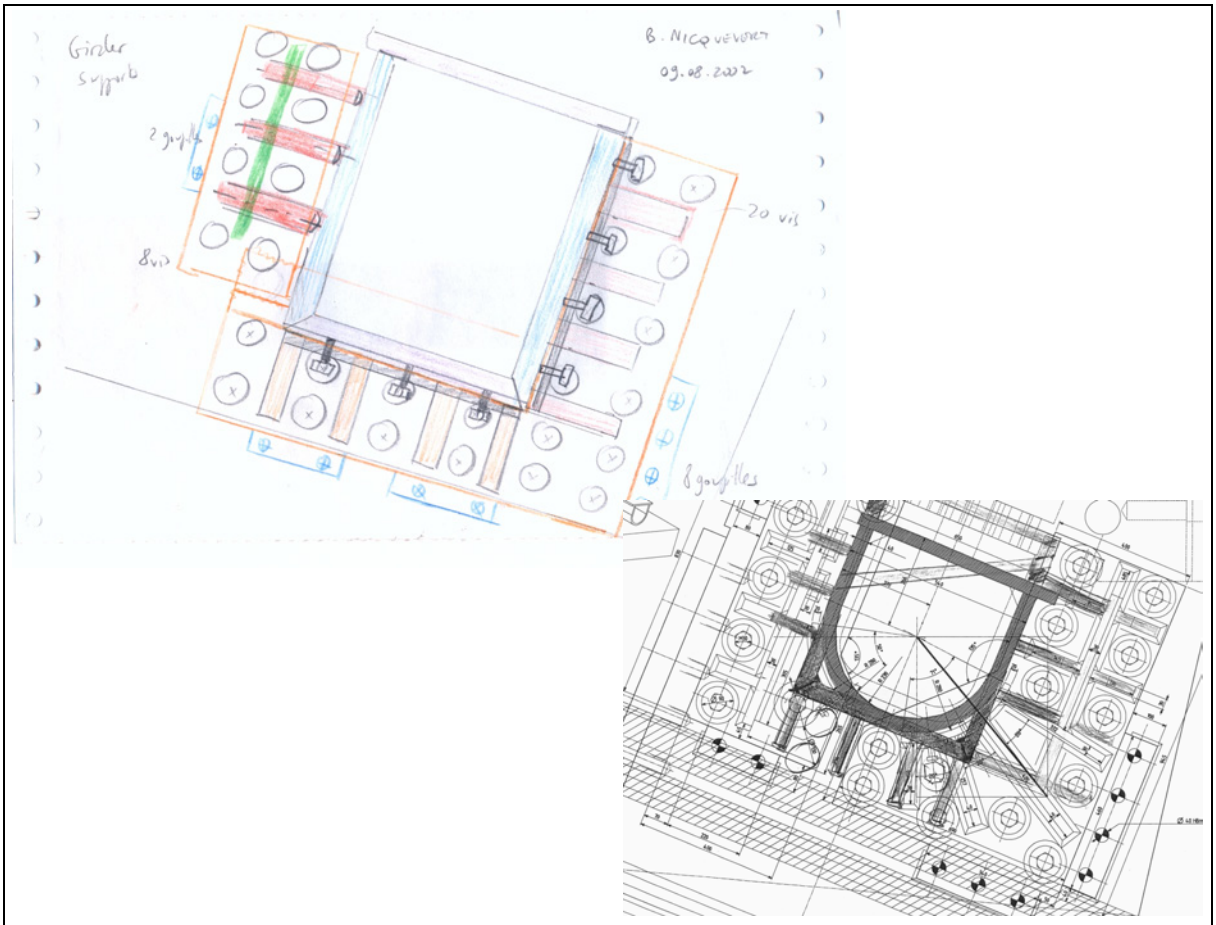


Figure 7.23 : Esquisse de la solution de compromis hybride du *girder* et de ses supports

Bertrand, dessin à la main aux crayons, 09 août 2002, sur base de plan d'Olivier

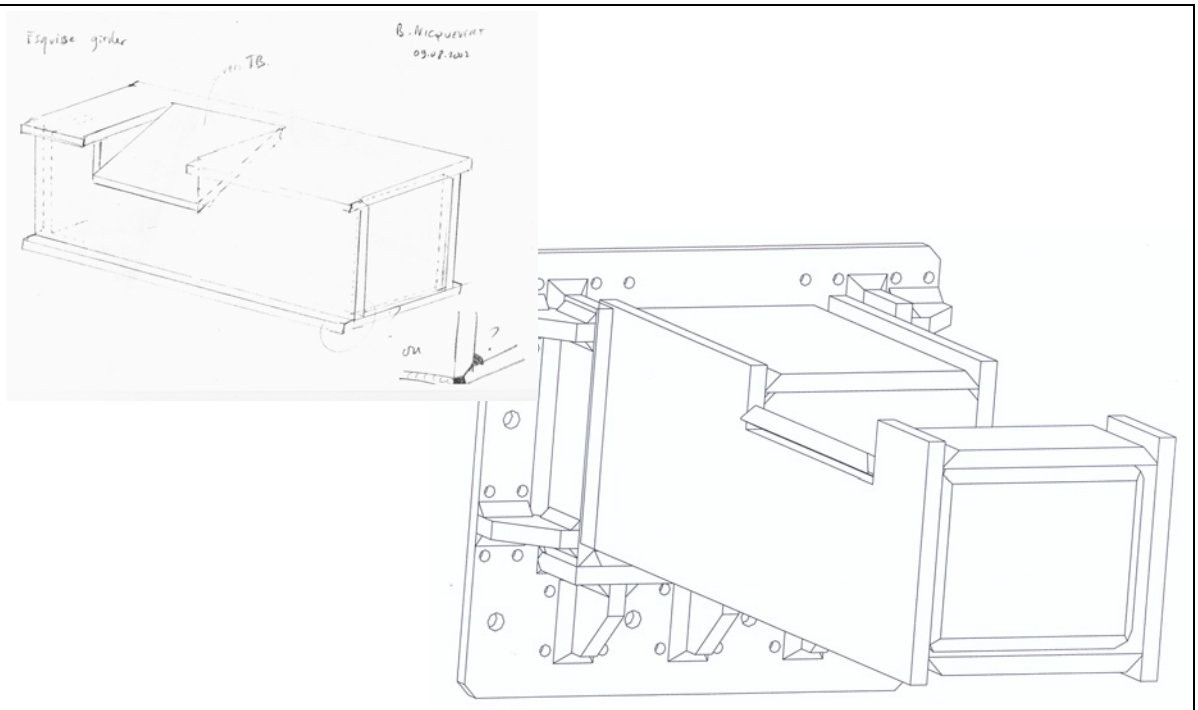


Figure 7.24 : Esquisse du *girder* hybride, et sa modélisation en 3D

Esquisse de Bertrand, 09.08.2002. Modèle 3D d'Olivier, 17.08.2002

C'est cette solution qui est finalement discutée à Saclay dans la réunion avec l'équipe du Toroïde, celle des Pieds et la Coordination technique. L'on y convient de la solution définitive, esquissée au tableau (Erreur : source de la référence non trouvée), et l'on abandonne de fait la voie hybride. Cette solution se contente d'intégrer quelques nouvelles et dernières évolutions, en particulier concernant les supports du *girder*, avec le recours à des "balcons" épais goupillés dans les pieds. Ces supports sont sur le chemin critique de la production, puisque leur design impacte directement celui des pieds. Or à cette date, les deux premiers pieds sont déjà terminés !

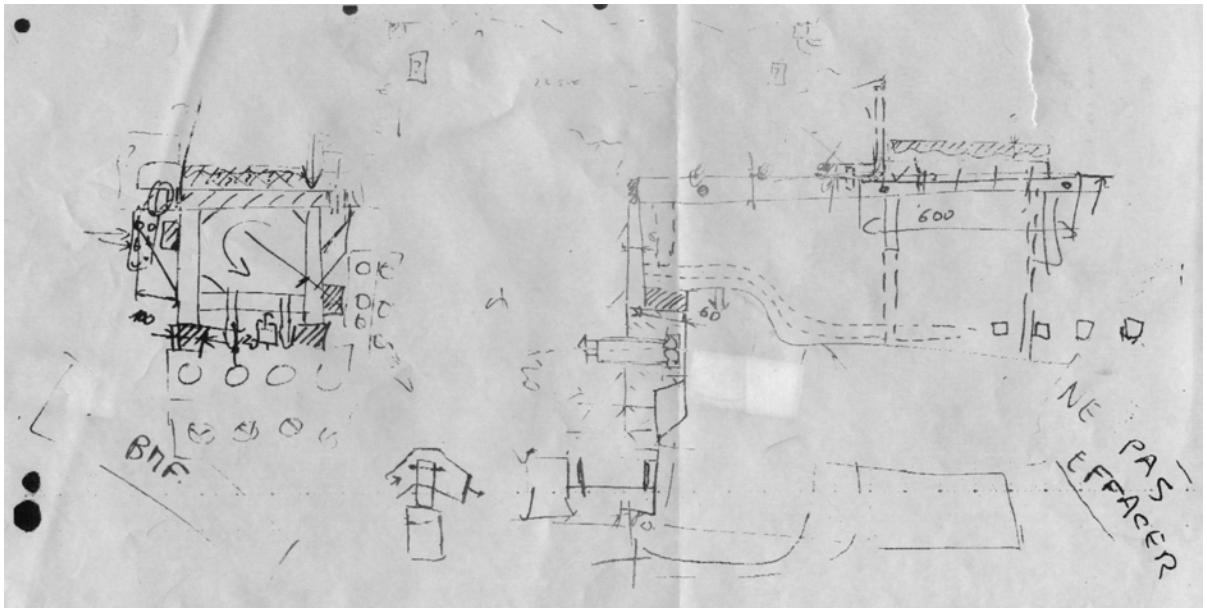


Figure 7.25 : Esquisse de la solution définitive

Copie papier du tableau blanc utilisé pendant la réunion de projet HB/TB, Saclay, septembre 2002

On assiste également à un retour définitif à une position de *girder* horizontale, et à une simplification de toutes les interfaces. La cale pentée qui était réapparue début août prend forme finale, et elle occupe tout l'espace rendu disponible : c'est visible sur la coupe de la Figure 7.26 réalisée par le bureau d'études du CEA et annotée durant une réunion ultérieure.

Le 10 septembre, après une réunion le soir tard avec le management de la Coordination technique, le chef du projet des Pieds synthétise l'accord final. La liste des paramètres figés est diffusée par courriel pour validation de principe par l'ensemble des parties prenantes. Quelques réserves subsistent encore : « *The thick plate balcony is still a proposal and needs to be proven viable first* », morigène un *senior engineer* de la TC. « *Right. Everything is a proposal and everything needs to be proven viable first. This is the purpose of having a baseline: everybody works with the same assumptions* », réplique le chef du projet des Pieds [411].

En quelques jours, l'étude mécanique de la version 9 des *girders* est affinée, les modèles pour l'analyse sont adaptés, et les calculs sont lancés. Le 23 septembre, les

411. « Le balcon en plaque épaisse est encore une proposition et il faut d'abord prouver qu'elle est viable. »

« C'est exact. Le tout est une proposition, et pour le tout il faut d'abord prouver que c'est viable. C'est l'objet d'avoir une configuration de référence : tout le monde travaille avec les mêmes hypothèses. »

Échange de courriels entre Balasz et Bertrand, 11.09.2002, à propos de la synthèse du 10.09.2002, *HB girders: design status.*

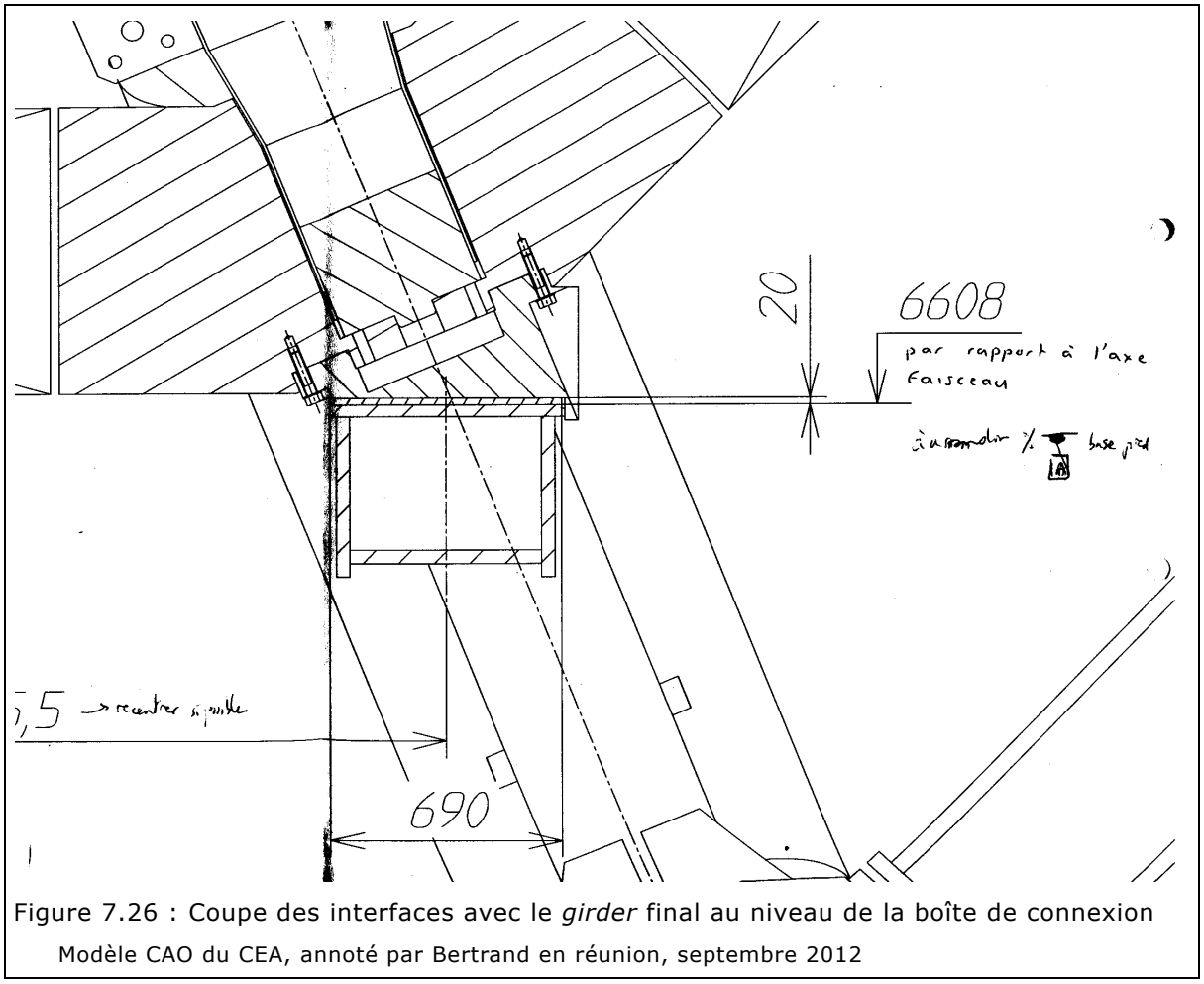


Figure 7.26 : Coupe des interfaces avec le *girder* final au niveau de la boîte de connexion
Modèle CAO du CEA, annoté par Bertrand en réunion, septembre 2012

résultats tombent : « *The results seem surprisingly GOOD!* » [412] À partir de là, les actions s'enchaînent très vite : présentation au *Technical Management Board* de septembre, lancement en approbation des dessins de définition, et communication à l'usine russe Izhora pour adaptation du design des pieds avec les trous de goupilles, puis préparation de la production des *girders*. La crise est terminée, il ne reste plus qu'à gérer l'après-crise.

Avec le recul (faute de compte-rendu et compte tenu du temps passé, qui a effacé la mémoire à court terme), je me demande en définitive de quelle manière s'est déroulée la réunion à Saclay début septembre [413]. Comment expliquer l'abandon définitif aussi rapide de la voie inclinée, même mâtinée d'hybride, alors que sa supériorité objective était démontrée ? Quelles croyances n'a-t-elle pas su détruire ? Pourquoi ai-je alors renoncé à soutenir cette solution, alors que son principe avait été pourtant validé en août ?

Je m'interroge si ce n'est pas en fait dû à un événement indépendant du projet ATLAS, à savoir ma décision personnelle de changer complètement de position institutionnelle : sollicité en août pour rejoindre le groupe qui se formait alors afin de coordonner l'installation du grand collisionneur LHC, j'acceptais rapidement. En fait, cette décision n'était pas si indépendante que cela du projet ATLAS : je trouvais que l'ambiance y était devenue détestable pour moi, et je ressentais la pression de manière très désagréable. Je n'ai cependant pas quitté mes responsabi-

412. « Les résultats semblent étonnamment BONS ! » Dimitar, courriel à Bertrand, *Girder V9*, 23.09.2002.

413. J'ai fini par retrouver le compte-rendu *ATLAS Magnet installation Minutes* (daté du 16.09.2002) de cette réunion des 12 et 13 septembre 2002 à Saclay. Il confirme que la décision a été prise dès le 11 septembre, et que seuls des points techniques sur la stratégie de positionnement des *girders*.

lités de chef du projet des Pieds : je les ai en effet assumées jusqu'au bout, à savoir assurer le suivi de la fabrication jusqu'à la livraison au CERN – ce qui a impliqué près d'une année et demie supplémentaire, jusqu'au début 2004. J'étais en effet engagé au nom du CERN dans ce projet vis-à-vis de la firme. Et on n'abandonne pas le navire au milieu de l'océan. Toutefois, en changeant de cadre, je me protégeais en partie de cette pression permanente avec ses injonctions que je percevais comme souvent contradictoires. À partir de ce moment, l'enjeu personnel n'étant plus aussi prégnant, il était beaucoup plus facile de lâcher sur des choix dont je n'avais plus à assumer les conséquences.

7.6.4 Une galerie de pièces à convictions

La difficulté de convaincre, même avec des arguments techniques solides, quand on fait face à des croyances fermement ancrées, est à mettre en regard d'un certain entêtement, d'une certaine fierté de chacun. Où et quand doivent survenir les compromis ? Ainsi des discussions fin juillet et fin août sur le choix de la solution, dont les teneurs transparaissent dans les discussions rapportées précédemment.

On voit que chaque partie prenante tient dès le début une certaine ligne dont elle a du mal à bouger. La Coordination technique possède un atout dans l'affaire, celui de disposer d'un ingénieur calcul. Or, on l'a vu amplement, la question est centrale. Quant à l'équipe des Aimants, elle est globalement assez conservatrice sur les solutions de *girder tilté*, privilégiant une solution qui matérialise clairement et découple les descentes de charge verticales des reports transverses. Quant à l'équipe des Pieds, elle souhaite profiter de cette opportunité qui est imposée par les faits pour pouvoir optimiser son design, et cherche à aller jusqu'au bout de la période exploratoire. Le sablier toutefois met fin à ces tentatives, et la solution retenue reste en grande partie dans la lignée du design initial, certes renforcé habilement, mais somme toute pas révolutionnairement modifié.

Au cours de ces négociations autour des diverses solutions, on parcourt toute une galerie de pièces à convictions, qui défilent dans les nombreuses figures du § 7.6. On y voit des croquis à la main, des perspectives, des modélisations CAO, des modèles pour analyse par éléments finis, des schémas esquissés en réunion, et même des collages aux techniques hybrides. L'exploration du domaine des possibles fait feu de tout bois, et tous les outils sont bons pourvu qu'on puisse « *montrer* ». Les manageurs techniques sont des éclectiques pragmatiques, et le processus de conception n'est pour eux qu'un simple guide indicatif global. Ce qui compte, c'est de convaincre, et donc de pouvoir échanger avec ses interlocuteurs et ses homologues, de remplir l'espace de ces échanges avec des arguments visuels aussi déterminants que possibles pour persuader les décideurs.

Ce qui frappe aussi, c'est la difficulté à instaurer ces espaces d'échanges de manière non pas nécessairement véritablement formelle, mais à tout le moins cadrée : on assiste à quantité d'échanges informels entre pairs, et à très peu de plate-formes ou de revues systématiques sur des bases qui auraient été au préalable stabilisées sur des hypothèses collectivement convenues. L'absence de clarté sur les exigences de conception se fait sentir encore lors du choix entre les solutions, et certains critères semblent apparaître un peu au dernier moment, comme les discussions sur les interfaces en caoutchouc fin juillet.

∴

Toute cette phase bouillonnante, voire tourbillonnante et créative, semble assez mal accompagnée en termes de gestion des données. Le nombre de fichiers graphiques échangés dans cette période est de l'ordre de la centaine. Si aujourd'hui je

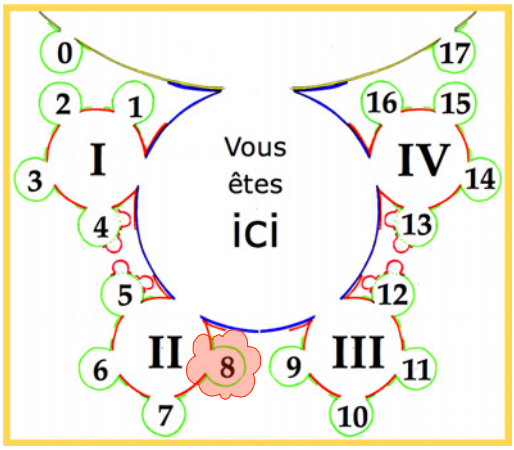
m'y retrouve plus ou moins dans la foison de pièces à conviction, c'est uniquement par le classement dans la hiérarchie des fichiers de mon ordinateur, sous une forme parfois plus ou moins lisible et avec des formats parfois impossibles à lire. Il faut attendre véritablement la fin septembre pour commencer à trouver des données gérées de manière systématique, et encore ne sont-elles que d'une seule nature : les plans. Les modèles 3D ne sont pas gérés de manière systématique en dehors de l'outil de CAO lui-même, et les données ne sont donc pas archivées de manière pérenne. Quant aux résultats de calculs, ils ne restent disponibles qu'au travers des notes de synthèse, au format bureautique, stockés dans un simple gestionnaire de documents.

Comment imaginer un outil qui permette de suivre les phases de conception créatrice sans trop contraindre la créativité du concepteur, qui recueille les variantes et versions successives en évitant la surenchère de qualificatifs de type « *final* », « *hybride* », « *solution 1 "TB"* » (correspondant, d'ailleurs, à la « *solution 2 "TC"* »), « *solution TC optimisée* » (correspondant curieusement à la solution « *HB renforcé* ») et autres inventions *ad hoc* de dénomination… C'est cette question, parmi d'autres, que nous allons aborder au chapitre suivant, consacré à la gestion des données techniques.

∴

Pour ATLAS	**От АТЛАСа**	**От ОАО «Ижорские заводы»**	**Pour la firme OAO Izorskiye zavody**
A. Naudi, directeur des finances du CERN	А.Науди (Финансовый директор ЦЕРН'а)	Ю. А*** (Первый заместитель ГДО-директор по продажам)	I. A***, Premier directeur adjoint et directeur commercial
A. Zaitsev, coordinateur du groupe de Russie dans ATLAS	А.Зайцев (Координатор Российских групп в АТЛАС'е)	О. Д*** (Заместитель ГДО по производству)	A. D***, Directeur adjoint pour la production
M. Nessi, coordinateur technique d'ATLAS	М.Несси (Главный инженер АТЛАС'а)		
B. Nicquevert, chef du projet HB d'ATLAS	Б.Никевер (Руководитель проекта HB в АТЛАС'е)	А. Г*** (Директор фирмы по продаже машиностроительной продукции)	A. G***, coordinateur du projet HB

Tableau 7.2: Signataires du protocole de lancement de la production à IZ, 11 avril 2001



Chapitre 8. Gestion de données techniques

Où le manageur technique s'applique à faire équiper de métadonnées les objets grapho-numériques

Le pessimisme est d'humeur ; l'optimisme est de volonté.

Alain [414]

414. *Propos sur le bonheur*, XCIII « Il faut jurer, 29 septembre 1923 », Gallimard, 1928.

Ce dernier chapitre de la partie II présente une étude de cas qui s'appuie au départ sur les études de cas précédentes et les prolonge selon l'axe de la gestion des données techniques. Dès 1995, j'ai été confronté à cette question avec la mission qui m'était confiée de structurer les données techniques pour ATLAS. Ces données techniques étaient alors essentiellement au départ les dessins, mais pas de manière limitative. La mission paraissait simple : mettre à disposition de la Collaboration les dessins « *validés* ». Or, en tirant ce fil de la validation des dessins, c'est toute la pelote de la GDT (Gestion de Données Techniques) qui s'en est suivie. Ceci apparaît déjà en filigrane dans les cas précédents de chapitres 5, 6 et 7. Ce phénomène résonnera particulièrement dans l'épisode de crise que nous observerons au cours du déploiement d'un outil dit de PDM (*Product Data Management*) adossé au nouvel outil de CAO mis en place à la fin des années 2000 dans les bureaux d'études du CERN, et que nous évoquerons rapidement au début du chapitre 13.

Cet axe de la GDT nous conduira depuis les études de cas de la partie II jusqu'aux réalisations organisationnelles concrètes de la partie IV, en passant par les formalisations et conceptualisations de la partie III. Plus concrètement, la présente étude de cas se consacrera principalement à trois blocages conceptuels relatifs au déploiement d'une GDT : la notion hautement stimulante d'article, ou d'*item* ; la problématique générale de la structuration des données ; et la question de leur validation. Dans la partie III, nous verrons comment l'approche par les espaces de conception d'une part, et la gestion des interfaces d'autre part, permet de clarifier l'approche de la GDT au sein du processus de conception, en jetant les bases d'une implantation opérationnelle concrète : celle que nous exposerons à la partie IV.

L'étude de cas présentée dans ce chapitre 8 dépasse le cadre strict de la GDT. Nous verrons combien la GDT est une question complexe : elle englobe et incorpore son contexte tout en le façonnant. La GDT est source de complexité en même temps qu'elle fournit des solutions aux problèmes qu'elle soulève, pour peu que son implantation se déploie suffisamment loin, à savoir jusqu'à la gestion de projet. Elle permet alors de lier projet, produit et processus de conception tout au long du cycle de vie. C'est pourquoi elle fait figure de précurseur de ce qui est désormais bien connu sous le nom de *Product Lifecycle Management* (PLM). L'étude de cas trouvera donc des suites et des échos dans les parties suivantes.

Cette thèse n'est pas une thèse sur le PLM. Il est donc tout à fait hors de propos ici de rendre compte d'une littérature foisonnante, à l'intersection des domaines du génie industriel, de *l'engineering design*, du management de projet ou de l'informatique. Ce nouveau domaine en soi s'est considérablement développé dans les années 2000. Il est donc important de remettre en perspectives les observations rapportées dans le présent chapitre : elles prennent naissance en 1995, période où le développement du Web était encore balbutiant, et où la CAO (au CERN, Euclid de Matra Datavision) était davantage centrée sur des préoccupations de modélisation volumique que de gestion sémantique. Et elles s'arrêteront à l'orée du déploiement des outils de la génération suivante (au CERN, Catia de Dassault Systèmes). Il est également important à titre liminaire de dire ce que *n'est pas* ce chapitre : on n'y trouvera pas de développements sur les modèles de données, ni de modélisation UML [415]. On ne parlera pas de gestion de projet PLM, ni de ROI [416], ni d'outils de gestion de configuration. On n'exhibera pas de modèle nouveau permettant

415. *Unified Modelling Language*, ou langage unifié de modélisation, un langage de modélisation universel dans le domaine de l'ingénierie logicielle orientée objet.

416. *Return On Investment*, ou retour sur investissement.

d'améliorer la performance de tel ou tel processus. On ne s'intéressera pas à la performance de telle ou telle architecture de serveur, de tel ou tel protocole d'échanges de données, de tel ou tel mappage (copie miroir) de propriétés des métadonnées.

Ou plutôt si : on abordera tout cela à la fois, et de manière globale, en montrant qu'aucun de ces aspects ne mérite d'égard en lui-même s'il n'est pas mis en perspective avec le système global duquel il participe, et auquel il contribue. Nous privilégions donc une approche systémique, avec la triple thèse suivante, en phase avec nos trois questions de recherche formalisées au chapitre 3 : le PDM est un *outil de gestion collaborative* du processus de conception de produit dans un contexte de projet ; le manageur technique (le chef de projet, ou le responsable de bureau d'études, ou le responsable de service informatique) a pour rôle d'*activer et réguler les boucles complexes* qui se créent entre les utilisateurs (qu'ils soient actifs, c'est-à-dire producteurs de données, ou passifs, c'est-à-dire consommateurs et exploiteurs de ces données [417]) et les fournisseurs de cet outil de PDM ; et enfin, le PDM peut contribuer de manière opérationnelle à *réduire la complexité du processus de conception collaborative sans en perdre la nature complexe*, et donner des éléments de réponse à la question formulée par Mol et Law dans leur introduction à *Complexities* : « *How might complexities be handled in knowledge practices, non reductively, but without at the same time generating ever more complexities until we submerge in chaos?* » [418]

À ce stade, cette formulation peut paraître quelque peu absconse. Revenons donc à la réalité du terrain, celui des projets de conception et de fabrication, et en tout premier lieu sur ceux que nous avons visités lors des précédents chapitres de cette partie II avec ses études de cas sur ATLAS, dans le contexte exposé au chapitre 2 de la partie I, à savoir les détecteurs de particules installés sur le LHC au CERN. À partir de ces quelques observations concrètes, nous pourrons commencer à élaborer nos éléments de réponse, qui seront développés dans la partie III.

La première section reprend donc l'émergence des besoins de gérer les données techniques et des solutions déployées. La deuxième section évoque une première phase de création et structuration des données, la troisième expose quelques mécanismes de validation des données et de leur partage, et la quatrième explicite quelques controverses sur la gestion des demandes de changements.

8.1 Besoin de gérer des données techniques

La gestion des données techniques apparaît en filigrane dans l'ensemble des cas précédemment étudiés, à commencer par le contexte du tout premier cas n° 0 [419]. J'ai ainsi retrouvé dans les notes de terrain d'un étudiant cette intéressante remarque concernant l'ambiance dans le Bureau technique que j'animais alors :

> *L'ambiance est très amicale. Le ton monte de temps en temps surtout lorsque BN a reproché à ZOL* [420] *deux plans ayant le même numéro pour des contenus différents. Les standards et la codification de tout document semblent être pris à la légère par certains des acteurs de la conception.* [421]

417. Présenter les choses de manière aussi schématique est déjà faire preuve de simplification excessive. À titre liminaire, c'est une façon de fixer des idées que nous nuancerons ultérieurement.

418. « Comment traiter les complexités dans les pratiques de connaissance, de manière non réductrice, mais sans pour autant engendrer encore davantage de complexités jusqu'à ce que le chaos nous submerge ? » [Law et Mol 2002, 1].

419. § 3.1 : « Une étude de cas : le rôle du Bureau technique », p. 79 sqq.

420. L'étudiant employait dans ses notes des pseudonymes aux initiales décalées par rapport à la réalité, de manière à préserver l'anonymat des personnes concernées. ZOL correspond à Robert, l'ingénieur technique en charge de l'intégration des muons dont on a pu voir un dessin à la Figure 6.9 p. 158. (Y avait-t-il un clin d'œil dans ce choix de pseudonyme, quand on sait que *Zoll* en allemand signifie douane ?)

421. Grégoire, *Notes de terrain*, 01.04.1998.

Cette observation illustre le constat porté par de nombreux analystes des outils PLM : « *le manque de rigueur dans la Gestion des Données Techniques est l'un des éléments les plus pénalisants pour la performance d'une entreprise* » [Debaecker 2004, 34], et plus généralement d'une organisation comme le CERN ou d'une collaboration comme ATLAS. Les études ethnographiques consacrées à cette question ont bien saisi cette problématique, comme en témoigne cette restitution issue directement de l'anecdote précédente :

> *The head of the design office showed signs of great concern when, from time to time, he found drawings with no information about their author or status lying around on desks or being passed on or discussed in meetings.* [422]

Quel est en effet le risque ? Celui de la confusion. De quoi parle-t-on lorsque l'on base une discussion sur un dessin sans référence, et dont, par conséquent, la version, le statut et la validité ne sont pas connues, ni même l'ancienneté ? Ainsi que le rapporte l'ethnographe :

> *The head of the design office often met with physicists or designers who happened to have screen shots or print-outs of detector part drawings with no reference. During discussions with them, he was confronted with the fact that he did not always know whether the drawings they talked about were valid.* [423]

On l'a vu dans le chapitre 7, même quand il s'agit de gérer de simples documents, le fait de ne pas assurer l'unicité de la désignation d'un document peut amener à de fâcheuses conséquences. Et l'auteur de ces lignes a été accusé – à tort – d'être à l'origine d'une confusion lorsqu'il envoya à la firme IZ un fax reçu apparemment deux fois (§ 7.5.1 p. 206) : l'on se souvient des soucis de compréhension mutuelle que cela avait engendré. C'est la raison pour laquelle, en tant que manageur technique, j'avais imposé aux membres du Bureau technique un *minimum minimorum* de la gestion des données : tout document imprimé et non destiné exclusivement à un usage privé à l'état de brouillon [Lécaille 2003, 94] doit comporter au moins trois métadonnées, fussent-elles griffonnées à la main : le nom, la date, et une référence au fichier informatique dont il est issu. C'est ce que l'on voit apparaître par exemple à la Figure 6.5 p. 154 : dans le coin inférieur droit, on peut remarquer la signature BJP/BN, et la date. Cette exigence a donné lieu à un développement spécifique implanté en 1998, l'outil *sticker* [424].

Les *métadonnées* [425] constituent donc le tout premier concept de gestion de document (qu'elle soit électronique ou manuelle, au demeurant) : des données sur les données – autrement dit, l'étiquette sur la bouteille. Sans elle, impossible de savoir de quoi l'on parle sans avoir à ouvrir le fichier – ou la bouteille. Quand il s'agit de documents simples, j'entends par là des documents de type texte ou plus généralement issus des outils de bureautique, les bons principes d'une GED (gestion élec-

422. « Le chef du bureau d'études montrait des signes de grande inquiétude quand, de temps en temps, il trouvait des dessins sans aucune information sur leur auteur ou leur statut qui étaient posés sur des bureaux ou qui étaient diffusés ou discutés lors de réunions. » [Vinck 2011, 36]

423. « Le chef du bureau d'études rencontrait souvent des physiciens ou des projeteurs qui se trouvaient en possession de copies d'écran ou d'impressions de dessins de pièces de détecteur sans aucune référence. En discutant avec eux, il était confronté au fait qu'il ne savait pas toujours si les dessins dont ils s'entretenaient étaient valides. » *Ibid.*

424. Pour une recension détaillée, voir [Lécaille 2003, 133-136]. C'est à partir de là qu'est définie la notion fondamentale d'équipement des objets grapho-numériques : « *L'équipement se rapporte à tout dispositif technique, méthodologique ou graphique qui accompagne l'action et qui est supporté par les objets mêmes auxquels ils s'appliquent. L'équipement peut être une méthode supportée par ces objets, les cartouches et les renseignements que ceux-ci contiennent, un numéro, un code-équipement, des symboles ou toute autre marque distinctive attribués à l'objet.* »

425. En suivant Lécaille (voir la note précédente), Vinck [2011, 2009] considère que ces métadonnées constituent l'équipement des objets intermédiaires. Nous reprendrons cette question au chapitre 12.

tronique de documents), dérivés de quelques siècles de gestion documentaliste et bibliothécaire, suffisent amplement : identifier auteur, titre, date de parution, éditeur, et éventuellement quelques mots-clés et la localisation physique du document dans les rayonnages ; et gérer ces informations qui constituent les métadonnées du document concerné dans un système de gestion de base de données relationnelles. À l'heure de la mise en réseau et du Web, ces principes restent des invariants [Salaün 2012, 48-50].

Les choses se compliquent notoirement quand il s'agit de gérer les données techniques issues de la CAO, de les valider et, plus complexe encore, de gérer les demandes de modifications. Analysons successivement ces trois phases, correspondant aux trois grandes fonctions des PDM : fonctions de *création* et gestion des données ; fonctions de partage et de *validation* des données ; fonctions de gestion de la *configuration*. La description qui suit correspond peu ou prou au corpus commun de connaissances partagées par les principaux acteurs et utilisateurs des outils de gestion des données, au niveau des ingénieurs de projet, des responsables de bureaux d'études ou des projeteurs. La dynamique complexe qui permet de construire ce corpus commun sera évoquée à l'occasion du changement de CAO d'Euclid à Catia, au début du chapitre 13.

8.2 Créer et structurer les données

Reprenons les métadonnées manuscrites de la Figure 6.5 p. 154. Au dos du tirage papier au format A4, Bernard, le projeteur qui avait créé le plan, avait griffonné quelques remarques *a priori* quelque peu sibyllines, que nous reproduisons à la Figure 8.1. Elles sont en fait les traces d'une gestion manuelle de configuration : c'est l'explication que l'ensemble représenté est constitué de trois sous-ensembles (TB : toroïde barrel ; HB : pieds ; et M : muons), dont les enveloppes sont décrites respectivement par des plans dont la référence est donnée (par exemple, ATLTB–0001), d'un certain format (ici 2 pour A2), comportant un indice de révision (indice du plan D pour le toroïde, version N1 de la configuration pour les muons) et avec des indications de dates diverses de révision. Ce sont ces informations qui sont nécessaires pour savoir de quoi l'on parle, et construire une référence précise et un état des lieux solide.

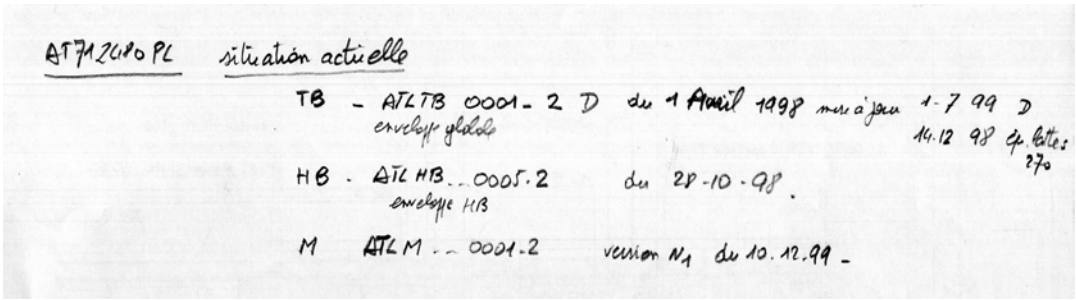


Figure 8.1 : Quelques métadonnées d'un plan issu de la CAO

Bernard JP, informations manuscrites portées au dos d'un tirage papier du plan AT712480PL, décembre 1999

En 1999 au CERN, les outils de gestion disponibles dans les bureaux d'études permettent un certain nombre d'opérations, et sont limités dans certaines fonctionnalités. Essayons d'y voir un peu plus clair.

La CAO, basée sur le logiciel Euclid, ne possède pas de gestion de données intégrée. Elle gère uniquement les liens entre modèles 3D, regroupés en figures, ainsi que les relations entre 3D et 2D. Chaque utilisateur travaille dans une base de données qualifiée par un nom de projet (ici **AT** pour ATLAS) et un ensemble (ici **71**

pour intégration). À chaque création d'objet, la base de données génère un numéro incrémental automatique (ici 2480), ainsi qu'un suffixe sur la nature de l'objet : MQ pour maquette (donc 3D), PL pour plan (donc 2D) ou VU pour vue. La base de données seule ne permet pas de visualiser le graphe, c'est-à-dire de déterminer de quels objets-fils est composé un autre objet-père, sans au préalable qu'il ait fallu ouvrir dans la CAO l'objet-père en question. Des outils spécifiques [426] ont été développés, pour aider à retrouver les données dans la structure de graphes, dont CONSULT et Scandoc [Lécaille 2003, 140 sqq.], et très ultérieurement ECC : *Euclid Control Center*, développé pour préparer la migration des données en 2008.

Pour illustrer cette préoccupation, et anticiper sur la problématique de la migration, comment fait-on en 2012 lorsque l'on souhaite récupérer un vieux plan Euclid, le plan AT712484PL (cousin du précédent), pour obtenir des images afin d'illustrer une étude de cas sur la modification des lattes d'ATLAS ? On sollicite le collègue qui a accès à ce dernier outil, et qui vous l'exhibe avec un petit commentaire malicieux : « *On parle de ce qui suit ? Plan avec un tag* delete. » [427] Ce qui signifie qu'il avait été prévu de détruire ce plan lors de la migration… (Cette anecdote rappelle la lancinante question de la pérennité de données informatiques au-delà de la disparition du système qui a permis leur création.)

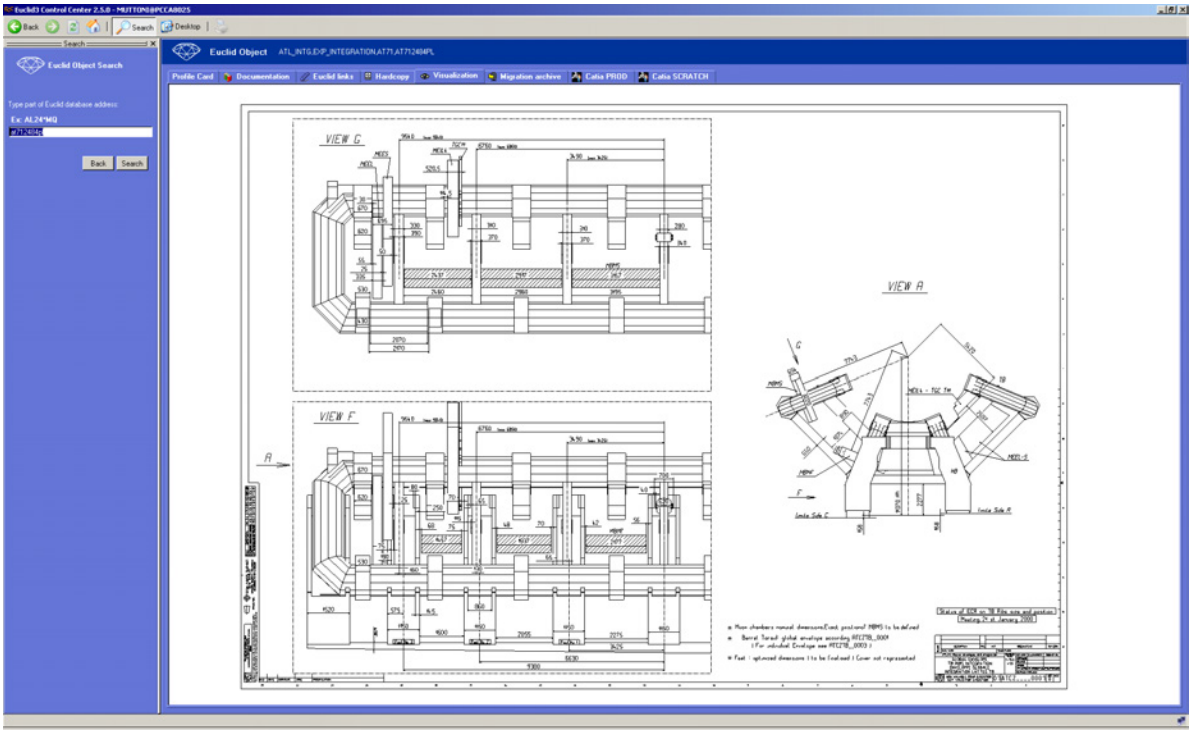


Figure 8.2 : Le plan AT712484PL retrouvé par Yvon dans les BD Euclid grâce à l'outil ECC

Les plans sont par ailleurs gérés par une application dédiée, CDD (*CERN Drawings Directory*). Cette application [428] est basée sur un puissant système de gestion de base de données (Oracle) d'une part, et d'autre part sur une interface Web – ce qui, en 1994, constitue probablement une première dans le domaine de la GDT. L'archi-

426. Nous ne donnons ces indications que pour laisser à penser les différentes couches de complexité des outils, couches que nous escamotons ici vaillamment dans la mesure où elles n'enrichissent pas directement le fil de notre propos.

427. Yvon, courriel à Bertrand, 17.01.2012.

428. On consultera avec intérêt *CDD. Document d'analyse* de C. Delamare, référence EDMS 1016009, publié à l'origine le 26 octobre 1994.

vage des données se fait sous une forme neutre et pérenne, le format hpgl [429], ce qui fait que ledit dessin est encore aujourd'hui accessible. Plutôt que de dérouler un long discours [430], analysons pas à pas la copie d'écran reproduite à la Figure 8.3.

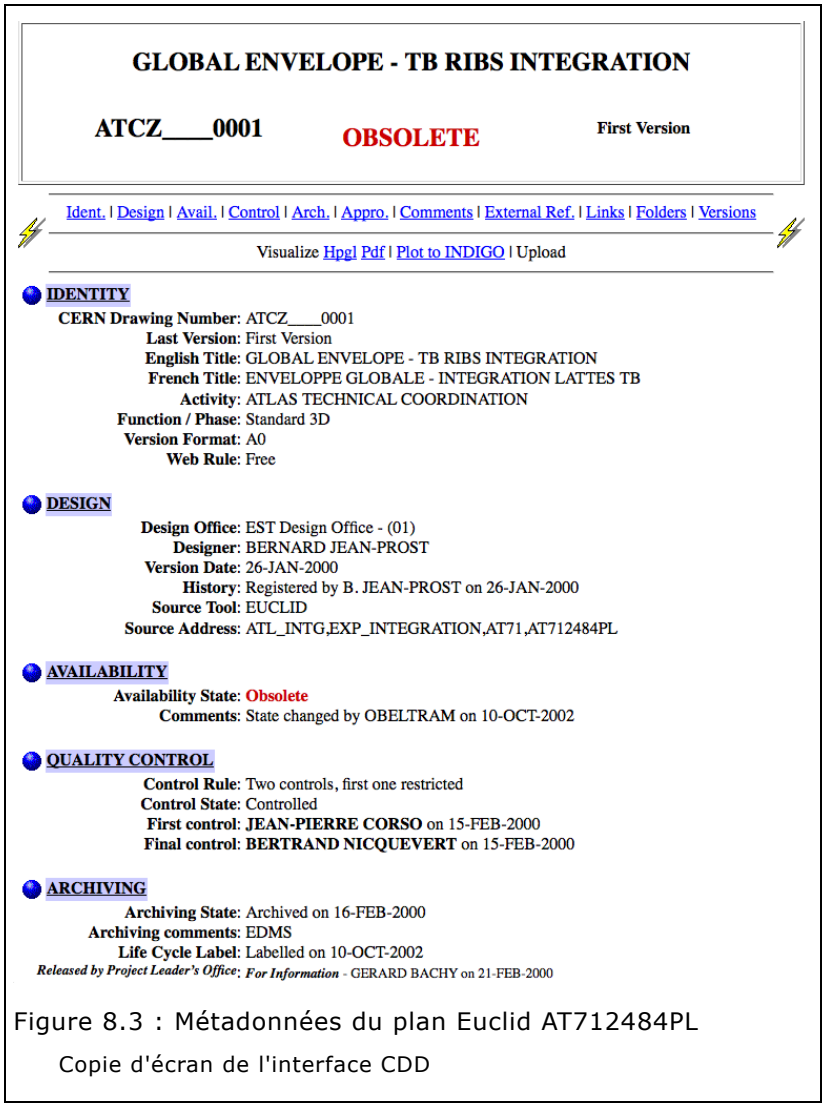


Figure 8.3 : Métadonnées du plan Euclid AT712484PL

Copie d'écran de l'interface CDD

Le plan Euclid produit par le projeteur est identifié dans le deuxième bloc d'information, et l'adresse source contient sa localisation dans les bases de données Euclid : on trouve son nom, AT712484PL. Le préfixe AT71 correspond aux activités d'intégration de l'expérience. Lors de son introduction dans CDD, le plan se voit attribuer un numéro (ici : ATCZ_ _ _ _0001) constitué d'un préfixe de projet (ATC : *ATLAS Technical Coordination*), d'un code équipement (Z_ _ _ _ : *global envelopes*, Z ayant été choisi pour Zone), et d'un numéro incrémental [431] (0001). Ce numéro est complété par un indice de versionnement (ici, il s'agit de la *First version*). Les autres blocs de métadonnées précisent le statut du plan (ici : *Obsolete*), ainsi que le mode de validation.

Au sein d'un grand projet, l'une des problématiques de gestion [Bachy et Hameri 1997 ; Hameri et Nitter 2002] est de construire l'arborescence produit, encore connue sous l'acronyme PBS [432]. Cette construction est un préalable à l'usage du système CDD, puisqu'il est exigé du projeteur, lors de l'enregistrement d'un dessin, qu'il sache à quel "code équipement" (ou nœud d'arborescence) le rattacher. En 1996, nous avons élaboré la version complète du PBS d'ATLAS dans le

429. HPGL, *Hewlett Packard Graphical Language*, considéré comme le Postscript des traceurs. Depuis peu (novembre 2011) a été développé un module qui permet la conversion « *on-the-fly* » (au fil de l'eau) des fichiers hpgl au format pdf, devenu le standard bien connu en matière de fichiers pérennes.

430. On se référera à la contribution : B. Nicquevert, S. Petit, P. Lécaille, « Un système de gestion de dessins sur le projet scientifique ATLAS : motivation, implantation, exploitation », in *Séminaire PRIMECA Systèmes de Gestion des Données Techniques – Offres, expériences et choix*, Grenoble, octobre 1998. [Nicquevert, Petit et Lécaille 1998]

431. C'est un numéro attribué automatiquement par CDD, et incrémenté à chaque nouveau dessin.

432. *Product Breakdown Structure.*

cadre de la mise en place du plan d'assurance qualité (QAP) du projet [433]. La Figure 8.4 [434] en donne les deux premiers niveaux. Imprimée, l'arborescence complète remplirait plusieurs formats A0 !

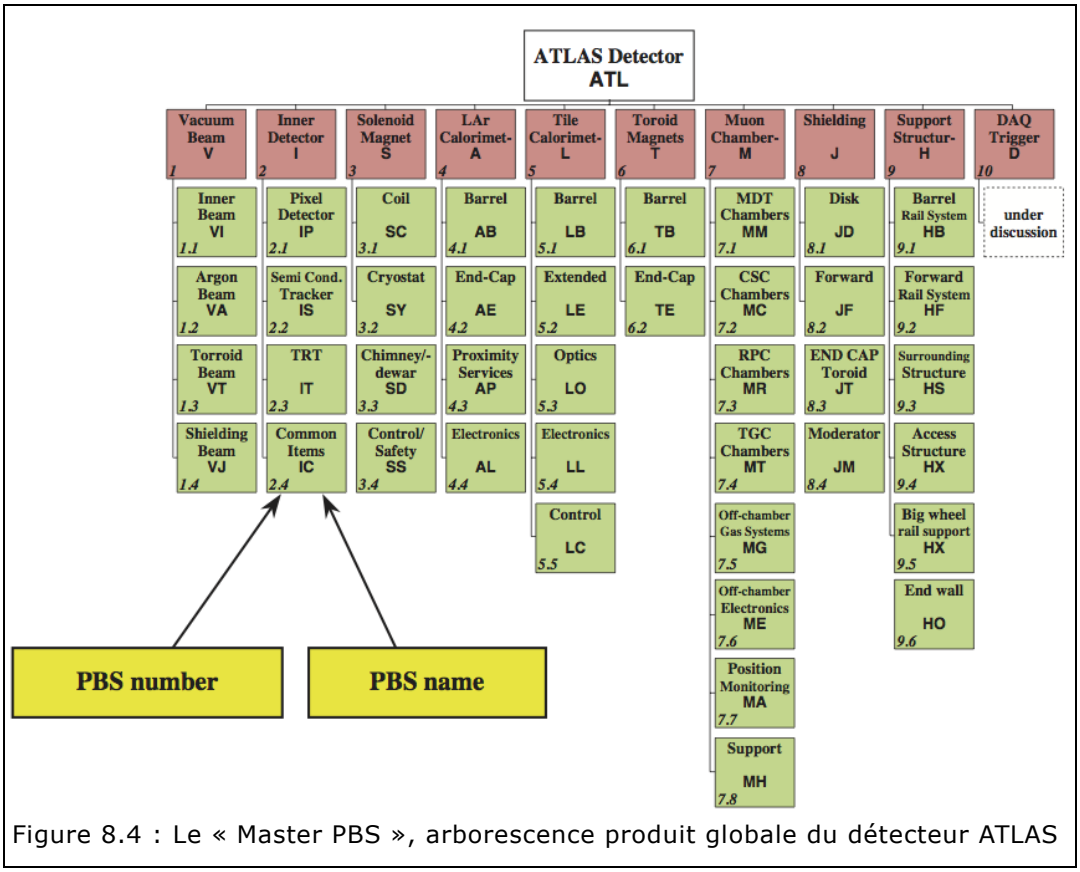


Figure 8.4 : Le « Master PBS », arborescence produit globale du détecteur ATLAS

L'ingénieur en chef d'ATLAS, maître d'œuvre de ce QAP, avait souhaité distinguer l'arborescence du détecteur de celle du projet, et avait donc introduit un niveau supplémentaire, avec plusieurs subdivisions : outre le détecteur lui-même, dont le préfixe reste ATL, ont été introduits un préfixe ATC, pour les données produites par la *Coordination* technique, c'est-à-dire concernant l'ensemble du détecteur ou les parties communes, en particulier les enveloppes, les services, l'alignement…) ; un préfixe ATA, pour les zones d'*assemblage* et d'essais, donc qui comportent des composants et outillages particuliers du projet qui ne sont pas installés dans la caverne au final ; et enfin, un préfixe ATF, pour les *Facilities*, c'est-à-dire les composants ancillaires situés autour du détecteur dans la caverne, comme les ponts roulants, réservoirs de fluides cryogéniques, services spécifiques, etc. Cette approche complique évidemment la gestion des codes (le préfixe à trois lettres n'étant plus identique à tous les composants du projet), mais il présente l'avantage de mieux distinguer les différents volets du projet, et rend mieux compte de sa complexité.

L'ensemble des métadonnées gérées par CDD permet de remplir le cartouche du plan, c'est-à-dire la zone normalisée [435] où sont reportées les principales métadonnées. Le cartouche d'un plan CERN se présente donc de la manière indiquée dans la Figure 8.5 (grossissement du plan de la Figure 8.2, dont les métadonnées sont

433. Voir en particulier notre contribution aux chapitres 2 (section *Identification and naming conventions*) et 3 (section *The ATLAS structures*) du TDR de la TC [ATLAS Technical Co-ordination Team 1999, vol. 13:11-30].

434. « ATLAS Detector master PBS », Figure 3-3 [ATLAS Technical Co-ordination Team 1999, vol. 13:19]

435. ISO 7200:2004 – *Technical product documentation - Data fields in title blocks and document headers* (ISO 2004b).

explicitées à la Figure 8.3). Sur ce cartouche, la plupart des champs correspondent en fait non pas à des données de structuration, mais à des données créées après l'enregistrement, lors des phases ultérieures de vérification et de validation. Au moment de l'enregistrement, le dessinateur ne doit définir que le code de rattachement (ici ATCZ_ _ _ _). Voyons dans la section suivante comment ces champs de gestion du statut du dessin sont ensuite insérés.

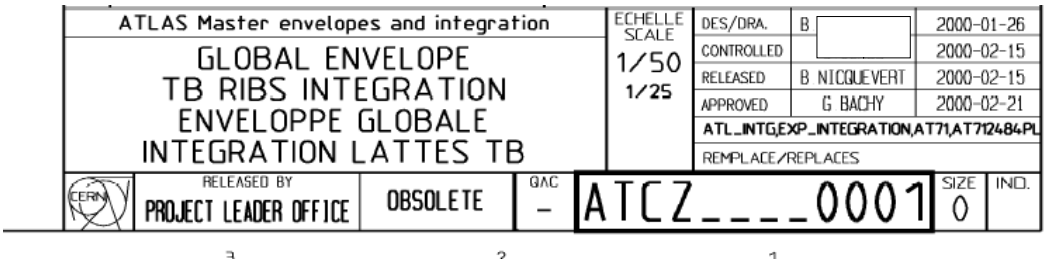


Figure 8.5 : Cartouche d'un plan validé, exemple d'un plan d'enveloppe

8.3 Valider et partager les données

CDD est un outil qui permet de gérer des processus élémentaires de vérification et de validation [436]. Explicitons le mécanisme sous-jacent de CDD pour éclairer la présence dans le cartouche des différents stades de validation, et surtout pour mettre au jour les phases implicites qui mènent d'un premier enregistrement de modèle jusqu'à un dessin validé, ou pour reprendre l'expression de Lécaille, jusqu'à une « *trace habilitée* ». Nous verrons comment les différentes étapes sont enregistrées dans CDD, et à quel moment les données sont mises à disposition des membres du projet [437]. Nous déclinerons ensuite deux exemples qui font respectivement écho aux cas du chapitre 7, avec le cas des dessins de production des pieds en Russie, et du chapitre 5 avec le processus d'approbation des enveloppes : ils illustreront le propos sur des cas concrets.

8.3.1 Les mécanisme de gestion de *workflow* dans CDD

La Figure 8.6 résume le modèle sous-jacent de *workflow* [438] programmé dans CDD. Ce diagramme figure dans la documentation diffusée par l'équipe CDD [439]. Ce cycle de vie est exprimé en rouge clair, il explique les différentes étapes de traitement d'un dessin : après la phase d'enregistrement, le dessin est soumis à un contrôle qualité à une ou deux étapes. Les types de règles de contrôle qualité sont définis par le plan d'assurance qualité de chaque projet, et CDD enregistre lequel de ces types a été sélectionné pour le dessin considéré (dans l'exemple de la Figure 8.5 : *Two controls, first one restricted*, ceci signifiant que le contrôle ne peut pas être effectué par le projeteur lui-même). Le dernier contrôle déclenche le processus d'archivage (en bleu), c'est-à-dire la création en temps masqué d'une version du dessin en format neutre (voir la note n° 429 p. 234) à partir du fichier source placé dans la

436. La formulation en termes de vérification et validation est basée sur des travaux plus récents [Chapurlat et Braesch 2008]. Elle est donc anachronique : au CERN il était alors (et il est toujours) question plutôt d'une phase de "contrôle" (menant au *Release*, c'est-à-dire à la "publication"), suivie éventuellement d'une phase d'approbation optionnelle. Nous discuterons ce glissement sémantique au chapitre 14.

437. Nous reviendrons aux chapitres 12 et 14 sur ce point, qui est délicat et important à nos yeux.

438. Traduit en général par flux.

439. Reprise dans [Nicquevert, Petit et Lécaille 1998], troisième partie, diapositive n° 19.

base de données Euclid, et le stockage de ce dessin au format neutre sur un serveur de fichiers. À partir de ce stade, la phase de vérification est terminée, le dessin est dans un état dit « *Released* » (publié), accessible à partir de l'interface Web (copie d'écran de la Figure 8.3) pour toute personne ayant un droit d'accès au système CDD, et visualisable avec l'outil approprié hpglview [440].

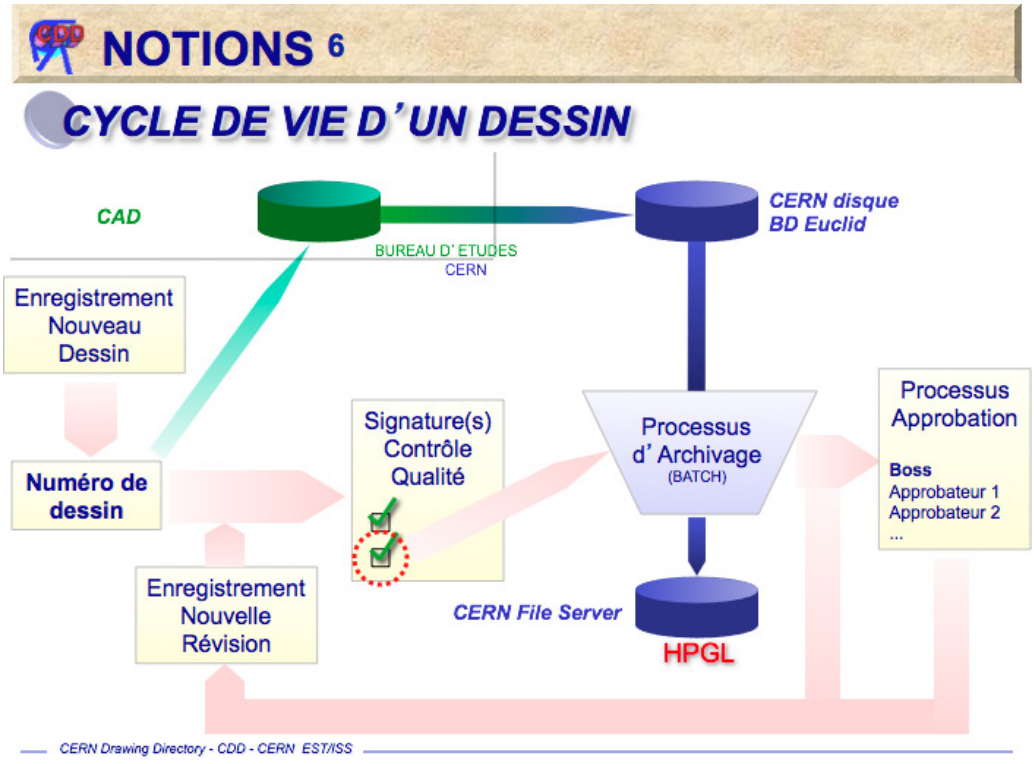


Figure 8.6: Cycle de vie d'un dessin dans CDD

Extrait de la documentation CDD, 1998

La dernière étape est celle de l'approbation, entraînant la validation du dessin. Cette phase est déclenchée par un « *Approval leader* », responsable de l'approbation (le *Boss* de la Figure 8.6), qui envoie à une liste donnée de personnes concernées une invitation à commenter le dessin à travers des fenêtres dédiées. Au vu des commentaires recueillis, le responsable de l'approbation prend ensuite la décision de terminer le processus. Il peut rejeter le dessin, ou bien l'approuver, et lui associer une étiquette (« *label* ») de type « *Valid for execution* » (valable pour exécution). Après la fin de ce processus, le dessin est à nouveau archivé, de manière à mettre à jour le cartouche sur le fichier neutre une fois ces étiquettes modifiées.

Il est possible à tout moment d'interrompre le cycle de vie d'une version donnée d'un dessin pour enregistrer une nouvelle version. Dans ce cas, les versions antérieures sont automatiquement déclarées obsolètes.

8.3.2 Archivage de dessins externes : le cas d'Izhora

Lors du cas présenté au chapitre 7 des pieds produits en Russie, l'ensemble des plans de fabrication de la firme Izhora en Russie a été archivé dans le système CDD, bien qu'ils ne soient pas issus de bureaux d'étude du CERN. C'est un élément important pour assurer le suivi et la pérennité des données décrivant un projet dans le contexte d'une collaboration multi-sites. La procédure d'archivage est alors

440. Logiciel développé au CERN disponible à http://service-hpglview.web.cern.ch/service-hpglview/.

adaptée, les fichiers sources ne provenant pas de la base de données Euclid du CERN.

Les dessins produits en Russie ont été rattachés selon le composant qu'ils décrivent à l'arborescence du produit. Il s'agit en l'occurrence de celle du système complet des Pieds intitulé ici « *Barrel rail system* », présentée à la Figure 8.7. Les cinq premières lettres des codes correspondants sont donc ATLHB (ATL pour ATLAS, H pour structures, B pour Barrel), qui correspond à la case 9.1 du PBS présenté à la Figure 8.10. Les autres codes complètent cette arborescence jusqu'à une profondeur de 4.

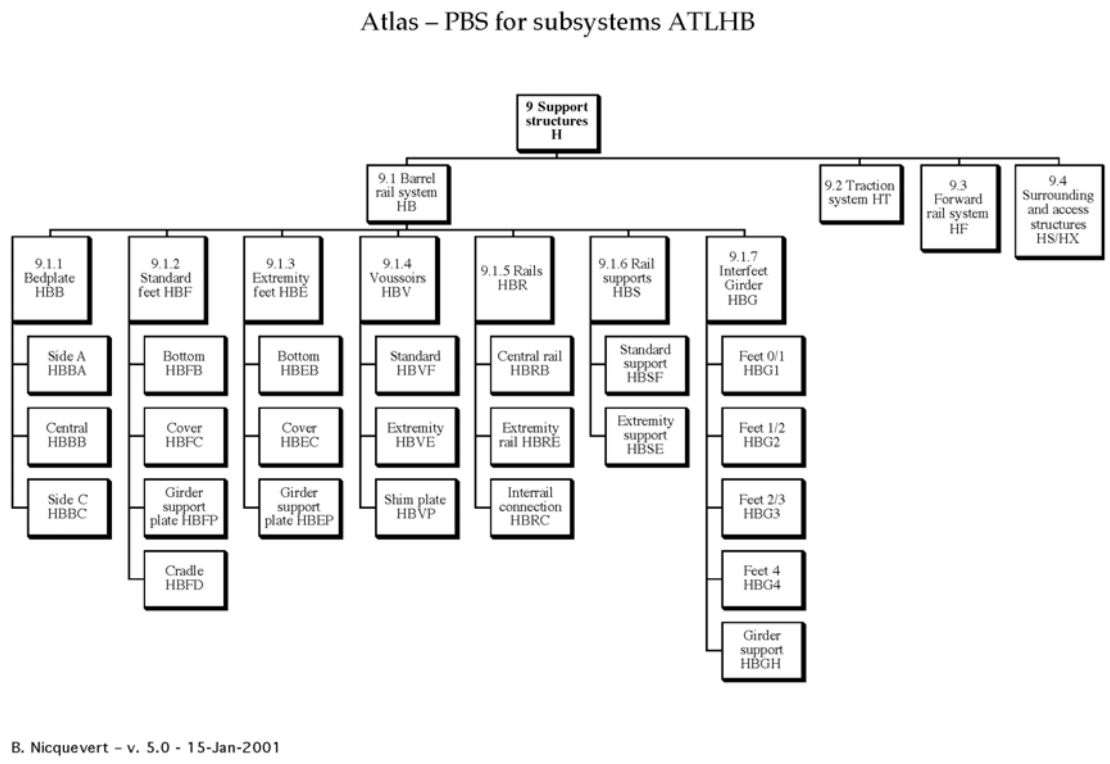


Figure 8.7 : Arborescence du projet des Pieds et rails, code racine ATLHB

Lors de l'opération de rapatriement des dessins de production dans le système central CDD, chaque dessin a reçu une double numérotation : tout en conservant son numéro d'origine défini par Izhora, il était également doté du numéro ATLAS correspondant. Dans l'exemple de la Figure 8.8, il s'agit de la partie inférieure droite du plan d'un *girder* d'extrémité. Cette partie du dessin est traditionnellement dévolue au cartouche, ce qui est défini par la norme [441]. En dessous d'un croquis présentant le dimensionnement d'un cordon de soudure, on peut constater que les métadonnées en deux langues se font nombreuses. Ceci montre combien un dessin est porteur de bien plus d'informations que de la simple définition géométrique ou technique d'un produit.

Le plan est tout d'abord équipé d'un cartouche conforme aux règles de qualité de l'entreprise. Il porte un numéro fourni par le bureau d'études d'IZ, dont le nom de code est ОКБ ИЗ [442] (tout en bas à droite). Ce numéro est constitué d'un préfixe de projet, 1502.98, et d'un numéro (00.380) correspond à l'arborescence produit

441. Norme ISO 5457:1999 – *Technical product documentation - Sizes and layout of drawing sheets* [ISO 1999]

442. ОКБ : Опытно-Конструкторское Бюро, c'est-à-dire « bureau d'études avancées ». Rappelons qu'ИЗ correspond tout simplement à Ижорские Заводы, soit IZ.

définie par IZ. Le suffixe СБ désigne un dessin d'ensemble. On trouve également, outre la masse de l'objet (765 kg), et l'échelle du plan (1:10) de format A1, une information de suivi de production : « С паспортом », c'est-à-dire “avec passeport”, une feuille ou un dossier de suivi menant à certification qualité. Enfin tout à gauche figure le tableau de signatures (Согласовано, approbations).

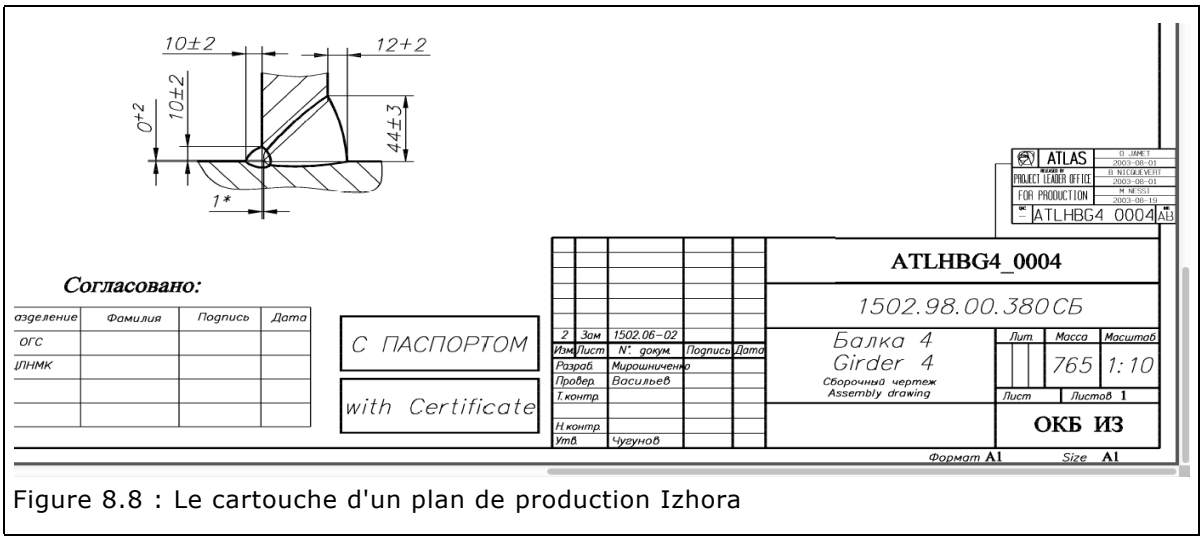


Figure 8.8 : Le cartouche d'un plan de production Izhora

Au-dessus à droite du cartouche d'origine, agrandi à la Figure 8.9, on trouve une version réduite et adaptée du cartouche CDD pour ATLAS, appelé “tampon”. Ce tampon inclut le numéro (ATLHBG4_0004) et l'indice du plan (AB) dans CDD, les dates de création, d'archivage et d'approbation du dessin, et les signataires correspondants, et enfin le label « *For production* ». Ce tampon est en fait rajouté au stade de l'archivage dans un cadre dont la taille et la position sont prédéfinies, et qui est laissé vide par le bureau d'étude pendant la préparation du dessin. On peut d'ailleurs ici constater le léger décalage de positionnement entre le cadre vide et le tampon intégré au moment de la génération du fichier neutre hpgl : malgré toutes les précautions prises lors du paramétrage des échanges, ce décalage est la trace visible de l'introduction ultérieure de ce “cartouche dans le cartouche”.

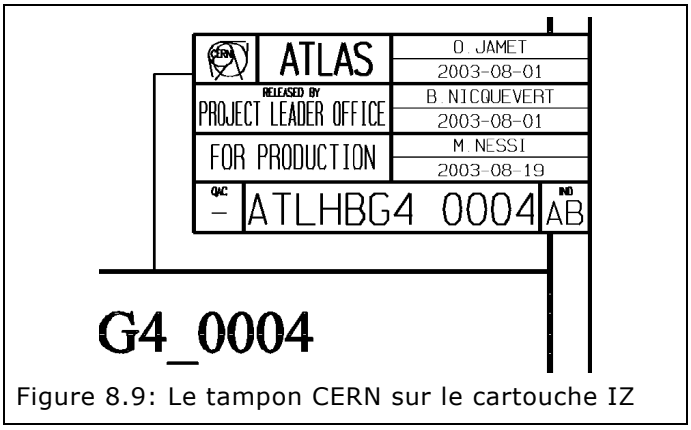


Figure 8.9: Le tampon CERN sur le cartouche IZ

On entrevoit le rôle du manageur technique dans la mise en place et le paramétrage de ces outils permettant de gérer la traçabilité des données de manière cohérente, aussi bien du côté de la maîtrise d'ouvrage (la Coordination technique d'ATLAS, au CERN) que la maîtrise d'œuvre (l'ingénieur d'IHEP) et du site de production. Car c'est une mise en place et un paramétrage qui ont donné lieu à de nombreuses navettes de discussion. Le manageur technique, chef du projet des Pieds, devait synchroniser les actions des projeteurs du Bureau technique au

CERN, du bureau d'études russe, du service support CDD et de la Coordination technique. Au Bureau technique, Olivier, le projeteur en charge de la conception, effectuait la modélisation et les plans d'ensemble ; Laurent assurait une grande partie de la mise en plan de la liasse de dessins de définition, et d'autres dessinateurs sont intervenus soit pour finaliser certains dessins, soit pour enregistrer des dessins en provenance de Russie. Le bureau d'études ОКБ de la firme russe a produit près de 150 dessins de production, en a établi la liste et géré la double numérotation. Quant au service support CDD, il a travaillé sur l'import et l'inclusion du deuxième cartouche au moment de la phase d'archivage. Les acteurs au sein de la Coordination technique, enfin, étaient en charge de certains stades de validation.

Sans trop entrer dans les détails assez techniques, il a fallu définir un processus complet : définition commune d'un espace (dimension et position) au dessus du cartouche habituel de la firme ; adaptation de la procédure informatique d'archivage CDD pour que l'inscription automatique des métadonnées se fasse dans l'espace ainsi réservé ; le bureau d'études ОКБ fournit une liste complète de ses dessins ; le Bureau technique CERN introduit et enregistre cette liste dans CDD, obtient les numéros correspondants et les envoie en Russie ; le bureau d'études ОКБ complète les dessins avec le numéro CDD, les contrôle (phase interne de contrôle qualité) et envoie l'ensemble sous forme de fichiers hpgl ; le Bureau technique charge ces fichiers aux nœuds du système CDD correspondant aux codes équipement ; le chef de projet exécute le deuxième contrôle, qui déclenche l'archivage ; enfin, 'ingénieur en chef ou le coordinateur technique valide ces dessins pour production. Il aurait été possible de simplifier encore la procédure en ouvrant un accès Web au bureau d'études ОКБ. Au début des années 2000, ce n'était toutefois pas possible, et ce pour une raison bien simple : les ordinateurs du bureau d'études n'étaient tout simplement pas connectés à un réseau, qui de toute façon n'était pas encore déployé (ne parlons même pas de “sans fil” ou de 3G) [443].

En dépit de mes recherches dans les très nombreux documents de mes archives (évoquées au chapitre 7), je n'ai étonnamment trouvé aucun document ni aucune trace d'échanges par courriel concernant la mise en place et la formalisation de cette procédure. Ceci dénote la part informelle résiduelle de tels projets, et ce sont des pans entiers de l'activité de terrain du manageur technique et de ses collaborateurs qui ne sont pas nécessairement documentés par écrit [444]. De mémoire, la procédure a été mise en place par discussions bilatérales successives, orales et donc non tracées, en particulier lors des réunions de travail avec le bureau d'études à IZ

443. Il y aurait une intéressante étude à faire sur les ruptures technologiques asynchrones. En ce tout début des années 2000, tandis que les premières clés USB apparaissaient tout juste, nos ordinateurs étaient équipés de lecteurs (pas encore graveurs) de CD-Rom (pas encore DVD), et les lecteurs de disquettes avaient progressivement disparu avec la mise en réseau systématique des ordinateurs. À IZ, les ordinateurs appartenaient à une ou deux générations précédentes, on ne pratiquait que les transferts par disquette, les ordinateurs n'étaient pas reliés aux réseaux externes, les ports USB n'existaient pas encore, et même les lecteurs de CD-Rom étaient rares. Le recouvrement technologique ne se faisait plus directement, l'échange était impossible.

444. Cette part de terrain reste donc tout à fait inaccessible aux historiens de bibliothèque, tels que ceux ironiquement représentés à la Figure 4.1 p. 99 (épigraphe du chapitre 4). Elle ne l'est pas davantage aux chercheurs préoccupés uniquement par le management stratégique, pour lesquels ces activités de gestion des données semblent à ranger au rayon des accessoires – on n'en trouve pas trace dans la littérature du management consacrée à ATLAS [Marchand et Margery 2009 ; Boisot et al. 2011]. Quant aux ethnographes, centrés sur les outils et leurs usages, il n'est à l'inverse pas certain qu'ils en perçoivent la dimension interactive avec le management de projet. C'est ce que nous constatons en analysant les observations de Lécaille, chapitres 5 à 7 [Lécaille 2003] sur ses questions de l'usage des outils de gestion des données techniques. Du point de vue méthodologique, nous nous efforçons de rendre compte de la continuité du terrain, depuis le moindre détail comme cette question d'un simple décalage de cartouche, jusqu'au choix stratégique du prestataire de la contribution *in kind* de la Russie avec le représentant du Minatom, en passant par les élaborations de PBS ou la gestion des demandes de changement. Chacun de ces niveaux contribue à la fois au bon fonctionnement d'un projet et à sa complexité. Le modèle qui sera proposé à la Figure 9.4 p. 275 est une tentative de rendre compte de ce continuum.

en Russie, et d'autres échanges bilatéraux avec l'équipe support CDD au CERN. Seul le résultat est tangible : une série de dessins archivés et toujours disponibles en ligne, de manière pérenne.

Cette documentation pérennisée a été très utile aux physiciens d'ATLAS encore très récemment, pour vérifier les géométries effectives lors de la modélisation des volumes réels des différents composants du détecteur dans les logiciels de reconstruction de trajectoires : « *Source geometry has been taken from SmarTeam Engineering database. Then it was full field [sic] with missing volumes. All missing parts were built in CATIA on the base of CDD drawings.* » [445] Le travail de consolidation d'une base documentaire (la référence produit) solide et conforme au *as-built*, le *tel que construit* est donc fondamental pour le projet, même s'il ne l'est pas toujours aux yeux des responsables et des membres de bureaux d'études.

8.3.3 Approbation de volumes : le cas des enveloppes

L'outil CDD ne permet pas de gérer le stockage et les métadonnées des modèles volumiques. Ce n'est d'ailleurs pas sa vocation : il se restreint à la gestion des plans. Il faut donc connaître (via la ligne « *source* », voir la Figure 8.3) la référence Euclid d'un plan [446] pour pouvoir remonter, à l'intérieur du logiciel de CAO, au modèle dont le plan est la projection. Or, à l'époque du cas décrit au chapitre 5 (1995-2000), CDD était le seul outil doté de fonctionnalités d'approbation de données techniques. Comment est-il possible alors de procéder pour valider des volumes ? Nous avons laissé en suspens cette question au § 5.4.3 p. 137. Maintenant que les mécanismes de CDD ont été explicités, voyons comment son usage a été adapté pour résoudre notre problématique, par le recours à des “plans vecteurs” décrivant la “mise en standard” des volumes correspondants.

Le Standard STD est une base de données Euclid en lecture seule « *dans laquelle les projeteurs mettent des objets EUCLID qu'ils jugent bons de diffuser* » [Lécaille 2003, 142]. afin qu'ils soient mis à la disposition des autres acteurs de la conception. Les différents points de vue et controverses sur la notion de Standard et la mise en commun des informations sont exposés par Lécaille dans son chapitre 5 « *Concevoir entre* “voisins” : des controverses sur l'équipement et sur l'échange des modèles CAO » [Lécaille 2003, 132-160]. Dans notre propre chapitre 6, nous avons montré le contre-plan de cette phase, à savoir l'exploitation dans un contexte de négociation entre systèmes des enveloppes élaborées selon les pratiques observées par l'ethnographe. Dans le chapitre 5, nous avions observé les difficultés à faire converger un processus global d'approbation qui était resté en dehors du champ d'observation de l'ethnographe [447]. Ici, nous nous intéressons à la phase amont, à la mise en place de l'outil. La place nous manque pour en effectuer une étude ethnographique détaillée, nous donnons les quelques éléments nécessaires à notre propos.

Le contexte du développement de cette procédure de Standard et de plan vecteur est celui de l'introduction progressive d'un système de gestion des données techniques au CERN. À la suite d'une *task force* [448], le logiciel Cadim de Eigner +

445. « La géométrie source a été obtenue à partir de la base de données techniques SmarTeam. Puis elle a été entièrement remplie avec les volumes manquants. Toutes les pièces manquantes ont été reconstruites dans CATIA à partir des dessins CDD. » Courriel d'Alexander Sh., 10.01.2012, concernant la reconstruction des bobines et des supports du toroïde.

446. C'est précisément cette référence qui a été rentrée dans le logiciel ECC pour récupérer le plan de la Figure 8.2. C'est la clé pour naviguer dans des bases de données qui ne sont aujourd'hui plus actives. Euclid a en effet cessé de fonctionner fin 2008 au CERN (§ 13.2.1 p. 381).

447. « *Je ne décris pas ici le processus jusqu'à son terme, lorsque les enveloppes seront « gelées »* (frozen)*, car ce n'est pas mon propos de détailler toute la méthodologie.* » [Lécaille 2003, 62]

448. Menée de 1995 à 1997, et dont j'étais le secrétaire scientifique [Chevalley et al. 1996 ; De Jonghe et al. 1997].

Partner est sélectionné. Son implantation est en cours en 1998 lorsque je formule ma demande auprès du support CAO. Cette demande souligne le conflit potentiel entre d'une part une solution "*quick and dirty*" [449] mais qui permettrait de satisfaire l'urgence du besoin d'un outil permettant d'approuver des volumes, et d'autre part une solution pérenne basée sur le nouvel outil de GDT et son module d'intégration des données CAO, mais dont la durée de développement pouvait assurément être anticipée comme étant bien supérieure. C'est l'hypothèse que formulait Éric, l'un des développeurs du support CAO :

> *La réalisation full Cadim va prendre un certain temps. C'est pourquoi j'essaie de proposer une architecture compatible avec Cadim où la case "EDMS" pourrait être remplacée par quelque chose de plus simple en attendant... Ceci aurait l'avantage de laisser avancer le schmilblick sans développer à contresens du projet EDMS. Celle-ci sera comparée à l'interface Euclid-Cadim fournie par Eigner & Partner.* [450]

Le développement d'une solution provisoire est approuvé par la hiérarchie d'Éric, et nous travaillons ensemble pour définir la spécification fonctionnelle de ce « *quelque chose de plus simple* », avec en particulier l'idée d'adosser une bibliothèque 3D à CDD. Éric propose alors de procéer comme suit [je conserve l'absence d'accents de l'original] :

> *Le dessinateur fait un plan par maquette a passer en std [Standard]. Il y mentionne les principales cotes d'encombrement et de positionnement. Je trouve ca tres bien si les projeteurs acceptent c'est meme une soumission superieure a celle que je proposais a long terme.*
>
> *Tant qu'a faire je te propose de standardiser (tiens tiens ...) ces plans en y ajoutant toujours la meme vue axonometrique, a la meme place et a la meme echelle: l'element en place dans une division du detecteur [...] Ce sera plus facile a interpreter que les cotes memes si celles-ci restent necessaires. On y ajoute la ligne faisceau et un rectangle pour representer le sol de la caverne.*
>
> *Une telle procedure de soumission me parait tres serieuse.* [451]

L'idée de la vue axonométrique est adoptée, et prend la forme indiquée à la Figure 8.10 pour le cas du disque de blindage [452].

Le travail d'élaboration conduit d'une part à un projet-pilote, et d'autre part à une note rédigée par Éric qui définit l'objectif de la mise en bibliothèque 3D, et la procédure de « *plan-vecteur* » (en lieu et place du terme « *plan de soumission* », terme jugé moins attractif) :

> *La mise en standard à l'intérieur d'Euclid vise à :*
>
> *1. sauvegarder les maquettes 3D ailleurs que dans le 'brouillon' général que constituent les Bases de Données Euclid de travail;*
>
> *2. leur associer une notion de validation/approbation ;*

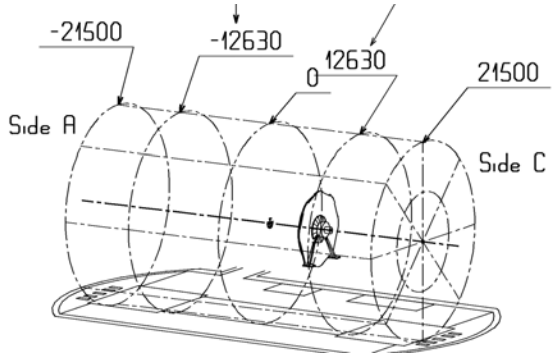


Figure 8.10: Vue axonométrique incluse dans les plans-vecteur

Extrait du plan enveloppe du disque de blindage, ATCZJD__0001

449. Que l'on traduirait volontiers en français par : « *Vite et mal* ».

450. Éric, courriel à Bertrand, 26.02.1998.

451. Éric, courriel à Bertrand, 04.03.1998.

452. Ce disque, évoqué au § 1.4 p. 38, est au centre du chapitre 1 déjà cité de [Vinck 1999b].

> *3. retrouver la dernière version et trier chronologiquement les versions successives.*
>
> *[…] De ce contexte est issue l'idée pragmatique d'associer un plan au modèle et de lui faire suivre le cheminement habituel par CDD : au moment où ce plan-vecteur est archivé, le modèle 3D sera automatiquement copié vers la ou les bibliothèques correspondantes.* [453]

Le mécanisme de base qui permet de supporter au niveau de l'outil de gestion le processus d'approbation des enveloppes est désormais en place : utilisation des fonctionnalités de CDD appliquées au plan-vecteur, dont l'archivage (après contrôle et avant approbation) provoque le stockage simultané du volume correspondant dans une base de données en lecture seule, assurant du même coup sa disponibilité et sa récupération ultérieure (les 3D dans Euclid n'étant pas au bénéfice d'une procédure de versionnement), ainsi qu'une certaine pérennité. Ce n'est que quelque temps plus tard que des outils de validation de 3D et de maquettes numériques via des modèles vrml (*virtual reality modeling language*) seront introduits. Et encore bien plus tard que, la fin d'Euclid aidant, la question cruciale de la pérennité relative de ces données volumique est apparue au grand jour.

8.4 Gérer les demandes de modifications

Classiquement, en gestion de qualité, les demandes de modifications sont gérées par des ECRs, ces *Engineering Change Requests* dont nous avons observé l'exploitation autour de la crise des lattes (§ 6.5 p. 165), et qui nous ont donné l'occasion de discuter quelques singularités dans la circulation formelle et informelle des informations. Nous y revenons ici sous l'angle de la gestion des données, et plus particulièrement de la question : quand la modification d'un dessin est approuvée, qu'est-ce qui est en fait approuvé ? Car le dessin est un modèle du produit en cours de conception, ce modèle étant lui-même dérivé d'un autre modèle, précisément désigné comme étant le modèle volumique, qu'il enrichit par un certain nombre d'annotations.

Pour illustrer cette question, et sans lui donner une extension aussi conséquente que pour les cas précédents, je vais présenter un petit cas concernant le projet des Pieds dans une phase antérieure à celle étudiée au chapitre 7. Nous resterons ici uniquement concentré sur la question formelle.

La période concernée constitue une sorte de prologue au cas du chapitre 6, en ce qu'il met en présence les mêmes entités organisationnelles et la plupart des acteurs impliqués dans le cas ultérieur des lattes. C'est aussi une anticipation du chapitre 7, puisqu'il y est amplement question, déjà, du supportage du toroïde barrel. Les deux sources d'information principales sur ce cas sont, d'une part, mes notes de terrain intitulées *ATLAS aux pieds d'argile*, qui s'étendent sur l'ensemble du cas, d'avril 1998 à mars 1999 ; et d'autre part un mémorandum [454] adressé à Gérard Bachy, l'ingénieur en chef, traduisant mon analyse de la crise à une époque contemporaine à cette crise. Résumons brièvement l'histoire telle qu'elle transparaît à la lecture de ces deux documents.

En avril 1998, Gérard Bachy propose dans une ECR [455] de modifier la position des pieds de façon à assurer le supportage des bobines au niveau des boîtes à biellettes et des voussoirs plutôt que dans le plan des lattes [456]. Après la crise provo-

453. Éric, Note EST/CAO 98-xx [numéro non complété], « *Bibliothèques 3D Euclid pour Machine et Expériences LHC* », juin 1998.

454. Bertrand, Mémorandum à G. Bachy, *Approval of drawing ATLHB___0003 release C,* BN/199910, 3 mars 1999.

455. ECR ATL-TC-EC-0009, 30.04.1998.

456. Pour le vocabulaire spécifique, voir § 6.2 : « Lattes, chambres, corridors et pieds » p. 152 sqq.

quée par cette ECR non concertée au préalable, il s'ensuit un mois d'intenses discussions entre les membres des entités concernées, qui font émerger une troisième solution : le supportage des boîtes à biellettes par des poutres entre pieds (c'est la solution présentée dans le chapitre 7, celle-là même précisément qui y fait l'objet d'une révision de chargement). La solution est alors adoptée et entérinée… mais formellement pas approuvée immédiatement ! Et c'est là que le cas devient intéressant pour notre propos : près d'une année plus tard, à l'occasion d'une révision des dessins concernés, un paramètre important (la distance entre pieds), pourtant figé en avril 1998, provoque en mars 1999 le rejet des dessins qui le contiennent. C'est la controverse qui s'ensuit que nous étudions ici.

Le style de résolution de problèmes qui émerge de la lecture de ces notes de terrain rappellera l'ambiance qui a présidé à l'élaboration de la solution menant à la sortie de la crise de la révision de chargement, rapportée au § 7.6 p. 213. Avec le recul, l'impression est celle d'un mouvement global un peu aléatoire, où la validation des solutions dépendrait de rencontres impromptues avec tel ou tel acteur de la conception, au travers d'une mosaïque de lieux de discussions dont on perçoit mal le degré d'interrelations : TCT, TCM, ATLBE, MPG, MLM, EB… Les tensions entre les différents sous-projets sont également assez palpables, et l'instance régulatrice semble absente. Cela a mené *in fine* à quelles réorganisations stratégiques, que nous avons analysées au chapitre 5 (§ 5.7 p. 144).

Nous nous intéressons dans la présente section à deux aspects de la crise : d'une part, la circulation et le traitement des informations et de leur support dans le cadre de l'analyse de cette demande de modification qui est, selon les termes de son demandeur, « *a "major" engineering change request* » [457] ; et d'autre part, les failles dans l'usage du concept d'ECR et des outils censés le supporter.

Dans la première partie de l'affaire, l'ECR est portée par un simple formulaire [458] ne comportant aucune donnée technique en soi. Il est simplement fait référence à des documents potentiellement à modifier : un TDR (celui des muons, car à cette date celui de la TC n'est pas encore publié, il est en cours de rédaction), et un dessin référencé comme étant « TC ATLHB 0002-0 ». Ce dessin est celui de l'ensemble des pieds en vue longitudinale, archivé le 3 février 1998 dans sa version initiale qui n'avait pas été soumise à approbation.

On constate que cette ECR est diffusée sans avoir été préalablement discutée ni étudiée, ce qui dans l'esprit de Gérard signifie simplement son souhait que cette étude soit entreprise. En fait, le rôle de l'ECR dans la formalisation d'une demande n'est pas perçu par les acteurs de la même façon, et son approbation ne s'appuie pas sur un processus bien établi, clairement identifié et collectivement accepté : il n'existe pas de bonnes pratiques auxquelles se référer. Dans la procédure en vigueur à l'époque [459], deux phases sont prévues : "préparation", et "évaluation" (la procédure ultérieure [460], toujours en vigueur, ne change pas cet esprit). Pour la première phase, seules des instructions purement administratives sont données : comment créer le document, où l'enregistrer, quels champs remplir. Les indications concernant la deuxième phase comportent l'indication suivante :

> *The PL [Project Leader] first examines the merits of the proposed change, and decide whether to go ahead with a detailed evaluation or to reject the proposal.* [461]

457. « Une demande de modification technique "majeure" ». G. Bachy, courriel d'accompagnement à l'ECR, 30.04.1998.

458. ECR ATL-TC-EC-0009.

459. Kathy, page web, *ECR process*, [non accessible en ligne, consultée et archivée à partir du fichier html source], 24.06.1999.

460. http://atlas.web.cern.ch/Atlas/TCOORD/Activities/TcOffice/Quality/ECR/

461. « Le chef de projet examine d'abord les mérites du changement proposé, et décide s'il s'engage dans une évaluation détaillée, ou bien de rejeter la proposition. »

Aucune précision n'est donnée ni sur le mode d'évaluation, ni sur le degré de formalisation. Si cette approche souple permet une adaptation du concept d'ECR à des situations de terrain et de projet très variées, elle présente l'inconvénient de laisser un flottement, à une époque où aucune jurisprudence, aucune expérience communément partagée n'existe : l'on ne sait pas à quoi se référer pour estimer si la démarche est normale ou excessive. Ne négligeons pas non plus que dans le cas que nous étudions ici, l'ECR considérée a été créée par l'ingénieur en chef lui-même, qui est le promoteur de la mise en place de ces procédures de gestion de qualité : comme le relève l'un des membres de la Coordination technique, « *c'est le créateur du concept d'ECR, alors…* » [462] Il semble flotter comme une certaine hésitation à en contester, ou même simplement à en questionner l'approche.

Dans le deuxième volet de l'affaire, en mars 1999, c'est l'esprit même des procédures de révision qui est mis en question. En effet, je pose alors la question de savoir si « *quand on met en approbation une nouvelle version, on sollicite une approbation des modifications, pas une remise en question de l'ensemble* », ou si à chaque révision, l'ensemble des caractéristiques et paramètres d'une conception est soumise à une nouvelle approbation. Une telle approche présenterait d'un côté l'avantage de garantir que la vigilance des membres de la liste d'approbation s'exercera pour bien vérifier la pérennité de l'adéquation du design considéré avec les évolutions ultérieures de ses voisins ; mais elle créerait *de facto* une instabilité générale du processus de conception. C'est donc toute l'instrumentation de l'ingénierie simultanée, et en particulier de la formalisation des décisions, qui est posée par ces questions.

À la lecture du mémorandum [463], on suit les avatars de la fameuse cote de 5400 mm, en effet décisive pour la forme générale des pieds, comme on peut s'en rendre compte sur la Figure 8.11. Elle détermine pour les muons la cote de la grande chambre horizontale MBOL que l'on voit positionnée à 2115 mm au dessus du sol. Nous ne détaillerons pas ici les questions techniques, pour ne considérer que les questions liées à l'approbation de la modification de la nouvelle version.

Le circuit effectif passe par diverses réunions : MWG (*Magnet Working Group*), TCM (*Technical Coordination Meeting*), MLM (*Muon Layout Meeting*), avec des doublons ou des échos dans chacune de ces réunions. On note ainsi dans les minutes du MLM une approbation implicite du type : « *The foot design version 5 as of April 1998 has accommodated most of the wishes of the muon system and gave a satisfactory system.* » [464] Est-ce pour autant suffisant pour que l'on puisse en conclure peut-être hâtivement, comme je l'ai fait dans le mémorandum, que « *ceci indique donc l'accord attendu du système muons sur, entre autres les 5400 mm* » ? Assurément non, puisque le paramètre considéré n'est pas explicitement mentionné.

Quatre jours plus tard pourtant, la mention dans la présentation faite au TCM est explicite : « *As approved in the TCM in April, the inner distance between 2 feet is now 5400 mm* » [465]. Bertrand commente dans le mémorandum : « *Autant que je sache, personne n'a contesté* ». Mais cela ne suffit pas pour entériner la décision, car "qui ne dit mot" ne "consent" pas forcément. Bertrand note en mars 1999 :

> *L'ECR a balayé le paysage, écarté des préoccupations de chacun cette dimension de 5400 devenue secondaire, et personne ne s'est soucié, qui (BN) d'en obtenir une approbation formelle écrite, qui (JW) d'en poursuivre la contestation, alors déjà*

462. François, 14.05.1998.

463. Bertrand, Mémorandum à G. Bachy, *Approval of drawing ATLHB___0003 release C,* BN/199910, 3 mars 1999. Les citations qui suivent, sauf autres références citées, en sont extraites.

464. « Le design des pieds version 5 d'avril 1998 a incorporé la plupart des souhaits du système muon et a donné un système satisfaisant. » Extrait des minutes MLM #50 du 8 juin 1998 (MUO-TR-377).

465. « *Comme approuvé lors du TCM en avril, la distance entre deux pieds est désormais 5400 mm.* » Extrait des minutes du TCM du 12 Juin 1998 (ATC-TC-EM-0030).

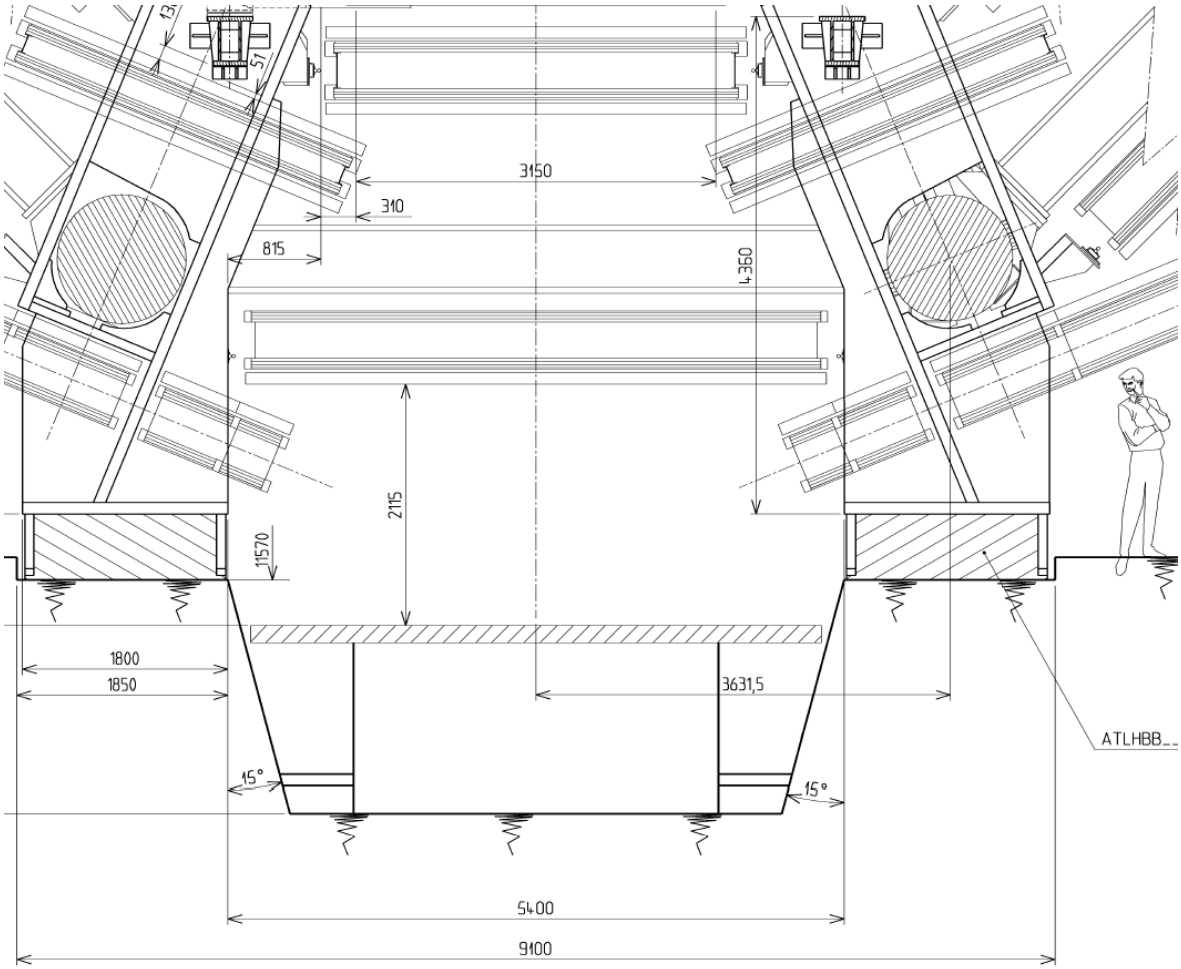


Figure 8.11 : Dessin d'ensemble montrant la cote entre pieds de 5400 mm

Plan ATLHB___0003, indice C, « Assembly v. 6 », publié le 7.12.1998

émoussée, mais pas complètement éradiquée. Il est étonnant que la question resurgisse près de 9 mois plus tard, comme drapée de nouveauté. [466]

Sauf que la procédure formelle d'approbation à travers CDD est, quant à elle, tout à fait explicite. Elle permet de recueillir et de conserver par écrit [467] les commentaires des différents acteurs sollicités par l'« *approval leader* ». Or la version B du dessin concerné, comportant cette cote de 5400 mm, est en effet approuvée dès novembre 1998, le seul commentaire négatif portant sur un autre point. Et à la version C – celle rejetée par Gérard Bachy –, le commentaire qui a conduit au rejet est un commentaire conditionnel : « *If the dimension 5400 is the free distance between the feet, I agree* » [468]. Or c'est bien le cas, et c'est un Bertrand quelque peu agacé qui conclut dans le mémorandum : « *C'est bien le cas : il s'agit de la distance libre entre les pieds. La conséquence en bonne logique est donc :* ***I agree.*** » Et pourtant l'approbation

466. Bertrand, *ATLAS aux pieds d'argile*, notes de terrain, mars 1999.

467. Ils sont encore aujourd'hui (2012) accessibles en ligne dans le système CDD, et la pérennité du système est telle qu'elle anticipe sur la durée de vie complète des équipements du CERN, qui peut attendre plusieurs dizaines d'années. Ainsi le PS, synchrotron à protons, est en service depuis 1959, et continuera de l'être pendant toute la durée de vie du LHC, soit jusqu'aux environs de 2030. C'est l'une des contraintes qui pèse sur le système de gestion des données technique – une contrainte qui pèse tout aussi lourd sur les systèmes techniques eux-mêmes !

468. « Si la distance de 5400 mm est bien la distance hors tout entre les pieds, je suis d'accord. »

est refusée avec le commentaire : « *The 5400 story has first to be clarified with the Muon Collaboration* » [469].

S'affrontent donc deux approches : une logique formelle et procédurale, qui a établi un certain paramètre de manière claire et non ambiguë, mais qui n'est pas restée présente dans les mémoires des hommes, à défaut de l'avoir été dans celles des ordinateurs ; et une démarche directe que le chef du projet impacté, celui des Pieds, considère comme désordonnée et non documentée. « *La justification [de ces 5400 mm] a été amplement présentée et discutée, puis approuvée. En revanche, la demande d'augmenter cette cote de 20 mm n'a jamais été discutée, ni documentée d'aucune manière à ma connaissance.* » [470] Lorsque Bertrand remet son mémorandum à Gérard, la discussion (privée) permet de clarifier les implicites, et de souligner la dynamique progressive de mise en place des règles d'usage de ces outils d'approbation.

> *Ce que j'ai le plus mal accepté, c'est qu'il rejette le plan avant d'en avoir discuté, et qu'il vaudrait mieux convoquer la réunion de concertation/conciliation avant de prendre une décision sur l'approbation du plan. Il avoue alors que ce n'est peut-être pas une mauvaise idée, en effet, et que c'est peut-être une faiblesse de la règle. Il regrette aussi que ces règles "*ne soient écrites nulle part*". Quand je lui fais remarquer qu'il n'a pas appliqué lui-même ces règles pour la version B, il avoue que, "*à l'époque (novembre !), je ne les avais pas encore établies*". On voit que les règles d'usage sont encore très flottantes et instables, loin d'être formelles et claires, ni même communes à tous.* [471]

C'est de l'équilibre entre discussions informelles, réunions et approbations formelles qu'il est question ici, et du complément harmonieux entre instances de vérification et étapes de validation, de manière à soutenir un processus de conception constructif, car ainsi que je le soulignais en conclusion du mémorandum : « *Le fait de rejeter la version C du plan ne suffit pas en soi à résoudre le problème (ce serait pourtant chouette, je te le concède…)* » [472].

∴

Le besoin qui ressort de cette section en particulier, et de ce chapitre en général, est multiple : celui d'un outil permettant de supporter l'évolution dynamique de la configuration du produit en cours de conception, non limité (comme l'est CDD) à une gestion de documents ; celui d'un processus permettant de conduire pas à pas cette gestion de configuration ; et celui d'une démarche d'établissement collectif de ce processus, menant à ce qu'il soit partagé par l'ensemble de la communauté des concepteurs, ingénieurs et physiciens impliqués dans la démarche de conception. Aucun de ces besoins ne peut être satisfait en soi, ils doivent faire l'objet d'une approche globale, simultanée et évolutive, au sein de laquelle des boucles complexes d'interaction puissent s'établir et trouver leur équilibre dynamique.

Nous avons ainsi mis en évidence ce qui nous semble constituer les trois piliers d'une gestion de configuration : un système de gestion de données techniques permettant de connaître le référentiel *produit* d'un projet à un instant donné ; une modélisation des *processus* des flux d'information sur les données produit menant progressivement de leur élaboration à leur validation, dans un but donné (correspondant à une certaine phase du projet) ; et un contexte dynamique de *projet* assurant la mise en place de ces processus et leur adaptation éventuelle à l'évolution

469. « L'histoire des 5400 doit tout d'abord être clarifiée avec la Collaboration Muon. »

470. Bertrand, Mémorandum à Gérard, *in ibid*., p. 6.

471. Bertrand, *ATLAS aux pieds d'argile*, notes de terrain, mars 1999.

472. Mémorandum, *in ibid*., p. 6.

globale et concomitante du projet. Si l'on considère la gestion de configuration au sens large comme l'une des tâches principales d'un manageur technique, son rôle se retrouve donc lié à ces trois piliers fondamentaux, que l'on pourrait, dans un premier temps, modéliser de la manière représentée à la Figure 8.12. Une modélisation dont nous sentons bien qu'elle n'est ni très stable ni très pérenne – sans aller jusqu'à affirmer qu'elle pourrait mener à la ruine. Nous affinerons cette représentation dans la partie III, pour aboutir progressivement à ce que j'appellerai l'hypercompas trialectique. Il manque encore, pour solidifier l'ensemble, un outil qui se ferait le porteur de la création et de la gestion des espaces d'échanges entre les acteurs de la conception, qu'aucun processus n'induit véritablement, et qu'aucun chef de projet ne pratique. Un tel outil collaboratif n'est alors pas en place dans les années 1998-2002 du projet ATLAS. Un certain volontarisme compense en partie l'insuffisance des outils et surtout des processus, mais il ne peut assurément suffire à optimiser les résolutions de crise.

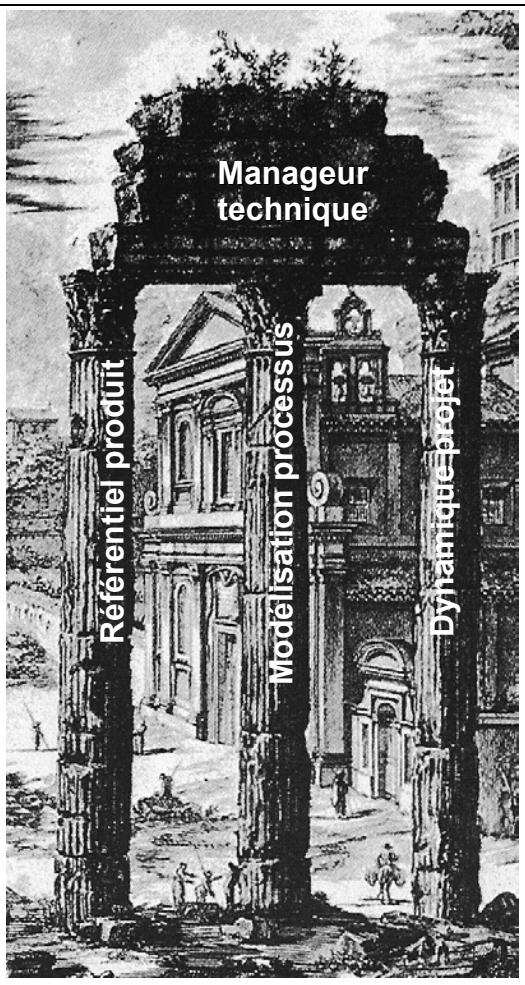


Figure 8.12 : Les trois piliers du rôle de manageur technique

Gravure de Piranesi (1720-1778), *Veduta di Campo Vaccino*
Détail représentant le temple de Castor et Pollux à Rome

C'est sur le constat au bilan mitigé de cet « *Agir sans trop penser » (à la complexité)* que se clôt la partie II. Nous allons nous attacher à « *Repenser avant d'agir* » en proposant quelques règles d'usage des outils de gestion et de validation des données ainsi que quelques processus de projet, en soulignant le rôle du manageur technique dans l'élaboration et le déploiement de cette démarche. La partie IV « *Agir et penser à la fois* » sera l'occasion d'une expérience *in vivo* de cette démarche.

Troisième clamot. *Les tailleurs de pierre quelques mois plus tard…*

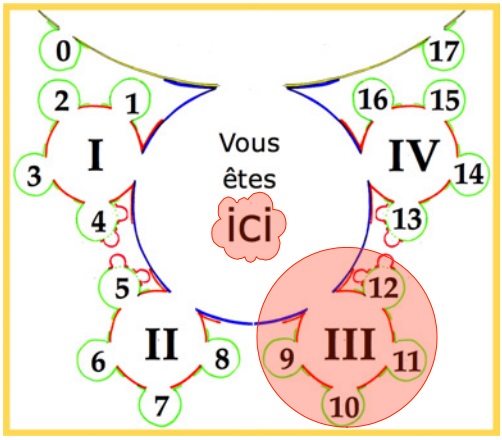
Nicolas Bonin [473]

Il était une fois, au centre de la France au milieu du Moyen-Âge, trois tailleurs de pierres qui étaient affairés sur de gros blocs de marbre, sous l'œil averti d'un vieillard. Un voyageur vint à passer et interrogea le premier tailleur. « *Pourquoi fais-tu ceci ?* » Le tailleur le regarda et étonné lui répondit : « *Il me faut bien travailler, car l'ouvrage est nécessaire.* » L'homme alors se tourna vers le second compagnon et lui posa la même question. « *Je travaille pour l'argent car chaque pierre me rapporte un peu de pièces.* » Le voyageur enfin regarda vers le troisième tailleur de pierres et écouta sa réponse : « *Je taille des pierres pour bâtir une cathédrale et évangéliser mon pays.* » Le voyageur repartit en se disant qu'il aimerait que tous les travailleurs soient comme le dernier ouvrier qu'il avait interrogé.

L'histoire est connue, mais on omet souvent la suite.

Quelques mois plus tard, le voyageur vint à repasser. Il ne trouva alors qu'un seul homme dans la carrière, c'était le troisième qu'il avait interrogé quelques mois plus tôt. Il l'interrogea pour lui demander ce qu'étaient devenus ses compagnons, mais l'homme fut incapable d'aligner un mot. Le voyageur s'apprêtait à repartir, quand une voix le héla. Le vieillard qui regardait de loin les tailleurs s'approcha alors de lui et lui expliqua : « *Le premier tailleur a été remercié à l'occasion d'un plan de sauvegarde de l'emploi. On l'a autorisé à pointer au chômage. Le second, celui qui travaillait pour l'argent, est parti gagner 29 deniers parce qu'on ne le payait pas assez. C'est toujours peu, mais il se console en se disant qu'un denier de plus et il serait passé pour un traître. Le troisième quant à lui, s'est élevé contre l'enrichissement de l'Église et a été torturé par la Sainte Inquisition. On ne l'a pas brûlé car il est le dernier à travailler et qu'il faut bien que l'Église prouve sa grande puissance. On lui a juste coupé la langue.* »

473. http://milleetuneminutes.blogspot.com/2011/03/le-conte-des-trois-tailleurs-de-pierres.html



Partie III - Repenser avant d'agir

Où l'on s'assoit pour mieux se regarder marcher, et où l'on se prépare à se relever d'un pas autrement dynamique

Il y a un temps pour vivre et il y a un temps pour témoigner de vivre. Il y a aussi un temps pour créer, ce qui est moins naturel.

Albert Camus [474]

474. *Noces, in Œuvres complètes*, Pléiade, Gallimard, 2006, T. 1, p. 109.

Sommaire de la Partie III

Chapitre 9. Émergence du manageur technique.....257
9.1 Crises et pompiers.....260
9.2 La figure émergente du manageur technique.....265
9.3 Un modèle "concentrique" du manageur technique 274
9.4 Vers un modèle complexe du manageur technique en action.....277

Chapitre 10. Pour une complexité féconde.....279
10.1 La complexité des cas.....281
10.2 Qu'est-ce que la complexité ?.....286
10.3 Fécondité de l'approche par la pensée complexe.....293
10.4 Cellule majeure c11 : une boucle dialogique.....297
10.5 Cellule mineure c21 : le manageur technique, moteur de boucle.....300
10.6 Cellule mineure c31 : une dialogique Ω (Conception, Intégration).....301

Chapitre 11. Acteur d'interface.....305
11.1 Cellule mineure c12 : le principe hologrammique.....307
11.2 Cellule majeure c22 : un modèle d'acteur d'interface.....312
11.3 Cellule mineure c32 : relations d'interdépendances hétérarchiques.....334

Chapitre 12. Jusqu'aux frontières des espaces d'échanges.....339
12.1 Cellule mineure c13 : le principe d'auto-éco-organisation.....341
12.2 Cellule mineure c23 : vers l'acteur-frontière.....347
12.3 Cellule majeure c33 : traverser les espaces.....356
12.4 Vers l'agir ↔ penser.....365

Quatrième clamot. Faire et avoir pour être.....367

Camus, dans l'épigraphe à cette troisième partie donné à la page précédente, déploie trois temps successifs [475] : vivre, témoigner, créer [476].

J'ai *vécu*, et la première partie de la thèse l'a rappelé.

J'en ai *témoigné*, et ce fut l'objet de la deuxième partie, retraçant cette période de ma carrière consacrée à l'expérience ATLAS (de 1994 à 2004). C'est l'avantage du temps long dont je bénéficie, et qui est un apport notoire à la richesse des cas : à la lumière de plus de dix ans d'observation, et avec presque autant de recul, de nombreux aspects apparaissent qui auraient été invisibles dans le temps d'une thèse habituelle ou d'une observation ethnographique classique.

Vient maintenant le temps de *créer*.

Créer quoi, tant le verbe paraît ambitieux, voire prétentieux ?

De cette création, que m'est-il permis d'espérer ?

Nous retrouvons par cette interrogation la troisième question de Kant mentionnée dans l'*Introduction "kantique"* (p. 13). Dans cette partie intitulée *Repenser avant d'agir*, il s'agira de créer quelques outils, et d'en élaborer le mode d'emploi afin d'accompagner le manageur technique dans son dessein de mieux remplir son rôle au sein de grands projets complexes. Ce sont tout d'abord des outils d'analyse, parce qu'il en a besoin pour mieux comprendre son environnement. Ce sont également des outils pour mieux agir. C'est aussi enfin l'élaboration d'une méthode pour instrumenter cette action future, conformément à la troisième phase du modèle DRM, dont nous suivons le schéma global (voir § 4.3 p. 109).

En d'autres termes, il s'agira, à partir du vécu rapporté dans la partie II, de créer quelques nouveaux concepts de génie industriel, discipline tutélaire de la thèse, c'est-à-dire d'élaborer des savoirs actionnables sur le terrain où évoluent les manageurs techniques ; des concepts qui fassent le lien entre les apports respectifs des théories de la pensée complexe et de la systémique, du management de projet et des études des organisations, trois disciplines que je mobilise ici pour me fournir en concepts. Je fais ainsi volontiers mienne l'injonction de Nietzsche :

> *Les philosophes ne doivent plus se contenter d'accepter les concepts qu'on leur donne, pour seulement les nettoyer et les faire reluire, mais il faut qu'ils commencent par les fabriquer, les créer, les poser et persuader les hommes d'y recourir.* [477]

Si la part de philosophe en moi se sent directement interpellée par le début de cet appel, la part de manageur est quant à elle particulièrement alertée par sa conclusion : « *persuader les hommes d'y recourir* ». Ce sera l'objet de la partie IV. Dans la présente partie, nous nettoierons le concept d'acteur d'interface, qui n'a pas connu la postérité qu'il mérite selon moi ; nous ferons reluire le concept d'espace d'échanges, aux formes variées ; et nous proposerons de les réunir en un modèle de manageur technique recomplexifié dit "en mailles à trois pôles" s'inscrivant dans un "tissu complexe" formant une cotte de mailles de notre confection. Nous en testerons la solidité, nous en étudierons quelques propriétés et nous envisagerons quelques usages possibles pour notre manageur technique ainsi dûment doté et équipé. Nous dresserons également une carte de la route complexe, qui traverse les

475. À la manière de l'Ecclésiaste, 3 : « *Il y a un temps pour tout, un temps pour toute chose sous les cieux…* »

476. Notre approche méthodologique globale pourrait être conçue comme une scansion à trois temps sous forme d'une tresse « *agir, observer, conceptualiser* ». Elle n'est pas sans faire écho, je le réalise, à la formule de Camus.

477. F. Nietzsche, « Fragments posthumes 1884-1885 », *Œuvres philosophiques complètes*, tome XI, Gallimard, 1981, p. 215-216.

frontières séparant les espaces d'échanges et de conception. Cette route prendra la forme d'une méthode de déploiement pour le processus de conception et d'intégration et son instrumentation en termes de gestion des données. Elle sera opérationnalisée et mise en actes dans la partie IV (chapitres 14 et 15).

L'enjeu est également de donner à ces concepts une représentation graphique. Car créer des concepts, c'est précisément concevoir, au sens propre du terme. Et concevoir, c'est le travail du concepteur. Or le concepteur, quand il est mécanicien, recourt aux outils de la géométrie pour esquisser ses solutions [478], les partager avec ses pairs et les soumettre à leur jugement. « Ἀγεωμέτρητος μηδείς εἰσίτω μου τήν στέγνην » [479], affichait-on déjà sur le fronton de l'Académie d'Athènes, cette ancêtre de toutes les universités fondée par Platon. C'est pourquoi, en bon géomètre, je tiens particulièrement à ne pas cantonner la représentation des concepts à leur formulation verbale, et à leur en donner en guise de prolongation une représentation graphique. Leur valeur heuristique s'accroît ainsi, qui enrichit en retour la compréhension du concept. La démarche suivie dans la partie III (et dans toute la thèse, si l'on veut bien) est en quelque sorte une *métaphore* du processus de conception (dont la phase de vérification et validation interviendra en l'occurrence dans les formes requises par l'exercice académique de la soutenance).

Et puis si “montrer n'est pas démontrer”, l'inverse vaut également : “démontrer n'est pas montrer”. Il me faut donc à la fois prouver la validité de mon modèle et en montrer l'utilisabilité. Car je suis un praticien dans ma propre organisation, et je dois donc construire de l'util(isabl)e, c'est-à-dire élaborer des savoirs actionnables. Or, recourir à une représentation graphique de mon concept d'acteur d'interface, c'est améliorer mes chances de convaincre de cette actionnabilité des savoirs, et donc qu'ils seront effectivement actionnés. Cette question mérite assurément des développements en termes d'articulation entre actionnabilité potentielle et actionnabilisation effective, entre utilisabilité et utilité, ou encore entre potentiel et actuel, questions qui dépassent le cadre de cette thèse.

∴

Explicitons la structure de la partie III *Repenser avant d'agir.* Elle sera (un peu) plus concise que les longs développements de la partie II exigés par la complexité des cas ; elle gagnera aussi en densité, par sa construction comme par son contenu. Et elle nous permettra de forger peu à peu la représentation graphique couplée des concepts d'acteur d'interface et d'espace d'échanges.

Le chapitre 9 reprendra les cas présentés dans la partie II pour en tirer quelques enseignements sur le rôle du manageur technique, en termes de degrés d'intervention. Quelques-uns de ces enseignements seront particuliers et propres à chacun de ces épisodes de conception de l'instrumentation scientifique pour la “téraphysique”. D'autres seront globaux, et porteront par exemple sur le fonctionnement des méga-collaborations, mode peut-être précurseur d'une évolution possible du mode de fonctionnement de l'entreprise étendue (ou entreprise globalisée).

Au début du chapitre 10, nous établirons le caractère complexe de tous ces cas, liés entre eux et surtout liés avec leur contexte bien davantage que nous ne l'avions peut-être envisagé à la lecture du chapitre 2 consacré au CERN.

Les trois chapitres 10 à 12 sont construits comme un tout, sous une forme matricielle : les trois questions de recherche définies au chapitre 3 (sur le processus de conception et d'intégration, sur le rôle du manageur technique, sur la modélisation de la complexité) se croiseront avec trois principes de la pensée complexe qui

478. Voir le chapitre de Blanco, *Les brouillons. Révélateurs et médiateurs de la conception*, p. 181-201, in [Vinck 1999b].

479. « Que nul n'entre ici s'il n'est géomètre. »

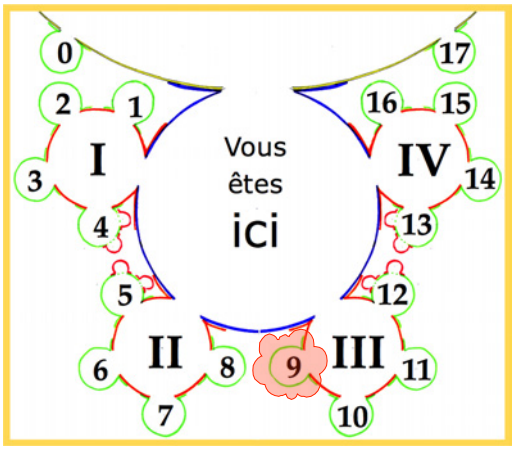
auront émergé à la fois de l'étude des cas et de l'étude bibliographique de la littérature sur la complexité. C'est dans cette matrice “méthodologique” que s'élaboreront progressivement les modèles complexes constituant des éléments de réponse à nos questions de recherche.

Dans la deuxième partie du chapitre 10, orientée par le principe complexe dialogique, nous proposerons de considérer le manageur technique comme le moteur de boucles dialogiques complexes, et nous élargirons la perception de l'activité d'intégration en interaction avec la dynamique de différenciation pour constituer un *processus de collaboration complexe* comme dépassement dialogique du processus de conception et du processus d'intégration.

Le chapitre 11, inspiré par le principe complexe hologrammique, fixera à trois le nombre de niveaux pertinents d'organisation et d'interaction ; il proposera un modèle d'acteur d'interface sous forme d'une maille à trois pôles, correspondant aux trois instances régulatrices de son action possible, il déploiera cette maille sous forme d'une “cotte”, soit un tissu complexe. Il suggérera que le processus de collaboration complexe est basé sur la gestion des relations d'interdépendances.

Le chapitre 12 enfin, illustrant le principe complexe de l'auto-éco-organisation, partira du réseau d'interfaces modélisé par cette cotte pour en faire émerger les espaces d'échanges qui feront de l'acteur d'interface un manageur technique dûment équipé pour l'agir ↔ penser. Il matérialisera enfin dans le processus de collaboration complexe des cadres de collaboration sous forme d'espaces d'échanges représentant des zones d'autonomies coordonnées permettant une articulation des activités de conception et d'intégration dans le déroulement global du processus du projet.

Nous nous trouverons ainsi, à l'issue de cette partie III « *Repenser avant d'agir* », dotés d'un modèle de manageur technique comme acteur d'interface et d'une démarche de déploiement d'espaces d'échanges pour le processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation. Ils guideront le retour sur le terrain du manageur technique, dont nous suivrons les premiers pas au cours de la partie IV *Agir et penser à la fois*.



Chapitre 9. Émergence du manageur technique

Où l'on considère la dynamique complexe du processus de conception, et les contours possibles de ce rôle émergent

Les faits ne pénètrent pas dans le monde où vivent nos croyances, ils n'ont pas fait naître celles-ci, ils ne les détruisent pas ; ils peuvent leur infliger les plus constants démentis sans les affaiblir.

Marcel Proust [480]

480. *Du côté de chez Swann*, Pléiade, Gallimard, [1918] 1987, p. 146.

À partir des faits exposés dans la partie II, il s'agit ici de confronter les croyances parfois très ancrées d'un certain nombre d'acteurs avec une observation un peu plus objectivée des cas. Que l'on songe à un seul exemple technique, celui qui traverse tout le chapitre 7 : comment expliquer la conviction qu'il faut séparer les efforts en x (transverses) des efforts en y (verticaux), quand de toute façon c'est la résultante de ces efforts que doit encaisser le support, et que ladite résultante varie non seulement en fonction des cas de charge mais également en fonction des cas d'usage (les différents scénarios, par exemple selon que l'aimant est ou non en fonction) ? C'est pourtant cette croyance – liée sans doute aux habitudes de décomposition et de projection sur des axes que pratiquent les mécaniciens lors de leurs analyses – qui va faire obstacle à l'acceptation de la solution proposée par l'équipe des Pieds. Et même la solution hybride, qui est pourtant une concession équilibrée issue d'un long processus de concertation, ne suffit finalement pas à briser cette croyance.

Les limites de la réflexivité, et sans doute l'existence d'un point aveugle, m'empêchent de prendre conscience de mes propres croyances probables sur cette question. Les projets regorgent d'exemples de ce type, et Herbert Simon a su donner un nom à ces limites : la *rationalité limitée*.

> *The capacity of the human mind for formulating and solving complex problems is very small compared with the size of the problems whose solution is required for objectively rational behavior in the real world or even for a reasonable approximation to such objective rationality.* [481]

L'objet est de réfléchir à la manière dont on peut intégrer ces attitudes mentales plus ou moins figées dans l'élaboration de processus de conception et de bonnes pratiques du manageur technique qui pourraient définir un cadre favorable à l'épanouissement de son action. Pour cela, nous dégagerons les principaux enseignements des cas précédents concernant les caractéristiques du manageur technique qui avaient été posés comme hypothèses au chapitre 3. Et nous fonderons ensuite sur eux nos quelques éléments de modélisation de la dynamique complexe des processus observés que nous développerons dans les trois chapitres suivants.

L'ampleur de la recension des cas présentés s'oppose à ce que nous les reprenions ici en détails, d'autant plus que cette recension incluait au fil du propos un certain nombre de commentaires et de prises de recul, que ce soit sur l'organisation des projets, sur la circulation et la validation des informations et des données, ou sur les relations entre les différents acteurs et les luttes de pouvoir. Si nous considérons l'ensemble du matériau accumulé au fil des quelque 130 pages de la partie II, je n'épuiserai pas ici la matière, qui restera offerte à des analyses ultérieures – qu'elles soient de mon fait, ou bien retravaillées en seconde main par la communauté des chercheurs en génie industriel, en management de projet, en sociologie des organisations, en ethnographie des techniques ou autre. Nous resterons centrés sur nos questions de recherche, suffisamment vastes en soi : celle des processus de conception et d'intégration, celle du rôle du manageur technique, et celle de la complexité. On verra alors tour à tour le manageur technique comme un passeur, comme un sélectionneur, comme un synthétiseur, comme un obstacle, comme un

481. « La capacité de l'esprit humain à formuler et résoudre des problèmes complexes est très petite comparée à la taille des problèmes dont la solution est requise pour un comportement rationnel objectif dans le monde réel, ou même pour une approximation raisonnable d'une telle rationalité objective. » [Simon 1957, 198]

communicateur, comme un calculateur… Ce sont ces différentes postures observées que j'aimerais mieux caractériser.

Cette synthèse s'effectuera en plusieurs temps. La première section reviendra sur l'analyse en termes de crises que nous avons plusieurs fois effectuée, et permettra d'argumenter que nous avons affaire à des dynamiques de systèmes complexes, le mythe du processus linéaire déterministe étant largement pourfendu. Nous définirons ensuite trois degrés possibles d'action du manageur technique, sur lesquels nous élaborerons les caractéristiques à intégrer dans notre modèle. Nous aurons ainsi établi en conclusion trois enseignements principaux : le caractère complexe des phénomènes observés, que nous développerons au chapitre 10 ; l'observation de l'émergence progressive de processus d'intégration et de coordination dans les cas de la partie II, que nous reprendrons au chapitre 12 ; et l'établissement d'un premier modèle de manageur technique comme acteur d'interface dûment équipé, modèle que nous affinerons progressivement aux chapitres 11 et 12.

9.1 Crises et pompiers

Nous avons évoqué au cours de la partie II notre choix méthodologique de recourir à des épisodes de crises pour étudier nos cas, comme des moments révélateurs de l'histoire des organisations dont elles sont le siège. N'est-ce pas Dumas qui prétendait que « *ce sont les crises qui soudent une nation* » [Peng 2003, 62] ? Nous avons observé principalement quatre de ces crises : deux à propos des enveloppes (le blocage de leur processus d'approbation au chapitre 5, et la crise des lattes au chapitre 6), et deux concernant le projet des Pieds (la révision du chargement en 2002 au chapitre 7, et l'ECR sur le changement de position en 1998 au chapitre 8). Cette section est donc à la fois une modeste contribution à la « *crisologie* » [Morin 1976] – la développer davantage sort du cadre de la thèse – et une entrée en matière dans la systémique.

Ce choix d'étudier les cas sous l'angle de la crise se doit d'être justifié. Je voudrais écarter l'impression que, parce que nous ne parlerions que de crises, nous en tirerions la conclusion quelque peu tautologique que tout n'est que crise. À l'inverse, et même s'il nous manque une étude quantitative étayée pour l'établir catégoriquement, on ne peut nier que la survenance des crises est tout sauf exceptionnelle au cours des projets du CERN. J'en ai mentionné et étudié quatre pour la seule période de 1998 et 2002. J'en avais connu quelques-unes auparavant, et j'en ai essuyé quelques autres depuis ; et je ne fais pas figure d'exception, parmi mes collègues, homologues ou prédécesseurs. Je mentionnerai simplement pour mémoire, à l'échelle globale du projet LHC, les deux crises majeures que furent successivement l'arrêt de l'installation de la ligne d'alimentation cryogénique QRL en 2005, avec les conséquences particulièrement importantes sur la planification du projet [Barbero-Soto et al. 2007] ; et l'implosion au niveau d'une interconnexion d'aimants le 19 septembre 2008 [482] évoquée à la fin du § 2.5.1. Étudier les modes de survenue de ces crises – en se basant sur nos quatre cas – et chercher à en tirer quelques leçons pour le management de nos projets paraît donc approprié.

9.1.1 Phasages des crises

Nous retiendrons comme définition d'une « *crise dans une organisation* » que c'est « *une situation qui menace les buts essentiels des unités de prise de décision, réduit le laps de temps disponible pour la prise de décision, et dont l'occurrence surprend les respon-*

482. Pour plus de détails, voir la très récente étude anthropologique [Roy 2012] portant sur cet incident important, et l'analyse développée en particulier à partir du concept de *liminalité*. (La place et le temps nous manquent pour développer et relier avec nos interrogations sur les frontières du chapitre 12).

sables » [483]. Cette définition s'applique au cas des projets, qui constituent bien un certain type d'organisation. Et les trois critères proposés sont bien présents, comme établi dans le Tableau 9.1, pour chacun des cas considérés dans la partie II.

Crise (par ordre chronologique)	**Unité de prise de décision**	**But menacé**	**Laps de temps limité à**	**Effet de surprise déclenché par**
Position des pieds (cas n° 4, chapitre 8)	Chef du projet des Pieds (+ TCM)	Tenue mécanique de l'enceinte chaude du TB	Une semaine Élément limitant : *layout* muons	Avril 1998 : idée diffusée sous forme d'ECR sans concertation préalable
Taille des lattes (cas n° 2, chapitre 6)	TC+TB+HB+Mu	Dilatation différentielle lattes TB / Perte d'acceptance muons	Un mois, étendu à deux	Octobre 1999 : mail contre les marges convenues entre lattes et enceinte à vide TB
Approbation des enveloppes des muons (cas n° 1, chapitre 5)	TCM+Mu	Validation du lancement en production des sous-systèmes d'ATLAS	Deux semaines Élément limitant : l'enceinte chaude du toroïde	Octobre 1999 : nouvelle version du *layout* muons, présentation au TCM
Révision du chargement des pieds (cas n° 3, chapitre 7)	Chef du projet des Pieds + TCSG	Tenue mécanique des pieds Planning de production	Six mois pour la re-conception Un mois pour la re-planification de la production	Mars 2002 : remise en cause des hypothèses sur le chargement adoptées fin 2000

Tableau 9.1 Synthèse des critères de crise selon Hermann (1972)

On peut en outre distinguer pour chaque crise quatre phases caractéristiques [484] : une phase *amont* dans laquelle on peut déceler (d'autant plus facilement *a posteriori*) des signes annonciateurs ; une phase *aiguë* provoquée par des éléments déclencheurs ; une phase *chronique* au cours de laquelle des paramètres amplificateurs peuvent s'ajouter, et qui se termine par l'étape qualifiée de *sortie de crise* proprement dite ; et enfin une *queue* de crise, qui est le siège d'éventuels rebondissements. Le Tableau 9.2 synthétise pour chacun des cas les phases et les éléments correspondants. L'élément déclencheur entre la phase amont et la phase aiguë n'est autre que l'élément provoquant l'effet de surprise selon le critères d'Hermann du Tableau 9.1.

Crise	**Phase amont**	**Phase aiguë**	**Phase chronique**	**Sortie**	**Queue**
Position des pieds (cas n° 4, chapitre 8)	Analyse du comportement mécanique de la structure chaude, et questions sur les conditions aux limites	Étude de l'ECR, établissement des arguments contrant le changement suggéré	Élaboration de la solution des *girders*	Rejet de l'ECR, adoption du principe des *girders* entre pieds	Rejet de la cote de 5400 mm (mars 1999)

483. Charles F. Hermann, « *Some Issues in the Study of International Crisis* », in [Hermann 1972, 13]. Cité par [Lagadec 1992, 51].

484. Adapté de Muriel Jouas, « *L'état de la crise n'est pas linéaire* », 2006, http://www.com2crise.com/.

Crise	Phase amont	Phase aiguë	Phase chronique	Sortie	Queue
Taille des lattes (cas n° 2, chapitre 6)	Conception et intégration du TB, questions sur les marges des enveloppes	Décembre 1999 : remise en cause de l'intégration de la région, évaluation des conséquences	Janvier 2000 : établissement des marges, des positions des lattes, pieds et chambres	Février 2000 : validation de l'ECR	–
Approbation des enveloppes des muons (cas n° 1, chapitre 5)	Dès 1997. Plusieurs versions n'atteignent pas le stade « *Released* » pour établir une *baseline*	Novembre 1999, Eilat	Février à Juin 2000 Réorganisation de la TC	Janvier 2001 (seulement) édition du *layout* v. O1 des muons	L'intégrateur et le physicien *layout* muons "passent la main" début 2001
Révision du chargement des pieds (cas n° 3, chapitre 7)	Dès 1998 (voir la première crise, cas n° 4), puis PRR avril 2001	Avril 2002 : Blocage de la production, incertitudes sur le chargement	Été 2002 : Recherche de solutions, comparaison des options	Septembre 2002 : choix de la solution	Le chef de projet HB quitte ATLAS après la fin du projet début 2004

Tableau 9.2: Analyse des phases des crises

Lors de l'étude du cas n° 3, au § 7.5.2, nous avions proposé un découpage en sept étapes (Tableau 7.1 p. 211) : pré-crise, prémisses, déclenchement, évaluation, plan de consolidation, éléments de solution et dénouement, situation d'après-crise. Ce découpage correspondait à la résolution du "capteur" choisi, à savoir les rapports au TCSG. Le phasage proposé ici en quatre phases est plus général, mais tout à fait compatible : la pré-crise et les prémisses correspondent à la phase amont, le signal annonciateur de décembre 2001 étant ce prémonitoire : « *to the exception of…* ». La phase aiguë s'étend du déclenchement jusqu'à l'établissement du plan de consolidation. La phase chronique est celle d'établissement de la solution ; et la situation d'après-crise, ou queue de crise, correspond à la mise en place des solutions retenues dans le programme de production, et aux éventuels rebondissements.

Le rebondissement ultérieur consécutif à la crise du cas n° 3 est constitué par ma décision en septembre 2002 de quitter le projet ATLAS, une fois achevé le projet des Pieds. En quoi est-il lié à la crise ? En raison du stress induit par l'exposition à ces situations de projet vécues comme épuisantes. Sans doute auraient-elles pu être évitées : j'en avais le sentiment, sentiment devenu voisin de la certitude, c'est ce que je vais établir maintenant.

9.1.2 Stress, ou intensité ?

Il faut parler de l'impact de ces crises sur le mental et le moral des troupes, et en particulier de ceux qui se retrouvent en première ligne pour les gérer. Il convient certes de relativiser : les crises dont nous parlons ont des conséquences très limitées de ce point de vue, et demeurent sans commune mesure avec celles auxquelles doivent faire face les organisations humanitaires lors des crises internationales, qu'elles soient dues à des causes politiques (conflits armés), à des catastrophes naturelles ou à des accidents de grande ampleur. Par rapport à nos crises de projet, les différences proviennent de deux origines.

La première, c'est que les gestionnaires de telles crises, contrairement aux exemples humanitaires, ne sont souvent ni étrangers ni extérieurs à la cause qui les

provoquent, soit qu'ils en soient victimes directes ou indirectes, soient qu'ils les aient (la plupart du temps involontairement) provoquées.

La seconde différence est l'impact humain beaucoup plus limité. Il est heureusement rarissime qu'il y ait mort d'homme. Rarissime n'est toutefois pas synonyme de “jamais”. Je n'ai finalement pas inclus dans les cas étudiés celui initialement envisagé de la gestion logistique des cryo-aimants du LHC en 2004-2005. Ce cas a été écarté pour plusieurs raisons, dont principalement deux : une raison propre à la construction de la thèse, la pertinence limitée du cas vis-à-vis des questions de recherche, ainsi que le volume qui aurait été nécessaire pour en rendre compte avec le soin requis (ce sera sans doute l'objet de travaux ultérieurs). Le contenu émotionnel personnel résiduel est une autre raison pour ne pas retenir ce cas, et c'est pour cela que je ne l'évoque qu'ici. Je veux rendre ici un bref hommage à Jose Pereira Lages, décédé le 25 octobre 2005 lors d'une opération de manutention. Cet accident n'était certes pas lié aux opérations sur les cryo-aimants dont je coordonnais la logistique. Mais il nous a profondément marqués, dans la période la plus aiguë de la crise liée à la reprise de l'installation des cryo-aimants dans le tunnel à la cadence imposée par le DG de l'époque, suite au long arrêt dû à la crise de la QRL, la ligne d'alimentation cryogénique.

Même si j'ai décidé de ne pas traiter le cas de cette logistique, je souhaite ne pas en évacuer totalement la résonance. La souffrance de ceux qui se retrouvent à gérer une crise, quelle qu'elle soit, est en effet à prendre en compte, et c'est l'une de mes motivations pour chercher des façons de les éviter quand cela est possible.

J'appelle *stress*, en suivant la définition de l'agence européenne pour la sécurité et la santé au travail, le « *déséquilibre perçu entre ce qui est exigé de la personne et les ressources dont elle dispose pour répondre à ces exigences* » [485]. Le stress à court terme, engendré par exemple par l'obligation de respecter un délai ponctuel, ne constitue pas un problème en soi : il peut en effet stimuler chacun à donner le meilleur de soi-même. Le stress devient un risque pour la santé et la sécurité lorsqu'il est éprouvé dans la durée. L'alternance de stress élevé et de dépression imposée par le culte de l'urgence, voire par la dictature de l'urgence [Aubert 2009], n'est pas la voie optimale pour exploiter au mieux les ressources psychologiques des personnes concernées. Comme le suggère la courbe présentée à la Figure 9.1, il vaut assurément beaucoup mieux rester dans les limites de l'eustress (le « bon » stress) plutôt que de se retrouver en détresse. Il ne faut pas confondre le piment de la vie avec le « *baiser de la mort* » [Levi 2000, vi]. Je prône donc avec Morin [486] de remplacer cette alternance d'angoisse due à un excès de stress et de calmes dépressifs due à des décompensations ultérieures, par une alternance de phases d'*intensité* (la meilleure forme de bon stress) dans les phases d'actions, et de *sérénité* propice à la préparation et à la récupération. Ces considérations ne seront pas développées davantage.



Figure 9.1: Une courbe de dépendance de la performance en fonction du niveau de stress

D'après la loi de Yerkes-Dodson, 1908

« *N'importe quel idiot peut faire face à une crise. C'est le quotidien qui use* » [487]. Et quand le quotidien est un quotidien de crise ? C'est cette usure d'un tel quotidien

485. http://osha.europa.eu/fr/topics/stress/index_html/definitions_and_causes.

486. [Morin 2011, 261-262]

487. Cette citation est ordinairement attribuée au dramaturge russe Anton Tchekhov. Je ne suis toutefois pas parvenu à en établir la source exacte.

de crise qui m'a amené à décider de quitter le projet ATLAS. Je n'étais plus en mesure de supporter que l'on considérât la situation de crise comme une situation normale, ni que l'on me tînt pour responsable du délai nécessaire pour en sortir, plutôt que de s'interroger sur ce qui aurait pu ou dû être fait pour éviter d'y entrer, et surtout de ce qui pourrait ou devrait être fait pour en sortir *collectivement*. N'est-il pas paradoxal de tirer sur le pompier plutôt que de rechercher le pyromane, d'installer des extincteurs ou de brancher la lance à incendie ? C'est ce paradoxe, que je n'ai pas su analyser à l'époque, sur lequel je veux revenir maintenant, car c'est un marqueur fondamental de la complexité systémique.

9.1.3 Une dynamique de systèmes complexes

Ma thèse est que cette crise de la révision du chargement des pieds d'ATLAS (et celle-ci ajoutée aux autres qui l'avaient précédée) était le symptôme d'une évolution non achevée dans le style de management, et d'un manque d'adaptation à un changement alors non identifié [488]. La crise ne serait donc pas un accident contingent, mais un mode de management inconscient, doublement consécutif de la nature complexe des systèmes et du décalage avec l'approche managériale requise (globale et systémique).

Une définition possible des actions pompier requises par de tels types de crises est la suivante, ici proposée dans le contexte du développement logiciel (une autre activité de conception) : « *Firefighting describes the unplanned allocation of developers and other resources to fix problems discovered late in the development cycle* » [489]. Comment une organisation de projet peut-elle éviter de tomber dans le piège de l'action-pompiers, la crise continuelle imposant une orientation des actions à court terme qui empêche d'investir dans des capacités organisationnelles qui permettraient d'éviter les crises ? À cette question, Sterman regrette de devoir répondre que « *many programs undertaken to escape the trap, including many programs to implement new product development processes and tools, are self-defeating* ». Car, au moins partiellement, « *our mental models lead us to interpret the data we receive from complex systems* » [490]. Le mythe du processus de conception déterministe, linéaire et quasiment défini une fois bouclé le cahier des charges, a cependant la peau dure. C'est donc une approche revue de ce processus qu'il faut adopter, par exemple une approche par la dynamique des systèmes complexes [Repenning et Sterman 2001].

Dubar vient à l'appui de cette approche, qui propose ce qu'il dénomme des « *éléments d'une théorie processuelle des crises* » [Dubar 2011]. Il en propose quatre :

> *La crise est une phase dans un parcours, c'est-à-dire dans un processus.*
>
> *La crise est une transition entre deux états, à la suite d'une rupture.*
>
> *La crise est un régime temporel spécifique, un temps suspendu.*
>
> *La crise est un blocage provisoire des capacités d'action ou d'accord.*

Ce rapprochement entre crise et processus est pour nous pertinente, puisqu'elle lie notre question de recherche sur le rôle du manageur technique (ici vu comme vic-

488. La place, les éléments et la compétence me manquent pour développer cette idée, inspirée par les travaux du psychologue C. Jung.

489. « Le terme d'action-pompiers décrit l'allocation non planifiée de développeurs et d'autres ressources pour résoudre des problèmes découverts tardivement au cours du cycle de développement. » [Repenning, Goncalves et Black 2001, 45]

490. « De nombreux programmes entrepris pour échapper au piège, y compris de nombreux programmes pour implémenter de nouveaux outils et processus de développement de produits, contiennent leur propre échec. » « Nos modèles mentaux nous conduisent à interpréter les données que nous recevons des systèmes complexes. » [Sterman 2001, 23]

time et/ou à l'origine d'une crise, puis gestionnaire de la crise) et celle sur la nature des processus, en particulier les processus de conception et d'intégration. Et ce à travers notre troisième question de recherche sur l'approche par la pensée complexe, la seule selon nous qui soit à même de nous livrer des pistes pour faire face aux injonctions contradictoires imposées par les projets.

Ma proposition est de considérer les processus de conception et d'intégration comme un **processus collaboratif complexe de convergence conjointe** de la constitution du référentiel du produit, de la définition des *process* [491] de fabrication, et des contraintes imposées par, ou s'imposant pour la réalisation du projet : qualité attendue (spécification fonctionnelle du besoin), délais, coûts. Le rôle du manageur technique est alors de **réguler ce processus**, et d'assurer cette convergence, qui est tout sauf naturelle. S'il y parvient, c'est donc, selon les lois de la dynamique des systèmes complexes, grâce à des outils de stabilisation apportés par exemple par l'intégration, et grâce au déploiement d'espaces d'échanges permettant de rétablir (en cas de crise) ou de maintenir ouverts les échanges entre les différents acteurs. C'est en ce sens de la systémique que j'ai intitulé ce chapitre *Émergence du manageur technique* : le processus de collaboration complexe est un tout qui fait émerger des propriétés qui n'étaient pas incluses dans chacune de ses parties (voir le chapitre 10). Le manageur technique est l'une de ces propriétés des projets complexes.

Nous verrons [492] en quoi l'approche managériale originale d'ATLAS (décentralisée, fractale, à stratégie tacite) se rapproche sans le savoir d'un mode d'organisation permettant cette émergence, ce qui a donc contribué à la réussite *in fine* du projet. Comment modéliser cette approche, comment l'améliorer, comment la rendre compatible avec le paradigme dominant des ingénieurs (plus déterministe, plus normatif) ? Cela passe par une meilleure compréhension du rôle que joue le manageur technique ; c'est l'objectif des sections et des chapitres suivants.

9.2 La figure émergente du manageur technique

Au cours des cas étudiés dans la partie II qui ont fait l'objet de l'analyse des phasages de crise du début de ce chapitre, nous avons vu à l'œuvre différents manageurs techniques. Pour étayer notre thèse du rôle de manageur technique comme régulateur du processus global de conception collaborative, nous distinguerons trois degrés d'intervention du manageur technique, chacun de ces degrés étant lié aux deux autres de manière récursive et complexe.

Le *premier degré* est celui que j'appellerai *conception collaborative en action* : le manageur technique œuvre à une démarche de conception, d'intégration et de coordination entre les différents acteurs. C'est typiquement le cas de l'ingénieur-projet des pieds, ou des autres ingénieurs que nous avons vu intervenir, tant pour les aimants que pour les chambres à muons.

Le *deuxième degré* est celui de la *conception d'outils d'aide à la conception collaborative* : le manageur technique s'appuie sur des notions et des concepts plus élaborés pour les formaliser en outils pragmatiques afin de favoriser le succès des actions du premier degré. C'est l'exemple du concept d'enveloppe, déployé dans ATLAS avec les réussites et limites exposées aux chapitres 5 et 6. Ce deuxième degré s'étend au delà du cadre de la conception proprement dite, pour inclure le travail d'intégration, qui est un travail de coordination avec le projet [493].

491. Je note ici *process* (terme anglais) et non *processus* (son presque équivalent français) pour distinguer plus clairement le processus conceptuel d'enchaînement de tâches du *process* de fabrication définissant les étapes et moyens d'obtention physiques du produit. Le distinguo est subtil mais à mes yeux essentiel.

492. Chapitre 12, § 12.1.2 p. 343.

493. Nous reviendrons ci-dessous à la sous-section correspondante, puis aux chapitres 10, 12 et 15, sur l'articulation complexe entre conception et intégration.

Le *troisième degré*, enfin, est celui de la *conception d'organisation permettant la conception d'outils d'aide à la conception collaborative*. Nous avons évoqué dans cet ordre d'idées essentiellement la définition et la mise en place d'une démarche structurée de gestion des données techniques. C'est le cadre dans lequel peuvent se déployer les outils du degré 2, il est donc fondamental pour la réussite des actions de degré 1, tout en étant défini dans ses propres finalités par ces actions-là. Une démarche de GDT (ou de management du cycle de vie du produit PLM, comme nous l'exposerons dans la partie IV) ne se conçoit pas *sui generis*, mais bien en fonction des exigences du degré 1. Un tel projet n'est au reste ni plus ni moins qu'un processus de conception lui-même, appliqué cette fois non pas à un produit ou à un système matériel, mais à un service, c'est-à-dire à un système immatériel. L'activité de conception d'organisation est *aussi* une activité de conception.

(J'ouvre une parenthèse réflexive, conformément au principe évoqué au chapitre 4 de « *réintroduction du sujet connaissant dans la connaissance* » souvent mis en avant par Morin [494].

Aux degrés supérieurs à 1, le manageur technique s'engage dans une démarche réflexive. Les degrés supérieurs ne sont en effet accessibles que si le manageur technique réfléchit sur sa propre action et qu'il modifie son mode d'intervention, qu'il module son attitude, qu'il prend conscience de son action dans et sur le(s) processus. Au degré 2, au vu des manques observés par la régulation au degré 1 des opérations, il s'agit de compléter la panoplie des outils disponibles, et de faire évoluer les processus. Au degré 3, le manageur technique devient acteur du changement de l'organisation qui l'inclut.

L'on pourrait oser un quatrième degré, qui serait celui où opère cette thèse : en situation réflexive assumée ouverte, je quitte ma posture de manageur technique, je prends conscience des autres degrés, et je me place dans une perspective prospective pour élaborer des stratégies visant à favoriser l'émergence ou l'évolution de bonnes pratiques de conception d'organisation au niveau de l'Organisation du CERN dans sa globalité ou de la Collaboration ATLAS dans son entier. Il s'agit bien là, pour reprendre à nouveau l'expression d'Avenier, d'élaborer des « *savoirs actionnables* », des « *savoirs scientifiques pertinents pour l'action* ». C'est en définitive la deuxième boucle d'apprentissage organisationnel de Schön et Argyris [1992] qui me semble en phase avec ce degré-là. Son étude toutefois sort tout à la fois et du périmètre du manageur technique (même "(re)-complexifié"), et du cadre déjà bien trop large de cette thèse, qui se contentera d'être une tentative de son illustration.

Je referme la parenthèse réflexive – au cinquième degré ?!)

C'est donc la figure d'un manageur technique intervenant successivement ou simultanément sur chacun de ces trois degrés qui émerge de nos études de cas, et ce dès le cas n° 0 exposé au chapitre 3, et qui contenait déjà tous ces ingrédients : la présence de telles figures serait donc bien une propriété émergente de la dynamique complexe qui se déploie dans un projet de cette nature.

Basée sur les travaux de Jacques Mélèse [1968], la synthèse que propose Genelot [2011, 161-162] offre un cadre en termes de niveaux dans laquelle s'inscrit mon articulation en trois (ou quatre) degrés. Autour du niveau opératoire (physique) s'articule un pilotage en trois niveaux de logique : *exploitation* (organisation de la façon dont les choses se font), *gestion* (orchestration des fonctions d'exploitation), *évolution* (niveau des stratégies), et *mutation* (finalité prospective à long terme). Cette distinction des niveaux de pilotage est bien d'ordre logique et non pas hiérar-

494. Par exemple [Morin 1996]. Ce principe serait à rapprocher des idées de praticien réflexif de Schön [1995], en particulier la section « *The art of managing* », p. 241 sqq.

chique, insiste Genelot : « *Ce serait une erreur grossière de penser que les niveaux du métasystème de pilotage correspondent aux niveaux hiérarchiques de l'entreprise. […] Un métasystème n'est pas une description structurelle fixe de l'entreprise, c'est une façon de penser, une façon de se mouvoir dans la complexité.* » Dans ma propre classification, c'est d'autant plus probant que nous parlons de degrés d'intervention pour la même personne, le manageur technique. Il est donc bien question de distinguer des niveaux logiques, chacun de ces niveaux étant caractérisé en particulier par des temporalités différentes. C'est la modeste raison pour laquelle je préfère parler de degrés plutôt que de niveaux.

Il est normal qu'à certaines phases on passe collectivement ou individuellement davantage de temps sur l'opérationnel que sur le stratégique ; et il est également normal que, selon son profil, son intérêt, ses qualifications, ses responsabilités, chaque acteur d'un projet passe un temps différent sur chacun de ces niveaux logiques de pilotage. On peut escompter raisonnablement qu'un projet qui saurait suffisamment investir dans les degrés plus élevés pour mettre en place des processus suffisamment agiles pour lui permettre de piloter l'opérationnel dans l'environnement dynamique complexe dans lequel il baigne est un projet qui éviterait les modes de crise et les phases d'action-pompiers .

Ayant mis en évidence ces trois degrés d'intervention du manageur technique (le quatrième degré étant en fait incarné par le processus d'élaboration du présent document, nous n'y reviendrons pas), revenons tour à tour sur chacun de ces degrés au vu des cas exposés, et cherchons à en tirer quelques enseignements sur les actions et attitudes du manageur technique qui nous permettront de mieux circonscrire son périmètre et définir son rôle.

9.2.1 Degré 1 : le MT animateur de la conception collaborative

Au cours du projet des Pieds, nous avons vu qu'il fallait jongler avec trois balles : un *cahier des charges* variable et évolutif, caractérisé par des modifications parfois spectaculaires en cours de projet des définitions qualitatives (positions des pieds) ou quantitatives (chargement imposé par le toroïde) des interfaces ; un *design itératif* au gré des diffusions des notes de calculs des équipes collaborant au projet (le calcul de la structure chaude du toroïde) ou des positions et tailles des chambres (le *layout* des muons) ; et une *production nécessairement séquentielle* limitant fortement les retours en arrière une fois engagée la phase de fabrication.

Le projet des Pieds, même s'il a été mené à bien avec succès, a subi une instabilité des trois référentiels qui le composent : celui du *produit* (pas assez bien défini avant le lancement de la production), celui du *process* (trop bien défini une fois la production lancée), et celui du *projet* (un planning ne parvenant pas d'un côté à obtenir les informations de l'usine, de l'autre à se synchroniser avec les voisins et utilisateurs). Quand les points de concourance du processus de conception sont aléatoires et provisoires, il faut à tout instant penser tous les instants, et c'est une source supplémentaire d'instabilité et de fragilisation pour toutes les équipes.

La difficulté du processus de conception collaborative sur le mode de l'ingénierie concourante provient de deux obstacles majeurs : la difficulté d'échanger et de converger sur un référentiel commun, et le mode global de gestion de grand projet.

a. Espaces d'échanges

J'appelle *espace d'échanges*, m'inspirant du concept de *trading zone* [Galison 1997, 784 sqq.], l'espace où se coordonnent l'action globale et les convictions de chaque partenaire de la négociation et de l'action [495].

495. Je développerai le concept au chapitre 12, en particulier au § 12.2.1 p. 348.

Dans l'épisode de l'ECR sur la position des pieds (§ 8.4), l'espace d'échanges entre le demandeur et les parties prenantes, espace qui aurait permis à la crise de ne pas survenir, manque tout simplement : aucun dialogue préalable n'est instauré avant la formalisation d'une demande dont le bien-fondé même n'a pas été discuté – une formalisation initiale de la spécification fonctionnelle, même réduite à une expression de la compréhension du besoin par l'équipe projet, est d'ailleurs elle-même manquante.

Dans le cadre de la crise de la redéfinition des interfaces entre le toroïde et les pieds, l'espace d'échanges existe bien, et on le voit à l'œuvre au fil des notes de calculs et des commentaires qu'elles suscitent. Pourtant, aucune notion, aucun outil ne permet de susciter la cristallisation d'un consensus, *a fortiori* de le capter pour en faire un élément de référence de la conception collaborative. Il manque, pour circonscrire les limites des actions mécaniques exercées, un outil équivalent à celui des enveloppes pour les interfaces géométriques, qui a permis de guider, nourrir et formaliser les discussions apparues lors du cas des lattes (chapitre 6). C'est un appel à une action au degré 2 du MT, celui de concepteur d'outils de conception. Le travail sur le modèle global d'analyse par éléments finis « *toroïde plus pieds* » développé par la Coordination technique à partir de 2002 (sous l'égide d'Olga) est un élément de réponse à cet appel.

Le cas des lattes, exposé au chapitre 6, est un exemple plus réussi de ce que j'appelle l'adaptation d'impédance [496] entre les physiciens et les mécaniciens des équipes de l'aimant, du spectromètre à muons, des pieds et de la Coordination technique. Pour qu'un compromis satisfaisant émergeât, il fallait que les arguments de chacun fussent entendus et compris. Les enveloppes ont servi de support à cet effort de compréhension mutuelle, et permis l'émergence de l'espace d'échanges. L'enveloppe ouvre un nouvel espace de discussion, et se revêt du statut d'objet intermédiaire [Vinck et Jeantet 1995 ; Jeantet 1998]. Considérer l'enveloppe comme un objet intermédiaire ouvre d'autres perspectives sur la notion d'espaces et de repères en gestion de projet, que nous considérerons au chapitre 12 : il s'agit de rendre compte de la dynamique de collaboration, donc d'une part des acteurs en présence, et d'autre part, de l'évolution et de la validation de leurs discussions (dont l'enveloppe est ici l'objet).

Toutefois, même existant et utilisé, l'outil “Enveloppes” lui-même rencontre des difficultés pour mener à bien son propre processus d'approbation : c'est un appel au degré 3 du manageur technique, concepteur d'organisations et de GDT. Cet appel a conduit typiquement à deux pistes : d'une part, le développement des Standard 3D, décrit au chapitre 8) permettant leur approbation technique via des dessins-vecteurs ; et d'autre part, les évolutions de l'organisation de la Coordination technique rapportées à la fin du chapitre 5.

Il revient ensuite au périmètre de l'action de degré 1 du manageur technique de mettre en place les espaces d'échanges nécessaires et de les configurer [497].

b. Mode de gestion de projet

Revenons au deuxième obstacle du déroulement du processus d'ingénierie concourante, celui lié au mode de gestion de projet. Les recherches sur l'histoire des modes de gestion [Giard et Midler 1995 ; Midler 1998 ; Garel 2003] montrent l'évolution entre la gestion des grands projets des années 1960-1970 et les exigences liées à l'ingénierie concourante. Le processus de conception intégrée échoue si l'on n'est pas dès le début dans un mode de type “plateau projet”, c'est-à-dire un mode faisant intervenir en amont, de préférence par une présence permanente, un repré-

496. Cette notion sera développée au § 11.2.4 c. p. 327.

497. Nous verrons au § 12.2.1 p. 348 de quelle manière sont construits ces espaces d'échanges.

sentant des métiers intervenant dans les phases aval, voire très ultérieures d'un projet.

Or, une telle intégration est rendue impossible par la présence dans le processus global des projets du CERN d'une étape de type appel d'offre ou, pour ATLAS, déclaration d'intérêt et processus de qualification. La présence d'une telle étape pose en effet un problème notoire de *désynchronisation*. Reprenons l'exemple du projet des Pieds : quand on a enfin connaissance des règles du jeu de la conception (de quelle manière sera fabriqué le produit, des critères de facturation basés sur le prix au kilogramme fini et non pas sur la quantité d'usinages par exemple), alors il est tout simplement trop tard pour recommencer le design ! Les spécifications techniques elles-mêmes et les contraintes de design dépendent donc de la suite du processus global, lequel n'est pas forcément prévisible. Comment imaginer faire mieux ?

Dans les faits, lors de la crise de re-conception des pieds relatée au chapitre 7, un rétablissement *de facto* d'un mode concourant a été opéré. Le point de blocage de l'appel d'offres étant passé – le producteur est choisi, et même déjà à l'œuvre en l'occurrence –, la re-conception peut enfin s'effectuer sur un mode de conception collaborative complexe, en intégrant simultanément les trois composantes de définition conjointe du *produit* en révision, du *process* de sa fabrication (prise en compte des matériaux disponibles, re-phasage, …) et du *projet* (définition du coût et des délais de livraison). Dans une même phase de projet se superposent et s'articulent les phases d'*explicitation* du besoin par l'accord et la stabilisation sur les conditions de chargement et d'interface, d'*exploration* des solutions mécaniques possibles satisfaisant ce besoin (renforcé, incliné, hybride), et d'*exploitation* optimale des moyens de fabrication disponibles en Russie [498].

Je soutiens l'idée que c'est ce rétablissement d'un mode concourant qui a permis la réussite du projet (avec aussi un peu de chance, à savoir une "formule de prix" initiale qui s'est révélée très favorable). Une certaine agilité managériale a permis de privilégier au bon moment, et sans en avoir conscience, une approche systémique qui avait au départ été empêchée par le mode d'organisation globale du projet. C'était une façon d'aplanir la difficulté : « *Умный в гору не пойдёт, умный гору обойдёт* » [499]. Car même au sein de l'entreprise russe, cette phase a un peu dégelé le glacis organisationnel.

Nous avons vu au cours de la gestion de la crise de révision du chargement des pieds (§ 7.5.1 p. 206) les difficultés du médiateur russe de l'IHEP pour obtenir les informations sur l'état d'avancement du projet en interne, et parvenir à ce que les instructions du projet soient bien comprises, transmises et exécutées par l'entreprise. Nous nous serions presque crus de retour à l'époque carolingienne et à ses circuits de communication si longs et périlleux : « *Tout bouge en ce monde, mais sans route, sans monnaie ou presque, qui pourrait faire exécuter ses ordres, très loin du lieu où il se trouve en personne ? Le chef obéi est donc celui que l'on voit, que l'on entend, que l'on touche, avec qui l'on mange et l'on dort* », écrit l'historien Georges Duby [1979, 25]. Ainsi fonctionne le manageur technique russe de l'entreprise : il obéit à celui qu'il voit et qu'il entend, c'est-à-dire à la hiérarchie interne et fragmentée de cette fédération d'entreprises qu'est IZ.

Les deux manageurs techniques d'ATLAS (le russe et le cernois) ont dû faire face à une organisation par branches disciplinaires fortes, et à un manque de liant par carence de management technique transversal entre ces branches au sein de

498. Cette formulation en double cube (produit / processus / projet d'une part, explication / exploration / exploitation d'autre part) anticipe sur l'hypercompas trialectique. Celui-ci sera présenté au chapitre 16 (Figure 16.3 p. 440), et c'est l'un de ses enseignements. Si j'anticipe ainsi, c'est qu'il est peut-être temps que nous commencions à apercevoir le bout de notre grande boucle en omegador, et donc la fin de notre parcours.

499. « Le sage, la montagne, il ne la franchit pas ; le sage, la montagne, il la contourne. » Proverbe russe.

l'entreprise. Et encore, je dois ici souligner la quantité considérable de relations informelles déployées par Alexandre, une quantité qui m'a pour l'essentiel parfaitement échappé. Le manageur technique en mode complexe, c'est aussi cela : faire confiance [500].

9.2.2 Degré 2 : le manageur technique concepteur d'outils de conception collaborative

On a considéré au degré 1 que le manageur technique avait essentiellement pour fonction d'animer un processus de conception collaborative global plus ou moins défini, et en utilisant des outils pré-existants. Son rôle consiste à ce degré à réguler ce processus. Au degré 2, le manageur technique prend conscience des manques observés par la régulation au degré 1 des opérations, et s'applique à compléter la panoplie des outils disponibles, et de faire évoluer les processus. Au degré 3 enfin, il devient acteur du changement de l'organisation qui l'inclut, par exemple du projet dans lequel il est impliqué.

Je rappelle avec Genelot que ces degrés correspondent à des niveaux de méta-systèmes logiques, et qu'ils sont donc fondés à être déployés en conjonction et en complément les uns des autres, selon leur propre temporalité, et en boucle récursive : le degré 1 sollicite le degré 2 de ses demandes et de ses carences, qui en retour définit les réorientations et satisfait ses besoins. Il en est de même entre degré 2 et degré 3, degré qui s'articule avec le déploiement stratégique d'outils et de processus de gestion de données techniques (entre autres, car on pourrait ajouter à ce niveau la définition des plans d'assurance qualité, par exemple) ou de définition et de modification des structures organisationnelles globales.

Dans les cas que nous avons exposés à la partie II, l'exemple le plus éloquent d'actions de ce degré 2 est sans doute celui de la formalisation opérationnelle du concept d'enveloppe, et de la première structure de processus d'intégration qui a été ébauchée pour en favoriser le déploiement. Cette formalisation est inspirée des actions de degré 1, à savoir la mission confiée à la Coordination technique par la Collaboration ATLAS d'assurer l'intégration géométrique du détecteur, c'est-à-dire l'attribution des espaces à chaque sous-système de manière compatible avec les différentes contraintes techniques (supports, services, installation, accès, alignement…). Afin de la mener à bien, le manageur technique en charge avait ainsi été amené, sous la houlette du coordinateur technique, à proposer et formaliser le concept en janvier 1996 pour les aimants toroïdaux, puis à le généraliser pour l'ensemble des détecteurs [501]. L'incursion au degré 2 permet donc ensuite un retour au degré 1 avec un outil facilitant les actions sur le terrain.

On a pu constater aussi l'appel au degré 3 qui a été nécessaire pour rendre opérationnel le processus d'intégration en termes de mécanismes d'approbation formelle des volumes, par exemple par le développement d'outils spécifiques (comme les standards 3D et les plans-vecteurs), ou par l'incitation à faire évoluer le positionnement managérial de la Cordination technique vis-à-vis des sous-projets d'ATLAS (passage à une « *discipline de projet* »). Cette dynamique me semble caractéristique du rôle du manageur technique : dans son périmètre d'autonomie, il prend des initiatives non explicitement demandées par ses homologues “clients ” ou par ses superviseurs, et il monte d'un ou deux degrés d'action, parfois en sollicitant d'autres homologues “fournisseurs” ou ses “supervisés”, afin d'instrumenter son action ultérieure au(x) degré(x) inférieur(s).

L'apparition de ce premier processus d'approbation des enveloppes signe le début de ma réflexion personnelle sur les processus d'intégration. Il apparaît vite

500. Genelot [2011, 214] emploie même l'expression « *Oser la confiance* », empruntée à [Martin, Lenhardt et Jarrosson 1997].

501. Voir les détails au chapitre 5.

en effet que la formalisation de l'enveloppe ne suffit pas en soi, car elle ne contient pas intrinsèquement les éléments qui explicitent le moyen de la construire socialement. Une enveloppe est en effet un objet dynamique, évolutif, qui ne s'élabore que collectivement, par un processus progressif d'itérations successives [502]. En ce sens, il participe du processus de conception lui-même, puisqu'il le déclenche (en se faisant l'expression de l'architecture globale initiale du système, liée par exemple aux exigences de la physique) ; puis il s'en nourrit (au moment des premières itérations en particulier), puis il le délimite et le régule (une fois définie la *baseline*, la configuration de référence), pour finir par s'en détacher (une fois le processus de conception achevé, et les dernières demandes de modification de la configuration traitées). Le processus d'intégration poursuit son propre chemin au-delà de la fin de la conception, puisqu'il constitue une référence ultérieure lors du cycle de vie du produit : il est le "juge de paix" du respect du gabarit lors de la réception de chaque produit ou sous-système, et le guide général, la référence globale lors de la phase d'installation.

Ce premier processus d'intégration tel qu'il apparaît à la Figure 5.11 : Modélisation schématique du processus d'approbation des enveloppes p. 137 est consacré à la gestion des enveloppes. Par la suite, le concept sera enrichi, en particulier sur la gestion des interfaces qui n'était encore qu'embryonnaire (Figure 9.2) en 1999-2000 : elles sont simplement considérées comme des surfaces de contact entre deux enveloppes contenant des ensembles réels (aux défauts didactiquement très amplifiés). L'expérience ultérieure que j'ai acquise au degré 1 va conduire à affiner cette approche, à chercher à définir la position de ces interfaces par rapport à un repère absolu, et à inclure dans cette définition non seulement la position, mais également le typage (la caractérisation spécifique) technologique de l'interface [503].

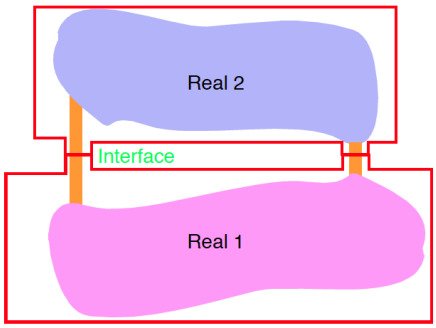


Figure 9.2: Définition embryonnaire des interfaces

Bertrand, Présentation au LHCC, 25 mars 1999

Il faut ici retenir la dynamique d'apprentissage à long terme, dont la capitalisation se fait par incursion au degré 2 de la logique d'actions du manageur technique, et par inscription dans des outils et des processus ou procédures adaptés. Elle nécessite éventuellement des incursions au degré 3 d'actions, avec deux modalités d'intervention : l'introduction ou l'évolution de structures d'organisations permettant le déploiement de ces processus et procédures ; et la modification ou l'adaptation aux besoins d'outils de gestion de données existants.

Concernant le rôle au degré 2, je voudrais encore ajouter un point concernant la dynamique d'apprentissage organisationnel (que nous n'approfondirons pas). C'est au degré 2 que le manageur technique doit selon mon expérience déployer le plus de pouvoir de conviction, construire des espaces d'échanges portant sur la dimension méta, c'est-à-dire sur la façon de travailler. Au degré 1, et *a fortiori* au degré 0 opérationnel, il faut convaincre ses partenaires du bien-fondé d'une solution, d'une modification de conception, de la validité d'un calcul, de la pertinence d'une évolution. Au degré 2, construire le consensus est plus difficile : il faut convaincre de l'utilité d'un outil, de l'intérêt d'un processus, de la pertinence d'une procédure. Il faut non plus communiquer sur la base du référentiel produit, mais méta-commu-

502. Nous y reviendrons plus en détails au chapitre 15.

503. Des exemples de ce typage seront explicités au chapitre 15, avec la définition de l'interface entre un aimant dipolaire d'accélérateur et son support.

niquer sur la base du référentiel du processus de définition du produit, c'est-à-dire du processus de conception. C'est pourquoi, selon moi, il est parfois nécessaire de monter au degré 3 pour obtenir l'adoption de modifications au degré 2 : le degré du référentiel de projet. C'est en s'appuyant sur des arguments liés aux contraintes du projet (délais, coûts, ressources), ou en suscitant des modifications d'organisation au niveau des structures du projet, que de telles évolutions peuvent être obtenues. Toutefois, une élaboration collective (au sein d'espaces d'échanges) permettrait une appropriation commune bien plus pérenne que par le pouvoir de conviction, et *a fortiori* par la coercition.

9.2.3 Degré 3 : le manageur technique concepteur d'organisation(s)

Chaque degré fonctionne de manière récursive avec chaque autre, et à chaque degré se retrouvent les mêmes caractéristiques. Seul change le « *niveau de logique du métasystème de pilotage* » [Genelot 2011, 163]. Au degré 3 comme aux autres, le manageur technique va donc solliciter toute approche conceptuelle utile à ses yeux : c'est aussi un "pragmatique éclectique". À ce degré, le manageur technique agit selon deux modes.

Le premier mode est d'influer sur l'*évolution des structures organisationnelles* qui pourraient faire obstacle aux évolutions de degré 2 qu'il cherche à introduire. On en a vu plusieurs exemples, en particulier l'évolution de l'organisation de la Coordination technique et de son mode de relation avec les différents systèmes d'ATLAS. On peut également classer dans ce mode la définition des référentiels de projet : ces outils précieux que constituent les plans d'assurance qualité, et plus généralement le déploiement d'une démarche qualité, nonobstant les adaptations nécessaires de cette démarche inhérentes à la spécificité des activités de recherche [Petit 1999a, 1999b]. Tout le travail d'élaboration des différentes structures arborescentes et de formalisation des processus qui a été entrepris et est résumé dans la première partie du TDR de la TC relève de cette activité. Est-il utile de mentionner que le travail d'explication et d'accompagnement a été considérable ? On en voit quelques traces dans les chapitres 6 et 8, avec la difficulté de garantir ne serait-ce que la simple traçabilité des données techniques [504]. On a vu à de nombreuses reprises cette frilosité à faire circuler des dessins tant que leur contenu n'est pas figé, alors que c'est le fait même de les faire circuler qui, selon moi, va permettre au processus de vérification d'opérer, donc à la phase de validation de pouvoir parvenir à bonne fin. Tout ce travail de vérification progressive souffre en fait d'un processus sans doute trop intimidant pour beaucoup d'acteurs impliqués, avec ses phases perçues comme trop formelles de contrôle, de publication et d'approbation. Et même la possibilité de travailler sur une nouvelle version dès que la version précédente est diffusée ne suffit pas à apaiser la nervosité observée.

Le second mode d'action au degré 3 est lié au *déploiement de démarches de gestion des données techniques* (GDT). La problématique de mise en place de tels systèmes est particulière. En ce qui me concerne, elle a accompagné mes activités dès le début 1995, nous en avons brièvement rendu compte au chapitre 8. Elle est motivée par un constat : il manque un espace d'échanges entre les différents producteurs de données techniques pour leur permettre de partager ensemble leurs réflexions sur leurs données respectives sans avoir l'impression de perdre le contrôle sur la validation de leurs propres données. À la fin des années 1990, aucun outil ne permet de construire un tel espace d'échanges. CDD offre des fonctionnalités prometteuses en ce sens, et nous avons vu en particulier la procédure d'approbation, qui permet de recueillir des commentaires sur un dessin. Nous avons également vu que les règles d'usage autour des procédures d'approbation fluctuent, et dépendent large-

504. Cette problématique est-elle bien propre aux projets scientifiques ? Assurément non.

ment de l'esprit qui anime l'*approval leader*, le responsable de l'approbation. Et ces procédures, peut-être pas assez bien établies pour cela, ou pas assez coercitives, n'imposent pas, par exemple, une réunion après la phase de recueil de commentaires pour parvenir à une conclusion consensuelle avant la sanction proprement dite de la phase de validation : acceptation ou rejet motivé. Au reste, une telle procédure serait-elle viable sans surcharger en revues de dessins des équipes pas assez étoffées ?

Toujours est-il que le constat après les années ATLAS est pour moi évident : nous n'avions pas l'outil qui permette de mettre en œuvre l'idée que je me fais d'un espace d'échanges en phase de vérification d'un processus de conception ; nous n'avions pas non plus les processus qui en induiraient l'établissement et la pratique ; et enfin, nous n'avions pas les chefs de (sous-)projet qui auraient demandé à y recourir. C'est ce que je mettrai en place au chapitre 14, au degré 3, et qui nécessite simultanément une action organisationnelle et sur les processus, et une action au niveau des outils de GDT.

Si l'on décale le regard d'un cran, on peut s'interroger sur les espaces d'échanges requis par les actions au degré 3 pour le déploiement d'un système de GDT : ce sont ceux qu'il faut créer entre trois groupes d'acteurs : les utilisateurs d'un tel système, qu'ils soient actifs (projeteurs et ingénieurs) ou simples consommateurs des données (acheteurs, donneurs d'ordre) ; les membres des équipes de développement et de support informatique de ces outils complexes ; et les représentants du projet qui sont porteurs des circuits de circulation (*workflow*), qui attribuent les droits respectifs des différents utilisateurs, et surtout qui sont les mieux à même de définir les modèles de données correspondant à leur projet [505]. Je veux souligner ici que leur nature n'est pas différente au degré 3 de ceux que nous cherchons à instrumenter précisément pour l'action au degré 1, ou de ceux qui se révèlent nécessaires au degré 2, au cours des négociations de méta-communication sur ces outils, pour amener à convaincre et emporter l'adhésion sur leur usage. Un processus de conception d'outil ou d'organisation reste un processus de conception. Chaque degré est de ce point de vue un élément fractal, au sens qu'il est auto-similaire (récursif) aux autres.

En ce qui concerne la conception de systèmes collaboratifs – auxquels j'assimile les GDT –, la littérature propose un modèle, celui du « *trèfle du collecticiel* » qu'il me paraît intéressant de commenter pour les besoins ultérieurs de notre modèle de manageur technique. Nous reproduisons à la Figure 9.3 une représentation graphique montrant effectivement un trèfle [Vernier 1997, 11]. Ce modèle s'appuie sur des travaux antérieurs [Ellis et Wainer 1994] qui définissent un système multi-utilisateur comme « *une combinaison de trois aspects fonctionnels* » [Salber 1995, 18] : l'aspect *ontologique* (les objets manipulés et les opérations possibles sur ces objets), l'aspect *coordination* (l'organisation et les relations entre les activités des participants), et l'aspect *interface* (la façon dont les participants interagissent avec le système et entre eux). Le trèfle des systèmes multi-utilisateurs représente alors trois espaces distincts qui classent les services offerts : la *production*, la *coordination* et la *communication* (qui remplace dans le modèle de Salber [506] l'aspect interface du modèle d'Ellis, lequel ne fait pas partie du noyau fonctionnel). Salber présentait ainsi son modèle [1995, 19] :

> • *L'espace de* production *correspond au modèle ontologique d'Ellis : il désigne les objets qui résultent d'une activité de groupe, par exemple un livre, une œuvre de cinéma, un logiciel, etc. L'espace de production correspond au modèle conceptuel tel*

505. Nous évoquerons au chapitre 13 les difficultés particulières à constituer de tels espaces d'échanges [Nicquevert, Boujut et Yami 2009].

506. Le modèle sera ensuite enrichi et exploité dans le déploiement de ces systèmes [Laurillau et Nigay 2002a, 2002b].

que nous l'entendons en conception des systèmes mono-utilisateurs. Pour les systèmes multi-utilisateurs, ce modèle décrit les concepts qui motivent l'action de groupe, qui dénotent l'œuvre tangible commune, mais aussi l'espace privé de chaque utilisateur comme dans un système mono-utilisateur.

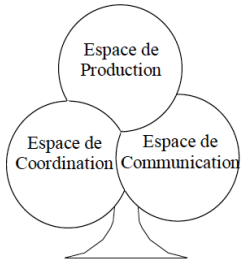


Figure 9.3: Modèle du trèfle des systèmes collaboratifs

In Vernier 1997

• *L'espace de* coordination *reprend la définition d'Ellis : il s'agit de définir les acteurs (et notamment les individus, les groupes, les rôles, voire des agents logiciels "intelligents"), d'identifier les activités et les tâches (et notamment leurs relations temporelles), de désigner enfin les acteurs responsables des tâches et des activités. Tandis que l'espace de production offre une vue statique du système, l'espace de coordination en définit la dynamique. Sur ce point, nous adhérons au point de vue d'Ellis.*

• *L'espace de* communication *offre aux acteurs du système multi-utilisateur la possibilité d'échanger de l'information. Le contenu sémantique de cette information concerne les acteurs communicants. Il est étranger au système qui se contente de servir de messager. Cet aspect, qui constitue l'essence de la communication homme-homme médiatisée, n'est pas explicite en tant que tel dans le modèle d'Ellis.*

Salber exploite ensuite son modèle en expliquant que, selon les systèmes, la taille respective des espaces varie. Mais je n'ai pas trouvé comment les espaces sont liés entre eux, que ce soit de manière graphique ou même conceptuelle. La critique que je formule à l'égard de ce modèle est donc son simplisme notoire, en dépit de l'intérêt graphique qu'il pourrait représenter : on ne voit pas l'apport d'une présentation en trèfle (dont le pied n'est d'ailleurs même pas présent dans sa propre figure, c'est Vernier qui le rajoute).

Sur le fond, ce modèle décompose distinctement en trois classes les services que l'on peut attendre d'un système de gestion des données techniques. Le premier espace "de production" correspond à l'espace de travail des utilisateurs, nous le retrouvons dans la définition de Lécaille sous la dénomination d'espace privé (§ 12.3 p. 356) également utilisée par Salber. L'espace de coordination de Salber correspond plus ou moins à celui de l'action des manageurs techniques de projet œuvrant aux degrés 2 (paramétrage des droits) et 3 (définition des tâches et activités). Quant à l'espace de communication, il est assez semblable à ce que nous avons vu dans CDD avec le processus d'approbation, dans les limites que nous avons relevées. Nous voyons que notre approche des espaces d'échanges n'est pas couverte par ce modèle des systèmes multi-utilisateurs : l'espace d'échanges dépasse le cadre d'un tel système, si performant soit-il.

9.3 Un modèle "concentrique" du manageur technique

Les degrés logiques ne sont pas les niveaux hiérarchiques, avons-nous souligné à plusieurs reprises. Les niveaux hiérarchiques ont toutefois un rôle important dans nos cas, et c'est sur eux que nous allons nous fonder pour ébaucher un premier modèle du manageur technique. Son rôle, illustré par les trois degrés de son intervention, évoque celui d'un *acteur d'interface* entre l'ensemble des acteurs intervenant dans un projet. Pour illustrer cette hypothèse [507], je propose à la Figure 9.4 une représentation graphique du positionnement respectif des acteurs du projet *Pieds et rails* d'ATLAS. La structure de management du projet donnée à la Figure 7.3 p. 191,

507. Et avant que de préciser au chapitre 11 ce que nous entendons par acteur d'interface (§ 11.2 p. 312).

ainsi que la liste des signataires du protocole de lancement de la production (Tableau 7.2 p. 226), complèteront utilement la description de ce modèle, en particulier pour les noms des acteurs dont seules les initiales sont ici repris.

C'est un modèle concentrique [508] : l'ensemble des acteurs est positionné radialement autour d'un centre qui représente le projet, acteur “moral” [509]. Chaque secteur radial du modèle correspond à une unité organisationnelle intervenant dans le projet. Radialement, le disque de projet est découpé en quatre anneaux, dont les trois premiers correspondent aux trois [510] niveaux hiérarchiques que nous retiendrons (indiqués en forme de légende dans le secteur radial inférieur) : celui du *management supérieur* (le *top management*), le plus proche du centre ; celui des *manageurs techniques*, au milieu (dénommé *middle management*) ; et enfin, l'anneau du *management opérationnel*. À l'extérieur, on retrouve les exécutants, avec le nom de l'organisation qui les emploie. L'intersection entre un secteur radial et un anneau contient

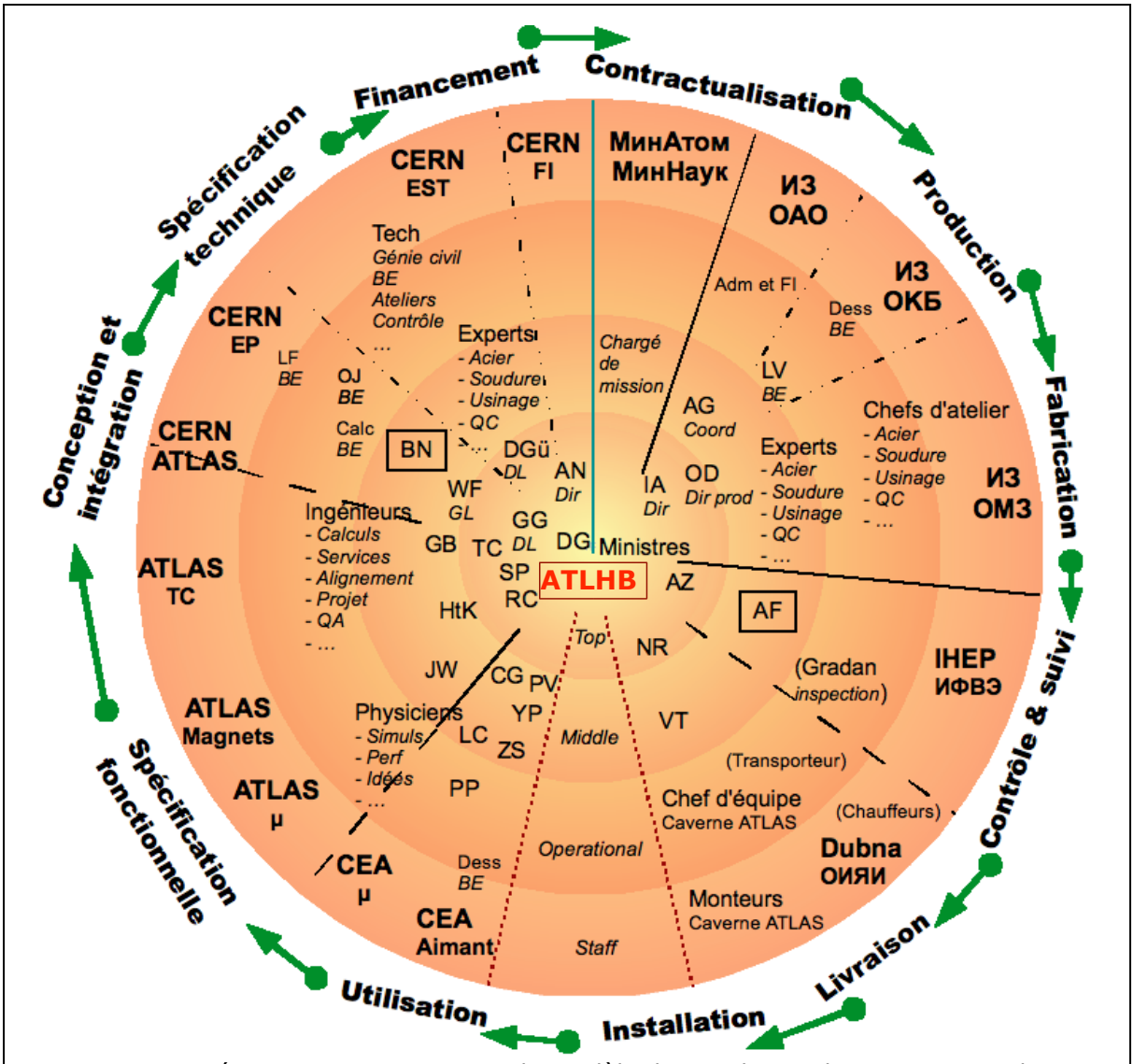


Figure 9.4 : Représentation concentrique du modèle de circulation du manageur technique

Le cas du projet *Pieds et rails* ATLHB d'ATLAS

508. Ce modèle n'est pas sans ressemblance avec une première ébauche, celle de la Figure 3.3 p. 84. Lequel est d'ailleurs bien utile pour déchiffrer celui-ci.

509. Par analogie avec la distinction entre personnes physiques et morales.

510. Ce nombre sera justifié (et en fait considérablement nuancé) au § 11.1.3 p. 311.

donc un acteur ou un groupe d'acteurs, défini ainsi à la fois par son niveau hiérarchique approximatif et par son unité organisationnelle de rattachement.

L'on trouve autour du disque de projet une série de flèches indiquant l'évolution schématique du cycle de vie global du projet. Il part en bas à gauche de la définition du besoin, et se termine au même endroit par la phase d'utilisation, au niveau d'un secteur radial correspondant à l'unité organisationnelle ATLAS : ce sont les physiciens, spécificateurs fonctionnels d'un besoin initial, que l'on doit satisfaire *in fine*. Ces physiciens sont (dans notre modèle simplifié) pour partie au CERN et pour partie au CEA, où se trouve également l'équipe projet en charge de la conception de l'aimant, elle aussi client des Pieds. La spécification technique dérivée est ensuite satisfaite par le Bureau technique du CERN, qui s'appuie pour cela sur les groupes supports de sa division et des autres services techniques et administratifs du CERN. Le financement est assuré partiellement par le CERN et partiellement par les ministères russes, qui traitent avec la firme russe IZ en charge de la production. Cette production est suivie principalement par l'institut IHEP, membre d'ATLAS œuvrant par délégation de la Collaboration, auprès de laquelle il est co-responsable de la bonne livraison du produit, puis de l'installation, cette dernière activité étant co-pilotée par le CEA, par l'équipe ATLAS des Aimants et par l'équipe d'installation de la Coordination technique.

L'on a représenté sur le disque du projet quelques frontières indicatives, entre organisations, entre sous-organisations, et même entre pays si l'on veut bien. Différents types de traits sont utilisés, sans aucune prétention à une quelconque définition précise de la nature de ces frontières : compte tenu des intrications organisationnelles multiples, elles n'ont guère plus de sens, selon nous, qu'indicatives, voire intuitives [511].

Ce modèle illustre la particularité des manageurs techniques à se mouvoir et à circuler entre l'ensemble des acteurs sur l'ensemble du disque, que ce soit le chef du projet des Pieds ou le médiateur russe (avec pour ce dernier un léger décentrage vers les circuits informels internes à IZ par exemple). Il intervient en effet (et ce selon ses trois degrés d'action possibles) aussi bien auprès de ses pairs et homologues de l'anneau intermédiaire que de l'anneau le plus proche du centre, pour établir et réguler le contexte organisationnel dans lequel évolue le projet, ou sur l'anneau extérieur quand il s'agit de suivre, réguler ou superviser les actions sur le terrain, que ce soit au(x) bureau(x) d'études, dans la production et la gestion des données techniques [512] ou des documents commerciaux et administratifs, dans les laminoirs, les ateliers de soudage et d'usinage et autres services de contrôle, ou bien encore dans la caverne lors de l'installation. Le séminaire technique de novembre 2004 déjà cité au § 7.3.1 avait d'ailleurs mis en évidence les contributions fondamentales des services techniques du CERN, tant dans les phases de préparation des spécifications techniques que dans les phases de contrôle et de validation de la qualité de la production.

L'on pourrait produire un modèle concentrique basé sur les mêmes principes à partir du Tableau 6.1 p. 170 consacré à la crise des lattes. Les secteurs radiaux seraient alors uniquement représentés par des instituts membres d'ATLAS. On pourrait en tirer des conclusions similaires sur la circulation et l'ubiquité du manageur technique. De même, quoique correspondant à un projet essentiellement de degré 2, l'on pourrait esquisser un modèle concentrique semblable pour le petit projet de création des standards 3D.

Ce modèle concentrique est un élément de modèle descriptif global du projet, qui permet de visualiser en quelque sorte le périmètre d'intervention du manageur

511. Cette question des frontières reviendra dans nos questionnements de la fin de la partie III : le modèle de “cotte de mailles” se substituera alors à ces secteurs radiaux de manière bien plus souple.

512. Parmi les services support du CERN figure le support CAO et GDT.

technique, sans en préciser toutefois ni la nature ni les modalités. C'est à l'élaboration d'un tel modèle du manageur technique lui-même que nous allons nous atteler désormais dans le reste de la partie III.

9.4 Vers un modèle complexe du manageur technique en action

Cette dernière brève section définit l'objectif et le domaine de validité recherché du modèle de manageur technique en action. Le modèle que nous allons élaborer se doit d'être compatible avec le modèle concentrique élaboré précédemment : rendre compte de son ubiquité sur l'ensemble du périmètre du projet et de sa capacité d'intervenir selon les trois degrés possibles avec l'ensemble des acteurs.

Pourquoi élaborer un tel modèle ? C'est que celui que nous avons esquissé précédemment, le modèle concentrique, est au mieux descriptif, et ne propose aucune explication, aucun mécanisme heuristique du rôle du manageur technique. Il le met en scène dans un contexte de projet, et montre – ce qui est déjà quelque chose – une certaine continuité d'action avec l'intervention sur l'ensemble des niveaux d'un projet. Toutefois, n'est-ce pas dû à une sorte d'effet d'optique ? Se concentrant sur un manageur technique donné, jouant par construction un rôle central dans un projet donné, n'est-il pas compréhensible que le modèle concentrique dont l'axe est ledit projet exhibe ledit rôle central ? Je ne le pense pas puisque, parmi les acteurs impliqués dans le projet, il est le plus à même de bénéficier de ce que j'ai appelé l'*ubiquité*, la faculté de lier des relations avec chacun des autres acteurs du projet.

Le modèle concentrique met également en évidence un autre résultat déjà pressenti : le caractère complexe de la problématique. La diversité des interactions, le couplage entre des processus dont les échelles de temps sont différentes, et selon des degrés variables, semblent en être les principaux éléments. Il nous faut donc enrichir le modèle pour comprendre ce qui fait cette spécificité du manageur technique comme acteur d'interface. Il nous faut saisir ce que le caractère complexe de ces projets projette en retour sur ses actions. Ces éléments de la pensée complexe seront repris de manière plus organisée au chapitre 10 : approche systémique, prise en compte de l'émergence d'auto-organisation, boucles de couplage permettant le dépassement des antagonismes apparents.

Notre objectif sera de montrer les blocages perçus sur le terrain en raison d'approches de management trop déterministes, et les lacunes (partielles) en termes d'interrelations entre activités techniques et management de projet. En introduisant ces éléments, nous construirons au chapitre 11 un premier étage de modèle de manageur technique comme acteur d'interface entre les différents acteurs de projet, c'est-à-dire un rôle qui sache dépasser l'axe traditionnel vertical de circulation des informations, des instructions et des restitutions, qu'il soit ascendant (*bottom-up)* ou descendant (*top-down*) ; c'est ce que nous pourrons appeler le « *pas sur le côté* » [Bottero 2003], le « *pouvoir latéral* » [Rifkin 2011], ou encore, et c'est ce terme que nous retiendrons, l'approche centrifuge *middle-out*. Nous enrichirons ensuite dans le chapitre 12 ce premier étage par la mise en évidence des espaces d'échanges qui sont nécessaires au manageur technique pour jouer ce rôle d'acteur d'interface. Nous expliciterons comment ce manageur technique, équipé d'espaces d'échanges, parvient à être en mesure de réguler le processus global, et nous en proposerons les premiers éléments d'une mise en actes concrète dans la partie IV.

Plusieurs limites s'imposent à ce stade à ce projet ambitieux de modélisation. Tout d'abord, une telle démarche est de nature profondément transdisciplinaire, et toute velléité d'embrasser une telle question ne pourrait qu'être excessive. Ensuite, nous ne sommes pas encore en mesure d'établir un tel modèle général, qui ferait exploser le cadre de la thèse : c'est pourquoi nous nous limitons à mieux comprendre la façon dont se déploient les interfaces autour et avec le manageur technique. Il ne m'échappe pas qu'une description plus complète de cet acteur nécessi-

terait que soient étudiées bien d'autres caractéristiques, en particulier liées à son leadership, à sa capacité à emporter la conviction et à enrôler les autres acteurs, par exemple ; ces questions ne seront abordées que de manière indirecte, car les traiter dans leur globalité nous emmènerait assurément trop loin. Prétendre à une description complète serait de toute façon retomber dans les travers d'une pensée analytique déterministe : il nous faut assumer que certaines caractéristiques restent indéterminées, et / ou auto-référentes. Un véritable modèle complexe de manageur technique doit inclure sa propre incomplétude [513], et il nous faut accepter de le doter de sa propre capacité à s'auto-définir et à faire évoluer cette définition.

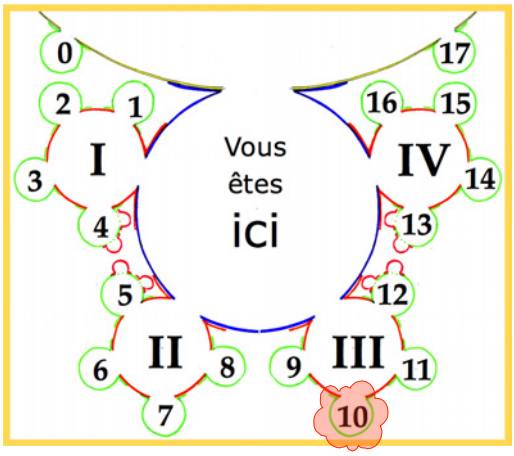
Nous limiterons le cadre de validation de ce modèle à celui de l'activité d'intégration, au sens où nous l'avons vu à l'œuvre principalement dans les chapitres 5 et 6 : une activité visant *« à vérifier la mutuelle compatibilité des constituants d'un système, à identifier les frontières et interfaces pertinentes entre ces constituants, et à simuler le fonctionnement potentiel du système »* (§ 3.4.2 p. 95). Outre qu'elle me semble mettre en valeur les spécificités de la figure de manageur technique, cette activité a été abondamment illustrée dans la partie II, et offre un terrain d'application dans le cadre ébauché à la partie IV. De plus, les leçons de l'application de notre modèle seront assez facilement transposables au cas de l'activité de projet. Mais surtout, outre ces arguments d'ordre méthodologique, l'activité d'intégration est pour moi particulièrement représentative de notre proposition du rôle de manageur technique comme régulateur du processus global de conception et de réalisation, que nous avons encore appelé processus collaboratif complexe. Nous avons vu dans la partie II l'émergence des premiers processus d'intégration et des premiers modèles de ces processus (voir le chapitre 5, et en particulier la Figure 5.11 p. 137) : ils constituaient la tentative aux succès progressifs (mais finalement assez décisifs) d'introduire un élément de stabilisation dans le processus de conception. Cette démarche d'intégration est une constante sous-jacente à toute ma démarche, dans un contexte dont j'avais déjà l'intuition qu'il était trop complexe pour se satisfaire d'une approche analytique par décomposition en tâches élémentaires. Nous développerons dans le chapitre 12 notre approche de la place du processus d'intégration dans le processus de conception et dans l'économie générale d'un projet, selon une approche globale et complexe. Dans le chapitre 15, nous en proposerons une opérationnalisation effective par une approche hybride associant enveloppes, interfaces (via la notion de squelette) et espaces d'échanges.

∴

Conformément à notre projet initial exposé dans le chapitre 0, c'est donc une proposition effective d'*Agir et penser à la fois*, conforme aux enseignements de la pensée complexe, que nous développerons à la partie IV, après nous être munis de quelques conceptualisations développées dans la présente partie *Repenser (le complexe) avant d'agir*. Car la réelle mise à l'épreuve du modèle est celle de la mise en pratique, celle du management technique en actes, ou plutôt en actes ↔ pensées.

Dès le chapitre 2, et au fil du propos, nous nous sommes référés plus ou moins explicitement à quelques concepts propres à la systémique et à la pensée complexe. Il convient maintenant de les mobiliser plus directement dans la triple réponse que nous souhaitons donner à nos questions de recherche. C'est l'objet des trois chapitres suivants, et tout particulièrement du prochain : misant sur la fécondité des principes de la pensée complexe, nous y exposerons plus en détails la démarche retenue pour l'élaboration de notre modèle complexe du manageur technique.

513. Incomplétude, auto-référence et indétermination : trois concepts liés qui constituent les piliers de la trialectique. Nous n'irons pas plus loin à ce stade, et attendrons le chapitre 16.



Chapitre 10. Pour une complexité féconde

Où, sous l'égide de quelques principes de la pensée complexe, l'on élabore les premiers éléments d'un modèle de manageur technique

Tant que nous ne relions pas les connaissances selon les principes de la connaissance complexe, nous restons incapables de connaître le tissu commun des choses : nous ne voyons que les fils séparés d'une tapisserie. Identifier les fils individuellement ne permet jamais de connaître le dessin d'ensemble de la tapisserie.

Edgar Morin [514]

514. *La Voie. Pour l'avenir de l'humanité*, Fayard, 2011, p. 152.

Les trois chapitres suivants de la partie III s'attellent à l'exercice de tisser une tapisserie du type évoqué par Morin (en écho à la métaphore que nous avions déjà filée lors de la partie I) : sur la trame constituée des trois apports respectifs des principes de la complexité que nous allons retenir, vont s'entrelacer les fils de nos trois questions de recherche (posées au chapitre 3), sur la modélisation complexe elle-même, sur le rôle du manageur technique, et sur le processus de conception et d'intégration. C'est ainsi un premier dessin d'ensemble de la tapisserie qui s'esquissera. Il tiendra sans doute davantage du point de croix qu'il ne sera véritablement digne des Gobelins : tout artisan commence par être un apprenti – et il le demeure. C'est le désir de donner à voir ce fameux *tissu complexe* qui motive ici notre démarche, et cette conviction : mieux vaut bâtir un patron dans son ensemble plutôt que de se concentrer sur la broderie d'un galon, si raffinée soit-elle.

Dans le présent chapitre, à partir du vécu de terrain décrit à travers les cas étudiés à la partie II, et au vu de la synthèse opérée au chapitre 9, nous allons mettre en évidence des caractéristiques de complexité ; puis nous préciserons, dans le très vaste et très dynamique champ des études se réclamant de cette complexité, quels sont les concepts que nous retenons pour notre propos. Nous élaborerons ensuite un tissu complexe au moyen d'une approche matricielle exposée au § 10.3.2 p. 294. Les premières contributions fécondes de la pensée complexe à l'élaboration des éléments de réponse à nos questions de recherche seront ainsi mises en évidence dans la première colonne de cette matrice. Les deux autres colonnes seront complétées dans les chapitres 11 et 12.

10.1 La complexité des cas

Dans les cas étudiés au cours de la partie II, observons-nous que nous avons affaire des manifestations de la complexité, et dans quelle mesure ? Si oui, quels sont les principes complexes auxquels nous serions en mesure de les associer ? Nous pourrons alors en retour exploiter les apports de la pensée complexe pour, d'une part, apporter des éléments de réponse à nos questions de recherche, et surtout, d'autre part, élaborer ces savoirs actionnables, outils dont le manageur technique sera doté pour retourner sur le terrain à la partie IV.

Au vu des cas rapportés dans la partie II, et après la présentation du CERN comme système complexe proposée au chapitre 2, il est légitime de supposer que nous avons bien affaire à des projets complexes. Williams [1999] rappelle utilement qu'un projet complexe est « *more than simply a 'big' project* » [515] et introduit l'importante dimension d'incertitude (*uncertainty*), dont on a vu combien elle accompagnait la plupart des acteurs lors des cas étudiés. Si nous adoptons la grille de lecture de Weber [2005], nous pouvons étayer par quelques données cette conclusion. Weber propose un « *concept étendu de la complexité* » en cinq dimensions. Les deux premières donnent une indication assez intuitive d'une mesure de complexité : complexité *numérique* (nombre de composants d'un produit ou d'un système) ; et complexité *relationnelle/structurelle* (nombre de relations et d'interdépendances entre composants). Il y ajoute une troisième dimension, liée au développement du produit proprement dit, la complexité *variationnelle* (nombre de variantes d'un produit/système). Ces trois complexités peuvent servir de base à une certaine mesure quantitative de la complexité d'un produit ou d'un système. Weber complète utilement ces trois dimensions par une complexité *disciplinaire* (nombre de disciplines

515. « Un projet complexe, c'est davantage que simplement un "gros" projet ».

différentes impliquées dans la création du produit/système), et par une complexité *organisationnelle* : « *distribution of work, "global co-operation", "top-down" instead of "bottom-up" development/design procedures, etc.* » [516]. Cette grille appliquée à nos cas nous permet de mettre en évidence la complexité sur chacun des axes proposés. Reprenons-les une à une succinctement.

• *Complexité numérique* : les centaines de milliers de composants d'ATLAS s'ajoutent aux centaines de milliers de composants du LHC pour constituer, avec les centaines de milliers de composants de CMS et des autres expériences, l'un des dispositifs techniques les plus considérables au monde.

• *Complexité relationnelle* : nous avons vu les difficultés survenues pour assurer la connexion entre les chambres à muon, les toroïdes et les pieds, et ce n'est là que partie visible d'un iceberg qui ne mentionne même pas les millions de câbles de toutes sortes. Les complexités d'interfaces entre aimants du LHC, nommées interconnexions, seront évoquées au début du chapitre 13 : on parle ici de milliers de relations mécaniques, électriques, hydrauliques, magnétiques, cryogéniques…

• *Complexité variationnelle* : il existe, rien que pour les chambres à muon MDT d'ATLAS, une bonne vingtaine de variantes standard – sans compter les chambres spéciales avec découpes dans les pieds, ou pour les passages des services. Pour le LHC, il existe vingt-sept variantes des aimants de focalisation de type SSS.

• *Complexité disciplinaire* : faire la liste des disciplines et champs d'expertise requis pour construire ATLAS est déjà un travail considérable, une page n'y suffirait pas. La liste figurant à la fin de la complexité relationnelle en donne une idée. La question de la multi-physique est également abordée dans [Samper et al. 2007].

• *Complexité organisationnelle* : le chapitre 8, entre autres, a illustré les problématiques d'échanges et de partage des données. Les chapitres 2 (organisation d'ATLAS), 3 (cas n° 0, relations entre Collaborations et groupes support, rôle dual du CERN) et 5 (Coordination technique et relations avec les sous-projets) ont évoqué les questions d'organisation internes au CERN et à la Collaboration ATLAS. Dans le chapitre 7, on a en outre aperçu la problématique dans sa dimension géopolitique, avec la firme et les ministères russes.

Au vu de la grille de Weber , ATLAS, le LHC et le CERN constituent donc indéniablement des cas complexes, de surcroît couplés. Le recours à d'autres typologies de la complexité [Missonier 2012] conduirait au même constat. C'est un véritable cas d'école pour étudier la complexité à l'œuvre. Elle se déploie et se ramifie, s'insinuant dans un champ de valeurs multidimensionnel et transdicisplinaire. Prenons le cas des pieds d'ATLAS, pourtant *a priori* plus simple : depuis la valeur d'un effort transverse exercé par un aimant sur une poutre jusqu'à la valeur du prix de l'acier en roubles selon l'approche comptable d'un consortium industriel post-soviétique, en passant par la valeur de la déviation d'un muon issu de la désintégration d'un Higgs hypothétique [517] lors de sa traversée d'une soudure dont la valeur du taux de ferrite serait excessive, ou encore la valeur du tolérancement exprimé selon des normes soviétiques et porté sur un dessin géré par une base de données accessible aux instituts membres de la Collaboration via le *Web*, inventé d'ailleurs à cette fin… Abyssales mises en abymes.

En termes de complexité, que peut-on tirer comme enseignement des cas de la partie II ? L'un d'entre eux est la complexité multi-échelles évoquée ci-dessus, auxquels j'ajouterai trois autres enseignements : les carences en termes d'approche systémique ; les dilemmes, controverses et tensions plus ou moins "essentielles" ; et les émergences d'auto-organisations.

Analysons tour à tour ces quatre aspects.

516. « Distribution du travail, coopération globale, procédures de développement et de conception descendantes plutôt qu'ascendantes, etc. » [Weber 2005, 4-5]

517. Ajout ultérieur : notoirement moins hypothétique depuis l'annonce du 4 juillet 2012…

a. Les carences en termes d'approche systémique

L'approche systémique a été évoquée au chapitre 2 avec, selon l'approche de Le Moigne, quatre aspects : téléologique, fonctionnel, ontologique et génétique. Elle vise à construire une représentation du réel qui prenne en compte de manière simultanée et couplée ces quatre aspects, en particulier selon le principe de l'approche globale des interactions entre les composantes d'un système [518].

Dans les cas de la partie II, on a noté plusieurs carences dénotant une approche systémique déficiente. Les carences les plus évidentes sont les problèmes de couplages aux interfaces, dans le cas des efforts induits par le toroïde sur les pieds. Il s'agit aussi de penser ATLAS comme un tout, et non pas comme une juxtaposition de composants indépendants. Par ailleurs, l'aspect génétique induit de penser d'emblée l'ensemble du cycle de vie, donc de prendre en compte lors de la conception les aspects liés à l'installation ou à l'alignement ; on a vu que c'était parfois peu naturel pour certains physiciens en charge des chambres à muon.

À l'inverse, on a pu noter que parfois certains ingénieurs perdaient de vue l'aspect téléologique propre au projet : construire un détecteur unique au monde, dont les performances soient les meilleures possibles, quitte à sacrifier certaines marges qui eussent été pleinement légitimes pour des systèmes industriels. La constitution d'un but commun pour tous reste un défi pour le management du projet, qui doit à la fois polariser les énergies en donnant un sens partagé au projet, tout en respectant les intérêts individuels et les motivations collectives propres à certains sous-groupes de la Collaboration. Galison [1997] a bien montré cette fragmentation en sous-cultures qu'il faut réconcilier pour mener à bien un grand projet scientifique. Sur ce point, il faudrait également souligner l'influence pas toujours bénéfique des arborescences produit sur lesquelles s'appuient les démarches de gestion des données techniques, arborescences peu propices à la gestion des relations d'interdépendances [519].

b. Les dilemmes

Le point précédent sur le but commun d'un projet pour l'ensemble de ses acteurs, fondamental à la fois du point de vue systémique (que l'on se souvienne des mésaventures d'Aramis [Latour 1993], projet qui a couru à l'échec pour ne pas avoir su cristalliser l'émergence d'un but commun partagé) souligne la question des dilemmes qui traversent les projets, surtout d'ampleur et de nature semblable au LHC ou à ATLAS. Même pour des projets plus modestes, le management des projets d'innovation est considéré comme nécessairement dialectique, ou paradoxal pour reprendre la terminologie de Martinet [2012].

Celui-ci retient quatre couples de concepts, qui se trouvent en tension dialectique (selon ma formulation). Ces couples sont analysés comme suit par Chanal [2000, 25-26] et représentés deux à deux dans la Figure 10.1 : le couple conçu / émergent, comme « *compromis entre l'exploitation intelli-*

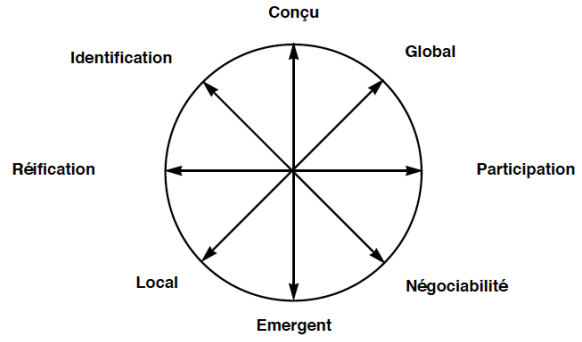


Figure 10.1 : Couples en tension du management « paradoxal »

in Chanal 2000

518. Nous développerons ces points dès le § 10.2.1 p. 287.

519. Nous y reviendrons au chapitre 11 (§ 11.3 p. 334)

gente des ressources (structure et compétences organisationnelles), et l'exploration des nouvelles voies qui rompent avec les routines établies » ; le couple participation / réification, qui « *conduit à s'interroger sur ce qui doit être réifié dans l'organisation (par exemple, des méthodes de gestion de projet, communes à tous les projets* [520]*) et sur le niveau souhaitable d'autonomie des acteurs* » ; le couple local / global concernant les interfaces entre les projets et le reste de l'organisation ; et le couple identification / négociabilité, au sens de l'identification des acteurs projets par rapport au « *maintien de zones d'incertitude et d'ambiguïté dans la définition des rôles des participants* ».

Nous retrouvons ces dilemmes, ou tensions dialectiques, ou couples paradoxaux, dans les cas décrits à la partie II. Ainsi du couple conçu / émergent, qu'évoque le cas n° 0, ainsi que les discussions sur la réorganisation de la Coordination technique au chapitre 5. Le couple participation / réification est illustré par les difficultés de déploiement de la procédure d'ECR au chapitre 8, et pose la délicate question de la marge de manœuvre des acteurs de la conception vis-à-vis de processus de gestion des données bien définis, déterministes, et vécus comme bureaucratiques et défavorisant la création. Le couple local / global et la question des interfaces organisationnelles a aussi à voir avec le périmètre des sous-projets et des acteurs d'interface, surtout dans des projets comme ATLAS qui multiplient les espaces locaux et les espaces globaux (comme l'illustrent le Tableau 6.1 p. 170 pour le cas des lattes, ou le modèle concentrique de la Figure 9.4 p. 275 pour le cas des pieds). Enfin, le couple identification / négociabilité est celui qui illustre, selon moi, la difficulté de positionnement des acteurs de la Coordination technique, dont le rôle est à la fois bien défini du point de vue structurel, et flou du fait qu'ils sont un « *management sans pouvoir* » condamnés à devoir convaincre de l'intérêt général des mesures qu'ils prônent.

Le dilemme programmé / innovant relevé aussi bien dans le chapitre 6 à propos des lattes que dans le chapitre 7 dans la révision du chargement des pieds participe de ces tensions dialectiques. Il est analogue au couple conçu / émergent. L'avancement du projet est une sorte d'adaptation mutuelle de la technique et de l'organisation, au sens que lui donne Leonard-Barton [1988] ou, de manière assez analogue, Roddier [2012, 52 et 118].

La « *tension essentielle* » a été présentée au chapitre 3 et illustrée aux chapitres 5 et 6, entre des physiciens centrés sur (pour ne pas dire obnubilés par) la performance, et des ingénieurs préoccupés (pour ne pas dire obsédés) par la faisabilité. Elle se recoupe en partie avec la dialectique entre, d'une part, les objectifs de conception, qui poussent à une optimisation de la fonction intrinsèque du composant, quitte à traiter avec désinvolture les interfaces, et, d'autre part, les objectifs de l'intégration, qui se soucient principalement de leur compatibilité avec les voisins, au détriment éventuel de ladite fonction. Cette tension pourrait se rapprocher du couple participation / réification de Martinet. Nous sentons toutefois les limites de cette approche binaire un peu systématique et opposante, avec sa logique de tiers exclus. C'est là que l'approche complexe va nous permettre d'élargir l'approche.

c. Les émergences d'organisations

L'émergence évoquée au chapitre 9 d'un espace projet incluant l'ensemble des acteurs nécessaires pour permettre la re-conception des pieds est un exemple de ces émergences d'organisations *ad hoc*. Elle a permis une adaptation aux évolutions du contexte, et une réouverture du champ de solutions à explorer, qui a sauvé le projet dans la crise qu'il a traversée en 2002. C'est un élément de réponse possible à la question de savoir « *comment intégrer dans les [organisations] les libertés et désordres qui peuvent apporter l'adaptivité et l'inventitivé, mais peuvent aussi apporter la décomposition et la mort* » [Morin 2005, 123]. La souplesse organisationnelle d'AT-

520. C'est l'une des missions du *Projects Support Office* du CERN, que j'ai rejoint début 2012.

LAS autorise ces émergences, et cela en fait un exemple d'une organisation complexe sans pour autant qu'elle s'assume ni même se considère comme telle [521].

L'organisation très structurée de la firme russe, héritée de la période soviétique – et peut-être plus ancienne encore, rappelons que la firme a été fondée au début du XVIII^{ème} siècle – n'était pourtant pas nécessairement au diapason. Au reste, l'ensemble du système industriel soviétique était très structuré, en particulier en raison de sa taille et de son importance. L'analyse suivante est très instructive, qui dresse le parallèle entre système industriel et système de R&D soviétique :

> *The Sovietic R&D system was developed according to a socialist "industrial organization" model, which explains its huge scale. It grew extensively when new sectors and research "plants" were established to solve new problems, especially under the numerous branch ministries. The main weaknesses of the R&D system were also the same as in industry: it was internationally isolated and domestically departmentalized in monopolistic and more or less closed entities. Communication, cooperation and also competition between the various units was hindered by many factors such as administrative barriers, overemphasized care for secrecy, political (and philosophical!) control and the formalized division of labour which was guided by official research programs and plans. Coordination and integration of different scientific and technological fields was up to the higher authorities; as a researcher you did better just to stick to your own piece of the given problem and not worry about the bigger issues.* [522]

En 2000-2002, nous sommes une dizaine d'années seulement après l'implosion du système soviétique. Les mentalités et l'organisation ont une constante de temps bien supérieure. L'évolution était suffisante toutefois pour que les équipes de la firme relèvent le défi d'entrer dans le jeu dynamique et stimulant de la révision des pieds. L'entrée en communication et en coopération, internationale de surcroît, a permis l'émergence de nouvelles formes d'organisation spontanées informelles.

d. Les effets multi-échelles

J'emploie ce terme d'effets multi-échelles à dessein pour souligner le continuum de complexité, et la circulation entre niveaux et degrés dans les projets. Il est impossible de découpler les problèmes.

L'on part du projet LHC, et même au-delà, avec les visions stratégiques à long terme sur l'avenir du CERN et de la physique des particules, en lien avec les conséquences toujours sensibles de l'implosion de l'Union Soviétique ou avec les interrogations sur l'avenir du Fermilab et de l'évolution de la *Big Science* aux États-Unis d'Amérique avec l'abandon du SSC fin 1993 (ou encore en mars 2012 la réticence à financer le projet *Long-Baseline Neutrino Experiment* [523]). Et l'on plonge jusqu'au fonctionnement des outils CAO et à leur paramétrisation fine permettant de modé-

521. Nous y reviendrons au § 12.1.2 p. 343.

522. « Le système soviétique de la R&D s'était développé selon le modèle de "l'organisation industrielle" socialiste, ce qui explique sa taille considérable. Il avait crû de manière extensive lors de l'établissement de nouveaux secteurs et de nouvelles "usines" de recherche dans le but de résoudre de nouveaux problèmes en particulier sous l'égide des nombreux ministères spécialisés. Les principales faiblesses du système de R&D étaient également les mêmes que celles de l'industrie : il était internationalement isolé et à l'intérieur du pays compartimenté en entités monopolistiques et plus ou moins fermées. La communication, la coopération mais également la compétition entre les différentes unités étaient entravées par de nombreux facteurs, tels que les barrières administratives, un souci du secret exacerbé, un contrôle politique (et philosophique !) et une division du travail formalisée qui était définie par les plans et les programmes de recherche officiels. La coordination et l'intégration des différentes disciplines scientifiques et technologiques se faisait au plus haut niveau des autorités ; en tant que chercheur, mieux valait se restreindre à sa propre partie d'un problème donné et ne pas se soucier de considérations plus larges. » [Kaukonen 1994, 28]

523. LBNE, « *Expérience sur les neutrinos sur configuration longue* » [Samuel Reich 2012].

liser des objets d'une précision du micron positionnés dans des ouvrages de génie civil de plusieurs dizaines de kilomètres (soit une étendue numérique de 10 ordres de grandeur !).

Et l'on parcourt par continuité organisationnelle toute une succession d'organes, le Conseil scientifique du CERN, le LHCC (comité scientifique de pilotage du projet LHC), puis l'*Executive Board* d'ATLAS, puis le TCSG (*Technical Coordination Steering Group*) et le TCMS (*TC Meets Systems*), puis les réunions internes aux systèmes, qu'elles soient plutôt managériales (*Muon Steering Group, Magnet Project Group*) ou de coordination (comme le *Muon Layout Meeting*), pour descendre jusqu'aux réunions du TIE (*Team for Integration and Engineering*), jusqu'aux discussions du Bureau technique et des autres bureaux d'études, puis aux séances de préparation technique des revues décrites par Lécaille (voir § 6.4 p. 160), pour enfin atteindre l'activité de conception des projeteurs sur leurs machines CAO, avec les problématiques spécifiques de modélisation, d'émergence et de représentation des solutions qui sont les leurs. Ne s'étend-on pas aussi, du point de vue organisationnel, sur 10 ordres de grandeur ? Les canaux parallèles sont extrêmement nombreux (et ici particulièrement tronqués, on n'en a évoqué qu'une seule modalité, celle de la conception mécanique). L'on voit que la circulation s'effectue entre tous ces niveaux de manière constante et couplée, avec l'impression de retrouver à chaque niveau des problématiques d'interfaçage et de management identiques, ou en tous cas analogues.

L'un des enjeux de notre modélisation systémique complexe en cours d'élaboration sera donc de conserver cette continuité lors du passage du micro (bien décrit par l'ethnographie) au macro (saisi essentiellement par le management stratégique, ou par l'histoire des sciences et des techniques), en passant par un niveau “méso” intermédiaire (le management de projet et le génie industriel étant sans doute les mieux équipés pour le décrire) [524]. C'est toutefois aux interfaces ou aux frontières, particulièrement floues, diffuses, épaisses et progressives en l'espèce, qu'il est nécessaire de maintenir la circulation des couplages entre niveaux.

∴

C'est un exercice lui-même complexe, et sans doute insoluble en soi, que d'énoncer les principes de la pensée complexe à partir des seules quatre catégories d'observations que nous venons de mettre en évidence : carence systémique, dilemmes, émergences et effets multi-échelles. Il nous faut préciser davantage ce qu'est la complexité, en nous appuyant sur les apports de la littérature. Nous sélectionnerons ensuite les principes complexes utiles pour étayer nos éléments de réponse à la triple question de recherche exposée au chapitre 3.

10.2 Qu'est-ce que la complexité ?

Dès le chapitre 2, nous avons parlé de complexité, nous avons présenté le CERN comme un système complexe, et nous avons mobilisé quelques concepts fondamentaux de l'approche systémique pour clarifier le propos. La complexité est également au cœur de notre troisième question de recherche, portant en particulier sur le niveau pertinent de modélisation complexe qu'il faut introduire pour saisir le caractère complexe des situations dans lesquelles évolue le manageur technique. Dans la section précédente, nous avons mis en évidence quelques principes qui semblent émerger du terrain.

524. Ces indications ne constituent pas un découpage systématique, et n'ont pour objet que de donner une idée de ce que recouvrent ces échelles en termes de disciplines académiques.

Répondre à la question "*Qu'est-ce que la complexité ?*"est probablement presque aussi délicat que d'aborder la question "*Qu'est-ce que la philosophie ?*", lancinante interrogation qui a peuplé les nuits de tant de penseurs, et produit tant d'ouvrages éponymes (Heidegger, ou Deleuze et Guattari, pour n'en citer que deux). J'avoue avoir abordé cette question de la complexité avec cette naïveté qui consiste à penser que l'on peut répondre simplement à cette question. Tel est en effet le paradoxe de la complexité qu'elle ne peut s'expliquer simplement, ce que nous illustrerons à la section suivante avec le cas d'Einstein, lui-même victime de ce paradoxe. La présente section pourrait à elle seule constituer une thèse en soi ; c'est dire si nous ne donnerons ici que les quelques éléments nécessaires à la poursuite du développement de notre propos. Après avoir présenté le paradigme systémique, nous ferons un survol de la littérature abondante sur la pensée complexe, et soulignerons par un exemple autour d'Einstein la difficulté intrinsèque de parler simplement de la complexité. Nous extrairons ensuite quelques principes séminaux de la pensée complexe pour structurer notre démarche de recherche.

10.2.1 Le paradigme systémique

L'approche systémique est en quelque sorte préalable et contingente à la pensée complexe. Le Tableau 10.1, adapté de Genelot [2011, 133-135] lui-même inspiré de Le Moigne [1990, chap. 1], résume les différences principales d'approches entre le paradigme systémique et la méthode analytique traditionnelle, dont la logique est décrite dès 1637 dans le *Discours de la méthode* de Descartes [525].

Préceptes de la méthode analytique	**Principes du paradigme systémique**
Précepte de l'*évidence* : il suffit qu'une chose se présente « *clairement et distinctement* » à l'esprit pour qu'elle soit vraie	Principe de *pertinence* : une représentation n'est pas vraie en soi, mais par rapport à l'intention de celui qui formule la représentation
Précepte de l'*analyse* : il faut diviser les difficultés en autant de parcelles qu'il est nécessaire pour les comprendre séparément	Principe de l'*approche globale des interactions* entre composantes d'un système
Précepte de la *structuration hiérarchisée* : on conduit la pensée de manière ordonnée en allant des objets les plus simples aux plus composés	Concept de *téléologie* : la finalité d'un système constitue l'essence même de sa dynamique, et non sa structure
Précepte de "dénombrement", ou d'*exhaustivité* : il ne faut rien omettre	Principe de la *rationalité limitée* : une représentation est une sélection d'agrégats tenus pour pertinents dans la situation à éclairer

Tableau 10.1 Comparaison de la méthode analytique et du paradigme systémique

(Petite parenthèse sur la filiation des idées. Le souci d'exactitude, que Le Moigne assume d'ailleurs explicitement, exige de souligner que c'est Bachelard le premier qui a travaillé cette différence :

> *La base de la pensée objective chez Descartes est trop étroite pour expliquer les phénomènes physiques. La méthode cartésienne est* réductive*, elle n'est point* inductive*. […] D'une manière générale, le simple est toujours le simplifié ; il ne saurait être pensé correctement qu'en tant qu'il apparaît comme le produit d'un processus de simplification.* [526]

525. Ce grand classique de la philosophie et son célébrissime *Cogito ergo sum* est accessible dans de nombreuses éditions, par exemple [Descartes 1996, 126-178].

526. *Le Nouvel Esprit Scientifique* [Bachelard 1934, 142-143], chapitre « Épistémologie non-cartésienne ». C'est lui qui souligne.

La problématique de la décomplexification évoquée au chapitre 3 est antérieure à l'émergence de la pensée complexe.)

10.2.2 La pensée complexe

Poursuivons avec la complexité. Celle-ci, nous prévient Paul Valéry, est un état de choses « *qui nous égare, nous interdit la moindre prévision, nous ôte toute possibilité de raisonner sur l'avenir* » [527]. La complexité est donc longtemps apparue comme un concept peu digne d'intérêt pour les scientifiques, dont la vocation est contraire. Bachelard appelle dès 1934 à voir la complexité de la science contemporaine comme un idéal :

> *Alors que la science d'inspiration cartésienne faisait très logiquement du complexe avec du simple, la pensée scientifique contemporaine essaie de lire le complexe réel sous l'apparence simple fournie par les phénomènes compensés* » [Bachelard 1934, 143].

C'est un véritable changement de paradigme.

Le développement de la pensée complexe s'adosse progressivement à l'épistémologie constructiviste déjà évoquée au § 4.1, et qui se pose en alternative à l'approche positiviste. Cette dernière fait reposer le savoir scientifique sur quatre conventions [528] : l'existence d'une réalité objective, d'une causalité selon des règles stables, d'une explication de la complexité qui serait réductible à ses parties, et enfin de la méthode hypothético-déductive. Campan [2002] note que l'alternative constructiviste est « *en relation avec une vision complexe et systémique de la réalité construite et subjective* » – ou plus exactement, selon moi, intersubjective. La causalité linéaire est remise en cause par la récursivité, et le réductionnisme est contesté par l'approche systémique et par l'auto-émergence de propriétés du tout qui ne sont pas contenues dans les parties du système.

Nous tenons là quelques grands principes de la pensée complexe. Le philosophe et sociologue Edgar Morin a abondamment travaillé ces principes dans sa monumentale *Méthode* en six volumes [Morin 2008]. Une version synthétique de sa pensée complexe est donnée dans une *Introduction à la pensée complexe* [Morin 2005] et dans *Science avec conscience* [Morin 1990]. L'ouvrage de Jean-Louis Le Moigne sur la *Modélisation des systèmes complexes* [Le Moigne 1999] est une approche sans doute plus abordables que la *Théorie du système général* [Le Moigne 1990] évoquée au chapitre 2, dont l'abord reste exigeant. Tenter de les résumer ici serait une gageure.

L'approche complexe a peu à peu touché un nombre considérable de domaines scientifiques et savants, comme en témoigne l'impressionnante bibliographie tant académique que plus accessible. Ainsi Urry [2005, 2] liste plus de cinquante ouvrages importants sur le thème et plus de 1200 au total, et il relève que même le domaine des sciences sociales produit de très nombreux livres, des articles – dont le séminal *Architecture of Complexity* de Simon [1962] –, des conférences et des ateliers sur la thématique. Outre les ouvrages de Morin et Le Moigne déjà cités et parfois éclairés par des travaux heuristiques [Fortin 2007, 2008] ou critiques [Jacob 2011] [529], je me suis appuyé (sans compter les articles) sur : des ouvrages pluridisci-

527. P. Valéry, *Regards sur le monde actuel*, in *Œuvres*, Pléiade, Gallimard, T. II, p. 1059.

528. Académie des sciences, rapport n°6, 1996. Cité par [Le Moigne 2004, 47].

529. Ouvrage en l'occurrence abusivement et inutilement critique, qui selon moi passe totalement à côté de son sujet, en adoptant en outre un ton polémique particulièrement épuisant. Prétendre que Morin est un chantre de "*l'écologie de l'inaction*" est le signe d'un contre-sens notoire. Considérer qu'il "*dérègle la méthode sociologique*", s'appuie sur une "*lutte des classes surannée*", propose une "*philosophie de salle d'attente*", se retrouve "*au fonds du puits*", se constitue en "*alibi du conservatisme*", ou encore qu'il prône "*une politique de décivilisation*" qui aboutit à "*l'esbrouffe institutionnalisée*", tout cela ne fait en rien avancer le débat scientifique. Un livre inutile, auquel je regrette déjà d'avoir consacré une si longue note.

plinaires [Benkirane 2006 ; Bourgine, Chavalarias et Cohen-Boulakia 2008] ; de philosophie [Wunenburger 1990 ; Besnier 2006] ; d'épistémologie [Axelrod 2000] et de sciences [Gell-Mann 1995] ; de sciences politiques [Innerarity 2006 ; Clemens 2001] ; et même d'architecture [Farel 2008] et de musicologie [Yves-Bonnet 2010]. En ce qui concerne les sciences sociales, le management [Avenier 2000 ; Massotte et Corsi 2006 ; Auger 2008 ; Genelot 2011] s'ajoute à la psychologie [Yatchinovsky 1999 ; Kourilsky-Belliard 2004]. On y ajoutera les publications du réseau « Intelligence de la complexité » [530], dont le fort utile *Agir et penser à la fois* [Genelot 2011], ou le dossier « *De la complexité restreinte à la complexité générale* » [531]. Nous ferons enfin une place à part à l'ouvrage consacré à ce remarquable outil transdiciplinaire que constitue la trialectique [Gigand 2010] [532].

Tous ces ouvrages ne sont pas d'égal intérêt pour nos questions, ni d'égale rigueur : certains se prêtent à de joyeuses envolées, d'autres s'attachent à identifier consciencieusement les principes de la pensée complexe ; cette multiplicité des approches montre la richesse du paradigme complexe, et permet de distinguer quelques invariants. Elle démontre assurément la dynamique d'un champ en développement, inachevée, et j'ose l'affirmer, inachevable par essence. La présente section ne saurait prétendre au statut d'étude bibliographique exhaustive ou systématique – ne serait-ce d'ailleurs pas en partie contradictoire avec le propos ?

Retenons des travaux de synthèse de Le Moigne [533] que le paradigme de la complexité émerge dans les années 1950 à partir des travaux conjoints de la théorie des systèmes et de la cybernétique, autour de la théorie de la communication de Shannon, de la théorie de la computation de Turing, de la théorie de la régulation intelligente et de la variété requise d'Ashby, de la théorie de l'intelligence artificielle de Simon et de Newell ou encore de la théorie du système général de von Bertalanffy. Le tout débouche sur l'approche dite de la "complexité organisée" et des premières théories de l'auto-organisation du bio-informaticien von Foerster et de l'anthropologue Bateson, pour ne citer que les principaux. Le paradigme systémique naît à l'interface d'un paradigme réductionniste de la simplicité qui, selon Le Moigne, se serait « *"compliqué" plutôt que complexifié* » et d'un paradigme holiste de la complexité désorganisée qui se serait « *"ordonné" plutôt que complexifié* », pour constituer enfin un « *paradigme de la complexité organisée* » [Weaver 1948].

Cette formulation donne l'occasion d'une distinction importante, entre *composé*, *compliqué* et *complexe*. L'étymologie de ces termes évoquée dans la partie I nous éclairera. Est *composé* ce qui n'est pas constitué d'un seul élément. La *complication* est de l'ordre de la redondance structurelle d'une configuration avec (*cum*) des plis (du latin *plico*, *-are*, *-atum* : plier). La complication, ainsi que les mots morphologiquement analogues (multiplication, duplication, réplication) participent de la série des simples plis et plissements, et même l'hyper-complication, c'est-à-dire l'accumulation considérable de complication, ne suffit pas à passer à la complexité. La modélisation de tels phénomènes est toujours possible, pour peu que l'on possède une capacité computationnelle suffisante : une théorie, une loi ou une structure invariante expliquent le comportement du phénomène et le rend prévisible.

La *complexité*, quant à elle, serait par opposition la caractéristique d'une situation dans laquelle le système est susceptible de manifester un comportement imprévisible pour l'observateur. C'est une configuration avec (*cum*) un nœud

530. http://www.intelligence-complexite.org/

531. « *Un 'nouveau commencement' : "De la complexité restreinte à la complexité générale". Quelles conséquences et quels projets pour l'enseignement formation, la recherche scientifique et les organisations, entreprises et administrations ?* » Dossier MCX XXI de mars 2006, coordonné par J.-P. Gaillard et M. Adam, non publié à notre connaissance.

532. Un nouvel ouvrage de Gérard Gigand, en collaboration avec le Pr Jean-Pierre Bréchet (IAE, Nantes), sera prochainement consacré à l'apport de la trialectique au domaine du management.

533. Son article *Complexité* in [Lecourt 1999, 205-215] constitue une excellente introduction.

(*plexus*), donc des entrelacements et des enchevêtrements. On dépasse le stade de la simple addition (ou même multiplication), au profit de l'*intrication* : est complexe ce qui est fait de composants étroitement liés. Ainsi que le formule Urry :

> *Complexity is not the same as simply complicated. Complex systems analyses investigate the very many systems that have the ability to adapt and co-evolve as they organize through time. […] Complexity investigates emergent, dynamic and self-organizing systems that interact in ways that heavily influence the probabilities of later events. Systems are irreducible to elementary laws or simple processes.* » [534]

Quant à Le Moigne, il résume l'enjeu de la modélisation d'un système complexe : « *La science occidentale […] tient les phénomènes pour réductibles à un modèle, éventuellement compliqué mais potentiellement simplifiable. On ne sera donc pas surpris de l'inadéquation des modèles du "compliqué" lorsqu'on les utilise pour représenter* a priori *les phénomènes perçus complexes. La simplification du compliqué appliqué au complexe a pour conséquence une aggravation de la complexité par mutilation et non par la résolution du problème considéré* » [Le Moigne 1999, 5]. C'est en particulier le cas lorsque l'on opère un découpage de système en arborescence de composants, ou un projet en arborescence de tâches [535].

Essayons de préciser davantage les choses, avec la proposition de définition de Law et Mol : « *There is complexity if things relate but don't add up, if events occur but not within the processes of linear time, and if phenomena share a space but cannot be mapped in terms of a single set of three-dimensional coordinates.* » [536] Cette acception renvoie à nouveau (comme lors de la contestation des quatre conventions positivistes) à quelques principes de base : la somme est plus que les parties, la causalité n'est pas linéaire, les phénomènes s'intriquent dans des espaces non cartésiens. On retrouve en définitive l'inspiration de Blaise Pascal dans ses *Pensées* :

> *Donc toutes choses étant causées et causantes, aidées et aidantes, médiatement et immédiatement, et toutes s'entretenant par un lien naturel et insensible qui lie les plus éloignées et les plus différentes, je tiens impossible de connaître les parties sans connaître le tout, non plus que de connaître le tout sans connaître particulièrement les parties.* [537]

Cette citation, très commentée par Morin comme par Le Moigne, montre en effet une position en rupture avec l'approche analytique cartésienne telle que décrite dans le Tableau 10.1 sur le paradigme systémique. Ainsi que le formule Besnier :

> *Selon le* Discours de la Méthode, *l'indice qu'un phénomène est compris consiste dans la restitution de l'ensemble qu'il forme par recomposition de ses éléments simples. Si la totalité peut excéder la somme des parties, c'est que le mécanisme doit dépasser le simple terrain analytique. En disant cela, on restera dans le cadre de la science, d'une science non cartésienne telle que Bachelard [dans* le Nouvel Esprit Scientifique*] la désire.* [Besnier 2006, 248]

534. « La complexité, ce n'est pas être simplement compliqué. Les analyses de systèmes complexes enquêtent sur les très nombreux systèmes qui ont la capacité de s'adapter et de co-évoluer lorsqu'ils s'organisent avec le temps. […] La complexité enquête sur des systèmes émergents, dynamiques et auto-organisateurs qui interagissent selon des modes qui ont une forte influence sur les probabilités des événements ultérieurs. Les systèmes ne sont pas réductibles à des lois élémentaires ou de simples processus. » [Urry 2005, 3]

535. Nous y reviendrons dès le § 11.3 p. 334.

536. « La complexité apparaît lorsque les choses sont liées mais qu'elles ne s'ajoutent pas les unes aux autres, lorsque les événements surviennent mais pas selon des processus temporels linéaires, et lorsque des phénomènes se partagent un espace mais qu'ils ne peuvent pas être repérés au moyen d'un ensemble unique de coordonnées tridimensionnelles ». [Law et Mol 2002, chap. Introduction]

537. Blaise Pascal, *Pensées diverses*, XXXI, Édition de Port-Royal, 1670, p. 322. La pensée qui contient cet extrait porte le n° 66 selon le classement dit de Brunschvicg, et le n° 199 dans l'édition Lafuma.

Il s'agit alors, comme nous l'avons relevé plus haut, de dépasser la question de l'opposition entre holisme [538] et réductionnisme [539]. Morin précise qu'il ne s'agit pas « *d'opposer un holisme global en creux au réductionnisme mutilant ; il s'agit de rattacher les parties à la totalité. Il s'agit d'articuler les principes d'ordre et de désordre, de séparation et de jonction, d'autonomie et de dépendance, qui sont en dialogique* [540] *(complémentaires, concurrents et antagonistes) au sein de l'univers.* » [Morin 1996]

Se pose également la question de la mesure de la complexité. Nous ne l'aborderons pas, non pas par omission, mais parce qu'elle ne se situe pas dans l'axe de nos questions de recherche, essentiellement qualitatives. Citons les approches par la complexité computationnelle de Kolmogorov. Dans le domaine du génie industriel, nous avons cité au début du chapitre les contributions de Weber [2005], l'une des rares à notre connaissance à faire le lien de manière pertinente entre la pensée complexe et ce domaine du génie industriel [541].

Toutes ces considérations théoriques, philosophiques, historiques et épistémologiques sur la complexité constituent un immense champ d'investigation et de recherche. La littérature offre pléthore de contributions. On retiendra par exemple le remarquable travail de recension systématique de Couture [Couture 2007a ; Couture et Valcartier 2007 ; Couture 2007b, 2007c], qui constitue une mine encore à exploiter. Il nous faut ici mettre un terme provisoire à ces considérations qui nous emmèneraient trop loin, et tenter d'en tirer quelques principes séminaux.

10.2.3 Einstein et le paradoxe de la complexité

Revenons d'abord à la question de la simplification et de la décomplexification, que j'illustrerai par le paradoxe de la complexité avec lequel Einstein fut aux prises. On attribue à Einstein la phrase suivante :

> *Make things as simple as possible, but not simpler.* [542]

Cette section, en forme d'intermède non dénué toutefois d'enseignements, se consacre à une brève étude de la manière dont une telle affirmation sur la complexité peut se retrouver déformée par excès de simplisme. Elle illustre ce que j'appelle le *paradoxe de la complexité*, selon lequel il est impossible de l'expliquer simplement sans en perdre la nature intrinsèque. C'est pourtant ce qui est survenu à cette affirmation d'Einstein, qui est purement et simplement, si j'ose dire, outrageusement simplifiée : l'on en fait souvent le porte-étendard du paradigme de la complexité, quand il n'est qu'un aphorisme assez répandu [543], fort joli au demeurant, mais qui distord le propos, et se retrouve à la limite de l'apocryphe dans sa formulation. C'est donc du trompe-l'œil : la complexité, ce n'est pas si simple !

J'ai retrouvé la citation d'Einstein qui a inspiré cette citation, et je suis en mesure d'affirmer qu'en effet il n'a rien écrit de tel. Ce qu'il écrit de plus approchant, en 1934, est la phrase suivante :

538. Le *holisme* (du grec *holos*, l'entier), parfois appelé *globalisme*, est un système de pensée pour lequel les caractéristiques d'un système ne peuvent être connues que lorsqu'on le considère et qu'on l'appréhende avec l'ensemble de son environnement, dans sa totalité. Ainsi, un système est déterminé par le tout dont il fait partie.

539. Le *réductionnisme* est la position qui consiste à connaître les propriétés d'un tout uniquement par la connaissance des propriétés de ses constituants.

540. Nous développerons ce concept de dialogique au § 10.4 p. 297.

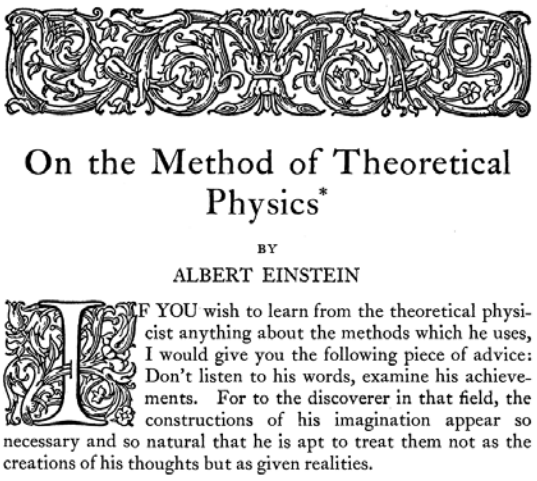
541. Nous avons évoqué au § 2.2 p. 45 les travaux sur la complexité des projets [Vidal et Marle 2008].

542. « Faites les choses aussi simplement que possible, mais pas plus simplement. »

543. Pour la petite histoire, je l'ai découvert inscrit sur une petite plaque dans… un ascenseur d'hôtel. Il faut dire qu'il s'agissait de l'*Albert Hotel*, à Riga (Lettonie).

> *The basic concepts and laws which are not logically further reducible constitute the indispensable and not rationally deducible part of the theory. It can scarcely be denied that the supreme goal of all theory is to make the irreducible basic elements as simple and as few as possible without having to surrender the adequate representation of a single datum of experience.* [544]

Évidemment, c'est moins percutant que l'aphorisme initial. Et la compréhension de ce texte nécessite en effet quelques explications. Cet extrait se trouve en fait à la page 165 d'un article de nature épistémologique consacré à la méthodologie de la physique théorique [545]. Il reproduit le texte d'une conférence qu'Einstein a donnée à Oxford le 10 juin 1933 dans le cadre des *Herbert Spencer Lectures*. La Figure 10.2 reproduit son (très élégant) frontispice. Cet article en général, et cet extrait en particulier, concernent la constitution d'un corpus de principes de base d'une théorie physique. Le contexte épistémologique est donc extrêmement précis et circonscrit. À partir de ce positionnement dûment étayé et prudent concernant la démarche intellectuelle permettant de construire méthodiquement les éléments de base logiquement suffisants d'une théorie physique, en déduire une paraphrase du type « *Make things as simple as possible, but not simpler* », ou encore, comme on le trouve parfois, « *Everything should be made as simple as possible, but no simpler* », est donc hautement contraire au principe même invoqué par la phrase : c'est exagérément simplificateur – et abusivement généralisé.



On the Method of Theoretical Physics*

BY

ALBERT EINSTEIN

IF YOU wish to learn from the theoretical physicist anything about the methods which he uses, I would give you the following piece of advice: Don't listen to his words, examine his achievements. For to the discoverer in that field, the constructions of his imagination appear so necessary and so natural that he is apt to treat them not as the creations of his thoughts but as given realities.

Figure 10.2: Frontispice de l'article d'Einstein [1934]

Certains commentateurs [546] y ont vu un principe très semblable à celui du "rasoir d'Occam" qui invite à supprimer toute hypothèse non nécessaire à l'établissement d'un raisonnement. Rebaptisé "rasoir d'Einstein", il est alors invoqué lorsque le recours au rasoir d'Occam mène à des explications simplifiées à l'excès conduisant à une conclusion erronée. La première occurrence relevée de ce rasoir d'Einstein semble dater de 1950, lorsque Roger Sessions écrit dans le *New York Times* du 8 janvier : « *I also remember a remark of Albert Einstein, which certainly applies to music. He said, in effect, that everything should be as simple as it can be, but not simpler.* » [547] Le *Time magazine* du 14 décembre 1962 popularise l'expression dans son excès de simplicité : « *We try to keep in mind a saying attributed to Einstein—that everything must be made as simple as possible, but not one bit simpler.* » [548] Ou comment

544. « Les concepts et les lois fondamentales qui ne sont pas davantage réductibles par la logique constituent la partie de la théorie indispensable et non rationnellement déductible. Il paraît difficile de nier que le but ultime de toute théorie est de faire en sorte que les éléments de base soient aussi simples et aussi peu nombreux que possible sans que l'on ait à renoncer à expliquer de manière adéquate une seule donnée d'expérience. »

545. "On the Method of Theoretical Physics", *Philosophy of Science*, Vol. 1, N° 2 (April 1934), p. 163-169 [Einstein 1934]. Disponible en ligne, http://www.jstor.org/pss/184387.

546. http://www.thefullwiki.org/Albert_Einstein.

547. « Je me souviens d'une remarque d'Albert Einstein qui s'applique sans aucun doute à la musique. Il a dit en effet que tout doit être aussi simple que possible, mais pas plus *simple*. »

548. « Nous devons essayer de garder à l'esprit un proverbe attribué à Einstein – selon lequel tout doit être fait aussi simplement que possible, mais pas d'un chouïa plus simplement. »

passer de considérations sur les caractéristiques des éléments fondamentaux d'une théorie de physique à une sorte de théorie du Tout englobante.

Alors, ne jamais sur-simplifier ? C'est pourtant ce dont Einstein a été victime, de manière paradoxale. Veillons à ne pas être victimes de tels dérapages.

10.3 Fécondité de l'approche par la pensée complexe

10.3.1 Trois principes séminaux

Dans la première section de ce chapitre, nous avons relevé dans les cas étudiés quatre manifestations de l'émergence du complexe. Nous avons ensuite traversé le champ de la pensée complexe pour y déceler les principes qui nous permettraient de catégoriser ces manifestations. La littérature propose plusieurs ensembles axiomatiques (si tant est que pareille définition s'applique ici) de la pensée complexe, contenant un nombre variables de principes. Genelot [2011, 229 sqq.] exhibe dix principes pour une organisation fondée sur la pensée complexe. Morin [1996, 122] annonce « *huit principes-guides* [549] *pour penser la complexité, complémentaires et interdépendants* » : systémique, ou organisationnel ; de la boucle rétroactive ; de la boucle récursive ; d'auto-éco-organisation ; dialogique ; hologrammique ; et enfin, principe de « *réintroduction du sujet connaissant dans la connaissance* » [550]. Le Moigne, quant à lui, en déploie douze, plus un treizième qu'il qualifie de « *Méta Principe* », celui de « *l'Unitas multiplex organisationnel* » [Le Moigne 2009, 40]. La place nous manque pour en recenser la richesse et la complexité, objet de débats et de développements toujours actuels.

Nous retiendrons trois [551] de ces principes, deux d'entre eux étant promus par Morin lui-même comme les plus centraux [2005, 98-101] : le principe *dialogique*, le principe *d'auto-éco-organisation*, et le principe *hologrammique* (qu'il avait initialement intitulé hologram*ma*tique). La prochaine section exposera la voie selon laquelle seront développés ces principes.

Nous proposons au Tableau 10.2 une correspondance purement indicative avec les observations de terrain – en gardant à l'esprit que les trois principes sont liés entre eux, et que les frontières sont donc nécessairement floues.

Manifestations du complexe dans les cas	**Principes de la pensée complexe**
Dilemmes	Principe dialogique
Émergences d'organisation	Principe d'auto-éco-organisation
Effets multi-échelles	Principe hologrammique

Tableau 10.2 Correspondance indicative entre observations et principes

Quelle est l'utilité de recourir à ces principes ? En quoi l'approche complexe est-elle féconde ? Horgan [1995] avoue sa perplexité face à la complexité. Au fil d'une argumentation épistémologiquement nourrie [552], Farouki affirme qu'il sera « *probablement à tout jamais impossible de faire [des systèmes complexes] – autrement que d'une*

549. Il n'en fournit finalement que… sept. C'est dire si ce nombre n'a rien d'absolu.

550. Ce principe extrêmement important est sous-jacent à toute la démarche réflexive que je me suis attachée à mettre en valeur au cours du chapitre 4, où j'expose la méthodologie suivie dans cette thèse.

551. L'intérêt du nombre trois n'est pas uniquement de pure forme (qu'imposerait la taille de la matrice que nous souhaitons élaborer). Nous verrons d'ailleurs au § 11.1.3 p. 311, ainsi qu'avec Gigand au chapitre 16, quelques raisons théoriques pour se limiter à ce nombre.

552. Ce qui n'est pas le cas des développements polémiques de Jacob évoqués dans la note 529.

manière partielle et approximative – de véritables objets de science » [553] et nie donc à la complexité toute possibilité de se poser en explication scientifique. Ce n'est pas le lieu ici de souligner les limites de son raisonnement ; et plutôt que de jouter sur ce terrain, je me contenterai de mettre en œuvre la complexité. Montrer son opérationnalité n'est certes pas affirmer sa scientificité – c'est à tout le moins en souligner la fécondité.

Quelques tentatives d'exploiter la fécondité de l'approche par la pensée complexe et la systémique ont précédé la mienne dans le domaine du génie industriel : l'on pense ici par exemple aux SCOS' (*Systemics for Complex Organisational Systems*) [Bocquet et al. 2007]. Il y est procédé à une application très topologique des travaux de Le Moigne par organisation en pôles des fonctions de l'entreprise, qui ne me paraît pas être de nature véritablement systémique ; et il semblerait qu'il faille les classer dans la catégorie de ce que ce dernier qualifie (un peu méchamment, assurément) d'« *ornière de la démagogie pédagogique* » [Le Moigne 2010, 1].

Le cadre méthodologique rappelé par Avenier [2009] pour la construction de savoirs scientifiques pertinents pour l'action affirme qu'il est possible de concilier ces deux caractéristiques de scientificité et de fécondité. Il reste néanmoins du travail pour le chercheur : une « *absence de théories de moyenne portée (Merton, 1957)* [554] *concernant la conception de méthodes de management complexes, destinées à aider les entreprises à affronter la complexité de leurs environnements internes et externes* » [Avenier 2009, 197]. Elle rapporte que les manageurs impliqués dans son étude pensent que « *seule la complexité peut aider à composer avec la complexité* » [*in ibid.*, 201]. Je suis en accord avec ce constat. C'est pourquoi je relève ce défi de composer avec la complexité en une forme que j'expose maintenant, afin de tenter d'élaborer des éléments d'une telle méthode de management complexe. Morin n'a-t-il pas affirmé que « *la pensée complexe est donc essentiellement la pensée qui traite avec l'incertitude et qui est capable de concevoir l'organisation* » [Morin 1996, 123] ?

10.3.2 Élaboration matricielle d'un tissu complexe

L'idée de l'intrication des trois chapitres 10 à 12 est de donner la forme familière d'une matrice 3x3 à l'élaboration progressive de notre triple réponse à la triple question de recherche. Nous nous appuyons sur les principes de la pensée complexe et systémique retenus précédemment : principe dialogique, principe hologrammique, et principe d'auto-éco-organisation. L'objectif global de ces trois chapitres est, en guise d'éléments de réponses aux questions de recherche, d'élaborer un modèle du manageur technique complexe et de ses modes d'action, et un modèle de processus de collaboration complexe.

Quelques précautions méthodologiques s'imposent : le caractère complexe de cette construction est là pour nous rappeler les multiples couplages, et il a ses propres limites. D'une part, les questions de recherche ne sauraient strictement se cantonner à leur ligne propre : nous avons souligné au § 3.5 p. 96 la manière dont ces trois questions s'appellent les unes les autres dans une combinatoire récursive. Et d'autre part, si les apports des principes de complexité retenus apparaissent comme les dominantes respectives de chaque chapitre, cela ne les empêche nullement d'apparaître dans les autres : les frontières ne sont ici ni statiques ni étanches. Au reste, on aurait tout aussi bien pu retenir d'autres principes. Et puis. en définitive, tout ceci n'est pas fondamental puisque ces principes sont tous interdépendants et qu'ils requièrent de la souplesse et de l'agilité dans leur compréhension et leur application. Nous avons par ailleurs assumé au chapitre 4 une approche trans-

553. « *La complexité : une théorie scientifique ou un mythe moderne ?* », texte non publié, disponible sur http://www.homo-rationalis.com/texte.php?idte=39 [consulté le 05.06.2010].

554. La référence exacte semble être plutôt [Merton 1949].

disciplinaire. Cette porosité des frontières en sera, ici comme ailleurs, une possible opérationnalisation. D'ailleurs, la construction matricielle contient en elle-même ses propres espaces d'échanges et de bouclages. Notre matrice est un creuset, recevant tour à tour et sans toujours en réclamer explicitement l'origine, les contributions diffuses des sciences sociales et des études des organisations, du management en particulier de projet, du génie industriel bien entendu, de la sociologie, voire des sciences politiques et de la philosophie. Je solliciterai naturellement un certain nombre de cadres et d'outils théoriques existants, dont quelques-uns reprennent les fils tissés au cours de la collaboration 3S/Cristo (§ 1.3 p. 36).

Chacune des cellules de la matrice complexe n'est donc pas indépendante des autres : elle contribue au tout dont elle constitue une partie, chaque partie étant elle-même explicitée par le tout duquel elle participe – une signature de la complexité. Une autre de ces signatures serait l'auto-émergence de nouvelles propriétés : peut-être le modèle proposé contribuera-t-il à mettre au jour des ouvertures possibles, et que les rapprochements ainsi suggérés sauront, c'est mon espoir, en susciter d'autres auxquels je n'aurai pas songé au préalable. Il faut toutefois garder à l'esprit – et c'est aussi l'une de ses difficultés cognitives pour celui qui tente de la mettre en œuvre – que la modélisation systémique n'est qu'une méthodologie de représentation opérationnelle (à des fins d'actions), posant d'emblée qu'une connaissance exhaustive n'existe pas, et acceptant des lacunes. Par conséquent, ses représentations ne sont en soi ni vraies ni fausses ; elles se veulent utiles pour l'action future, permettant une certaine prédictibilité, ou bien si elles ne le sont pas, elles sont inutiles : elles sont donc contingentes de leur évaluation *a posteriori*.

10.3.3 Constitution de la matrice méthodologique

Reprenons les trois questions de recherche telles que résumées au chapitre 3, qui constitueront les trois lignes de la matrice après que, de manière purement formelle, on les aura renumérotées en commençant par la question sur l'approche par la complexité. Question n° 1 : la modélisation complexe. Question n° 2 : le rôle du manageur technique. Question n° 3 : le processus de conception / intégration. Une fois ces questions croisées avec les trois dominantes constituées des principes de la complexité retenus, il est aisé de bâtir un tableau qui représente notre matrice (Tableau 10.3), chaque case constituant une cellule de la matrice, numérotée c_{ij} selon la manière conventionnelle en algèbre matricielle.

QR	Dominante 1	Dominante 2	Dominante 3
QR1	c_{11}	c_{12}	c_{13}
QR2	c_{21}	c_{22}	c_{23}
QR3	c_{31}	c_{32}	c_{33}

Tableau 10.3: Matrice croisant dominantes complexes et questions de recherche

La diagonale (Tableau 10.4) contient des cellules qui sont le produit de la résonance entre la dominante et la question de recherche, nous les qualifierons de majeure. Les termes non-diagonaux de la matrice représenteront des couplages dits mineurs [555]. Ces dénominations ne portent aucun jugement de valeur sur l'mportance du contenu effectif de la cellule, mais uniquement sur l'intensité du couplage avec la dominante du chapitre en termes de principe complexe. Chaque case du tableau correspondra à une section de chaque chapitre. Ces cellules seront d'in-

555. L'on pourrait étendre la lecture de cette présentation matricielle en disant que l'approche analytique, ou réductionniste, ou non transdisciplinaire, est une approche qui consisterait à négliger les termes non-diagonaux de la matrice. Mais faute d'étayer davantage, je ne pousserai pas l'analogie plus loin.

égale importance, tout en apportant chacune leur touche à l'ensemble. À la fin du chapitre 12 (§ 12.4 p. 365), nous proposerons une version complétée du tableau contenant quelques mots-clé pour chaque case de la matrice.

Question de Recherche	Dialogique (chap. 10)	Hologrammique (chap. 11)	Auto-éco-organisation (chap. 12)
Modélisation complexe	*Majeure*	*Mineure*	*Mineure*
Rôle du manageur technique	*Mineure*	*Majeure*	*Mineure*
Processus de conception / intégration	*Mineure*	*Mineure*	*Majeure*

Tableau 10.4: Élaboration matricielle du tissu complexe : matrice méthodologique

La matrice n'est pas symétrique, et le tableau se lira aussi bien verticalement (ce qui correspond au déroulé de l'écriture linéaire des chapitres de la partie III, colonne par colonne) qu'horizontalement : on y trouvera alors les éléments de réponse à chaque question de recherche, consolidés et noués selon ce procédé de tissage. Nous espérons, ainsi tant dans le fond que dans la forme, exprimer le caractère couplé, récursif, en interrelations, en un mot *complexe*, de ces éléments de réponse.

Sur la première ligne de la *modélisation complexe* seront ainsi insérés les principes complexes observés sur le terrain et mis en évidence au § 10.3.1. Ces principes seront répartis dans chaque chapitre. Les principes dominants retenus seront complétés par d'autres apports tant de la pensée complexe que de la systémique, là encore sans prétention à une exhaustivité inatteignable : l'incomplétude est inhérente aux systèmes complexes.

Sur la deuxième ligne du *rôle du manageur technique* s'élaborera peu à peu le modèle de l'acteur d'interface comme enrichissement du modèle concentrique proposé au chapitre 9, en introduisant une représentation des interfaces par une maille à trois pôles. Les propriétés de ce modèle interfacial par transactions et traductions seront essentiellement développées dans la deuxième cellule majeure au § 11.2, et complétées par la notion d'espace d'échanges et d'acteur-frontière au chapitre 12.

Le long de la troisième ligne, le *processus de conception / intégration* sera progressivement élaboré, dans un premier temps comme la convergence dialogique d'une dynamique de différenciation des composants et d'une dynamique d'intégration de ces composants. Nous introduirons la constitution en réseau d'interfaces entre composants (§ 11.2.3), pour ensuite développer le processus dans la troisième cellule majeure au § 12.3, en instrumentant l'exploitation des espaces d'échanges entre les différents acteurs obtenus à partir du modèle interfacial de la deuxième ligne. C'est essentiellement cette troisième ligne qui fera l'objet d'une opérationnalisation à la partie IV.

J'ai été tenté un temps de superposer à cette construction complexe les enseignements des cas, et en particulier les trois degrés d'action du manageur technique présentés au § 9.2. Il se révèle à l'usage qu'une telle approche est à la fois réductrice et source de confusion ; c'est pourquoi j'y renonce de manière formelle, sans toutefois la perdre de vue dans certains développements (en particulier ceux de la cellule c_{21} au § 10.5). Constituons maintenant la matrice sans chercher outre mesure à la présenter, en évitant de nous enfermer inconsidérément dans le formalisme (voir le chapitre 0, § 0.5 p. 21).

Rappelons également, en préalable à ce déploiement de la matrice, le principe selon lequel *le réel est toujours plus complexe qu'il nous semble, même en tenant compte*

du fait que le réel est toujours plus complexe qu'il nous semble [556] ; cet avertissement est un excellent stimulant pour s'attacher à élaborer avec modestie des modèles complexes permettant la construction de quelques savoirs actionnables. Chemin faisant, nous serons plus à même d'en évaluer la pertinence.

∴

Les trois dernières sections du chapitre vont nous permettre de remplir la première colonne de la matrice, et de donner à voir la fécondité de l'approche par la pensée complexe à partir de la première thématique complexe, le principe *dialogique*.

10.4 Cellule majeure c_{11} : une boucle dialogique

Le concept de dialogique a été élaboré par Edgar Morin (le terme apparaît pour la première fois, sauf erreur, dans la première édition de *Science avec conscience* en 1982). Il exprime la fusion en une « *unité complexe entre deux logiques, entités ou instances complémentaires, concurrentes et antagonistes* » [Morin 2008, Lexique, 2432], sans que leur dualité ne se perde ou ne s'évanouisse dans cette unité. La dialogique est le principe qui, contrairement à la dialectique, permet d'associer des logiques différentes dans un principe qui n'absorbe pas leurs identités ou leur originalité.

Grâce à ce principe, la pensée complexe se trouve en mesure de penser la contradiction entre logiques au sein du réel [557]. La pensée classique, quant à elle, esquive cette contradiction de trois manières possibles : ou bien elle dissout cette contradiction par une simplification du réel (une sorte de fuite en avant, un déni de la complexité de la réalité) ; ou bien elle opère une synthèse dialectique, au sens hégélien du terme [558], dont la teneur n'est rien de plus que l'élimination de la contradiction, donc de la diversité ; ou bien encore, elle s'isole ou s'enferme dans l'une des logiques à l'exclusion des autres.

L'objet ici n'est pas de proposer une recension critique et philosophique du concept de dialogique [559] ; il est de l'utiliser pour élaborer la première cellule de

556. Voir l'Introduction à la partie II, p. 117.

557. Une approche qui est dans l'esprit de celle du philosophe grec Héraclite, avec la dynamique de ses « *tables des contraires* ».

558. La *dialectique* est à l'origine l'art de la dispute, pratique politique propre à la cité grecque. La dialectique hégélienne, du philosophe allemand Georg W. F. Hegel, est ce processus (bien connu, et souvent perverti) de la thèse / antithèse / synthèse : une contradiction motrice qui conduit au dépassement de soi par opposition à soi-même, contradiction qui se résout par une union dans une catégorie supérieure. La plus célèbre est la dialectique du Maître et de l'Esclave (voir le chapitre IV de la *Phénoménologie de l'esprit*). Nous n'évoquerons pas la dialectique matérialiste de Marx – encore qu'elle aurait peut-être à nous apprendre sur la philosophie implicite de management du complexe industriel russe fabricant des pieds d'ATLAS ?

La différence principale entre la *dialectique* hégélienne et la *dialogique* de Morin réside entre autres, et de manière schématique, dans le fait que la dialectique s'appuie sur les principes de la logique (et en particulier la non-contradiction, l'identité et le tiers-exclu) et aboutit à un troisième terme stable qui dépasse les termes dont il est issu ; tandis que la dialogique repose justement sur la coopération, dans un même système, de logiques différentes, voire contradictoires, et demeure en perpétuel ajustement dynamique.

559. Mentionnons que le concept de *dialogique* apparaît initialement dans le champ de la théorie littéraire, en particulier dans les travaux du russe Bakhtine. Il désigne alors le principe selon lequel se structurent les différentes voix narratives, parmi lesquelles celle de l'auteur n'aurait pas plus d'autorité que celle de ses héros : « *l'auteur tient dans le dialogue un rôle d'organisateur et de participant* » [Bakhtine 1929, 87]. Cette approche intersubjective exprime qu'il est des explications du monde qui émergent dans la zone de contact entre des consciences multiples ; ce qui (nous le verrons au chapitre 12) n'est pas sans présenter des analogies avec la façon dont nous convoquons le principe dialogique de Morin. Ainsi, Todorov relève que « *la vérité ne naît pas dans la tête d'un individu, mais entre des personnes qui sont collectivement en quête de la vérité, dans le processus de leur interaction dialogique* » [Todorov 1981, 149]. Le domaine des études des

notre matrice, ce tout premier pas vers notre modèle du manageur technique et du processus de conception/intégration. C'est donc volontairement – et il en sera de même par la suite pour les autres principes – que j'en allège ici la présentation. À la crainte d'alourdir, je préfère le risque de l'ellipse et renvoie aux œuvres de ces géants sur les épaules desquels nous nous trouvons juchés.

Un exemple de dialogique qui se rapporte à notre contexte est celui de la relation entre les deux expériences sœurs du LHC au CERN : ATLAS et CMS. Ces deux expériences exploitent toutes deux les collisions produites par le LHC, et visent des objectifs scientifiques identiques. Elles entretiennent donc des relations particulières, faites à la fois de concurrence (sur les ressources, sur les résultats) et de coopération (projets de R&D communs, et surtout nécessité scientifique) :

> *La réalité organisationnelle actuelle tend à mixer les comportements coopératif et concurrentiel. C'est vrai aussi dans le champ de la recherche scientifique où, hormis les logiques coopératives nécessaires à la réalisation de certains projets de recherche, la dimension concurrentielle entre les acteurs en interaction (chercheurs individuels, laboratoires et équipes de recherche, projets…) se manifeste, tant en termes de ressources à convoiter et à acquérir (*inputs*) que de résultats à produire et à valoriser dans une logique de visibilité (*outputs*). Ces deux éléments de dynamique interorganisationnelle sont, à notre sens, indissociables. Cette idée est mise en évidence notamment à travers la notion de « coopétition »*. [Yami, Nicquevert et Nordberg 2006]

Cette notion de *coopétition*, mot-valise construit sur les termes *coopération* et *compétition*, est apparue au milieu des années 1990 [Nalebuff et Brandenburger 1997]. Suivant les travaux en management stratégique [Yami et Le Roy 2007], nous avons proposé une relecture fondée sur la théorisation des stratégies collectives proposée par Astley et Fombrun [1983], et nous avons conclu avoir affaire à une « *stratégie collective agglomérée* » [Yami, Nicquevert et Nordberg 2006, 198]. Dans le cas des expériences du LHC, ATLAS et CMS sont en concurrence pour les ressources aussi bien du CERN que des instituts membres de chaque Collaboration – le comble étant sans doute atteint avec l'équipe du CEA de Saclay, dont certains membres rencontrés aux chapitres 6 et 7 travaillaient simultanément pour la conception du toroïde d'ATLAS et pour celle du solénoïde de CMS. L'enjeu est également de détecter et d'analyser, puis de publier le premier les résultats par exemple sur l'existence et la valeur de la masse du boson de Higgs [560]. Et d'un autre côté, quelle que soit la première des deux collaborations qui publiera en premier, sa découverte sera validée uniquement si *l'autre* collaboration est également en mesure de corroborer cette découverte [561]. Le concurrent n'est donc pas un adversaire mais aussi un allié, car la primauté de l'un dépend non seulement de ses capacités intrinsèques de découverte qui doivent être les meilleures, mais aussi de celles de l'autre qui doivent être suffisamment bonnes. C'est en ce sens que nous considérons les deux expériences ATLAS et CMS comme étant en "coopétition".

Je propose ici une autre théorisation, qui illustre le principe de dialogique : la coopétition est la dialogique de la compétition et de la coopération. L'association de ces deux notions contradictoires est assumée par cette dialogique, et permet de concevoir un même phénomène complexe : la coopétition est *à la fois* de la compétition *et* de la coopération, et davantage que cela. Chaque expérience est séparée et autonome, tout en faisant partie de deux continuités inséparables, le domaine de la

organisations a par ailleurs récemment exploité ce concept à travers « *l'enquête dialogique* » [Lorino 2009 ; Lorino, Tricard et Clot 2011].

560. Voir le chapitre 2, en particulier la note n°67 p. 51.

561. Voir le § 2.5.2 p. 58. En l'occurrence (note ultérieure de l'été 2012), la découverte puis la publication furent simultanées pour les deux expériences.

physique des particules d'une part, et le CERN de l'autre. En compétition fonctionnelle (choix de l'architecture et du type d'aimant : toroïdal ou solénoïdal pour le spectromètre à muons, à argon liquide ou à cristaux pour la calorimétrie électromagnétique) et téléologique (primauté de la découverte), elles sont en collaboration ontologique (même laboratoire-hôte, même structure organisationnelle globale, même plafond de budget) et génétique (même comité d'évaluation, même hiérarchie dans l'organisation surjacente de la division de physique). Et à l'inverse, en compétition génétique (partage des ressources) et ontologique (rôle de la Coordination technique, davantage en recherche de consensus dans le cas d'ATLAS – en tous cas jusqu'en 2001 – , et plus coercitive dans celui de CMS), elles sont en collaboration téléologique (nécessité de corroboration mutuelle des résultats) et fonctionnelle (programmes communs de R&D sur les détecteurs, sur l'électronique rapide, sur la grille informatique). La pensée complexe assume dialogiquement les deux termes de compétition et de coopération qui tendraient à s'exclure l'un l'autre, les dépasse et les inclut à la fois.

Dans son "Introduction" à *La Méthode*, la notation qu'utilise Morin pour exprimer graphiquement la relation dialogique est celle reproduite à la Figure 10.3 :



Figure 10.3: Représentation graphique de la relation dialogique dans *La Méthode* de Morin (1977, 2008a)

Cette notation disparaît ensuite au fil des tomes, la dernière occurrence que j'en ai relevée se trouvant au tout début du tome 4 avec une dialogique "produit / producteur" [Morin 1991, 21, 2008, 1576]. La portée sémiotique de cette flèche qui « *noue le double mouvement* » [562] est pourtant fondamentale. Elle montre en effet une boucle, c'est-à-dire l'expression visuelle de la dépendance circulaire entre les termes, ainsi que le note Besnier :

> *La complexité impose que l'on aborde les phénomènes dans leur dépendance circulaire et qu'on préfère les exprimer mathématiquement en termes de fonction. Elle n'est compatible ni avec l'approche linéaire ni avec la tentation réductionniste qui caractérisent une démarche causale.* [Besnier 2006, 49]

Cette boucle est essentielle. Elle évoque le principe de rétroaction, qui permet la connaissance des processus autorégulateurs, et celui de la récursivité, qui dépasse la notion de régulation pour celle d'auto-organisation. Morin signale d'ailleurs que « *la dialogique comporte l'idée que les antagonismes peuvent être stimulateurs et régulateurs* » [Morin 1990, 177]. C'est pourquoi il me semble fondé de parler de "boucle dialogique" [563] pour exprimer la rétroactivité et la récursivité entre phénomènes qui sont en outre en relation dialogique. Je propose de la noter plus commodément sous une forme de fonction à plusieurs variables [564] :

Ω *(Argument 1, Argument 2, …),*

chaque argument étant l'un des termes en relation dans la boucle dialogique [565]. Nous noterons ainsi, pour reprendre l'exemple précédent :

Coopétition = Ω *(Coopération, Compétition)*

562. *La Méthode*, T. 1 « *La Nature de la Nature* » [Morin 1977, 28, 2008, 53] d'où est extraite la Figure 10.3.

563. Une association de termes que n'emploie pas Morin.

564. Morin définit une dialogique à deux termes. Nous osons une généralisation, qu'il utilise d'ailleurs lui-même implicitement. Nous y reviendrons au § 12.3.3 p. 363 (note 660).

565. Cette notation Ω est choisie en référence à la carte en omegador, avec ses espaces semi-ouverts que j'avais qualifiés d'espaces de bouclages (voir § 0.5 p. 14).

Une autre forme de notation possible serait :

Argument 1 Ω Argument 2 Ω …

On noterait alors :

Coopétition = Coopération Ω Compétition.

La notion de processus autorégulateur renvoie à toute la dynamique des systèmes, que ce soit en sciences – et le champ bibliographique y est immense, en partant des travaux initiaux de Forrester [1961] dans le domaine des systèmes industriels –, ou que ce soit dans des applications plus spécifiques dans le domaine du management [Sterman 2000]. Dans le domaine de la mécanique, l'étude des asservissements en constitue l'une des applications les plus répandues. Sans approfondir ces champs, nous leur emprunterons quelques notions chemin faisant. Et c'est dans ce cadre que nous allons remplir la deuxième cellule de la matrice, en donnant une place privilégiée au manageur technique au sein de cette boucle dialogique.

10.5 Cellule mineure c_{21} : le manageur technique, moteur de boucle

La notion de boucle dialogique introduite dans la cellule c_{11} me semble utile pour bien saisir le lien (complexe comme il se doit) entre rétroaction, récursivité et dialogique. Chaque niveau contient l'autre sans s'y restreindre, et il me semble que la boucle dialogique correspond à ce que Morin appelle boucle rétroactive/récursive :

> *Comment élaborer le méta-système qui puisse intégrer les deux systèmes de référence nécessaires ? […] Ce ne peut être qu'une boucle rétroactive/récursive. […] Cette boucle ne peut se construire tout de go, de par la volonté du concepteur. Si bouclage il y a, il faudra des tâtonnements au hasard, des essais et erreurs, des aller et retour, des échanges, migrations, transferts, transformations de concepts, il faudra de la chance… Si bouclage il y a, il ne pourra prendre vraiment forme qu'au terme du troisième volume* [566] *de ce travail.* [Morin 1977, 276]

Dans la présente cellule c_{21}, qui se situe sur la ligne de la question de recherche sur le rôle du manageur technique, nous cherchons à voir ce que nous apporte le principe dialogique. Autrement dit, quelle est la place du manageur technique dans le processus de construction de cette boucle dialogique ? Comme le souligne fréquemment Morin, « *la pensée de la complexité a besoin de l'intégration de l'observateur et du concepteur dans son observation et sa conception* » [Morin 2005, 102]. Autrement dit, il n'est pas de complexité possible sans réflexivité, sans autoréférence. C'est pourquoi, comme je l'ai explicité au chapitre 4, j'ai fait le choix méthodologique de relater des cas au sein desquels j'ai joué un rôle actif, c'est-à-dire de me mettre en situation réflexive, en référence à mes propres actions, à mes propres sentiments, à mes propres motivations et intérêts. Ainsi, *observateur* de la complexité dans la partie II, je suis dans la partie III (au cœur de laquelle nous entrons) *concepteur* d'une pensée complexe portant sur le cas de manageur technique, afin de retourner en tant qu'*acteur* de cette complexité sur le terrain de la partie IV selon un mode d'agir ↔ penser complexe, ou pour l'écrire dialogiquement, un mode *Ω (Agir, Penser)* [567].

Je suggère de considérer que, dans les boucles dialogiques issues des différents dilemmes observés sur le terrain, le manageur technique est *à la fois à l'interface entre les antagonismes, le régulateur de la rétroaction et le stimulateur de la récursivité.* En un mot, c'est le *moteur* de la dialogique. Le manageur technique se retrouve donc au cœur de la complexité, pour faire fonctionner ces boucles complexes de manière constructive et actionnable.

566. Pour le présent travail de thèse, c'est au terme de sa quatrième partie, et il faudra aussi de la chance.

567. Nous l'étendrions d'ailleurs volontiers à un *Ω (Agir, Observer, Conceptualiser).*

J'esquisse un parallèle avec la première modélisation en trois degrés d'action du manageur technique esquissée au chapitre 9. La relation en boucle ouverte au premier degré correspondrait à l'interfaçage du degré 1, qui est le pilotage “à vue” sur le terrain ; la relation en boucle fermée rétroactive serait à mettre en regard avec le degré 2, caractérisé par une capacité à faire évoluer les pratiques et les outils ; le degré 3, où le manageur technique déploie ou suscite de nouvelles organisations ou des systèmes de traitement, est en phase avec la récursivité créatrice. (Quant au niveau dialogique, il serait pleinement atteint au degré 4 qui dépasse *stricto sensu* le périmètre du manageur technique par sa capacité réflexive, globalisante, stratégique et complexe.) Ce parallèle est indicatif, je l'espère éclairant, et avec les limites d'une analogie que nous ne chercherons pas davantage à étayer. Dans la perspective de l'édification de notre modèle complexe du manageur technique, l'application de ce principe dialogique à la question qui lie les processus de conception et d'intégration est d'une utilité plus directe.

10.6 Cellule mineure c_{31} : une dialogique Ω *(Conception, Intégration)*

En quoi le manageur technique peut-il devenir le moteur de la boucle dialogique entre conception et intégration ? Comment dépasser la “tension essentielle” un peu schématique entre des physiciens qui seraient porteurs de la dynamique de conception, et des ingénieurs se posant comme garants de la nécessité de l'intégration) ? Comment les faire cohabiter, voire comment créer une synergie ? C'est le propos de la troisième cellule de notre matrice que d'apporter une première réponse à ces questions, sous la forme d'une dialogique Ω *(Conception, Intégration).*

À ce stade, deux questions théoriques se posent : la dénomination de cette dialogique, et la liste de ses arguments. La nature exacte de cette dialogique ne ressort pas encore clairement, et sans doute faudra-t-il que nous progressions dans la construction de notre modèle pour la déterminer davantage : est-ce une extension du processus de conception ? Ou au contraire une généralisation de l'intégration ? Ou alors est-ce une forme de coordination complexe ? Ou bien faut-il recourir à une autre notion, comme celle de congruence ? Une fois la dénomination idoine identifiée, nous pourrons alors nous interroger sur le nombre d'arguments : doit-on inclure uniquement conception et intégration, ou bien étendre la liste ? Pour éclairer ces questions, nous reviendrons dans un premier temps sur le concept d'intégration, dans l'acception que nous utilisons. Nous utiliserons ensuite la polysémie du terme pour justifier notre dialogique Ω *(Conception, Intégration)*.

Au § 5.1 p. 124, j'ai défini l'intégration mécanique comme une activité d'attribution et de gestion des espaces, et de contrôle, dès le stade de la conception, des interférences et des conflits éventuels. Lors des chapitres 5 et 6, nous avons observé cette activité d'intégration sur le terrain, dans le contexte de l'intégration de grands systèmes : leurs éléments y sont conçus par des équipes diverses, dans une approche de conception distribuée plus ou moins collaborative. Il s'agit essentiellement de gérer les interfaces entre différents composants d'un assemblage qui, dans nos cas, se présentent en nombre un petit peu plus élevé que la moyenne. Mais si l'échelle est différente, et donc les problématiques d'autant plus visibles, la nature de cette activité d'intégration n'est pas spécifique à nos cas. Cette définition de l'intégration est donc extensible à tout processus de conception de produit.

Dans les deux autres cellules de la troisième ligne de la matrice consacrée à ce que j'ai jusque là prudemment noté “processus de conception / intégration“, nous détaillerons à l'aune des deux autres principes complexes retenus quelques autres particularités de cette activité d'intégration généralisée. Ce qui nous intéresse ici est la relation dialogique entre conception et intégration.

Le terme d'intégration est doté d'une polysémie étendue. Dans son sens courant, assez proche de la définition précédente, l'intégration est l'incorporation à un col-

lectif, menant à son assimilation. C'est aussi son sens social et politique, d'où dérive le substantif *intégrationnisme*. Poussé à son achèvement, l'intégration mène à l'*intégralité*, à la totalité, c'est-à-dire à l'asssimilation et à l'absorption, c'est l'approche *intégriste*. Dans le domaine économique, l'intégration est la concentration des activités d'un domaine. Notre travail d'intégration géométrique est plus volontiers confié à un *intégrateur*, dont la tâche consiste à inclure un élément en cours de conception en tant que *partie intégrante* d'un ensemble en cours d'intégration. Ce qui évoque le sens mathématique : l'*intégration* est l'opération inverse de la dérivation, autrement appelée différentiation. De là à assimiler la différentiation à la conception, il reste un petit pas que nous allons oser franchir, histoire de voir si par cette analogie on obtient des résultats intéressants.

Et pour franchir ce pas, il suffit de glisser de la *différentiation* avec un *t* (celui de *différentiel*) à la *différenciation* avec un *c* (celui de *différence*) [568]. La conception n'est-elle pas en effet la démarche vers l'unicité, celle de la solution à un problème défini par, disons, le cahier des charges fonctionnels ? Concevoir serait, selon cette acception assez largement partagée, trouver la solution qui sera retenue de manière unique dans un champ de contraintes appelé spécifications : de produit – fonctionnelles ; de process – faisabilité ; de projet – coût et délais ; etc. Les approches divergent ensuite sur le caractère de ce champ de contraintes : statique et préalable, ou au contraire dynamique et co-construit au cours de la conception ? Dans tous les cas, l'idée du processus de conception est d'élaborer une unique solution, la plus spécifique et originale possible, donc de *différencier* les solutions possibles de manière à sélectionner celle qui sera considérée comme la meilleure.

Si l'on accepte de transformer la dialogique initiale *Ω (Conception, Intégration)* en une autre dialogique considérée comme équivalente *Ω (Différenciation, Intégration)*, des travaux de psychologie [Csikszentmihalyi et Rathunde 1998] nous éclairent étonnamment :

> *La complexité résulte de deux processus psychiques : la différenciation, qui implique un mouvement vers l'unicité en se distinguant d'autrui ; et l'intégration, son opposé, qui implique l'union à d'autres gens, à d'autres idées et à d'autres entités au-delà de soi. Un soi complexe réussit à combiner ces deux tendances opposées. La différenciation s'explique par le succès dans l'affrontement des défis, ce qui rend la personne plus capable, plus efficace, plus habile et unique. L'intégration permet l'harmonieux ajustement des parties, antécédent et conséquence des grandes réalisations.*
>
> *[…] Un soi qui est uniquement différencié peut accomplir de grandes réalisations mais risque l'égotisme ; une personne qui est uniquement intégrée peut être reliée aux autres mais risque de manquer d'autonomie. L'investissement d'une égale énergie psychique dans les deux processus évitera l'égoïsme ou la conformité et formera un soi complexe*. [Csikszentmihalyi 2004, 52-53]

Nous tenons ainsi deux résultats : la constitution d'un « *soi complexe* », et une dialogique. Cette dialogique est extrêmement intéressante : c'est dans la combinaison entre conception et intégration que se construit l'efficacité du processus de conception / intégration. C'est précisément dans cette dialogique que la complexité devient un atout plutôt qu'un handicap, que se constitue un « *soi complexe* ». Un tel système complexe ne peut pas être uniquement constitué des meilleurs composants s'ils ne sont pas intégrés harmonieusement ; et il ne peut pas davantage être constitué de composants merveilleusement interfacés, mais dont les fonctionnalités seraient piètres. Il faut donc chercher le dépassement dialogique de ces deux processus, et cesser de les considérer comme antagonistes – ou plutôt mieux, il faut

568. Une subtilité inutile en anglais, qui ne distingue pas orthographiquement les deux acceptions du terme *differentiation*.

accueillir leur antagonisme, leur concurrence et leur complémentarité dans un tout dialogique, une unité complexe, un « *soi complexe* » beaucoup plus riche. Un tel changement de paradigme permet de revisiter très différemment la controverse sur les enveloppes du chapitre 6, les tensions plus ou moins essentielles entre physiciens et ingénieurs, ou plus généralement entre spécificateurs et concepteurs.

C'est donc une contrainte que je pose à notre modèle à venir de processus de conception / intégration (ce « *soi complexe* » que nous continuerons à désigner ainsi pour l'instant) : *le processus que nous cherchons à modéliser favorise cette synergie entre logique de conception et d'optimisation des performances des composants, et logique d'intégration et d'optimisation des interrelations entre ces composants*. Le tout est plus que les parties si et seulement si à la fois les parties sont performantes et le tout correctement intégré. La contrainte qui en découle est que la complexité des projets doit bien être assumée comme telle, dans toute la richesse des interfaces entre les parties qui constituent le tout. C'est ce que nous allons étudier au chapitre 11.

La dialogique *Ω (Différenciation, Intégration)* se retrouve en management de projet, et elle éclairera en retour utilement la question du rôle de manageur technique. Le processus d'intégration de systèmes a en effet été identifié comme une fonction managériale importante [Lawrence et Lorsch 1967a]. Le besoin simultané à la fois d'une plus grande spécialisation (différenciation) et d'une coordination plus étroite (intégration) s'est accru dans les projets complexes. Ces auteurs introduisent précisément la nécessité d'un intégrateur, et soulignent, qu'entre différenciation et intégration, il ne faut pas choisir : « *an effective manager has a need for both; however since these two needs are essentially antagonistic, one can usually be achieved only at the expense of the other* » [569]. Grâce à l'approche complexe et au principe dialogique, nous pouvons affirmer qu'il est possible de dépasser cet antagonisme.

Stuckenbruck [1988] propose une représentation graphique, reproduite à la Figure 10.4, de ce « *trade-off* », de ce compromis entre ces deux exigences. Ce graphique est ensuite utilisé pour mesurer une performance managériale : tandis que le « *discipline manager* » (le spécialiste, par exemple le concepteur, ou le physicien) va avoir tendance à se rapprocher de l'axe de la différenciation (au sens de la recherche de l'unicité, de la spécificité), le « *project manager* » sera quant à lui davantage préoccupé du résultat d'ensemble, donc de l'axe de l'intégration. Stuckenbruck conclut :

> *The ideal high-performance manager falls on the arrow midway between differentiation and integration. […] This model emphasizes the importance of the project manager's role as an integrator.* » [570]

Où situer notre manageur technique ? Car la catégorie

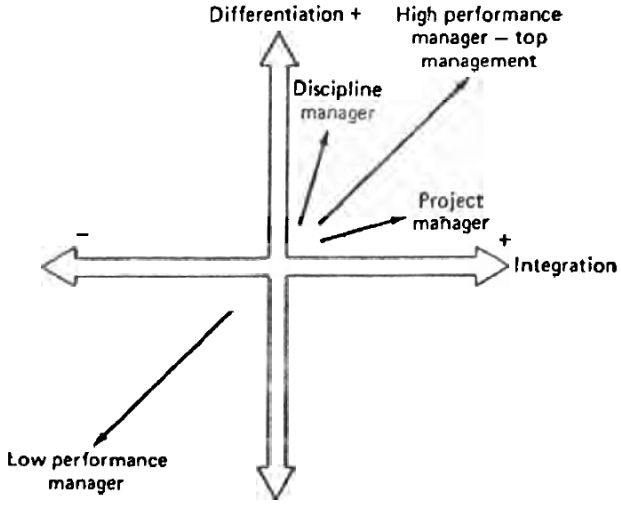


Figure 3-1. Measuring managerial performance.

Figure 10.4 : Le *trade-off* entre différentiation et intégration

In Stuckenbruck (1988)

569. « Un manageur efficace a besoin des deux ; toutefois, comme ces deux exigences sont par essence antagonistes, on ne peut ordinairement satisfaire l'une qu'au prix de l'autre ». [Lawrence et Lorsch 1967b]

de manageur technique inclut aussi bien le "*discipline manager*" que le "*project manager*". Dans les cas que nous avons observés au cours de la partie II, il oscille en effet entre les deux axes. Dans le modèle que nous construisons, nous inclurons l'exigence de privilégier ce dépassement dialogique complexe qui, je le répète, permet d'assumer l'antagonisme, la concurrence et la complémentarité des deux axes.

Avant de quitter cette dernière cellule de la matrice placée sous la dominante de la dialogique, signalons sans nous appesantir deux écueils liés à des questions de vocabulaire et de notions parfois glissantes selon les domaines.

Premier écueil : en psychologie, on appelle parfois *intégration* l'équilibre entre les principales forces psychologiques, dans un sens proche de l'éclectisme ou du syncrétisme. Lors du chapitre 11, au moment d'éprouver notre modèle de manageur technique, je privilégierai le terme de *congruence* pour éviter toute confusion.

Deuxième écueil : certains auteurs considèrent parfois que la complexité, c'est justement la différenciation, qui serait alors synonyme de diversification.

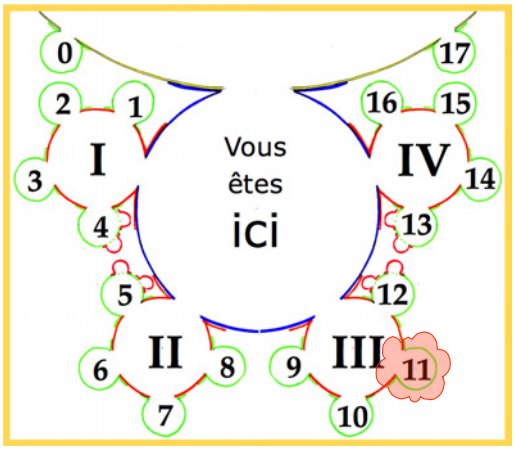
> *Les chefs d'œuvre, comme les corps vivants, se caractérisent à la fois par la complexité (tendance à la diversification) et par la simplicité (tendance à l'intégration). La simplicité intègre dans l'œuvre tous les niveaux de la complexité. Bach a produit une musique à la fois très simple par ses principes intégrateurs et très complexe par la diversité qu'elle pouvait intégrer. C'est la simplicité extrême du noyau intégrateur qui permet à la complexité d'apparaître unifiée.* [Bédard 2008, 199]

Cet écueil n'en est pas un, c'est tout au plus un bon signal. Tout d'abord parce que l'approche de Bédard est entachée de l'opposition frontale entre simplicité et complexité, et d'une assimilation caricaturale entre intégration et simplicité d'une part (l'intégration n'a rien de simple, elle est même au cœur du complexe), et diversification et complexité d'autre part (il est préférable de ne pas réduire la complexité à cette dimension quantitative). Au delà de son ton péremptoire, cette affirmation souligne toutefois utilement une limite à notre approche : il se pourrait bien que la dialogique ne puisse longtemps se satisfaire d'un antagonisme concurrent et complémentaire entre seulement deux termes. On sent poindre la nécessité d'une circulation à trois termes, où intégration, diversification (ou différenciation, ou encore conception) et aussi réalisation de projet, pourraient jouer ensemble sur un même plan, sans hiérarchie, comme pour constituer une sorte de réseau complexe de coordination. Ceci permettrait d'éviter ce second écueil, voire d'ouvrir la voie vers un processus de collaboration complexe incluant la dimension de projet. Ces remarques, encore intuitives à ce stade, guideront nos pas dès le prochain chapitre.

∴

Nous voici donc à l'issue de ce chapitre avec quelques enseignements sur la fécondité de l'approche complexe au vu de la valeur heuristique du principe dialogique. Et nous voyons s'esquisser quelques pistes pour les deux prochains chapitres : faire émerger une dialogique à trois composantes, qui permettra de dépasser un binaire trop manichéen ; prendre en compte dans le modèle de manageur technique la dimension managériale combinée à la dimension technique ; et travailler la modélisation du processus de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration)*, de manière à mettre en valeur la fécondité de la dialogique complexe engendrée.

570. « Le manageur de haute performance idéal se situe à mi-chemin entre les axes de différenciation et d'intégration. […] Ce modèle souligne l'importance du rôle d'intégrateur que doit jouer le manageur de projet. » [Stuckenbruck 1988, 209]



Chapitre 11. Acteur d'interface

Où le principe complexe hologrammique contribue par sa fractalité à l'élaboration d'un modèle du manageur technique comme acteur d'interface

Polarité de l'espace humain fait d'un dedans et d'un dehors. […] Pour qu'il y ait véritablement un dedans, encore faut-il qu'il s'ouvre sur le dehors pour le recevoir en son sein.

Jean-Pierre VERNANT [571]

571. *La traversée des frontières*, Le Seuil, 2004, p. 179-180.

Le manageur technique, comme moteur de la boucle dialogique complexe que nous avons évoquée au chapitre précédent, est un élément du système qui l'englobe et dans lequel il évolue. Ce chapitre a pour objectif de proposer un modèle du manageur technique constitué en *acteur d'interface* [572], c'est-à-dire dans son mode de relation avec le monde qui l'entoure, face aux responsabilités qu'il assume et dans un mode d'agir ↔ penser complexe que nous commencerons à appliquer dans la partie IV. Triffaux relève que « *le cœur de la responsabilité des ingénieurs, c'est une capacité à conceptualiser des problèmes complexes et à les résoudre* » [in Berthet 1997, 17]. Nous poursuivrons le remplissage de la deuxième colonne de la matrice, dont la cellule majeure sera précisément le modèle de manageur technique.

Dans un premier temps, et en nous inspirant du principe complexe hologrammique qui occupera la première cellule mineure de cette colonne, nous reviendrons sur la question des effets multi-échelles et de la fractalité des observations de la partie II. Nous serons alors en mesure de limiter le nombre d'interfaces auxquels est connecté le manageur technique à trois modes : le mode *ascendant* – à l'égard des décideurs stratégiques ; le mode *descendant* – à l'égard des exécutants de ses instructions ; et le mode *latéral* – à l'égard de ses pairs ou homologues.

Nous préciserons ensuite dans la cellule majeure de ce chapitre quels sont les différents types possibles de ces interfaces, et nous analyserons l'émergence de la figure de l'acteur d'interface dans la littérature. Nous proposerons un modèle graphique, constitué de mailles à trois pôles (inspirées de l'analyse transactionnelle), et qui généralise le modèle concentrique présenté au chapitre 9 (Figure 9.4 p. 275) : un modèle d'interaction basé sur la décomposition de l'interface en transactions et en traductions. Le modèle d'acteur d'interface sera ensuite mis à l'épreuve (sans prétendre à une quelconque exhaustivité).

Enfin, sur la dernière cellule mineure c_{32}, nous donnerons quelques pistes sur la manière de gérer les relations d'interdépendances entre composants d'un système, permettant de dépasser les limites arborescentes et d'opérationnaliser progressivement cette notion de mode d'interface latérale.

11.1 Cellule mineure c_{12} : le principe hologrammique

Au début du chapitre 10, nous avons souligné que l'un des enjeux de notre modélisation systémique complexe est de conserver la continuité lors du passage du micro au macro, en passant par un niveau "méso" intermédiaire. Or c'est aux interfaces et aux frontières qu'il est le plus nécessaire, et le plus délicat, de maintenir la circulation des couplages entre niveaux de réalité. Le principe hologrammique va nous aider à traiter ces va-et-vient entre niveaux, à relier les effets multi-échelles et à mieux saisir la récursivité et l'interdépendance systémique. Le niveau mésoscopique proposé dans la cellule c_{22} trouvera alors tout son sens.

11.1.1 Le tout est dans la partie qui est dans le tout

Le principe hologrammique proposé par Morin est basé sur une analogie avec l'hologramme physique : chaque point d'une telle image contient la quasi-totalité de

572. Il n'est dans mon intention ni de priver la moitié de l'humanité de la potentialité de devenir acteur d'interface, ni *a contrario* de céder aux charmes politiquement corrects d'une écriture androgyne. C'est pourquoi il faut naturellement considérer l'acteur d'interface comme une possible "actrice" d'interface, et ainsi de suite *mutatis mutandis*.

l'information de l'objet représenté : « *non seulement la partie est dans le tout, mais le tout est dans la partie* » [Morin 2005, 100], en écho à la *Pensée* de Blaise Pascal citée au chapitre 10 (p. 290). Il précisera ultérieurement que « *le tout est inscrit d'une certaine façon dans la partie* » [Morin 2008, Lexique, 2434]. Il cite l'exemple du monde biologique, où chaque cellule de notre organisme contient la totalité de l'information génétique de cet organisme. C'est également le cas dans le monde sociologique, où chaque individu porte en lui la connaissance sur la société, tout en étant conformé par elle. L'idée hologrammique est donc celle qui enrichit la connaissance des parties par le tout et du tout par les parties, dans un même mouvement producteur de connaissances.

(Morin ajoute en outre que la pensée de la complexité, de ce fait, a besoin de l'intégration de l'observateur et du concepteur dans son observation et sa conception [573] : c'est ainsi que mon modèle de manageur technique est conçu par un manageur technique en position de méta-observation et de méta-conception, au degré 4.)

Cette idée hologrammique aide à dépasser la difficulté apparue au degré 2 d'une complexité omniprésente pour le manageur technique en action, qui devient à la limite bloquante et paralysante : devant tant de complexité, qui suis-je pour oser décider quoi que ce soit, vu le nombre d'interlocuteurs, d'agents et d'acteurs. Quand on comprend la *fractalité* induite par le principe hologrammique, on peut alors plus aisément saisir la multiplicité de niveaux requis, et tenter d'en réduire le nombre pertinent. La dynamique multi-échelles est ainsi décrite :

> *Les systèmes complexes sont des systèmes présentant un grand nombre d'entités en interaction. Le niveau local fait émerger des formes organisées au niveau global, lequel influence en retour le niveau local. Interactions locales et interactions globales peuvent ainsi se conjuguer dans la description de leurs dynamiques. Ils présentent ainsi un comportement global qui rend vain toute tentative d'explication par le seul comportement des parties.* [574]

Dans la perspective de l'établissement de notre modèle systémique complexe du manageur technique, nous allons commencer par modéliser le niveau local. C'est ce que le premier modèle concentrique s'est appliqué à faire, et ce que nous allons établir désormais, en partant de l'hypothèse que chaque acteur d'un système fonctionne sur trois modes d'interactions locales : ascendant (*bottom-up*), descendant (*top-down*), et latéral (*middle-out*).

Bourgine poursuit ainsi sa description dont nous nous inspirons dans le cadre du modèle du manageur technique : « *La reconstruction des dynamiques multi-échelles ne peut se concevoir de manière purement théorique à partir de principes premiers, fussent-ils ceux de la physique* ». Il en tire trois conséquences épistémologiques :

> *Les systèmes complexes doivent être étudiés* in vivo, *c'est une nécessité intrinsèque, en raison de l'existence de la causalité descendante des contextes variés dans lesquels ces dynamiques prennent place*
>
> *L'observation* in vivo *d'un système complexe passe par une étape phénoménologique où le protocole expérimental permet de recueillir des données relationnelles et dynamiques de toutes sortes à différentes échelles ainsi que les annotations des experts sur ces données. […] Cette étape donne lieu à une reconstruction phénoménologique pour compléter les observations partielles, ainsi qu'à une catégorisation symbolique des événements à partir des annotations d'experts (interprétation des histoires individuelles comme dynamiques symboliques).*

573. Une conséquence du théorème d'incomplétude de Gödel [Hofstadter 1985], dont l'établissement nécessiterait quelques précisions hors de propos ici.

574. Bourgine, "Les systèmes complexes obéissent-ils à des lois ?" [in Bourgine, Chavalarias et Cohen-Boulakia 2008, 378]

> *La construction de ces grandes cohortes avec les données individuelles multi-échelles et les dynamiques symboliques associées est à la fois trop coûteuse et trop essentielle pour ne pas relever des principes de la science ouverte. Le principe est le même que pour les grandes expériences de physique des hautes énergies à travers le monde : les données recueillies font l'objet d'un premier traitement pour extraire des trajectoires élémentaires et ce résultat est disponible librement pour les laboratoires du monde entier. Ces bases de données associées aux cohortes sont incontournables pour développer scientifiquement les connaissances humaines sur les dynamiques multi-échelles des systèmes complexes.*

Nous avons ainsi bouclé la boucle, une boucle étrange s'il en est [Hofstadter 2008]. Ce que nous avons décrit en particulier au chapitre 2 dans sa globalité, et dans la partie II dans ses dynamiques locales, c'est précisément l'observation *in vivo* des efforts complexes consentis à tous niveaux par le CERN et par les collaborations de physique du type d'ATLAS pour, précisément, « *construire ces grandes cohortes avec les données individuelles multi-échelles* » dans le domaine de la physique des particules. En observant la constitution de ces collaborations, nous avons procédé à « *l'étape phénoménologique de recueil des données relationnelles et dynamiques de toutes sortes à différentes échelles* » mettant en scène des manageurs techniques et des experts, y compris leurs « *annotations sur ces données* » comme celles de l'ethnographe Pascal Lécaille au niveau micro, ou des chercheurs en management Yami ou Türtscher au niveau macro.

Notre programme de modélisation complexe est donc le suivant : *établir un modèle local décomplexifié du manageur technique*, en ayant bien conscience de ses limites et de son nécessaire dépassement par plongement dans les dynamiques globales ; puis *globaliser* par homogénéisation de ce modèle local, et *observer les émergences de dynamiques globales*.

Il va de soi qu'un tel programme dépasse le cadre de cette thèse, qui ne fait qu'en ébaucher les premiers linéaments et dessiner le substrat théorique. D'une part, pour reprendre Bourgine, « *la conception de programme de recherche et des protocoles expérimentaux multi-échelles ne peut se faire que de façon conjointe par les théoriciens et les expérimentateurs à la fois autour des grands objets et des grandes questions théoriques transversales* ». Et surtout, le recours à une modélisation numérique s'imposerait bien vite, avec corrélativement la nécessité de quantifier ces modes d'interactions et de procéder à des simulations dynamiques. Ce pourra être l'objet des développements ultérieurs éventuels de la modélisation proposée, avec les difficultés et obstacles inhérents.

11.1.2 Décomplexifier ?

Revenons à notre modèle local du manageur technique, premier maillon de cette chaîne bientôt transformée en réseau ; et reprenons la problématique déjà évoquée au § 3.1 p. 79 de la complexité intersubjective. Nous avions posé en principe dans la partie II qu'il existe une certaine complexité intrinsèque, qu'il s'y rajoute une certaine complexité perçue par l'observateur, et que ce noyau de complexité intrinsèque est résiduel une fois ôté au complexe perçu *a priori* tout ce qui apparaît ultérieurement comme étant plutôt de l'ordre du compliqué.

Où nous mènent ces réflexions, elles aussi bien complexes ? N'est-ce pas convoquer à plaisir la complexité là où elle n'a pas lieu d'être ? Quel est l'intérêt de cette édification intellectuelle pour aboutir à un simple modèle interactionniste ? Ne convient-il pas de décomplexifier tout cela, ou en tout cas de simplexifier ? Pour ne pas dire tout simplement : simplifier ? Dans un tout autre contexte, l'homme politique Michel Rocard a soulevé cette question de la décomplexification en ces termes très éclairants pour notre propos :

> *Le vrai problème du politique est moins la décision elle-même que la façon dont il va l'expliquer. Il lui faut donc non seulement l'avoir prise, mais maîtriser l'argumentation intellectuelle qui l'a conduit à la prendre. C'est là que la digestion d'une argumentation nouvelle, inconnue et probablement difficile, fait problème. […] Si au nom de la complexité l'argumentation experte ouvre sur le doute et l'incertitude, ou sur l'élargissement du champ de préoccupations, la tentation s'aggrave pour le politique de récuser tout cet appareil de réflexion et de décider au plus simple, au plus vite, et au plus connu.* [575]

Face au défi de définir un modèle local suffisamment simple, sans occulter les dynamiques complexes que ce modèle engendrera en même temps qu'il en sera le fruit (selon un processus récursif dialogique), je suis, en tant que modélisateur de ma propre pratique et de ma propre nature de manageur technique (en position d'auto-référence au degré 4), dans une situation d'embarras équivalente à celle du politique évoquée par Rocard. À force d'élargir le champ des préoccupations, et ce faisant, d'accroître le doute et l'incertitude sur notre propre démarche de modélisation, ne serions-nous pas tentés, nous aussi, de « *décider au plus simple, au plus vite, et au plus connu* » ? C'est pourquoi deux pas de recul sur les systèmes complexes s'imposent au moment de construire la première maille du modèle qui tentera de le saisir.

Repartons d'une définition d'un système complexe : il est « *composé d'un ensemble d'éléments hétérogènes dont les interactions locales sont diverses, non linéaires et s'exercent indépendamment d'un contrôle ou d'une synchronisation centralisée* » [Massotte et Corsi 2006, 39]. Nos éléments hétérogènes, dans le système qui nous intéresse, sont les acteurs de projet, et en particulier les manageurs techniques. Nous cherchons à caractériser leurs interactions locales de manière décomplexifiée. Le concept de simplexité est une piste, introduite par Massote et Corsi de manière pour le moins déconcertante et selon nous inopérante : « *La "simplexité" désigne un état, un caractère de ce qui est "simplexe", […] elle vise une action tendant à réduire la notion de complexité* » (*in ibid.*, p. 45). Plus intéressante est l'approche de Berthoz :

> *La simplexité, telle que je l'entends, est l'ensemble des solutions trouvées par les organismes vivants pour que, malgré la complexité des processus naturels, le cerveau puisse préparer l'acte et en projeter les conséquences. Ces solutions sont des principes simplificateurs qui permettent de traiter des informations ou des situations, en tenant compte de l'expérience passée et en anticipant l'avenir. Ce ne sont ni des caricatures, ni des raccourcis ou des résumés. Ce sont de nouvelles façons de poser les problèmes, parfois au prix de quelques détours, pour arriver à des actions plus rapides, plus élégantes, plus efficaces. [Berthoz 2009]*

C'est dans ce cadre, et sans chercher à en approfondir les tenants et aboutissants, que nous allons déterminer le niveau optimal de décomplexification s'appliquant à notre modèle local de manageur technique, permettant de réduire à *trois* le nombre d'interfaces à considérer : une action plus rapide, plus élégante et plus efficace.

Vidal a affirmé que « *the action of modelling is in essence a way to reduce perceived complexity in order to understand it better. As a consequence, one should always be aware that there is likely to be an optimal level of complexity for the project models* » [576]. Il a alors rappelé la règle empirique selon laquelle, dans le cas d'une décomposition arborescente, le cerveau humain peut analyser jusqu'à sept enfants par objet dans la limite d'une gamme maximale de trois niveaux de décomposition. Je suis pour

575. Rocard, "Responsabilité du politique face aux complexités" [in Bourgine, Chavalarias et Cohen-Boulakia 2008, 346]

576. « L'action de modélisation est par essence une façon de réduire la complexité perçue de manière à mieux la comprendre. Par conséquent, il faudrait toujours avoir conscience qu'il existe probablement un niveau de complexité optimal pour les modèles de projet. » [Vidal et Marle 2008]

ma part réservé sur l'usage que j'estime abusif des décompositions dans lesquelles se perdent les liens autres que les liens de composition [577]. Il est toutefois intéressant d'étayer cette hypothèse d'un niveau optimal, et de justifier le nombre invoqué de trois niveaux dans le cas des modélisations de projet. Notre cas est légèrement différent, puisqu'il porte sur le nombre d'interactions entre le manageur technique et son environnement. Les considérations plus philosophiques qui suivent sont quant à elles d'un caractère tout à fait général.

11.1.3 Le chiffre trois

Sans les commenter ici, je donne trois extraits éloquents d'un passionnant (et exigeant) ouvrage de philosophie, *la Raison contradictoire* [Wunenburger 1990].

> *Le trois est la première expression du multiple. Le découpage du donné peut certes s'opérer selon une grande variété de divisions et de subdivisions, sans pour autant remettre en cause une sorte de prééminence ontologique ou seulement épistémologique de l'unité et du binaire. Le déploiement de la différence selon le ternaire, la répartition des déterminations selon des triades, la composition triangulaire du réel […] met en cause la capacité pour l'unité simple et la dualité figée à exprimer la structure et le devenir du réel.* (p. 67)

> *La triade ne représente pas un cas de figure parmi beaucoup d'autres, mais comprend les conditions minimales d'interactions complexes, et donc d'une socialité qui croise égalité et inégalité, commandement et obéissance, alliance et guerre. Seule cette ambivalence complexe propre à une triade rend possible l'instauration de liens à la fois stables et évolutifs.* (p. 77)

> *Que le ternaire soit représenté de manière pyramidale, comme trois couches successives verticales, ou qu'il renvoie à trois sommets, équidistants ou non, d'un triangle, toujours le multiple est diffracté par une figure angulaire. […] Avec la triangulation, le réel prend corps dans une multiplicité concrète, asymétrique, tout en ne conduisant pas à un pluralisme indéterminé, déréglé. Le triangle est ainsi pluralisé selon un ternaire constitutif, tout en connaissant une unité générique. L'unité du triangle n'abolit plus le multiple, mais le dépasse pour s'installer dans une sorte de tétrade.* (p. 82)

Je retiens de ces trois extraits quelques pistes pour la modélisation du manageur technique nous permettant une « *multiplicité concrète* » : d'abord, le manageur technique sera représenté comme une « *tétrade* » au sens de Wunenburger, autrement dit un tout constitué de trois parties *et* de lui-même (ce qui fait bien quatre…), un tout en forme de ternaire sous la forme d'*une* maille à *trois* pôles permettant d'articuler ses *trois* modes d'interaction (interface, traduction, transaction) dans un contexte où il sera en interaction avec *trois* types d'interlocuteurs.

En introduction à la partie III (p. 254), je précisais que l'enjeu pour moi est également de donner à ces concepts une représentation graphique, puisque créer des concepts, c'est précisément concevoir, que concevoir est le travail du concepteur et que le concepteur, quand il est mécanicien, recourt aux outils de la géométrie. C'est pourquoi, en géomètre, je tiens à donner une représentation graphique à ces concepts. Le philosophe Wunenburger m'y invite à son tour implicitement, je m'y attelle à présent.

577. Nous y reviendrons dès la cellule c_{32} au § 11.3.

11.2 Cellule majeure c_{22} : un modèle d'acteur d'interface

Nous voici au seuil de la cellule centrale de la matrice complexe, une cellule qui se trouve au centre de la thèse elle-même, puisqu'elle condense les principaux enseignements de l'observation des actions de manageurs techniques menée lors de la partie II, et qu'elle en conceptualise l'actionnabilité qui sera abordée lors de la partie IV [578].

En guise de préliminaire à l'élaboration de ce modèle, je voudrais souligner que le manageur technique est avant tout un être humain, et citer le thérapeute Éric Berne : « *Il n'est d'être humain qu'en relation* ». Ce modèle du manageur technique, constitué en acteur d'interface, est donc un modèle d'interactions entre êtres humains selon une analyse en réseaux d'interfaces. Il est fondé sur les leçons que nous avons tirées du principe hologrammique : il s'agit d'insérer ce modèle, en tant que maille locale, dans une dynamique multi-échelles, dans un tissu global où le manageur technique est un acteur en interaction selon trois directions (ascendante, descendante et latérale) avec (en un sens très général que nous préciserons) ses donneurs d'ordre, ses subordonnés et ses homologues. Les interfaces se constituent selon deux composantes complémentaires : le manageur technique en *interface* entre deux de ces interlocuteurs, est en *transaction* avec chacun d'eux, et en *traduction* pour chacun d'eux.

Afin d'éclairer ces hypothèses, nous allons dans un premier temps revenir sur la définition d'une interface, et préciser l'émergence dans la littérature de la figure de l'acteur d'interface. Nous expliciterons ensuite les prémisses du modèle, avant de le présenter sous la forme d'une maille à trois pôles plongée dans un réseau d'interfaces. Nous clorons cette section et cette cellule c_{22} par une première mise à l'épreuve du modèle.

11.2.1 Acteurs et interfaces

Fleurance et Pérez développent une approche du management en actes selon laquelle celui-ci se construit dans un espace institutionnel dual (entre l'organisation et l'individu). Il s'agit de chercher la bonne distance entre un centre et une périphérie, dans le cadre de collectifs de type réseau d'acteurs. C'est un management complexe en raison de la structure, de la diversité des interactions et interventions, et du couplage entre processus et à échelles de temps différents. « *Cette perspective place alors les acteurs et leurs subjectivités au centre de la dynamique organisationnelle* » [Fleurance et Pérez 2009, 120] dans laquelle les savoirs sont négociés.

C'est cette image du manageur au centre d'un réseau d'acteurs qui a inspiré la figure de l'acteur d'interface, précisément à l'interface entre les communautés de pratiques introduites par Wenger [1999] (Figure 11.1). Le terme qu'il emploie est celui de courtier (*broker*) : « *people who can introduce elements of one practice into another* » [579]. Chanal propose de préférer au terme de courtier l'appellation *acteur d'interface*. Elle précise que cette position « *à la fois complexe et difficile à assurer […] suppose des compétences de traduction, de coordination et de mise en cohérence de différentes perspectives* » [Chanal 2000, 15]. Retenons le recours à la métaphore de la traduction, en référence explicite à Latour : « *La traduction est l'interprétation donnée, par ceux qui construisent les faits, de leurs intérêts et de ceux des gens qu'ils recrutent* » [Latour 1995, 260]. La traduction est l'une des deux composantes (avec la transac-

578. Cette démarche est à l'image de la boucle *Ω (Agir, Observer, Conceptualiser)* évoquée en introduction de la partie III (note 476 p. 253) et à la note 567 p. 300.

579. « Des personnes qui sont en mesure d'introduire des éléments d'une pratique à l'intérieur d'une autre. » [Wenger 1999, 105]

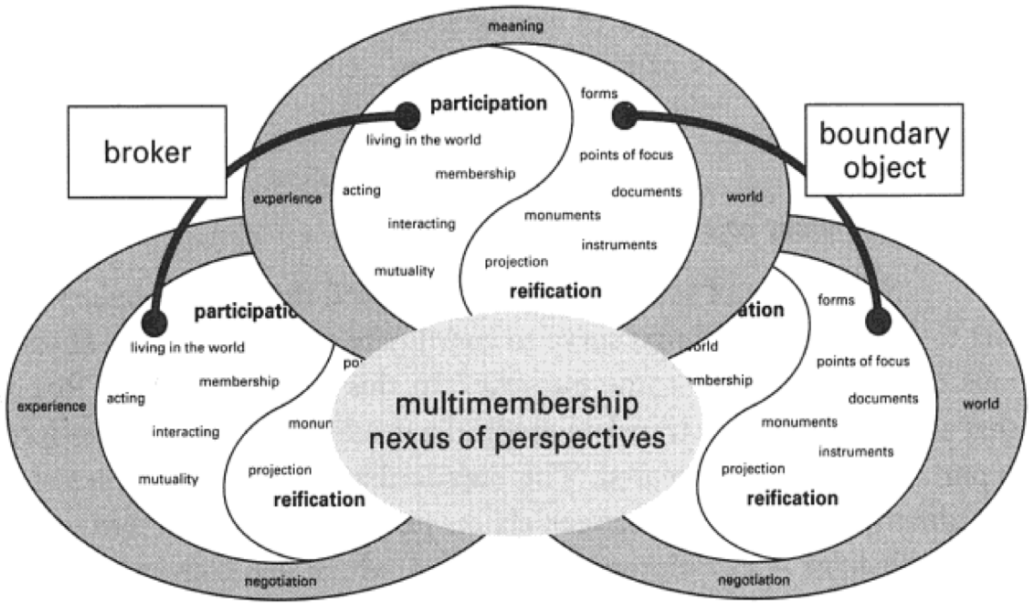


Figure 11.1 : Le concept de *broker* (courtier), parallèle à celui d'objet-frontière

In [Wenger 1999, 105]

tion) que nous retiendrons pour définir nos interfaces, dans un sens assez proche du sens latourien, qui pourrait s'élargir à celui de construction d'un référentiel commun évoqué par Genelot (voir le chapitre 9).

La première occurrence des acteurs d'interface date (à notre connaissance) de 1992, avec l'analyse des pratiques de projets dans l'automobile [Moisdon et Weil 1992a, 1992b]. Ils y sont définis comme de « *nouveaux acteurs préoccupés davantage des questions d'interfaces entre techniques connexes ou entre acteurs intervenant à des moments différents. […] Ils interviennent comme des médiateurs capables de proposer des concessions marginales de l'un ou l'autre des protagonistes ou même d'un troisième, œuvrant dans l'environnement immédiat* » [Moisdon et Weil 1992b, 56]. C'est cette notion de transaction que nous retiendrons comme deuxième composante d'interface, et que nous reprendrons au chapitre 12 avec les espaces d'échanges comme mode de résolution privilégiée des frictions aux interfaces.

Nous avons évoqué l'acteur d'interface sans spécifier ce que nous entendons par interface. Dans le domaine du génie industriel, Koike note que « *the word* interface *is related to links, interactions, and collaboration between two or more organizations, industrial functions, or team-members and the importance of suitable interfacing for supporting concurrent design activity has already been stressed in literature [Finger, Konda et Subrahmanian 1995]. For example, Boujut and Blanco [2003] claim that collaborative work is "a typical situation where interfaces are of prime importance"* » [580]. Koike utilise cinq éléments fondamentaux pour caractériser une interface : les acteurs d'interface, les objets intermédiaires (artefactuels ou réels, c'est-à-dire matériels), les outils, les règles et procédures, ainsi que l'espace et le temps d'interface.

Les modèles d'acteurs d'interface proposés par Koike pour la prise en compte de la logistique, ou bien encore exploités entre autres occurrences par Surbier pour la montée en puissance de la production dans les industries à faible volume [Surbier,

580. « Le mot *interface* est en rapport avec les liens, les interactions et la collaboration entre deux ou plus organisations, fonctions industrielles ou membres d'équipe, et l'importance d'une interface adaptée pour soutenir l'activité de conception concourante a déjà été soulignée dans la littérature [Finger, Konda et Subrahmanian 1995]. Par exemple Boujut et Blanco [2003] affirment que le travail collaboratif est "une situation typique dans laquelle les interfaces sont d'une importance capitale". » [Koike, Blanco et Penz 2005]

Alpan et Blanco 2010 ; Surbier 2010], présentent cependant la restriction d'être adaptés à un contexte de manière très *ad hoc*. Nous allons tenter de rester plus général à ce stade, et de ne procéder à l'application à nos cas de grands projets complexes (lors de la partie IV) qu'une fois que la figure même de l'interface sera mieux circonscrite.

Le management de projet, précisément, recourt à la notion d'interface. Le PMI® définit trois types d'interface : organisationnelle, technique et interpersonnelle [PMI Standards Committee 2003, 109]. L'importance de la gestion des interfaces est particulièrement développée dans le *Project Management Handbook* [Morris 1988]. Celui-ci l'admet toutefois : « *Interface Management is not a well-developed theory of management well supported by a tight body of research and experience.* » [581] Dans le même ouvrage, Stuckenbruck définit trois types d'interfaces : personnelles, organisationnelles et "de systèmes" (en un sens technique). Il précise : « *Problems become particularly troublesome when personal and organizational interfaces are combined into what may best be called management interfaces* » [582]. Il introduit alors la notion de « *matrice équilibrée* » [583], reproduite à droite à la Figure 11.2, en relation avec les multiples interfaces reproduites à gauche (la flèche blanche décrit un lien d'interface managériale, c'est-à-dire à la fois organisationnelle et personnelle). La matrice constitue et porte ce croisement entre la structure de projet et les structures métier, telles qu'elles sont apparues en particulier dans l'industrie automobile à la fin des années 1980 : l'histoire de la conception de la Twingo est de ce point de vue éloquente [Midler 2004].

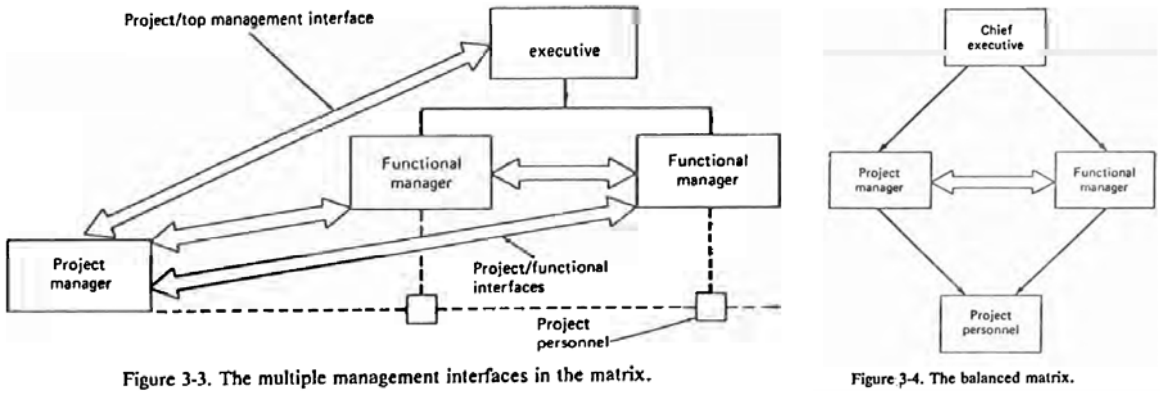


Figure 11.2 : Interfaces de management

In [Stuckenbruck 1988, 64-65]

Les considérations qui précèdent sur les interfaces et les acteurs d'interface ne laissent que peu de place à la complexité. Il est donc intéressant de travailler sur une notion d'interface complexe, dont nous ne faisons ici qu'esquisser l'ébauche : une interface entre entités personnelles ou organisationnelles ou techniques, qui serait bi-, voire multilatérale, autorisant soit des transactions entre deux entités, soit des traductions dans laquelle une entité joue elle-même le rôle d'interface entre deux entités. C'est en cela que le manageur technique est un acteur d'inter-

581. « Le Management des Interfaces n'est pas une théorie de management très développée qui serait soutenue par un corpus solide de recherche et d'expérience » [Morris 1988, 32]. L'on peut craindre vingt-cinq ans après que l'affirmation soit toujours valable ; nous espérons contribuer, si modestement soit-il, à un progrès en la matière.

582. « Les problèmes deviennent particulièrement aigus lorsque les interfaces personnelles et organisationnelles se combinent en ce qu'il conviendrait mieux d'appeler des interfaces de management. » [Stuckenbruck 1988, 63]

583. Cette « *matrice équilibrée* » a inspiré le modèle de la maille à trois pôles présenté ci-après au § 11.2.3.

face : il est à la fois en charge de gérer les interfaces dans un contexte de projet, mais également amené à se constituer lui-même en interface, en « *médiateur facilitateur* » (ainsi que l'ont relevé Moisdon et Weil), voire mieux encore, de « *construire les matrices de passage de la logique projet à la logique métier* » [Midler 2004, 128].

Lévy, l'un des premiers à théoriser la notion d'interface, la définit en termes similaires comme une « *opératrice de passage* ». Après avoir précisé que « *la notion d'interface renvoie à des opérations de traduction et de mise en contact de milieux hétérogènes* », il met en évidence deux dimensions de cette notion : « *elle évoque à la fois la communication (ou le transport) et les processus de transformations nécessaires au succès de la transmission* » [Lévy 1990, 199]. Transmission et transformation constituent les deux modes complémentaires et indissociables d'une interface. La voir comme un simple intermédiaire qui transmet sans transformer est la réduire à un rôle de messager (ou de transmetteur d'effort, selon la formule mécanicienne consacrée). L'interface offre une plus-value, qui est cette modification ajoutée au mouvement. Sans adaptation de ce qui vient d'un milieu aux caractéristiques de l'autre milieu, nul espoir de le voir pénétrer dans le milieu d'arrivée. Et à l'inverse, l'adaptation de forme n'est rien sans le mouvement de transmission qui assure le transport. Ainsi que le formule Lévy, « *aucun message ne se transmet tel quel, dans un milieu conducteur neutre, mais doit au contraire franchir des discontinuités qui le métamorphosent* » [Lévy 1990, 207].

Aux concepts couplés de transmission et transformation qui caractérisent les deux modes de l'interface de Lévy, il manque selon moi la dimension interactive, rétroactive, ou pour mieux dire, dialogique telle que définie lors de la cellule c_{11}, c'est-à-dire complexe, entre les deux milieux en interface. Car la mise en relation interfaciale à concevoir n'est ni unilatérale ni prédéfinie : elle est bilatérale et dynamique. L'interface par *transmission* et *transformation* de Lévy n'est donc que le premier pas de la caractérisation en termes de **traduction** et **transaction** que nous avons formulée plus haut. Le concept de traduction, qui est d'ailleurs explicite chez Lévy, reprend le double mouvement de transmission (passage d'un acteur à un autre) et de transformation (adaptation aux capacités cognitives et aux particularismes de métier), en un sens assez conforme selon moi à la sociologie de la traduction proposée par Callon et Latour [Callon 1986 ; Akrich, Callon et Latour 2006]. J'y ajoute une dimension transactionnelle pour deux raisons : profiter des apports de l'analyse transactionnelle (§ 11.2.2) en ce qui concerne la richesse des relations entre les acteurs ; et souligner que l'équilibrage complexe interfacial exige la participation même des acteurs de chacun des milieux respectifs dans la constitution et la validation de cette traduction au sein des réseaux. Lévy n'écrit-il pas : « *un acteur quelconque n'a rien de substantiel à communiquer mais toujours d'autres acteurs et d'autres interfaces à capter, chasser, envelopper, détourner, déformer, connecter, métaboliser* » [1990, 206] ? Et l'adjonction à l'interface traductrice latourienne de l'espace d'échanges galisonien, la *trading zone* [Galison 1997], permettra de donner à cet acteur d'interface une portée opérationnelle.

Évitons à ce stade le double écueil d'une part de plonger dans la très abondante littérature sur la théorie de la traduction qui dépasse le cadre de cette thèse, et d'autre part d'anticiper outre mesure sur la troisième colonne de notre matrice méthodologique complexe. Et abordons les constituants de ce modèle interfacial.

11.2.2 Constituants du modèle

Grâce aux apports précédents, notre modèle complexe d'acteur d'interface au sein d'un réseau d'interfaces prend progressivement forme. Nous avons ainsi défini qu'il devait gérer trois directions d'interface entre trois types d'acteurs selon les deux composantes couplées de traduction et de transaction. Nous précisons dans

cette section la problématique globale à laquelle doit répondre le modèle d'acteur d'interface, et nous explicitons deux autres sources d'inspiration qui contribuent à donner à ce modèle sa forme graphique : les systèmes multi-agents d'une part, et l'analyse transactionnelle d'autre part.

a. Quelles interfaces ?

Ainsi que nous l'avons vu, le manageur est en interface avec différents autres acteurs. La tripolarisation du modèle suggérée dans la cellule c_{12} provient également d'un constat déjà esquissé au chapitre 9 avec notre premier modèle concentrique : quel que soit le point de vue, quel que soit le centrage sur l'un quelconque des acteurs ou groupes d'acteurs considérés, qu'il soit humain, sociotechnique, organisationnel ou autre, cet acteur agit dans notre hypothèse selon trois modalités : **ce que l'on me fait faire ; ce que je fais ; ce que je fais faire**. Ces modalités correspondent aux trois catégories d'interlocuteurs retenus : *ceux qui me font faire* (par exemple les donneurs d'ordre, ou les supérieurs hiérarchiques, ou les chefs de projet, ou les clients…) ; *ceux avec qui je fais* (par exemple les organisations ou entreprises homologues, ou les pairs, ou les collègues, ou les partenaires…) ; et *ceux à qui je fais faire* (par exemple les sous-traitants, ou les subordonnés, ou les exécutants opérationnels ou les fournisseurs…) [584].

Les relations entre un acteur donné et ses interlocuteurs sont alors résumées par le schéma de la Figure 11.3. Les flèches claires expriment les relations directes entre les différents acteurs, et correspondent au diagramme de la « *matrice équilibrée* » proposée à la Figure 11.2 p. 314. La flèche entre l'acteur et son homologue est, dans le cas d'une relation entre chef de projet et responsable fonctionnel, une flèche qualifiée d'interface par Stuckenbruck [1988]. Les flèches que je qualifie d'interfaces sont les flèches foncées qui relient deux à deux chacun des interlocuteurs *à travers* l'acteur.

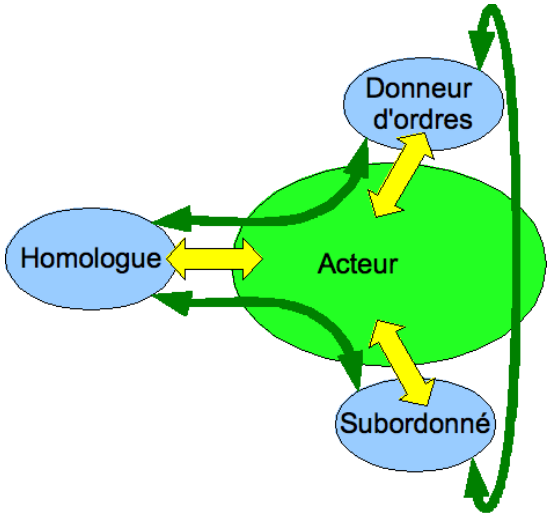


Figure 11.3 : L'acteur en relation avec trois types d'interlocuteurs

Flèche claire: relation directe entre l'acteur central et l'un de ses interlocuteurs
Flèche pleine : interface entre interlocuteurs à travers l'acteur central

Ce sont précisément ces relations d'interface que nous cherchons à caractériser grâce à notre modélisation : que faut-il faire pour que deux flèches de relations bilatérales mises bout à bout deviennent une flèche de relation d'interfaces ? Peut-on traiter les trois directions d'interfaces de manière générique, et comment ? Nous avons évoqué les deux composantes de traduction et de transaction ; il conviendra de le mettre en œuvre de manière structurée pour constituer cette interface.

584. La dénomination générique de ces catégories est trop limitante à mon goût, et il aurait été préférable de les appeler "*ceux qui me font faire*", etc. De manière un peu artificielle et par commodité, on se limite toutefois aux trois vocables de *donneur d'ordres*, d'*homologue* et de *subordonné*, vocables qu'il convient de considérer avec toutes les précautions nécessaires : ainsi un subordonné ne l'est pas nécessairement par voie hiérarchique. Et l'acteur peut aussi bien être collectif.

b. Les systèmes multi-agents

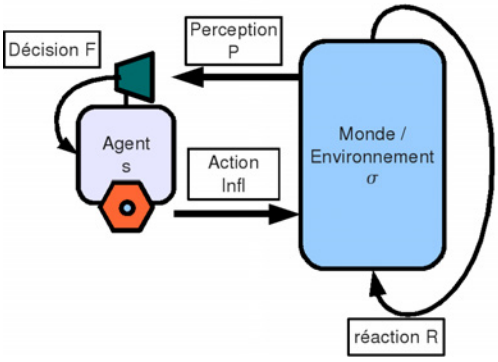


Figure 11.4: Comportement local d'un agent d'un système multi-agents

In Charrier 2009

L'idée des systèmes multi-agents, issue des développements de la théorie des systèmes dynamiques, de la cybernétique et de l'intelligence artificielle, est de considérer le comportement d'une cohorte d'agents identiques (les essaims, les vols d'oiseaux) comme la combinaison du comportement élémentaire d'un agent de base réagissant à son environnement. La Figure 11.4 résume un possible modèle dit « *influence – réaction* » [Ferber et Müller 1996]. Nous n'en développerons pas les propriétés, et nous en garderons l'idée d'une maille élémentaire, l'*agent*, en interaction avec un monde constitué, entre autres, d'un certain nombre de mailles élémentaires équivalentes.

Le comportement collectif de ces agents est considéré comme la somme, ou plutôt comme la résultante des comportements individuels de ces agents, compte tenu de l'influence mutuelle que ces agents exercent les uns sur les autres. Chaque agent prend ses décisions en fonction des décisions que prend chaque autre agent, selon un processus assez conforme à celui souligné par Morin : « *Toute décision, au sein d'un monde incertain, comporte un pari et nécessite une stratégie, c'est-à-dire la capacité de modifier l'action en fonction des aléas rencontrés ou des informations reçues en cours de route* » [Morin 2011, 153]. Notre manageur technique sera ainsi vu comme un agent dont la stratégie s'élabore « *chemin faisant* » [Avenier 1997, 1999], collectivement et en liaison avec celle des autres agents avec lesquels il est en relation.

Le modèle que nous proposons présente une maille élémentaire, analogue à celle présentée ci-dessus, modèle d'un agent à l'interface d'autres agents selon trois directions. Chaque direction est parcourue dans le sens de la *perception* (réception d'information, capteur) ou dans celui de l'*action* (émission d'information, actionneur). Cette information peut prendre la forme d'instructions, de rapports d'avancement, de demandes…, et elle peut, ou non, être portée par des objets intermédiaires, qu'ils soient artefactuels ou matériels.

c. L'analyse transactionnelle

Dans un tout autre domaine, celui de la psychologie, les travaux de Berne sur la théorie des rapports sociaux basée sur l'analyse structurale développent les relations entre individus au travers de différents « *états de l'ego* » qui décrivent les différents types de comportements, sentiments et attitudes psychiques [Berne 1961, 2001, 1984]. Ce modèle permet d'analyser les formes d'échanges et de réponses d'un interlocuteur à un stimulus soumis par un agent donné. Cette approche passionnante prend la forme graphique intéressante synthétisée à la Figure 11.5 : celle de trois disques superposés, *Adulte*, *Parent* et *Enfant*, représentant l'état de l'ego.

Chaque état de l'ego du premier interlocuteur est en transaction avec chaque état de l'ego de l'autre interlocuteur. Ces transactions sont dites complémentaires lorsqu'elles s'effectuent entre deux états de manière réciproque, soit entre états du moi identiques, ou « *égaux psychologiques* », soit entre états du moi différents. Elles sont dites croisées dans les autres cas. Il se peut aussi que les transactions soient doubles, lorsque la transaction apparente au niveau social est accompagnée d'une transaction différente au niveau psychologique. Il est à noter que cette approche par l'analyse transactionnelle a été récemment déclinée dans le domaine du coa-

ching organisationnel [Chernet 2009 ; Vergonjeanne 2010], ce qui la rapproche encore un peu plus de nos préoccupations.

De cette analyse transactionnelle, nous retenons plusieurs éléments pour notre modèle : la décomposition du manageur technique en trois « *états de l'ego* », que nous requalifierons en termes de *pôles* ; la représentation graphique de ces pôles sous forme de disques ; et la prise en compte de différentes transactions entre les pôles d'un interlocuteur et ceux d'un autre. Notre modèle propose un dépassement de celui de l'analyse transactionnelle selon deux directions : il assume l'interpénétration des disques, ce qui, chez Berne, est réservé à des cas très particuliers et considérés comme pathologiques, les cas dits de « *contamination* » [585] ; et surtout, notre modèle ajoute la dimension de *traduction* à celle de transaction proposée par Berne pour mieux caractériser les interfaces entre acteurs comme des interfaces entre leurs pôles. Il fait précisément usage des espaces ainsi topologiquement créés par l'interpénétration des disques : nous les exploiterons en tant qu'espaces d'échanges [586].

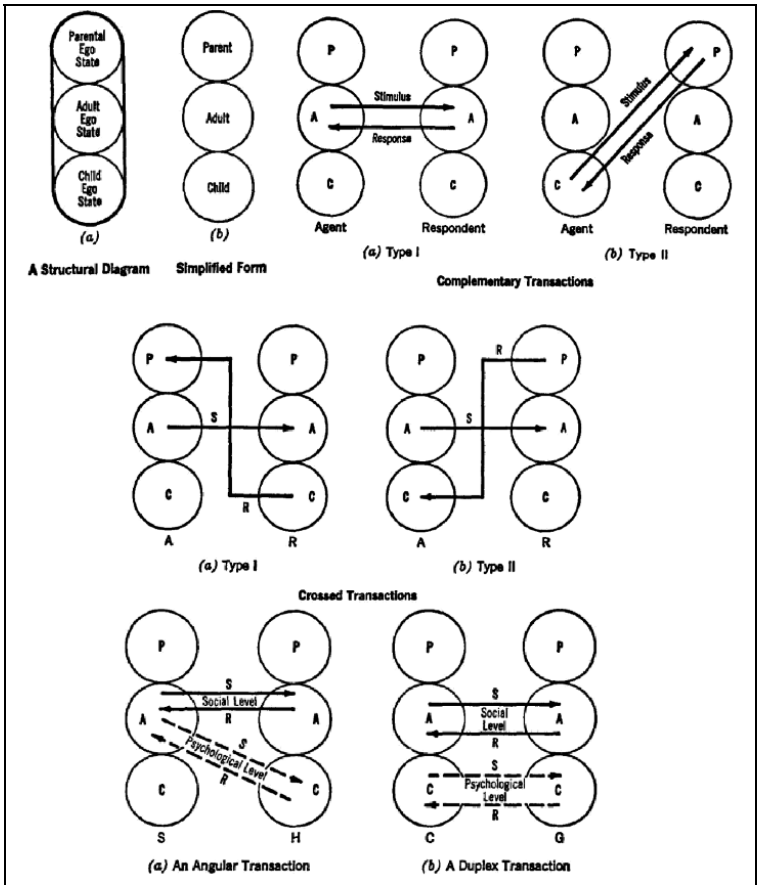


Figure 11.5 : les bases de l'Analyse Transactionnelle

In Berne 1964

11.2.3 Une maille à trois pôles

Le modèle en maille à trois pôles proposé est un modèle d'acteur d'interface tout à fait général, inspiré de l'analyse transactionnelle et des systèmes multi-agents, selon un mode dual de l'interface, à la fois de traduction et de transaction. Le modèle du manageur technique en sera une déclinaison. Ce modèle, suivant le principe hologrammique présenté lors de la cellule c_{12}, est composé d'une maille élémentaire qui prend la forme topologique assez simple donnée à la Figure 11.6.

La maille comporte sept zones distinctes créées par la topologie des trois disques superposés : une zone centrale *O* en forme de triangle curviligne, qui

585. Une analyse fine de ces considérations sort du cadre du présent propos, et ces questions ne sont mentionnées qu'en passant, pour clarifier mes apports. Il est à noter toutefois que le schéma que je propose en trois disques adjacents deux à deux est plus proche des premiers schémas de Berne, encore présents dans le chapitre « Pathogenèse » de son ouvrage initial [Berne 1961, 55]. Ils permettent ainsi la mise en relation interne entre chacun des pôles du modèle, ce qui n'est pas le cas du modèle postérieur de Berne qui exclut topologiquement la relation directe entre Parent et Enfant sans la médiation de l'Adulte.

586. Nous les explorerons davantage dans la cellule c_{23} (§ 12.2 p. 347) de notre matrice méthodologique.

représente ce que nous appellerons le *noyau* de l'acteur ; trois *pôles P1* à *P3* ; et trois *espaces E1* à *E3*, qui représentent des espaces bilatéraux d'échanges avec les mailles voisines [587].

Les trois pôles sont les porteurs des trois modalités évoquées précédemment au § 11.2.1 : le pôle 3 correspond à "*ce que l'on me fait faire*", le pôle 2 à "*ce que je fais*", et le pôle 1 à "*ce que je fais faire*". Les raisons de la disposition topologique respective de ces pôles vis-à-vis de la verticale apparaîtront rapidement. Il est loisible (et conforme à l'inspiration du modèle) de voir le pôle *P1* comme un pôle équivalent à l'état *Parent* de l'analyse transactionnelle, les pôles *P2* et *P3* étant respectivement les pôles *Adulte* et *Enfant* ; nous ne pousserons pas plus loin l'analogie.

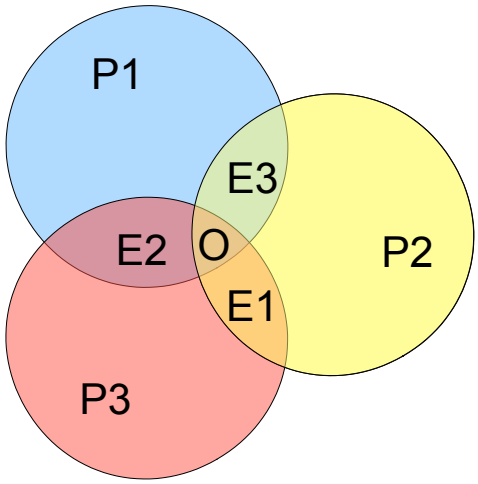


Figure 11.6: maille élémentaire du modèle d'acteur d'interface

O: noyau de l'acteur
Ei : espaces bilatéraux d'échanges
Pi : pôles
P1 : ce que je fais faire
P2 : ce que je fais
P3 : ce que l'on me fait faire

a. *Mailles et cotte*

En partant de ce modèle en maille, on peut aisément obtenir un *modèle de réseau d'interfaces à architecture polycentrique*, et ce en procédant de deux manières différentes possibles : par décomposition, ou par agrégation.

Si l'on procède par *décomposition* de ce réseau, partant d'un système global représenté par trois pôles, on zoome vers le détail pour retrouver une maille à trois pôles elle-même composée de mailles plus petites, chacune d'elle (et de manière fractale) étant composée de mailles encore plus petites, et ainsi de suite jusqu'au niveau de granularité requis par l'usage du modèle – avec la différence fondamentale par rapport aux décompositions habituelles que l'on y conserve à tout niveau les relations d'interdépendances latérales [588]. Une analogie mécanique possible serait celle de l'analyse par les éléments finis, dont les matrices dites de rigidité représentent précisément les interconnexions entre éléments.

À l'inverse, ou pourra tout aussi bien considérer la maille élémentaire comme représentant un acteur de notre réseau d'interfaces, lequel se construit par *agrégation* progressive d'acteurs, jusqu'à constituer des unités organisationnelles plus vastes, lesquelles s'agrègent à leur tour petit à petit jusqu'à donner le système complet. C'est un processus un peu analogue à celui pratiqué en mécanique des matériaux sous le terme d'homogénéisation périodique [589] : à partir d'une cellule élémentaire dont le comportement est caractérisé localement, on passe au comportement global d'une structure ; en changeant d'échelle, l'on conserve ou l'on retrouve la même structure [590].

Que ce soit par décomposition ou par agrégation, en vertu du principe hologrammique (présenté à la cellule c_{21}), on obtiendra un résultat analogue représenté

587. Nous les aborderons au § 11.2.4.

588. Nous y reviendrons à la cellule c_{32}, § 11.3 p. 334.

589. Voir par exemple nos travaux sur les matériaux composites [Kanoute et al. 1998]

590. La transposition analogique au domaine des organisations du passage d'une structure micro à une structure méso n'est pas sans soulever quelques questions [Klein, Dansereau et Hall 1994 ; Klein et Kozlowski 2000] que nous ne développerons pas ici.

à la Figure 11.7 par un tissu complexe en forme de cotte de mailles. La difficulté consiste alors à *repérer* les mailles dans un tel tissu, une difficulté qui est en fait un atout heuristique du modèle : on y perd quelque peu la position de l'acteur pour ne retenir qu'un réseau d'interfaces. Ce réseau n'est pas sans évoquer les « *réseaux de conversation* » de Winograd et Flores [1989]. Cet avantage sera mis à profit lors de la caractérisation du mode dual des interfaces complexes, abordé au § 11.2.4.

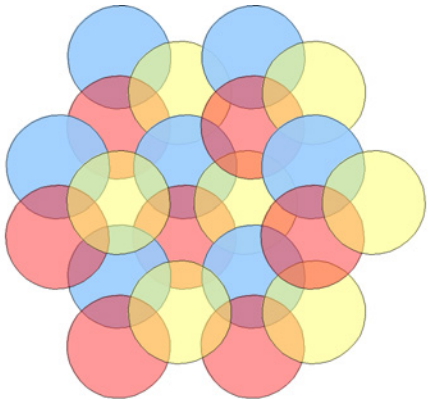


Figure 11.7 : Réseau d'interfaces en forme de "cotte" de mailles

Revenons à la maille élémentaire et au principe même d'interrelations qu'elle porte en elle. Selon le principe hologrammique , cette maille n'est pas affectée par le changement d'échelles du modèle de réseau en cotte de mailles, et peut donc aussi bien représenter un acteur (qu'il soit, exemple au hasard, un manageur technique, ou tout autre acteur, ou bien même encore un objet intermédiaire), ou une équipe, ou encore un projet ou une organisation. Une cotte de maille est composée de mailles tripolaires élémentaires, et peut elle-même être représentée par une maille tripolaire globale (selon une méthode de sous-structuration).

Prenons pour illustrer le cas du projet *Pieds et rails* d'ATLAS, représenté par le modèle dit concentrique de la Figure 9.4 p. 275. La maille élémentaire de la Figure 11.6 peut ainsi se lire à différents degrés ou niveaux, en vertu d'une décomposition ou d'une agrégation fractales, représentées à la Figure 11.8. Au niveau des acteurs humains, la maille la plus à gauche représente un acteur, les trois pôles étant les trois instances internes en phase avec les autres niveaux concentriques : le niveau supérieur, le niveau inférieur, et le niveau homologue. Ce sont les trois directions

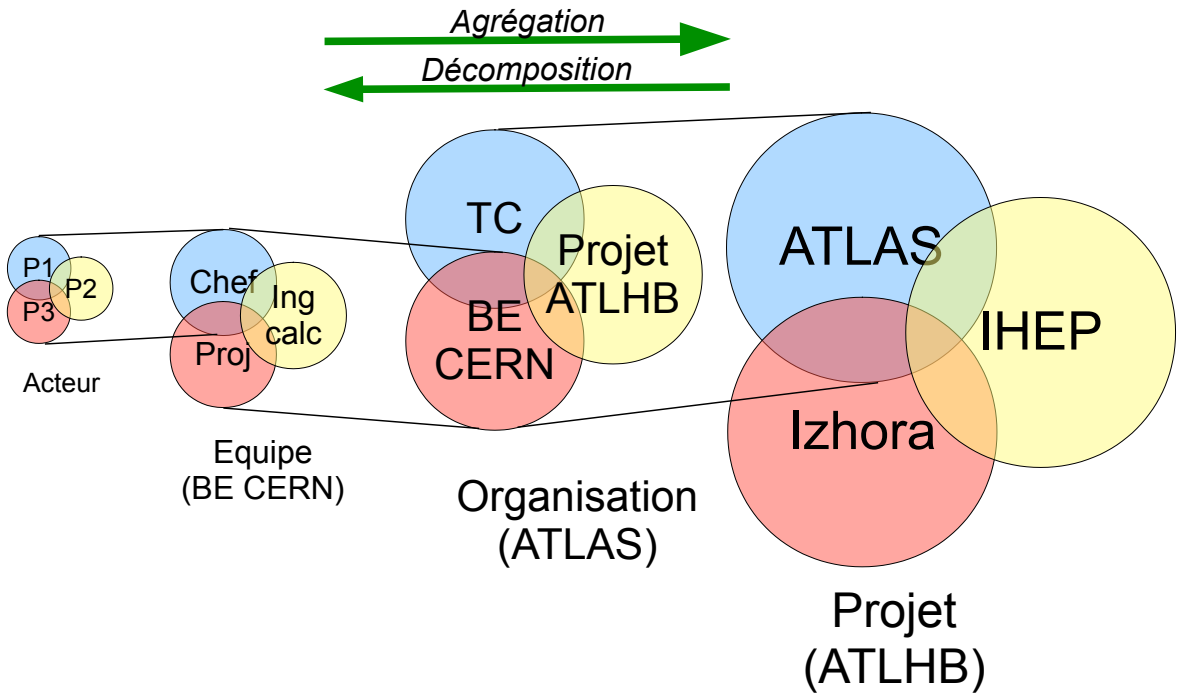


Figure 11.8: Décomposition/agrégation fractales

Représentation partielle dans le cas du projet ATLHB des *Pieds* d'ATLAS

(radiale centrifuge, radiale centripète, tangentielle) selon lesquelles le manageur technique se déplace dans le modèle concentrique, et s'interface dans la réalité du projet. Cette maille représente en fait n'importe quel acteur en interface avec les autres dans le réseau en cotte de mailles.

À un niveau un peu plus global, on trouve l'organisation d'équipe, le Bureau technique par exemple, avec les relations entre le chef du bureau d'études, le projeteur et l'ingénieur calculs. À un niveau encore un peu plus englobant, interne au CERN par exemple (non représenté à la Figure 11.8), nous avons vu (au chapitre 3) les interactions entre la Coordination technique d'ATLAS, le Bureau technique de la division de physique et la direction de cette division. Lors de l'étude de cas n° 0, cette dernière a joué le rôle d'interface entre ATLAS et le Bureau technique, et également à l'égard de tiers homologues d'ATLAS, comme l'expérience sœur CMS.

Au niveau de la Collaboration ATLAS, nous pouvons focaliser la maille sur les interrelations entre le BE du CERN, l'organisation du projet ATLHB des Pieds et la Coordination technique, dont la mission est de suivre au nom de l'ensemble de la Collaboration la bonne fin de la réalisation des projets du fonds commun. Au niveau global et inter-organisationnel, on peut aussi exploiter la maille comme étant la représentation du projet global dans sa phase de réalisation. Les trois acteurs sont alors les trois organisations concernées : ATLAS en donneur d'ordres, Izhora en exécutant, et IHEP chargé du suivi d'exécution. Il est intéressant d'identifier qui est porteur de quel pôle (en tant que représentant de la personne morale) au sein de chacun des organismes. Pour ATLAS, on pourrait proposer le coordinateur technique en pôle 3, le chef du bureau d'études en pôle 1, le chef de projet en pôle 2 ; pour Izhora, ce serait le chargé de projet en pôle 3, le chef d'atelier en pôle 1, et le bureau d'études en pôle 2 ; et pour IHEP nous aurions : le chef physicien en pôle 3, le bureau de vérification mandaté en pôle 1, et l'ingénieur-physicien en pôle 2. L'on voit toutefois que la réalité est plus complexe, et que cette question de représentant de la personne morale mérite d'autres développements.

En guise de synthèse, nous pouvons faire évoluer le modèle concentrique vers un modèle en cotte de mailles tripolaires comme le représente la Figure 11.9, directement dérivée de l'agrégation effectuée à la Figure 11.8. Ce modèle permet de rendre compte des interactions et des interfaces occultées par le premier modèle concentrique. Une fois complété, on obtient un réseau d'interfaces analogue à celui présenté à la Figure 11.7.

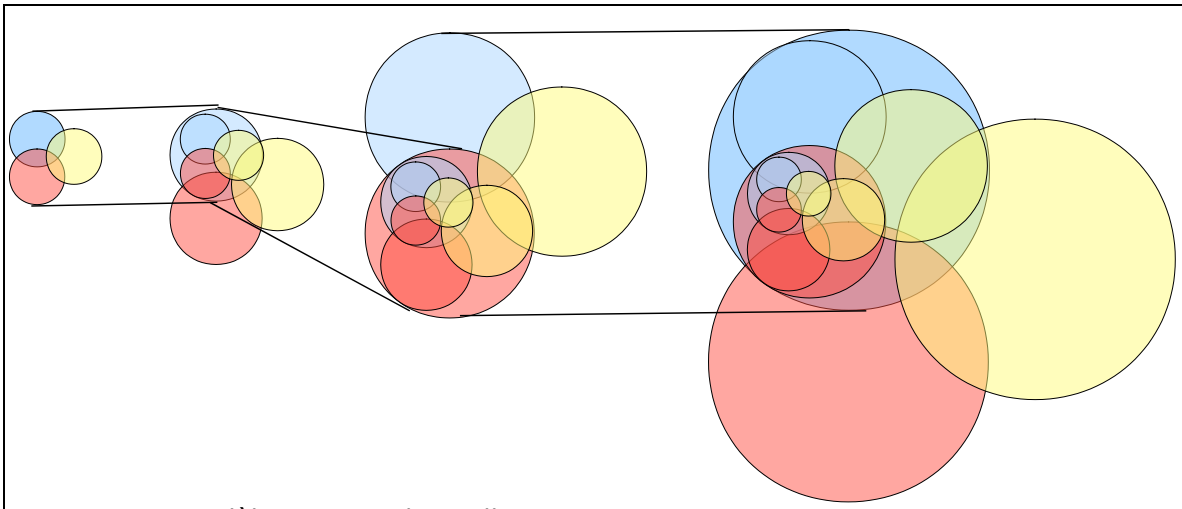


Figure 11.9: Modèle en cotte de mailles

Vue partielle pour le projet *Pieds* d'ATLAS

L'approche par réseaux d'interfaces présente le grand avantage de rappeler et de visualiser qu'une équipe, un projet, une organisation, ou pour mieux dire *chaque* niveau organisationnel n'existe qu'en tant qu'agrégation d'*individus* agissant en son sein, et parfois en son nom. Parler de collaboration inter-organisationnelle, c'est parfois occulter qu'il s'agit bien de collaborations *interpersonnelles*, Il s'agit tout au plus de tracer des motifs sur le tissu complexe, par ailleurs ni nécessairement connexe ni toujours continu. Comme le rappelle Martinet, « *les frontières de l'entreprise ne sont pas données. Elles sont des clôtures provisoires et partielles cognitivement et politiquement construites et décidées* » [Martinet 1993]. Et la complexité de ces collaborations provient de cet état de fait : c'est un tissu complexe, constitué d'un réseau sous-jacent d'interfaces. C'est pourquoi il est essentiel de mieux en caractériser les propriétés et d'en ébaucher un modèle.

b. Les pôles de la maille

Les trois pôles de la maille ne prennent tout leur sens qu'une fois insérés dans le contexte de la cotte, c'est-à-dire mis en relation avec les acteurs voisins dans le réseau. C'est pourquoi je propose la représentation "mésoscopique" (intermédiaire entre celle de la maille et celle de la cotte) donnée à la Figure 11.10. On voit alors apparaître de manière explicite les interfaces assurées par un acteur placé au centre de notre observation, et modélisé par la zone triangulaire curviligne *O*, le noyau de la Figure 11.6. Ces interfaces sont créées au travers des pôles respectifs de ses voisins *A*, *B* et *C*, figurés ici en pointillés. Les trois interfaces possibles ainsi établies sont celles où l'acteur central est *intermédiaire* entre deux autres acteurs pris parmi trois, comme exposé dans le schéma relationnel de la Figure 11.3 p. 316 (reprise à droite en regard de la représentation en mailles tripolaires à la Figure 11.10) : interface entre un donneur d'ordres et un homologue ; interface entre un donneur d'ordres et un subordonné ; ou interface entre un homologue et un subordonné.

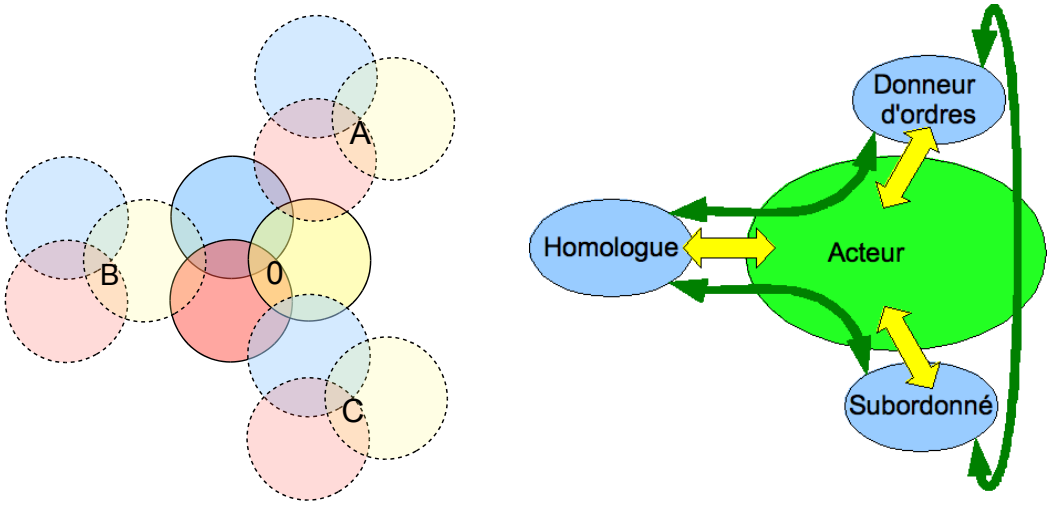


Figure 11.10: Représentation en mailles tripolaires des acteurs

Correspondance avec le schéma relationnel de la Figure 11.3 p. 316 reproduit en regard
O : acteur (d'interfaces) ; *A* : donneur d'ordres de *O* ; *B* : homologue de *O* ; *C* : subordonné de *O*

Agrandissons l'échelle pour faire apparaître plus clairement à la Figure 11.11 les différentes zones du modèle d'interfaces. Chaque acteur *A*, *B* ou *C* est en relation avec l'acteur central *O* à travers son pôle d'interface respectif : c'est le pôle $P1_C$ de l'acteur *C* qui est en relation avec l'acteur central, donneur d'ordres pour *C*, et le pôle $P2_B$ de l'acteur *B* qui est en relation avec *O* homologue de *B* ; idem pour *A* avec son pôle $P3_A$ et dont *O* est le subordonné.

La représentation topologique du modèle crée en outre à l'interface trois zones que nous n'avons pas encore définies : un triangle curviligne de même forme que les noyaux des acteurs ; et deux espaces en forme d'iris similaires à ceux des espaces d'échanges. Nous en verrons une possible signification au § 12.2 p. 347, lors de l'approfondissement de la notion d'espace d'échanges.

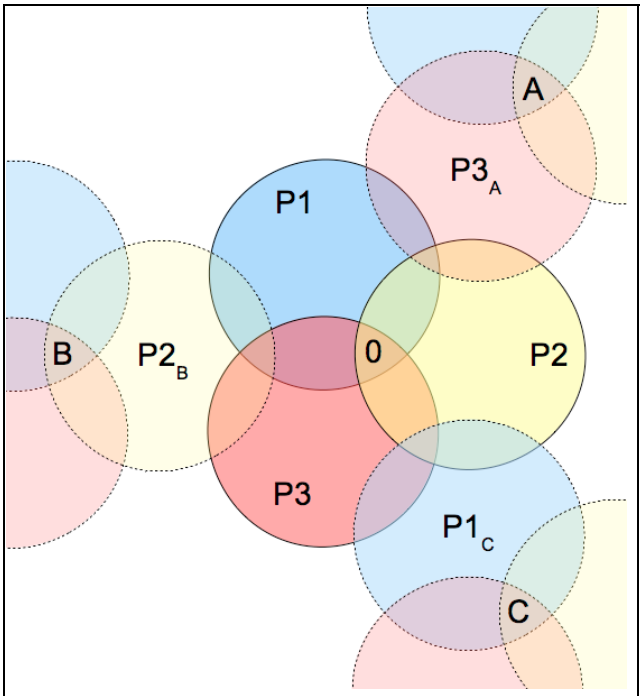


Figure 11.11 : Les pôles de l'acteur central et de ses voisins de réseau

Les pôles de l'acteur central sont non indicés, et leur tour est à trait continu.
Les pôles d'interface des voisins sont indicés *A* à *C*, et leur tour est représenté en pointillés.
P1 : pôle de ce que je fais faire
P2 : pôle de ce que je fais
P3 : pôle de ce que l'on me fait faire

11.2.4 Modélisation d'interfaces

Comment se créent les relations d'interface entre voisins de réseau à travers l'acteur central *O* ? Nous allons développer l'un de ces types d'interface, celui du rapport entre un donneur d'ordres *A* et un subordonné *C* à travers un acteur d'interface *O*. Les autres cas d'interfaces présentées dans la typologie présentée au § 11.2.5 se déduiront plus aisément de ce cas.

Si l'on se réfère au modèle concentrique de la Figure 9.4 p. 275, le cas développé ici est celui où le manageur technique crée le lien et fait l'interface entre l'un quelconque des acteurs du cercle le plus interne de ce modèle concentrique (qualifié de *top management*), avec un autre quelconque des acteurs du cercle le plus externe (*operational management*) : interface entre la Coordination technique d'ATLAS et les ateliers d'Izhora par exemple, ou encore entre la direction d'IHEP en Russie et le bureau d'études de la division EP au CERN.

L'enjeu de cette caractérisation d'interface consiste à déterminer l'équivalent, pour notre modèle interfacial à mailles tripolaires, des flèches du diagramme boîte / flèche du modèle relationnel représentées dans le schéma relationnel de la Figure 11.3 p. 316 (voir la correspondance présentée à la Figure 11.10). Est-ce un simple équivalent des flèches unidirectionnelles de l'analyse transactionnelle de Berne ? Comment enrichir notre modèle interfacial en y intégrant les deux composantes évoquées de transaction et de traduction ?

Considérons à la Figure 11.12 (en correspondance avec le schéma relationnel) le cas où l'acteur d'interface *O* établit une interface entre un donneur d'ordre *A* et un subordonné *C* au sein du réseau d'interfaces. L'interface que nous cherchons à modéliser relie les noyaux *A* et *C* des acteurs respectifs à travers le noyau de l'acteur central *O*. Cette interface fonctionne globalement selon deux sens : le sens descendant *top-down* des instructions (ou ordres, commandes, spécifications, demandes, …) que reçoit mon subordonné de mon donneur d'ordres ; ou le sens ascendant *bottom-up* des rapports de situation (ou informations, exécutions, fournitures, résultats, réponses, …) qu'envoie mon subordonné à mon donneur d'ordres. Que se passe-t-il lorsque je "*fais l'interface*" entre eux ? La voie que prennent les

échanges bidirectionnels via l'interface peut être modélisée par une flèche pleine directe, comme celle qui est dessinée à la Figure 11.3. Une telle flèche n'est pas la simple adjonction successives des deux flèches claires reliant le donneur d'ordres *A* à l'acteur d'interface *O*, puis celui-ci à un subordonné *C*.

De quoi cette flèche d'interface est-elle le représentant ?

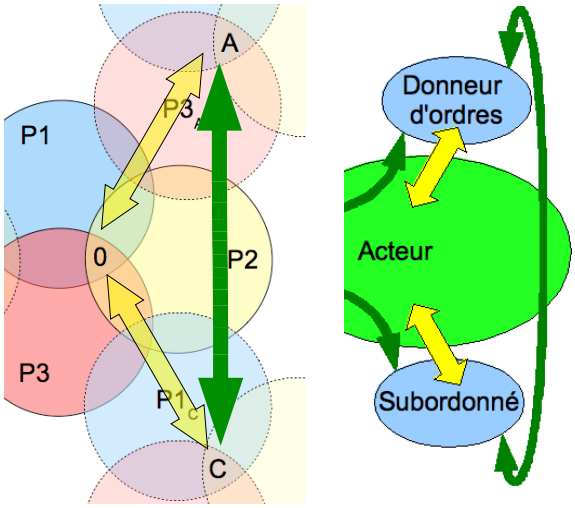


Figure 11.12: Interface entre *A* et *C* via *O*

Correspondance entre modèle interfacial et schéma relationnel

a. Le sens d'une flèche

Une parenthèse méthodologique s'impose, utile pour préciser le contexte épistémologique de son élaboration et pouvant être omise sans dommage pour la compréhension de notre modèle d'interface (qui se poursuit immédiatement après).

Nous avons évoqué à plusieurs reprises la question délicate du niveau critique de décomplexification. Une activité de modélisation est par nature une activité de décomplexification, puisqu'un modèle se veut porteur d'un sens donné à une réalité qui, sans lui, pourrait échapper à notre compréhension, et *a fortiori* à toute actionnabilité. Les diagrammes boîtes / flèches sont un grand classique des modélisations, et il convient de ne pas se méprendre sur le fait que j'y recoure ici. Je voudrais rendre compatibles deux désirs : celui de ne pas perdre la dimension complexe des questions modélisées, et celui d'atteindre le but de rendre nos savoirs actionnables dans un contexte opérationnel, celui d'un agir ↔ penser qui constituerait les premiers éléments d'une ingénierie complexe de la concourance.

Quel est, dans ce balancement dialogique, le *sens* d'une flèche ? Comment dépasser cette dichotomie entre, d'une part, la conservation de la richesse des relations effectives sur le terrain, riches, variées et inattendues telles que nous les avons présentées dans la partie II ; et d'autre part la nécessité de construire un modèle opérant qui nous permette dans la partie IV un retour sur le terrain muni de quelques savoirs actionnables sous des formes manipulables par les ingénieurs ? Cet intermède méthodologique constitue donc, si l'on veut, des « *prolégomènes à toute science future qui voudra se présenter comme métaphysique* » des rapports humains [591]: il convient de préciser le sens de ces flèches. Le modèle interfacial que nous élaborons est conçu par un ingénieur pour des ingénieurs. Il doit donc parler le langage des ingénieurs (voir également l'Introduction à la partie III, p. 254 : la géométrie est le langage privilégié de la conception). Or, les ingénieurs ont souvent tendance (nous ne porterons pas de jugement de valeur) à ramener la gestion des rapports humains perçus uniquement à travers des schémas de transmission. La modélisation de ces relations par des flèches pourrait laisser accroire que j'ai cédé à ce travers. D'où cet avertissement méthodologique et épistémologique : une telle réduction n'est pas dans mon propos.

Les représentations qui suivent sont une tentative de rationaliser *a posteriori* quelque chose que nous savons ne pas être rationnel. Au regard des interactions observées dans la partie II, il nous faut garder en tête qu'au lieu d'être bien droites et continues, les flèches décrivant les relations entre boîtes devraient plutôt être

591. Allusion non fortuite à Kant.

biscornues, déformées, partielles, fragiles, et ne pas oublier que d'autres s'égarent, qu'elles se perdent même, puis reviennent par hasard ou par des voies détournées. Quant aux boîtes, leurs frontières sont floues, épaisses, lacunaires, changeantes…

Or, c'est précisément l'objet de la modélisation (en particulier scientifique) que de s'efforcer de rationaliser ce qui ne peut pas nécessairement l'être. Pour tenter d'y parvenir, nous avons fait le choix du recours à une vision mésoscopique, qui descende dans le détail micro de l'interaction entre acteurs tout en conservant le lien avec les relations globales macro au niveau managérial. En modélisant au niveau le plus élémentaire chaque interaction, comme nous nous apprêtons à le faire, nous nous donnons un outil qui permette ensuite, à un niveau plus global mais *relié* aux précédents, de reconstituer les relations entre acteurs dans leurs non-linéarités, dans leur diversité, dans leur égarement apparent, donc dans leur complexité et leur richesse humaine.

Ce modèle interfacial montrera ses limites dès le présent chapitre (que nous dépasserons lors du chapitre 12), et lors de son exploitation à la partie IV [592].

b. *Deux modes d'interfaces*

Revenons plus prosaïquement à notre modèle en mailles à trois pôles, et aux relations (bidirectionnelles) entre les acteurs *A* et *C* voisins de *O* dans le réseau d'interfaces. Nous allons préciser la manière dont ces relations s'établissent entre *A* et *C*, et le rôle de *O* dans l'interface ainsi constituée : rôle de *commissionnaire* dans le premier mode direct, et rôle de *médiateur* dans le second mode composé [Vinck 1999a]. Nous nous intéresserons principalement à ce dernier mode, celui dans lequel l'acteur d'interface apporte une valeur ajoutée.

Prenons le cas d'une instruction descendant de *A* vers *C*. Dans notre modèle en mailles tripolaires, les échanges vont prendre un chemin qui prend en compte les différents domaines traversés à partir du noyau de *A*, à savoir le pôle $P3_A$, puis l'espace d'échanges (bilatéral) *E3*, et ce jusqu'au noyau de l'acteur d'interface *O*. Le chemin ressort ensuite du noyau, et traverse l'espace d'échanges *E1*, avant de rejoindre le noyau *C* à travers le pôle $P1_C$ sous la forme d'une instruction, ou d'une initiation (au sens étymologique : ordre de mise en marche). Elle est donc constituée d'une première transaction entre *A* et *O*, puis d'une deuxième transaction entre *O* et *C*. Ces deux transactions sont représentées à la Figure 11.13 par les flèches *S* (pour tran**S**action) : la flèche *S3* modélise la transaction entre *A* et *O* à partir du pôle 3 de *A* jusqu'au noyau de *O* (à travers l'espace d'échanges *E3*) ; et la flèche *S1* modélise la transaction entre *O* et *C* à partir du noyau de *O* jusqu'au pôle 1 de *C* (à travers l'espace d'échanges *E1*).

L'interface ainsi formée est donc constituée de deux *transactions* successives, sans

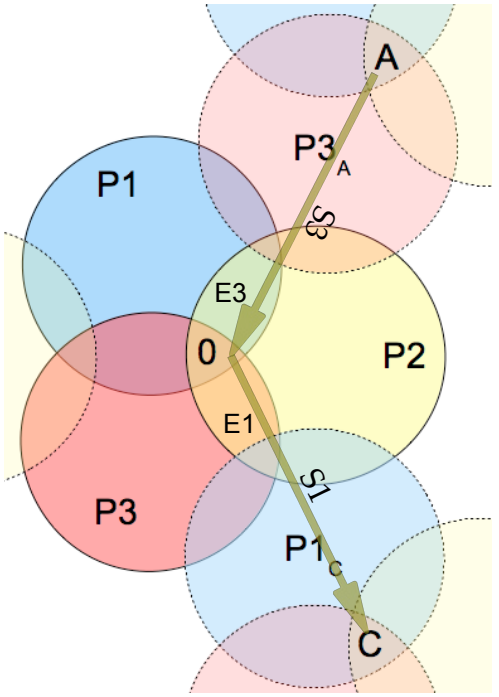


Figure 11.13 : Interface directe

L'interface entre donneur d'ordres *A* et subordonné *C* à travers l'acteur d'interface *O* est directe.

L'acteur d'interface joue un rôle de *commissionnaire*.

592. Au chapitre 16, nous nous appliquerons à lui adjoindre un hypercompas trialectique déjà évoqué à la note 498 p. 269.

traitement complémentaire intermédiaire au sein de *O*. Ce premier mode est qualifié de direct : la contribution de *O* à l'interface entre *A* et *C* n'ajoute pas de valeur. Par analogie à la terminologie retenue pour les objets intermédiaires, nous qualifions ce mode de *commissionnaire*.

Le second mode est celui au cours duquel s'intercale de manière complémentaire une opération interne à l'acteur d'interface *O*, l'opération de *traduction*. Conformément à la terminologie sur les espaces intermédiaires, nous qualifierons ce mode composé avec traduction de mode *médiateur*. Afin de représenter topologiquement cette opération de traduction et de matérialiser le passage d'un pôle de type *P3* (“*ce que l'on me fait faire*”) à un pôle de type *P1* (“*ce que je fais faire*”), le flux entrant (de spécification, dans notre cas) en provenance du premier protagoniste ne va pas passer directement de l'espace d'échanges *E3* à l'espace d'échanges *E1*. Il va transiter *à travers* les pôles internes de l'acteur d'interface *O*, comme indiqué à la Figure 11.14, et être transformé avant de parvenir à l'autre protagoniste de la relation. La spécification entrante par la transaction *S3* va bénéficier de la plus-value de l'interface apportée par l'acteur d'interface : nous allons la faire entrer dans le pôle *P3* interne, et faire passer la flèche décrivant sa transmission à travers le pôle *P3* de *O*, puis jusqu'à son pôle *P1*. L'espace d'échanges *E2* (inactif pour l'interface considérée) est alors traversé non pas longitudinalement (comme c'est le cas pour les deux flèches *S1* et *S3* modélisant une transaction lorsqu'elles traversent leurs espaces d'échanges respectifs), mais transversalement : c'est une opération de *traduction*. Le cheminement est représenté par la flèche *D2* (tra**D**uction de 3 à 1) en forme d'alpha entre *P1* et *P3*.

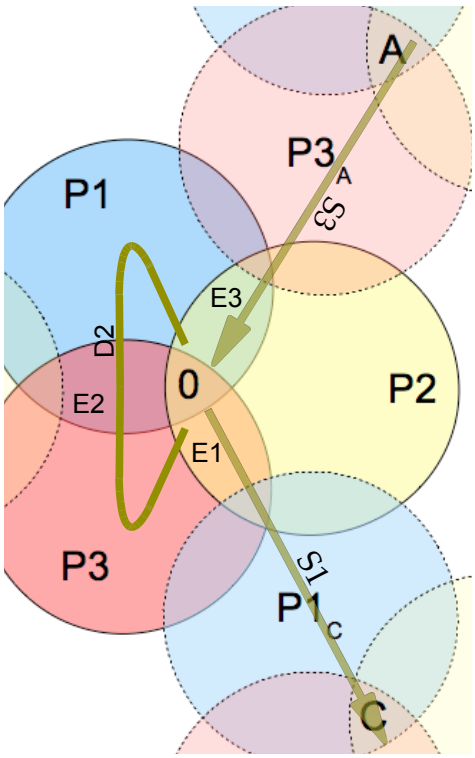


Figure 11.14 : Interface composée

L'opération de traduction *D2* est intercalée entre les transactions d'entrée et de sortie de l'interface.
L'acteur d'interface joue un rôle de *médiateur*.

L'interface ainsi constituée est composée d'une *transaction entrante*, suivie d'une *traduction*, puis d'une *transaction sortante*. Cette composition est générale à tous les types d'interfaces. L'interface étant de surcroît bidirectionnelle, il faut imaginer que les transactions entrante et sortante échangent régulièrement et dynamiquement leur rôle au cours du déploiement effectif de l'interface. La Figure 11.15 reprend les deux figures précédentes afin de montrer la différence au niveau du

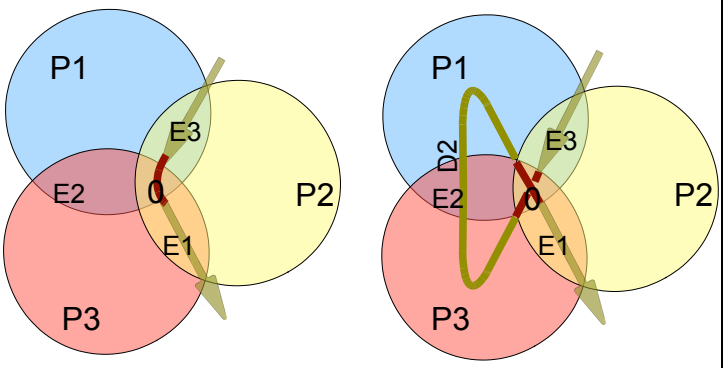


Figure 11.15: Comparaison des modes direct *commissionnaire* et composé *médiateur*

noyau de *O* entre les cas d'interface directe en mode commissionnaire, ou composée en mode médiateur.

Dans le prolongement de nos réflexions sur le sens d'une flèche (p. 324), il convient ici de nuancer, et souligner que les figures de médiateur et de commissionnaire sont des idéaux-types : leur caractérisation sur le terrain est plus délicate.

c. Une traduction en adaptation d'impédance

Dans le cas traité ci-dessus d'une opération de traduction particulière entre les pôles 1 et 3 de l'acteur d'interface, nous dénommerons cette traduction *adaptation d'impédance.* Ce terme provient d'une analogie avec l'acoustique que j'explicite brièvement : l'impédance acoustique est le rapport entre la pression et la vitesse de l'air, et elle exprime une forme de résistance, d'inertie opposée à la propagation du son. Par analogie, cette adaptation d'impédance exprime ici l'adaptation d'un type de langage à un autre, d'un type de sensibilité à un autre, d'un niveau cognitif à un autre. C'est une égalisation des résistances.

Nous avons constaté dans la partie II combien il était fréquent que les acceptions des physiciens ne soient pas directement compréhensibles pour les ingénieurs, et réciproquement, que les contraintes des ingénieurs ne soient pas perceptibles dans le monde des physiciens ; ou encore, que les demandes plus ou moins explicites de la Coordination technique devaient être interprétées et explicités pour pouvoir être traitées soit par le bureau d'étude soit par l'atelier russe. Il s'agit donc de traduire, en *adaptant* le message à la sensibilité et à la capacité cognitive des interlocuteurs : ce qui intéressera les uns laissera les autres indifférents, même si l'impact de ces préoccupations peut être effectif. Ce qui sera clair pour l'un plongera l'autre dans la perplexité s'il n'est pas muni des clés nécessaires au déchiffrage du message. Telle est l'utilité de cette adaptation d'impédance.

11.2.5 Une typologie d'interfaces

En procédant de manière analogue à la démarche suivie précédemment, il est possible de modéliser les deux autres types d'interfaces : interface entre un donneur d'ordre *A* et un homologue *B*, ou interface entre un homologue *B* et un subordonné *C*. La modélisation des interfaces peut également s'élargir à ces cas (assez fréquents en pratique) d'interfaces dites “bouclantes”, c'est-à-dire entre deux instances donneuses d'ordres de même niveau *A'* et *A''*, entre deux homologues *B'* et *B''*, ou entre deux subordonnés *C'* et *C''* [593].

Chacune des interfaces orientées (c'est-à-dire, dirigée d'un acteur vers un autre) est composée selon la formule :

Interface orientée = transaction entrante + traduction + transaction sortante

Pour définir les six types d'interfaces possibles créées par un acteur d'interface entre deux acteurs quelconques d'un réseau d'interface, il est nécessaire d'introduire d'autres composantes modulaires en termes de traductions et de transactions. Nous présentons tout d'abord les différents types d'interfaces, puis ces composantes supplémentaires, avant d'en synthétiser la composition.

Les interfaces *orientées* sont en fait au nombre de neuf. Elles sont résumées dans le Tableau 11.1. Le cas précédent correspond à l'interface orientée « *Verticale descendante* ». Couplée à l'interface orientée réciproque « *Verticale ascendante* », elle forme alors une interface (non orientée bidirectionnelle) « *Verticale* », reliant ainsi au travers de l'acteur d'interface deux acteurs placés à la verticale l'un de l'autre, les

593. On imaginera alors topologiquement un dédoublement des espaces d'échanges entre l'acteur d'interface et chacun de ses deux interlocuteurs, homologues entre eux. Nous y reviendrons en détails au chapitre 12, § 12.2.1 p. 348, voir en particulier la Figure 12.3.

acteurs *A* et *C* de la Figure 11.10. Les types d'interfaces orientées sont résumées au Tableau 11.1.

De \ à	Donneur d'ordre	Homologue	Subordonné
Donneur d'ordre	Bouclante vers le haut (*top-down bottom-up*)	Latéralo-supérieure descendante (*top-down middle-out*)	Verticale ascendante (*bottom-up bottom-up*)
Homologue	Latéralo-supérieure ascendante (*middle-in bottom-up*)	Bouclante latérale (*middle-in middle-out*)	Latéralo-inférieure descendante (*middle-in top-down*)
Subordonné	Verticale descendante (*top-down top-down*)	Latéralo-inférieure ascendante (*bottom-up middle-out*)	Bouclante vers le bas (*bottom-up top-down*)

Tableau 11.1 Les neuf types d'interfaces orientées

Les interfaces bidirectionnelles sont constituées d'un couple symétrique d'interfaces orientées, et elles sont de nature complexe. Avec les enseignements du chapitre 10, nous sommes en mesure de les décrire en termes de *boucles dialogiques* : les interfaces fonctionnent en effet globalement en boucles récursives entre les deux acteurs ainsi interfacés. Le manageur technique, en tant qu'acteur d'interface, est le moteur de cette mise en relation complexe, en équilibration dynamique. C'est tout l'intérêt du modèle proposé et de la décomposition complexe (où chaque composant est lié à chaque autre de manière systémique, à travers le triplet de deux transactions et d'une traduction) que de s'attacher à en préciser les différentes contributions simultanées, concurrentes, antagonistes et convergentes – bref, *dialogiques*.

Détaillons les composantes modulaires, transactions et traductions, qui nous permettent de construire ces interfaces.

a. *Types de transactions*

Lors de l'établissement du premier cas « *Vertical descendant* », nous avons déjà décrit deux types de transaction : la transaction entre l'acteur d'interface et un subordonné, et la transaction entre un donneur d'ordre et l'acteur d'interface. Le troisième type de transaction possible est celui de la transaction entre l'acteur d'interface et un homologue.

Dès lors, en effet, qu'un homologue est en relation avec notre acteur d'interface, intervient la transaction latérale, quelque peu négligée dans la littérature au profit des relations verticales. Elle est parfois qualifiée de *middle-out* [Kinchla et Wolfe 1979] ; osons l'extrapolation : nous dénommerons *middle-in* le cas de parcours centripète (entrant). Cette transaction avec un homologue est typiquement constituée de la tâche de synchronisation de mon action sur celle de mes pairs (*middle-in*), ou de partage d'informations envoyées à mes pairs pour qu'ils se synchronisent sur mon action (*middle-out*). Les six transactions possibles sont résumées graphiquement à la Figure 11.16.

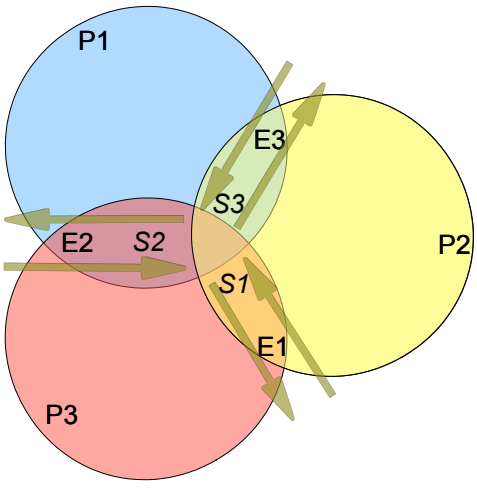


Figure 11.16: Les six types de transaction

Dans l'ordre sortie / entrée :
S1 : initiation / vérification
S2 : partage / synchronisation
S3 : orientation / spécification

Ces transactions sont légèrement différentes selon qu'elles sont parcourues dans le sens entrant ou sortant. Il faut les considérer comme des couples indissociables, le flux entrant et le flux sortant étant dialogiquement reliés et en équilibre dynamique. Nous reviendrons lors du chapitre 12 sur la manière dont ces flux traversent les espaces d'échanges correspondants.

b. Types de traductions

Nous avons vu dans le premier cas « *Vertical descendant* » l'apparition d'une traduction de type *D2* « adaptation d'impédance », entre le pôle interne 1 "*ce que je fais faire* " et le pôle interne 3 "*ce que l'on me fait faire*". Les deux autres types de traductions entre les deux autres couples de pôles sont respectivement : la traduction de type « *répartition / rassemblement* » entre le pôle 1 et le pôle 2 "*ce que je fais*" ; et la traduction de type « *tri / reconstitution* » entre les pôles 2 et 3. La Figure 11.17 résume graphiquement les trois types de traduction.

En toute rigueur, ces opérations de traductions ne sont pas symétriques (c'est-à-dire qu'elles devraient, elles aussi, dépendre du sens dans lequel elles sont parcourues). Le modèle offre toutefois la possibilité de simplifier cette hypothèse : seul l'usage du modèle nous guidera, l'épreuve de la pratique permettant de stabiliser les dénominations. Il est en effet délicat de distinguer ces différents types de traductions. C'est aussi pour rendre la différence dans cette réversibilité que nous avons employé des couples de mots [594].

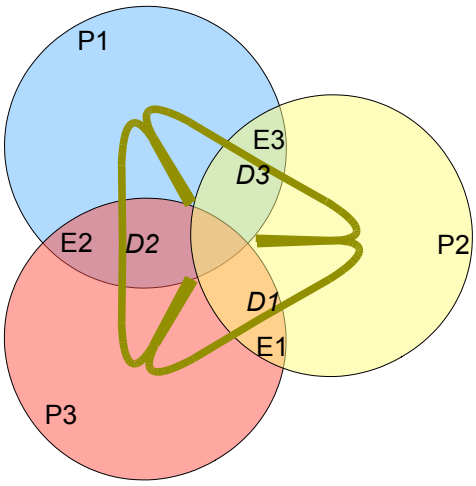


Figure 11.17: Les trois types de traduction

D1 : tri / reconstitution
D2 : adaptation d'impédance
D3 : répartition / rassemblement

Les traductions unidirectionnelles fonctionnent simultanément et dialogiquement. L'adaptation d'impédance de la traduction *D2* est un terme qui contient lui-même sa propre dialogique. Les autres traductions s'écriront plus aisément (voir aussi le Tableau 11.2) :

$$D1 = \Omega\ (Tri,\ Reconstitution) \text{ et } D3 = \Omega\ (Répartition,\ Rassemblement).$$

L'opération de traduction *D1* intervient entre le pôle *P2* "*ce que je fais*" et le pôle *P3* "*ce que l'on me fait faire*". Entre ces deux pôles, il s'agit donc de trier parmi ce que l'on souhaite « *nous* » faire faire (à mes homologues et à moi) : trier entre ce que je vais faire moi-même d'une part, et ce que d'autre part mes homologues vont faire. Il s'agit ensuite de faire en sorte (c'est l'objet de la transaction sortante qui complètera l'interface correspondante) que ce tri soit partagé avec mes homologues. En retour, il s'agit de reconstituer l'ensemble de la tâche. La vérification de sa complétude conformément à la demande initiale est l'objet de la transaction qui complète l'interface considérée. D'où l'opération *D1 = Ω (Tri, Reconstitution)*, qui est une opération de traduction entre tâche globale et sous-tâches que nous considérerons comme une traduction préparatoire à la ***coopération***.

De manière analogue, l'opération *D3* intervient entre le pôle *P2* "*ce que je fais*" et le pôle *P1* "*ce que je fais faire*". Elle est donc assez analogue à la précédente, à ceci

594. L'approche trialectique exposée au chapitre 16 procède par ce jeu d'associations / oppositions.

près que, cette fois, il s'agit de se partager les ressources, de définir les frontières au sein d'un ensemble de subordonnés, et ensuite en retour de rassembler ce qui avait été partagé pour en vérifier la cohérence (ce qui est l'objet de la transaction sortante). L'opération de traduction *D3* est donc bien une opération *D3 = Ω (Répartition, Rassemblement)*, que nous pouvons assimiler à une traduction préalable à la ***coordination***.

Il est dans la nature des composants complexes de ne pouvoir être analysés en propre, isolément. C'est pourquoi les dénominations proposées ne sont pas encore stabilisées, et qu'elles constituent à ce stade une suggestion ouverte à éprouver.

c. *Traductions en boucles*

Le cas des interfaces bouclantes implique une traduction *interne à un pôle*. Il est représenté à la Figure 11.18. Nous qualifions ces traductions en boucles respectivement de boucle de *conciliation* au sein du pôle *P1 "ce que je fais faire"* ; boucle de *médiation* au sein du pôle *P2 "ce que je fais"* ; et boucle d'*arbitrage* au sein du pôle *P3 "ce que l'on me fait faire"*. Ces dénominations soulignent les nuances subtiles entre ces trois boucles, cette proposition de désignation étant à affiner.

Il serait en fait judicieux de considérer ces trois traductions bouclantes comme étant chacune constituée des trois modalités possibles, la modalité majeure donnant son nom à la triade, devenue tétrade (au sens de Wunenburger, voir § 11.1.3 p. 311). Ainsi par exemple, faire œuvre de conciliation nécessite à la fois des dimensions de médiation et d'arbitrage.

Puisqu'on en est à boucler, et afin de montrer les couplages entre ces trois types de boucles, avec une dominante pour chacune d'elles, nous pourrions noter ces boucles sous la forme dialogique explicitement récursive [595] :

$$B_i = \Omega\ (B_i, B_1, B_2, B_3).$$

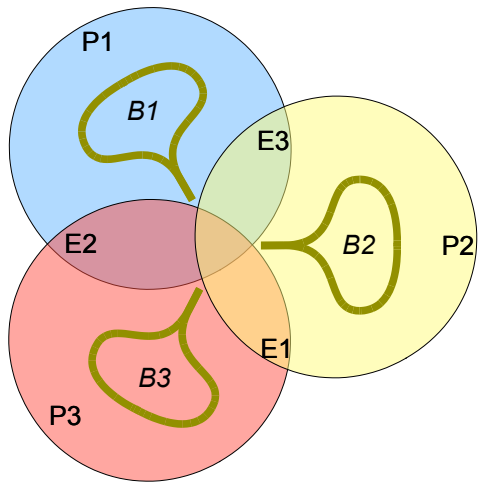


Figure 11.18: Les trois traductions en boucles internes

B1 : conciliation
B2 : médiation
B3 : arbitrage

d. *L'ensemble des relations*

Les différents types de transactions et de traductions sont synthétisés dans le Tableau 11.2, qui lie les pôles d'interfaces d'un acteur à un autre acteur du réseau d'interfaces. Les transactions S_i apparaissent dans la première ligne et la première colonne de la matrice 4x4 ainsi décrite, c'est-à-dire dans les cellules reliant un pôle d'un acteur extérieur avec le pôle de même nature de l'acteur d'interface considéré. Les traductions en boucles B_i (à l'intérieur d'un pôle donné de l'acteur considéré) remplissent les termes diagonaux, les termes non diagonaux D_i (entre pôles internes de l'acteur considéré) constituent les autres types de traductions. On obtient ainsi quinze types de relations. Avec l'hypothèse simplificatrice que le sens

595. L'on pourrait également s'interroger sur la subtile nuance entre boucle de *médiation* et interface indirecte sur le mode *médiateur*. Toutes ces considérations mériteraient des développements hors de propos ici. Le programme de recherche que nous proposons sur ce modèle d'interfaces est loin d'être achevé, nous en resterons donc là pour l'instant.

dans lequel les traductions sont parcourues n'en change pas la nature profonde, on réduit ce nombre à douze, la sous-matrice 3x3 des traductions entre pôles internes étant alors symétrique.

De / à	Pôle extérieur	Pôle 1	Pôle 2	Pôle 3
Pôle extérieur	*Pas de relation à travers l'acteur*	S1 *bottom-up* Vérification	S2 *middle-in* Synchronisation	S3 *top-down* Spécification
Pôle 1 (ce que je fais faire)	S1 *top-down* Initiation (Mise en route)	B1 Arbitrage	D3 Coordination	D2 Adaptation d'impédance
Pôle 2 (ce que je fais)	S2 *middle-out* Échange	D3 Coordination	B2 Médiation	D1 Coopération
Pôle 3 (ce qu'on me fait faire)	S3 *bottom-up* Orientation (Vue d'ensemble)	D2 Adaptation d'impédance	D1 Coopération	B3 Conciliation

Tableau 11.2 Boucles, traductions et transactions

Chaque type d'interface est donc la composition d'une transaction entrante (vers l'acteur d'interface), d'une traduction (interne à l'acteur d'interface), et d'une transaction sortante. La composition des interfaces est donnée dans le Tableau 11.3.

Interface	Transaction entrante	Traduction	Transaction sortante
Bouclante vers le haut	S3 *top-down*	B3 Conciliation	S3 *bottom-up*
Bouclante latérale	S2 *middle-in*	B2 Médiation	S2 *middle-out*
Bouclante vers le bas	S1 *bottom-up*	B1 Arbitrage	S1 *top-down*
Verticale ascendante	S1 *bottom-up*	D2 Adaptation d'impédance	S3 *bottom-up*
Verticale descendante	S3 *top-down*		S1 *top-down*
Latéralo-supérieure ascendante	S2 *middle-in*	D1 Coopération	S3 *bottom-up*
Latéralo-supérieure descendante	S3 *top-down*		S2 *middle-out*
Latéralo-inférieure ascendante	S1 *bottom-up*	D3 Coordination	S2 *middle-out*
Latéralo-inférieure descendante	S2 *middle-in*		S1 *top-down*

Tableau 11.3: Composition des interfaces

Nous avons cherché à conserver au modèle d'acteur d'interface une généralité aussi élevée que possible. Il est une généralité que j'aurais aimé ajouter, c'est celle de m'affranchir de la référence à la verticale [596]. Je l'ai toutefois conservée, pour aider à la compréhension. Dans un réseau d'interfaces, il ne faut pas donner de valeur normative aux notions de haut et de bas. Ce qui est en haut n'est pas supérieur *sui generis*, et n'a de valeur qu'en raison du réseau.

596. Le poète, à sa manière, a su relativiser cette référence à la verticale : « *Up and down / And in the end it's only round and round and round / Haven't you heard it's a battle of words ?* » (« Haut et bas / Et en fin de compte ça ne fait que tourner et tourner et tourner / N'as-tu pas compris que c'est une bataille de mots ? ») *Us and Them*, Roger Waters, Rick Wright, 1973.

Pour rendre compte de la complexité des interfaces réelles, il reste à appliquer ce modèle aux quatre types d'interfaces évoquées au début de cette section (§ 11.2.1 p. 312) : personnelle, organisationnelle (et leur composée : managériale), interface système, et enfin interface cognitive (en terme de domaine de compétences). C'est une combinatoire très vaste, dont l'analyse détaillée sort du propos de cette thèse. Le modèle proposé donne des outils pour en assurer une exploration systématique tout en conservant le caractère complexe des interfaces réelles. L'objectif d'un acteur d'interface est d'atteindre et de maintenir l'équilibre entre ces différentes interfaces, qui sont les boucles dialogiques du chapitre 10. Lorsque cet équilibre entre acteurs est rompu, le modèle nous éclaire encore sur quelques situations limite, que nous évoquons brièvement dans la dernière partie de cette section.

Quel usage ferons-nous, dans le cadre de la présente thèse, du modèle que nous avons élaboré ? Tel quel, il ne présente pas encore tout à fait le caractère d'un savoir actionnable, ou pour le dire autrement, son impédance doit encore être adaptée ! Il nous faut donc, d'une certaine manière, le traduire à son tour. C'est ce que nous ferons dans les deux cellules adjacentes de notre matrice méthodologique structurant la partie III. Dans la prochaine cellule c_{32}, dernière de la colonne centrale (§ 11.3 p. 334), nous prolongeons l'application du principe hologrammique en précisant les relations d'interdépendances, à savoir les liens d'interfaces systémiques. Et dans la deuxième cellule de la dernière colonne, la cellule c_{23}, nous détaillerons le moyen de construire les espaces d'échanges introduits dans la présente cellule. Ces deux cellules nous mèneront à l'ultime cellule c_{33} : nous y achèverons la transformation de notre modèle d'acteurs d'interface en un savoir actionnable lié au processus *Ω (Conception, Intégration)*.

11.2.6 Situations limites du modèle

Le modèle en mailles à trois pôles de l'acteur d'interface présente un certain nombre d'autres paramètres possibles que nous n'avons pas évoqués (et sans doute d'autres encore, qui restent à identifier). L'un de ces paramètres est la taille respective des pôles, autrement dit le rayon des disques, qui évoquerait par exemple le niveau de compétences d'un acteur dans la dimension correspondante, et donc sa capacité plus ou moins grande à effectuer les opérations de traduction. Un autre paramètre pourrait être la distance du centre des pôles au noyau, ce paramètre influant sur la taille des espaces d'échanges et donc sur leur capacité à supporter ou non des transactions de qualité. En jouant sur ces six paramètres, nous pourrions ainsi dresser différents profils d'acteurs d'interfaces. Développer ces perspectives sort du cadre du présent travail et en constitue des prolongements possibles : ce pourrait être un premier pas vers une quantification du modèle [597].

Même en restant sur des considérations qualitatives, il est intéressant de s'imaginer ce que signifie un acteur d'interface idéal dans le cadre de la caractérisation du manageur technique, qui reste notre objectif. J'ai évoqué lors de la cellule c_{31} (§ 10.6 p. 301) le terme de *congruence*. Il s'agirait ainsi de constituer un noyau centré sur trois pôles de taille équivalente, permettant de créer des espaces d'échanges efficaces conduisant à la constitution d'interfaces avec ses voisins de réseau qui soient pleinement fonctionnelles – nous retrouvons un manageur technique moteur de ces trois boucles dialogiques complexes *simultanées* avec ses donneurs d'ordre, ses homologues et ses subordonnés.

Le modèle peut-il rendre compte de situations limites inverses ? Imaginons deux scénarios. Le premier scénario est le cas où les pôles rétrécissent et s'atro-

597. Une telle quantification n'est pas notre propos : la quantophrénie, cet « *amour des méthodes quantitatives en management* », pour reprendre l'expression de Bourboulon [2011, 17] n'est pas dans la ligne de l'épistémologie revendiquée par les présents travaux.

phient, ou que les noyaux s'éloignent. La transaction n'est alors plus effective, il y a en quelque sorte déchirure du tissu complexe d'interfaces, et une faiblesse ou une faille apparaît dans la cotte de mailles. Même une interface réduite au mode commissionnaire n'est plus requise. En termes organisationnels, cela signifie la rupture d'un canal de communication, avec toutes les conséquences en termes de déficits de transmissions d'information, malentendus et dysfonctionnements possibles.

Le second scénario, opposé au précédent, est le cas où les pôles respectifs des voisins dans le réseau d'interfaces grossissent au point qu'ils englobent l'acteur d'interface et que les voisins entrent en contact direct. On se trouve dans la configuration indiquée dans la toute première case du Tableau 11.2 : une absence d'interface entre deux acteurs. C'est le cas par exemple quand la valeur ajoutée (l'opération de traduction) apportée par l'acteur d'interface n'est pas suffisante. Dans le cas de la traduction par adaptation d'impédance (ou par explicitation de la spécification, pour simplifier), si la différence d'impédance (la compréhensibilité de l'instruction descendante ou du rapport montant) est suffisamment faible, on comprend bien qu'aucune interface n'est plus nécessaire. L'utilité d'un acteur d'interface disparaît à ce moment entre ces deux acteurs, qui étaient auparavant plus distants dans le réseau d'interfaces.

Il faut donc voir la cotte de mailles globale, représentant le réseau d'interfaces, comme une cotte dynamique, qui évolue au fur et à mesure du contexte et des capacités mutuelles des différents acteurs à nouer des interfaces. Cette image rappelle aussi que, dans un réseau d'interfaces, tout acteur est acteur d'interface, appelé à se déplacer dans le réseau au gré des besoins. Nous pourrions alors ainsi caractériser le *manageur technique* comme un *acteur d'interface particulier* dont les trois pôles sont équidistants et de taille équivalente, autrement dit doté d'espaces d'échanges propices à l'établissement de boucles dialogiques complexes.

Un cas très limite de la disparition de l'interface est celui du *burn out*, le terme courant pour le « *syndrome d'épuisement professionnel* » [Peters et Mesters 2007]. On peut lire ce cas limite avec les outils de notre modèle. La plupart du temps, un manageur technique possède un *topos* (une place dans la cotte) bien établi, et sa valeur ajoutée est importante : ses opérations de traduction verticales ou latérales sont nécessaires, voire vitales pour un projet. Pour des raisons diverses, il se peut cependant que cette valeur ajoutée ne soit pas perçue comme telle, et il va alors se retrouver court-circuité, en quelque sorte "exclu du jeu" : les acteurs établissent un contact direct contre le gré de l'acteur d'interface, qui n'a littéralement plus *lieu d'être*, au sens propre du terme. Une autre source possible de *burn out* est que l'énergie exigée par l'exécution des opérations de traduction soit tellement élevée qu'elle se porte au détriment de la qualité des transactions : on parlera alors d'irritabilité, d'indisponibilité relationnelle… Après tout, comme le soulignait un physicien d'ATLAS, « *if you want to have an easy life, working on an LHC experiment is probably not the thing to do* » [598].

∴

C'est notre conviction que le modèle que nous avons esquissé permet de jeter un œil nouveau sur de nombreuses situations managériales et industrielles, gestion de conflits, situation de crises, leadership, processus de prises de décision collectives, etc. Il offre donc probablement des perspectives nombreuses et variées d'applications, que nous n'explorerons pas ici.

598. « Si tu veux avoir une vie facile, travailler sur une expérience du LHC, ce n'est probablement pas la chose à faire. » Marc, courriel à Hubert, 12 octobre 2000.

11.3 Cellule mineure c_{32} : relations d'interdépendances hétérarchiques

La dernière cellule de la deuxième colonne de notre matrice méthodologique est la cellule qui se trouve à l'intersection du principe hologrammique, objet principal du présent chapitre, et de la modélisation des processus d'intégration et de conception. C'est une cellule mineure (non diagonale) qui va éclairer et nourrir la cellule majeure de la même ligne qui conclura à la fin du chapitre 12. En nous inspirant des considérations sur les relations latérales de la cellule c_{22} précédente, il s'agit donc d'élaborer un savoir actionnable.

Le terme de relations d'interdépendances hétérarchiques qualifie les relations latérales non hiérarchiques. Un recours bref à l'étymologie éclaire cette différence : la hiérarchie (*hiér-archie*) est le pouvoir du sacré (du grec *hieros*), donc du haut sur le bas. La hiérarchie sociale est ainsi souvent considérée comme inéluctablement consubstantielle à la division du travail. L'anarchie (*an-archie*) est *a contrario* l'absence de structure de pouvoir.

L'hétérarchie, concept introduit par Wilson dans le contexte de l'étude des colonies de fourmis [Wilson et Hölldobler 1988], est le pouvoir qui est reconnu à *l'autre* (du grec *heteros*). C'est donc une structure sociale dans laquelle n'importe quel acteur peut communiquer et influer sur n'importe quel autre, sans *en référer à la hiérarchie*. En ce sens, l'architecture polycentrique des réseaux d'interfaces présentés lors de la cellule c_{22} est une structure hétérarchique, et elle présente des caractères d'auto-organisation que nous étudierons au chapitre 12 : nous mettrons ainsi en évidence la manière dont peut émerger au sein d'une organisation planifiée et hiérarchisée des niveaux d'auto-organisation qui la rendent plus souple et adaptable aux évolutions de son environnement.

Afin d'esquiver les questions sur la pertinence (contestée dans la littérature) de l'approche analogique de la socio-biologie, nous pouvons faire appel à une autre image pour éclairer notre propos : la métaphore du rhizome, analogie philosophique de ces plantes aux racines souterraines qui forment réseau [Deleuze et Guattari 1980]. La tâche du manageur technique évolue ainsi en partant « *d'un schéma arborescent, où chaque discipline se répond selon un ordre établi et s'organise en un tout homogène, à un schéma rhizomatique où les flux d'information et de collaboration s'organisent moins selon des logiques préétablies mais de façon souterraine entre les disciplines* » [599]. Nous avons déjà vu au chapitre 8 que cette évolution appelle des techniques de gestion due connaissances toujours plus développées, et l'analyste précédent précise qu'elle nécessite « *la naissance de nouveaux médiateurs, par exemple les coordinateurs de projet* ». Le manageur technique est la figure même de ces nouveaux médiateurs, telle que nous l'avons esquissée dans le modèle précédent.

Nous nous restreignons ici au cas des hiérarchies de décomposition de systèmes, autrement appelées arborescences (découpage d'un système en arborescences de composants, découpage d'un projet en arborescences de tâches). Rappelons l'avertissement déjà cité au § 10.2.2 : « *La simplification du compliqué appliqué au complexe a pour conséquence une aggravation de la complexité par mutilation et non par la résolution du problème considéré* » [Le Moigne 1999, 5] .

Que se passe-t-il lors de la décomposition arborescente ? On se focalise sur les liens de composition : quels sont les fils (de quoi est composé le père), et qui est le père (de qui dépendent les fils). Ainsi que le soulignent Stal-Le Cardinal et Marle, « *decomposition involves other interactions than the only hierarchical link between father*

599. Anonyme, « *Du savant au technicien de la science. Évolution de la figure du scientifique dans la recherche atomique française* », 2008. L'auteur est un analyste de l'évolution du travail scientifique. Ce document, mis en ligne au moment de sa publication sur le site http://www.manuscrit.com, n'est plus disponible à notre connaissance.

and sons. The other links are between the sons or between one son and another object elsewhere in the project » [600]. Si l'on omet ces autres liens, les liens d'interdépendances hétérarchiques sont perdus, et seule la relation verticale décrite au § 11.2.4 est conservée, les interfaces latérales étant occultées : l'on se prive de la capacité d'effectuer ce précieux « *pas sur le côté* » [601]. On perd donc la capacité de gérer les interfaces, donc de créer des réseaux d'interface, donc de faire jouer son rôle à l'acteur d'interface.

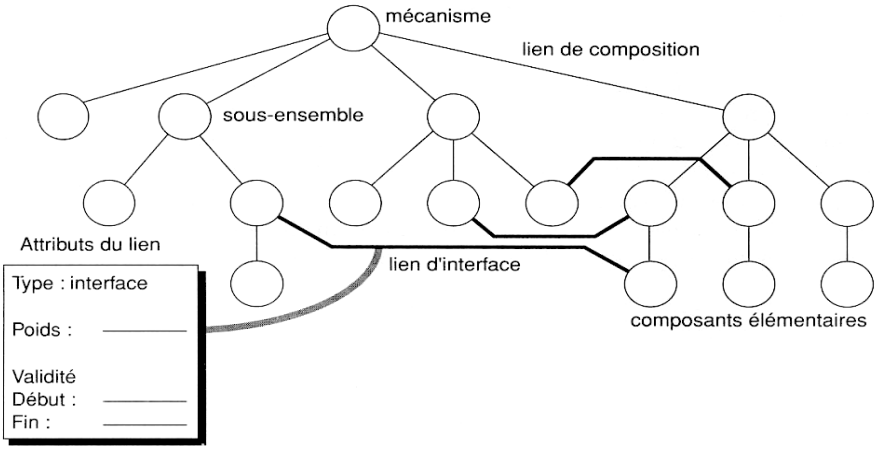


Figure 11.19 : Lien d'interface et lien de composition

In Maurino 1995, figure 7-3 p. 91

Considérons le cas d'une décomposition de système mécanique, telle que décrite par le schéma de la Figure 11.19, tiré d'un ouvrage [Maurino 1995] sur les SGDT (systèmes de gestion des données techniques, précurseurs des PDM actuels). Sur ce schéma, la décomposition en ensembles et sous-ensembles jusqu'aux composants élémentaires se fait par réduction progressive. Cette décomposition en elle-même n'est pas sans poser de nombreuses questions : décomposition architecturale, fonctionnelle, d'assemblage, organisationnelle [Hameri et Nitter 2002]. Lors de l'établissement de la décomposition d'ATLAS présentée à la Figure 8.4 p. 235, il a été par exemple assez délicat de savoir où placer le solénoïde (voir la Figure 2.9 p. 62) : fonctionnellement utilisé par le détecteur interne, organisationnellement et technologiquement rattaché aux autres aimants (toroïdaux), assemblé à l'intérieur du cryostat du calorimètre à argon liquide, architecturalement inclus dans le composant global dit Z1 incluant le détecteur interne… Sans compter que l'histoire initiale de la conception architecturale d'ATLAS [Türtscher et al. 2011] a parfois déplacé ce cryostat, au risque, selon la logique adoptée, de modifier la décomposition sur laquelle se base la dénomination effective des composants.

La conservation des liens d'interface permet(trait) de retrouver la dynamique perdue lors de la décomposition arborescente. Plutôt que de privilégier exclusivement les liens parent–enfant, on conserve les liens latéraux, c'est-à-dire entre composants “frères” (du même parent), ou entre “cousins” (enfants dont les parents sont frères) [602]. Le souci est que « *these links should not be forgotten, as they are created in an invisible and indirect way* » [603]. Pire, ces liens, qui étaient naturels avant décom-

600. « La décomposition implique d'autres interactions que le seul lien hiérarchique entre un père et ses fils. Ces autres liens sont entre les fils, ou entre un fils et un autre objet ailleurs dans le projet. » [Stal-Le Cardinal et Marle 2006, 230]

601. P. Bottero, *D'un monde à l'autre*, Rageot, 2006.

602. Un peu de fraternité dans ce monde de bru*t*s…

603. « Ces liens ne doivent pas être oubliés, car ils sont créés de manière invisible et indirecte. » [Stal-Le Cardinal et Marle 2006, 230]

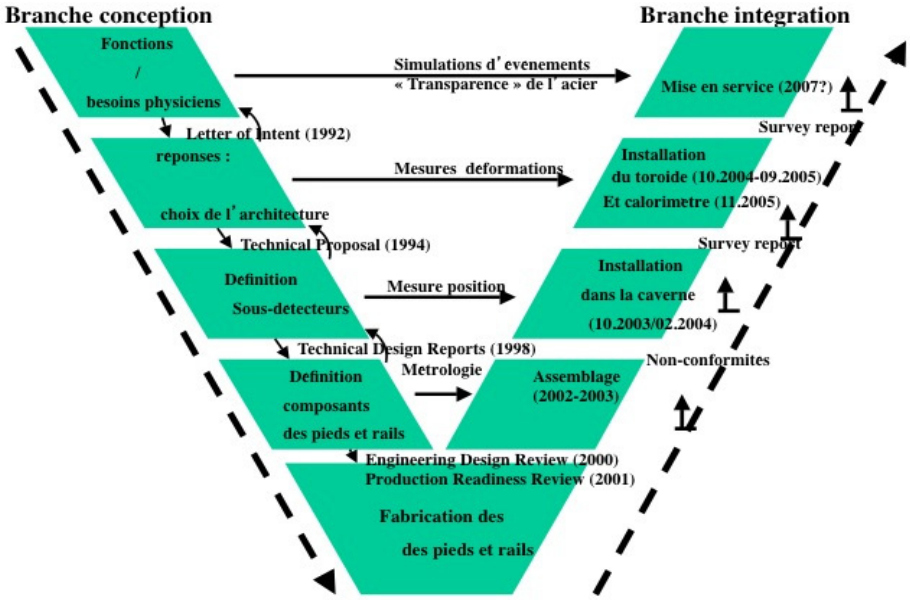


Figure 11.20 : Cycle en V pour le projet Pieds et rails d'ATLAS

B. Nicquevert, séminaire ENS GI, Grenoble, novembre 2005

position, sont perdus s'ils ne sont pas identifiés et conservés lors de l'opération de décomposition [604].

Et c'est ici que doit intervenir la logique de l'intégration, au sens où nous l'avons exposée aux chapitres 5 et 6. Il est souvent supposé que l'intégration a pour objet de remonter le long de la branche droite du fameux cycle en V de l'ingénierie des systèmes [Fiorèse, Meinadier et AFIS : Association Française d'Ingénierie Système 2012]. Un tel cycle en V est proposé à la Figure 11.20 qui propose une formalisation d'un possible et indicatif cycle en V pour le projet *Pieds et rails* d'ATLAS. On remarquera que l'un des intérêts d'un tel cycle est précisément de remettre à l'honneur des liens latéraux de vérification partielle de conformité aux exigences (flèches horizontales).

Plus importante est la distinction à effectuer entre intégration au sens du cycle en V et intégration au sens géométrique : cette dernière permet la gestion non pas invisible et indirecte, mais bien directe et visible de ces liens d'interface que sont les liens de contact entre pièces n'appartenant pas à un même sous-ensemble, ou bien les liens de voisinage avec espace garanti, ou encore les liens de positionnement absolu vis-à-vis d'un repère extérieur. L'activité d'intégration géométrique a pour objectif même d'assurer la gestion de tous ces liens. Une fois les composants définis, comment reconstituer l'ensemble ? Les liens de composition suffisent-ils ? L'information transversale manquante doit être gérée pour parvenir à l'objectif du projet. On retrouve la dialogique *Ω (Conception, Intégration)* du § 10.6 p. 301.

∴

L'histoire bien connue des six aveugles et de l'éléphant est une parabole instructive : chaque équipe, chaque acteur a tendance à ne saisir qu'une petite partie de la réalité, et à extrapoler à partir de cette compréhension partielle et parcellaire vers la constitution globale du tout, chacun affirmant détenir la vérité. Ce conte d'ori-

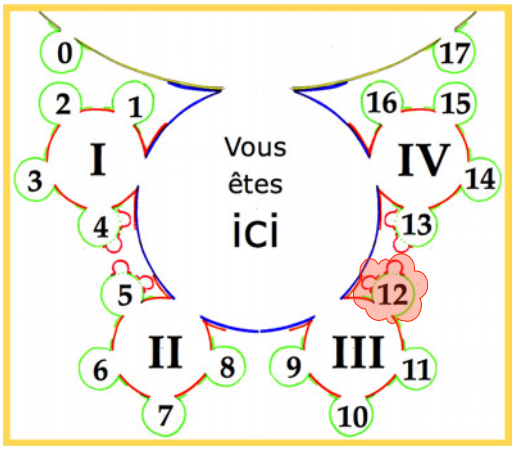
604. Une approche par *design rationale* permettrait d'enregistrer cette histoire et de conserver la trace des décisions et des justifications sous-jacentes.

gine indienne, popularisé par le poète américain John Saxe [605], est un poème qui décrit des aveugles se retrouvant autour d'un éléphant. Le premier s'approche et, touchant l'éléphant, déclare : « cela ressemble à un mur » ; le second touche ses défenses et dit : « c'est comme une lance », le troisième sa trompe « comme un serpent », le quatrième sa queue « comme une corde », le cinquième ses oreilles « comme un éventail », et le dernier touchant sa patte la décrit « comme un arbre ». Ainsi que conclut Chamberlain, « *all present a logical interpretation but their perceptions are misguided as they are unable to establish an holistic understanding of what they have encountered* » [606]. C'est le risque de la décomposition arborescente : que soit perdue dans l'opération la compréhension globale du système, précisément par manque des liens d'interfaces qui assurent la continuité du système.

C'est pourquoi nous présenterons au chapitre 15 une approche de processus d'intégration fondée sur le concept de squelette : un objet intermédiaire dont la tâche est de matérialiser ces liens d'interface pour la gestion desquels ni les outils de CAO ni les logiciels de PDM ne sont conçus. Ainsi saurons-nous mieux rattacher la corde au mur, et l'oreille à la tête de notre éléphant. Ainsi aurons-nous réintroduit les liens d'interfaces, la dimension méconnue de projets souvent déséquilibrés sur l'axe de la différentiation / conception. Ainsi aurons-nous renforcé la trame du tissu complexe qui ne tient que par la dialogique entre ces deux axes.

605. *The poems of John Godfrey Saxe*, Boston: Ticknor and Fields, 1868, 259-261.

606. « Chacun d'eux propose une interprétation logique, mais leurs perceptions sont biaisées par leur impossibilité à établir une compréhension holistique (intégrale) de ce à quoi ils font face. » [Chamberlain 2010, 166]



Chapitre 12. Jusqu'aux frontières des espaces d'échanges

Où l'acteur d'interface, guidé par le principe d'auto-éco-organisation, s'équipe d'espaces d'échanges pour élaborer un processus de conception et d'intégration pour un projet

De la sauvegarde de la frontière dépend la survie non pas de « citoyens du monde », […] mais de citoyens de plusieurs mondes à la fois et qui deviennent, par là même, ces féconds androgynes que sont les hommes-frontières.

Régis Debray [607]

607. *Éloge des frontières*, Gallimard, 2010, p. 93.

Dans le réseau d'acteurs et d'interfaces que constitue le terrain d'action du manageur technique, le modèle proposé au chapitre 11 éclaircit le rôle joué par les acteurs d'interface. Le manageur technique, un acteur parmi d'autres au départ, se trouve placé à des nœuds du réseau où il doit développer sa capacité à mettre en œuvre des espaces d'échanges pour assurer des transactions et des traductions entre d'autres acteurs à l'interface desquels il se positionne. Sans son entremise, la relation entre ces acteurs serait plus difficile, voire inopérante.

Le modèle interfacial du chapitre 11 est un modèle de type interactionniste, c'est-à-dire basé sur l'hypothèse que chaque acteur est en interaction avec d'autres acteurs. Il n'est par conséquent pas porteur de la dimension téléologique, c'est-à-dire du but poursuivi par chaque acteur, ni de l'objectif global de l'effort collectif. Il nous faut donc travailler le modèle pour faire apparaître des stratégies, si possible dans leur dimension collective, des lieux d'élaboration collaborative de décisions dans un but donné. En vertu du principe hologrammique, nous avons en outre considéré que le modèle fonctionne aussi bien au niveau micro-sociologique (entre personnes) qu'à des niveaux plus globaux (entre équipes, entre organisations). Ce passage du niveau d'interaction entre individus à un niveau plus global n'a pourtant rien d'évident du point de vue pratique : à partir des notions introduites au chapitre 11, celle d'*espace d'échanges* (bilatéral), lieu de transactions entre acteurs en interrelation, et celle de *pôle*, lieu de la traduction entre acteurs, comment élaborer les modalités d'une action collective dont le manageur technique serait le moteur et le régulateur ? C'est le principe d'*auto-éco-organisation*, le troisième principe complexe retenu pour l'élaboration de notre matrice méthodologique, qui va nous guider dans ce passage. Il sera l'objet de la première cellule c_{13}.

À l'issue de ce chapitre, dans la cellule majeure c_{33}, nous aurons ébauché un processus dialogique de coordination complexe de la conception et de l'intégration qui servira de trame à la partie IV : un tel processus nécessite quelques adaptations pour prendre racine au sein des pratiques effectives des ingénieurs ; il s'agira en quelque sorte “d'adapter l'impédance” entre le modèle de la partie III et le terrain réel. Avant d'en arriver là, nous avons besoin d'approfondir notre analyse de la construction d'espaces d'échanges collectifs, et du rôle que joue le manageur technique dans cette construction ; rôle qui sera l'objet de la cellule c_{23}.

12.1 Cellule mineure c_{13} : le principe d'auto-éco-organisation

12.1.1 Éco-organisation et autopoïèse

Le principe d'auto-organisation est apparu dès la fin des années 50 chez des mathématiciens, des ingénieurs, des cybernéticiens et des neurologues. La complexité, n'avait alors pas été perçue de manière nette en biologie, et c'est le biologiste français Henri Atlan [1986] qui a repris cette idée dans les années 70. Un système auto-organisé est un système capable de construire ses propres structures, un système au sein duquel émergent des propriétés nouvelles qui n'étaient pas contenues dans ses composants. En cela, le principe d'auto-organisation est à la fois complémentaire et concurrent des principes dialogique et hologrammique.

Dans le tome 1 de *La Méthode*, Morin [2008, 88-89] développe la boucle récursive (qualifiée de « *tétralogique* ») entre désordre, ordre et organisation, et insiste sur le fait qu'aucun des trois concepts n'est concevable sans interactions, que ces termes se développent mutuellement les uns les autres. Ce jeu « *permet des développements*

locaux, insulaires d'ordre et d'organisation, inséparables des développements de la diversité ». Il élargit ensuite le concept et rajoute le terme « *éco-* » pour forger le concept d'auto-éco-organisation [608] : il souligne ainsi le fait que l'auto-organisation dépend (de manière écologique) de son environnement, puisqu'elle y puise de l'énergie et de l'information. En effet, comme elle constitue une organisation qui travaille à s'auto-entretenir, elle dégrade de l'énergie par son travail, et doit donc puiser de l'énergie dans son environnement.

À un niveau individuel et du point de vue biologique, ce principe se retrouve sous le terme savant d'*autopoïèse*, qui n'est autre que la construction de l'individu du grec *poiêsis*, création). Le sujet acteur exprime ainsi son autonomie dans sa propre construction, il est acteur de son développement individuel [609], il est auto-organisateur de structures sociales capables de réaliser des activités collectives, il participe à la dynamique des populations, et il devient même un acteur des processus novateurs de l'évolution des espèces (phylogenèse).

Campan ajoute que « *l'autopoïèse constructiviste s'exprime aussi dans l'organisation des groupes sociaux, la structure des interactions et les modes de communication* » [610]. Ce sont alors des processus auto-organisateurs qui produisent les activités collectives : chaque acteur individuel y exécute des règles simples d'interactions avec ses congénères et son environnement physique local, et participe à un ouvrage collectif dont le résultat final n'est pas prédéterminé dans le comportement individuel.

Nous poserons, en nous inspirant des travaux d'Avenier [611], que l'action du manageur technique (qu'il soit en charge de processus de conception et / ou d'intégration, ou plus généralement impliqué dans une mission de management technique quelconque) s'inscrit dans ce cadre. Les processus enchevêtrés d'actions et de réactions décrits au chapitre 11 sont bien des processus auto-organisateurs, dus à l'autonomie d'action conférée à chaque acteur. Les réactions d'un acteur sont intentionnelles et potentiellement imprévisibles par les autres acteurs, et le résultat n'est pas prédéterminé. Quant à l'environnement, modélisé par notre réseau d'interfaces en cotte de mailles, il joue son rôle de pourvoyeur d'informations, il définit les contraintes qui se posent au jeu des interactions, et il est influé en retour par le résultat des actions collectives entreprises. Les processus évoqués sont donc bien de nature auto-éco-organisatrice. Morin précise :

> *L'éco-organisation est une organisation spontanée qui […] se fait de soi-même, sans être incitée ou contrainte par un programme […] Toute l'éco-organisation naît d'actions "égoïstes", d'interactions "myopes", d'intercommunications baignées et parfois submergées par le flou, le bruit, l'erreur, dans des niches ou milieux sans clôtures ni barrières.* [Morin 1980, 17-21]

Or, dans ce contexte, ainsi que le précise Avenier, « *aucun des acteurs n'a de légitimité à se comporter comme le méta-pilote de l'ensemble des acteurs qui lui sont connectés* ». L'évolution du réseau d'interfaces sera donc dynamique, avec un décalage entre le moment où une décision est prise et celui où cette décision se propage et s'établit, ou en d'autres termes, où elle se réifie. C'est cette dynamique que nous allons observer sur trois cas.

608. Par la suite, dans la *Méthode*, Morin introduit un principe d'auto-éco-*ré*-organisation, puis il élabore même « *la formule incompressible : auto- (geno-pheno-ego) – éco-ré-organisation informationnelle/computationnelle/communicationnelle* » [Morin 2008, 2430]. Nous nous contenterons ici du deuxième degré : l'auto-éco-organisation.

609. Le développement *ontogénétique* (nous retrouvons la racine grecque décrivant l'être en tant qu'être présente dans le terme ontologie, voir la note 60 p. 47), par opposition au développement *phylogénétique*, celui de l'espèce, mentionné plus loin.

610. Article « Constructivisme », *Notionnaire des idées*, Paris, Encyclopædia Universalis, 2005, p. 191.

611. M.-J. Avenier, « Le management stratégique dans la complexité : un cadre de réflexion », 2009. Document de travail, à notre connaissance non publié.

Le premier cas est celui du fonctionnement global d'ATLAS, vu comme une organisation à la stratégie « *tacite* ». Nous la traiterons dans le cadre de la présente cellule c_{13}, en prolongation de notre première question de recherche sur la complexité, et comme illustration du principe d'auto-éco-organisation. Ce sera également l'occasion d'enrichir de manière critique le modèle de l'évolution d'ATLAS présenté au chapitre 5 (§ 5.3 p. 127-130).

Le second cas sera celui de l'action du manageur technique, avec des éléments de réponse à notre deuxième question de recherche qui seront présentés dans la cellule c_{23} de notre matrice. Nous reprendrons le concept d'espace d'échanges introduit au chapitre 11, et nous analyserons son extension progressive. Ce sera l'aboutissement de l'élaboration d'éléments de réponses à la deuxième question de recherche de notre thèse : ***le manageur technique, acteur au sein d'un réseau d'interfaces, acquiert un statut d'acteur-frontière par son équipement en espaces d'échanges collectifs.***

Le troisième cas constituera la cellule majeure de cette dernière colonne de la matrice : comment intégrer les espaces d'échanges (récursifs) dans le contexte d'un processus globalement linéaire de conception et d'intégration ? Les réponses plus pragmatiques à cette question constitueront les premiers éléments d'un savoir actionnable. La partie IV aura pour objet d'en éprouver l'actionnabilité.

12.1.2 ATLAS, ou l'auto-organisation tacite

ATLAS a adopté une organisation globale basée sur un certain nombre de principes très simples [612]. Le MoU (*Memorandum of Understanding*) comprend sept pages, il ne saurait se comparer aux corpus réglementant la constitution et le fonctionnement de grandes organisations. Un ouvrage de management cite d'ailleurs les collaborations de physique comme exemple d'une approche du management sans chef :

> *Parfois, on est surpris de rencontrer des formes d'auto-organisation là où on ne s'y attend pas du tout. «* Au pays des physiciens, le CERN, les équipes qui composent les détecteurs du collisionneur de particules n'ont pas de chef. *» Sous ce titre,* Le Monde *du 28 juillet 2010* [613] *donne la parole à plusieurs chercheurs du CERN qui affirment que rien ne doit entraver la circulation des idées et les capacités d'invention et que, par conséquent, les arguments d'autorité n'ont pas leur place. Les décisions sont donc prises par consensus, parfois au terme de longs débats : «* Le système doit tout simplement finir par désigner… celui qui a raison. À force de discussions, de coups de colère, de persuasion, la proposition la plus conforme à l'intérêt général doit arriver à émerger et, peu à peu, à rallier tous les avis. *» La sociologue Karin Knorr[-Cetina] (université de Constance) citée par* Le Monde *remarque que les décisions qui descendent de la hiérarchie, comme dans les entreprises, ne sont pas adaptées pour «* ces réalisations si complexes qu'aucun cerveau humain ne peut les concevoir dans son ensemble ». [Bourboulon 2011, 244-245]

Quels sont les éléments organisationnels qui ont contribué à ce que puisse être collectivement appréhendée la complexité d'ATLAS dans son ensemble ? L'originalité managériale d'ATLAS peut se caractériser par trois aspects :

- son caractère fractal : chaque sous-système est organisé de manière semblable à la Collaboration, avec un porte-parole, un comité directeur, un comité d'institutions, etc. Cette réplication se fait au niveau des sous-sous-systèmes lorsqu'ils existent ;

612. Voir le chapitre 2, en particulier § 2.6.3 p. 70.

613. *Au pays des physiciens*, 2/6. « La République des chercheurs » [Fenoglio 2010a].

- sa décentralisation et sa hiérarchie faible : chaque sous-système possède une latitude de prise de décision très importante, tant du point de vue organisationnel que budgétaire. Au niveau de la Collaboration, seules les frontières et les échéances sont fixées – on a vu dans la partie II combien le management central avait en définitive comme pouvoir essentiel celui de convaincre ;
- sa dimension a-stratégique tacite [Hyppölä 2008], évoluant progressivement vers une stratégie émergente à structuration souple.

Le chapitre de notre ouvrage collectif *Collisions and Collaboration* qui est consacré à la stratégie d'ATLAS [614] est assez éloquent concernant ce dernier point. Il rapporte la façon dont cette stratégie a progressivement émergé à partir de la façon dont a été conçue et gérée la transition de la phase de construction à la phase d'opération. L'hypothèse initiale était que les pratiques de management du secteur privé pouvaient contribuer à comprendre et accompagner cette transition. Or, bien qu'une planification préalable considérable ait été développée, la complexité particulière de l'expérience ajoutée à la période de construction très longue garantissaient à coup sûr que des problèmes scientifiques ou techniques surgiraient qui n'avaient aucun équivalent dans les projets du secteur privé. Faire face à ces problèmes risquait de mener le projet sur des chemins imprévus qui augmentaient l'incertitude globale. Dans ces circonstances, la communauté ATLAS devait décider si elle s'en tenait aux plans originaux tels qu'approuvés par les agences de financement et les comités de revue, ou si elle se lançait dans une « *stratégie émergente* » impliquant de nombreux arbitrages scientifiques, techniques et financiers.

Face à ce défi, le projet ATLAS s'est progressivement déplacé depuis une « *écologie adaptative* » peu structurée qui était apte à recevoir et à s'adapter à des éléments nouveaux, vers une « *configuration organique* » plus structurée et fortement couplée visant une efficacité accrue de ses opérations. De cette manière, le projet a gardé ses options et ses derniers choix de conceptions ouverts aussi longtemps que possible. Réduire prématurément par des contrôles de gestion et de comptabilité l'incertitude dans des projets R&D hautement risqués, c'est les priver de la possibilité de nouvelles approches et nouvelles visions des problèmes. ATLAS a montré la voie pour procéder différemment. Hyppölä souligne :

> *ATLAS is functioning very well, even if according to related research literature, it should not. In practice, the researchers and research groups develop and construct together a giant machine, without a codified strategy and hierarchical control. The goals are clear in everybody's mind: to build together a giant device, find the boson and, if lucky, win the Nobel for it.* [615]

Ces trois caractères, fractal, décentralisé et non hiérarchique, approche par la stratégie émergente « *chemin faisant* », n'ont peut-être pas été conçus au départ pour cela, mais ils favorisent assurément l'auto-organisation.

Comme l'a dit Nordberg, « *l'expertise pertinente se situe au niveau des individus et des institutions participantes, et non pas à celui du management d'ATLAS : chacun sait ce qu'il a à faire et il s'en occupe ; on n'a pas besoin de le leur dire. Ce n'est que si des sous-*

614. Chapitre 3 : « *New Management Research Models: Lessons from the ATLAS Adhocracy* » [Santalainen et al. 2011].

615. « ATLAS fonctionne très bien, même si selon la littérature de recherche correspondante, elle ne devrait pas. En pratique, les chercheurs et les groupes de recherche développent et construisent ensemble une machine gigantesque sans stratégie codifiée ni contrôle hiérarchique. Les objectifs sont clairs dans l'esprit de tout le monde : construire ensemble un dispositif géant, trouver le boson, et si l'on a de la chance, gagner le Nobel pour ça. » [Hyppölä 2008, 75]

[Petit bilan de ces objectifs tacites. Construction du dispositif : terminée (dès août 2008). Boson : probablement trouvé (juillet 2012). Nobel : espéré… (octobre 2012 ? 2013 ? jamais ?)]

systèmes arrivent à des exigences incompatibles qu'un arbitrage de niveau supérieur peut être requis » [616].

Or, l'auto-organisation a été un facteur clé du succès, comme en a témoigné le projet des Pieds (chapitre 7) : c'est parce que le projet disposait de sa propre autonomie que les différents acteurs, qu'ils soient Cernois, de l'institut IHEP ou de l'usine IZ, ont été en mesure de mettre en œuvre leurs décisions propres, chacun à leur niveau. Les circulations d'information et les prises de décisions se sont faites au plus juste, et pas toujours en suivant les circuits formels. Cette réussite est due également à la construction collective d'un espace d'échanges efficace, tel que nous le décrirons au § 12.2.

Dans son analyse d'ATLAS, Hyppölä note encore :

> *The personal capacities are [with motivation] the other contributing factor to the strategy absence in ATLAS. Most people are intelligent and smart, highly educated, used to solve complex problems and willing to cooperate with others in order to attain the shared goal. They are capable to take responsibility on their own work and to work on their own initiative innovatively without surveillance or tight organizational control. None can obtain the goal alone so cooperation is indispensable, as well as any actions and mechanisms to facilitate it.* [617]

Cette vision, une fois confrontée à la réalité du terrain telle que décrite dans la partie II, semble quelque peu idéaliste. Elle ne rend pas compte non plus de la diversité des métiers, et semble considérer ATLAS comme constituée uniquement de physiciens. Et surtout, la complexité réelle des interfaces et des interactions ne ressemble pas tout à fait à ce monde de collaborateurs scientifiques disposés à coopérer aimablement et de manière transparente. Il est vrai toutefois que le haut degré d'implication personnelle des collaborateurs favorise l'auto-organisation à tous les niveaux, parfois de manière foisonnante et stimulante.

La question de la coopération est essentielle, et il est intéressant de regarder les facteurs qui l'ont favorisée dans ATLAS. Nous avons avancé, au chapitre 5 et au § 6.6, la thèse que le mode de management « *sans pouvoir* » (au sens d'une hiérarchie peu puissante et d'une grande place laissée à l'auto-organisation) est un mode de management plus efficace qu'il n'en avait l'air à mes yeux à l'époque. Il est temps de revenir sur ce que j'ai appelé au chapitre 3 (§ 3.2.3 p. 89) la « *tension essentielle* » entre les physiciens soucieux d'innover jusqu'au dernier moment, et les ingénieurs soucieux de stabiliser la configuration au plus tôt. Comment cette tension a-t-elle été dépassée et transformée en dialogique *Ω (Différenciation, Intégration)* ? Cela tient selon nous à une double prise de conscience collective.

La première est celle de la *coopération*, évoquée par Hyppölä. Physiciens et ingénieurs, motivés par la réussite du projet (avec les réserves relevées dans la partie II), devaient trouver moyen de coopérer. On a assisté progressivement à un rapprochement des positions, et l'adaptation du style de chacun vers un management complexe : une prise de conscience conjointe, d'une part par les ingénieurs de donner à l'intégration un rôle moins prescriptif et davantage régulateur, et d'autre part par les physiciens de la nécessité de cette régulation pour que la convergence vers une configuration réalisable puisse se faire. La tension essentielle est alors dépassée, et le rôle de la Coordination technique (assimilable à un manageur technique

616. Voir la note 217 p. 139.

617. « Les capacités personnelles sont [avec la motivation] l'autre facteur qui contribue à l'absence de stratégie dans ATLAS. La plupart des gens sont intelligents, avec un haut niveau d'éducation, habitués à résoudre des problèmes complexes et avec la volonté de coopérer avec les autres de manière à atteindre l'objectif partagé. Ils sont capables de prendre la responsabilité de leur propre travail et de travailler de leur propre initiative de manière innovante sans surveillance ni contrôle organisationnel strict. Aucun d'entre eux ne peut atteindre seul son objectif, la coopération est donc indispensable, ainsi que toutes les actions et tous les mécanismes qui la facilitent. » [Hyppölä 2008, 76]

collectif) en charge de l'intégration, de l'installation, de la planification et des objets du fonds commun, devient un rôle de régulateur, le moteur de la boucle dialogique *Ω (Différenciation, Intégration).* Quant au physicien, il adopte aussi la posture technique car, selon Beaune inspiré par la phénoméno-technique de Bachelard, « *le savant expérimentateur est ingénieur parce que laborantin* » [Beaune 1998, 377].

La seconde prise de conscience est celle évoquée par Santalainen et al. [2011] à propos de l'évolution stratégique d'ATLAS évoquée ci-dessus : la phase de transition qui est le point de départ de l'émergence d'une stratégie explicite est précisément celle que nous avons observée à la partie II, la phase 1996–2003, et plus particulièrement la phase charnière de cette période de transition, les années 1999-2001. Au cours de cette transition, l'anarchie assumée du départ laisse peu à peu place à une approche plus structurée, qui reste néanmoins centrée sur une priorité : celle de la performance scientifique du détecteur. En stabilisant ce qui peut l'être, et à temps, la Collaboration reste maîtresse de laisser ouvertes les options pour lesquelles les choix techniques ne sont pas encore mûrs (particulièrement dans le domaine de l'acquisition et du traitement des données).

Ce double constat nous donne l'occasion de revenir sur l'interprétation de la transition d'une discipline collaborative vers une discipline de projet [Marchand et Margery 2009]. L'analyse de la courbe proposée de la « *configuration de projet* » en fonction du temps, reproduite au § 5.3 (Figure 5.6 p. 129), nous permet de placer nos considérations dans une perspective de très long terme : un constat valable à une époque (par exemple celui de la tension essentielle, que j'avais formulé en 1999) cesse de l'être plus tard en fonction de l'évolution du contexte d'une part, mais aussi du regard même de l'observateur. C'est une nouvelle illustration du fait que « *la pensée de la complexité a besoin de l'intégration de l'observateur et du concepteur dans son observation et sa conception* » [Morin 2005, 102] : avec le recul historique, et la certitude d'un projet réussi (ce qui était loin d'être le cas alors), les perspectives changent.

Dans le modèle de Marchand et Margery, nous contestons le recours au terme de discipline (au sens où nous le comprenons ici d'obéissance à une règle de conduite imposée, et non pas de communauté de pratique ou de savoir) : ce terme ne convient ni à la phase d'émergence de l'architecture [Türtscher 2008a ; Türtscher et al. 2011], ni à celle de construction du détecteur. Un membre d'une collaboration de physique n'est pas là pour se plier à une quelconque discipline, mais plutôt pour contribuer à un effort collectif. La question est alors de saisir l'évolution dans le temps de l'agglomération de ces efforts individuels dans une entreprise collective. La toute première partie de l'histoire d'ATLAS (1992–1994) correspond à l'établissement d'une spécification fonctionnelle (aboutissant formellement à la *Technical proposal* en décembre 1994) en termes de performances pour la physique, et donne lieu à des allers-retours entre architectures possibles, choix de technologies et efficacités attendues. Une fois cette architecture stabilisée (« *taken for granted* », pour reprendre l'expression employée par Türtscher), les questions d'intégration prennent de l'importance, et le système perd ses propriétés émergentes. C'est là que se situe la période transitoire, qui représente le point le plus élevé de la tension essentielle : que l'on se réfère aux cas de la partie II, en particulier aux controverses entre le système des muons et la Coordination technique.

La coopération fructueuse (et réussie dans le cas d'ATLAS, nous le savons désormais) suppose un pré-requis essentiel, sur lequel insiste Knorr-Cetina [1999, 130-135] : la confiance mutuelle. Nous avons évoqué cette confiance en conclusion du § 9.2.1 : « *savoir faire confiance, c'est aussi cela, un manageur technique en mode complexe* ». Mais la confiance ne se décrète pas, elle se construit. Et si elle se construit, c'est que des lieux lui sont propices : les espaces d'échanges collectifs dont nous allons, dans la prochaine cellule de notre matrice méthodologique, étudier la construction. Celle-ci s'appuie sur le travail du manager technique qui doit se

constituer comme une référence fiable, un repère dans l'environnement de travail, un homme de confiance pour le projet, en un mot un *acteur-frontière*. Il aura ainsi été un acteur de l'émergence d'auto-éco-organisation dans le réseau d'interfaces au sein duquel il évolue.

Et c'est au sein des espaces d'échanges collectifs dont il suscite l'élaboration que va s'effectuer et être validé (ou autrement dit, « *habilité* ») le travail de conception collaborative de projet, et de création de ce que Türtscher nomme « *interlaced knowledge* » [Türtscher et al. 2011]. Nous l'avons ainsi résumé dans l'introduction de *Collisions and collaboration* :

> *The structure of the ATLAS detector [is] a complex sociotechnical system that, far from working from some initially well-defined and detailed blueprint, gradually evolves its own architecture over time. It does this through constant horizontal negotiations between specialist teams, each with its own perspective, and each with its own agenda. Out of this process emerges a kind of 'interlaced' knowledge that is distributed across the different members of the Collaboration to become a collective possession. Interlaced knowledge gradually produces an infrastructure of 'boundary objects' through which much of the organizational coordination across heterogeneous teams, practices, and languages can then take place.* [618]

Dans son étude sur la structure organisationnelle d'ATLAS, Hyppölä conclut d'ailleurs :

> *In ATLAS the decisions itself [sic] are not as important as the process preceding them: reviewing, discussing, justifying and convincing the colleagues (Türtscher 2008). The freedom [at] every level of the organization is crucial for the project success, as the decisions must be done as close to their subjects and the problems must be solved where they appear. [With] a hierarchical decision making structure with several stages the organization would soon be paralyzed.* [619]

Cet équilibre dialogique entre un "ni trop" de formalisme, qui étoufferait les processus de création et de validation, et un "ni trop peu" de formalisme, qui rendrait vaine toute tentative de stabilisation de la configuration de projet, cette tension à dépasser là aussi sur un mode complexe, c'est ce que nous espérons atteindre grâce à un processus de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* ; ce sera l'objet de la toute dernière cellule majeure c_{33} de notre matrice méthodologique. Nous y verrons les espaces d'échanges accueillir ces « *revues, discussions, justifications et persuasions* ».

12.2 Cellule mineure c_{23} : vers l'acteur-frontière

Dans la cellule c_{13} consacrée à la question de recherche sur la modélisation complexe, nous avons vu l'utilité de considérer les actions du manageur technique

618. « La structure du détecteur ATLAS est un système socio-technique complexe qui, loin de s'élaborer à partir d'un dessin initialement bien défini et détaillé, fait progressivement évoluer sa propre architecture avec le temps. Cela s'effectue grâce à des négociations horizontales constantes entre les équipes de spécialistes, chacune selon sa propre perspective, et chacune selon son propre agenda. Il émerge de ce processus une sorte de connaissance "entrelacée" qui est partagée par les différents membres de la Collaboration pour devenir une possession collective. La connaissance entrelacée produit progressivement une infrastructure d'"objets-frontière" à travers lesquels peut alors s'établir l'essentiel de la coordination organisationnelle entre des équipes, des pratiques et des langages hétérogènes. » [Boisot et al. 2011, 4]

619. « Dans ATLAS, les décisions en elles-mêmes ne sont pas aussi importantes que le processus qui les précèdent : revoir, discuter, justifier et convaincre les collègues [Türtscher 2008a]. La liberté à chaque niveau de l'organisation est cruciale pour le succès du projet, car les décisions doivent être prises aussi près que possible de leurs sujets et les problèmes doivent être résolus là où ils apparaissent. [Avec] une structure hiérarchique de prise de décision comportant plusieurs étapes, l'organisation serait vite paralysée. » [Hyppölä 2008, 77]

comme favorisant une auto-éco-organisation au sein du réseau d'interfaces. Précisons le mode de construction des espaces d'échanges collectifs, et l'enjeu particulier que représente cette élaboration pour le manageur technique.

Dans la présente cellule c_{23}, nous allons explorer à nouveau ce réseau d'interfaces tel qu'il a été élaboré dans la cellule majeure c_{22}. Le modèle interfacial va nous aider à formaliser l'espace d'échanges collectif dont doit s'équiper l'acteur d'interface pour accéder au rôle d'acteur-frontière. Cet espace d'échanges collectif sera conçu comme un réseau d'espaces d'échanges bilatéraux. Cette section est donc articulée en deux parties : construire un espace d'échanges collectif ; et équiper un acteur d'interface de façon à ce qu'il puisse se constituer en acteur-frontière. Nous aurons ainsi bouclé, dans le cadre de cette matrice méthodologique, la contribution à notre modèle du manageur technique comme acteur-frontière. C'est dans la toute dernière cellule c_{33} que nous étudierons l'exploitation effective de ces espaces d'échanges collectifs comme cadres de coopération entre les acteurs du processus de collaboration complexe, cadres posés par l'acteur-frontière.

12.2.1 Construire un espace d'échanges collectif

Résumons les apports de la cellule majeure c_{22} consacrée au modèle interfacial à mailles tripolaires. À partir des propriétés de cette maille, nous avons modélisé les interfaces créées entre deux acteurs du réseau par l'acteur d'interface. Nous avons vu que cette interface était composée de deux transactions (entre l'acteur d'interface et chacun de ses interlocuteurs) et d'une traduction (correspondant à la valeur ajoutée de médiateur de l'acteur d'interface, par exemple une adaptation d'impédance pour exprimer l'ajustement cognitif nécessaire entre deux acteurs). Tandis que la traduction se déroule au sein des pôles internes de l'acteur d'interface, chaque transaction prend place dans l'espace d'échanges bilatéral correspondant.

Au chapitre 9 (§ 9.2.1 p. 267), nous avons défini l'espace d'échanges comme « *l'espace où se coordonnent (localement) l'action et les convictions de chaque partenaire de la négociation et l'action* ». Au chapitre 11, nous avons modélisé un espace d'échanges bilatéral, cet espace où se déroulent les transactions entre deux partenaires et deux seulement. Cet espace présente de ce fait une restriction : elles ne s'appliquent qu'à des relations bilatérales. Or, dans un contexte de coopération, donc d'élaboration collective de l'action, une telle restriction rend le concept trop spécifique : une action collective ne se réduit pas à un ensemble d'interactions bilatérales. Il s'agit donc ici de passer d'un tel espace d'échanges (bilatéral) à un espace où les informations et les décisions soient partagées par l'ensemble des acteurs concernés. Comment effectuer ce passage ?

Cette notion d'espace d'échanges, déjà évoquée, n'est pas nouvelle, et elle s'appuie notamment sur les travaux de Galison [620] et de la postérité assez heureuse qu'a connu son concept de « *trading zone* » [621], inspiré de l'anthropologie.

> *Two groups can agree on rules of exchange even if they ascribe utterly different significance to the objects being exchanged; they may even disagree on the meaning of the exchange process itself. Nonetheless, the trading partners can hammer out a local coordination, despite vast global differences. In an even more sophisticated way, cultures in interaction frequently establish contact languages, systems of discourse.* [622]

620. Essentiellement développés dans la partie II du chapitre 9 de *Image & Logic*, p. 781-844. On en trouvera une version abrégée au chapitre 10 du *Science Studies Reader* [Biagioli 1999, 145-158].

621. La traduction du terme de *trading zone* pose question : zone de commerce, espace de troc, domaine d'échange ? Nous employons depuis le chapitre 11 l'expression d'espace d'échanges, dont le recouvrement avec la notion de Galison est important, mais pas nécessairement complet.

Galison appelle *trading zone* cette « *overlap area* » [623] entre deux disciplines, autrement dit « *the domain – partly symbolic and partly spatial – at which the local coordination between beliefs and action takes place* » [624]. Il développe l'idée autour du fait que les frontières entre les sous-cultures respectives des théoriciens, des expérimentateurs et des fabricants d'instruments constituent des domaines dans lesquelles la collaboration est possible : « *In the local context of the trading zone, despite the differences in classification, significance, and standards of demonstration, the two groups can collaborate. They can come to a consensus about the procedure of exchange* » [625].

C'est dans le même esprit que nous avons évoqué la création de connaissance entrelacée (*interlaced knowledge*), dont ces espaces d'échanges seraient le creuset. Pour généraliser tout en restant dans le cadre de notre approche complexe, la démarche devient presque métaphorique : Emmeche, cité par Weber [2005], considère « *the search for common structures across individual theories and local fields of knowledges [as a] truly legitimate aim of science* », et propose les « *complexity studies … as a cross-disciplinary field of research and meeting place for dialogue between specialised groups of people* » [626]. De là à dire que les études sur la complexité sont un espace de partage ou une *trading zone* à large spectre, il n'y a qu'un pas (que nous n'irons pas jusqu'à franchir dans cette thèse…)

Dans le cadre de notre modèle interfacial, comment imaginer la constitution de tels espaces d'échanges collectifs ? Nous proposons de les considérer comme l'agrégation d'espaces d'échanges bilatéraux en un réseau cohérent incluant l'ensemble des acteurs concernés. Pour mieux comprendre la construction, il convient de revenir à la géométrie du modèle interfacial, et tout particulièrement de l'espace d'échanges. Par la suite, nous nous limitons au cas de l'interface entre homologues (qui présente l'avantage topologique de se placer dans un plan horizontal, et facilite donc considérablement la compréhension géométrique).

La Figure 12.1 reprend les principaux éléments de notre modèle à mailles tripolaires : les deux acteurs *B* et *O*, avec leurs pôles respectifs et leur noyau représenté par le triangle curviligne au centre des trois pôles. L'espace d'échanges *E2* entre *O* et *B* est figuré par la surface en forme d'iris à l'intersection des pôles *P1* et *P3* de *O*. Il est le siège des transactions *S2* (*middle-in* et *middle-out)* de partage/synchronisation décrites au chapitre 11 [627]. Pour bien souligner que cet espace d'échanges est bilatéral, nous l'indiçons $E2_{OB}$. Le pôle *P2* de *B*, pôle d'homologie, est le pôle qui se trouve en interface avec *O*. Quant au pôle *P2* de *O*, c'est lui qui sera le lieu des traductions de type *D1* ou *D3* décrites à la Figure 11.17. Dans ce chapitre, nous nous concentrons sur les espaces d'échanges et les transactions entre *O* et *B*. Nous laisserons donc de côté ces traductions, qui n'interviennent que dans le cas où *O* sert d'interface entre *B* et un troisième acteur.

622. « Deux groupes peuvent se mettre d'accord sur des règles d'échanges même s'ils attribuent une importance totalement différente aux objets qui sont échangés : ils peuvent même ne pas être d'accord sur la signification du processus d'échange lui-même. Quoi qu'il en soit, les partenaires de l'échange peuvent élaborer une coordination locale malgré des différences globales considérables. De manière encore plus sophistiquée, des cultures en interaction établissent fréquemment des langues de contact, des systèmes de discours. » [Galison 1997, 783]

623. « Aire de recouvrement » [Galison 1997, 275]

624. « Le domaine – en partie symbolique et en partie spatial – dans lequel se déroule la coordination locale entre les croyances et l'action. » [Galison 1997, 784]

625. « Dans le contexte local de la zone d'échange, malgré les différences de classification, de signification et de normes de démonstration, les deux groupes peuvent collaborer. Ils peuvent parvenir à un consensus sur la procédure d'échange. » [Galison 1997, 803]

626. Emmeche considère « la recherche de structures communes entre les théories individuelles et les champs locaux de connaissance comme un but tout à fait légitime de la science », et propose que « les études sur la complexité [soient] un champ de recherche transdisciplinaire et un lieu de rencontre pour le dialogue entre des groupes de spécialistes » [Emmeche 1997].

627. Voir la Figure 11.16 p. 328 et le Tableau 11.2 p. 331.

L'intersection du pôle *P2* de *B* avec les pôles *P1* et *P3* de *O* créent trois surfaces dont nous avions laissé la signification de côté : un triangle curviligne et deux iris. Ces trois éléments caractérisent l'interaction bilatérale spécifique entre *O* et B. La notation proposée est $I2_{OB}$ pour le triangle curviligne (indicé 2 car c'est le pôle $P2_B$ qui en est le porteur), et respectivement $I1_{OB}$ (*I* pour iris) pour l'iris supérieur, et $I3_{OB}$ pour l'iris inférieur.

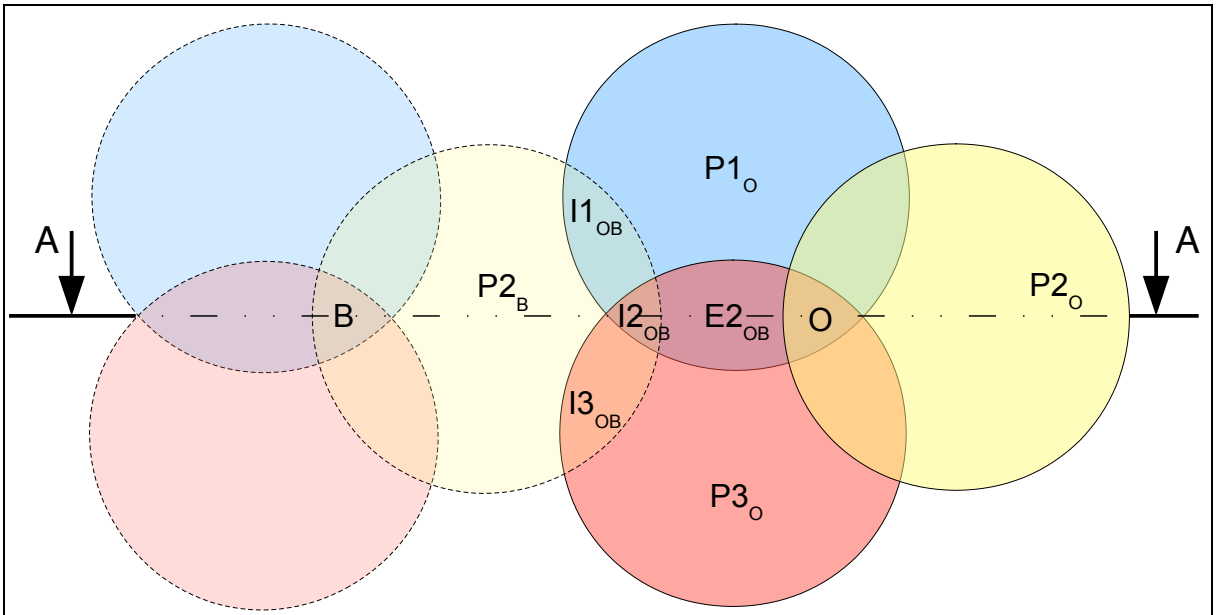


Figure 12.1: Modèle interfacial entre l'acteur d'interface *O* et un homologue *B*

L'interprétation proposée de ces deux iris interactionnels $I1_{OB}$ et $I3_{OB}$ est la suivante [628] : même une relation entre homologues, donc de niveau équivalent (ce qui est représenté par le fait qu'ils sont positionnés sur un même plan) n'est jamais parfaitement équilibrée en réalité. On pourra donc considérer les iris comme des *correcteurs d'interaction*, curseurs variables indiquant dans quelle mesure *B* possède un certain ascendant sur *O* (ou réciproquement), ou que sa compétence est supérieure, ou son influence plus grande, ou tout autre facteur de déséquilibre.

L'intérêt du triangle curviligne $I2_{OB}$ pour notre propos est beaucoup plus élevé. Nous le dénommerons *rivet*, en filant notre métaphore indicative de la cotte de mailles. Pour en saisir la signification, nous allons introduire une troisième dimension à la représentation géométrique de notre modèle interfacial. Revenons un peu en arrière : la cartographie du réseau d'interfaces est telle que tout acteur est un acteur d'interface, placé en l'un des nœuds du réseau, et simultanément interagissant de manière complexe sur les trois modes évoqués au chapitre 11 : ascendant, descendant et latéral. Il faut voir ce réseau comme un *réseau sans échelle* [Barabási et Albert 1999 ; Barabási 2009]. Il nous est donc loisible de donner à cet acteur une forme géométrique quelconque, et même multiforme en fonction des interactions étudiées, pour peu que ladite forme aide à comprendre le modèle [629].

C'est dans cet esprit que je choisis de représenter l'acteur *O*, dans le cadre de notre étude des interfaces entre homologues, comme étant en fait constitué d'une sphère *P2* et de deux *tores* [630] *P1* et *P3* d'axe vertical passant par le centre de *P2*.

628. Ce sont deux nouveaux paramètres du modèle, qui permettent d'en affiner la signification. Nous n'en approfondirons pas davantage l'analyse.

629. Sans expliciter davantage, j'utilise les recommandations de modélisation complexe de Genelot [2011, 187] : « *donner aux signes un sens partagé* ».

630. Un *tore* est un volume de révolution généré par une surface, par exemple par un disque, en rotation autour d'un axe qui ne le traverse pas – en clair, une *bouée* est un tore.

Quant à *B*, on le modélise simplement par trois sphères (dont les centres seront placés dans le plan horizontal, ce qui facilite la visualisation). Les formes complètes des acteurs (les nœuds du réseau) étant ainsi définies dans la troisième dimension, nous nous plaçons maintenant dans le plan pseudo-horizontal passant par les noyaux *O* et *B* (c'est-à-dire le plan de coupe A-A de la Figure 12.1). La coupe dans le plan horizontal de cet ensemble prend donc l'allure représentée à la Figure 12.2.

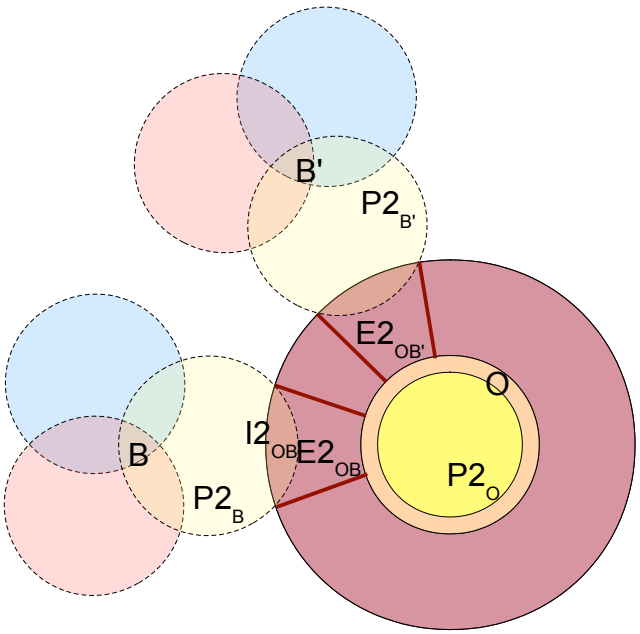


Figure 12.2: Représentation d'une interface entre trois homologues

Coupe A-A (plan horizontal) selon indication Figure 12.1

Nous avons adjoint à *B* un homologue *B'*, avec lequel nous souhaitons le mettre en interaction à travers *O* (qui devient de fait interface entre *B* et *B'*). Du fait des propriétés géométriques des formes choisies, les intersections sont telles [631] que le noyau de *O* a maintenant la forme d'un anneau (de section triangulaire curviligne) entourant le pôle $P2_O$, et que le lieu des espaces d'échanges (intersection des deux tores $P1_O$ et $P3_O$) est un autre anneau (représenté en foncé). Au sein de cet anneau sont figurés les espaces d'échanges bilatéraux $E2_{OB}$ et $E2_{OB'}$ entre respectivement *O* et *B*, et *O* et *B'*, ainsi que les rivets $I2_{OB}$ et $I2_{OB'}$ correspondants (qui ont cette fois, dans le plan de coupe A–A considéré, la forme d'un iris).

Nous avons maintenant tous les éléments topologiques en main pour pouvoir représenter l'interface dite bouclante (contenant la traduction dite de médiation B_2) décrite à la Figure 11.18 p. 330. Le circuit des échanges qui s'instaure au cours de l'interface composée (triplets de transactions et traduction) est représenté [632] à la Figure 12.3. Nous arrivons ainsi au résultat, formulé d'abord en termes géométriques : le mécanisme de construction de l'espace d'échanges commun à *B* et *B'* consiste, pour l'acteur *O*, à mettre en réseau, grâce à l'opération de traduction *B2*, les espaces d'échanges bilatéraux qui sont créés dans l'anneau $E2_O$. Les opérations de traduction conduisent à la construction progressive, par rapprochement des positions cognitives des deux interacteurs, d'un espace d'échanges multilatéral, *commun* aux trois homologues, à travers l'interface créée par *O*. Cette construction est donc plurielle, ou collective. Nous le désignerons par le terme d'*espace d'échanges collectif*, c'est-à-dire partagé par plus de deux acteurs.

631. Nous ne détaillons pas l'opération ; que les lecteurs peu versés en géométrie de l'espace veuillent bien considérer que le plus important est le résultat. Ils seront d'autant plus pardonnés de sauter à la p. 424, impatients d'en admirer une version tridimensionnelle à la Figure 15.9.

632. On notera, en écho à notre questionnement méthodologique sur « *le sens de la flèche* » (§ 11.2.4 p. 324), que la flèche de la boucle à l'intérieur du pôle $P2_O$ n'a rien de déterministe ni de déterminé, et qu'elle doit être plutôt considérée comme une sorte d'hyperflèche à la trajectoire floue ; ou peut-être de résille, ou de réseau de flèches ? (Nous n'irons pas plus loin dans la modélisation du processus de traduction).

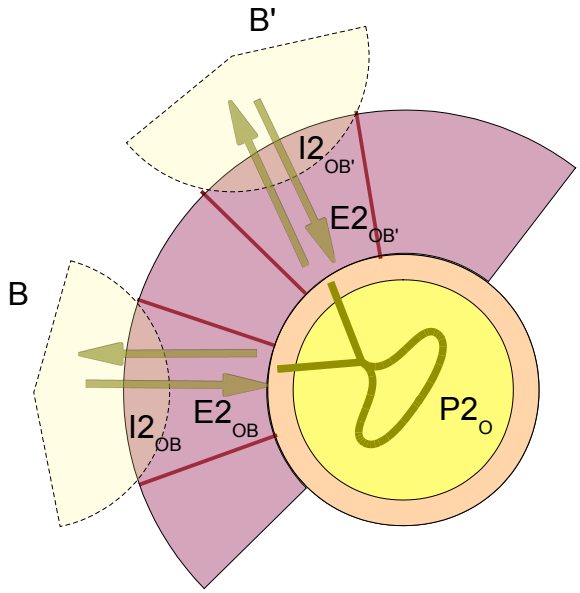


Figure 12.3: Interface bouclante entre homologues

Construction d'un espace d'échanges collectif par mise en réseau des espaces bilatéraux

Par extension à un nombre quelconque d'homologues, l'on entrevoit comment se construit un espace d'échanges collectif partagé entre homologues, grâce à l'interface multiple établie par l'acteur d'interface *O*. Par passage à la limite sur le nombre complet d'acteurs, et après le nombre nécessaire d'itérations dynamiques, l'anneau *E2* constitue la représentation graphique de cet espace d'échanges collectif, de cette *trading zone*.

Pour créer des espaces d'échanges collectifs entre subordonnés ou entre donneurs d'ordre, le mécanisme est tout à fait analogue *mutatis mutandis*, à savoir les plans de coupe et le choix des pôles à considérer comme des tores pour créer les anneaux correspondants. Quant au cas d'espaces d'échanges collectifs partagés par un nombre d'acteurs variable et placés de manière quelconque sur le réseau d'interfaces tridimensionnel, il constitue une généralisation du mécanisme précédent, qui ne nous semble pas poser de difficulté conceptuelle majeure (même si elle en pose assurément quelques-uns concernant leur visualisation…)

On perçoit l'enjeu en termes cognitifs et communicationnels de ce mécanisme de construction pour l'acteur d'interface *O* : dans une interaction bilatérale, chaque acteur peut assez aisément maîtriser les transactions qu'il entretient avec son interlocuteur. C'est déjà beaucoup plus délicat quand il s'agit de s'adresser *simultanément* à un ensemble d'interlocuteurs de statuts et de positions différentes, ou plus difficile encore, pour coordonner leur coopération ou leur collaboration. C'est ce que nous allons considérer maintenant. Du moins avons-nous déjà obtenu, avec notre modèle, une certaine visualisation du processus. Et cela est en soi selon nous un savoir actionnable essentiel pour le manageur technique.

12.2.2 De l'acteur d'interface à l'acteur-frontière

Que représente cet espace d'échanges collectif en forme d'anneau (ou globalement de triple anneau) entre les différents interlocuteurs, pour celui qui en est l'instigateur et l'animateur, l'acteur d'interface *O* ? Que se joue-t-il dans la construction collective de ces espaces d'échanges, et dans la circulation dynamique au sein et entre ces espaces d'échanges ? L'image en terme de processus de conception est bien celle-ci, comme nous l'avons souligné à plusieurs reprises : « *concurrent design happens at interfaces* » [Finger, Konda et Subrahmanian 1995], et non pas au cœur des sous-systèmes [633]. Les questions de validation progressive d'un concept et d'habili-

633. Ceci n'induit pas que le travail de conception ne soit pas nécessaire au sein de ces sous-systèmes. Il n'est cependant pas nécessairement de nature concourante, et il ne nécessite pas toujours cette dialogique interactive. Les processus métier qui s'y déroulent sont de nature plus déterministe et séquentielle, et les approches systématiques traditionnelles s'y appliquent de manière bien plus satisfaisantes. Cette question

tation d'une conception, portés ou représentés par des objets intermédiaires dûment équipés, sont liées à leur traversée progressive de divers espaces consécutifs, que Lécaille (2003) a qualifiés d'*espaces de conception* [634].

Or, ces espaces d'échanges ne sont pas donnés comme cadres *a priori* de la coopération, et leur traversée n'est ni spontanée, ni programmée ; elle est le résultat d'actions délibérées de la part du/des manageur(s) technique(s) en charge, avec la plus ou moins grande collaboration des autres acteurs du processus. Et c'est précisément à cet endroit que nous plaçons l'*action en boucle dialogique* du manageur technique définie au chapitre 10 dans les cellules c_{21} et c_{31} de la première colonne de notre matrice méthodologique [635] : nous faisons l'hypothèse qu'*en s'équipant d'espaces d'échanges collectifs (*construits comme une mise en réseau des espaces d'échanges bilatéraux), *l'acteur d'interface acquiert un statut d'acteur-frontière*. C'est ce que nous avancions déjà au § 11.2.1 p. 312 : « *Le manageur technique est un acteur d'interface : il est à la fois en charge de gérer les interfaces dans un contexte de projet, mais également de se constituer lui-même en interface, en médiateur facilitateur.* »

Ce concept d'acteur-frontière est heuristiquement inspiré de « *l'homme-frontière* » formulé par Debray [2010, 93] cité en épigraphe de ce chapitre p. 339. Nous le considérons comme analogue à celui d'objet-frontière [Star et Griesemer 1989]. Dans son ultime article, Star [2010a, 19-20] précise ce qu'elle entendait par là : « *Les objets-frontière sont un arrangement qui permet à différents groupes de travailler ensemble sans consensus préalable. […] Le mot [frontière] est utilisé pour désigner un espace partagé, le lieu précis où le sens de l'ici et du là-bas se rejoignent. Ces objets communs constituent des frontières entre groupes grâce à la flexibilité [interprétative] et à la structure partagée ; ils sont des ingrédients de l'action.* » Ce n'est pas le lieu de se lancer dans une étude approfondie du concept, de son histoire et de ses interprétations [Trompette et Vinck 2009a, 2009b]. Retenons avec Star qu'un objet-frontière n'est pas un objet stable, en ce sens qu'il offre une flexibilité interprétative, qu'il « *se situe entre plusieurs mondes sociaux (ou communautés de pratiques) où il est mal structuré* » [636], qu'il est adapté à leurs besoins par des groupes locaux dans un travail qui n'est pas interdisciplinaire, et que les groupes coopèrent sans consensus sur des formes différentes de l'objet. Cette notion vise donc à caractériser les mécanismes d'articulation entre acteurs appartenant à des « *social worlds* » [637] hétérogènes.

Vinck précise dans quelle mesure des objets intermédiaires, tels que ceux que nous avons spécifiquement étudiés au chapitre 8, peuvent devenir des objets-frontière. Il se base et fait d'ailleurs explicitement référence aux travaux de Lécaille qui étaient élaborés à partir des observations rapportées dans la partie II de la présente thèse.

> *Des objets intermédiaires peuvent devenir des objets-frontière notamment lorsqu'ils sont équipés, par exemple, de métadonnées, qui rendent possible la constitution d'une équivalence entre des mondes hétérogènes. Cet équipement matérialise dans l'interaction une infrastructure invisible faite de standards, de catégories et de conventions qui permet la circulation d'un monde à l'autre. L'ethnographie de l'activité de conception (notamment Lécaille 2003) a permis de montrer que non seulement les objets intermédiaires sont au cœur de l'action et des préoccupations des*

est au cœur d'un vaste débat, surtout si l'on considère l'activité de conception ainsi définie comme une activité fractale.

634. Nous étudierons ces questions lors de la prochaine cellule c_{33}.

635. § 10.5 et § 10.6, respectivement p. 300 et p. 301.

636. Dans la version originale de l'article, le terme utilisé est « *ill structured*» [Star 2010b, 604]. La traduction proposée par la version française que nous citons ici, « mal structuré », ne rend pas tout à fait le côté flou et sans jugement de valeur induit par l'anglais.

637. « Mondes sociaux ». On entend par là des groupes d'activités n'ayant ni de frontière claire ni d'organisation formelle et stable [Vinck 2011, n. 17].

> *acteurs, mais que l'équipement de ces objets est un sujet récurrent de controverse et de mobilisation collective.* [Vinck 2009, 67]

Lécaille a en effet écrit :

> *Pour qu'un objet intermédiaire, comme ces objets grapho-numériques, remplissent les conditions de la médiation entre acteurs d'un même réseau […], il y a lieu pour les acteurs de s'entendre sur les équipements qui ont à s'appliquer sur les objets et que ces équipements soient reconnus par tous les acteurs.* [Lécaille 2003, 147]

L'enjeu des espaces d'échanges est donc non seulement l'échange sur les contenus, mais également l'échange sur les codes et protocoles qui permettent les échanges sur les contenus, c'est-à-dire leur équipement (au degré 2). C'est toute la problématique [638] du déploiement d'un système de gestion de données techniques. Vinck poursuit son analyse de l'équipement, et précise les conditions de passage d'un objet intermédiaire au statut d'objet-frontière, précisément par ce travail d'équipement dont il est l'objet :

> *Les acteurs en situation consacrent du temps à imaginer, à mettre au point et à négocier l'équipement que devraient recevoir les objets intermédiaires, justement, pour être en mesure de circuler dans des espaces plus étendus et dans des mondes hétérogènes. La notion d'équipement permet d'éviter de penser que les caractéristiques de médiation, de traduction, sont attachées à la seule nature de l'objet. Nous faisons l'hypothèse que le passage de l'objet intermédiaire à l'objet-frontière tient justement à ce travail d'équipement. Équipé, l'objet intermédiaire entre dans un espace suffisamment commun à plusieurs mondes sociaux. Dès lors, la structure minimale reconnaissable par les membres de différents mondes serait l'équipement dont l'objet est doté plus que l'objet lui-même. Qu'il s'agisse du plus petit commun dénominateur, du répertoire, de l'idéal-type, de l'enveloppe ou du format qui facilite la communication, le travail d'équipement pourrait être la clef permettant de saisir ce qu'il y a de commun entre les objets intermédiaires et les objets-frontière de Star et Griesemer (1989).* [Vinck 2009, 67]

La transformation de l'acteur d'interface en acteur-frontière est selon nous analogue à celle concernant le passage de l'objet intermédiaire à l'objet-frontière par le travail dit d'équipement. Et il faut considérer selon moi ces deux transformations de l'objet et de l'acteur comme étant complémentaires et contingentes. La réussite même du processus exige qu'elles soient toutes deux effectives et conjointes : le passage de l'objet intermédiaire à un statut d'objet-frontière s'effectue dans un espace d'échanges construit par l'acteur d'interface qui passe ainsi au statut d'acteur-frontière, c'est-à-dire d'acteur dont l'action est reconnue par chaque partenaire au sein des différents espaces d'échanges auxquels il contribue – et vice-versa.

Comment se traduit ce statut d'acteur-frontière dans le réseau d'interfaces de notre modèle interfacial ? On peut voir le manageur technique comme un acteur d'interface qui cristallise autour de lui un nombre élevé d'interfaces en raison des espaces d'échanges collectifs dont il suscite la construction. Il devient ce que l'on appelle un "***hub***", un nœud ou une plate-forme doté-e-s de nombreuses connexions dans le réseau d'interfaces, qui est un réseau sans échelle. À ceci près bien entendu qu'il assure de surcroît un service de traduction, et ne se contente pas d'être un lieu de commutation. Galison emploie une image similaire : « *In the trading zone, where two webs meet, there are knots, local and dense sets of quasi-rigid connections that can be identified with partially autonomous clusters of actions and beliefs.* » [639]

638. Nous en reparlerons aux chapitres 13 et 14.

639. « Dans la zone d'échanges, là où se rencontrent deux réseaux, il y a des nœuds, des ensembles locaux et denses de connexions quasi-rigides que l'on peut identifier à des regroupements partiellement autonomes d'actions et de croyances. » [Galison 1997, 816]

Cette proposition de *hubs* dans un réseau d'interface est également en accord avec les conclusions de Türtscher concernant ses travaux sur les « *interlaced knowledge structure* » (structures de connaissance entrelacée) au sein d'ATLAS :

> *Structures emerged in a decentralized manner through subgroups that formed within the Collaboration in a self-organizing process. Groups formed tightly connected clusters around components and related technologies in such a way that many latent compatibility issues were contained within such a cluster.* [640]

Le mécanisme de construction des espaces d'échanges proposé ci-dessus est en mesure d'expliquer cette émergence de « *clusters* », ou agrégats d'acteurs. On assiste à l'élaboration concomitante d'une « *boundary infrastructure* » (infrastructure d'objets-frontière) [Bowker et Star 1999] organisé en une architecture modulaire qui prend forme peu à peu, et de l'édification de réseaux d'influences sous forme d'espaces d'échanges interconnectés, animés par des responsables de sous-projets positionnés en acteurs-frontière.

C'est donc à la création de ce que nous appellerons des *zones d'autonomie coordonnées* (ZAC) que nous assistons avec la construction de ces espaces d'échanges. Ce sont des zones d'autonomie (relative) dans la mesure où les acteurs qui y coopèrent, ayant co-construit un cadre de collaboration assez vaste, n'ont pas nécessairement besoin d'en référer à tout instant au contexte global de projet ; au contraire, libérées provisoirement des injonctions du programme global, ces zones d'autonomie favorisent l'émergence de solutions locales. Et elles demeurent néanmoins coordonnées, entre elles et avec le contexte global, du fait de la dynamique du réseau d'interfaces, et en particulier d'un continuum de ce réseau tel que modélisé par la cotte de mailles, et ce jusqu'aux positions de management supérieur et de coordination globale.

Ces zones d'autonomie coordonnées peuvent faire penser aux constellations de travail différencié de Mintzberg [1998]. Nous les rapprochons plus directement du concept de *cadre de coopération* [Boujut 2001 ; Boujut et Laureillard 2002]. « *C'est en fait une question de management d'interfaces qui se pose aux animateurs des phases coopératives* », question à laquelle nous estimons que notre modèle interfacial répond explicitement. Construire un espace d'échanges participe de l'établissement d'un cadre de l'action coopérative, et en ce sens, elle équipe le manageur technique qui l'anime et contribue à en faire un acteur de référence, un acteur-frontière. Comme le souligne Boujut, « *l'acteur d'interface anime la démarche coopérative, construit avec les acteurs des objets et des symboles métiers, anime le processus de capitalisation et d'apprentissage* » [Boujut 2001, 38]. Dans l'étude de cas menée avec son co-auteur dans l'industrie du transport, ils observent « *the emergence of a new role that is neither that of manager nor supervisor but rather an interface role with the purpose of facilitating the reflective process* » [641]. Or, c'est précisément le rôle que nous assignons à l'acteur-frontière équipé d'espaces d'échanges. En outre, les quatre cadres proposés pour l'action coopérative (temporel, spatial, conceptuel, organisationnel) [Boujut 2001, 35] sont tous quatre inclus dans la construction de l'espace d'échanges (même la notion d'*espace partagé* informatique peut aisément s'y inscrire) [642].

640. « Des structures ont émergé de manière décentralisée sous la forme de sous-groupes qui se sont formés au sein de la Collaboration selon un processus d'auto-organisation. Ces groupes ont constitué des ensembles fortement liés autour des composants et des technologies correspondantes, d'une manière telle que de nombreuses questions latentes de compatibilité étaient maintenues à l'intérieur de cet ensemble » [Türtscher 2008b, 3]. On se référera aussi à la figure en couleurs [Boisot et al. 2011, Plate 10].

641. « L'émergence d'un nouveau rôle qui n'est ni celui d'un manageur ni celui d'un superviseur, mais plutôt un rôle d'interface dans l'intention de faciliter le processus réflexif ». [Boujut et Laureillard 2002, 512]

642. Nous en proposons d'ailleurs quelques éléments concrets lors de la partie IV de cette thèse.

Il ne faudrait pas occulter dans ce mécanisme de constructions des espaces d'échanges les controverses auxquelles elles donnent lieu. L'auto-(éco)-organisation favorise l'émergence de ces espaces, mais celle-ci reste soumise à tous les aléas illustrés dans la partie II et propres à toute entreprise collective : leur construction peut être contestée, détournée, contournée, omise, ignorée. Le modèle que nous avons proposé n'est pas déterministe ! Le chemin qui mène à l'établissement, au maintien et à l'utilisation effective de ces espaces d'échanges est lui-même complexe. Il participe en cela du processus de conception. Car, ainsi que je l'écrivais au chapitre 3, « *concevoir, c'est concevoir à la fois la conception et le processus de conception* ». Nous y reviendrons très vite.

La réussite de cette construction d'espaces d'échanges consacre l'accès de l'acteur d'interface à cette position (visible et exposée) d'acteur-frontière, elle dépend donc autant des obstacles évoqués ci-dessus que de ceux liés aux questions interpersonnelles et aux dynamiques de construction de la confiance (méthode PAT-miroir [Le Cardinal, Guyonnet et Pouzoullic 1995]). Les enjeux de carrière, concurrence, compétition, voire jalousie, se surajoutent alors aux problématiques auxquelles fait face l'instigateur d'espaces d'échanges. Il lui faut négocier, tenter de convaincre, batailler, justifier de l'utilité de sa construction, rallier à lui ceux qui l'aideront, en écarter les adversaires ou du moins atténuer leur pouvoir de nuisance, affronter les luttes de pouvoir, jouer de la dynamique du projet, de l'appui de ses donneurs d'ordre comme de l'adhésion de ses subordonnés, faire preuve de charisme… Devenir le nœud d'un réseau d'interfaces est un parcours d'autant plus animé dans une organisation complexe aux réseaux d'interfaces très étendus et aux composantes très variées. Nous pensons apporter avec notre modèle quelques éléments qui permettent d'en éclairer le mécanisme.

En résumé, nous soutenons la thèse suivante sur le rôle du manageur technique et proposons la définition suivante :

> ***Le manageur technique est un acteur au sein d'un réseau d'interfaces qui s'équipe d'espaces d'échanges collectifs comme cadre de coopération, afin de faire passer des objets intermédiaires équipés au statut d'objets-frontière.***

Ce rôle n'est pas réduit de manière exclusive à cette dimension, et il possède assurément bien d'autres – le leadership, par exemple – dont l'étude sort du cadre de ce travail.

C'est ce triptyque [643] d'un *acteur*, d'un *espace* et d'un *objet*, liés entre eux de manière complexe, qu'il nous semble essentiel de retenir à ce stade pour l'élaboration d'un processus de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* [644]. Et cela tient aux deux moyens par lesquels nous allons les lier : grâce aux liens d'interfaces (pluralité d'objets), et temporellement (via la dynamique de projet).

12.3 Cellule majeure c_{33} : traverser les espaces

C'est la question du niveau critique de décomplexification qui se dresse à nouveau devant nous à l'orée de cette dernière cellule de notre matrice méthodologique. Il s'agit en effet d'intégrer dans cette cellule tous les enseignements tirés à la fois de sa dernière colonne – placée sous le signe du principe d'auto-éco-organisation – et de sa dernière ligne – consacrée à la question initiale du processus *Ω (Conception, Intégration)*. Le contenu sémantique de cette cellule est donc complexe, et nous voici à nouveau confrontés au défi de décrire linéairement un modèle de nature

643. Un triptyque bientôt trialectique, voir le chapitre 16.

644. Rappelons que la notation en *Ω (x, y)*, introduite à la cellule c_{11} au § 10.4 p. 297, signifie un processus en boucle dialogique autorégulateur.

récursive, dialogique, hologrammique, en un mot complexe. C'est en condensé le défi que nous avons affronté pour la construction de toute la partie III, et plus globalement pour l'élaboration de la carte en omegador de la thèse. Parler du complexe sans le perdre dans le discours nécessite d'inventer de nouveaux modes de discours. Je ne prétends pas y être parvenu ; que l'on me fasse crédit de m'y être sincèrement attelé.

Et puisque l'objet de cette cellule majeure va parler de processus, nous voudrions voir ce discours complexe sur ce mode : un processus dynamique récursif. La construction linéaire pas à pas du modèle est impossible. Nous ne sommes pas dans une situation où il s'agit d'élaborer des éléments, puis de les rassembler entre eux en une partie cohérente, qui une fois adjointe à d'autres parties donnerait un tout complet. Nous sommes dans une dynamique où chaque élément se construit en même temps que se construit le tout qui le contient, qui est fait d'eux et les fait à la fois. Concrètement, le processus de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration)* que nous élargirons très prochainement est un processus dynamique, en ce sens qu'il est à la fois le résultat de tout ce qui le précède et aussi de tout ce qui le suit. La description que j'en ferai ici le sera également. Il faut sans doute superposer modes inductif, déductif, abductif [645] et intuitif pour le saisir. Ce modèle n'est saisissable à mon sens qu'au regard des observations de la partie II, des conceptualisations de la partie III (y compris ce modèle lui-même, une caractéristique de la récursivité induite aussi bien par le principe dialogique que par le principe de l'auto-éco-organisation), et également des premières tentatives de mises en actes (sur le mode complexe agir ↔ penser) de la partie IV. Un processus récursif…

Après cette introduction de nature méthodo-épistémologique, je vais exposer le modèle complexe du processus tel que je le conçois, dans sa globalité ouverte. J'en complèterai ensuite la présentation par certains éléments sur les espaces d'échanges et les frontières de ces espaces, indispensables pour saisir ledit processus – tout en me projetant dans la structuration de la partie IV qui l'éclairera sans doute en retour [646]. Cette partie IV a aussi pour objectif d'instancier le processus de manière concrète pour le cas qui est l'objet de cette thèse : à savoir la gestion et l'intégration des grands projets complexes, de nature scientifique, en particulier accélérateurs et détecteurs de particules. Ce qui signifie aussi que nous cherchons à conserver aussi loin que possible, dans cette partie III, la généralité du propos, renvoyant à ses perspectives ultérieures le soin d'en envisager des applications dans d'autres domaines, si l'on estime qu'il dégage un corpus suffisamment cohérent de savoirs potentiellement actionnables. Procédons à l'exposé du processus dans sa globalité.

12.3.1 Un processus élémentaire au sein des espaces d'échanges

L'objectif du processus *Ω (Conception, Intégration)* est d'expliciter l'articulation dialogique entre les processus liés de conception et d'intégration. En préalable, nous adoptons comme définition qu'un « *processus est un enchaînement partiellement ordonné d'exécution d'activités qui, sous l'effet d'une sollicitation, réalise un objectif* » [Théroude, Braesch et Haurat 2002]. Retenons la dimension temporelle, dynamique, et l'orientation vers un but. Le processus *Ω (Conception, Intégration)* au sein d'un projet donné est donc, globalement et de la manière la plus générale, le pro-

645. Abduction : mode d'inférence par généralisation de la meilleure explication apparente [Hanson 1958, 2000].

646. Il nous faudrait ménager des espaces de bouclage dans la thèse elle-même – qui se fait ainsi à l'image dudit processus, nouvelle mise en abyme. Nous touchons à nouveau aux limites du formalisme discursif linéaire tel qu'il s'écrit au fil des lignes et des pages – et les appels en avant répétés apparaîtront sans doute fatigants et peu efficaces à la longue.

cessus qui permet d'évoluer d'une idée vers sa concrétisation, au sens que nous lui avons donné dans la cellule c_{31} (§ 10.6 p. 301) : un processus qui « *favorise cette synergie entre logique de conception et d'optimisation des performances des composants, et logique d'intégration et d'optimisation des interrelations entre ces composants*. »

En se basant sur ses observations et sa recherche-action au sein du Bureau technique à la fin des années 1990, Lécaille (2003) a introduit le concept d'espace de conception, conçu comme « *constitué dans l'action en relation avec les objets produits ou mis en circulation* » (la récursivité y est déjà induite). Il y décrit le mouvement d'objets intermédiaires dûment équipés à travers ces espaces, jusqu'à atteindre un statut qu'il dénomme « *trace habilitée* » [647]. Ce faisant, il a élaboré sans le vouloir [648] un véritable modèle de processus de conception.

Je reprends ce modèle comme élément de base de mon propre modèle complexe du processus dialogique *Ω (Conception, Intégration)* en le complétant des dimensions que ni lui, ni Vinck (2011) après lui, n'ont explicitement introduites : la dimension de conception *simultanée* des différents composants, et la *structuration* d'ensemble de tous les composants dans un contexte [649] de projet [650].

Nous en sommes restés à l'issue de la cellule c_{23} avec un triptyque composé d'un *acteur*, d'un *espace* et d'un *objet*. Rajoutons-y un *but* (l'objectif défini par – ou pour mieux dire, co-défini avec le projet) ; et complétons par un *itinéraire*, donc un déplacement, et même une trajectoire, y ajoutant ainsi une dimension temporelle et surtout téléologique. Et nous obtenons un premier processus élémentaire (en ce sens qu'il s'applique à un seul objet) : *un processus élémentaire est la trajectoire d'un objet, piloté par un acteur, traversant un espace, pour atteindre un but situé à la frontière dudit espace*.

Il convient évidemment de préciser que cet itinéraire, cette trajectoire sont tout sauf linéaires. Bouclages, retours en arrière, régressions, égarements, fugacités, impasses, rencontres de compagnons de route (agglomération avec d'autres objets) ou au contraire scissions, tout cela est le lot de tels processus, dont le pilotage (en boucle fermée) est précisément assuré par l'acteur de projet qui en a la charge. Cela implique aussi que, s'il est délaissé par son pilote, un objet peut très bien être oublié au bord du chemin… Comme nous le disions plus haut, leur traversée des espaces d'échanges n'est ni spontanée, ni programmée, et le processus doit être animé par des acteurs humains (éventuellement assistés de non-humains à la mémoire plus systématique et infaillible, les systèmes d'information [651]) : un tel processus est le résultat d'actions délibérées (et même d'un méta-processus, incluant la co-construction des espaces traversés) de la part du/des manageur(s) technique(s) en charge et des autres acteurs. C'est pourquoi nous avons placé à cet endroit l'*action en boucle dialogique* du manageur technique.

---

647. Concept suffisamment solide pour avoir donné son titre à la thèse.

648. Selon ses propres dires : « *JFB, lors de la soutenance, m'avait mis le nez sur ce que j'avais effectivement fait : "tu as fait un modèle de la conception" (et à l'époque, je n'avais pas pris conscience de [cet] apport sur les "espaces de conception").* » Pascal, courriel à Bertrand, 25.02.2012.

649. J'emploie le mot de *contexte* faute de mieux, et je vais le nuancer très rapidement : par définition, un contexte ne change pas en fonction de ce qu'il contextualise, alors que nous serons amenés à parler de co-construction également à ce niveau. Comme nous l'avons déjà signalé lors de l'étude de cas n°0 (§ 3.1.1 p. 80), la notion de contexte dans une approche complexe doit être affinée : le contexte n'est plus indépendant de ce qu'il contextualise (sinon pour désigner une relation peu évolutive ?) : il se forme un système contexte / contextualisé qui implique une approche dynamique du mécanisme de contextualisation.

650. Nous entreverrons dans la partie IV la place respective des outils de CAO et de PLM dans cette structuration – c'est déjà un retour sur le terrain, qui n'est pas encore de mise.

651. Le rôle de ces systèmes d'information et des équipements associés des objets intermédiaires peut, à cette aune, être considéré comme la tentative de créer des trajectoires privilégiées dans les espaces d'échanges de manière à systématiser, voire à automatiser certaines transactions dans le but de fluidifier, d'accélérer, et donc d'augmenter la performance (en temps) de ces processus.

Autrement formulé, ce processus élémentaire opère conjointement trois transformations : celle d'un objet intermédiaire en objet-frontière, celle d'un réseau d'échanges bilatéraux en un espace d'échanges collectif (définissant /défini par une frontière), et enfin, celle d'un acteur d'interface en acteur-frontière. Le processus élémentaire crée des frontières pour chaque constituant du triptyque.

La question de la frontière (déjà évoquée à la fin du § 5.4.1 p. 134) est particulièrement intéressante. Morin affirme : « *Il ne faut jamais chercher à définir par des frontières les choses importantes. Les frontières sont toujours floues, toujours interférentes. Il faut donc chercher à définir le cœur* » [Morin 2005, 98]. La discussion de cette affirmation demanderait d'autres développements que ceux que nous pouvons nous permettre dans notre cadre [652]. C'est pourtant là que nous aimerions porter le fer, convaincus que la difficulté n'est pas tant de définir le cœur que d'en circonscrire l'étendue et d'en poser les limites ; voire de considérer que le cœur est *aussi* dans la frontière. C'est dans une vision structuraliste des choses que les frontières n'ont pas de dimension et ne peuvent pas occuper d'espace. Or, l'aire de délimitation non seulement existe, mais elle est le lieu d'intenses activités ; un *no man's land* bien peuplé…

Au chapitre 5, notre définition de l'enveloppe nous a amenés à décortiquer les contributions de chaque source à la taille effective de la zone réservée (voir la Figure 5.7 p. 131), la concaténation (l'empilage) de ces contributions attribuant une certaine épaisseur à la zone frontière. Nous avons également proposé au chapitre 11 de décomposer les interfaces entre acteurs en transactions et traductions, leur conférant là aussi de l'épaisseur, d'une nature non géométrique. Nous défendons ici la thèse que la frontière d'un espace d'échanges est également dotée d'une épaisseur. Or, une frontière épaisse constitue un espace en soi, *l'espace de la frontière de l'espace d'échanges* – ou en d'autres termes *la frontière de la frontière*, selon une formulation dans le style de Morin non dénuée de récursivité. Cette frontière constitue, dans notre modèle, le lieu des prises de décision, le lieu où change le statut de l'objet qui l'atteint ; et l'acteur-frontière en détient l'une des clés.

Cette question de la décision est centrale. Ce sont dans les espaces d'échanges que se discutent l'intérêt, la pertinence, la validité, le potentiel, la richesse d'un objet intermédiaire porteur d'une solution, que s'estiment ses performances, que s'échangent les points de vue, que se disputent les arguments. Et à la frontière de ces espaces, il s'agit de décider. Peut-être la question qui devrait nous occuper ici serait alors d'explorer ce que signifie décider dans un tel processus, ce que signifient les termes valider et approuver, tous ces actes supposés performatifs. Mais que performent-ils, et dans quelles conditions ? Entre le modèle d'un décideur rationnel omnipotent ayant une vision d'ensemble d'un projet et qui prendrait les décisions optimales pour tous, et un modèle où des centaines de micro-décisions sont prises simultanément par autant d'acteurs sans aucun ordre lisible, il existe différents modèles proposés par une littérature abondante [Vidaillet, Estaintot et Abecassis 2005]. Nous prônons une co-construction collective, au sein de l'espace d'échanges, de l'évaluation et de la vérification de l'objet intermédiaire une fois parvenu à la frontière de l'espace d'échanges – c'est-à-dire pour lequel il y a une demande (tacite, explicite, individuelle, collective, *bottom-up*, *top-down* ou *middle-in*, cela est une autre question) de validation et de changement de son statut. La traversée, le franchissement effectif de la frontière est alors la formalisation de cette décision collectivement prise. Cette formalisation est opérée par la personne habilitée pour cela, un manageur technique qui pourra (sans exclusive, c'est selon son degré 1, 2 ou 3 d'intervention) être ou non l'acteur-frontière qui a construit l'espace d'échanges correspondant.

652. La notion d'objet-frontière a par exemple été récemment élargie à celle de « *border-crossing* » (traversée des frontières) [Akkerman et Bakker 2011].

12.3.2 Les processus de conception et d'intégration

Explicitons, dans le cas des processus de conception et d'intégration, ce processus élémentaire sous la forme d'un objet traversant un espace sous la conduite d'un acteur, qui atteint une frontière où sera décidé de son sort ultérieur.

Nous nous placerons tout d'abord dans le cas du processus de conception d'un composant, tel que décrit par Lécaille (2003) et Vinck (2011). L'objet considéré ici est un objet intermédiaire porteur de la représentation, et en ce sens médiateur d'un objet potentiellement réel (le futur composant du projet). À chaque phase du processus, cet objet intermédiaire ne peut *a priori* connaître à terme que deux destins : vaincre, ou mourir. Lécaille écrit : « *La médiation conduit à considérer des objets en projet. La fugacité conduit à considérer des objets en rejet* » [Lécaille 2003, 121]. Plus modestement en ce qui nous concerne, l'objet a deux possibilités : soit disparaître après élimination au cours du processus de conception ; soit obtenir pour le composant dont il est le médiateur [653] le statut « *bon pour réalisation* » (et en cela, devenir un objet-frontière, à la frontière entre le monde de la conception et le monde de la production : que l'on pense à l'exemple d'un dessin de définition). Ajoutons-y une troisième possibilité, loin d'être rare, proche de la première : être abandonné par son pilote sans pour autant être formellement considéré comme obsolète.

Lécaille a défini ses « *espaces de conception* » comme des espaces d'échanges :

> *L'espace de conception est constitué dans l'action en relation avec les objets produits ou mis en circulation. Un espace de conception correspond au moment où émerge la nécessité d'avoir à conserver l'objet pour soi-même ou non, d'avoir à se persuader soi-même ou à persuader d'autres acteurs de ce qui y est représenté, d'avoir à se coordonner ou bien d'avoir à solliciter l'approbation d'autrui. En rapport à ces actions, les espaces de conception indiquent le cadre des échanges possibles ou non des objets en question. Ces espaces se délimitent en fonction du destinataire et de son rôle dans le collectif, ou en fonction de la délimitation que s'impose l'acteur de la conception, que ce soit ou non par une prescription préalablement définie par un ou plusieurs acteurs.* [Lécaille 2003, 166]

L'approche de Lécaille est complétée par la notion de maturité d'objet [Grebici, Rieu et Blanco 2005] qui permet de mesurer la progression de l'objet dans sa traversée des espaces successifs jusqu'à sa validation. La Figure 12.4 propose la représentation d'une phase de ce processus de conception [654]. Vinck [2011] évoque ce travail d'équipement de l'objet intermédiaire comme une transformation ontologique, et souligne comme nous l'importance de la co-construction :

> *The equipment added to intermediary objets enables them to be connected to conventional supports and spaces of circulation. […] The challenge relating to the equipping of these objets concerns their change in ontological status as well as the areas of exchange and circulation that are co-produced alongside this change in status. The equipping of the object […] corresponds to an ontological transformation of the object.* [655]

653. Je souligne la distinction explicite que je fais entre l'objet intermédiaire (réel ou virtuel) et le composant destiné à devenir réel (avec des subtilités sur l'instanciation que je réserve au chapitre 14).

654. Nous y reviendrons au chapitre 14, § 14.3 p. 395, qui sera consacré à la mise en place d'un tel processus. Nous y expliciterons les termes introduits par Lécaille, repris et complétés par Grebici.

655. « L'équipement ajouté aux objets intermédiaires leur permet d'être mis en phase avec des supports conventionnels et des espaces de circulation. […] Le défi relatif à l'équipement de ces objets concerne leur changement de statut ontologique ainsi que les aires d'échange et de circulation qui sont co-produites au cours de ce changement de statut. L'équipement de l'objet […] correspond à une transformation ontologique de l'objet. » [Vinck 2011, 38]

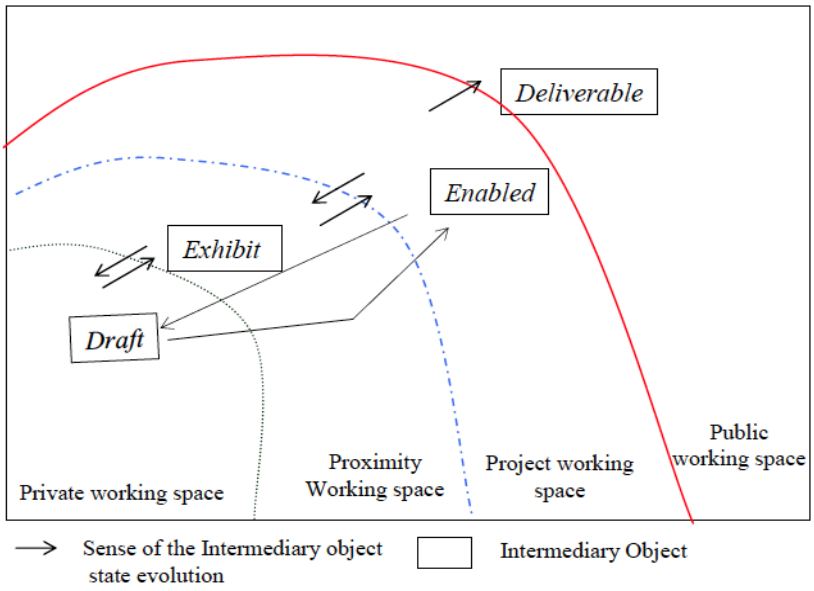


Figure 12.4: Modèle de l'évolution d'un objet intermédiaire lors du processus de conception

in [Grebici et al., 2005, Fig. 4]
Draft : brouillon ; *exhibit* : pièce à conviction ; *enabled* : trace habilitée ; *deliverable* : livrable
Private, proximity, project, public working spaces : espaces de travail privé, de proximité, de projet, public
Sense of the Intermediary object state evolution : direction de l'évolution de l'objet intermédiaire

Cette approche passe toutefois sous silence le *décalage* entre la transformation ontologique de l'objet (intermédiaire) comme représentation artefactuelle et celle de l'objet potentiellement réel dont il est le médiateur, un décalage fondamental dont nombre d'acteurs de terrain n'ont eux-mêmes pas du tout conscience [656].

Pour compléter notre processus de conception, nous ajoutons au modèle implicite de Lécaille l'explicitation du caractère décisionnel attaché au franchissement de la frontière par l'acteur-frontière défini à la cellule précédente. Nous parvenons ainsi à notre définition du *processus élémentaire de conception* d'un produit dans un projet, schématiquement constitué de :

- les trajectoires successives d'un objet intermédiaire (représentant l'objet potentiellement réel, encore virtuel) ;
- piloté par des acteurs : au départ le créateur de l'objet intermédiaire, propriétaire de « *l'espace privé de conception* » à sa propre initiative ; ou le client de ce créateur ; ou tout acteur de notre réseau d'interfaces ;
- à travers l'espace d'échanges construit à cet effet pour la phase de conception considérée (espace *co-construit* avec l'objet, et à cette fin, ou désigné pour cette traversée) à l'instigation de l'acteur d'interface intéressé ;
- jusqu'à atteindre la frontière où il accroît sa maturité d'un degré après validation par l'acteur-frontière correspondant (l'instigateur ou le responsable de l'espace d'échanges considéré).

Poursuivons le déploiement de notre processus complexe. Car, et c'est là où nous dépassons le périmètre couvert par le modèle de Lécaille (et de bien d'autres), ce n'est pas un seul objet qu'il faut considérer pour réaliser un projet : c'est un ensemble d'objets, et parfois très vaste, qu'il s'agisse de composants et d'assemblages réels, ou bien qu'il s'agisse de tous les objets intermédiaires qui sont élabo-

656. C'est pourquoi, au chapitre 14, nous insisterons sur la différence ontologique entre article, modèle volumique et dessin.

rés au cours du processus de conception en train de se co-élaborer avec ces objets intermédiaires. Et pour atteindre le but du projet, il faut faire converger tous ces processus de manière concourante ! Et puis en outre, le nombre d'acteurs est également potentiellement très élevé, et donc avec lui celui des espaces d'échanges [657].

Nous définirons donc le *processus global de conception* d'un projet comme la mise en parallèle de l'ensemble des processus élémentaires de conception pour l'ensemble des composants du projet. Ce processus est en général piloté au niveau du management de projet, et non pas du bureau d'études : c'est l'*avancement connexe* de la conception des différents sous-systèmes.

Or, ce faisant, nous n'avons pas encore introduit le couplage entre ces composants, autrement dit nous avons passé sous silence la dimension d'intégration. En effet, ce qui lie les différents composants entre eux, comme nous l'avons relevé lors de la cellule c_{32} (§ 11.3 p. 334), c'est la *double structure* des *liens de composition* (un assemblage est fait d'un certain nombre de composants, selon la décomposition que suivent les processus de conception) d'une part, et des *liens d'interface* (latéraux, entre composants voisins quelle qu'en soit la nature ou la fonction) d'autre part. Nous avions relevé combien les projets sont quasi-exclusivement structurés selon les liens de composition, laissant la gestion des liens d'interface aux (pas forcément bons) soins du pilotage du projet. Nous prônons donc une approche radicalement différente, qui donne aux liens d'interface toute leur importance.

Ce réseau de liens d'interface est en fait porté par un ensemble d'objets intermédiaires spécifiques, dont la nature est assez proche du concept d'enveloppe déployé au chapitre 5. Ce réseau constitue lui aussi un objet intermédiaire, ou plutôt une *infrastructure d'objets intermédiaires* [658]. En définissant au chapitre 3 le processus d'intégration comme une activité visant « *à vérifier la mutuelle compatibilité des constituants d'un système, à identifier les frontières et interfaces pertinentes entre ces constituants, et à simuler le fonctionnement potentiel du système* » (§ 3.4.2 p. 95), nous étions assez proches de parler d'architecture. Après les travaux de Türtscher déjà évoqués, nous n'hésitons plus, donnant ce sens particulier à l'infrastructure d'objets intermédiaires définissant les interfaces, et donc l'architecture du projet [659].

De manière analogue au processus global de conception précédemment défini, nous considérerons par conséquent que le *processus global d'intégration* est schématiquement la trajectoire de cette infrastructure d'objets intermédiaires définissant le réseau d'interfaces entre composants d'un assemblage (ou entités d'un système), trajectoire pilotée par des acteurs (typiquement, l'intégrateur du projet) à travers l'espace d'échanges construit à cet effet par l'acteur d'interface intéressé, jusqu'à atteindre la frontière après validation par l'acteur-frontière correspondant (l'instigateur ou le responsable de l'espace d'échanges considéré). La trajectoire de cette infrastructure d'objets intermédiaires définissant le réseau d'interfaces entre composants est assimilable à un réseau de trajectoires au sein des espaces d'échanges ; il est, en première analyse, analogue à celui décrit pour l'approbation des enveloppes d'ATLAS.

Ce processus global d'intégration pourrait être vu comme la mise en parallèle, ou en réseau, d'un certain nombre de *processus élémentaires d'intégration*, à savoir la

657. Il faudrait sans doute imaginer une véritable *écologie* (une science systémique et dynamique par essence) des espaces d'échanges, qui aiderait à déterminer en quoi certains espaces (en fonction de leur taille, de leur nature, de leurs positions respectives) sont propices et d'autres moins à l'éclosion et au développement de certaines idées et de certains objets intermédiaires plutôt que d'autres, et pourquoi, du point de vue social et organisationnel, certains acteurs-frontières sont plus efficaces que d'autres. Le champ est vaste, nous ne le labourerons pas davantage.

658. Le terme d'infrastructure est introduit par Bowker et Star pour les objets-frontières [Bowker et Star 1999], et il nous semble qu'il s'applique assez bien par simple transposition aux objets ou aux collections d'objets intermédiaires [Vinck 2009, 66].

659. Nous y reviendrons de manière très concrète au chapitre 15.

trajectoire des objets intermédiaires définissant la place de chaque composant dans l'assemblage (ou de chaque entité dans le système), à travers l'espace d'échanges construit à cet effet, jusqu'à atteindre la frontière qui le valide en tant qu'objet-frontière entre chaque équipe de conception concernée. Ce serait alors au processus global d'intégration d'assurer la compatibilité mutuelle de ces objets intermédiaires élémentaires au sein du réseau d'interfaces. Nous sentons bien ce que cette approche a de systématique et de réducteur ; la simple juxtaposition d'un processus de conception et d'un processus d'intégration séparés nécessite d'être dépassée.

12.3.3 Le processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* [660]

Pour saisir le processus de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration)* dans sa globalité au niveau du projet, il faut complexifier encore l'approche, afin de se hisser au dessus du niveau critique de décomplexification. Procédons en deux mouvements. À partir des processus globaux de conception et d'intégration, constituons d'abord le processus *Ω (Conception, Intégration)* comme dépassement de l'inséparabilité des processus de conception et d'intégration. Puis élargissons-le au troisième terme de l'opérateur dialogique Ω, la réalisation, en partant du constat qu'il n'y a de projet réussi qu'un projet *réalisé*, c'est-à-dire matérialisé, et que cette dimension de la réalisation ne peut être ni un élément absent ni une donnée intangible, transcendante et indépendante du processus *Ω (Conception, Intégration)*.

Le processus *Ω (Conception, Intégration)* ne peut pas être considéré comme une simple juxtaposition de deux processus globaux, l'un qui serait de pure conception, et l'autre de pure intégration. Le processus à considérer est en fait un *processus de processus* : c'est un tissage complexe des deux réseaux d'objets intermédiaires, les trajectoires simultanées et couplées de tous ces objets intermédiaires, trajectoires de tous les processus élémentaires de conception, reliés à tout instant et de manière dynamique par tous les processus élémentaires d'intégration constitués en réseau d'interface, avec tous les couplages induits, ces couplages étant eux-mêmes dynamiques, et ce pour tous les types de composants. Le processus *Ω (Conception, Intégration)* a pour objectif d'assurer la concourance de toutes ces trajectoires.

Or, tout cela doit fonctionner pour chaque phase du cycle de vie de chaque composant, et ce dès l'élaboration des spécifications fonctionnelles – l'attendu final – et jusqu'à l'exploitation – le fonctionnement effectif et les performances –, en passant par les recherches de solutions et par les conditions de fabrication. Et cela doit s'appliquer à chaque exemplaire de chaque type de composants (autrement dit, à chaque instance de l'article). C'est dans cette nécessaire, pour ne pas dire immanente émergence du principe de réalité et de matérialité, qu'apparaît le troisième terme du processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, réalisation)* : par la prise en compte indispensable du projet [661] (qui le suscite et qui s'en nourrit) dans le processus même *Ω (Conception, Intégration)*.

660. Ce n'est pas la première fois (voir la note 564 p. 299) que nous utilisons l'opérateur dialogique avec plus de deux variables, mais c'est la première fois que nous le faisons de manière précise. J'assume ce dépassement de la logique binaire et cette brisure de symétrie (qui fige le complexe). Morin lui-même [2008] n'hésite pas à de nombreuses reprises à mobiliser des boucles récursives à trois ou quatre termes, voire davantage. Si le principe dialogique est construit au départ avec « *deux instances complémentaires, concurrents et antagonistes* » (§ 10.4 p. 297), il est important pour nous d'entrer dans cette trialogique, ou trialectique, de mettre la matrice en mouvement, et de rendre justement la dynamique complexe qui se joue ici (voir le chapitre 16).

661. À moins de considérer le travail de projet comme purement spéculatif, et jamais destiné à voir le jour dans toute sa dimension concrète. Ceci dit, je n'insinue pas que les concepteurs ne prennent pas en compte le projet dans le processus de conception : je relève simplement que c'est souvent de manière extrinsèque, en termes de données d'entrée ou de contexte, et non pas comme élément-même du processus, ainsi que je le propose.

(Un tel processus est un net dépassement de la conception dite *intégrée*, laquelle se limite – et c'est déjà un vaste programme – à la prise en compte des conditions de production dans la conception : le processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* inclut le projet dans toute son extension.)

Autrement dit, et c'est notre conviction profonde [662], il y a *co-construction* du projet par le réseau d'interfaces entre acteurs tout au long du cycle de vie du projet ; et la validation ultime de la spécification fonctionnelle est liée à la mise en opération, ainsi qu'à *toutes* les autres phases du cycle de vie de *tous* les autres composants à travers leur réseau d'interfaces, par la dynamique des espaces d'échanges au sein du projet. Lequel projet joue, pour ce processus de processus, deux rôles : celui de pourvoyeur d'un objectif évolutif co-construit, la spécification fonctionnelle ; et celui de cadenceur temporel, la définition des échéances [663]. On l'aura compris, notre approche induit que le projet lui-même est le résultat d'une co-construction, y compris dans l'actualisation (au sens de réalisation du potentiel) de sa planification (au sens organisationnel, et non pas uniquement temporel). C'est ce que nous pouvons appeler *espaces de bouclage* : des espaces d'échanges ouverts qui assurent, au niveau parfois le plus global et le plus tardif, les boucles itératives récursives entre les différents éléments couplés.

Le chapitre 16 exposera l'état de nos réflexions sur la question, et aboutira à l'introduction déjà évoquée d'un hypercompas [664] trialectique : naviguer simultanément dans tant d'espaces d'échanges n'est pas à la portée des outils traditionnels de gestion de projet, et nous n'irons pas jusqu'à savoir en introduire de nouveaux. Sans trop anticiper, qu'il me soit permis de relever que cette vision d'un projet collaboratif comme triple processus co-construit n'est accessible que par l'approche complexe.

En suivant les travaux d'Olmedo sur les organisations considérées comme des systèmes adaptatifs complexes qui recommande d'évoluer « *from rules to adaptive guidelines* » [665], je considérerai, sans approfondir :

> *Le processus de collaboration complexe global est défini sous la forme Ω (Conception, Intégration, Réalisation), et* ***ce processus est l'auto-émergence récursive du processus.***

∴

Nous voici à la fin de cet exposé complexe. Il soulève un nombre considérable de questions, tant du point de vue méthodologique que conceptuel ou applicatif. L'on pourra ainsi par exemple s'interroger sur notre proposition d'assimiler l'obtention du statut d'objet-frontière à la sortie d'un espace d'échanges – par ailleurs co-construit. L'on pourra s'interroger sur les relations entre acteurs et espaces. Nous n'avons pas réponse à tout, le périmètre séparant nos savoirs de notre ignorance s'accroissant à proportion de la quantité de savoirs potentiellement actionnables élaborés. Ce premier exposé avait pour objectif de donner une image globale du processus ; on voit que, dans l'opération, on y inclut récursivement le contexte de projet, qui cesse ainsi d'être un contexte pour devenir un élément même du proces-

662. Nous l'avions déjà évoqué au § 9.2.1 p. 267.

663. Je n'omets pas les nombreuses autres fonctions du management de projet, comme l'attribution des ressources – qui peut avoir une notable influence sur le processus. Partant des processus de conception et d'intégration, il ne faudrait pas qu'à en enfler exagérément le périmètre, notre processus collaboratif perde toute identité : le management du projet dans sa globalité ne s'y réduit assurément pas.

664. Une hypernavigation dans des hyperespaces nécessitant un hypercompas pour nos hyperpilotes d'hyperprojets ?

665. Évoluer « depuis des règles vers des lignes de conduite adaptatives » [Olmedo 2010, 79-80].

sus. Forts de cette image globale, nous allons passer à la partie IV et à la mise en acte de quelques-uns de ces savoirs actionnables ainsi élaborés, qui seront, espérons-le, ainsi éclairés en retour.

12.4 Vers l'agir ↔ penser

Notre matrice méthodologique est désormais complète, et la dernière cellule contient à elle seule presque tout le programme de la partie IV, et sans doute bien au-delà. Nous sommes désormais dotés de quelques outils, de quelques savoirs actionnables pour avancer vers un agir ↔ penser complexe. Sans autre forme de commentaire, le Tableau 12.1 représente la version complétée de la matrice esquissée au Tableau 10.4 p. 296.

Question de Recherche	**Principe dialogique (chap. 10)**	**Principe hologrammique (chap. 11)**	**Principe d'auto-éco-organisation (chap. 12)**
Modélisation complexe	Boucle dialogique Notation *Ω (x, y, …)*	Multi-échelle et fractalité Nombre de niveaux : trois	Émergence, auto-éco-organisation et autopoïèse
Rôle du manageur technique	Le manageur technique est le moteur de la boucle dialogique	Réseau en cote de mailles tripolaires Modèle interfacial par transactions et traductions	Espaces d'échanges L'acteur d'interface comme acteur-frontière Zones d'autonomie coordonnées
Processus de conception / d'intégration	C'est une dialogique *Ω (Conception, Intégration*)	Liens d'interface, relation d'interdépendances hétérarchiques	*Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* Auto-émergence récursive du processus

Tableau 12.1: Matrice méthodologique complétée par mots-clé

Enfin, nous indiquons l'envoi aux chapitres correspondants de la partie IV pour la mise en actes de savoirs « *actionnés* » :

- Le chapitre 13 sera consacré à la constitution des réseaux d'acteurs, à la définition des périmètres organisationnels pertinents, et donc à la construction des espaces d'échanges adéquats pour la réussite d'un projet. Il abordera aussi la question de la modélisation des processus.
- Le chapitre 14 traitera de la mise en place d'un projet de déploiement d'un système de gestion des données produit, et des étapes de validation dans les processus élémentaires de conception. Il donnera l'exemple de la formalisation dans le processus d'un espace d'échanges et de bouclage.
- Le chapitre 15 traitera de la mise en œuvre concrète d'un processus global d'intégration et de son articulation avec les processus élémentaires de conception. Nous y introduirons une forme revisitée de l'enveloppe, englobant le concept de squelette.
- Le chapitre 16, enfin, donnera des pistes pour la grande intégration dite procube « produit, processus, projet », en contrepoint de la navigation dynamique dans le processus *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)*. Nous serons vite amenés à considérer que la question mérite une autre thèse, et nous nous contenterons de proposer l'hypercompas de la trialectique du management technique comme outil d'aide à cette navigation dynamique.

Ces quelques éléments constituent ainsi notre contribution à l'élaboration d'une *ingénierie complexe de la collaboration*.

Quatrième clamot. *Faire et avoir pour être*

In *Gestion des compétences, la grande illusion*
[Merck et Sutter 2009, 84-87]

L'être humain en situation de travail se situe schématiquement dans l'une des trois attitudes possibles et complémentaires, que l'on peut désigner par l'un des trois verbes « avoir », « faire » ou « être ». On peut résumer cette triple attitude à l'aide de l'histoire des trois tailleurs de pierre [*] : au Moyen Âge, un bourgeois visite le chantier de construction d'une cathédrale. Il rencontre successivement trois tailleurs de pierre à qui il pose la même question : « *Que fais-tu ?* » Le premier lui répond : « *Je gagne ma vie* » ; le second : « *Je taille une pierre* » ; le troisième, quant à lui, affirme : « *Je bâtis une cathédrale* » [**] . L'être humain, dans son processus d'évolution, est tôt ou tard confronté à l'angoisse existentielle, celle qui lui fait prendre conscience que sa vie a une fin (dans les deux sens du terme). Cette angoisse existentielle, plus ou moins conscientisée, le pousse à se mettre en action pour agir, dans, sur et avec le monde, afin de donner un sens à sa vie (voire au-delà de sa mort). […] C'est cette angoisse qui amène à considérer le travail soit comme une contrainte inéluctable, soit comme un facteur de réalisation. […]

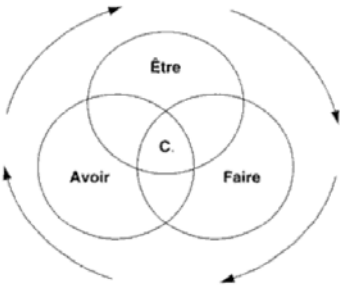


Figure [originale] : Modèle de l'être > faire > avoir
C : compétence

Si on résume la problématique à l'aide de nos trois verbes (voir le schéma), l'individu, pour « être », doit « faire » l'effort suffisant pour « avoir » ce qu'il faut pour, non seulement vivre, mais aussi pour survivre. Il y aurait ainsi schématiquement un ordre des choses dans le sens « être > faire > avoir », sous-tendant une hiérarchie dans laquelle prédomine l'« être » sur le « faire » et sur l'« avoir ». La compétence naît de la rencontre de ces trois attitudes. Elle s'y trouve au carrefour [***] ; c'est pourquoi la compétence s'exprime avec ces trois verbes, en fonction de la situation de travail dans laquelle se trouve l'individu, de son niveau de conscience et de connaissance de lui-même du point de vue professionnel et de sa situation par rapport à son travail : « je suis compétent » ; « je fais (autorité de) compétence » et « j'ai des compétences ».

[*] Christian Jacq, *Le message des constructeurs de cathédrales*, Paris, Éditions du Rocher, 1980, coll. *J'ai lu*. [Ouvrage cité dans notre *Deuxième clamot* p. 115. Note d'origine, comme les deux suivantes.]

[**] Cette histoire vulgarise la pensée d'Hannah Arendt qui compare le travail, l'œuvre et l'action dans son ouvrage *Condition de l'homme moderne*, Paris, Press Pocket, 1993, coll. Agora.

[***] Le « *C* » à l'intersection des trois cercles de la figure.

Tout se détraque quand l'ordre des choses est inversé, ou lorsqu'il y a impression de non-sens, particulièrement quand la hiérarchie des trois verbes est bouleversée, par exemple quand la finalité n'est plus l'être, mais le faire ou l'avoir, pire quand l'être est exclusivement un moyen mis au service de l'avoir, surtout lorsque cet avoir ne revient pas à l'être qui le fait : c'est, littéralement, pour l'être, « se faire avoir », l'aliénation même... Et l'individu perd alors le sens de son propre existentialisme professionnel : à quoi bon « être » si le « faire » se résume à « l'avoir » accaparé par un autre qui n'est pas soi dans un processus qui n'a pas été librement accepté ? […] D'où l'importance d'un équilibre perçu par l'individu entre ces trois attitudes. Le modèle schématisé ci-dessus sous-entend qu'il y a interaction entre les trois attitudes, qu'elles sont interdépendantes de façon cyclique. Ceci contrairement au modèle de la pyramide de Maslow qui sous-entend que l'individu passe de « l'avoir » (premier étage de la pyramide, celui des besoins vitaux comme se nourrir, se vêtir...) au « faire » (les étages intermédiaires relatifs au « confort » psychique), puis à « l'être » (les derniers étages plus « spirituels » donnant du sens aux actions, comme la réalisation de soi). Le modèle de Maslow présente l'individu dans une dynamique linéaire (il faut gravir les échelons un à un) ; celui de « l'être-faire-avoir » met en lumière une dynamique circulaire (il existe une interdépendance entre les différentes logiques, même s'il y a évolution). Cette dynamique circulaire postule que l'individu travaille dans le but de passer d'un état de déséquilibre inconfortable à un nouvel état d'équilibre, plus confortable. Dans une première phase, « l'être fait, pour avoir ». Dès lors que l'environnement fait évoluer cet état d'équilibre vers un nouvel état de déséquilibre, l'individu entre dans la seconde phase, celle de « l'être qui fait pour mieux faire ». Puis la troisième phase l'amène à « faire pour être ». C'est ce qui explique que l'on peut se reconnaître **successivement dans l'un des trois tailleurs de pierre** sur le chantier de la cathédrale, **et simultanément dans les trois** *, selon le moment où on se situe dans la vie, selon son état d'équilibre ou de déséquilibre dans son travail et selon ce qu'il représente en termes d'intégration pour l'identité individuelle. L'« avoir » est nécessaire pour « être » (pour « bien être », serions-nous tentés d'écrire) et il ne peut s'obtenir sans le « faire » que procure le travail. […]

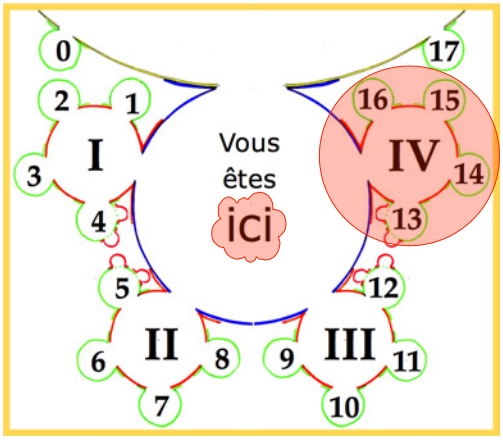
On peut classer schématiquement les organisations selon leur position, en leur transposant le modèle des trois verbes évoqué ci-dessus : « avoir », « faire » et « être ».

• « avoir » : quand l'organisation envisage la gestion des hommes et de leurs compétences sous le signe de « l'avoir » (acquérir des ressources pour produire), on ne peut que difficilement mobiliser ces hommes et leurs compétences autrement que par la carotte ou le bâton ;

• « faire » : quand l'organisation s'envisage elle-même dans le « faire » (faire travailler ensemble un collectif vers un projet commun), elle est en chemin vers la mobilisation des hommes et des compétences, vers la performance sociale, dans une perspective constructiviste de « co-construction » ;

• « être » : quand l'organisation se conçoit dans « l'être » (mettre ses salariés en finalité avec eux-mêmes, comme travaillant ensemble dans l'entreprise), elle ne peut que mobiliser les hommes et leurs compétences vers une performance sociale optimale dans une perspective ontologique et phénoménologique de réalisation des salariés.

* [C'est moi qui souligne.]



Partie IV -
Agir et penser à la fois

C'est-à-dire Agir ↔ Penser ; ou encore *Ω (Agir, Penser)*

Il faut agir en homme de pensée *et* penser *en homme d'action.*

Henri Bergson [666]

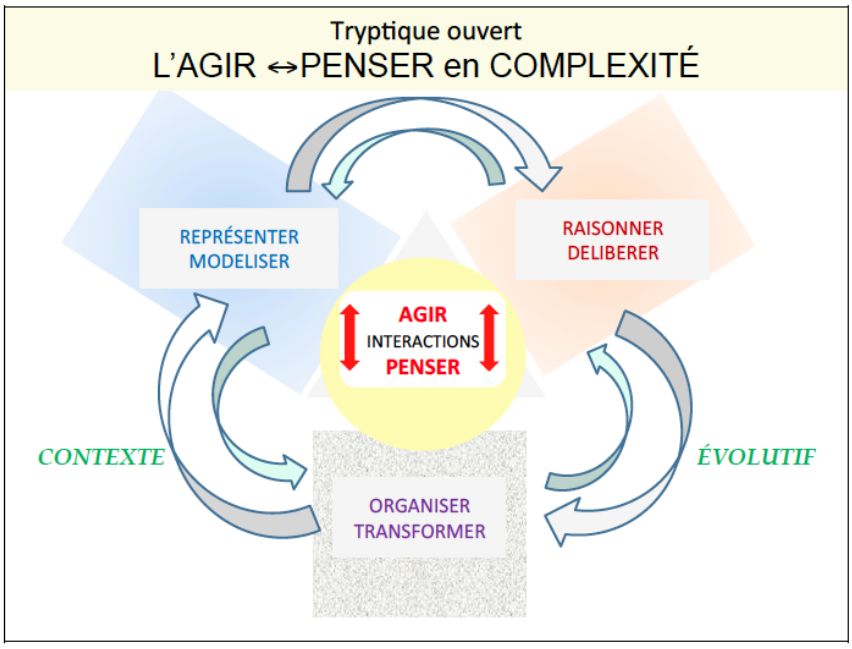


Figure IV-1: Schéma général de « *l'Agir ↔ Penser en complexité* »
In [Le Moigne 2010]

666. Message au Congrès Descartes, 1937. *Mélanges*, PUF, 1972, p. 1579.

Sommaire de la Partie IV

Chapitre 13. Périmètres ?.....373
13.1 Un nouveau terrain : MedAustron.....375
13.2 Un périmètre favorable.....381

Chapitre 14. Équipement de l'équipage.....387
14.1 Un projet de gestion des données de conception.....390
14.2 Le cartouche, partie visible du processus.....392
14.3 Du cartouche au cycle de vie.....395
14.4 Modélisation du processus de vérification et validation.....401

Chapitre 15. Intégration de l'intégration.....407
15.1 Le processus d'intégration.....410
15.2 Entre optique et mécanique : le lien manquant.....414
15.3 De l'objet-frontière au processus sans frontières.....422

Chapitre 16. Pro-cube et hypercompas.....427
16.1 Sorties de terrain.....430
16.2 Un hypercompas.....437

Cinquième clamot. Vision des choses.....445

Qu'aurait pensé Bergson de ce temps où, ayant achevé de repenser, il s'agit de repartir à l'action, tout en s'appuyant sur le bénéfice dialogique de l'agir ↔ penser ? Aurait-il agi en homme de pensée, ou bien pensé en homme d'action ? Sans doute les deux, si l'on songe à son influence sur le président Wilson en 1917 pour la création de la Société Des Nations – mais c'est une autre histoire.

Arrive pour moi le moment de ce retour au terrain sur ce mode de l'agir ↔ penser, ultime étape de notre parcours en quatre parties. Or « *il arrive un moment dans la restauration d'une vieille maison où l'envie d'en finir avec les travaux risque de compromettre toute noble intention esthétique de départ. La tentation de se contenter de raccourcis vient vous ronger à mesure que les retards s'accumulent et que les excuses se multiplient* » [667]. Jusqu'ici, nous n'avons pas voulu nous contenter de ces raccourcis et nous avons tâché de respecter la construction de la thèse en quatre parties de quatre chapitres sans en compromettre la structure fractale en *omegador* (p. 21), structure non dépourvue d'une certaine « *intention esthétique* ». Dans cette quatrième partie, nous allègerons le propos pour en hâter l'achèvement.

La partie IV décrit un programme *Ω (Agir, Observer, Conceptualiser)* en cours [668]. Elle propose un retour sur le réel basé sur la modélisation complexe élaborée au cours de la partie III, à partir des observations tirées des cas exposés dans la partie II. Morin l'a synthétisé : « *La façon de penser complexe se prolonge en façon d'agir complexe* » [Morin 1990, 318] ; et récursivement, comme le souligne Le Moigne, « *la façon d'agir complexe développe la façon de penser complexe* » [Le Moigne 2009, 34]. C'est ce à quoi nous nous attachons ici. Ce programme *Ω (Agir, Observer, Conceptualiser)* pourrait d'ailleurs être rapproché du triptyque ouvert de Le Moigne [2010], reproduit à la Figure IV-1, « *L'Agir ↔ Penser en Complexité* » : dans un contexte évolutif (en raison même de l'évolution du système), un agir ↔ penser complexe constitué d'interactions constantes entre ces deux modes pourrait se modéliser par un triptyque composé d'un volet *Représenter Modéliser*, d'un volet *Raisonner Délibérer,* et d'un volet *Organiser Transformer*. La correspondance ne s'effectue pas terme à terme avec nos trois pôles *Agir, Observer, Conceptualiser* ; et ce n'est pas important, puisque chaque volet est en interaction dialogique avec chaque autre : les deux schémas sont à la fois complémentaires et équivalents [669].

Ce retour sur le réel correspond également peu ou prou à la dernière phase du modèle de la DRM (*Design Research Methodology*) exposé au § 4.3 p. 109 : une nouvelle étude descriptive DS II, qui évaluerait le résultat des applications issues de la phase prescriptive sur le système étudié, et qui encouragerait un retour vers la définition de la méthode et de la mesure. Notre approche complexe montre toutefois les limites de cette méthode, même dotée des bouclages suggérés par Blessing.

Ce retour sur le réel correspond enfin, selon notre *Introduction "kantique"*, à la question : « *Qu'est-ce que l'homme ?* ». Il s'agit ici d'observer un manager technique en quelque sorte recomplexifié, homme de pensée agissant et homme d'action pensant, un « *roseau pensant* » qui « *plie, et ne rompt pas* » [670]. Pour ne point rompre, et mener à terme la présente partie, et avec elle la thèse, nous ne procéderons pas de

667. Peter Mayle, *Une année en Provence*, Le Seuil, 1994, p. 226.

668. Voir la note 578 p. 312.

669. Nous avions initialement imaginé de structurer la partie IV autour de ces différents modes, illustrés par l'action ↔ pensée d'un manageur technique au cours de chaque chapitre ; nous avons renoncé à cette approche, qui présente le défaut totalement rédhibitoire de décomplexifier cet agir ↔ penser complexe en cherchant à l'analyser et à le découper en « *entités indépendantes* » alors qu'elles ne le sont pas par nature (voir le Tableau 10.1 Comparaison de la méthode analytique et du paradigme systémique p. 287).

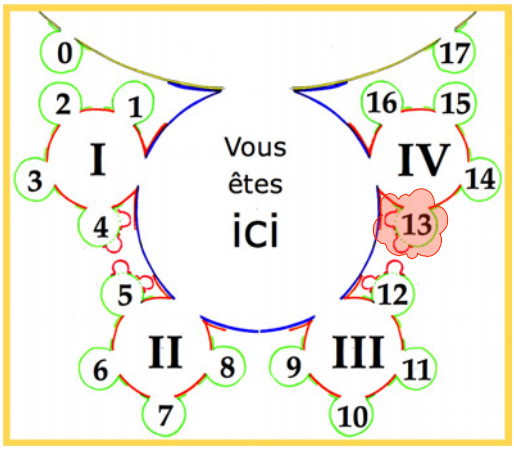
670. Hommage à Blaise Pascal et Jean de La Fontaine, inspirés l'un et l'autre par la symbolique du roseau.

manière aussi approfondie que lors de la partie II. Et ce pour plusieurs raisons. D'abord, il s'agit davantage à ce stade des tout premiers éléments constitutifs d'un programme de travail en cours plutôt que de résultats complets, avec un manque de recul : du point de vue académique, les travaux sur les applications du modèle développé dans la partie III n'en sont qu'à leurs premiers pas, et la partie IV n'en donnera à voir que quelques mises en actes, parfois plus proches de l'intuition que de la preuve ; et du point de vue du terrain du CERN, certaines actions sont suspendues depuis octobre 2011 – parfois tout simplement en raison de mon retrait dû à la rédaction du présent mémoire –, et d'autres font quelquefois l'objet de déploiements de longue haleine, dont la restitution est incompatible avec la durée d'une thèse, fût-elle aussi longue que la mienne. Enfin, présenter ce dernier cas sur le même mode que les précédents serait faire fi du changement accompli : *IV. Agir et penser à la fois* n'est pas *II. Agir sans trop penser*, et raconter cet agir ↔ penser requiert de nouveaux modes de recension, encore à inventer.

Au cours de cette partie IV, nous allons donc expérimenter quelques premières mises en actes partielles et inachevées du modèle d'acteur d'interface et de la dynamique des espaces d'échanges élaboré lors de la partie III. Il s'agit en quelque sorte d'un exercice d'application dynamique « *chemin faisant* ». Nous allons observer comment vont s'élaborer quelques modalités d'une action collaborative dont le manageur technique serait le moteur et le régulateur, abordées concrètement sous sous l'angle du déploiement du processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)*. Au chapitre 13, nous présentons le nouveau cas : la coordination technique du projet *Med*Austron ; nous mettrons en avant quelques améliorations organisationnelles face aux obstacles épistémologiques opposés au déploiement d'une approche PLM centrée sur l'article. Au chapitre 14, nous exposerons l'instrumentation du processus de conception et de la gestion des données du produit associée : nous proposerons la modélisation avec le langage BPMN du processus de conception élémentaire (au sens introduit au chapitre 12) comprenant une matérialisation des espaces d'échanges. Et au chapitre 15, nous introduirons un nouvel objet intermédiaire, le *squelette*, permettant la cristallisation du processus d'intégration élémentaire et son traitement dans les espaces d'échanges, ce qui constitue le fondement d'un processus *Ω (Conception, Intégration)*. Dans ces chapitres, nous illustrerons en pratique l'opérationnalité des quatre cadres proposés par Boujut [2001] pour l'action collaborative (temporel, spatial, conceptuel, organisationnel).

Enfin, au chapitre 16, nous évoquerons le défi de la mise en place d'un processus global de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* qui concluait notre chapitre 12, et dont le déploiement n'a pas encore abouti. À chacun des chapitres 13 à 15 correspondent en effet des limitations qui expliqueront le caractère incomplet – peut-être de par leur nature complexe ? – des observations rapportées. L'on retrouve l'écueil d'une présentation nécessairement linéaire imposée par le fil de l'écriture : il nous faut procéder pas à pas, quand la dynamique de la complexité exigerait que nous pussions embrasser simultanément les tenants et les aboutissants. Ces limitations conduiront à introduire un hypercompas pour guider le manageur technique dans la conduite de ces processus complexes, hypercompas que nous construirons à partir de la trialectique de Gigand [2010].

L'ouvrage récent intitulé *Agir et penser en complexité avec Jean-Louis Le Moigne : Témoignages de mises en actes* [Genelot et Avenier 2012] indique que ces réflexions sur le retour au réel d'un agir ↔ penser complexe sont la trace de travaux et de réflexions en cours. Cette partie IV pourrait ainsi se lire comme une contribution parallèle, un témoignage supplémentaire de mise en actes au travers d'une recherche-action en cours. Il constituera ainsi un espace de bouclage (voir la carte en *omegador* et le § 0.5 p. 21), l'ouverture du dernier omega de la thèse vers le plus grand omega global d'une communauté de recherches qu'il espère modestement nourrir de sa contribution.



Chapitre 13. Périmètres ?

Où le manageur technique est placé dans un nouveau périmètre propice à quelques mises en actes

Pour l'esprit scientifique, tracer nettement une frontière, c'est déjà la dépasser.

Gaston Bachelard [671]

671. « Critique préliminaire du concept de frontière épistémologique » [1934], *in Études*, Vrin, [1970] 2002, p. 71.

Le cas étudié globalement dans la partie IV est celui du projet *Med*Austron. Très récent (à l'échelle de la thèse) [672], puisque qu'il couvre la période 2010-2011, il est suffisamment différent et indépendant des terrains précédents pour offrir une terre vierge à l'expérimentation en agir ↔ penser du manageur technique. Le présent chapitre va succinctement [673] présenter ce nouveau terrain. Nous y aborderons la question des frontières organisationnelles et la manière dont elles sont construites dans les têtes : la matérialité d'un tel tracé n'est pas forcément visible sur le terrain, et pourtant, la façon dont il est effectué a des conséquences sur l'efficacité opérationnelle de l'action ainsi organisée. C'est pourquoi le chapitre est intitulé *Périmètres* : nous y soulignerons dans quelle mesure le choix du périmètre influe sur l'action complexe du manageur technique, et nous présenterons les avantages espérés du périmètre de gouvernance adopté. Or, l'épigraphe de Bachelard incite à penser un tel tracé comme entraînant son propre dépassement : ce ne sont pas par les structures ainsi constituées que l'on pilote un projet de manière complexe, mais bien par les processus et par l'objectif [Genelot 2011, 231].

L'angle adopté étant l'observation du déploiement du processus collaboratif et de son instrumentation, la question de la gestion des données sera prégnante dans nos observations. Les acquis du chapitre 8 consacré à la question de la gestion de données techniques dans ATLAS serviront de point de départ : nous y avions échafaudé une première représentation du rôle du manageur technique sous la forme de trois piliers : référentiel produit, modélisation des processus, et dynamique de projet (Figure 8.12 p. 248). Ce sont ces trois piliers que nous allons déployer [674] sur le terrain, en considérant le processus de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* comme un processus de convergence conjointe de la constitution de ces trois piliers [675]. Le présent chapitre 13 introductif pose le contexte et explicite le choix stratégique d'une gestion “centrée sur l'article”.

13.1 Un nouveau terrain : *Med*Austron

Au mois de novembre 2009, j'ai été mis en contact avec le chef du projet *Med*Austron qui souhaitait renforcer son équipe autour des activités liées à la coordination technique du projet. C'est ainsi que je suis nommé en février 2010 responsable du *Work package (WP) “Integration*” (lot de travaux « Intégration »). Dans cette section, nous présentons le projet dans son ensemble, ainsi que le périmètre et l'organisation du lot de travaux et de l'équipe MAID (*MedAustron Integration and Design*) que j'ai mis en place pour s'attacher à satisfaire les objectifs assignés à cette équipe.

13.1.1 L'organisation globale du projet

*Med*Austron (***Med****ical* ***Aus****trian Synchro****tron***) [676] est un centre de thérapie ionique qui fournit des faisceaux de protons et d'ions pour le traitement de tumeurs par

672. Cas n°6 selon la liste des cas étudiés dans la thèse établie au § 4.4 p. 111 sqq.

673. Ceci, ajouté aux propos de l'introduction à la partie IV, pourra paraître comme un luxe inouï de précautions oratoires. Je ne les estime pas excessives au regard des effets d'annonce peut-être exagérément provoqués par la partie III. J'ai le sentiment qu'il s'en faut encore de beaucoup avant que je ne sois en mesure de maîtriser ne serait-ce que passablement la portée applicative du modèle qui y a été élaboré.

674. Implanter, ou ériger, seraient sans doute des termes architecturalement plus adaptés…

675. Comme évoqué dans la partie III, au § 9.1 et formalisé au chapitre 12.

676. Voir le site http://www.medaustron.at/, ou sa version anglaise http://www.medaustron.at/en.

hadronthérapie [Amaldi et Kraft 2009]. Le complexe d'accélération est basé sur un synchrotron qui exploite une extraction par résonance lente pour fournir les faisceaux avec la structure temporelle requise par l'« *active scanning* » (balayage actif) requis pour le bombardement de ces cibles particulières que constituent les tumeurs [Benedikt 2005]. La disposition générale représentée à la Figure 13.1 comprend : un complexe d'injection avec des sources d'ions et un accélérateur linéaire ; un synchrotron de 25 m de diamètre, alimenté en amont par une ligne de transfert à énergie intermédiaire ; une ligne de transfert à haute énergie en aval, qui se divise en trois lignes de traitement médical, et une ligne pour la recherche non-clinique [Aumayr et Technische Universität Wien 2009]. Cette disposition est inspirée d'installations équivalentes au CNAO [677], ainsi qu'au PSI [678] en particulier pour certains éléments clés de la partie médicale (le « *gantry* », portique rotatif).

Le complexe d'accélération est installé dans un bâtiment [679] dédié (Figure 13.1) construit dans la ville de Wiener Neustadt (Niederösterreich), au sud de Vienne en Autriche [Benedikt et Wrulich 2011]. L'installation proprement dite de l'accélérateur se poursuivra jusqu'à la fin 2013, pour une mise en service progressive en 2014 menant à une qualification par les autorités sanitaires autorisant en principe le traitement du premier patient au printemps 2015.

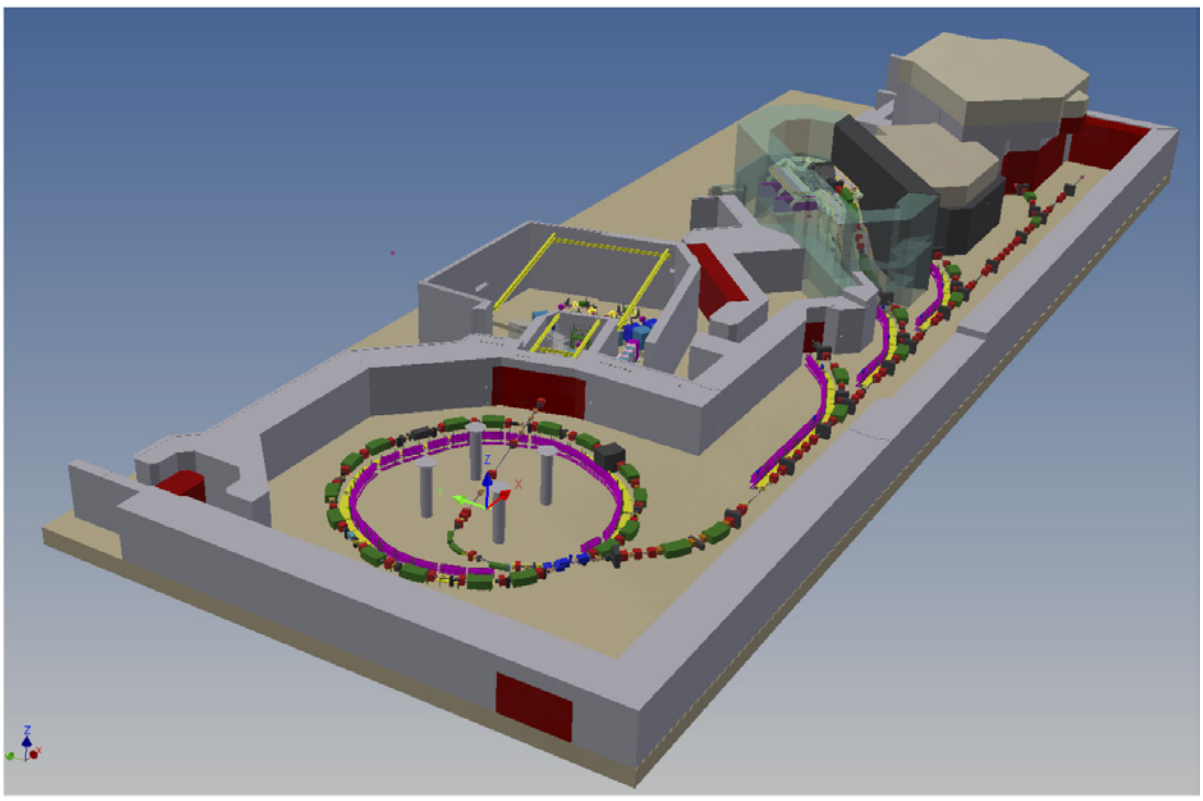


Figure 13.1 : Disposition générale du complexe d'accélération de MedAustron

Vue 3D issue de la CAO, novembre 2010

Le projet *Med*Austron est porté par une entreprise de type économie mixte (avec financements publics et capitaux privés). Il bénéficie d'une coopération technique avec le CERN, selon une structuration originale de transfert de savoir-faire : la constitution d'une équipe mixte située au CERN. « *Austria,* explique le chef de pro-

677. *Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica* de Pavie (Italie). http://www.cnao.it/

678. *Paul Scherrer Institut*, près de Zurich (Suisse). http://www.psi.ch/

679. La construction était en phase de finition à l'été 2012.

jet, *had no accelerator community of its own. […] CERN agreed to help by hosting and intensively training the MedAustron team in all aspects of the accelerator design and construction.* » [680] La conception et l'approvisionnement en composants est donc réalisée en commun en bénéficiant du savoir-faire du CERN. La mise en œuvre de l'accélérateur sera effectuée sur site en Autriche par cette même équipe mixte. Enfin, les membres appartenant à l'entreprise « *Med*Austron » de l'équipe ainsi formée resteront sur place pour exploiter les installations, tandis que le personnel du CERN rentrera au bercail.

Le projet est partagé en trois sous-projets principaux : l'architecture, le génie civil et les bâtiments ; la partie médicale (équipements spécifiques de traitement et d'imagerie, et hôpital de jour) ; et le projet d'accélérateur d'ions. Ce dernier est découpé en un certain nombre de lots de travaux selon des critères technologiques correspondant aux différents domaines des équipements qui doivent être fournis : les sources d'ions, l'accélérateur linéaire, les aimants conventionnels (de courbure et de correction), les aimants spéciaux (d'injection et d'extraction), le diagnostic de faisceau, le système de vide, la puissance électrique, la radiofréquence et les cavités accélératrices, l'absorption de faisceau, et enfin le portique, dispositif de traitement permettant de traiter le patient avec un faisceau incident de direction variable [681]. Quelques lots de travaux (*work packages*) transverses complètent le dispositif : optique de faisceau, systèmes de contrôle, radioprotection, et enfin intégration. Nous ne détaillerons pas chacun de ces lots de travaux, mais uniquement leur interaction avec l'équipe d'intégration.

La matrice organisationnelle de la partie accélérateur du projet à mon arrivée est reproduite à la Figure 13.2. Ce sont les couleurs affectées à chaque personne qui désignent leur statut (employé de l'entreprise *Med*Austron ou d'une autre organisation, consultant ou étudiant), tandis que leur position hiérarchique dans le projet est donnée par un éventuel surlignage. Le caractère matriciel de l'organigramme ne saute pas aux yeux, ni d'ailleurs la nature transverse des lots de travaux de type coordination comme le mien : ce sera l'objet de nombreuses discussions de péri-

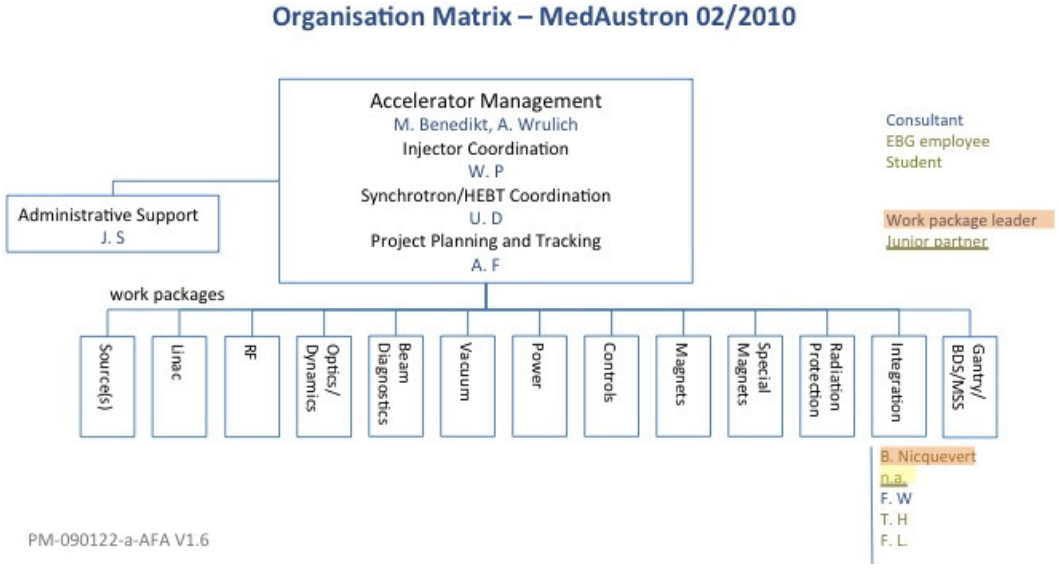


Figure 13.2 : Matrice organisationnelle de MedAustron

Version officielle 1.6 (anonymisée) de février 2010, document PM-090122-a-AFA-V1.6

680. « L'Autriche ne possédait pas de communauté propre de physique des accélérateurs. […] Le CERN a accepté d'apporter son aide en accueillant et en formant de manière intensive l'équipe MedAustron sur tous les aspects de conception et de construction d'un accélérateur. » [Benedikt et Bryant 2011]

681. Voir le site http://radmed.web.psi.ch/asm/gantry/gantry/n_gantry.html (consulté le 8 juin 2012).

mètre, en particulier avec les coordinateurs désignés comme tels (pour la région de l'injecteur et pour le synchrotron et la zone d'éjection). Manque aussi dans cette matrice la relation avec les autres parties du projet (infrastructure des bâtiments, et pôle médical).

Soucieux de nous concentrer sur les aspects managériaux qui nous intéressent ici, nous n'entrerons pas davantage dans la présentation technique du projet. Nous n'aborderons donc pas l'action au degré 1 [682] des manageurs techniques, à savoir exploiter les cadres de collaboration, pour nous concentrer sur leur élaboration et celle des outils qui permettent de les exploiter (degré 2) et des organisations favorisant l'élaboration de ces outils (degré 3).

13.1.2 Le périmètre du lot de travaux "Intégration"

Le rôle attribué au WP Intégration au sein du projet d'accélérateur *Med*Austron comprend les tâches couramment assignées à la coordination technique de tels projets, tel que nous avons pu l'observer dans la partie II sur ATLAS. De manière générale, nous avons proposé [Nicquevert, Hauviller et Benedikt 2011, 1671] de la résumer en paraphrasant la célèbre déclaration d'Archimède [683] : « *Donnez-moi un* layout *suffisamment solide et un bâtiment pour l'accueillir, et j'installerai votre accélérateur.* » Partant de la connaissance de la position fonctionnelle des éléments sur le trajet du faisceau (le *layout*), et des contraintes imposées par les infrastructures techniques, le travail d'intégration consiste schématiquement à vérifier la compatibilité entre les différents équipements.

Nous donnons ici une explication globale, conformément à la présentation que j'ai faite le 30 juin 2011 au MATAC (Med*Austron Technical Advisory Board*, l'organe de supervision du projet). Son premier objectif était d'expliciter et de faire approuver la stratégie d'intégration, dont je souhaitais poursuivre la mise en place initiée dès le mois de mars 2010. Il s'agissait également de faire valider l'organisation de l'équipe MAID et les moyens mis en place pour atteindre les objectifs assignés au WP Intégration. Dans ma construction d'une modélisation *ad hoc* de ses activités, j'ai réparti ce rôle entre trois pôles, très liés entre eux comme en témoigne la Figure 13.3 : activités de conception, travail d'intégration proprement dite, et coordination de l'installation.

La présentation, apparemment analogue à la maille à trois pôles du chapitre 11, ne fonctionne cependant pas selon ce modèle interfacial : la figure a en effet été préparée en juin 2011, date à laquelle le modèle était encore dans les limbes. Cette figure est donc un bon exemple d'objet de type agir ↔ penser, puisqu'il est à la fois un document réel de terrain, conçu par un acteur de terrain et exploité sur le terrain, et en même temps un document résumant une modélisation *ad hoc* qui a conduit à l'élaboration du modèle beaucoup plus général à mailles tripolaires. Pour boucler la boucle (ou simplement, la nourrir), nous évoquerons au § 13.2.2 la possibilité d'un modèle à mailles tripolaires de cette modélisation *ad hoc*.

Le premier pôle de tâches (disque inférieur gauche) concerne les activités de *conception*. L'équipe MAID a pour tâche de fournir aux autres *work packages* des prestations d'études mécaniques et de modélisation géométrique, pouvant aller selon les cas jusqu'à la constitution de dossiers de plans : plans de spécification ou plans d'exécution. Dans ce pôle de tâches figurent également la définition et l'établissement des règles de conception et de définition du modèle de données (explicitées au chapitre 14). Dans le cadre fixé par ces règles et ce modèle de données, le pôle de conception part alors des spécifications fonctionnelles (*Work Package Functional Specification*, petits polygones en bas à gauche de la Figure) définies par

682. Au sens de *degré* précisé au chapitre 9 (voir § 9.2 p. 265 sqq.).

683. « Donnez-moi un point fixe et un levier, et je soulèverai la Terre. »

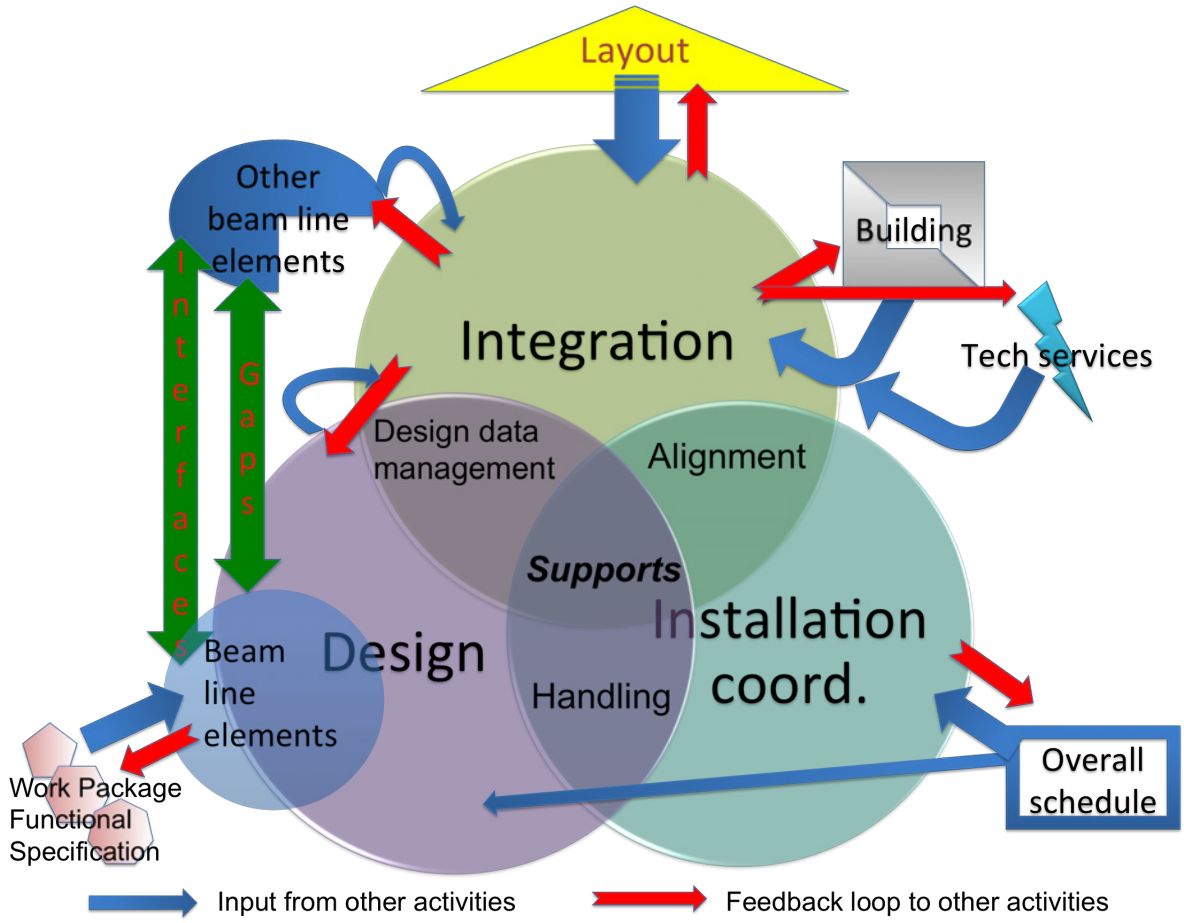


Figure 13.3 : Tâches de l'intégration, et liens avec les autres activités du projet *Med*Austron (Nicquevert et al. 2011, Fig. 2)

chaque *work package* en charge de chaque type d'éléments, en fonction des particularités techniques (et optiques si c'est un élément sur le faisceau) de l'élément considéré : c'est la flèche bleue de type « *Input from other activities* » (Entrées en provenance d'autres activités) indiquée dans la légende de la Figure. Puis le pôle en assure la conception, en tenant compte des positions d'interfaces définies par le pôle d'intégration. Et enfin, il en fait vérifier par le *work package* la conformité avec la spécification fonctionnelle, selon la flèche rouge de type « *Feedback loop to other activities* » (Boucle de retour vers les autres activités), et il gère les données techniques associées (dont le modèle volumique et les plans), et ce jusqu'à leur validation finale [684].

Le deuxième pôle de tâches (disque supérieur) est celui de *l'intégration* proprement dite, lui-même constitué de trois tâches principales, évidemment très liées :

- la première tâche est la modélisation géométrique du *layout* : définition de l'enveloppe volumique de chaque item (chaque article, ou encore modèle d'équipement) en position théorique tel que défini par l'optique du faisceau, c'est-à-dire par la simulation des fonctions magnétiques radio-fréquence à implanter pour contrôler le chemin théorique et le comportement ondulatoire du faisceau. Cette optique faisceau est représentée par le triangle supérieur (jaune) qui, tel un *deus ex machina*, fournit les spécifications fonctionnelles majeures de la configuration de l'accélérateur. La flèche est donc essentiellement descendante bleue, avec une petite remon-

684. Dans le chapitre 14, nous apporterons quelques nuances à toutes ces notions.

tée rouge en retour lorsque les études d'intégration ne peuvent converger sans demander une modification de cette optique ;

- la deuxième tâche d'intégration est précisément l'*intégration géométrique* (ou intégration intrinsèque de l'accélérateur) : avec l'aide d'outils de maquettage numérique (que nous verrons en action au chapitre 15), elle contrôle le design de chaque item, qu'il soit conçu par le pôle d'activités de conception (*beam line elements*) ou issu de bureaux d'études extérieurs (*other beam line elements*). Ce contrôle s'exerce vis-à-vis des conflits géométriques, et il définit (flèches vertes à gauche) la position des interfaces entre éléments en contact et la taille des jeux (*gaps*) entre éléments voisins. Enfin il s'agit d'assurer la gestion de la configuration (évolution dynamique) ;
- la troisième tâche d'intégration globale assure l'*intégration dans l'infrastructure*, c'est-à-dire qu'elle vérifie la compatibilité de l'accélérateur avec le bâtiment (*building*, carré gris en haut à droite) et l'infrastructure technique (*technical services*, flèche en forme d'éclair) : position des murs et des espaces de circulation et de manutention, ponts roulants, routage de câbles, positionnement des drains et autres gaines et tuyaux, mises à la terre, évacuations d'urgence, etc.

Quant au troisième pôle de tâches (disque inférieur droit), il est basé sur l'expérience antérieure accumulée au long de deux projets d'accélérateurs beaucoup plus ambitieux : le LEP [Bachy 1987, 1581 ; Hübner 2004, 182-183 ; Picasso 2011, 560], et le LHC [Hauviller et Weisz 2004 ; Barbero-Soto et al. 2007]. Il couvre la coordination de l'installation : établir la stratégie globale de cette installation (phasage et ordonnancement des tâches) ; en synchronisation avec le planning général (*overall schedule,* en bas à droite), définir et cadencer les durées de chaque phase, et assigner les ressources collectives (pontiers et manutentionnaires, mécaniciens monteurs, électriciens…) à chaque tâche d'assemblage.

Aux intersections de chacun de ces pôles de tâches apparaissent des activités qui relèvent des deux pôles à la fois : le couplage entre les pôles est important, et il paraissait essentiel d'établir des frontières souples, dynamiques et mouvantes – ces frontières épaisses évoquées lors de la partie III, et que nous montrons ici à l'œuvre. C'est le cas par exemple de la définition des outils et des procédures de manutention spécifiques pour l'installation des équipements (dont certains nécessitent le recours à des moyens tout à la fois assez lourds et délicats). C'est surtout le cas de deux activités essentielles, qui ont donné lieu à la mise en place de sous-projets spécifiques : *l'alignement*, d'une part, couvrant la définition de la stratégie globale de mesure par les géomètres, le couplage avec le positionnement des composants de l'accélérateur, la gestion des informations et des données produites et leur confrontation avec les positions théoriques exactes définies par l'optique de faisceau ; et d'autre part *le management des données de conception*, que nous allons étudier plus particulièrement.

Enfin, tout au centre, à l'intersection entre les trois pôles d'activités, figure le cas des supports, qui se trouve à la synergie des trois dynamiques : le projet MASAS (*MedAustron Supports and Adjustment Systems*) a en effet été défini, à ma demande, comme une responsabilité propre du MAID, depuis la conception jusqu'à l'installation effective dans le bâtiment, en passant par la définition de l'interface avec chaque élément supporté via des dispositifs d'ajustement, puis par le lancement et le suivi de leur fabrication. Il sert ainsi de projet pilote en interne au MAID pour la mise en place de toutes les procédures de gestion des données, de flux d'information et de management de la configuration.

13.2 Un périmètre favorable

Les chapitres de la partie IV abordent conjointement le déploiement des trois piliers évoqués (référentiel produit, modélisation de processus, dynamique de projet). L'un des enjeux est d'estimer dans quelle mesure un système d'informations de type PLM (*Product Lifecycle Management*) constitue un outil d'aide à l'ingénierie concourante complexe, et donc adapté pour porter notre processus de collaboration complexe *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)*.

La qualité des résultats de ces activités obtenus entre mars 2010 et septembre 2011 a été essentiellement due à trois facteurs de succès [Nicquevert, Hauviller et Benedikt 2011] :

- le regroupement des trois ensembles d'activités (*Conception*, *Intégration*, et *Coordination de l'installation*) sous l'égide d'une entité opérationnelle unique ;
- l'utilisation d'un système de gestion des données du produit [685] permettant une approche « *item-centric* » (centrée sur l'article) ;
- et la modélisation des processus de conception et des procédures de vérification et de validation des données, ce dernier point faisant l'objet du chapitre 14.

En contrepoint de *Med*Austron, nous évoquerons brièvement le cas n° 5 [686] du déploiement d'un système de PDM (*Product Data Management*) dans les bureaux d'étude du CERN. Grâce à cette étude de cas [Nicquevert, Boujut et Yami 2010], nous avons mis en relief quelques concepts qui font obstacle au déploiement des outils de PDM : ce sont ces enseignements qui ont nourri les choix stratégiques du projet de déploiement du PLM pour *Med*Austron.

13.2.1 D'une gouvernance fragmentée…

Dans le modèle d'organisation proposé pour le WP Intégration de *Med*Austron, la conception, l'intégration et le déploiement des outils de gestion des données techniques se retrouvent tous dans un périmètre unique. C'est l'assurance d'une égide unifiée, et d'un centrage des actions sur les besoins du projet, et non pas d'une incessante controverse alimentée par les desiderata des uns et les contraintes imposées par les autres – et vice-versa – qui ont marqué le cas n° 5, ce qui change la perspective en termes de collaboration entre ces pôles.

Que s'était-il passé dans le cas n° 5, que nous avons décrit plus en détails dans la publication citée ? Pressé par l'arrêt en production du logiciel Euclid®, CAO utilisée dès la conception du LEP [Colman, Hauviller et Mottier 1984 ; Bachy et al. 1988], Catia® est sélectionné dès 2003 comme système de CAO unique au CERN. Ce logiciel garantissait au mieux sur le papier la pérennité des données volumiques accumulées depuis 1983, et qui correspondent souvent à des installations encore en service [Hakulinen et al. 2004]. Or « *l'introduction d'un logiciel dans un bureau d'études ne se fait pas sans provoquer de bouleversements. Un logiciel de CAO n'est pas un simple outil au seul usage de l'utilisateur, il doit être maîtrisé, ses données doivent être exploitables par tous les acteurs d'un projet et par les systèmes de gestion, d'archivage et de communication* » [687].

Le support CAO du CERN avait dès 2006 souhaité élaborer une spécification fonctionnelle pour le PDM. Or, à cette période, aucun représentant des bureaux d'études n'était disponible, puisque cette période correspondait au pic d'activité de la conception du LHC. Le support a donc élaboré la spécification fonctionnelle

685. Basé sur *Vault*® d'Autodesk.

686. Cas n°5 selon la liste des cas étudiés dans la thèse établie au § 4.4 p. 111 sqq.

687. Claude M. (responsable de bureau d'études), « *Contexte de la CAO au CERN* », 7 mars 2002.

selon sa propre compréhension des besoins futurs supposés des utilisateurs, et cette spécification n'a été ni validée ni invalidée par les utilisateurs. Lorsque ceux-ci découvrent le résultat du développement et de la paramétrisation des fonctions logicielles, ils poussent les hauts cris : « *Ce n'est pas ça qu'on avait demandé ! – Peut-être, mais vous n'avez rien demandé*, leur rétorque-t-on côté support, *et il fallait bien qu'on avance*. » Situation de blocage. Tous semblent avoir oublié la précieuse recommandation :

> *Treating your users as co-developers is your least-hassle route to rapid code improvement and effective debbugging.* [688]

Dans un rapport diffusé fin 2007, le support CAO du CERN écrit :

> *In agreement with the Design Office the use of Smarteam will be limited to the design office and professional designers and only in conjunction with Catia to avoid the emergence of a second data management system. All approval processes and technical document management will remain in the robust EDMS environment.* [689]

Un responsable du bureau d'études réplique immédiatement, et exprime la nécessité d'inscrire le déploiement du PDM dans une logique projet globale :

> *Ce document fait apparaître une utilisation de Smarteam uniquement pour les bureaux d'études. Sans aucun doute, Smarteam couvrira les besoins des bureaux d'études. Pour moi c'est un outil beaucoup plus ambitieux au vu de ses caractéristiques et sa complexité. Si on décide de limiter Smarteam à l'usage unique des bureaux d'études, on s'est trompé sur le choix de l'outil. Les besoins des bureaux d'études seuls auraient pu être couverts par un outil moins compliqué et plus facile d'accès et d'utilisation.* [690]

L'accord évoqué par le support est donc peu patent. En aparté, le responsable de BE est encore plus radical, et prône (sans l'exprimer ainsi) une approche plus globale et systémique :

> *Si on dédie ST [Smarteam] uniquement aux bureaux d'études, on prend une bombe pour tuer une mouche. Il y a toute une chaîne de services qui devrait être concernée à terme (gestion des jobs [sous-traitance], fabrication [atelier CERN], suivi de fabrication, gestion des composants machine …… [sic] et j'en oublie bien d'autres.)*
>
> *Si ST ne concerne que les bureaux d'études, encore une fois, nous allons lancer seuls les projeteurs dans une aventure qu'ils ne demandaient pas, cela n'en vaut pas la chandelle. Et les autres continueront à utiliser leurs outils tranquillement.* [691]

Or, ce sont entre autres les questions de mécanismes de validation des données qui sont en jeu dans les discussions. Les hypothèses formulées par le support ne prennent pas en compte des processus de bureaux d'études qui, de leur côté, sont d'une part tacites (non formalisés), et d'autre part largement dépendants des besoins implicites des projets. Et ces demandes ne sont pas formulées par les responsables des projets : dans l'ensemble, ils ne s'intéressent guère à ces questions de gestion des données et de processus de validation. C'est quasi uniquement le résultat qui les intéresse, le produit et les données finalisées qui permettent de le défi-

688. « Considérer vos utilisateurs comme des co-développeurs constitue la route la moins pénible qui mène à une amélioration rapide du code et à un déverminage effectif », *The Cathedral and the Bazaar* [Raymond 1999, 27].

689. « En accord avec le Bureau d'Études, l'usage de Smarteam sera limité au bureau d'études et aux projeteurs professionnels et uniquement en conjonction avec Catia pour éviter l'émergence d'un second système de gestion des données. » Thomas Pettersson *et al.*, « *Integration of Catia/SmarTeam into CERN's Corporate Engineering Data Management System – Draft* », EDMS N° 884385, 29.11.2007, p. 5. Voir aussi [Hakulinen et al. 2008].

690. Claude M. (responsable de bureau d'études), courrier à Tadeusz (chef de groupe), 7 janvier 2008.

691. Claude M., courriel à Bertrand, 25.01.2008.

nir. Le rapport du support s'appuie d'ailleurs sur cette pratique de référence, et se contente de renvoyer à l'usage des outils existants :

> *Once a design is considered ready for approval the relevant data will be exported to EDMS for approval using the standard tools available. […] The proposed approval cycle model requires only that the design offices continue to follow the successful baseline management model that was used for LHC.* [692]

Ces crises de périmètre autour du PLM nous paraissent illustrer le constat (un peu désabusé) d'un analyste du domaine, qui considère que le PLM est « *une solution à la recherche d'un problème* » :

> *Die klanten betalen niet voor PLM, terwijl engineers en directeuren zich niet bewust zijn van de mogelijkheden. Zolang die situatie voortduurt, blijft PLM een oplossing, op zoek naar een probleem.* [693]

La place nous manque – elle nécessiterait des développements plus considérables, des références à un champ académique extrêmement actif, et pour tout dire, une thèse en soi – pour traiter avec soin le matériau accumulé et les dynamiques observées au cours de la recherche-action de ce déploiement, et pour analyser tous les enjeux explicites et implicites mobilisés lors de cette crise : enjeux socio-techniques, enjeux de positionnement et de pouvoir, enjeux interrelationnels [694].

Analysons succinctement à l'aide du modèle à mailles tripolaires la situation du cas n° 5 décrite ci-dessus. Les deux acteurs (collectifs) principaux en présence sont : d'une part l'équipe de support CAO, interfaçant elle-même avec le développement informatique, ce qui implique (si l'on observe plus en détails par décomposition fractale, voir la Figure 11.8 p. 320) que ces différents pôles ne sont pas non plus nécessairement en phase ; et les bureaux d'études, incluant le bureaux d'études mécaniques (conception des composants d'accélérateurs), le bureau d'intégration, mais aussi les bureaux en charge de l'infrastructure (génie civil, électrique, ventilation). Les premiers fournissent un service et une palette d'outils aux seconds, qui eux-mêmes produisent des données décrivant des produits permettant de réaliser des projets : le troisième acteur est donc représenté par les projets, et il est plus effacé, voire totalement absent, dans ce contexte de déploiement d'outils. On constate toutefois que le support y fait explicitement référence (« *successful baseline management model that was used for LHC* »), tout comme le bureau d'études quand il exprime que l'outil ne peut pas avoir seulement pour vocation de couvrir les besoins des BE.

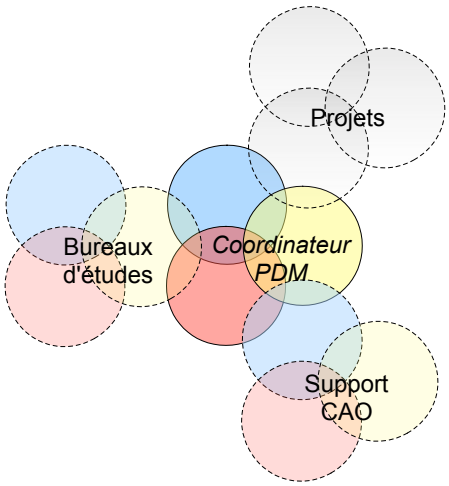


Figure 13.4: Modèle à mailles tripolaires des acteurs en présence pour le déploiement des outils PLM

692. « Une fois qu'un design est considéré comme prêt à être approuvé, les données pertinentes seront exportées dans le SGDT pour approbation avec les outils standard disponibles. […] Le modèle de cycle d'approbation proposé exige uniquement que les bureaux d'études continuent à suivre le modèle couronné de succès de la gestion de la configuration de référence qui a été utilisé pour le LHC. » *In ibid.*, p. 5.

693. « Les clients paient pour des produits, pas pour le PLM, et dans le même temps les ingénieurs et leurs supérieurs ne sont pas conscients de ses possibilités. Aussi longtemps que cette situation perdurera, le PLM demeurera une solution à la recherche d'un problème. » [Pels 2008]

694. Les grandes lignes ont au reste été largement évoquées au chapitre 8.

Quant au manageur technique, il se trouve à l'interface entre ces trois acteurs, dont l'un (le projet) est en transaction en quelque sorte par contumace. Le modèle tripolaire représenté à la Figure 13.4 aide à identifier ce partenaire implicite mais absent. Quant aux interfaces trop malmenées comme celles entre le support et les utilisateurs, elles ne permettent pas la construction d'espaces d'échanges et la constitution d'une compréhension commune de la problématique. Les raisons d'échouer sont nombreuses, comme cela a été relevé en particulier dans le cas du déploiement de systèmes d'informations analogues de type ERP [Vinck, Rivera et Penz 2004 ; Vinck et Penz 2008].

La brièveté de cette recension occulte les quelques réussites objectives, comme la mise en place d'un groupe paritaire pour la gestion du projet de déploiement du logiciel, ou la création d'un groupe de définition de spécification regroupant CAO et PDM – structures toujours en place sous des formes plus ou moins équivalentes (GUCS, PLM-WG) et qui ont considérablement contribué à la stabilisation de la situation. Ceci ne saurait masquer les difficultés considérables rencontrées, et qui sont d'ailleurs loin d'être totalement aplanies aujourd'hui : soumis à une *gouvernance fragmentée* (c'était l'un des résultats principaux de la revue sur le passage d'Euclid® à Catia® que j'avais organisée en août 2008), piloté par un trop grand nombre de comités de coordination. Le déploiement est également tiraillé par des exigences difficilement compatibles entre d'une part les utilisateurs (qui ne sont pas homogènes entre eux de surcroît : il suffirait par décomposition fractale d'analyser les relations entre pôles pour s'en convaincre), d'autre part et le support et développement (pas non plus toujours en phase entre eux), le projet de déploiement a peiné à trouver une vitesse de croisière.

L'un des facteurs clé de succès identifié par la littérature pour ce type de projets est l'implication du management supérieur : que ce soient les projets agiles de logiciels [Chow et Cao 2008], l'implantation de systèmes d'entreprise [Nah, Lau et Kuang 2001], ou l'exploitation de base de données [Wixom et Watson 2001]. Ce facteur est ici remis en cause par l'implication très faible des projets, qui semblent agir comme des clients non intéressés.

13.2.2 … à une égide unifiée

Dans le cas du projet *Med*Austron, l'égide est *a priori* unifiée, par construction : la structuration de périmètre proposée pour le MAID à la Figure 13.3 inclut en son sein l'équivalent pour *Med*Austron de tous les acteurs précédents pour le CERN. En effet, le pôle conception du MAID (équivalent du bureau d'études mécaniques du CERN) et son pôle intégration (équivalent du bureau d'intégration du CERN) sont présents, et à leur intersection, nous trouvons le projet de gestion des données techniques. C'est ainsi que projeteurs, support et développement (ou disons, plus modestement, paramétrisation et adaptation du logiciel sélectionné et déployé aux besoins du client) sont réunis dans le même périmètre.

En outre, pour reprendre le point précédent sur le facteur clé de succès, le responsable du MAID est très impliqué dans le déploiement de ce système : à l'intérieur de ce périmètre, les acteurs n'ont pas à lutter ou à travailler en sous-main pour œuvrer à la mise en place du PDM, ils y sont au contraire incités et fortement encouragés par un manageur technique s'efforçant de déployer une approche agir ↔ penser. La mise en place de ce périmètre est représentative d'une démarche au degré 2 (le manageur technique concepteur d'outils de conception collaborative) couplée à une démarche au degré 3 (le manageur technique concepteur d'organisations), cette dernière s'accomplissant selon les deux modalités évoquées au § 9.2.3 p. 272 : influencer sur l'évolution des structures organisationnelles, et déployer une démarche de gestion des données techniques. Il s'agit ici de développer une

logique organisationnelle favorisant la dynamique collaborative [695]. Le même manageur technique qui se sentait piégé dans un jeu binaire d'oppositions pas toujours très fructueuses lors du cas de SmarTeam au CERN, se retrouve avec une marge de liberté accrue pour proposer cette approche systémique aux équipes impliquées (certes plus modestes par leur nombre d'acteurs).

De surcroît, le manageur technique agissant ↔ pensant dispose d'un espace institutionnel pour expérimenter collectivement. Pour cela, nous avons procédé par approche récursive sur les objectifs assignés : mise en place progressive de chaque étape prenant en compte le déploiement global, selon le précepte « *Think big, start small* » (pense en grand, mais démarre petitement). Et cette mise en place progressive s'est appuyée sur une démarche d'apprentissage organisationnel, de type *learning by doing*, apprentissage par l'action. On n'attend pas de savoir comment faire le tout sur le papier (développer un modèle de données complet, par exemple) pour commencer à effectuer le premier pas en vrai : on fait le premier pas tout de suite, on tâte le terrain et on procède « *chemin faisant* » : la pratique éclaire la théorie qui éclaire la pratique, en boucle dialogique. Car il s'agit tout à la fois d'apprendre le logiciel, d'apprendre du logiciel, de développer une méthodologie commune entre les différents métiers, de se mettre d'accord sur un nombre considérable de paramètres, de tester les mécanismes tant à l'intérieur du logiciel que dans ses relations avec les autres logiciels (CAO, bases de données, utilitaires, autres systèmes d'informations), et de tester l'acceptance des utilisateurs aux procédures et aux processus, leur sensibilité à la rigueur ou la souplesse des règles, de tenir compte de la variabilité des besoins, de la diversité des cultures, et d'un nombre incroyablement élevé de facteurs.

Reprenons le schéma de la Figure 13.3, et observons-le avec un œil familiarisé à l'approche complexe de la partie III. L'on observe alors que la logique induite par l'organisation proposée ne propose pas un ensemble de territoires séparés délimités par des frontières nettes. Il suggère plutôt une dynamique d'échanges suscitée par des frontières épaisses et floues : la dialogique est inscrite dans la logique, pour faire en sorte d'inciter à l'ouverture aux autres plutôt qu'à la fermeture sur son pré carré. C'est bien une autre dynamique visuelle que celle qui est déclenchée par un organigramme, qu'il soit pyramidal ou matriciel.

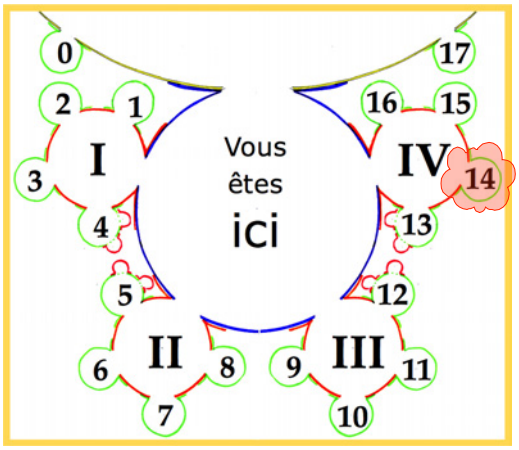
Une modélisation du périmètre du MAID avec un modèle à mailles tripolaires permettrait de mieux percevoir les instances avec lesquelles le MAID est en relation, et les endroits où doivent se construire des espaces d'échanges. Cela permettrait aussi de mettre en valeur le continuum organisationnel : la position des frontières est dans une large mesure artificielle, et la porosité nécessaire à la dynamique du projet exige une circulation des informations, des objets, des acteurs sur l'ensemble de la cotte de mailles. C'est à cette dynamique des espaces d'échanges que va s'intéresser le chapitre 14. On trouvera à la fin du chapitre 15, au § 15.3 p. 422, une modélisation partielle du processus *Ω (Conception, Intégration)* qui préfigure cette modélisation complète, auquel il ne manque plus que la maille *Réalisation*, considérée au chapitre 16.

∴

Conclure d'une égide unifiée qu'elle est artificielle après avoir mis en valeur les avantages qu'elle confère au manageur technique, cela peut paraître relever du paradoxe. C'est un autre de ces couples en tension du management relevés au cha-

695. Nous l'avons annoncé : nous ne procéderons pas à une recension exhaustive du cas. Pour clore ce chapitre introductif, j'indique quelques enseignements principaux et quelques pistes intéressantes concernant cette approche. Le premier faisceau de réflexion porte sur la logique organisationnelle, le second concerne la gestion des données techniques faisant l'objet du chapitre 14.

pitre 10 (Figure 10.1 p. 283) : à la fois favoriser l'identification de l'équipe et son homogénéité, et s'ouvrir aux influences extérieures et aux négociations sur les interfaces. Le paradoxe est, selon moi, dépassé par le modèle transactionnel proposé : il rend compatibles les deux approches, et mieux, instrumente leur complémentarité antagonique. C'est donc un instrument dialogique, au service d'un « agir ↔ penser l'interface ».



Chapitre 14. Équipement de l'équipage

Où s'élabore de manière collaborative l'instrumentation du processus collaboratif

L'utilisation du sextant est d'autant plus imprécise qu'on la pratique peu. La précision des visées, la rapidité des calculs, le tracé fin sur la carte : tout cela se travaille… Vous n'êtes pas comme ces informaticiens qui croient tout savoir sur l'organisation du monde, parce qu'ils ont réussi à le découper en zéros et en uns ! Vous êtes un navigateur. À ce titre, vous devez pratiquer la navigation comme un art, pas comme une fin.

Olivier Bass [696]

696. *La musique des Kerguelen*, La Rochelle : La Découvrance, 2009, p. 38.

Les grandes lignes de la problématique de la gestion des données techniques du produit au cours du processus de conception ont été exposées au chapitre 8 : création et structuration, validation et partage, gestion des demandes de modification et de la configuration. Nous ne les reprendrons donc pas *in extenso* dans cette partie à visée applicative, pour nous consacrer ici à la manière dont nous avons espéré résoudre l'une des questions les plus délicates : la construction et l'exploitation des espaces d'échanges pour la vérification et la validation des données.

En effet, lors du cas n° 1 sur la controverse entre Muon et Coordination technique, nous avions relevé l'impossibilité de mettre en place un « *cadre paritaire* » qui permettrait de suivre la méthode préconisée du « *common understanding* » (§ 5.7 p. 144). Et le cas n° 4 sur la gestion des ECRs dans ATLAS nous a amené à constater le manque d'espace d'échanges au moment de cette phase de validation des données : « *Il vaudrait mieux convoquer la réunion de concertation/conciliation avant de prendre une décision sur l'approbation du plan* », écrivais-je dans l'ECR sur la distance de 5400 mm. Nous avons aussi relevé la carence en termes d'outils pour établir des cadres de coopération à la fois formels et souples qui se révèlent nécessaires à ce stade : « *Nous n'avions pas l'outil qui permette de mettre en œuvre l'idée que je me fais d'un espace d'échanges en phase de vérification d'un processus de conception ; nous n'avions pas non plus les processus qui en induiraient l'établissement et la pratique ; et enfin nous n'avions pas les chefs de (sous-)projet qui auraient demandé à y recourir*» (§ 9.2.3 p. 272). Avec le nouveau périmètre décrit au chapitre 13, il en va tout autrement : étant le décideur au sein de ce périmètre, au degré 3, j'ai été en mesure de mettre en place et l'outil, et le processus [Nicquevert et Boujut 2011]. C'est ce que nous décrivons dans ce chapitre.

Qu'entendons-nous par la formule « *équipement de l'équipage* » ? Elle se réfère à notre définition du manageur technique élaborée au chapitre 12 : « *un acteur au sein d'un réseau d'interfaces qui s'équipe d'espaces d'échanges collectifs comme cadre de coopération, afin de faire passer des objets intermédiaires équipés au statut d'objet-frontière* » (cellule c_{23}). Nous avons ensuite vu à la cellule c_{33} comment un objet intermédiaire dûment équipé pouvait être piloté au travers d'un espace d'échanges pour atteindre un but, et franchir une frontière qui marque une étape dans son cycle de vie. Filer la métaphore conduit à cette formule d'équipement de l'équipage : les pilotes sont l'équipage, dont l'équipement est précisément l'espace dans lequel évoluent ces objets équipés. C'est une manière de (re)mettre l'acteur au centre du processus, dont bien des représentations sont allègrement désincarnées.

Il est donc ici question d'un couplage complexe d'équipements, à divers niveaux : celui de l'objet par les métadonnées, et celui de l'équipage (l'acteur d'interface ou le réseau d'acteurs) par l'espace d'échanges. Cela implique (et nous ne dénouerons pas ici l'écheveau de cette complexité) d'autres équipements connexes : celui de l'espace lui-même par le processus (local) de traversée des frontières, celui du processus (global) de conception par le réseau d'acteurs, celui du réseau d'acteurs par ces deux processus, et réciproquement, selon la logique de la dynamique systémique. (Sans parler de la mise en actes de l'articulation dialogique du processus de conception avec le processus d'intégration formulée à la fin du chapitre 12, et que nous n'aborderons qu'au prochain chapitre 15.) La meilleure formulation consiste à dire qu'il y a équipement *conjoint* de l'objet, de l'acteur et de l'espace.

Procédons pas à pas, espérant que, chemin faisant, ces questions s'éclaireront. Nous commencerons par traiter la question de l'équipement des données, en introduisant le concept central d'article. Nous reprendrons ensuite l'approche par les espaces d'échanges dans le processus de conception, théorisée au chapitre 12. Et enfin, puisqu'il est question de processus, ce chapitre 14 va s'appuyer sur une démarche de pilotage de projet par les processus (que nous ne détaillerons pas) et

aboutir à une proposition de matérialisation et d'inscription des espaces d'échanges dans le langage de modélisation BPMN.

14.1 Un projet de gestion des données de conception

L'un des obstacles majeurs au déploiement d'un outil de PDM (gestion des données du produit) entre les différents acteurs est la perception de la finalité même de l'outil, d'autant plus quand cette perception n'est pas orientée par une dynamique commune, comme nous l'avons vu précédemment à propos du cas de SmarTeam® au CERN évoqué au chapitre 13 ([Nicquevert, Boujut et Yami 2010]. Les utilisateurs des bureaux d'études considèrent souvent que l'objectif d'un outil de PDM est de simplifier le travail de conception, et donc de gérer les données et la connaissance associée pour libérer l'esprit du projeteur [McMahon, Lowe et King 2002]. Ainsi que l'a rappelé l'un d'entre eux, « *on est là pour trouver des solutions, pas pour gérer des données !* » Le projeteur serait-il pris lui aussi entre deux révolutions, la révolution technique et la révolution informationnelle, comme on a pu le dire de l'ingénieur industriel [Du Preez et Pintelon 1997] ?

La réaction rapportée ci-dessus n'est pas nécessairement motivée par une supposée résistance au changement (explication un peu systématique, par trop simpliste, et impropre en l'occurrence), ou par une opposition de principe au fait même de gérer ses données dans un concept de conception collaborative. Car les projeteurs sont parfaitement conscients de la nécessité de gérer les données, et même de l'intérêt de cette gestion ; et ils sont demandeurs d'outils et de procédures, pour peu que cette gestion demeure pour eux une activité mineure (en temps), qu'elle ne fasse pas obstacle à la dynamique de la conception. Leur investissement dans l'usage sera d'autant plus conséquent qu'ils en percevront d'une part la nécessité globale pour le projet, et d'autre part le retour sur investissement pour eux-mêmes. Ce sont les questions d'ergonomie, de facilité d'utilisation, d'interface homme-machine, qui sont soulevées par une telle réflexion, questions nombreuses et délicates qui n'entrent toutefois pas dans le fil de nos préoccupations.

Là où le PDM présente des limites pour l'usage qu'escompte en faire le BE pour ses besoins propres (et donc là où l'impact sur la perception du retour sur investissement est le plus sensible), c'est dans la gestion des phases amont de conception, entendues au sens des phases préalables à toute validation, ces phases d'échanges informelles entre acteurs de la conception au cours de la phase de conception collaborative [Grebici, Blanco et Rieu 2006]. À l'époque de la gestion des données d'ATLAS, nous en avions souvent discuté avec l'équipe support CAO du CERN. Le chef de groupe d'alors avait assez bien résumé la situation :

> *Our current thinking is: as long as the design is in a "gas state" the exchange should be free, ie. CADD [ftp disc space] with limited life times. Once the design has reached a state (more liquid than gas) such that more than two or three people start to need the information and the information starts to have a longer life it should go into EDMS since the data content must then be controlled. Obviously the hard part is to define when do we go from gas to a liquid state?* [697]

C'est à ce stade que l'approche par la dynamique des espaces d'échanges et les solutions proposées pour la vérification et la validation des données dans le cas de *Med*Austron permettent de dépasser ces limites : en nous basant sur les concepts

697. « Voilà ce que nous pensons pour l'instant : aussi longtemps que la conception est dans un "état gazeux" l'échange doit être libre, c'est-à-dire CADD [un espace disque ftp] avec des durées de vie limitées. Une fois que la conception a atteint un état (plus liquide que gazeux) tel que plus de deux ou trois personnes commencent à avoir besoin de l'information et que l'information commence à avoir une durée de vie plus longue, elle doit aller dans EDMS vu que le contenu des données doit alors être contrôlé. Clairement la partie difficile est de définir quand passe-t-on de l'état gazeux à l'état liquide ? » Thomas, *Exchange site*, courriel à Bertrand, 8 décembre 1999.

développés au chapitre 12 d'espaces de conception, de maturité de l'information, d'objets intermédiaires et de cadres de coopération, nous allons démontrer que l'indicateur d'état d'un document n'est pas suffisant pour gérer les données de conception, et que le recours au cycle de vie de l'article que décrit l'objet intermédiaire résout ce manque et apporte une valeur ajoutée considérable : il permet de constituer une représentation commune du processus de gestion des données.

Dans le cas de *Med*Austron, l'activité de conception avait commencé sans aucune organisation de gestion des données pré-existante : le projet n'étant pas un projet CERN *stricto sensu*, il ne s'appuyait pas sur le PDM en place. Ce cas est donc d'autant plus intéressant, surtout dans une perspective de recherche-action et de démarche agir ↔ penser, qu'il permet l'observation de l'émergence d'une telle organisation. Les difficultés à dépasser sont beaucoup mieux mises en valeur que dans un contexte de simple adaptation à un contexte existant. En nous concentrant ici sur le processus de validation des données de conception, nous privilégions un axe qui, sans restituer toute la richesse du cas, nous permet d'en saisir les enjeux principaux.

La contrainte imposée fin 2009 par le projet était une autonomie totale dès la fin 2012 (début de la phase d'installation en Autriche) : tous les processus, logiciels, outils et meilleures pratiques des bureaux d'études du CERN, qui ont émergé du cas de SmarTeam® au CERN évoqué plus haut, mais aussi des décennies de pratiques antérieures, tout cela ne pouvait pas être exploité directement. En outre, la phase de conception proprement dite étant relativement courte (deux à trois ans), il était hors de question de procéder au développement spécifique d'un outil de PDM. L'équipe MAID (*MedAustron Integration and Design*) a donc relevé le défi de cette situation : à partir d'un logiciel choisi par le management du projet sur des critères non techniques, déployer à partir de rien une structure de gestion des données, tout en poursuivant l'activité de conception en parallèle. Cela a consisté à implanter et adapter le logiciel commercial (*Vault*® d'Autodesk), définir le modèle de données, inventer les règles d'usage, former les projeteurs, éduquer les ingénieurs, résoudre les relations entre toutes ces entités, autant humaines que numériques, tout cela en produisant des données de conception réelles et en les gérant au fur et à mesure des besoins. Accessoirement, cela démontre s'il en était besoin que l'utilisation d'un logiciel *off-the-shelf* (sorti de la boîte) n'est pas immédiate et demande un soin particulier.

Dans ce processus d'implémentation d'un système de PDM (qui est en définitive également un processus de conception, de nature organisationnelle), nous nous concentrons ici sur la question de la validation des données, entendue comme un moyen de partager l'information dans l'ensemble du projet. Et nous allons voir qu'il est un impératif préalable crucial : celui d'identifier proprement l'entité validée et le but du processus d'approbation lui-même à un moment donné. Les données de conception ne peuvent pas être approuvées *per se*, pour elles-mêmes, mais seulement dans le cadre d'une phase donnée du projet, et en lien étroit avec l'approbation de l'article qu'elles sont censées décrire. On entend ici par article (*item* en anglais) une classe d'éléments, un modèle (au sens du patron de couture) d'un produit donné.

Reformulée en terme d'équipement, cette approche souligne que l'équipement des données n'est pas intrinsèque, mais bien lié à un projet, et qu'il nécessite donc la construction d'un espace d'échanges adéquat en fonction du but recherché par l'acteur qui demande la validation de la phase considérée du processus de conception, et donc du cycle de vie de l'article.

Le périmètre, en écho au chapitre 13, est défini par le document de cadrage *Description du poste de chef du lot de travaux Intégration de MedAustron* [698], qui décrit la mission de gestion des données et de définition d'une stratégie globale :

> • *Supervise CAD application environment implementation, establish storage environment for engineering data with access rights, and implement approval process with versioning ;*
>
> • *Implement workflows for teams involved related to integration and design work ;*
>
> • *As part of the design coordination task: technical document preparation for evaluation, approval, tender, production (and follow-ups) for all MedAustron work packages.* [699]

C'est dans ce cadre que j'ai lancé [Nicquevert et Boujut 2011] un projet spécifique, intitulé *Design data management project* (DDMP), celui qui apparaît à la Figure 13.3 à l'intersection des pôles *Conception* et *Intégration*.

14.2 Le cartouche, partie visible du processus

Nous plongeons ici dans quelques détails qui, au premier abord, pourront sembler parfaitement évidents. Or, le diable surgissant des détails, c'est précisément en allant au bout des évidences que nous constaterons qu'elles sont sources de bien des malentendus. Détaillons donc comment, en partant de la conception du format du cartouche de dessin, c'est finalement toute la stratégie de gestion des données qui a été progressivement élaborée.

La première étape du projet a consisté à formaliser la représentation visible du processus de validation, à savoir le cartouche du dessin, support classique des métadonnées des documents issus de la CAO. C'est une solution immédiate suffisamment pragmatique *a priori* pour satisfaire le besoin de traçabilité du statut du dessin, une fois celui-ci imprimé (donc hors de tout accès à la base de données gérée par le PDM). Nous avons décrit au chapitre 8 (autour de la Figure 8.5 p. 236 décrivant le cartouche du CERN) la manière dont est construit un cartouche, réceptacle visuel des différents champs permettant l'identification du dessin : au minimum un numéro d'identification, un titre et un propriétaire [700], et ordinairement beaucoup d'autres informations.

Définir le format du numéro d'identification était donc le tout premier objectif. Il est souvent le reflet des arborescences produit (PBS) que nous avons évoquées au chapitre 8. Le défaut principal, que nous avons fustigé au § 11.3 p. 334 sur les relations d'interdépendances hétérarchiques, est qu'un système d'identification orienté arborescence produit signifie qu'on classe avant tout le document selon le critère d'une structure de nomenclature donnée. Or, si le même objet est réutilisé dans un autre assemblage, alors son nom est supposé changer alors même que le design est strictement identique ; et d'autre part, comment dénommer un ensemble quelconque d'objets et assurer le lien entre arborescence produit et arborescence d'assemblage ?

698. « *Job Description of the MedAustron Integration work package leader* », document JD-100201-a-AFA, 22 janvier 2010.

699. « • Superviser l'implantation de l'environnement de l'application de CAO, établir l'environnement de stockage pour les données techniques avec les droits d'accès, et implanter un processus d'approbation avec versionnement. • Implanter les flux de circulation pour les équipes impliquées concernant les tâches d'intégration et de conception. • Faisant partie de la tâche de coordination de la conception : préparation de la documentation technique pour l'évaluation, l'approbation, les appels d'offres, la production (et le suivi) pour tous les lots de travaux de MedAustron. »

700. Exigences de la norme ISO 7200:2004 – *Technical product documentation - Data fields in title blocks and document headers* [ISO 2004].

Un exemple illustrera ce point. Sur le projet *Med*Austron, un aimant dipolaire est constitué de trois parties [701] : un électro-aimant, une chambre à vide et un support. Selon l'arborescence produit définie par la convention de dénomination du complexe d'accélérateur du projet [702], l'électro-aimant a pour code MBHC [703], et la chambre à vide VCEA [704]. Comme la fonction est définie par la partie magnétique, l'ensemble est en pratique appelé aimant. Mais comment dénommer cet ensemble ? Est-ce l'aimant qui l'emporte, ou le vide ? Et comment appeler les supports, qui de plus sont utilisés pour d'autres équipements ? L'arborescence produit tend à devenir une sorte d'arborescence fonctionnelle largement inspirée par la définition de l'accélérateur selon les exigences de l'optique du faisceau (le triangle jaune supérieur à la Figure 13.3). Dès qu'un assemblage donné utilise des éléments en provenance de plusieurs lots de travaux, le PBS ne fonctionne plus, en raison des conflits avec l'arborescence OBS organisationnelle (autrement appelé l'organigramme).

D'où le choix qui a été fait (après des débats intenses et des rejets assez radicaux de cette approche, il faut le reconnaître) : la convention de dénomination est dénuée de signification, le numéro du dessin n'est pas porteur de sens, il devient un simple identifiant unique. Les autres informations sont gérées dans et par le système de PDM [705]. Le numéro est tout simplement de la forme MA-1234567, avec un préfixe désignant le projet, et un numéro incrémental fourni par le PDM. Ce nombre est celui de l'article, et un modèle 3D ou un dessin 2D décrivant un article portent tout simplement le même numéro que l'article auquel il est assigné (avec une extension de fichier propre à leur nature) [706].

Le tout premier processus d'approbation imaginé par l'équipe projet était constitué de quatre phases séquentielles habituelles au CERN : préparation, contrôle qualité, publication (*release*) puis approbation, les deux dernières opérations étant effectuées dans cet ordre. Le dessin est tout d'abord créé par le projeteur à partir du modèle 3D, puis soumis à un contrôleur dont le rôle est de vérifier la qualité d'exécution (respect des normes de représentation et de tolérancement, entre autres). Une fois contrôlé, il est transmis à l'ingénieur en charge dont le rôle est de valider que la solution représentée par le dessin est conforme aux exigences fonctionnelles. Enfin, le chef de projet (ou équivalent, selon le niveau décisionnel requis par l'importance de la pièce considérée) approuve le dessin pour production. Cet embryon de processus a servi de base au format du cartouche : quatre paires de champs de métadonnées (un nom / une date) pour chaque étape de ce processus sont mentionnées dans le cartouche. La dernière étape autorise, mais n'implique pas le changement du champ statut, qui mentionne jusque là : *Non valide pour exécution*. C'est en effet une décision qui concerne la gestion de projet, et non pas le statut du modèle en tant que tel. Ce changement est en effet lié au statut de l'article, dont le cycle de vie est propre, quoique lié à celui du modèle 3D. Nous y reviendrons plus loin.

Nous avons vu au chapitre 11 l'intérêt de considérer le dessin comme un objet intermédiaire. Ce sont des artefacts (au sens d'objets matériels) qui assurent simultanément la représentation de l'article (modèle du futur produit) et la médiation entre les différents acteurs. En tant qu'artefacts, il faut les équiper de métadonnées ; en tant qu'objets de médiation, leur identification doit contenir un statut

701. Beaucoup plus pour un aimant dipolaire du LHC, en particulier du fait qu'il est superconducteur.

702. « *Naming convention of the MedAustron accelerator complex* », document ES-081117-a-UDO-V7.0_elements_naming_convention.

703. *Magnetic Bending Horizontal with C-shape yoke*, aimant de courbure horizontale à culasse en *C*.

704. *Vacuum Chamber Elliptic Aperture*, chambre à vide à ouverture elliptique.

705. Des champs libres ont été réservés dans le cartouche pour une numérotation interne au sous-projet.

706. Une précision de détail : cela limite à un seul le nombre de dessins décrivant une pièce. Cette limite est conforme à la pratique usuelle, surtout si l'on prend en compte la possibilité de dessins multi-feuilles.

indiquant leur degré de maturité [Batenburg, Helms et Versendaal 2006]. Pour un dessin, ces informations figurent dans le cartouche, avec en général une confusion d'ordre ontologique entre les différents niveaux de signification. En effet, certains champs d'information concernent le dessin lui-même – en tant qu'objet matériel, un papier imprimé ; d'autres portent sur le document 2D – à savoir, un fichier électronique produit par un logiciel de CAO ; d'autres enfin se réfèrent à l'article – à la classe d'éléments du futur produit en cours de conception. Par conséquent, qu'est-ce qui est approuvé lorsqu'un dessin est approuvé ? Le tirage papier, le fichier ou bien l'article lui-même ? Et pour quelle raison, dans quel but et à quelle phase du projet ? C'est donc à reconsidérer entièrement la question des métadonnées qui équipent les données de conception que nous sommes invités par l'introduction du PDM.

Comme le DDMP partait d'un terrain vierge de toute histoire antérieure, il nous a paru approprié de prendre ces interrogations en compte, et d'exploiter le cartouche comme un outil pour définir la représentation du processus de gestion des données sous-jacents. Le format de cartouche présenté à la Figure 14.1 opère une claire distinction ontologique, c'est-à-dire une discrimination de nature profonde et essentielle entre différentes entités [707]. À chacune de ces entités correspond une colonne spécifique du cartouche : le *projet* (entité de nature organisationnelle) ; l'*article* (la classe d'éléments à laquelle appartient un élément physique donné, un produit réalisé – dont on dira que c'est une instance de l'article), qui possède des métadonnées propres souvent confondues avec celles du dessin ; le *fichier de CAO* 3D (représentation géométrique spatiale de l'article) et le fichier de CAO 2D (projection standardisée de la représentation tri-dimensionnelle) ; et enfin, la *feuille de papier*, la seule entité physique (avec le produit final), et le seul document géométrique à portée contractuelle dans la relation donneur d'ordres / contractant pour la réalisation du produit.

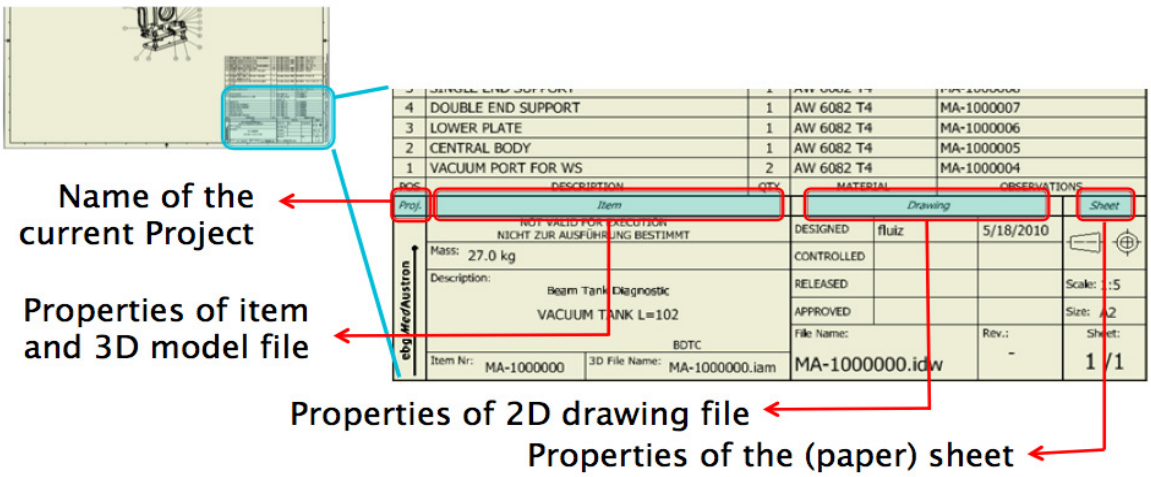


Figure 14.1: Première version du nouveau cartouche, avec distinction des entités

Première colonne : nom du projet
Deuxième colonne : métadonnées concernant l'article
Troisième colonne : métadonnées concernant le dessin (fichier)
Quatrième colonne : métadonnées concernant la feuille (papier)

Ces définitions pourront paraître évidentes. Notre expérience nous laisse à penser qu'il n'en est rien, et que la confusion est grande entre ces différents statuts ontologiques. Or la clarification de cette confusion est indispensable pour définir correctement la signification des procédures de publication. Le format adopté y contribue, en déplaçant par exemple la propriété de masse dans la colonne de l'article, et

707. J'ai renoncé à le qualifier d'*ontologiquement discriminant*, mais l'idée est bien là.

surtout, le tampon du statut (ici, « *Not valid for execution / Nicht zur Ausführung bestimmt* »). Nécessaire, cette clarification n'a toutefois pas été suffisante pour asseoir un usage satisfaisant en pratique. L'étape suivante a consisté à modéliser le processus de validation afin de construire une représentation commune aux différents acteurs.

14.3 Du cartouche au cycle de vie

L'article introduit dans le cartouche va acquérir une position clé comme objet intermédiaire dans cette représentation commune. Car à ce stade du DDMP, les utilisateurs du bureau d'études n'étaient pas en mesure de produire des dessins avec un cartouche rempli : comment faire correspondre les métadonnées du cartouche et les propriétés des différentes entités entre le cartouche et le logiciel de CAO ? Ce n'est pas aussi simple, là non plus, qu'il y paraît, quand on s'intéresse non pas à la théorie du mode d'emploi, mais à la pratique *réelle* de production *réelle* de données *réelles* dans le monde *réel*. Le défi est de faire en sorte que le système soit non seulement potentiellement utilisable, mais *réellement* utilisé : utilisé à chaque phase du cycle de vie, depuis la création jusqu'à la diffusion des données de conception, en passant par toutes les phases collaboratives indispensables d'élaboration, de vérification et de validation ; et utilisé par tous les acteurs, depuis les projeteurs jusqu'aux entreprises de fabrication, en passant par les ingénieurs et les manageurs de projet.

14.3.1 Limites au cartouche

Notre espoir était, grâce au cartouche, de marquer une claire distinction entre l'article et ses représentations. Car le cycle de vie de l'article n'est pas le cycle de vie de ses représentations. Le dessin imprimé est le seul endroit matériel où le statut de l'article est visible. D'où la confusion régulière entre la carte et le territoire, entre le référent et le signifié. Trois limitations ont, en pratique, étouffé cet espoir. La première limitation provient du *data mapping*, la mise en correspondance des données : la définition des métadonnées et du schéma de cycle de vie n'est pas identique entre la CAO, le système de PDM, le cartouche et le processus (voir le Tableau 14.1 p. 400). L'équipe a donc dû résoudre les questions de synchronisation, voire de recréation de certains champs. La deuxième limitation est due à la difficulté à générer des nomenclatures directement à partir de l'arborescence de la CAO. La troisième limitation est imposée par l'effort exigé de la part des utilisateurs pour s'approprier la globalité du processus de gestion des données : les utilisateurs étaient « *lost in translation* », désorientés par cette nouvelle approche. Les concepts étaient nouveaux, les noms des métadonnées n'étaient pas identiques d'un endroit à l'autre, et surtout, les utilisateurs n'étaient même pas tous convaincus de l'utilité d'un PDM : dans la phase initiale de l'implantation d'un système de gestion, quand elle se fait en parallèle avec la production effective de données et que toutes les fonctionnalités ne sont pas opérationnelles, la gestion des données apparaît quelque peu superfétatoire.

Il fallait donc améliorer tous les aspects du projet de manière à obtenir un environnement de gestion des données qui fonctionne : les outils, la formation des utilisateurs, les processus et les procédures. C'est à ce moment que nous avons stratégiquement introduit un pilotage par les processus qui aille au-delà d'un simpliste et ambigu modèle de données : clarification des concepts par modélisation des processus, configuration et synchronisation des outils, promotion intensive de l'usage de l'article comme un concept central, définition des droits et formation de tous les utilisateurs au travers de l'ensemble du projet.

La définition de la procédure de validation d'un dessin que nous avons retenue est la suivante. La publication d'un dessin est le résultat d'une procédure de vérification et de validation conduisant de la préparation d'un dessin dans l'espace privé du concepteur jusqu'à sa diffusion dans l'espace plus vaste du projet. L'approbation d'un dessin, selon l'acception courante, est la procédure à travers laquelle la réalisation de l'élément spécifié, en tant qu'objet physique correspondant à un article, est autorisée. Le dessin est alors rendu public (*released*) hors du périmètre de l'équipe projet, en se faisant *porteur du statut de l'article*. La différence est essentielle : en approuvant le dessin, c'est l'article qu'on approuve.

Il est à noter que, entre cette définition et la première version du cartouche basé sur l'embryon de procédure et sur les pratiques du CERN, il est intervenu une interversion : l'approbation devient *antérieure* à la publication. C'est une mise en conformité avec les recommandations de la norme [708] (Figure 14.2)

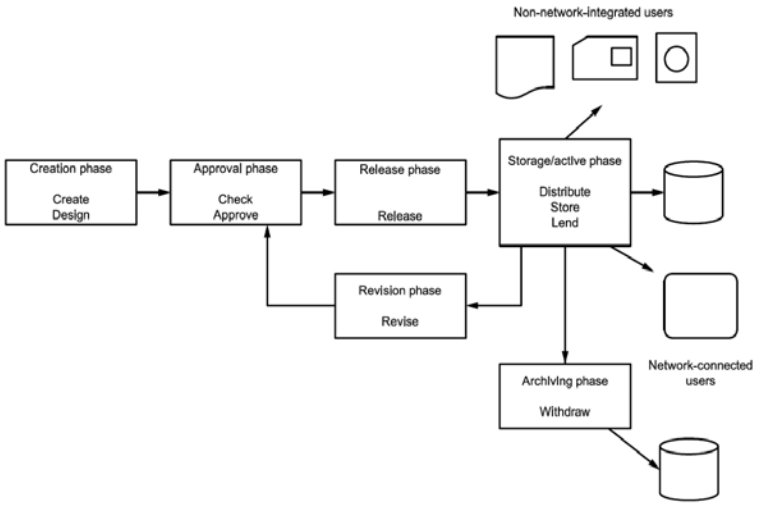


Figure 14.2 : Phases de la tâche de documentation de la conception

in ISO 11442:2006, Fig. 2

C'est en même temps une clarification conceptuelle : on approuve bien *avant* de publier, et non l'inverse. Tout dépend, toutefois, de ce que l'on appelle publier, dont l'équivalent anglais, *release*, possède le sens quelque peu différent de *libérer*.

14.3.2 Espèces d'espaces

Les concepts sous-jacents à la définition proposée de la procédure de validation ne sont autres que ceux que nous avons étudiés au § 12.3.2 p. 360, et nous retrouvons par la pratique la définition du processus élémentaire de conception : au gré des différentes étapes d'un cycle de vie, les données sont préparées, discutées et gérées dans différents espaces : espaces de conception de Lécaille, espaces de travail de Grebici, ou espaces d'échanges tels que nous les avons définis. Partant des processus d'échanges des objets introduits par Lécaille, Grebici [2007, 91-93] définit quatre espaces (Figure 14.3) : en plus de l'espace privé, de l'espace de proximité et de l'espace de projet introduits par Lécaille, elle ajoute l'espace public. La Figure 12.4 p. 361 en donne un modèle théorique.

708. ISO 11442: 2006 – *Technical product documentation — Document management. § 5 : Phases in the design documentation work* . Depuis cette modification sur MedAustron, l'organe compétent du CERN, le GrACQ, a entrepris d'aligner le cartouche pourtant multi-décennal du CERN sur cette pratique.

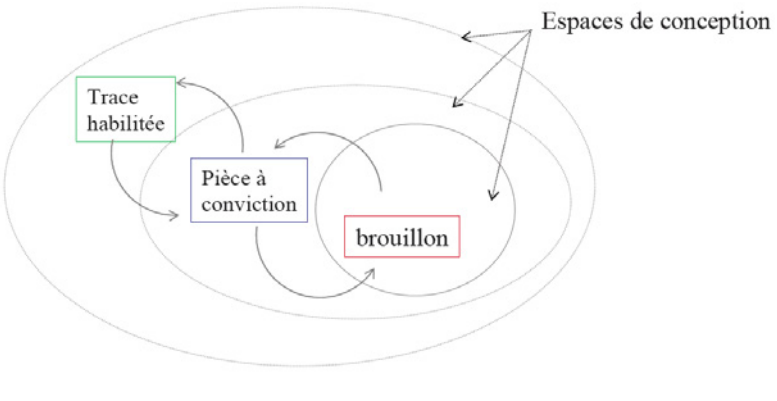


Figure 20 Modalités d'action et processus d'échange des objets [Lécaille 03]

Figure 14.3 : Les espaces de conception de Lécaille vus par Grebici

Développons l'instrumentation (l'équipement) de ces espaces, et reprenons la suite du propos du chapitre 12. Chaque traversée des frontières confère à l'objet intermédiaire (le dessin ou le modèle 3D, dans notre cas concret) une évolution de son équipement (entendu comme l'ensemble de ses métadonnées) : son état passe ainsi du statut de *brouillon* (qu'il possède dans l'espace privé) à celui de *pièce à conviction* (dans l'espace de proximité), puis de *trace habilitée* (dans l'espace de projet), avant d'atteindre celui de *livrable* (une fois publié dans l'espace public).

À chaque état des objets intermédiaires ainsi défini correspond une modalité d'actions : pour le brouillon, modalité de création et de validation d'hypothèses ou de solutions (je préfère le terme de test, ou d'épreuve) ; pour la pièce à conviction, modalité de persuasion et d'argumentation, « *permettant la construction conjointe et l'échange de point de vue* » ; pour la trace habilitée, modalité de « *consentement à la circulation sans contrainte* », au-delà duquel la donnée sort du rayon d'action de son concepteur ; et enfin pour le livrable, modalité de « *vérification et validation formelles (par la hiérarchie) à la fin d'un processus de conception* ». Grebici souligne le caractère irréversible de ce dernier passage de l'état de trace habilitée à celui de livrable [709].

Grebici résume ainsi :

> *La diffusion d'un objet intermédiaire est donc un processus d'échange permettant la construction conjointe et graduelle des informations de conception. Ce processus dépend des modalités d'usage (ou modalités d'action) que les acteurs peuvent appliquer sur l'objet (création, vérification, argumentation, etc.). Les différents états d'un objet (brouillon, pièce à conviction, etc.) traduisent ces modalités d'action.*

Les passages d'un état à un autre, liés selon mon approche aux traversées de frontières, nécessitent une traçabilité. Nous considérons ainsi le système de gestion des données comme la mémoire, ou le grand registre de police : par exemple, qui était le garde-frontière, ou le *gate-keeper*, pour reprendre l'expression de Macdonald et Williams [1993] ? Qui a autorisé le franchissement (l'acteur habilité par le projet auquel a été octroyé ce droit) ? À quelle date le passeport (l'équipement de l'objet intermédiaire contenant les données) a-t-il été tamponné ? Avec la mise à jour et l'incrément de quel indice de révision ?

Grebici propose à la Figure 14.4 une formalisation des passages entre les états sous forme d'un diagramme d'état / transition, assez différente de notre propre approche. Si je montre ce modèle UML, c'est aussi pour illustrer la variété des exploitations que l'on peut faire des observations ethnographiques sur un bureau d'études du CERN…

709. Nous nuancerons cette affirmation dès le § 14.3.3.

14.3.3 Étape, état, statut

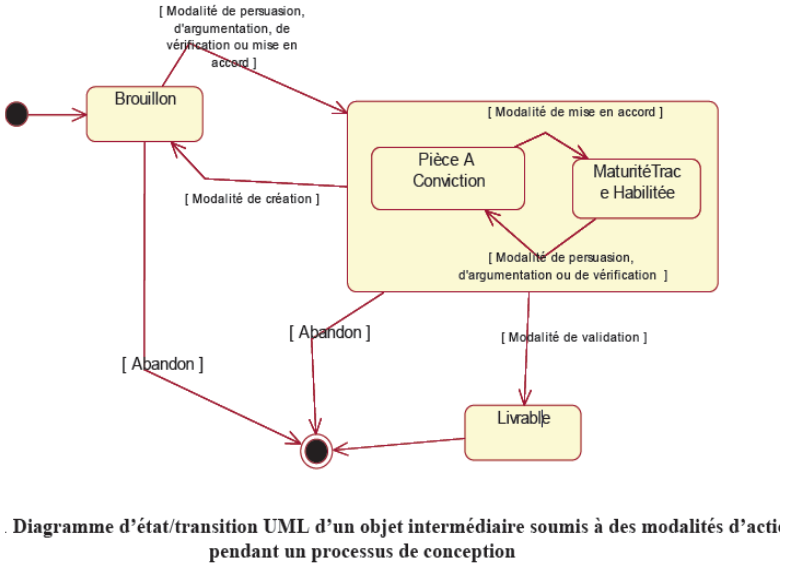


Diagramme d'état/transition UML d'un objet intermédiaire soumis à des modalités d'acti pendant un processus de conception

Figure 14.4 : Une autre vision de la traversée des frontières

in Grebici 2007

La limite commune à tous les modèles précédents est qu'ils s'appliquent uniquement à l'état de *l'objet* intermédiaire lui-même. Or, je ne pense pas qu'il y ait une équivalence bidirectionnelle totale entre l'état d'un objet et sa position dans les espaces d'échanges. Au cours des boucles de conception qui surviennent tant que l'objet intermédiaire reste ouvert aux modifications, c'est en général assez vrai. Mais à l'étape finale, l'objet va devenir figé (objet intermédiaire fermé) après que la dernière frontière (entre les espaces de projet et public) est franchie par l'objet. Et cet objet, ayant atteint l'état "livrable" *pour une étape donnée* du cycle de vie du *projet*, peut encore être amené à évoluer : ce sera le déclenchement (avec un nouvel indice de révision *sur l'objet*) d'un nouveau cycle de vie pour l'objet dont l'indice a été ainsi incrémenté. Or entre-temps, quelque chose de fondamental a évolué : c'est le statut de *l'article* auquel l'objet est assigné [710]. Il a lui aussi augmenté d'un cran, et c'est lui et lui seulement qui a subi ce changement de manière irréversible, et qui va le conserver dès lors dans son propre cycle de vie, et le traçabiliser.

D'où la proposition suivante qui permet d'enrichir le modèle théorique de Lécaille et de Grebici. Récapitulons. Au cours des différentes étapes, les objets contenant les données traversent différents espaces et y acquièrent des degrés de maturités accrus [Grebici, Blanco et Rieu 2005 ; Saint-Marc et al. 2004], qui sont entérinés par un certain état. Je considère toutefois (nuançant ainsi l'approche de Grebici) que la maturité n'est pas une propriété absolue de l'objet intermédiaire, et que la validité des données n'existe pas *en soi*, mais *pour* quelque chose [711]. Ce qui signifie que la validité des données n'est pas une propriété intrinsèque de ces données, mais qu'elle dépend de l'étape du projet de conception. Nous affirmons que le *statut*, la validité des données considérées, est la combinaison de leur *état* (reflet de leur degré de maturité et de l'information) sur l'*étape* (la phase du cycle vie de l'article correspondant). Le statut des données de conception est donc constitué de cette double information.

La circulation des objets intermédiaires porteurs des données entre les différents espaces est tracée par le changement de statut. Au sein de chaque espace, des activités se déroulent : conception, vérification. La traversée des frontières correspond à l'activité de validation. Les objets peuvent boucler autant que nécessaire dans les trois premiers espaces, sans que le statut de l'article en soit affecté. La traversée de

710. Terme technique utilisé dans le PDM pour indiquer le lien entre article et objet, un lien de type : « ce document décrit et spécifie certaines caractéristiques potentielles de cet article ».

711. Un écho hégélien dans la formulation, que je ne développerai évidemment pas : voir la *Phénoménologie de l'Esprit* (1806-1807).

la dernière frontière (vers l'espace public) ajoute une nouvelle dimension : non seulement les données sont validées, mais également l'étape du cycle de vie de l'article auxquels ils sont assignés. D'où l'équation proposée :

Statut = État + Étape, soit encore :

Validité = Degré de maturité de l'objet + Phase du cycle de vie de l'article

Revenons à notre cartouche. On peut voir que l'état est indiqué par le nombre d'étapes franchies dans la procédure progressive de validation, tandis que l'étape est donnée par le tampon « *Valid for execution* », tous ces éléments étant donnés pour un indice de révision donné de l'objet. La seule information manquante est l'indice de révision de l'article. Par chance, connaissant l'indice de révision du dessin, cette information est disponible dans le système de PDM.

Ce statut enrichi fournit toutes les indications, les hypercoordonnées pour définir la position d'un article donné dans les espaces d'échanges. On peut y voir la préfiguration d'un hypercompas orientant l'objet dans un hyperespace produit / processus / projet accueillant le processus collaboratif global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)*. Le chapitre 16 évoquera l'enjeu d'une telle mise en acte.

14.3.4 Implantation effective

Maintenant que notre modèle théorique a été encore enrichi, grâce à cette immersion dans les détails de l'équipement des données, voyons comment a été opérée l'implantation effective de cette procédure de validation, aboutissement du processus élémentaire de conception défini au chapitre 12 (§ 12.3.2 p. 360). L'observation de cette implantation éclairera alors sans doute en retour ce que nous y disions de la traversée des « frontières épaisses ».

Chaque catégorie d'objet intermédiaire possède ses propres métadonnées pour s'identifier et décrire son état. La CAO et le PDM, surtout s'ils sont conçus pour fonctionner ensemble, assurent en général une excellente connexion entre les modèles 3D et les dessins 2D. L'introduction des articles complique l'affaire. Et les différentes dénominations utilisées pour les mêmes concepts, ou les décalages entre concepts, provoquent des malentendus entre utilisateurs, et posent des difficultés pour établir une représentation commune du processus de gestion des données de conception sous-jacent. Le Tableau 14.1 donne une vue d'ensemble des correspondances à établir entre les différents champs de base de données et les concepts, en commençant par les cases du cartouche présentées au § 14.2.

Notons que l'on a dû ajouter un deuxième espace de proximité pour mieux s'adapter aux réalités du projet : un espace lié au bureau d'études (orienté métier), et un espace attaché au lot de travaux propriétaire de l'article étudié (orienté fonction). Ce rajout ne remet pas en cause le modèle théorique, et montre au contraire la souplesse qu'il autorise en terme d'adaptabilité.

Une analyse fine donne une idée de la subtilité de la tâche de conciliation : confusion (accrue par l'inversion) entre états *released* et *approved*, et même entre *checked* et *approved* ; contenu et limites de chaque phase de vérification ; règles à suivre pour prendre un nouvel indice de révision, pour déclencher le changement de "*Work in progress*" à "*For review*", qui n'existe pas dans notre PDM… Grande était la difficulté de synchroniser tous ces champs et tous ces noms entre les représentations cognitives des utilisateurs (concepts), les outils de CAO (champs de base de données) et de PDM (modèle de données implicite), dessin et cartouche (comme objet intermédiaire) et processus métier (comme guide pour les utilisateurs). Noter également que la colonne *État des données dans le PDM* ne permet pas d'instrumenter le passage du statut *Approved* (*Eng. approved*, fonctionnellement approuvé) au statut *Released* (*Mfg. approved*, valide pour exécution).

État dans le cartouche	*Champ de base de données CAO / PDM*	*Rôle autorisé à procéder à la validation (traversée de frontière)*	*Dénomination du rôle dans le PDM*	*État des données dans le PDM après validation*	*État de maturité*	*Espace de conception atteint après traversée de frontière*
Created	*Created by*	Projeteur	*Engineer design*	*Work in progress*	Brouillon	Privé
[submitted] – Non rendu visible	*[submitted by] – non défini*	Projeteur	*Engineer design*	*For review*	Pièce à conviction	Proximité bureau d'études
Checked	*Controlled by*	Responsable de bureau d'études	*Checker*	*For review*	Pièce à conviction	Proximité dans le lot de travaux
*Released**	*Eng Approved by*	Ingénieur projet du lot de travaux	*Engineer approver*	*Released*	Trace habilitée	Projet
*Approved**	*Mfg Approved by*	Chef de projet	*Manufacturer approver*	*Released*	Livrable	Public

Tableau 14.1: Différents champs à mettre en correspondance et concepts à réconcilier

* : inversés après mise en conformité à la norme (voir note 708 p. 396)

D'où l'importance d'introduire un lien entre le cycle de vie des documents (contenant les données) et le cycle de vie de l'article, afin d'obtenir un statut *Released* complet. Ce lien a été introduit dans le processus de gestion des données en imposant que la publication d'un article ne puisse être effectuée que sur la base d'un document lui-même publié soit au préalable soit simultanément. C'est ce que résume la Figure 14.5, qui avait été préparée pour expliquer ce point lors de la for-

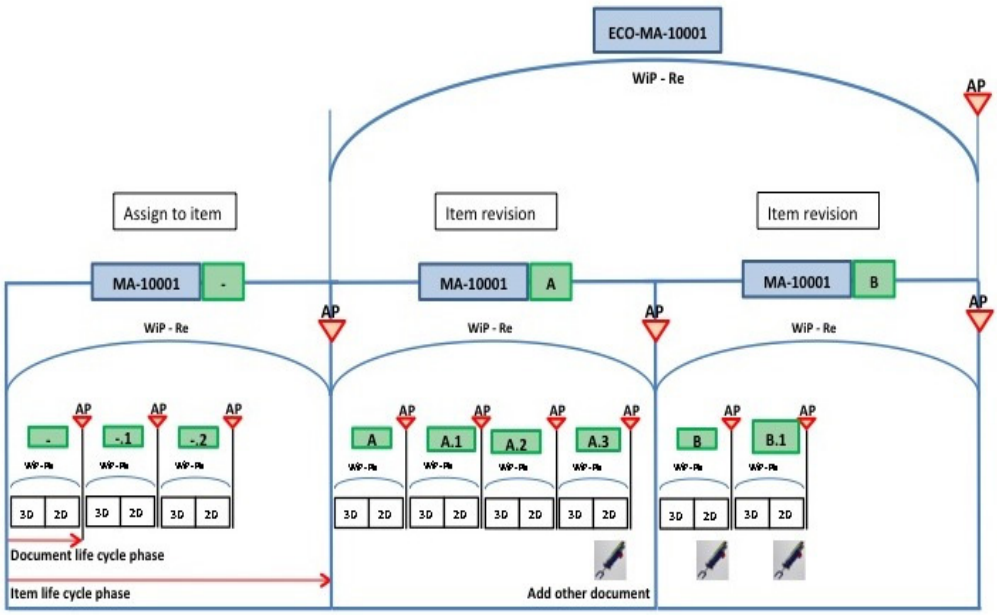


Figure 14.5 : Articulation entre cycle de vie des données et cycle de vie de l'article

Préparé par Sylvain B. pour MedAustron, juin 2010
WiP : *Work in Progress* – Re : *Released* –
AP : *Approval (validation) process* – ECO : *Engineering Change Order*

mation des utilisateurs. Nous ne la détaillerons pas ici, si ce n'est pour illustrer le caractère partiel de la synchronisation entre les cycles de l'article (« *Item life cycle phase* » tout en bas à gauche) et ceux des documents (à plus courtes périodes).

Ce mécanisme offre de nombreuses possibilités pratiques, comme la co-existence de différents statuts de différentes révisions du même document : par exemple, l'une étant dans l'état *Released* pour une étape de cycle de vie d'article *Pour prototypage* ; une autre dans l'état *Approved* pour une étape d'article *Préparation de l'étude de marché* ; et une troisième dans l'état *Work in progress* pour l'étape d'article *Production*. La gestion de configuration est à portée de main !

Jetons maintenant à nouveau un œil à notre cartouche : le nombre d'informations à gérer est de plus en plus important, et nous pourrions souhaiter éliminer toute l'information non nécessaire. Ainsi, les tableaux de révision traditionnels n'ont pas été implantés, puisque l'information correspondante est enregistrée dans le PDM. En définitive, ce qui est nécessaire (en sus des informations concernant le support papier), c'est l'identifiant (le numéro de l'article) et l'indice de révision. Toutes les autres informations pourraient aussi bien ne pas apparaître dans le cartouche. L'acceptation sociale d'une solution aussi radicale n'était toutefois pas suffisante : les utilisateurs se seraient sentis perdus sans cette redondance et sans la disponibilité immédiate du statut sur le dessin [712].

14.4 Modélisation du processus de vérification et validation

14.4.1 Une modélisation BPMN

Nous proposons à la Figure 14.6 une modélisation simplifiée du processus de gestion des données de conception. C'est un modèle complet utilisant le langage BPMN (*Business Process Model and Notation*) [713]. Quatre rôles principaux ont été identifiés et occupent les couloirs de nage : *Designer* (projeteur), *Checker* (contrôleur), *Engineer approver* (approbateur de la fonctionnalité) et *Manufacturing approver* (approbateur pour le lancement en production), selon la désignation des rôles préimplanté dans le PDM. Afin de mettre en évidence la mise en actes du concept d'espaces de conception de Lécaille ou d'espaces de travail selon Grebici, nous les avons superposés à ce modèle. La traversée des frontières est ainsi rendue directement visible et représentée par les actions dénommées *"Properties to change"* (Propriétés à changer, ce qui correspond à une modification de l'équipement des objets intermédiaires qui sont porteurs des données traitées).

Ces rôles peuvent être tenus aussi bien par un acteur individuel que par un groupe d'acteurs, ou un réseau. C'est ainsi que nous faisons la distinction entre les activités de vérification et celles de validation. Les premières se déroulent à l'intérieur d'un espace de travail donné – dans lesquels plusieurs acteurs sont impliqués, le transformant ainsi en espace d'échanges au sein duquel plusieurs points de vue (multi-métiers) seront exprimés. Les activités de validation ont lieu aux *frontières* de ces espaces d'échanges, elles sont effectuées par un acteur unique, et elles marquent la fin formelle de la phase de vérification. La validation n'intervient qu'après la phase de vérification, dont elle représente la clôture. Cette distinction confère aux activités de ces phases de conception et de vérification un caractère semi-prédictibles : ce sont des zones d'autonomie coordonnées, des phases non séquentielles et non linéaires, sur un mode synchrone (en co-présence), dont l'orga-

712. Sans parler de la contrainte de rester en permanence connecté au PDM. Ceci dit, en sommes-nous si loin, à l'heure de l'iPhone (3, 4 ou 5) et des apps ? Il en existe d'ailleurs une pour accéder aux données d'Inventor (*IPM Viewer*).

713. Nous relatons au § 15.1.2 p. 411 les circonstances et motivations de l'introduction de BPMN.

nisation revient à l'acteur qui sollicite une validation. Transformer un objet intermédiaire en objet-frontière par le truchement de la modification de son équipement en métadonnées requiert que l'acteur s'équipe lui-même d'un espace d'échanges adapté, dont le franchissement de frontière représentera précisément cet acte de validation (voir le chapitre 12).

Des boucles multiples sont possibles dans ces espaces d'échanges, et même encouragées, des *boucles de conception* qui ne peuvent et ne *doivent* pas être prescrites par un flux prédéterminé : à l'intérieur de cette espace de bouclage, il est essentiel, pour favoriser la fluidité des flux d'informations, que les activités de conception et de vérification ne soient pas tracées par le PDM et que les acteurs soient laissés complètement libres. Cet espace d'échanges *ad hoc* est représenté à la Figure 14.6 par une zone spécifique violette *Design loop* (boucle de conception) s'étendant sur plusieurs couloirs de nage. C'est une notation qui représente une extension des symboles BPMN, nous allons l'expliciter au § 14.4.2.

Avant cela, revenons sur la traversée des frontières. Pour les trois premiers espaces (espace privé, espaces de proximité BE et lot de projet) visualisés à la Figure 14.6, ces traversées fonctionnent sur des modes similaires. Ce qui change n'est pas le mécanisme, mais le contexte, qui va influer sur les acteurs impliqués, et donc sur le mécanisme collaboratif de prise de décision [Jankovic, Stal Le Cardinal et Bocquet 2007]. Il n'en va pas tout à fait de même pour le passage de l'espace projet à l'espace public, puisqu'il implique l'*item release* (une publication d'article qui n'a rien d'académique ni de journalistique). La différence ontologique est radicale avec la publication d'un document. Elle impose, entre autres conditions, que tous les sous-articles soient eux-mêmes déjà publiés ou inclus dans la même procédure de publication ; et que toutes les données de conception (modèle 3D et dessin 2D) aient été publiées au préalable en tant que documents. Et surtout, le processus de publication d'article n'est pas une simple opération de gestion des données de conception. C'est une action de gestion de projet, dont l'étendue est bien plus vaste que le cadre de la conception. C'est l'une des clés du sous-processus *Ω (Conception, Réalisation)* inclus dans le processus global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* [714].

14.4.2 Extension du domaine de la boucle

Le recours au langage BPMN a été extrêmement positif pour le DDMP. Par son intuitivité et la facilité des cycles auteur/lecteur, il a permis de clarifier la stratégie globale et de la partager avec l'ensemble des acteurs. Il a aidé à définir les différents rôles, et même à en identifier un qui n'était pas couvert : celui de gestionnaire de données. Il a contribué à identifier les phases séquentielles, les phases parallèles et les flux de données associés, ainsi que les boucles de conception non séquentielles correspondant au travail dans les espaces d'échanges.

La représentation graphique de ces boucles de conception n'a pourtant pas été facile, car c'est une notion qui n'est pas couverte par la norme du langage BPMN. C'est d'autant plus important d'avoir trouvé une solution à cette question de modélisation, que le modèle ainsi proposé permet d'intégrer l'inattendu. Il est ouvert à l'imprévu, il laisse des espaces à l'indéterminé, dans un ensemble qui est globalement déterminé. C'est ce que j'ai appelé des zones d'autonomie coordonnées. On dépasse ainsi la contradiction ordre / désordre, ou programmé / aléatoire, pour atteindre une stratégie de type « *chemin faisant* » [Morin 2005, 119].

À la Figure 14.6, l'espace d'échanges *ad hoc* est représenté par une zone spécifique. Nous allons ici préciser comment nous sommes parvenus à proposer cette

714. Cette question sera abordée au début du chapitre 16, après que nous aurons traité la dimension intégration au chapitre 15.

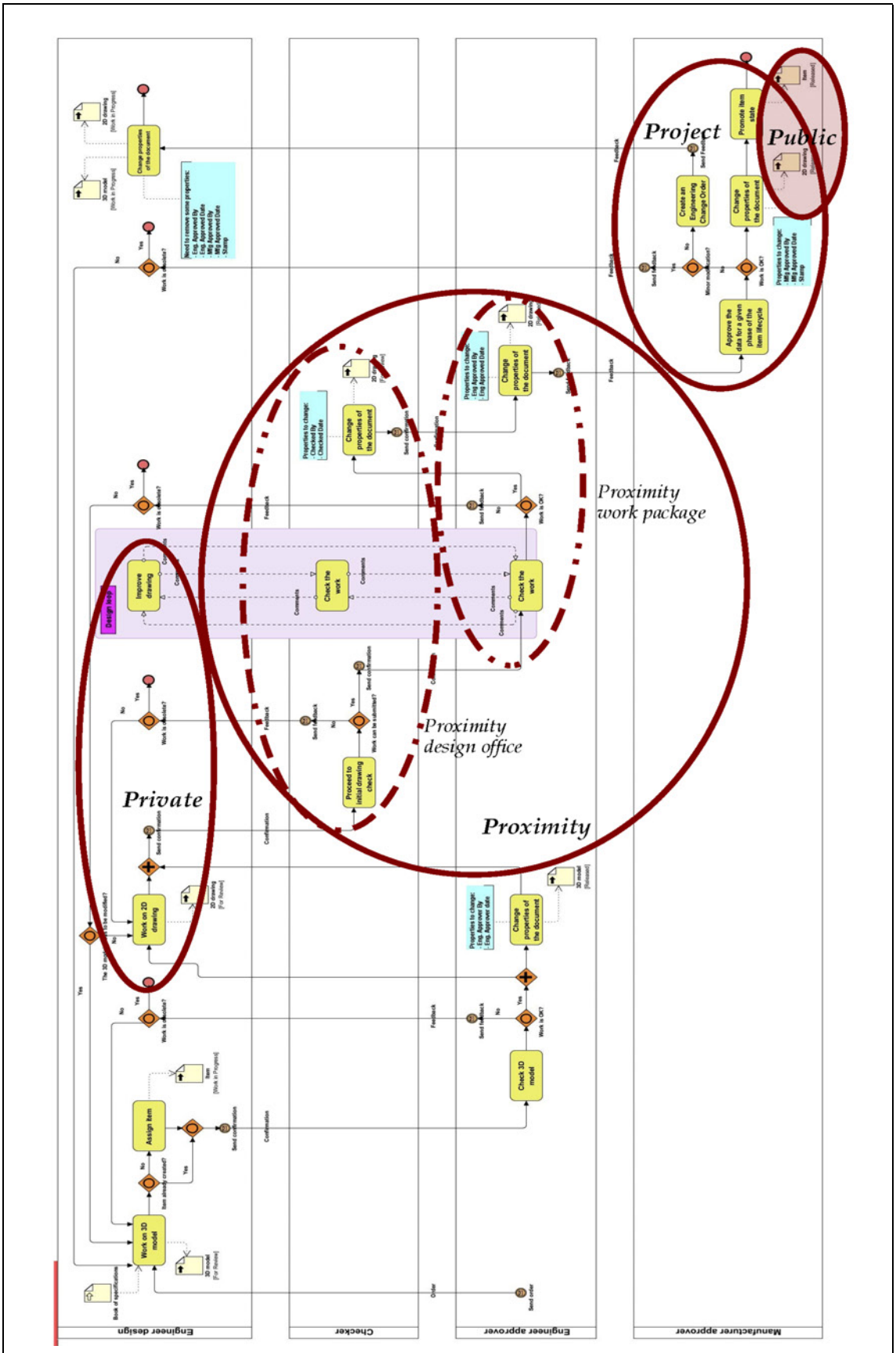


Figure 14.6 : Modèle simplifié BPMN du processus de validation des données de conception

En superposition : visualisation des espaces de conception et des frontières

représentation non normalisée [715]. Le problème consiste à modéliser un espace multi-agents avec des activités concomitantes et liées entre elles. Les pratiques courantes en BPMN [Silver 2009] autorisent deux approches possibles : les activités en boucle et les activités de type multi-instances.

La manière la plus simple de représenter la répétition d'une activité ou d'une partie d'un sous-processus est d'utiliser (Figure 14.7) une *boucle* avec condition de réalisation, équivalente à un *Do-while* ou une structure *Repeat* en programmation : tant que la condition de validation n'est pas satisfaite, l'activité se poursuit dans la boucle. Le nombre d'itérations n'est pas connu à l'avance. C'est un rectangle avec une flèche circulaire en bas au centre de l'activité ou du sous-processus qui symbolise cette boucle.

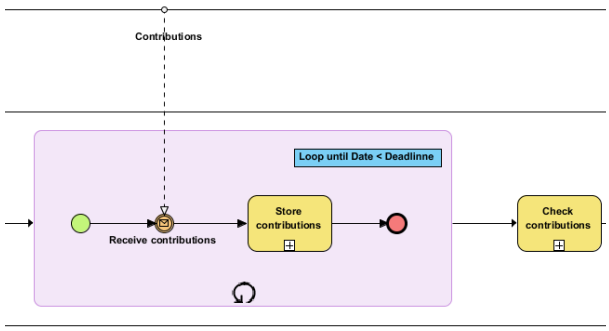


Figure 14.7 : Exemple de boucle

L'activité « Recevoir des contributions » se poursuivra tant que Date < Deadline

L'*activité multi-instance* (MI) est équivalente à une structure *For-Each* en programmation. Pour chaque entrée, l'action de l'activité doit être réalisée. Les itérations des activités MI peuvent être réalisées en parallèle, il n'y a pas de contrainte à terminer une itération pour en commencer une autre. Le nombre d'itérations est connu à l'avance (il dépend du nombres de lignes dans la liste). Le symbole utilisé (Figure 14.8) est l'association de trois barres parallèles.

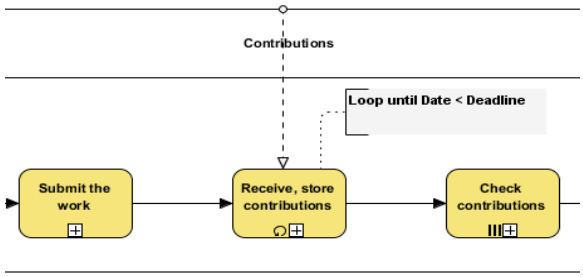


Figure 14.8 : Exemple d'activité multi-instance

Chaque itération de l'activité MI (*Check contributions*) peut être traité en parallèle. Chaque instance peut être vérifiée indépendamment et en parallèle, tant que la boucle en amont est active.

Ces deux propositions ne répondent pas à la demande qu'un acteur donné puisse prendre part à un processus dans lequel plusieurs acteurs sont impliqués de manière collaborative. Nous proposons trois solutions : utilisation des *gateways*, création d'un processus interne vertical, et fusion d'acteurs dans un même couloir de nage. Dans les exemples qui suivent, les couloirs de nage contiennent les activités des acteurs du processus de vérification et validation des données : *Designer*, *Checker*, *Eng. Approver*. Ils ont respectivement

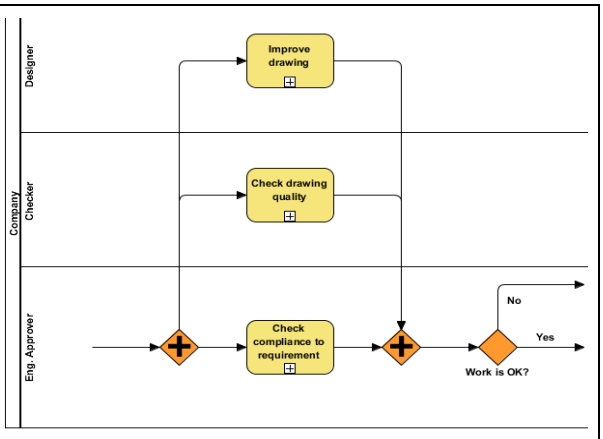


Figure 14.9 : *Gateways* : parallélisation

715. Cette petite recherche a été menée par Sylvain Bailly en 2010 à partir de la version 1.2 de la norme BPMN, donc avant la publication de la version 2.0 [OMG 2011]. Je le remercie pour sa précieuse contribution, ainsi que C. Braesch (Symme) pour nous avoir guidés dans nos premières modélisations BPMN.

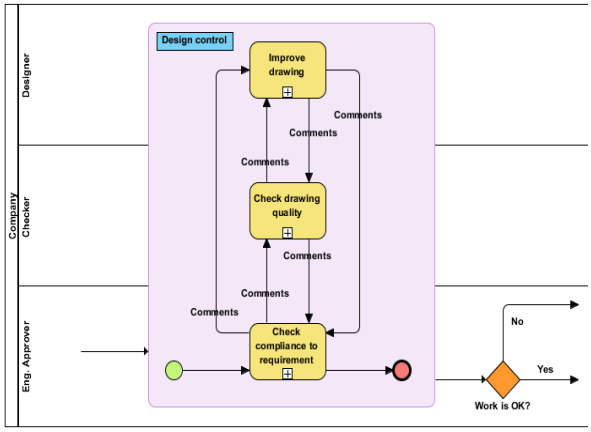


Figure 14.10 : Processus interne vertical

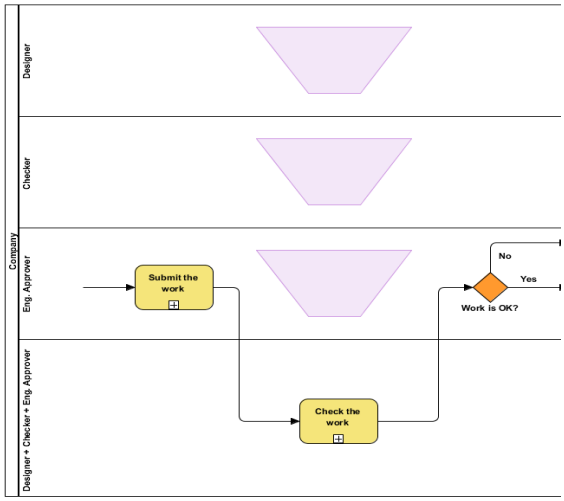


Figure 14.11 : Fusion de lignes de nage avec interdiction d'activités simultanées

pour tâche *Improve drawing* (améliorer le dessin) pour le projeteur, *Check drawing quality* (contrôler la qualité du dessin) pour le contrôleur, et *Check compliance with specification* (contrôler la conformité à la spécification) pour l'*Eng. Approver*.

Les *gateways* (Figure 14.9) permettent des bifurcations et des confluences conditionnelles de chemins. Le périmètre de chaque acteur est fixé, chaque entité conserve son identité. Mais la simultanéité et surtout les liens d'actions entre acteurs ne sont pas bien représentés : les flux restent indépendants.

Le *processus interne vertical* (Figure 14.10) formalise les boucles bidirectionnelles, traite la question de la communication entre acteurs et favorise le travail collaboratif. Il montre la synergie entre les membres du groupe. Mais les critères de fin de la tâche globale ne sont pas clairement représentés. À l'opposé, il est possible de procéder à la *fusion de couloirs* de nage dans un couloir additionnel (Figure 14.11) contenant tous les acteurs impliqués dans le processus, dont l'acteur est un acteur collectif représentant le groupe. Cette solution implique une coopération entre acteurs. Une forme géométrique (ici un trapèze) rappelle au modélisateur l'interdiction d'activités simultanées dans les couloirs individuels, tous les acteurs étant requis pour participer à la tâche collective. Mais seule la tâche globale (*Check the work*) est indiquée : l'individuation est perdue, et avec elle les informations sur les attributs intrinsèques (fonctions, compétences) et extrinsèques (tâches, flux).

La solution retenue permettant de décrire la tâche réalisée concomitamment par plusieurs acteurs (Figure 14.12) sera en fait une combinaison hybride d'éléments de la norme BPMN : une boucle représentant le résultat global d'activités multi-instances. Cette proposition est dans l'esprit de la philosophie BPMN, qui propose une approche étagée à différents degrés de granularité. Le nombre d'itérations dans la boucle n'est pas connu, car non quantifiable à l'avance par nature. Il dépend des activités multi-instances, liées au nombre d'interactions entre acteurs dans l'espace d'échanges ainsi constitué. Cet espace représentant une zone d'autonomie coordonnée, la dynamique interne à cet espace appartient en propre aux acteurs, qui sont libres d'échanger aussi longtemps qu'un résultat satisfaisant n'est pas élaboré. Il se peut qu'à un moment donné le groupe décide de cesser l'échange concomitant synchrone, et de laisser le projeteur repartir mettre au propre une nouvelle solution : celui-ci réintègre son couloir de nage, procède aux modifications suggérées, après incrémentation éventuelle de l'indice de révision, et ensuite convoque un nouvel espace d'échanges *ad hoc* de même nature.

Pour en terminer avec la modélisation, une activité multi-instance n'est en principe achevée que lorsque toutes les instances sont achevées, même si la norme

BPMN autorise d'autres conditions de fin. Notre proposition est toutefois acceptable dans la mesure où le résultat du travail collaboratif des différents acteurs implique la satisfaction d'un objectif commun, qui est utilisé comme critère de sortie de la boucle : la condition de fin de ces boucles *For-Each* d'activités individuelles est la boucle globale *Loop until making decision* elle-même.

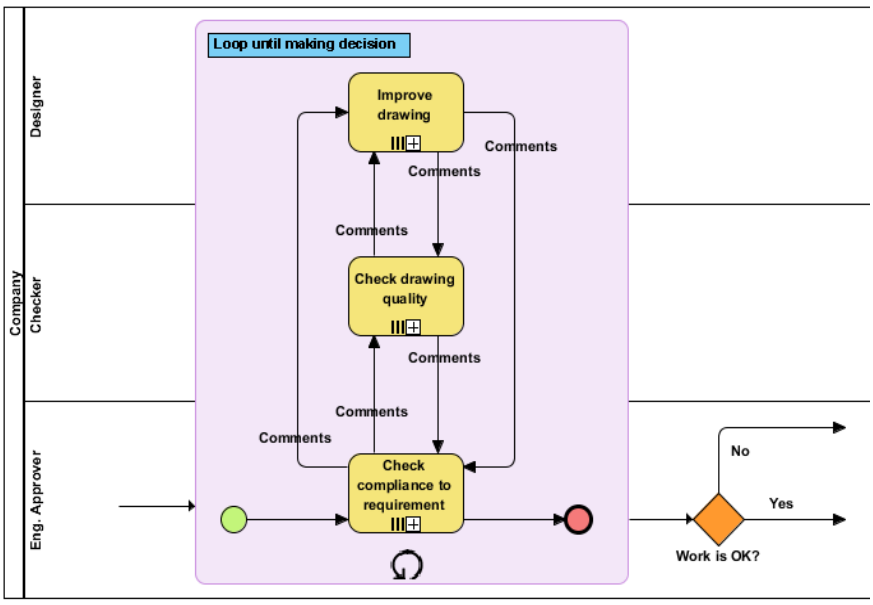


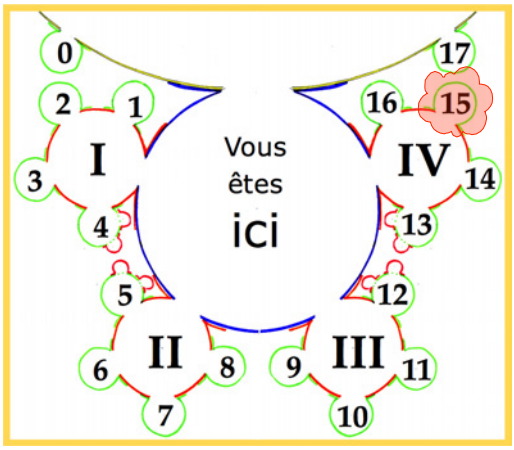
Figure 14.12 : Solution hybride avec boucle et activités multi-instances associées

C'est cette solution qui a été retenue et implantée dans la représentation du processus global de vérification et validation présenté à la Figure 14.6. Lors de l'étude qui a mené à cette solution, nous avions mis en place un dispositif d'évaluation de la qualité du processus basé sur la littérature [Wohed et al. 2006 ; Schuette et Rotthowe 1998 ; Indulska, Recker et al. 2009 ; Kalpic et Bernus 2002 ; Indulska, Green et al. 2009 ; Recker et al. 2010 ; Hommes et Van Reijswoud 2002 ; Bandara, Gable et Rosemann 2005]. Nous avions retenu de ces différentes études cinq critères : compréhensibilité, cohérence, conformité au réel, qualité du modèle, et satisfaction de l'utilisateur. Nous leur avions adjoint trois critères *ad hoc* : capacité à modéliser la répétition des activités de la boucle de conception jusqu'à son achèvement ; capacité à modéliser la concomitance de ces activités ; capacité à modéliser l'intrication des liens entre les acteurs. Ce dispositif a conclu à la validité, à la pertinence et à la supériorité de la solution *boucle globale d'activités multi-instances*.

∴

Nous espérons, par cette mise en acte pratique du processus élémentaire de conception, avoir illustré et éclairé le modèle théorique de l'espace d'échanges et de la dynamique de transformation d'un objet intermédiaire en un objet-frontière élaboré au chapitre 12. La modélisation BPMN (enrichie) visualise bien le rôle de ces espaces d'échanges et de la traversée des frontières qui accompagnent leurs mise en place. L'approche par la modélisation des processus, ainsi que les quelques considérations sur les statuts de l'article, ont inspiré les réflexions [716] du groupe de travail du CERN créé en 2010 après la révision de gouvernance du projet.

716. Voir le rapport EDMS 1078979: *Product Lifecycle Management at CERN*, v. 6, 01 février 2012.



Chapitre 15. Intégration de l'intégration

Où le squelette structure le processus *Ω (Conception, Intégration)*, et s'incarne en archétype d'objet-frontière

τοῖς ἐγρηγορόσιν ἕνα καὶ κοινὸν κόσμον εἶναι, τῶν δὲ κοιμωμένων ἕκαστον εἰς ἴδιον ἀποστρέφεσθαι.

« Il n'y a pour les éveillés qu'un seul et même monde, mais pour les endormis, chacun s'en détourne vers son propre monde. »

HÉRACLITE[717]

717. Fragment 89 selon l'édition de référence Diels-Kranz, *Die Fragmente der Vorsokratiker*, Berlin, 1934. Voir aussi Héraclite, *Fragments*, texte établi par M. Conche, Paris, PUF, 1986, p. 63-64.

Dans le bon déroulement d'un projet de conception collaborative, l'activité d'intégration est essentielle, au sens étymologique du terme : elle en constitue l'essence. L'intégration est la tâche dévolue à la gestion des interfaces, et, nous l'avons signalé plusieurs fois, « *concurrent design happens at the interfaces* » [Finger, Konda et Subrahmanian 1995]. C'est donc sur l'intégration que je souhaite revenir ici pour (presque) achever le périple de cette thèse.

Ce chapitre est de taille bien modeste au regard du sujet abordé, le processus d'intégration. Une étude approfondie nécessite d'autres développements que ceux que nous proposons ici. Nous nous fonderons sur l'expérience du projet *Med*Austron, notre fil conducteur du retour sur le terrain de la partie IV (lequel retour se nourrit évidemment des expériences antérieures acquises sur le projet ATLAS, et largement évoquées aux chapitres 5 et 6). Et nous placerons ces développements dans la perspective des enseignements du chapitre 12. C'est pourquoi nous l'avons intitulé *Intégration de l'intégration* : poursuivant nos réflexions sur le processus collaboratif Ω (*Conception, Intégration*), nous souhaitons *intégrer l'intégration dans le processus de conception* traité au chapitre 14, et instrumenter la dynamique des espaces d'échanges autour de ce processus.

Afin d'y parvenir, nous allons procéder en trois temps (sachant que, comme à l'habitude, se pose la problématique de la décomplexification due à la nécessité d'une restitution linéaire du discours). Dans un premier temps, nous approfondirons ce que nous avons appelé au § 12.3.2 p. 360 le processus élémentaire d'intégration, en évoquant deux approches de l'intégration : réactive et prescriptive ; nous en montrerons les limites, et la nécessité d'inscrire l'intégration dans une démarche *pro-active*, dynamique et systémique, qui n'est autre que le processus dialogique qu'elle forme avec la conception (§ 10.6 p. 301).

La clé du processus, que nous allons traiter dans un deuxième temps, tient à l'introduction d'un *squelette* dans la définition de l'enveloppe géométrique, défini comme une *épure d'interface*. Après avoir retracé l'évolution du concept, nous montrerons comment il sert de lien entre l'optique et la mécanique, c'est-à-dire entre les spécifications fonctionnelles sur les positions des éléments d'une part, et la localisation des parties matérielles de ces éléments par rapport à leurs surfaces fonctionnelles d'autre part. Nous montrerons comment l'article permet d'articuler cette approche dans le PDM, et enfin, ayant abordé la formalisation du processus de vérification et de validation de l'enveloppe, nous verrons émerger une difficulté inattendue, formulée en termes de propriété : à qui *appartient* le squelette ?

Cette question illustre parfaitement, et de manière archétypique selon nous, le concept d'objet-frontière. À qui appartient un objet-frontière ? D'ailleurs, à qui appartient une frontière ? C'est dans un troisième temps que nous reprendrons donc la question, sans l'approfondir outre mesure au stade actuel de nos considérations. Le squelette est un objet virtuel qui connecte un élément d'un système à un autre élément de ce système et, par associativité (terme particulièrement bien nommé en l'occurrence), le relie ainsi à l'ensemble de tous les autres éléments du système.

Le squelette est devenu un objet-frontière au gré du processus élémentaire d'intégration qui le valide, selon le mécanisme plusieurs fois évoqué de la traversée des espaces d'échanges. Nous proposerons alors une représentation graphique en mailles tripolaires des espaces d'échanges construits autour de l'enveloppe, et nous verrons que le squelette y prend la place de l'*élément de rivetage* entre acteurs introduit au chapitre 12. Un objet-frontière à tous points de vue. Quant à la dynamique de ces espaces d'échanges, elle est bien illustrée par le propos d'Héraclite cité en

épigraphe : les rivetés (les « *éveillés* ») construisent ensemble un espace d'échanges collectif de collaboration, tandis que ceux qui ne se prêtent pas au jeu de l'intégration (les « *endormis* ») évoluent « *chacun dans son propre monde* », au risque de la non-intégrabilité, donc de la marginalisation. Ou comment l'adoption d'un objet-frontière évite de se retrouver aux confins.

L'analyse nous mènera au constat que, sur le terrain aussi, l'appel vers un élargissement du processus Ω (*Conception, Intégration*) à un processus Ω (*Conception, Intégration, Réalisation*) se fait puissamment entendre. Comment alors envisager le passage d'un processus à deux mailles à un processus à trois mailles? C'est à cette question que le chapitre 16 apportera les premiers éléments de réponse.

15.1 Le processus d'intégration

Récapitulons les différentes définitions de l'activité d'intégration proposés jusqu'ici :

§ 3.4.2 p. 95. *Vérifier la mutuelle compatibilité des constituants d'un système, identifier les frontières et interfaces pertinentes entre ces constituants, et simuler le fonctionnement potentiel du système.*

§ 5.1 p. 124. *Prévoir la montabilité sur modèles virtuels des éléments d'un dispositif (expérience ou accélérateur) dans un contexte (caverne ou tunnel) donné.*

§ 10.6 p. 301. *Attribuer et gérer les espaces, et contrôler, dès le stade de la conception, les interférences et les conflits éventuels. […] Gérer les interfaces entre différents composants d'un assemblage.*

Le processus d'intégration peut s'effectuer de plusieurs manières, dont nous allons brièvement comparer les avantages, sans approfondir ces questions, l'objectif ici étant de souligner les attraits de l'approche proactive que nous prônons.

15.1.1 Approches du processus élémentaire d'intégration

Nous proposons de définir deux approches comme deux cas d'école limites : ce sont l'intégration *réactive*, et l'intégration *prescriptive*, toutes deux insatisfaisantes.

L'intégration réactive est l'approche qui consiste à vérifier *a posteriori* les problèmes d'attribution d'espace. Elle est couramment appelée *détection de collisions*. Je la qualifie de réactive, dans la mesure où la personne en charge réagit à des données qui lui sont soumises, ou bien se saisit de sa propre initiative de données existantes à fins de vérifications. Une telle approche constitue en général une étape du processus de conception, sous la forme d'un critère de validation. En cas d'échec, le processus boucle, tel un ordinateur exécutant un programme fidèle à un organigramme bien déterministe, renvoyant le projeteur à ses chères études. Il est d'ailleurs fréquent de confier à la CAO ce genre d'études, réalisées à grands coups d'opérations booléennes. Ce processus de type *bottom-up* est un peu trop rudimentaire, puisqu'il est binaire : pas de conflit, tout va bien ; un conflit, rien ne va plus. Alors que dans un cas comme dans l'autre, bien des nuances sont à apporter. En outre, la question des interfaces n'est en général pas considérée.

À l'inverse, l'intégration prescriptive consiste à définir *a priori* le contexte de réalisation d'une étude : elle fixe un volume et éventuellement des conditions d'interface à respecter par le projeteur, et elle vérifie en fin d'études le respect de ces conditions. La phase de détection de conflit est alors inutile tant que les conditions imposées sont respectées. C'est un processus *top-down* trop élémentaire, puisqu'il ne tient pas compte de l'évolution des exigences qui apparaissent en cours d'étude.

Une possibilité, celle que nous avions adoptée pour ATLAS, consiste à opter pour une approche mixte, une *intégration prescriptivo-réactive* : elle consiste à se placer aux deux extrémités du processus élémentaire de conception en imposant un

espace d'un côté, et en contrôlant son respect de l'autre. L'espace imposé, c'est l'enveloppe : tant que les composants et assemblages conçus respectent les frontières et les interfaces définies, l'équipe de conception est libre (du point de vue de l'intégration) de faire évoluer son projet sans se préoccuper davantage de son voisinage. Et dès que la frontière est franchie, ou que l'interface est modifiée, c'est dans un cadre formalisé que les évolutions de la configuration peuvent ensuite être négociées. « *L'enveloppe, espace offert à la conception, est un repère pour situer l'activité d'une équipe de conception par rapport à ses voisins* » [Nicquevert 2010, 140].

C'est une première approche opérationnelle du processus élémentaire d'intégration au sens où nous l'avons défini au § 12.3.2 p. 360 : un processus de définition et d'approbation des enveloppes attribuées de manière prescriptive à chaque sous-système. L'enveloppe est un objet intermédiaire, progressivement élaboré, puis validé, en traversant divers espaces d'échanges :

> *Le premier espace est l'espace privé, dédié au projeteur du bureau d'intégration, qui synthétise l'ensemble des contraintes connues à un moment donné en un brouillon, ou ébauche, discuté seulement avec l'ingénieur en charge de l'intégration. À l'issue de cette synthèse, l'enveloppe devient une pièce à conviction datée, et passe dans un espace de proximité : ce sont les autres projeteurs et ingénieurs concernés qui vont, à ce stade, améliorer et corriger dynamiquement et informellement l'enveloppe jusqu'à ce qu'elle acquière le statut de trace habilitée, et soit équipée d'un numéro de version. C'est dans l'espace de travail projet que se confrontent les avis autour des enveloppes. Les activités collaboratives sont formalisées et prédictibles, chaque système étant officiellement représenté jusqu'à ce que survienne un consensus sur les différents paramètres en discussion. Jusqu'à ce stade inclus, les allers-retours entre différents états sont possibles et fréquents. […] La dernière étape correspond à un état d'objet mature, qui peut alors être diffusé dans l'espace public, c'est-à-dire à l'ensemble des acteurs du projet ATLAS, qui sauront ainsi se positionner soit à l'intérieur de leur enveloppe, soit à bonne distance de la frontière ainsi définie. L'enveloppe a acquis le statut de livrable, et elle est formellement validée.* [718]

Ce modèle est assez théorique, et ne rend pas totalement compte de la réalité, nous l'avons abondamment rapporté dans la partie II. En particulier, il est impossible de valider une enveloppe sans valider dans le même temps ses interfaces avec les enveloppes voisines : la notion même de processus élémentaire n'est pas séparable du processus global : c'est donc une démarche récursive, faite parfois de validations partielles, de compromis provisoires, de remises en cause tardives. Et le processus converge bien difficilement (Figure 5.3 p. 126), car le temps d'élaboration, puis de maturation des enveloppes est plus long que la durée de stabilité des données d'entrée et des contraintes qui, dans une telle approche, s'imposent au système. Trop de prescriptions tue la prescription, et étouffe la fluidité des échanges.

L'idée que des procédures précises et minutieuses pourraient suffire à résoudre le problème de manière systématique constitue un mythe rationnel [Hatchuel 1998] qu'il convient de dépasser. L'intégration n'est pas une activité déterministe décomposable en entités élémentaires, c'est un processus global de management. Comment donc introduire dans le processus les éléments qui permettent de l'adapter au processus de conception tout en l'inscrivant dans les limites requises ?

15.1.2 Intégration proactive

Comment résoudre le dilemme ? En changeant de perspective : intégrer est une activité qui ne vient ni avant, ni après, mais *pendant* l'activité de conception. Il en va d'ailleurs de même avec les spécifications fonctionnelles, et il en va aussi de

718. Citation légèrement adaptée de ma synthèse sur la question [Nicquevert 2010].

même avec les conditions de fabrication – et tout cela nous mènera justement, j'anticipe, au processus global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* : le cahier des charges fonctionnel n'est pas une donnée d'entrée de l'étude de conception, il est co-construit (ingénierie de la spécification) ; les conditions de fabrication ne sont pas des données d'entrée de l'étude, elles sont co-construites (conception intégrée) ; et de même, les interfaces et contraintes géométriques d'intégration ne sont pas des données d'entrée de l'étude, elles sont co-construites.

C'est d'ailleurs cette conviction qui m'a amené à chercher une meilleure approche en matière de modélisation des processus métier. Rapportons-en brièvement les circonstances. En 2008, les bureaux d'études du CERN avaient effectué un travail important d'introspection, et développé une représentation des processus d'une étude, depuis son lancement jusqu'à sa conclusion par un « *dossier de plans* ». Cette modélisation se présentait sous la forme d'une dizaine d'algorithmes bien précis, reliés entre eux avec une approche par données d'entrée et de sortie. On donne ici en exemple le troisième de ces algorithmes, consacré à la phase 3 dite de pré-étude (Figure 15.1). On y voit des « *éléments d'entrée* » bien structurés (trapèzes bleus à droite : cahier des charges issu du demandeur, définition du contexte définie par le bureau d'intégration (BI) au cours de la phase 2. Quant aux « *acteurs externes* » au processus de pré-étude (le BI, le demandeur, les ateliers), ils n'y sont mentionnés que comme intervenants à quelques moments-clé.

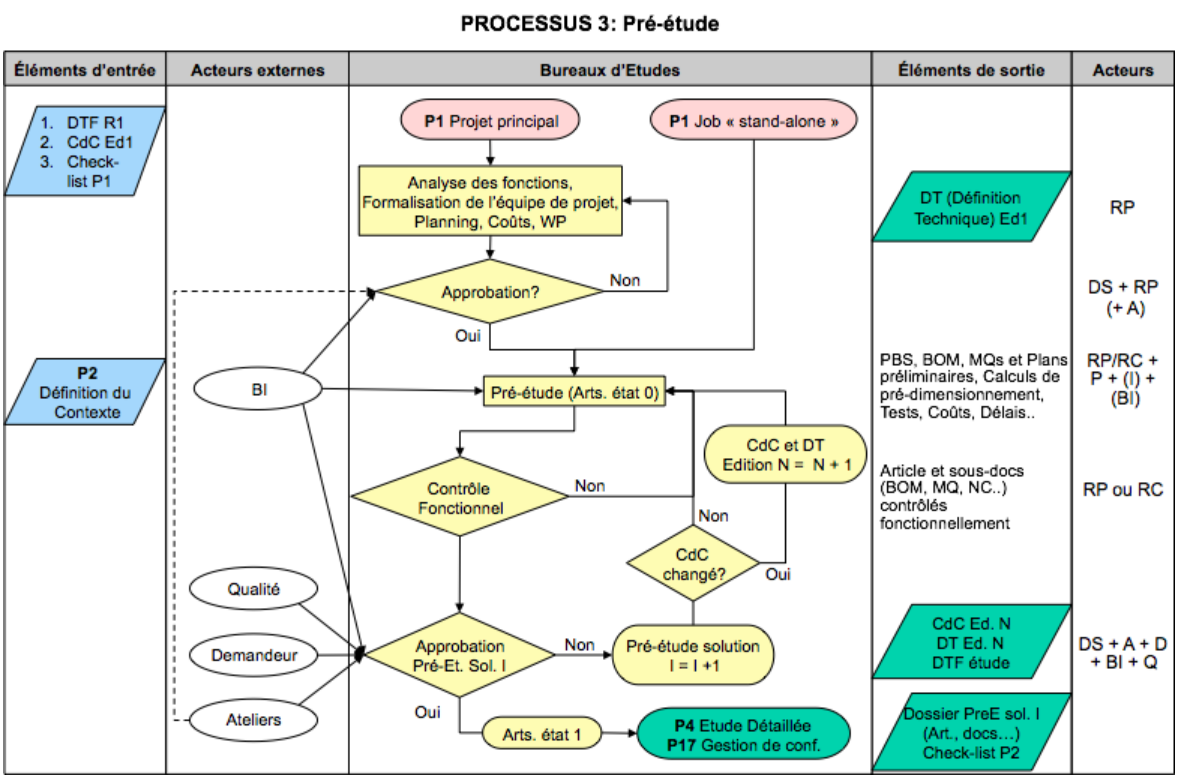


Figure 15.1: Modélisation partielle du processus BE : la phase de pré-étude

CERN, *Process BE*, février 2009

Le propos n'est pas ici de remettre en cause l'intérêt du modèle, qui représentait une avancée notoire en matière de modélisation des processus métier des bureaux d'études du CERN, ainsi qu'en témoigne notre étude de cas [Nicquevert, Boujut et Yami 2010]. C'est toutefois en partant du constat qu'il ne représentait ni la réalité du terrain ni l'approche que je souhaitais en matière de modélisation de processus que je me suis forgé la conviction qu'il fallait trouver un autre mode, un autre lan-

gage de représentation des processus métier, orienté sur les tâches et les acteurs. C'est ainsi que, en relation avec Christian Braesch [Pinel, Braesch, Tabourot et al. 2012], nous avons introduit le langage BPMN pour la modélisation des processus de *Med*Austron [719] présentés au chapitre 14 (Figure 14.6 p. 403) [720]. La conviction d'évoluer vers une modélisation de type BPMN venait principalement de deux limites de la modélisation algorithmique, l'une portant sur le rôle des acteurs, et l'autre sur la structure.

Concernant les acteurs, l'identification des tâches dévolues à chacun au vu du processus était délicate : le bureau d'intégration était sollicité pour donner son accord (ou son avis, ou bien était-il seulement informé ?) sur le résultat de la pré-étude. Sous quelle forme ? Celle d'un rapport, d'une approbation formelle de modèles, d'une note, ou bien d'un simple courriel, voire d'une discussion de couloir ? À partir de quelles informations, quels objets se faisait la validation ? Et selon quelle procédure, avec quel degré de formalisme ? Quel espace d'échanges était mis en place par le BE pour solliciter l'avis du BI et des autres acteurs externes ? Bien d'autres questions analogues se posent.

La seconde limitation concerne la structure même de l'algorithme, caractéristique de la représentation dominante des différents acteurs : ces processus, relativement prescriptifs, se devraient selon eux d'être rigoureux, déterministes et systématiques [Pahl et Beitz 2007]. Une telle approche, dont les apports sont par ailleurs indéniables mais sur un autre plan, doit cependant être incluses dans une perspective plus adaptée aux réalités du terrain (le chapitre 8, pour n'en citer qu'un, en est une illustration éloquente). C'est pourquoi il convient de passer à une stratégie d'intégration dynamique et systémique, que je qualifierai de *proactive* [721] : en mesure de prendre en compte les événements inattendus qui surviennent lors du processus, et de proposer des voies pour les traiter et pour évoluer souplement dans sa propre structure agile. D'où le couplage dialogique, dynamique et couplé, entre ce processus d'intégration et le processus de conception (couplage formulé au § 10.6 p. 301) :

> *Le processus Ω (Conception, Intégration) ne peut pas être considéré comme une simple juxtaposition de deux processus globaux, l'un qui serait de pure conception, et l'autre de pure intégration. Le processus à considérer est en fait un processus de processus : c'est un tissage complexe des deux réseaux d'objets intermédiaires.* (§ 12.3.2 p. 360)

Il s'agit de trouver comment gérer la dynamique couplée entre ces deux types de flux de données imbriqués : d'une part le flux dit *de contexte* issu des voisinages et des contraintes extérieures, et d'autre part le flux dit *de données* issu des processus élémentaires de conception. Pour cela, il faut que les deux réseaux d'objets intermédiaires associés à chacun de ces types de flux puissent s'articuler. Il faut donc un objet intermédiaire qui leur soit *commun*, afin d'assurer ce couplage dialogique.

Cet objet intermédiaire, ce sera le *squelette*.

---

719. L'approche BPMN a ensuite été reprise dans d'autres contextes du CERN [Bonnal et Braesch 2012 ; Pinel, Braesch, Pralus et al. 2012], et c'est une autre histoire. Concernant les processus métier des bureaux d'étude, le groupe de travail sur le PLM au CERN a entrepris un vaste travail en cours de modélisation par BPMN, inspiré des travaux sur *Med*Austron.

720. Nous exposerons au § 15.2.3 l'implantation du processus d'intégration pour *Med*Austron.

721. Nous appliquons ici le terme *proactif* (issu initialement de la psychologie) à la gestion, « *dans le sens d'une gestion prévoyant tous les événements pouvant se produire avec les modes d'action correspondants. Cette gestion est plus souple et moins systématique que la gestion prévisionnelle classique, fondée sur des modèles prédéterminés. Elle fait intervenir des facteurs d'indétermination comme la validité des hypothèses, les facteurs décisifs de succès et l'analyse du risque dans la planification.* » [Pepermans 1985]

Il faut selon nous ici, pour éviter tout déterminisme *a priori*, entendre l'expression « *prévoir tous les événements* » au sens de « *prévoir la possibilité d'occurrence de tous les événements* ».

15.2 Entre optique et mécanique : le lien manquant

Nous relatons ici la motivation pour introduire le concept de squelette dans l'intégration d'un accélérateur, à l'origine du concept, et son implantation concrète dans le PDM et la CAO.

15.2.1 *Layout* et *design*

Revenons au contexte de l'intégration de l'accélérateur *Med*Austron, présenté à la Figure 13.3 p. 379. Et intéressons-nous à l'un de ses éléments, le triangle supérieur jaune dénommé *Layout*. Il s'agit de la définition de l'optique du faisceau : positions et propriétés des éléments de l'accélérateur. Ces informations sont issues des simulations effectués par les physiciens sur des logiciels spécialisés (type MADX ou OPERA), et représentent le résultat d'optimisation des exigences fonctionnelles imposées au faisceau : courbure, focalisation, accélération, mesure…

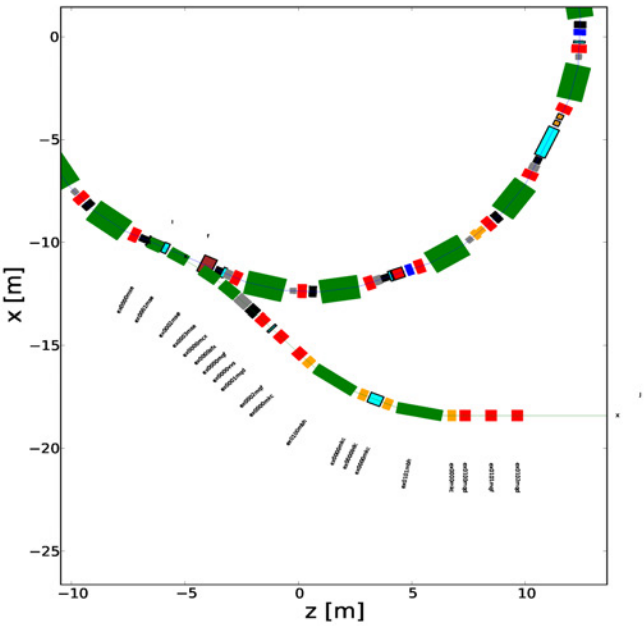


Figure 15.2 : Exemple de layout partiel

MedAustron, extraction du faisceau

Le résultat est schématiquement (Figure 15.2) une trajectoire théorique tridimensionnelle du faisceau, ponctuée d'une succession de positions du centre optique des éléments et de leur orientation dans l'espace. On voit apparaître un volume coloré autour de chacun de ces centres, qui est un gabarit parallélépipédique approximatif, basé sur les données d'encombrements entrées dans la base de données des paramètres de l'accélérateur.

L'activité d'intégration consiste en deux tâches : l'*intégration de la machine* (i.e. de l'accélérateur), qui revient à substituer à ces gabarits approximatifs des données géométriques suffisamment précises pour assurer la détection de conflits éventuels et les bonnes conditions d'interface ; et l'*intégration d'infrastructure*, qui vérifie que l'ensemble de l'accélérateur s'adapte bien au bâtiment, et vice-versa (tâche dont le résultat est visible à la Figure 13.1 p. 376, nous n'approfondirons pas davantage).

Le résultat d'une tâche d'intégration machine est typiquement celui montré à la Figure 15.3, qui représente la même région que dans l'exemple de *layout* précédent (la branche qui part à droite est celle qui part en bas à la Figure 15.2). On y voit le tube à vide (en jaune) contenant le faisceau circulant, et différents types de modèles représentant des éléments du détecteur : certains sont représentés par des modèles CAO détaillés ou simplifiés ; certains autres le sont par leur enveloppe, comme la boîte de diagnostic présente en bas à gauche (en magenta).

En médaillon, on voit un exemple d'identification de conflit entre d'une part un aimant dipolaire, représenté par un modèle CAO détaillé (issu, en l'occurrence, du bureau d'études du fabricant de l'aimant, donc réalisé avec un logiciel de CAO dif-

férent de celui utilisé pour l'intégration), et d'autre part une enveloppe (en gris) d'un dispositif d'instrumentation de faisceau. Le travail consiste alors soit à réduire les enveloppes (action sur le design), soit à déplacer l'un ou l'autre des éléments (action sur le *layout*). C'est la tâche de l'intégrateur, au degré 1 d'action.

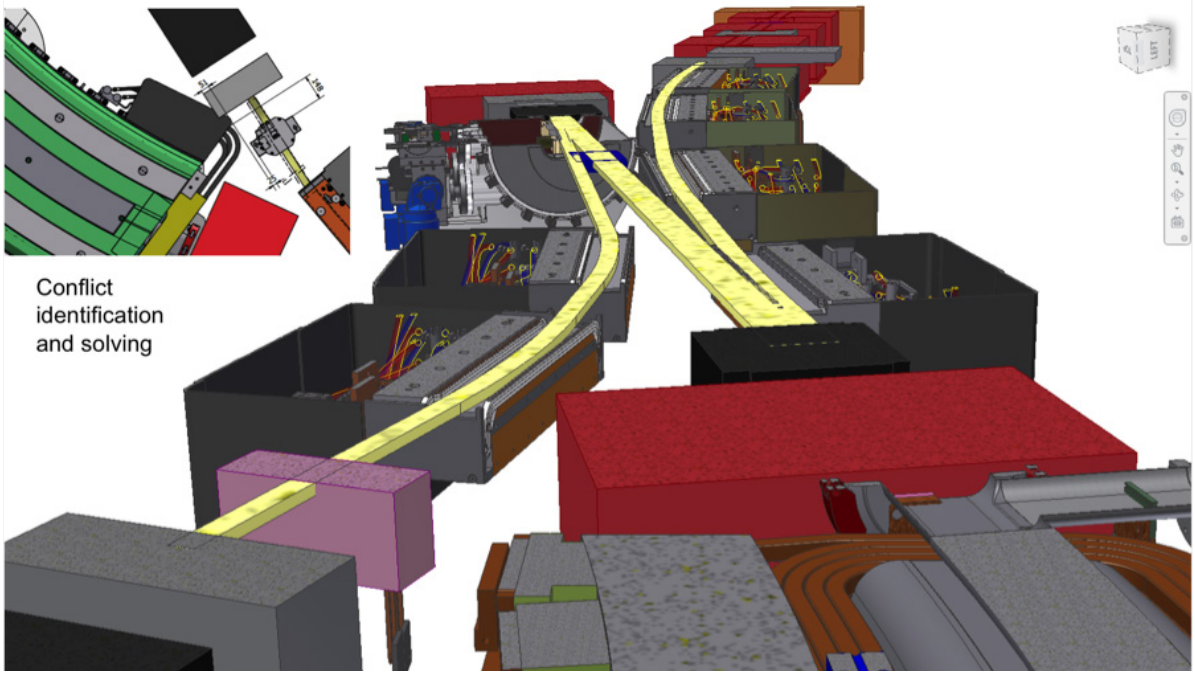


Figure 15.3: Intégration de la région de l'injection / extraction

Coupe dans le plan du faisceau, Thomas, juin 2011 (in Nicquevert et al. 2011, Fig. 3)

Nous nous intéressons ici aux degrés 2 (conception d'outils) et 3 (conception d'organisation) du manageur technique, nous ne détaillerons donc pas le travail d'intégration au quotidien. Il nous faut cependant comprendre comment l'on passe de l'épure optique de la Figure 15.2 à un ensemble intégré tel que montré à la Figure 15.3 : comment a-t-on relié optique et mécanique, comment a-t-on attaché les modèles géométriques 3D à la trajectoire théorique du faisceau ? Ou, selon l'analogie couramment utilisée, comment a-t-on pendu le linge à la corde au bon endroit ? C'est là qu'en guise de pince à linge intervient le squelette.

Le squelette est un objet intermédiaire qui se positionne entre le composant et l'épure optique. Il doit donc s'interfacer de part et d'autre. Or, l'optique est définie à partir d'un centre et d'un système d'axes : ce sera le point de départ du squelette. Autour de ce point de départ, on va attacher dans le repère local les positions des interfaces théoriques de l'élément considéré : points d'entrée et de sortie de la zone active du faisceau, position des interfaces (flasques, supports), et marques dites de fiducialisation (qui permettent de positionner les surfaces fonctionnelles). C'est également autour de ce squelette, et dans le respect des interfaces ainsi définies, que l'on va construire le volume englobant. L'enveloppe devient ainsi l'association d'un squelette vu comme une épure d'interface, et d'un volume englobant [Heimann 2011].

Le squelette étant présent à la fois dans l'épure optique et dans chacune des enveloppes, le travail consiste tout simplement à superposer le squelette de l'un (définissant le repère local de la pièce) au squelette de l'autre (dans un repère global) : on connaîtra ainsi la position absolue de toutes les entités fonctionnelles définies dans le squelette relatif de la pièce.

Tout est dans le « tout simplement », et la réalité est évidemment toute autre. Si le concept de squelette est, comme nous le disions au § 11.3, « *un objet intermédiaire*

dont la tâche est de matérialiser les liens d'interface pour la gestion desquels ni les outils de CAO ni les logiciels de PDM ne sont conçus », encore faut-il trouver le moyen de faire en sorte que lesdits outils en acceptent l'usage. C'est ce que nous aborderons au § 15.2.3 après avoir rapidement brossé le portrait du concept de squelette.

15.2.2 Le squelette : anatomie d'un concept

Le concept de squelette n'est pas nouveau, et nous en avons trouvé trace dans la littérature dès 1993 [Wu et Wu 1993], et en France en 1995 [Tollenaere, Belloy et Tichkiewitch 1995]. Il est au cœur du procédé de modélisation tridimensionnelle d'ensembles mécaniques breveté par Renault, sous le terme d'épure général[e] [Baudlot, Buysse et Lopes 2005] qui constitue une aide précieuse à la conception modulaire de systèmes complexes [Baudlot et al. 2007]. C'est donc une méthodologie répandue dans les problématiques de DFA (*Design For Assembly*) et la gestion des relations entre produits [Gomes et al. 2008 ; Demoly et al. 2011 ; Demoly, Matsokis et Kiritsis 2012]. Des travaux en cours au CERN poursuivent le déploiement de la méthodologie d'utilisation du squelette pour ce que l'on pourrait appeler le DFI (*Design For Integration*).

Le squelette a été introduit au CERN en 2008, lors des activités sur le projet pilote d'intégration du SPS. En étroite collaboration avec le Bureau d'intégration qui avait des idées très similaires, j'avais alors proposé l'adoption du concept, introduit la première fois sur un aimant dipolaire du SPS. Ce squelette avait pris concrètement la forme montrée à la Figure 15.4.

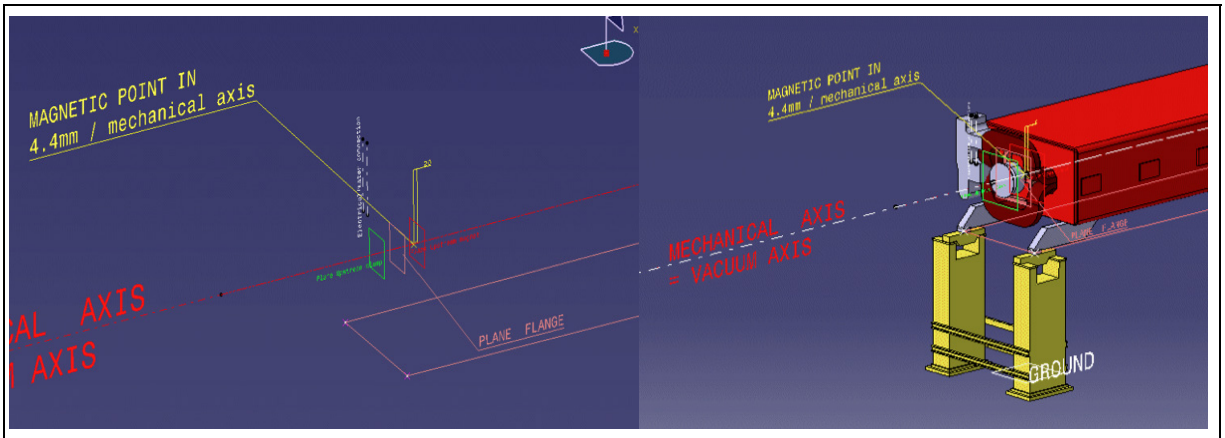


Figure 15.4 : Premier squelette, un aimant dipolaire du SPS, avec ou sans le 3D Mark, modèle Catia, juillet 2008

L'aimant (vue droite) est l'assemblage d'une culasse (rouge), d'un bobinage (rouge foncé, on en aperçoit l'extrémité), d'une chambre à vide (grise) et de différents supports (jaunes) et réglages (gris). En superposition, et agrandis dans la vue gauche, on trouve les éléments du squelette, ou épure d'interface : des points, des droites et des plans caractérisant le modèle. On voit ainsi le plan de la bride (rose saumon), l'axe mécanique (rouge), et un point particulier, le point d'entrée magnétique (*Magnetic Point In*), dont il est mentionné ici qu'il est décalé par rapport à l'axe mécanique. Le squelette contient donc tous les éléments (y compris la position du sol) pour satisfaire deux besoins : celui du concepteur, qui connaît la position dans le repère de pièce des éléments fonctionnels principaux en termes d'interface ; et celui de l'intégrateur, qui une fois connue la position du centre de l'élément dans le repère global, connaîtra la position de ces éléments fonctionnels dans ce repère. Il suffit d'y ajouter un volume englobant pour obtenir l'enveloppe complète.

Le squelette est-il une version dégradée d'un modèle potentiellement plus complexe, mais non opérationnel en tant que tel ? Ou bien est-ce l'aboutissement d'une réflexion adéquate, menant à un objet bien dimensionné à la problématique d'usage ? En d'autres termes, est-il simplifié par souci de robustesse, ou bien par complétude intrinsèque ? Selon ma conception, le squelette n'est pas une dégradation de modèle, il possède son existence propre, son rôle spécifique, et il répond à un besoin non couvert par un quelconque autre modèle : celui d'objet pivot du processus Ω *(Conception, Intégration).*

15.2.3 Implantation effective

Entrer dans les détails de cette implantation requiert une étude détaillée qui sort de l'épure (!) de la thèse. Nous ne mentionnons ici que quelques obstacles à l'implantation effective du concept de squelette comme objet pivot du processus. Ledit processus est ensuite globalement décrit, puis montré dans sa forme BPMN, sans autre forme de commentaires. Nous terminons par quelques pistes de réflexions sur les évolutions organisationnelles qu'implique l'approche dialogique proposée.

a. Squelette, enveloppe et article

Les trois concepts de squelette, d'enveloppe et d'article sont liés de différentes manières, nous en ébauchons ici une description.

L'enveloppe, volume englobant, est désormais attachée au squelette par les conditions d'interface que celui-ci définit Figure 15.5. Or, il est intéressant de noter que, lors du déploiement dans *Med*Austron, nous avons retrouvé une controverse très éclairante, qui fait écho à celle sur les « *frontières et voisins* » exposés au § 6.6 p. 172.

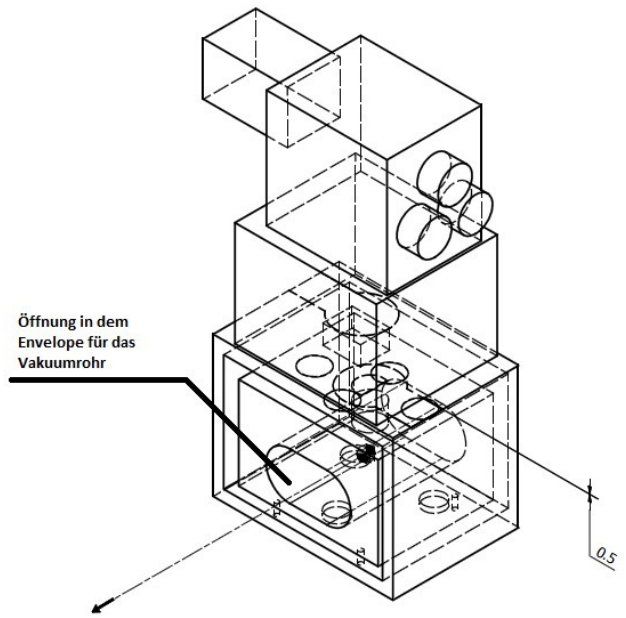


Figure 15.5: Enveloppe d'un équipement

(Heimann 2011, 46)
Öffnung in dem Envelope für das Vakuumrohr : ouverture dans l'enveloppe pour le tube à vide

Pour certains, le volume englobant est issu du modèle 3D de la CAO (approche *bottom-up*), dont il constitue une approximation par excès : c'est le papier cellophane de l'emballage ; c'est le textile de Christo jeté sur le Pont Neuf (à Paris en 1985) ; c'est, selon le terme anglais bien adapté, le modèle *shrunk-wrapped* : contracté-emballé. Pour une partie des partisans de cette approche, l'enveloppe contient toutes les formes de détails, mais en simplifiant la géométrie ; pour l'autre, elle élimine ces détails sans les inclure quand ils représentent des formes très locales. Pour tous ceux-là, adeptes en général de l'approche réactive du processus d'intégration, il s'agit somme toute de fournir un modèle simplifié pour la détection de conflits, et de permettre une représentation globale simplifiée de l'assemblage de l'accélérateur.

Pour d'autres, l'enveloppe est en fait une jauge, ou un gabarit, imposé sur le mode *top-down* par le projet, et qui définit un espace dévolu à un sous-système donné. Ceux-là seraient alors les partisans de l'approche prescriptive d'intégration.

Une approche pro-active articule en fait ces deux approches. L'enveloppe y est vue comme un fantôme (au sens de nos anciennes bibliothèques : ce petit carton qui gardait la place de l'ouvrage emprunté), un *placeholder*, ou encore *Platzhalter* en allemand. On lui substitue alors, au gré des besoins de l'intégration, soit le gabarit, soit le modèle simplifié. Et parfois, on les superpose pour vérifier que le second est bien contenu dans le premier, ainsi que procède l'équipe du DESY pour le projet ILC [List et al. 2011]. Et quel est le support de ce jeu agile de substitutions ? Le squelette [722]. L'on y attache aussi bien une représentation 3D complète et détaillée, simplifiée, ou volume englobant.

Le squelette joue ce rôle de support grâce à l'appui du concept d'article (Figure 15.6). En effet, que doit faire le projeteur en charge de l'intégration lorsque, ayant achevé un squelette, il doit le ranger comme modèle CAO dans le PDM ? Le squelette considéré est celui d'un composant ou d'un assemblage donné. Comment créer et diffuser ce lien ? En l'attachant à l'article correspondant. L'article, concept fédérateur du cycle de vie lors du processus élémentaire de conception, devient également dans le PDM le porteur du couplage avec l'intégration. Or, cet avantage indéniable va se révéler un véritable casse-tête en pratique, et il concerne les droits de propriétés. En somme, *à qui appartient le squelette* ?

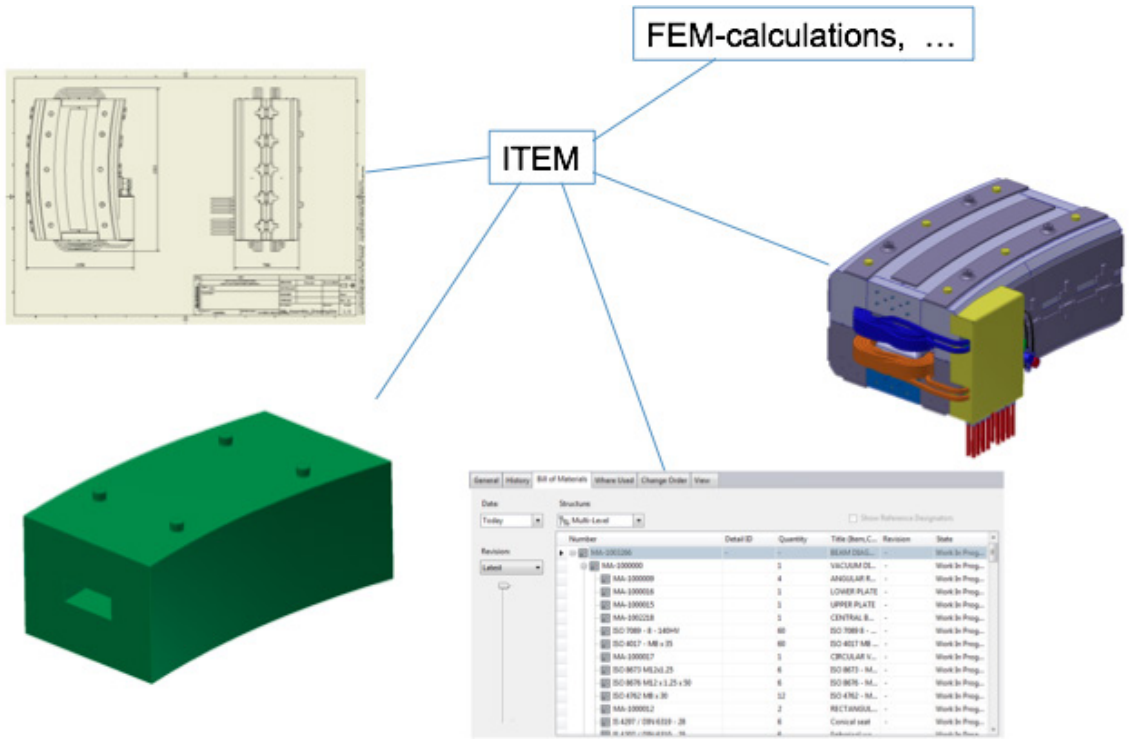


Figure 15.6: L'article fédérateur d'objets intermédiaires

Le cas d'un aimant dipolaire de *Med*Austron
En tournant dans le sens direct depuis le haut à droite: le modèle 3D détaillé, la BOM (nomenclature, l'enveloppe, le plan 2D, et d'autres fichiers (calculs)
Thomas, PP-101206-a-THA, décembre 2010

Cette question apparemment anodine va en fait mettre le feu aux poudres organisationnelles, de manière parfaitement inattendue. À chaque objet entré dans sa base de données, le PDM exige qu'on attribue un *owner*, un propriétaire. Il est donc légitime de penser au départ que le squelette, créé par le bureau d'intégration, appartienne à ce bureau ; et donc, que les droits concernant la vérification et la

722. Que l'on me pardonne cette image involontaire d'un squelette qui serve de support au fantôme…

validation de cet objet-là découlent de cette appartenance-ci. La difficulté est légèrement accrue par le fait que le squelette n'est pas toujours distingué du volume englobant, avec lequel il forme l'enveloppe.

Le souci est apparu quand il s'est révélé que, si l'on utilisait le squelette dans un assemblage différent, par exemple dans le modèle 3D de conception, mais dépendant du même article, alors il n'était pas possible d'attribuer au modèle un propriétaire différent. Le propriétaire de l'article devient *de facto* le propriétaire de tous les objets qui lui sont assignés ! (Le squelette apparaissait en effet dans la nomenclature du modèle 3D, il fallait le faire disparaître en le déclarant comme… fantôme – *phantom*, dans le PDM.) Cette problématique délicate de gestion des données, soluble en soi quoique avec difficultés, a mis en relief une intrication des rôles très intéressante (et qui va dans le sens de mon propos vers une trialectique). Car en définitive, si le squelette appartient à l'intégration, et le modèle 3D à la conception, l'article n'appartient ni à l'une ni à l'autre, mais bien au *projet*. La nécessité d'un processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* ressort aussi clairement de la problématique de gestion des données. Quant au rôle du PDM, il doit être le facilitateur de cette démarche d'ingénierie de la concourance complexe [Helms 2002]. Après tout, une base de données aussi peut constituer un objet frontière [Meyer 2009].

b. Le processus

Après avoir détaillé le squelette et ses liens avec l'enveloppe et l'article, voyons comment l'approche proactive de l'intégration a été déployée dans *Med*Austron [Nicquevert, Hauviller et Benedikt 2011].

Comme dans le cas du processus élémentaire de conception, nous avons cherché à identifier les espaces d'échanges pertinents et à les mettre en évidence dans le processus de vérification et de validation des enveloppes (incluant les squelettes) : une enveloppe est en effet un objet dynamique, évolutif, qui ne s'élabore que collectivement, par un processus progressif d'itérations successives, ainsi que nous l'annoncions dès le § 9.2.2 p. 270. La modélisation BPMN du processus est donnée à la Figure 15.7 p. 420. Les espaces d'échanges (plus nombreux que pour le processus élémentaire de conception) sont modélisés comme expliqué au § 14.4.2 p. 402, et figurés en cyan. Résumons-en le déroulement global.

La première grande phase du processus concerne l'établissement de la configuration de référence (*baseline*) : une liste des articles est établie par le management de projet sur la base des spécifications fonctionnelles (nombre et type d'éléments constituant l'accélérateur). Sur cette base est construite l'ossature (l'arborescence) du PDM. Une première enveloppe est alors créée pour chaque élément (processus élémentaire d'intégration), comprenant un squelette synthétisant les informations connues à ce stade (expérience des concepteurs, projets similaires antérieurs) : taille et dimension, paramètres optiques comme positions fonctionnelles du centre et des axes, interfaces connues ou prévues. On y inclut également (en prévision de la phase d'installation, qui comprend une importante étape de pré-alignement des éléments) des marques fiducielles pour la topographie.

On obtient ainsi une première série complète d'enveloppes compatibles entre elles, qui font l'objet, pour clore la première phase du processus global d'intégration, d'une vérification et validation collective *simultanée* : on obtient ainsi la configuration de référence (*baseline*) du projet. Jusque là, le processus d'intégration est partiellement autonome (à l'exception de l'estimation initiale des paramètres). L'avantage de cette approche est qu'elle améliore la probabilité d'une convergence initiale raisonnablement rapide du processus.

La deuxième phase du processus est celle des révisions. Au cours de la conception de chaque élément, le processus élémentaire de conception peut éventuelle-

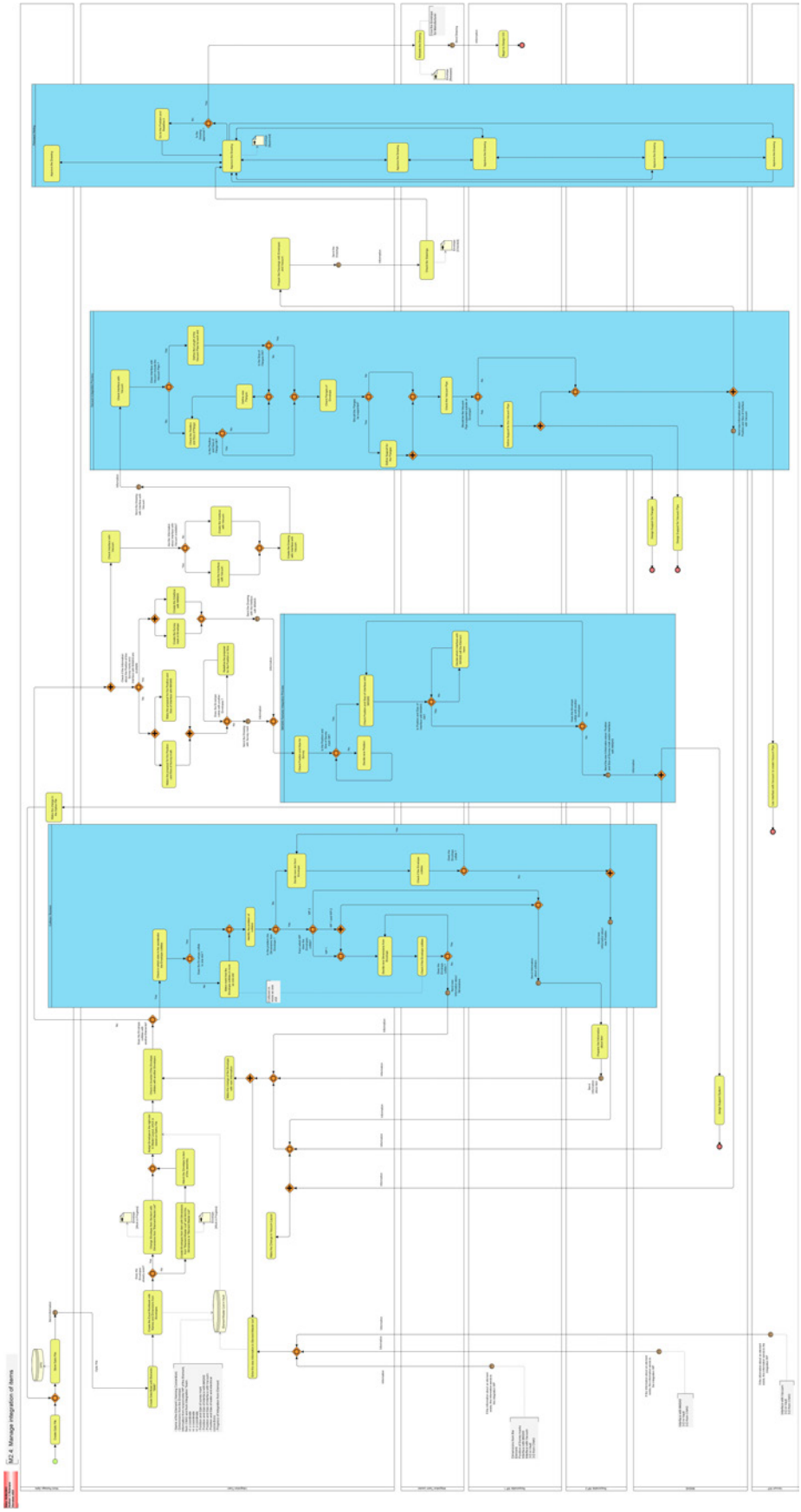


Figure 15.7 : Le processus BPMN complet de conception et intégration Jakob, sur une base de Sylvain, revu par Bertrand, octobre 2011

ment conduire à demander des modifications ayant un impact sur les éléments de l'enveloppe : soit le volume englobant, soit le squelette, voire les deux. Ces modifications, traitées dans des espaces d'échanges adaptés prévus par les procédures d'ECR, peuvent conduire à une modification de l'enveloppe, voire à travers le squelette, à une évolution de l'épure optique. Ce sont des modifications de type *middle-out*, latérale centrifuge, pour reprendre la terminologie introduite au chapitre 11 : l'influence qu'exerce un élément sur ses homologues sur l'axe transactionnel partage/synchronisation (Figure 11.16 p. 328). Et en symétrique, dans la direction *middle-in* latérale centripète, le squelette d'un élément peut être modifié en raison d'un changement de l'interface de l'un de ses voisins. L'avantage de la configuration de référence basée sur un réseau de squelettes est que l'étude d'impact de la propagation des changements est grandement facilitée [723].

Ce qui constitue, dans les approches existantes, des données d'entrée contextuelles (que d'aucuns voulaient considérer comme immuables, et dont pourtant les demandes de modifications entraînaient des remises en cause périodiques et insécurisantes) est désormais transformé en éléments intrinsèques d'un processus global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* pour lequel ce couplage est naturel et même consubstantiel. Ceci s'applique aussi bien aux exigences du cahier des charges (comme les paramètres optiques du *layout*) qu'aux contraintes d'infrastructure ou d'interfaces, et c'est un élargissement fondamental qui est procuré.

c. Rééquilibrages organisationnels

Une telle évolution en termes de processus implique évidemment une évolution organisationnelle dont nous esquissons maintenant les premiers contours. Élaborer des préconisations plus détaillées nécessite des développements qui sortent largement du cadre de la thèse. Formuler toutefois quelques remarques, inspirées à la fois par le cas de *Med*Austron et par celui des bureaux d'études au CERN, nous paraît utile.

Lors du projet pilote de mise en place des squelettes en 2008, dans le contexte de la numérisation du SPS, il s'agissait de crédibiliser la démarche et de démontrer au management du projet et des départements concernés que la reconstruction de la machine par maquettage numérique apportait une plus-value dans un contexte où le client (le physicien en charge des arrêts machine, ces périodes hivernales de maintenance où les configurations sont modifiées) se satisfaisait jusque-là de dessins papier 2D…

La nécessité de devoir justifier cette démarche pose la question du rôle du bureau d'intégration : je la conçois comme l'architecte numérique, garant de la cohérence globale du projet, ainsi que cela se pratique dans l'aéronautique ou l'automobile. Or, cette conception n'est pas vraiment conforme à la réalité du terrain au CERN. Ainsi, certains projets récents (qui ne seront pas cités ici) ne se sont préoccupés de leur propre intégration qu'à un stade avancé du projet, parfois seulement au moment de lancer la production des éléments : préoccupé du processus global de conception, le management du projet avait visiblement négligé de tenir compte des relations d'interface et de la nécessité de croiser ce processus – sans aller jusqu'à le faire dialogiquement… – avec quelques études de montabilité. À cet égard, je voudrais considérer l'enveloppe comme un *outil de gestion de projet* permettant une certaine « *formalisation de l'activité organisée* » [Moisdon 1997, 7] autour de l'allocation d'espaces.

> *Les procédures d'approbation associées permettent un accord, puis un gel des frontières, dont la modification ultérieure éventuelle fait l'objet de procédures plus for-*

723. Il existe une abondante littérature sur la question, que je ne convoque pas ici, dans la mesure où mon approche est assez différente. C'est une perspective du modèle transactionnel qui sera à explorer.

> *melles. C'est un outil au service du manageur intégrateur, et un tableau de bord à disposition du coordinateur technique sur la stabilisation, donc la maturation du projet.* [Nicquevert 2010, 146]

La question se pose donc d'une répartition différente des rôles, voire d'un rééquilibrage des pouvoirs, n'ayons pas peur des mots, dans une situation où historiquement les leviers sont du côté des lots de travaux, où le management de projet est supporté au mieux comme un gentil coordinateur, au pire comme une instance qui impose des règles désagréables ; où le bureau d'études est considéré non pas comme un partenaire, mais comme un exécutant, un modélisateur géométrique de solutions élaborées par des experts ; et où le bureau d'intégration est perçu comme une sorte d'excroissance du bureau d'études, une interface avec le projet comme une porte dans le mur de verre qui séparent ces deux entités.

Ces questions méritent et exigent d'être étayées par des observations plus rigoureuses, qui sortent du cadre de l'épure. Ma nouvelle position au sein du *Projects Support Office* leur donnent un relief rehaussé. Elles constituent également une perspective intéressante qui va inspirer la modélisation à mailles tripolaires que je propose dans la dernière partie de ce chapitre consacré à l'intégration.

15.3 De l'objet-frontière au processus sans frontières

Au sein du projet *Med*Austron, le squelette a été introduit comme un élément assurant l'interface entre l'épure optique (le *layout*) et l'élément destiné à réaliser la fonction optique correspondante. De manière plus générale, on peut considérer le squelette comme l'objet intermédiaire qui fait l'interface entre l'architecture globale d'un projet et l'arborescence des produits qui le composent. Ainsi que nous avons parlé d'infrastructure d'objets intermédiaires, nous pouvons ici introduire l'expression *infrastructure de squelettes* pour désigner le réseau d'interfaces constitués par l'ensemble des squelettes pour chacune des instances des articles du projet.

Une fois validé, c'est-à-dire une fois qu'il a suivi les processus de traversées des espaces d'échanges successifs décrits au chapitre 12 et illustrés dans le cas de *Med*Austron, le squelette devient un objet-frontière. Il le devient doublement, si j'ose dire : conceptuellement, et techniquement. C'est en ce sens que je voudrais le considérer comme archétypique. Explicitons brièvement.

15.3.1 Le squelette, archétype de l'objet-frontière

Le premier sens conceptuel d'objet-frontière est celui qui est largement évoqué au chapitre 12, introduit par Star et Griesemer et amplement travaillé par la littérature. Un objet-frontière est un objet situé entre deux mondes sociaux qui constitue « *un arrangement qui permet à différents groupes de travailler ensemble sans consensus préalable* » [Star 2010a, 19]. Ici, le squelette est à la frontière entre les différentes équipes des différents lots de travaux et avec l'optique faisceau, architecte global de la fonctionnalité du projet. Chacun peut travailler paisiblement de son côté de la frontière, qui à l'intérieur de l'enveloppe, qui le long de son épure optique. Le squelette est à l'interface.

Le deuxième sens est technique, au sens fort du terme : le squelette définit les interfaces mécaniques entre objets, et parfois avec une certaine précision. Nous avons évoqué au chapitre 9 (note 503 p. 271) la question du typage technologique de l'interface. C'est ainsi le cas de l'enveloppe de l'aimant dipolaire de *Med*Austron qui, la première, a reçu une telle caractérisation spécifique (Figure 15.8). Une caractérisation au demeurant techniquement très simple : trois ensembles de quatre trous filetés, désignés explicitement par l'annotation M12x1.75-6H, positionnés par rapport au centre magnétique de l'élément (symbolisé par un petit disque avec

deux quarts noircis), dont l'écartement est fixé (les cotes d'une enveloppe étant par définition des dimensions théoriques exactes), et dont la fonction est indiquée : *Interface with MASAS*, interface avec les supports et systèmes d'alignement.

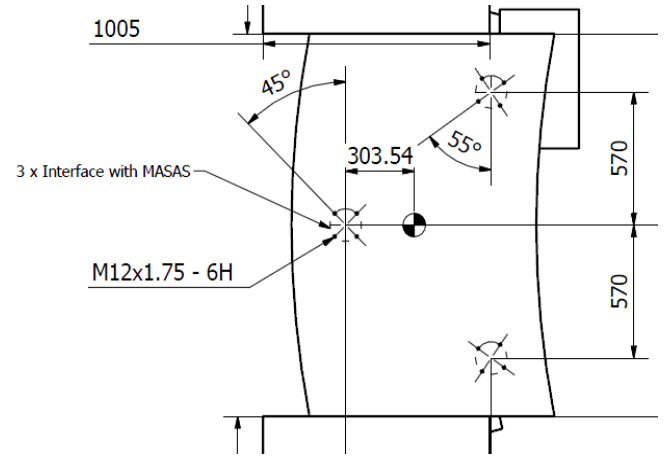


Figure 15.8: Interface technologiquement typée
Enveloppe d'un aimant dipolaire (Heimann 2011, 55)

Les trois ensembles de quatre trous constituent la frontière. L'équipe de conception et de réalisation des aimants n'a pas besoin de savoir quoi que ce soit de plus sur le système de support et d'alignement ; et le MASAS n'a plus à se préoccuper de la solution technologique qui sera adoptée pour réaliser ces filetages dans les laminages de la culasse magnétique. Le squelette est un objet-frontière, contenu de part et d'autre, et n'appartenant ni à l'un ni à l'autre. Le squelette est à l'interface.

15.3.2 Modélisation interfaciale du processus *Ω (Conception, Intégration)*

L'interface, précisément, est au centre de notre modèle à mailles tripolaires introduit au chapitre 11. Dans le cadre de la modélisation du processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration)*, nous attribuons au squelette un rôle tout particulier : celui du dispositif de *rivetage* évoqué au § 12.2.1 p. 348 (voir en particulier la Figure 12.2, l'iris I_2 dans l'espace d'échanges E_2). C'est un dispositif de rivetage que l'on pourra imaginer analogue à celui de la rencontre entre la capsule Apollo et le vaisseau Союз du projet ASTP (*Apollo-Soyuz Test Project*), en juillet 1975 [724] : le squelette y représenterait le dispositif d'accostage [725], qui était identique sur les deux vaisseaux [Portree 1995, 49]. Cette petite analogie imagée est une modeste préparation mentale à la lecture de la représentation tridimensionnelle de la Figure 12.2, que je propose à la Figure 15.9.

Filons la métaphore spatiale, en termes organisationnels : sur le *docking module* (la station d'amarrage) représentant l'intégration, s'interfacent deux études élémentaires de conception, correspondant à deux éléments voisins relevant de deux lots de travaux. On imagine aisément que l'interfaçage peut s'effectuer avec un nombre plus important d'acteurs. Que se passe-t-il maintenant à l'interface entre l'intégration et l'un des pôles de conception ? Sachant que cette modélisation vaut par son caractère heuristique et non pour sa précision géométrique [726], elle constitue ni plus ni moins la **modélisation interfaciale du processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration)***.

724. Autre exemple de projet soviético-occidental, postérieur à Gargamelle. (И тебе было три месяца !)

725. Il faut tout de même rappeler que le système en question, le système APAS-75 « *d'arrimage périphérique androgyne* », a été co-conçu par les Soviétiques et les Américains en pleine guerre froide : cela laisse imaginer les trésors de diplomatie déployés dès 1970 en termes d'organisation de la conception collaborative [Portree 1993, 11]. Assurément un bel exemple de *coopétition*.

726. Galison a dit de la *trading zone* qu'elle était un « *domaine – en partie symbolique et en partie spatial* ». Gardons en tête cette dualité.

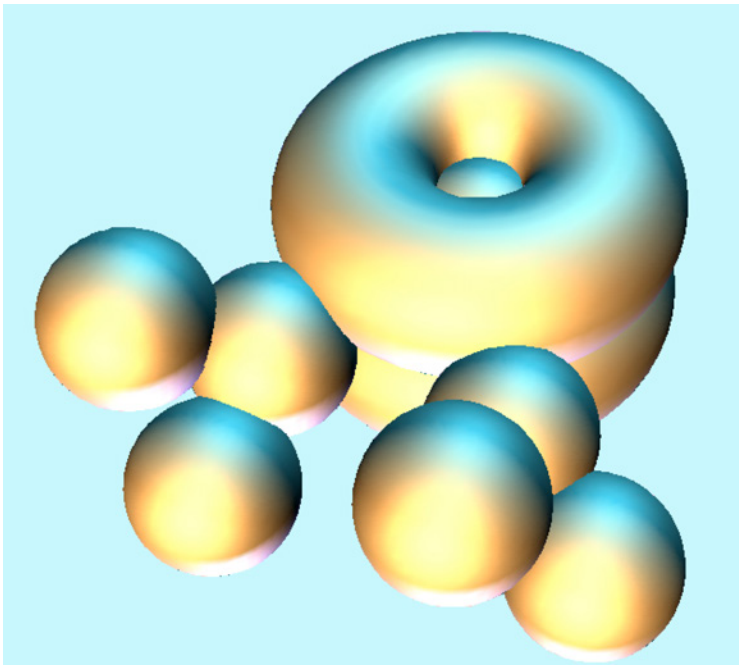


Figure 15.9 : Une interface entre trois homologues, version tridimensionnelle

Mise en 3D de la Figure 12.2 p. 351
Modèle CAO : Pascal La. ; paramètres de vue : Bertrand

Coupons cet ensemble dans le plan vertical contenant l'axe des deux tores, pour retrouver à la Figure 15.10 une vue similaire à celle de la Figure 12.1 p. 350, et identifions les différentes mailles présentes et leurs pôles. Au centre des deux tores superposés figure le pôle *P2* (ici sphérique) de la maille tripolaire qui représente l'*Intégration*. Les deux tores représentent respectivement les pôles *P1* (en haut) et *P3* de cette maille ; leur intersection avec le plan de coupe donne deux ensembles de deux cercles. Si l'on prend les deux cercles à gauche de la sphère *P2*, on retrouve la configuration de la Figure 12.1 p. 350. On en donne à la Figure 15.11 une nouvelle version légèrement complétée et adaptée.

À gauche, les trois pôles sphériques de la maille *Conception* sont visibles, dans un plan de coupe légèrement décalé compte tenu de l'inclinaison à l'amarrage [727]. En conséquence, le noyau de la maille *Conception* n'est pas tout à fait visible (cette configuration graphique peut représenter une situation de non-congruence [728], avec des pôles aux importances déséquilibrées). Nous figurons par la flèche rouge la transaction entre les deux noyaux, qui est le support du processus collaboratif. Dans ce modèle, que représentent les différents pôles et volumes ?

Du côté de la maille *Intégration*, à droite, le pôle $P2_{IN}$ « *ce que je fais* » représente toute la préparation des objets intermédiaires impliqués dans les processus élémentaires d'intégration : enveloppes et squelettes, mais aussi détection de collisions, par exemple. Il est en transaction avec le pôle $P2_{CO}$ de conception selon le mode transactionnel *S2* de *partage/synchronisation* : partage des squelettes, et synchronisation de leur évolution au gré des ECRs. Le squelette est donc l'objet intermédiaire qui circule le long de cette transaction

Le pôle $P3_{IN}$ « *ce que l'on me fait faire* » est le pôle en interface avec une maille *Layout*, et il représente le lieu de la traduction en termes géométriquement (et informatiquement) exploitables des données issues de l'optique : fichiers de positions et d'orientations par exemple. La transaction qui s'instaure entre ces deux mailles est de type *S3* d'*orientation/spécification* : le *Layout* fournit à l'*Intégration* les spécifications dont elle a besoin, et en retour celle-ci oriente la tâche du *Layout* en lui fournissant une vue d'ensemble géométrique des conséquences de ses choix de paramètres.

727. Inclinaison à laquelle l'on pourra à sa guise attribuer toutes sortes de significations possibles, ce n'est pas le propos ici.

728. Pour cette notion, voir § 11.2.6 p. 332. Nous n'approfondissons pas.

Quant au pôle $P1_{IN}$ « *ce que je fais faire* », il est le lieu de l'anticipation de l'installation par simulation et maquettage numérique (virtuel), y compris le phasage ; il est en transaction *S1* d'*initiation/vérification* avec une maille *Installation* qui représente la matérialisation de l'intégration : dans la phase d'installation, l'intégration va lancer, initier le travail par des plans ou instructions de positionnement, et vérifier (à partir des données fournies par les géomètres topographes au sein de la maille *Installation*) que les marques fiducielles d'alignement sont bien dans la limite du tolérancement de leur position théorique.

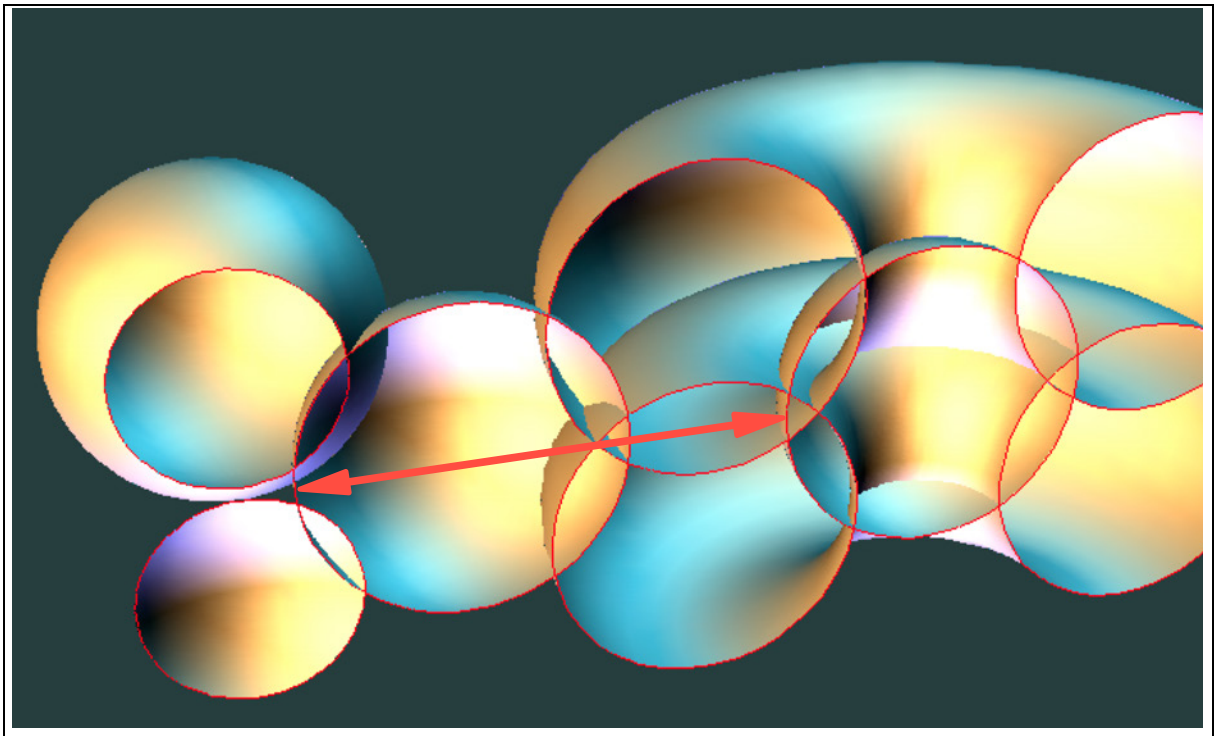


Figure 15.10 : Le processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration), coupe 3D*

Coupe tridimensionnelle de la Figure 15.9 correspondant à la Figure 12.1 p. 350
Modélisation Pascal La., paramètres de vue Bertrand

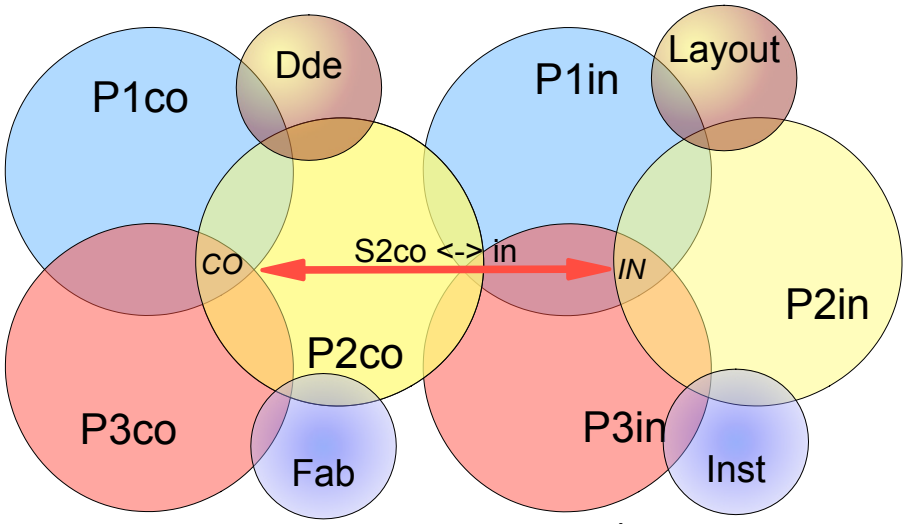


Figure 15.11: Le processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration)*

Supporté par la transaction $S2_{CO \leftrightarrow IN}$ dans un modèle interfacial en cotte de mailles tripolaires
CO : noyau de la maille tripolaire *Conception*
IN : noyau de la maille tripolaire *Intégration*

Côté maille tripolaire de *Conception*, le pôle $P2_{CO}$ « *ce que je fais* » est (sans exclusive, il s'y passe bien d'autres activités) le lieu qui recueille les squelettes et les adapte pour incorporation dans les modèles 3D, et le lieu où se repèrent les modifications de conception à signaler nécessitant une évolution de ces squelettes ; il est en transaction de type *S2* de *partage/synchronisation* avec le pôle $P2_{IN}$ d'Intégration, une transaction déjà évoquée qui constitue la colonne vertébrale du processus *Ω (Conception, Intégration)*. L'on voit que le squelette joue bien le rôle de rivet entre les deux pôles P2 des mailles respectives *Intégration* et *Conception* : c'est lui l'objet intermédiaire devenu objet frontière, qui occupe cette place pivot.

Le pôle $P3_{CO}$ « *ce que l'on me fait faire* » est en transaction avec une maille *Demandeur*, ou *Lot de travaux de sous-systèmes*. Il est le lieu de la compréhension et de l'analyse des exigences de la spécification fonctionnelle ou du cahier des charges ; il est donc en transaction *S3* d'*orientation/spécification*, exprimant en retour une indication de faisabilité et de coût qui oriente l'action du demandeur.

Le pôle $P1_{CO}$ « *ce que je fais faire* » de la maille *Conception*, enfin, est le lieu de la préparation des dessins. Il est en transaction de type *S1* d'*initiation/vérification* avec la maille *Exécution*, ou *Fabrication* (l'atelier par exemple) qui représente la matérialisation du travail de conception : le pôle $P1_{CO}$ va en effet envoyer un ordre d'exécution sous la forme d'un dessin de détail tolérancé, et vérifier le résultat fourni (à partir des données fournies par le service de métrologie au sein de la maille *Fabrication*).

Pour chacune des cinq transactions mentionnées, un espace d'échanges *ad hoc* est co-construit, qu'il est loisible de visualiser dans le modèle tridimensionnel. Nous ne détaillons pas ce point, approfondi aux chapitres 11 et 12.

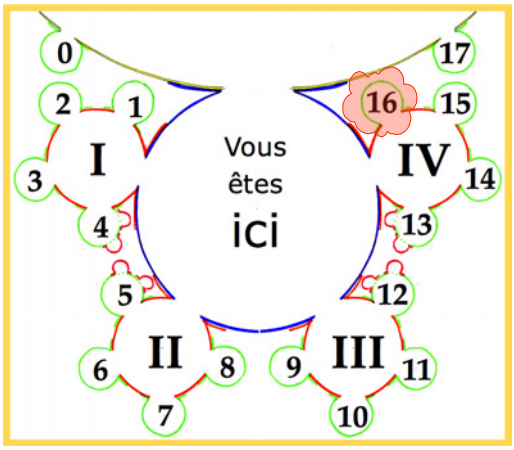
Ce modèle du processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration)* suggère la présence d'une troisième maille *Matérialisation*, qui serait la fusion de la maille *Fabrication* et de la maille *Installation*. Elle suggère aussi une maille *Exigences*, qui serait la fusion de la maille *Demandeur lot de travaux* et de la maille *Layout*. Or, nous sentons bien que, entre ces deux nouvelles mailles,il y a plus qu'une ressemblance : ce sont sans doute quelque chose comme la face émettrice et la face réceptrice d'un seul et même pôle que nous appellerons tout simplement *Réalisation* – le passage de *l'Exigence* à la *Matérialisation* : c'est la **réalisation d'un projet**.

∴

Le modèle transactionnel du processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration)* que nous venons d'exposer éclairera rétrospectivement, nous l'espérons, les considérations théoriques de la partie III. Il nous projette également dans l'ultime chapitre, consacré à l'introduction du troisième terme de la dialogique : la Réalisation.

Sapsed et Salter ont déclaré : « *Boundary objets, because of their marginal nature, are prone to be relegated to the edge of projects, which is after all where they belong* » [729]. Consacrons nos derniers efforts à nous rendre dans ces confins de projets, où nous retrouverons quelques-uns des objets-frontière issus de nos processus collaboratifs. Chemin faisant, nous chercherons à déterminer si le processus collaboratif global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)*, incluant la dimension du projet, possède une frontière.

729. « Les objets-frontière, en raison de leur nature marginale, ont tendance à se trouver relégués aux confins des projets, auxquels en définitive ils appartiennent. » [Sapsed et Salter 2004, 1531]



Chapitre 16. Pro-cube et hypercompas

Où, dans sa quête d'alliance entre *pro*duit, *pro*cessus et *pro*jet, le manageur technique s'équipe d'un hypercompas trialectique

Ne demande jamais ton chemin à quelqu'un qui le connaît, car tu ne pourrais pas t'égarer.

Rabbi Nahman de Braslav [730]

730. *In* Arthur Green, *La Sagesse dansante de Rabbi Nahman. Biographie d'un maître hassidique*, Albin Michel, 2000. Préface de M. A. Ouaknin, p. 8.

L'intégration n'existe pas *en soi*, mais *pour quelque chose*. Et ce quelque chose, c'est le projet. Il n'y a pas d'intégration sans projet, tout comme au reste il n'y a pas de projet sans intégration. Introduire les dimensions liées au projet dans l'activité d'intégration est donc essentiel, tout comme ancrer la pratique de l'intégration dans la démarche de projet. À l'orée de ce chapitre qui constitue la lisière de la thèse, aux confins de quels projets nous retrouvons-nous quelque peu égarés ?

Car le projet de la thèse *doit* s'achever, et apaiser les tensions dramaturgiques comme, par exemple, celle induite par la question de la frontière du processus collaboratif global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* : global, mais pas universel !

Car le modélisateur doit trouver moyen de forger les multiples pôles en cours de fusion de sa cotte de mailles, en n'imposant ni le jonglage ni le contorsionnisme – fût-il mental – au nombre des compétences requises pour appréhender son modèle : complexe, mais pas complexant !

Car le manageur technique, au degré 3, doit créer sur le terrain le lien entre le projet et le processus *Ω (Conception, Intégration)* qu'il pensait avoir su mettre en actes pratiques et opérationnels – grâce à ces éléments-clé que sont la modélisation des processus métier, l'introduction du squelette comme objet-frontière porteur du processus, ou le recours à l'article comme élément fédérateur au long du cycle de vie du projet : fédérateur, mais pas uniformisateur !

Or, c'est précisément au moment même où le projet est sur le point d'être modélisé dans le processus proposé par le manageur technique en mode agir ↔ penser, c'est à ce moment-là que se déclenche un processus qui conduira à ce qu'il soit mis fin à mes activités de manageur technique sur ce projet *Med*Austron. Ceci a bien failli sonner le glas du pôle *Penser* et de la thèse elle-même. Or, bien au contraire, cela en a revigoré la démarche [731], stimulé la rédaction, et lui a fourni par cet inattendu dénouement un roboratif matériel.

Ce chapitre vise donc un triple objectif – à l'image de la triple question proposée au § 3.4 p. 92, et des trois lignes de la matrice méthodologique de la partie III (§ 10.3.3 p. 295) : d'abord, l'objectif d'*introduire* le projet au sein de l'*Ω (Conception, Intégration)* ; ensuite, l'objectif d'*incorporer* le projet au sein de l'*Ω (Conception, Intégration) ;* enfin, l'objectif d'*agréger* le projet au sein de l'*Ω (Conception, Intégration).* Et avant qu'une telle apparente répétition [732] laisse penser que mon clavier se serait coincé, ou que mes capacités mentales auraient subitement diminué, je m'explique.

• Concernant la modélisation de *processus* et sa mise en actes sur le terrain : comment instrumenter concrètement ces transactions entre intégration, *layout* et installation, entre conception, demandeur et fabricant ; à quels flux de quels objets intermédiaires cela correspond-il ; et comment opérer cette sorte de compactification topologique des quatre pôles disjoints que nous avons ajoutés à la Figure 15.11 p. 425, et dont nous avons dit qu'ils représentaient à eux quatre la maille *Réalisation* ? C'est le premier objectif de ce chapitre : « introduire le projet au sein du processus *Ω (Conception, Intégration)* ». (Ou bien est-il question d'introduire un tel processus dans un projet donné [733] ?)

731. « *Car sept fois le juste tombe et se relève* », *La Bible*, Proverbes, XXIV, 16.

732. C'est Iain Pears qui, dans *Le cercle de la croix* (Belfond, 1998), accomplit l'exploit littéraire de donner quatre versions radicalement contradictoires des mêmes faits empiriques. Je me contente de trois, et en outre, je ne prétends pas à l'exploit…

733. Discuter de la nature ontologique et anthropologique du projet [Boutinet 2012], du processus et de leur relation nous emmènerait trop loin. Précisons que, selon moi, il sont de nature différente et qu'il convient de ne pas les réduire l'un à l'autre : le projet est davantage qu'une collection de processus, et le processus n'est pas toujours en projet.

• Du point de vue du rôle du manageur technique : d'emblée dépasser ce qui pourrait devenir l'amère et stérile « chronique d'un demi-échec non annoncé », et le voir au contraire comme une mission accomplie selon un mode différent de celui envisagé, reconsidérer la place du manageur technique comme acteur d'interface entre une logique de projet, une pratique de métiers et un principe de réalité. Je synthétiserai son rôle comme le lien entre *pro*duit, *pro*cessus et *pro*jet, lien que je dénommerai le *pro-cube* (*pro*^{3}). C'est le deuxième objectif de ce chapitre : « incorporer le projet au sein de l'*Ω (Conception, Intégration)* ». (Ou bien est-il question d'incorporer le manageur technique dans le projet ?)

• Sur le plan de la modélisation complexe : il s'agit de résoudre la question d'une association dialogique à *trois* mailles et non pas à deux, la maille *Réalisation* s'ajoutant aux mailles *Conception* et *Intégration* ; et au-delà, de proposer une base théorique plus rigoureuse à notre modèle interfacial à mailles tripolaires : c'est le troisième objectif du chapitre : « intégrer le projet au sein de l'*Ω* (*Conception, Intégration)* ». (Mais de quoi donc est-il ici question ?)

Ce faisceau de questions croisées, récursives, réciproques et équivoques montre bien à nouveau la complexité de la situation. C'est une nouvelle traversée complète de la thèse qu'il faudrait entreprendre, alors que nous achevons à peine celle que la carte en *omegador* nous a conduit à relater. Plutôt que de repartir tout de suite en haute mer, nous allons préparer nos prochaines expéditions, et nous équiper d'un outil qui nous aidera à nous orienter (au sens propre) quand nous nous y aventurerons : l'*hypercompas* trialectique, plusieurs fois évoqué.

Cette articulation ternaire [734] structure le chapitre : dans un premier temps, nous préciserons ces confins de projets problématiques, limites d'une mise en actes auxquelles nous nous trouvons confrontés du point de vue des trois objectifs mentionnés. La nécessité de transcender ces limites induira dans un deuxième temps la présentation de l'hypercompas et de la méthode trialectique qui aura présidé à son élaboration. Sur chacun des trois plans, simultanément et grâce à sa *complexion* ternaire, cet hypercompas nous montrera une triple voie possible.

Nous ouvrirons dans un troisième temps qui sera scandé au chapitre 17 (le dernier temps de la thèse) sur quelques perspectives d'explicitations supérieures, d'explorations intérieures et d'exploitations ultérieures de cet hypercompas, ainsi que du modèle de processus collaboratif global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* qu'il permet d'invoquer. Ce ne seront que frêles prémisses, grossières épures et premières pierres d'un nouveau chantier, que le chantier qui s'achève aura permis d'esquisser.

16.1 Sorties de terrain

En visant le triple objectif de prendre en compte la dimension de projet dans les dynamiques dialogiquement couplées de conception et d'intégration, nous allons sortir progressivement du terrain de *Med*Austron, et d'ailleurs de tout terrain particulier, pour tendre vers le général. Nous commencerons cette sortie progressive par la question spécifique de l'implantation du PDM dans *Med*Austron, et nous y montrerons les limites du déploiement d'un processus collaboratif global *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* dans un contexte de projet. Nous terminerons par la question de l'approche complexe et de la mise en actes d'une démarche agir ↔ penser. Entre les deux, nous reviendrons une dernière fois sur la figure du manageur technique, acteur d'interface entre le(s) concepteur(s), l'intégrateur, le réalisateur et le chef de projet, que ce soit sur *Med*Austron, sur ATLAS ou ailleurs.

734. Une triple répétition (signe d'un « *englobement homogène* ») suivi d'une différenciation tendant vers le terrain (signe d'une « *pluralisation complémentaire-contradictoire hétérogène* ») : c'est bien une démarche dans l'esprit de la trialectique, introduite dans ce chapitre. Merci à Gérard Gigand de l'avoir si bien formulé.

16.1.1 Article squelettique, squelette désarticulé, PLM hors les rails

L'objectif du déploiement de PDM, dans mon idée, était plus stratégique que celle de la gestion des données de conception. Il consistait à mettre en place un système d'informations homogène sur l'ensemble de la vie du projet, depuis les spécifications fonctionnelles jusqu'aux documents décrivant les équipements réels « *tels que construits* », en passant par les données de conception, les spécifications techniques, le suivi de fabrication et les résultats d'alignement, pour ne citer que les principales.

Dans cette approche globale, l'article joue un rôle central : nous avons vu comment la CAO et le PDM sont des outils qui accompagnent le processus *Ω (Conception, Intégration)* en gérant les objets virtuels et documents qui décrivent l'article. Les outils d'ERP sont censés prendre le relais dans la phase de fabrication ou d'approvisionnement des différentes instances de chaque article : les équipements réels. Quant au projet, il coordonne (entre autres) les différentes activités du point de vue du cadencement, dans une perspective de concourance, en fixant les échéances à chaque activité [Lindkvist, Soderlund et Tell 1998]. L'idée stratégique est selon moi de faire de l'article la *référence commune* à ces trois mondes.

Nous avons étudié au chapitre 15 le fonctionnement et le rôle du squelette et de l'enveloppe dans le processus *Ω (Conception, Intégration)*. Il permet, au travers des processus élémentaires de conception et d'intégration, de construire une vision dynamique de l'évolution du processus, et de synchroniser l'enveloppe (porteuse de l'intégration), le modèle 3D (représentant la conception) et le dessin 2D (donnée d'entrée pour la réalisation). Mais à ce stade, ces activités ne sont pas cadencées dans le temps, seule leur succession est structurée par la traversée des espaces d'échanges menant à leur validation respective.



Figure 16.1: Sommet du PLM

Hugo D'Alesi, Hugo, *Le Mont Rose - Vallée de Zermatt (PLM)*, 1891

Il est des sommets radieux dont on rêve, et qui parfois restent – provisoirement ? – inatteignables, comme l'illustre en clin d'œil la Figure 16.1 : le déploiement d'un PLM (Product Lifecycle Management). L'objectif de la dernière phase de notre projet de DDMP était, en synchronisant les systèmes d'informations, de mettre en place un « *overall global piloting tool based on an hybrid item-centric method, which would help the project management to get an integrated view of the three dimensions and provide a full product / process / project integration* » [735]. Déclarons-le d'emblée : nous n'y sommes pas encore parvenus. Sans en narrer les péripéties, la première sortie de terrain est donc celle de l'extension du

735. « Un outil global de pilotage basé sur une méthode hybride centrée sur l'article, qui aiderait le management de projet à obtenir une vue intégrée des trois dimensions et fournir une intégration complète produit / processus / projet. » [Nicquevert, Hauviller et Benedikt 2011, 1673]

PDM au PLM. Le déploiement stratégique du PLM a été interrompu. Si l'objectif affiché n'a pas été atteint, c'est pour trois raisons principales : la modélisation de processus, l'usage de l'article et l'implantation du squelette.

Nos tentatives de représenter un processus *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* graphiquement n'ont pas encore mené à un résultat exploitable. J'ai pensé adapter le cycle en V en lui adjoignant une troisième dimension, celle des différents composants du projet ; mais ce qui s'appelle intégration dans le cycle en V n'est pas tout à fait ce que j'appelle intégration au sens de la gestion des liens d'interface, et nécessite des adaptations (sans doute pas très élaborées). Une autre idée consistait en un modèle concentrique, dont chaque zone radiale représenterait une phase du cycle de vie : y serait représenté le statut (au sens donné au chapitre 15), sous la forme d'un tableau de bord synoptique complet. Ces idées sont encore à approfondir. Quant à une approche BPMN, dont nous avons vu la grande pertinence quand il s'agit d'identifier le lieu des espaces d'échanges pour les phases collaboratives, elle exigerait une multiplication du nombre de lignes de nage pour inclure l'ensemble des intervenants internes et externes au projet. C'est une aventure dans laquelle nous ne nous sommes pas encore engagés, qui constitue une perspective d'approfondissement.

Si le PLM s'est retrouvé sur une voie de garage pour *Med*Austron, c'est également qu'un certain nombre d'intervenants du projet n'a pas été convaincu du bienfondé de l'approche centrée sur l'article, considérée comme lourde et inutile. C'est ainsi que la notion même de l'article s'est retrouvée squelettique et réduite à un vague rôle de trombone rassemblant en un dossier différents documents dans le PDM. Au lieu de servir d'objet intermédiaire avec les systèmes d'information du projet, il s'en est vu fermer la porte. Le premier de ces systèmes, dénommé PIMS, est un lieu de dépôt (*repository*) des documents validés. Nous avions commencé à discuter d'un mécanisme informatique de poussage des documents validés (selon les procédures explicitées au chapitre 14) issus du PDM. Mais PIMS étant strictement orienté “gestion de documents”, l'assignation à l'article correspondant était perdue, et avec elle toutes les notions sous-jacentes de cycle de vie de l'article, et donc de statut. Quant au deuxième système, qu'utilisent les services d'achats et financiers, ils exploitaient *a contrario* uniquement la notion d'article, mais sans aucune possibilité d'attacher ou de lier des documents techniques. Impossible ainsi par ce biais de transmettre une enveloppe à un fournisseur comme contrainte d'environnement. Ces systèmes, conçus selon des stratégies disjointes, ne sont pas en mesure de communiquer véritablement : eux aussi auraient eu besoin d'espaces d'échanges co-construits… L'on retrouve la réserve de Claude M. : « *Si on décide de limiter [le PDM] à l'usage unique des bureaux d'études, on s'est trompé sur le choix de l'outil* » (§ 13.2.1 p. 381).

Le squelette, enfin, s'est retrouvé en quelque sorte désarticulé : pour que le processus d'intégration converge, il exige que l'ensemble des équipements soit associé à un squelette et à une enveloppe. Or, certains projeteurs fonctionnaient hors du périmètre du MAID, et refusaient d'investir dans l'introduction de ce concept nouveau. Par conséquent leurs modèles n'étant pas conformes à la méthodologie, ils ne se prêtaient pas à la logique d'intégration générale. On en voit trace à la Figure 15.3 p. 415: dans le médaillon, le conflit évoqué est dû au fait que l'enveloppe définie par l'intégration n'avait pas été incluse comme contrainte spatiale dans les données fournies au fabricant. Celui-ci avait donc conçu, en toute bonne foi, un capot pour ses connexions électriques qui excédait largement les dimensions autorisées. En l'occurrence, le conflit a pu être résolu au double prix d'une re-conception des connexions d'une part, et du déplacement (avec modification du *layout*) de l'équipement impacté d'autre part. La simple inclusion de l'enveloppe dans le dossier aurait tout simplement évité cet important travail supplémentaire de part et

d'autre. À partir de là, une intégration lacunaire ayant peu de chance de converger faute de squelettes en nombre suffisant, la démarche même était remise en cause.

Basé à la fois sur ce concept de squelette porteur de la logique d'interfaces hétérarchiques, sur le déploiement des espaces d'échanges comme outil managérial de vérification et validation des interfaces, et sur l'approche centrée par article, le processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* n'a connu qu'un déploiement opérationnel partiel sur le terrain de *Med*Austron – à la grande satisfaction de ceux qui l'ont adopté, mais une grande part de son intérêt étant perdue par le fait que l'adhésion ne recouvrait pas l'ensemble du périmètre du projet.

16.1.2 Péremption de périmètres

La question de la propriété du squelette, soulevée au § 15.2.3 p. 417, n'est pas uniquement une question technique liée à des droits d'accès dans un système d'informations, ou à la méthodologie d'usage dans un logiciel de CAO. Elle met en relief quelques limites du management de projet dans sa capacité à définir, attribuer et préserver la place du manageur technique dans les projets complexes.

La triade d'objets « *enveloppe* / *modèle 3D* / *dessin 2D* » évoquée précédemment comme pertinente pour représenter chacune des activités de conception, d'intégration et de réalisation n'est en fait pas tout à fait la bonne. Tout d'abord parce que le dessin 2D n'est finalement qu'un mode particulier de représentation de la solution modélisée en 3D, dont la nature n'est pas fondamentalement différente. Ensuite parce que c'est en définitive l'article qui est le porteur de la dimension *Réalisation*, c'est-à-dire que c'est le projet qui est en définitive le propriétaire de l'article. La question de la place du manageur technique n'est donc pas anecdotique dans cette dynamique, puisqu'elle implique de reconsidérer son rôle dans le projet lui-même. Dans l'analyse de la Figure 13.3 p. 379 que j'ai proposée au § 13.2.2 p. 384, le manageur technique couvre en fait le périmètre délimité par les trois cercles superposés, et gère plus particulièrement la mise en place et la construction des espaces d'échanges avec les entités extérieures. Le squelette étant l'émanation du bureau d'intégration dont il a la charge, il sert donc d'outil pour raccrocher l'intégration aux activités de conception (en interne au MAID, mais aussi avec les projeteurs extérieurs) ainsi qu'au projet, via l'article auquel il est assigné.

Une autre façon de considérer les choses, du point de vue du management de projet, est la suivante : aux acteurs du projet sont assignées des tâches techniques, et aux manageurs, ou responsables de lots de travaux, la responsabilité de planifier ces tâches (aussi bien du point de vue temporel que de celui des ressources ou de l'organisation). Dans cette grossière classification, quelle serait la place du manageur technique, comme acteur d'interface ? Celle de faire le lien entre l'avancement effectif du contenu technique des tâches et leur planification globale au niveau stratégique. C'est à cette fin que j'avais entrepris le développement de l'outil global de supervision évoqué plus haut. Une cartographie de l'avancement de la préparation des tâches au cours de leur cycle de vie viendrait ainsi au service d'une cartographie dynamique de suivi de l'avancement global du projet, et donc de réorientation stratégique éventuelle, liée d'une part au planning global du projet, et d'autre part à un système PLM orienté article [736].

En juin 2011, cette approche a été présentée au MATAC. En août 2011, nous écrivions dans un article co-signé par le chef de projet :

> *The complexity of such an endeavour, the merging of an equipped building, a nice optical layout and sophisticated elements, cannot be mastered without the proper*

736. C'est une approche que je voudrais similaire pour l'intégration à celle du management par la valeur acquise (*earned value management*) pour les aspects de coût et d'engagement financier d'un projet. Étayer cette similitude exige d'autres développements que ceux qui sont possibles dans le cadre de cette thèse.

> *management of all the integration issues. The team is now ready for Archimedes' task: integrate the actual accelerator in its building according to the planned optics.* [737]

L'équipe autrichienne bénéficiaire de ce transfert de compétences organisé par le CERN s'est à ce moment-là saisie de manière critique des stratégies, des processus et des outils que je lui avais proposés, et elle a estimé qu'un tel déploiement n'était pas nécessaire pour un projet de taille aussi « *modeste* » que *Med*Austron, dont le statut était en outre, selon leur appréciation, « *almost completed* » [738]. Cette étonnante appréciation est la conséquence du syndrome dit « *des 90 %* », selon lequel un projet est ressenti comme étant terminé à 90% quand il n'est exécuté qu'à seulement 50% [Ford et Sterman 2003b, 212, 2003a]. Le déploiement effectué pour la gestion des données a été limité dès septembre 2011 au périmètre du bureau d'études, car il a été considéré comme trop tardif par le management du projet : les études n'étaient alors pourtant terminées que pour un tiers environ des articles, et l'intégration était encore très préliminaire… Sans approfondir les motivations ou divergences d'appréciation sur ce que signifie un projet « *presque terminé* », invoquons en terme de dynamique des systèmes que le chef de projet a préféré, selon ses priorités et ses contraintes, investir sur l'axe « *work harder* » (travailler plus dur) plutôt que sur l'axe « *work smarter*» (travailler plus intelligemment) [Repenning et Sterman 2001, 63].

Nous l'avons souligné au chapitre 13, il nous avait semblé que le périmètre du MAID sur le projet *Med*Austron constituait un périmètre favorable, avec une égide unifiée sur le bureau d'étude, sur le bureau d'intégration et sur la coordination de l'installation (en charge de la planification de la phase d'intégration matérielle du projet), périmètre d'autant plus favorable qu'y était inclus le projet de gestion des données de conception exposé au chapitre 14. Ce périmètre est devenu en quelque sorte périmé dès lors que le déploiement du PLM centré sur l'article, moteur de la stratégie, était gelé et réduit à ce périmètre.

Cela provient en partie de la négligence du manageur technique à considérer son propre modèle de cotte de mailles comme étant un modèle résolument continu, sans limite intrinsèque, et donc devant être étendu jusqu'au chef du projet et à l'ensemble de ses homologues responsables de lots de travaux. Une égide unifiée ne l'est jamais que sur l'ensemble des mailles sur lesquelles le manageur technique conserve une influence, pour lesquelles il est en mesure de jouer les acteurs d'interface et de construire des espaces d'échanges. En l'espèce, le périmètre du MAID comme celui du projet dans son ensemble a connu une re-fragmentation, sur des lignes de faille inattendues, à savoir celles séparant les acteurs favorables à l'article de ceux qui y étaient opposés. Et ce à tous les niveaux : homologues, donneurs d'ordres, exécutants. Dans chaque catégorie se trouvaient des partisans et des opposants, en interne au MAID (espace de proximité du bureau d'études) comme en externe (espace de proximité de lots de travaux), à l'intérieur de *Med*Austron (espace de projet) comme auprès des intervenants extérieurs (espace public).

La situation devenait inextricable, et la décision du chef de projet a agi de bon sens, de ce point de vue. Faute de n'être pas parvenu à vendre le concept, de ne pas avoir rallié assez d'alliés, d'avoir sous-estimé le rejet d'une partie des acteurs et intervenants, et d'avoir négligé l'interface verticale ascendante (voir le Tableau 11.2 p. 331), celle dite précisément de l'*orientation*, le manageur technique a vu sa posi-

737. « La complexité d'une telle entreprise, la convergence d'un bâtiment équipé, d'une bonne configuration optique et d'éléments sophistiqués, ne peut être maîtrisée sans une gestion appropriée de toutes les questions d'intégration. L'équipe est maintenant prête pour relever le défi d'Archimède : intégrer l'accélérateur réel dans son bâtiment conformément à l'optique prévue. » [Nicquevert, Hauviller et Benedikt 2011, 1673]

738. « Presque terminé. » Entretien avec le chef de projet, 6 septembre 2011.

tion d'acteur d'interface se déliter peu à peu. C'est la conséquence d'un décentrage dans la recherche de congruence de tout acteur d'interface, c'est-à-dire la quête d'équilibre entre les trois types d'acteurs avec lesquels il est en interface (§ 11.2.6 p. 332). Un indicateur de degré de congruence serait à cet égard bien utile : c'est un élément de spécification fonctionnelle pour un hypercompas.

Cela nous conduit à une carence principale en termes d'agir ↔ penser : la carence en termes de co-construction, via l'absence ou l'insuffisance de la phase d'appropriation. Nous avons noté au § 14.3.1 p. 395 qu'il fallait « *améliorer tous les aspects du projet de manière à obtenir un environnement de gestion des données qui fonctionne : les outils, la formation des utilisateurs, les processus et les procédures* ». Or, cette « *amélioration* » n'a pas été couronnée de succès, en raison de la tendance à conceptualiser sans intégrer les questions de résistances naturelles à l'intégration de notions nouvelles. Une co-construction ne se décrète pas, une co-construction doit être co-construite, au degré 2.

La place nous manque pour approfondir – une thèse en soi, là encore. Je me contenterai de souligner ici, en écho aux considérations du § 4.1.2 p. 104 sur la démarche constructiviste, l'importance d'y inclure l'acception piagétienne, et notamment la notion du couple dialectique « *assimilation* » (intégration de l'expérience d'un sujet à un schème) / « *accommodation* » (adaptation du schème à un milieu ou un objet)" [Piaget 1937, 307]. Elle induit la nécessité permanente de réorganiser ses catégories de pensée à chaque nouvel apprentissage important. Ceci souligne l'importance fondamentale de la formation des acteurs d'un projet [739]. Nous pourrions aller jusqu'à émettre l'hypothèse que bien des malentendus ont pour cause l'absence d'un outil de formation qui aurait permis d'accompagner le projet. Deux volets pourraient constituer cette formation.

Le premier volet serait une *formation préalable* associant tous les acteurs, afin qu'ils se connaissent et se confrontent ensemble sur des cas simulés de conception et de mise en œuvre de projet. Une telle phase conduit à la mise en évidence des divergences d'appréhension d'une information et de son interprétation, et ce dans une situation protégée dans laquelle il est possible d'exprimer ses ressentis hors des enjeux du projet lui-même, s'y affronter, analyser ses propres modes de fonctionnement intellectuel et celui des autres, mais également les comportements dans une situation de conflit.

Le second volet serait un *accompagnement* tout au long du projet, concernant l'ensemble des acteurs (tantôt en groupes mixtes, tantôt en groupes homogènes) : dans un espace différent des réunions de projet qui, bien souvent, ne concerne que des représentants de chaque équipe (le plus souvent les chefs, qui retournent ensuite chacun dans son camp et fait à ses troupes une restitution forcément orientée), chacun se sentirait partie prenante, ce qui favoriserait l'articulation et la cohérence de l'ensemble, offrant ainsi un lieu privilégié de traitement des malentendus et des réajustements notionnels dont chacun aurait pris conscience. Un tel accompagnement serait également une contribution à une vision systémique partagée. Encore faut-il un outil sur lequel puisse se construire une telle vision systémique, nouvelle attente à l'égard d'un hypercompas.

Dans le cas de *Med*Austron, j'avais tenté en août 2010 une expérience sur le premier volet, au travers du jeu de rôles *Delta* [Masclet et Boujut 2010]. Les enseignements avaient été très intéressants, et m'avaient permis d'observer des comportements collectifs nécessitant quelques remédiations. L'approche proposée d'une formation avec accompagnement le long du projet présente l'inconvénient, aux yeux du management, de constituer une considérable perte de temps sans retour sur investissement garanti dans un contexte de production sous pression.

739. Je remercie Xavier Nicquevert pour cet éclairage important et les éléments de réflexion sur une telle formation que je reprends ici. Ils nécessiteraient là aussi d'autres développements.

Pour en finir avec le terrain *Med*Austron : le management de projet étant convaincu de pouvoir obtenir des résultats équivalents sans recourir aux approches proposées, que ce soit en termes de gestion des données ou de stratégie d'intégration, il a alors été convenu que l'équipe autrichienne prenait ses responsabilités dans le fait de ne pas adopter les approches prônées par le CERN et par le manageur technique détaché sur cette mission. Mission qu'il avait d'une certaine manière accomplie au seuil de cette prise d'indépendance. Ainsi s'est achevée l'une des tâches de transfert de compétences définies par le chef de projet :

> *MedAustron represents the most intensive "head-to-head" transfer of technology that CERN has ever undertaken. In many ways, it is the age-old system of master and apprentice and – as usually happens – the apprentice quickly overtakes the master who looks on him proudly.* [740]

C'est de l'équipe que j'ai formée, constituée et initiée que je suis fier en l'occurrence, qui a su s'adapter aux circonstances pour poursuivre l'ouvrage et le mener à bien en exploitant et en conformant habilement les principes proposés au contexte dans lequel elle devait continuer à évoluer.

16.1.3 Jeu de cubes

Tout ce qui précède a contribué, à divers titres, à ce que la grande unification des processus (incluant le projet) soit restée encore au stade des premières réflexions : la mise en acte en agir ↔ penser a été interrompue par la sortie de terrain de celui qui l'animait. Tout cela montre aussi en définitive que ce caractère partiel et inachevé de nos travaux applicatifs est constitutif même de l'approche complexe. Une démarche déterministe, avec des règles précises, doit céder le pas à une modélisation de processus agile et dynamique, basée sur des lignes de conduite (« *from rules to adaptive guidelines* » [741]). Il nous faut donc approfondir encore l'approche complexe, et nous munir de cet hypercompas pour déterminer le bon cap.

À ce stade, le manageur technique sorti du terrain, au degré 4, veut comprendre comment il aurait pu œuvrer différemment pour éviter la sortie de terrain, et poursuivre plus loin la tâche en pleine innovation systémique. Et en outre, il cherche toujours des éléments de réponse à sa triple question du chapitre 3, tout en s'appliquant à atteindre le triple objectif du chapitre 16. Or, face à l'incomplétude intrinsèque de la démarche complexe, et à l'indétermination d'un processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* qui semble échapper à toute modélisation, il s'agirait justement de ne pas sombrer dans le gouffre autoréférentiel du « modélisateur modélisé » (Figure 16.2).

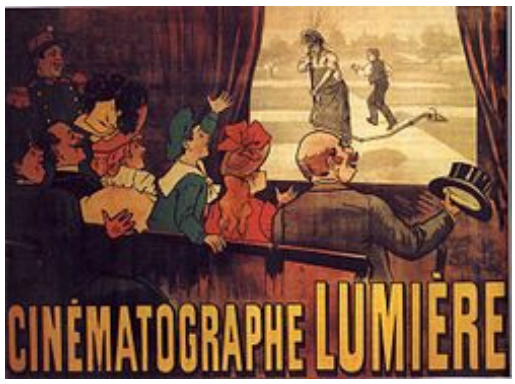


Figure 16.2 : *L'arroseur arrosé*
Affiche du film, réal. Louis Lumière, 1895

De quelle complexité est-il question ? Nous pouvons en relever plusieurs.

• Concernant les degrés du manageur technique : concepteur de processus de conception de projet de concep-

740. « *Med*Austron représente le transfert de technologie "en tête à tête" le plus intensif jamais entrepris par le CERN. De bien des manières, c'est le très ancien système du maître et de l'apprenti, et – comme cela survient en général – l'apprenti surpasse rapidement le maître qui le contemple fièrement. » [Benedikt et Bryant 2011]

741. « Depuis des règles jusqu'à des lignes de conduite adaptatives. » [Olmedo 2010, 79-80], déjà cité.

tion d'outil d'aide à la conception collaborative. Comment faire cesser l'inflation de degrés ?

• Concernant l'intégration : ce terme caractérise-t-il une fonction essentielle du management de projet [Stuckenbruck 1988] (revoir la Figure 11.2 p. 314), ou bien même peut-être constitue-t-elle un type d'activité générique, consistant à *définir et vérifier la compatibilité d'un ensemble à un champ d'interfaces quelconque* ?

• Concernant le processus *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* : est-ce une sorte de processus frontière, réunissant des objets-frontière (le squelette, par exemple), des acteurs-frontière (l'intégrateur) et un espace frontière (l'espace d'échanges) ?

L'on pourrait *ad nauseam* poursuivre et introduire des formulations plus alambiquées les unes que les autres, qui ne constitueraient qu'une fuite en avant. Il s'agit maintenant de concentrer sous une forme pertinente ces explosions conceptuelles qui finissent par devenir stériles.

L'objectif ici, tel que nous l'avons formulé plus haut, est d'embrasser la triade *pro*duit / *pro*cessus / *pro*jet, dénommée **pro-cube**. Comment saisir les relations entre produit, processus et organisation dans les projets de développement complexes [Nightingale 2000] ? Comment instrumenter ces relations en termes de processus et de gestion des données, comme le propose le projet IPPOP [Robin, Rose et Girard 2007 ; Noël et Roucoules 2008 ; Gzara Yesilbas, Rose et Lombard 2006 ; Ballu, Dufaure et Teissandier 2007] ?Comment exprimer cette idée que le projet de conception n'est pas antérieur à la réalisation du projet, que la spécification comme la réalisation sont constitutives du projet, et évolutives en fonction du projet, autour de la conception et de l'intégration ? Comment dire que les résultats partiels de conception et d'intégration obtenus nourrissent la redéfinition du projet, sa faisabilité, modifient même sa finalité, conditionnent son périmètre, et que tout cela constitue une boucle dynamique complexe ? C'est bien là que le manageur technique joue son rôle de moteur de boucle, entre celui des opérationnels – pris par l'exécution de tâches souvent morcelées – et celui des stratèges – qui souvent compactifient le projet comme un tout sans nuance –, aucun n'étant bien placé pour alimenter la boucle complexe. C'est la question de la *modélisation dynamique de projet* [Ford et Sterman 1998] *embrassant la globalité du projet.*

C'est dire si, alors que s'achève bientôt le présent mémoire, nous n'épuiserons pas cette question de la modélisation dynamique. Nous allons préciser la topologie d'un outil conceptuel qui nous aidera à en aborder la complexité avec une intelligibilité accrue : comment construire une dialogique à trois termes pour enfin saisir notre processus dans sa triple dimension ? Comment imaginer un mécanisme liant ces trois mailles tripolaires conception / intégration / réalisation avec un pro-cube produit / processus / projet ? À cette question qui dépasse en difficulté la quadrature du cercle [742], nous répondrons en convoquant l'approche trialectique, enrichissement et consolidation de notre boucle dialogique *Ω*.

16.2 Un hypercompas

Les considérations précédentes exigent un exploit conceptuel de la part de l'hypercompas pour satisfaire le triple objectif de ce chapitre. C'est le défi que nous nous sommes lancés en faisant nôtre l'interpellation nietzschéenne : « *fabriquer [des concepts], les créer, les poser et persuader les hommes d'y recourir* » (Introduction à la partie III, p. 251). Parmi ceux que nous avons créés dans la partie III, nous sommes parvenus à persuader un certain nombre d'acteurs du projet de la partie IV d'y recourir. Nous avons vu cependant au § 16.1 le besoin qui se faisait ressentir d'un concept unificateur pour nous orienter dans ces espaces complexes.

742. Une sorte de cubiture, ou d'hexaédriture de la sphère ?

Ce concept, c'est l'hypercompas. Sortons-le enfin de sa boîte : après quelques éléments théoriques, nous le construirons sous la forme d'une « *trialectique du management technique* ». Nous expliciterons chemin faisant la démarche de la méthode en effectuant l'exégèse de cette trialectique particulière. Wunenburger en a fort bien formulé l'enjeu du point de vue philosophique :

> *La complexité présumée du réel exige, qu'en certaines situations cognitives du moins, toutes ces figures [schèmes de la médiation, triades, ambivalence, polarité, contradictions ou paradoxe] œuvrent en synergie, s'associent de manière cohérente dans un mode propre d'appréhension du donné. Il importe donc de dépasser une présentation analytique des éléments d'une rationalité alternative, pour tenter de saisir en acte une méthode achevée, qui permette de faire jouer ensemble, de manière orchestrale, morphologies tripartites, oscillations énergétiques, énoncés contradictoriels. Car le travail intellectuel présupposé par une investigation de la complexité du réel ne saurait se réduire à une sorte de bricolages de schèmes, mais doit être guidé par une volonté architectonique, qui seule le dote d'une puissance d'intelligibilité accrue.* [Wunenburger 1990, 203]

La pensée de la complexité s'appuie, complète-t-il, sur trois voies : la « *distribution dans une configuration ternaire* », la « *polarité des forces* », et la « *logique de la contradiction* ». Ce sont précisément les principes directeurs de la démarche trialectique développée par Gigand [2007]. Cette démarche n'est pas l'un de ces « *bricolages de schèmes* » dénoncé par Wunenburger : Gigand parvient selon nous à cette « *puissance d'intelligibilité* » que lui donne une « *volonté architectonique* » sous-jacente soigneusement étayée [743]. Il y ajoute le souci d'aboutir (opération délicate) à des « *concepts-terrains* » qui le relie à la réalité de l'action et en fait un excellent indicateur de démarche agir ↔ penser. Au départ figurent les trois « *invariants fondamentaux* » déjà évoqués : l'incomplétude, l'indétermination et l'autoréférence. Ces trois invariants s'appuient sur une phénoménologie ternaire ainsi récapitulée par Galvani [Gigand 2010, 11] :

- un phénomène n'est jamais complètement cerné, parce qu'il est toujours perçu d'un certain point de vue : c'est l'invariant de l'*incomplétude*, ou la vue *partielle* ;
- un phénomène ne prend sens que par rapport à l'intérêt que lui porte l'observateur, c'est l'invariant de l'*autoréférence*, ou la vue *partiale* ;
- un phénomène peut apparaître différemment en fonction du mode d'observation utilisé, c'est l'invariant de l'*indétermination*, ou la vue *parcellaire*.

Cette ternaire est constituée de trois notions interdépendantes : dans l'incomplétude, on retrouve le reflet de l'autoréférence et de l'indétermination, et il en va de même pour chaque invariant à tour de rôle et simultanément, et ce phénomène circulatoire exprime leur coextensivité. Par là-même, la trialectique suit bien la première voie de Wunenburger : la distribution dans une configuration ternaire. Les deux autres voies, polarité des forces et logique de la contradiction, sont empruntées au cours du déploiement rigoureux des concepts dans une mise en géométrie complexe des trois dialectiques entre invariants pris deux à deux. Sur ce schéma, le positionnement des concepts n'est pas discrétionnaire, mais régi par des règles successives très précises, de dérivation, puis d'oppositions antagonistes, et enfin de recherche de tiers inclus. C'est cette rigueur qui confère à la méthode sa puissance heuristique.

Afin de tester cette méthode, et en compagnie de Pascal Lécaille, nous avons suivi un séminaire de deux jours avec Gérard Gigand lui-même en décembre 2011. Nous avons appliqué la démarche, très curieux et interrogatifs du résultat que nous pouvions attendre de l'approche complexe qu'il propose. Nous avons sélectionné le thème du management technique, nous avons dérivé ce thème suivant les

743. Nous renvoyons pour les détails à son ouvrage cité ou au site http://www.complexitude.org.

trois invariants, et suivi point à point la méthode. Et nous avons abouti (au bout d'environ huit heures de travail à trois) au schéma présenté à la Figure 16.3. Nous avons obtenu un résultat qui dépassait largement nos espérances ! Quel hypercompas ! Analysons point à point ce schéma très dense et foisonnant.

Tout d'abord, et d'emblée, précisons que, si la modélisation graphique propose aussi de trois cercles qui empiètent les uns sur les autres en formant des « *fuseaux de recouvrement* », la géométrie du schéma ne doit rien à notre modèle interfacial à mailles tripolaires et à ses iris, lequel ne lui doit rien en retour. L'une des différences – et l'objet d'interprétations divergentes et sources d'échanges fructueux entre nous – est la signification du centre : considéré dans le livre comme la place de « *l'observateur conscient d'observer* », puis celle du « *processus d'observation consciente* », il est désormais comme un « *non-lieu* » par Gigand, quand il constitue pour moi la source du schéma (tout comme il représente le noyau de la maille dans le modèle interfacial). L'analogie s'arrête là, et tout le développement trialectique est distinct.

Comment fonctionne le schéma trialectique dans son intimité ? Par la succession de plusieurs opérations que nous détaillons maintenant pour la Figure 16.3. La restitution qui suit ne rend pas la richesse de la réflexion et des résonances sémantiques et conceptuelles de l'exercice, au moins en donnera-t-elle un pâle reflet.

À l'intérieur des « *domaines de validité* » que sont les trois grands cercles, l'on commence par déterminer les trois *dérivées* du thème du management technique. Ce sont en fait les trois composantes du pro-cube, mais chacune ne se met pas indifféremment dans l'un ou l'autre cercles. Le *produit* pour le management technique est dans la sphère de l'incomplétude car il vient signifier un manque. Le *projet* est dans la sphère de l'autoréférence car il est issu de l'intention de quelqu'un. Quant au *processus*, il est dans la sphère de l'indétermination car il représente un chemin non connu à l'avance. Il illustre ainsi une ternaire sous-jacente « pouvoir / vouloir / savoir », ou encore « effort / ressource / attention », ternaire que Gigand appelle la « *dérivée des dérivées* » (en italique au dessus des invariants). Ainsi, le produit est l'objet de tous les efforts, le projet est la ressource du management technique, qui lui accorde son attention à travers le processus.

Les *agents* représentent ensuite l'influence que chaque invariant exerce sur les dérivées des deux autres invariants. C'est pourquoi ils sont figurés par des cercles de même couleur que ceux des dérivées influencées, et positionnés dans les cercles des invariants influençants. Il s'agit de capter l'influence sémantique de chaque invariant sur chaque dérivée, indépendamment du thème de la trialectique. On obtient trois binaires, indépendamment de la présence des dérivées. Ainsi l'agent de l'incomplétude pour le projet est la *réalisation*, c'est-à-dire le terme qui décrit ce qui provoque l'incomplétude du projet. L'incomplétude nous fait tendre vers la réalisation, qui est elle-même la preuve du déficit permanent de notre perception des choses. Le même processus croisé conduit aux cinq autres agents : l'agent de l'incomplétude pour le processus est l'existence d'une carence, c'est-à-dire la *diffusion* ; l'agent de l'autoréférence pour le produit est l'*artefact*, et celui de l'autoréférence pour le processus est la *modélisation* ; enfin, l'agent de l'indétermination pour le projet est la *proposition*, et celui de l'indétermination pour le produit est l'*élaboration*.

L'observation des premiers termes inscrits sur le schéma montre que, dans un même domaine de validité (le plus grand cercle), les agents sont *complémentaires*, alors que de part et d'autre de chaque fuseau de recouvrement, ils sont des *contraires*. Pour ce qui est des complémentaires : pour l'incomplétude, c'est le couple de la diffusion et de la réalisation, car ne peut être diffusé que ce qui est réalisé ; pour l'autoréférence, artefact et modélisation, deux instances complémentaires de la simulation ; et pour l'indétermination, proposition et élaboration, une proposition nécessite une élaboration, et une élaboration ne peut s'appliquer qu'à

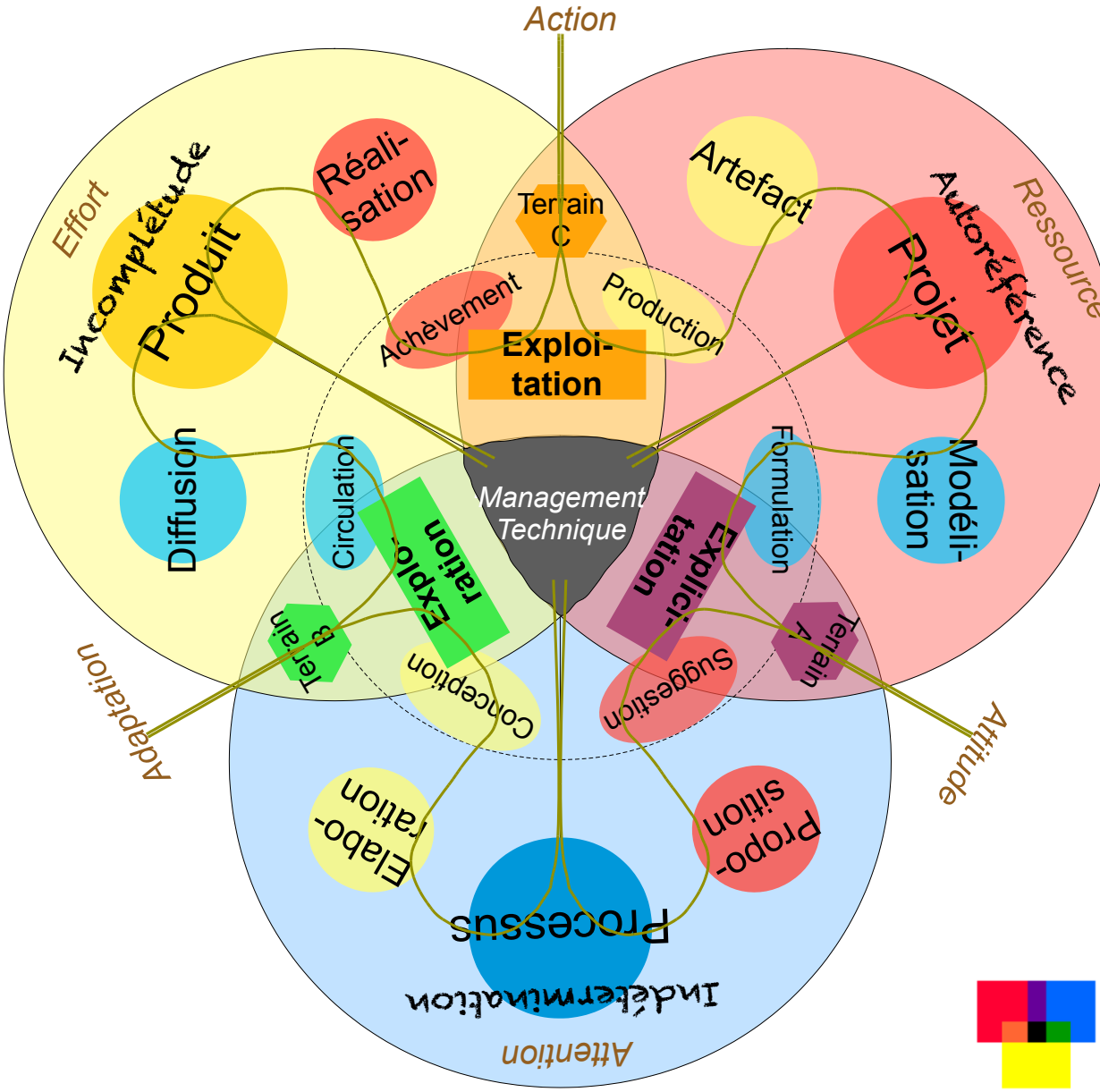


Figure 16.3: Trialectique du management technique

Élaborée par G. Gigand, P. Lécaille et B. Nicquevert selon la méthode trialectique de Gigand [2010]
Version 3 dite « RJB » (rouge jaune bleue) dessinée par Bertrand, décembre 2011

une proposition préalable. Pour ce qui est des contraires : l'artefact et la réalisation, opposés par nature, entre incomplétude et autoréférence ; la modélisation et la proposition. entre autoréférence et indétermination ; et l'élaboration et la diffusion, deux phases non simultanées, entre l'indétermination et l'incomplétude.

La phase suivante consiste à *reformuler les contraires* de manière plus englobante de façon à vérifier cette propriété et se diriger vers la formulation d'un tiers inclus qui désignera le processus englobant ces deux contraires sans se réduire ni à l'un ni à l'autre. C'est l'une des phases les plus délicates en termes sémantiques : il s'agit de « *réunir sans confondre et distinguer sans séparer* » [Gigand 2010, 45], ce que Morin écrit aussi sous la forme « *articuler ce qui est séparé et relier ce qui est disjoint* » [Morin 1977, 15]. Ici, le couple de la *réalisation* en tension avec l'*artefact* devient le couple

achèvement / *production*. Nous sommes bien dans l'énergie des contraires : sans production, l'achèvement n'est jamais atteint ; et dès qu'il l'est, la production cesse. La *modélisation* et la *proposition* sont renommées *formulation* / *suggestion*, dans l'idée que ne peut être formulé que ce qui a été suggéré au préalable, et qu'une fois atteint le stade de la formulation, elle est souvent très suggestive. Et le couple *élaboration* / *diffusion* est rebaptisé *conception* / *circulation* : seul ce qui est conçu peut circuler, et ce qui n'est pas conçu n'a pas lieu d'être, donc de se mouvoir.

La notion de *tiers inclus*, issue de Lupasco [1951], surgit au moment de la contradiction logique maximale. Elle constitue l'un des objectifs fondamentaux de l'exercice trialectique, et nous intéresse d'autant plus qu'elle représente une dialogique entre les deux termes issus de la reformulation des contraires. Il s'agit d'ouvrir un autre niveau de réalité, de dépasser en englobant, tout en étant encore autre chose [744] ! Le tiers inclus de l'achèvement et de la production est *l'exploitation*, qui recouvre à la fois l'action et son résultat. Le tiers inclus ouvrant un autre niveau de réalité entre la formulation et la suggestion est *l'explicitation*. Quant au tiers inclus dépassant la conception et la circulation tout en les englobant, c'est *l'exploration*.

La toute dernière étape consiste à extraire de chaque tiers inclus des *concepts terrains*, qui retranscrivent au niveau existentiel ce que désignent les tiers inclus. Dénommés génériquement « *Terrains A, B et C* » sur le schéma par manque de place, les propositions de concepts (non achevées, et éminemment discutables) sont les suivantes. Pour l'exploitation : rendement, mission, utilisation, épuisement, clôture. Pour l'explicitation : motivation, formation, influence, persuasion, recommandation, théâtre, rhétorique. Pour l'exploration : invention, découverte, parcours, abstraction, logistique, prise de données. C'est une opération dans laquelle il convient de ne pas trop spécifier le concept, ce qui peut donner l'impression d'un certain flottement. Les concepts-terrain génériques, *Action*, *Attitude* et *Adaptation*, permettent de guider le travail lexical (lequel en l'état doit encore être approfondi, car ces concepts sont essentiels pour une exploitation ultérieure efficiente).

Arrivés à ce stade, l'exégèse du schéma nous a réservé une belle et agréable surprise de voir apparaître une formidable ternaire de tiers inclus *Exploitation* / *Explicitation* / *Exploration,* une sorte de *Expl-cube* qui fait donc pendant à la ternaire de dérivées *Pro-cube Processus* / *Produit* / *Projet*. Ainsi, on peut reconsidérer l'ensemble et constater que les trois dérivées impliquent un lancement, une contribution : en latin, *produire*, c'est guider la marche ; *projeter*, c'est jeter en avant ; *procéder*, c'est avancer. De leur côté, les trois tiers inclus impliquent une extraction. Ces deux mouvements antagonistes donnent matière à réflexion par rapport à la problématique du management et de la gestion. Nous nous retenons d'en donner ici une interprétation appliquée au domaine de la conception collaborative : ce sont là des espaces nouveaux qui s'ouvrent devant nos yeux émerveillés, dans la perspective d'une hypernavigation dans l'espace *Ω (conception intégration réalisation)*.

Tous ces rouages de la « complexitude » font l'objet d'un ordonnancement du schéma de base sur lesquels nous ne nous appesantissons pas davantage [745]. Nous conclurons sur le constat que ce schéma trialectique est un dépassement du modèle concentrique du manageur technique, et qu'on assiste à une montée en puissance du modèle trialectique surtout mis en regard avec le modèle interfacial. Nous

744. Gigand cite l'exemple (très parlant pour un concepteur) du *cylindre* qui sera le tiers inclus du cercle et du rectangle, vus respectivement de face et de côté.

745. Soulignons que cette géométrie simple en apparence cache une dizaine de notions de base fondamentales pour son fonctionnement : concept de limite, d'invariance, d'antagonisme non symétrique, de souplesse contextuelle, d'équivalence de valeur d'écart, de processus d'observation consciente, de tiers inclus (dont la maîtrise est délicate), de processus trialectique concernant le collectif, le processuel, les temporalités, les binômes trialectiques antagonistes, le rôle fondamental de la perception, la notion d'accès, le concept d'énergie, … Tout cela est nécessaire pour accéder au niveau de finesse d'analyse requise dans certaines situations. Gigand répète fréquemment : « *J'en reste moi-même le premier étudiant* ».

avons deux modèles complémentaires, qu'il s'agira de faire fonctionner simultanément : la trialectique comme hypercompas pour s'orienter dans des espaces d'échanges bien définis par le modèle transactionnel de l'acteur d'interface. (Je mentionne en passant la notion de « *constellations de trialectiques* » que Gigand introduit également, et dont on pourrait imaginer une analogie avec notre modèle de la cotte de mailles).

Le travail est immense pour reprendre les notions introduites lors du développement de notre modèle d'acteur d'interface. Il constitue une perspective de recherche, tant pour la compréhension de notre modèle que pour l'enrichissement de l'approche trialectique et pour son application au domaine du management et du génie industriel. L'on s'interrogera ainsi sur les équivalences éventuelles entre les différents types d'interfaces, transactions et traductions formant ternaires d'une part, et les dérivées des dérivées d'autre part : que dire d'un rapprochement *Adaptation d'impédance* = Gestion de l'attention, *Filtre* = Partage des tâches (efforts), *Répartition* = Optimisation des ressources ? De même pour les traductions internes à mettre en regard avec les invariants : Boucle de conciliation → Indétermination, Boucle de médiation → Autoréférence, Boucle d'arbitrage → Incomplétude. On pourra encore observer les résonances entre les ternaires (initiation, synchronisation, orientation) et (action, attitude, gestion). La notation dialogique en Ω conserve à cet égard toute sa pertinence, et pourrait même se rapprocher d'une formulation trialectique [746]. Nous pourrions ainsi par exemple envisager de réduire la triade « *ce que l'on me fait faire* » / « *ce que je fais* » / « *ce que je fais faire* » en une dialogique à trois termes, ou une *trialectique de l'action*, *Ω (obéissance, initiative, procuration)…* La partie III contient un grand nombre d'autres schémas trialectiques potentiels qui, une fois développés, éclaireraient en retour notre modèle.

Un exemple parmi tant d'autres de l'enrichissement possible par la trialectique du cas de *Med*Austron : prenons d'une part la carence en termes de formation et d'accompagnement des acteurs du projet d'une part, et d'autre part le couple dialectique « assimilation / accommodation » de Piaget. Et imaginons [747] que ces deux notions soient en fait deux des trois dérivées d'une trialectique de l'*adaptation* : *assimilation* (autoréférence) et *accommodation* (indétermination) sont alors complétées par l'*affirmation* (incomplétude). Cette approche permet de déceler ainsi les carences concrètes sur le terrain et pour la formation : celle de l'adaptation au regard de l'autre – ce que j'ai appelé *adaptation d'impédance*, précisément. Partant du postulat de parité, à savoir que tous les échelons hiérarchiques qui participent à la formation le font en acceptant le pari de la parité intellectuelle par la reconnaissance de l'intelligence des autres (*assimilation*), ils s'ouvrent à des intelligences d'une autre nature peut-être, différente, et qui doit savoir s'affirmer (*affirmation* de soi), mais complémentaire : de leur place, de leur point de vue, avec chacun ses outils, conscients ou non, ils voient et ils se représentent (*accommodation*).

L'enjeu devient alors : construire, co-construire une représentation commune. Et pour cela, rien de mieux que de construire un espace d'échanges. Celui de cette formation initiale avec accompagnement le long du projet est le plus vaste des espaces d'échanges à construire d'emblée pour tout projet. Cet exercice est toutefois ici hâtivement mené, il mériterait d'être développé avec plus de soins ; son esquisse aura montré en peu de mots les éclairages possibles de la trialectique.

746. Une telle assimilation est sans doute hâtive et mérite assurément réflexion : les concepts ne sont pas strictement équivalents.

747. Merci à G. Gigand de m'avoir signalé les réflexions qu'il mène sur la question avec le Pr J.-P. Bréchet. Je les leur emprunte en constatant, ici comme souvent, qu'elles convergent étonnamment avec les miennes.

∴

Munis de notre hypercompas trialectique, nous avons désormais bien des champs à explorer. Sa construction nous a permis d'atteindre le triple objectif du présent chapitre : il offre une approche complexe solide à notre circulation ternaire de *Procube* ; il propose une modélisation du management technique qui place résolument le manageur technique à la croisée des chemins, et renforce notre thèse de le considérer comme un acteur d'interface ; et il illustre la richesse d'un processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)*, éventuellement transcendé dans sa résonance trialectique avec une ternaire dialogique *Ω (Exploration, Explicitation, Exploitation).*

Un hypercompas sert à hypernaviguer, par exemple dans la dynamique des espaces d'échanges dont nous avons montré l'importance pour le manageur technique constitué en acteur d'interface. C'est donc la pièce d'équipement qui nous manquait, celle qui relie l'ensemble des dimensions du processus collaboratif *Ω (Conception, Intégration, Réalisation).*

Comment est-ce que cela aurait pu se traduire concrètement sur le terrain de *Med*Austron ou d'ATLAS ? Et surtout, comment cela pourra-t-il se traduire concrètement sur les futurs terrains de tout manageur technique qui voudrait agir ↔ penser ? « *C'est une bonne question, et je ne voudrais pas la gâcher par une réponse* » [748]. La question est pertinente, et nous proposons au chapitre 17 une certaine manière – dans la lignée de l'approche complexe – de l'aborder…

748. John Cage, Post-scriptum, "Conférence sur rien", *Silence*, trad. V. Barras, Ed. Héros-limite, 2004.

Cinquième clamot. *Vision des choses*

Assertifuture [749]

Vers 1163, un nouvel arrivant à Paris entend un bruit régulier, comme quelqu'un qui frappe sans arrêt un objet dur. Il suit le bruit et découvre un grand chantier auquel trois hommes travaillent.

Il se dirige vers le premier qui travaille dur un morceau de pierre à l'aide d'un outil, et lui demande ce qu'il fait. L'autre lui répond, visiblement agacé : « *Tu le vois bien ce que je fais, je taille des pierres !* »

Il en voit un second occupé à la même tâche et lui pose la même question, à laquelle celui-ci répond aimablement : « *Je taille la pierre angulaire d'une arche de voûte* ».

Finalement, il interroge de la même manière un troisième. Ce dernier lui répond d'un ton enthousiaste : « *Moi, Monsieur, je suis tailleur de pierre et je bâtis une cathédrale !* »

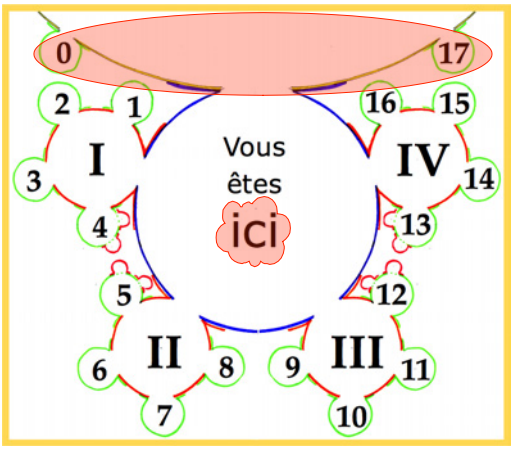
Ce dernier avait, lui, trouvé un sens à ses gestes, la construction de... Notre-Dame de Paris !

Cette métaphore illustre bien trois dimensions importante dans la gestion et la communication organisationnelle :

- Le niveau 1, les [produits] [750] (*je taille des pierres*) ;
- Le niveau 2, les processus (*je taille la pierre angulaire d'une arche de voûte*) illustre la fonction de l'action ;
- Le niveau 3, le projet (*je bâtis une cathédrale*) illustre toute l'importance du sens de l'action et de la vision d'entreprise, à communiquer et à partager à tous les niveaux.

749. Site de l'entreprise *Assertifuture*, http://www.assertifuture.be/fr/home
http://28581.frog01-direct.proximedia.com/28581/wwwroot/media/images/upload/Metaphore-Les-tailleurs-de-pierre.pdf

750. Le terme original est « *contenus* ». Je me suis permis cette légère adaptation.



Coda

Da capo al coda

À force de construire, me fit-il en souriant, je crois bien que je me suis construit moi-même.

Paul Valéry [751]

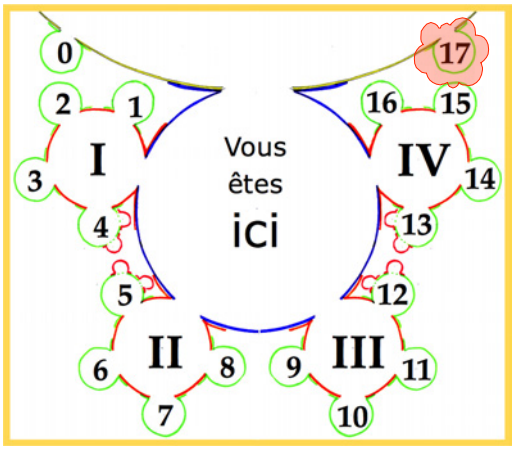
751. *Eupalinos ou l'Architecte*, Gallimard, 1923, p. 92.

Sommaire de la coda

Chapitre 17. Bouclages et ouvertures.....449

Remerciements.....457

Ultime clamot. Construire.....461



Chapitre 17. Bouclages et ouvertures

Où, en bouclant (sur) le présent mémoire, l'on s'ouvre à l'à-venir

Strange loops are shy creatures, and they tend to avoid the light of day.

Douglas Hofstadter [752]

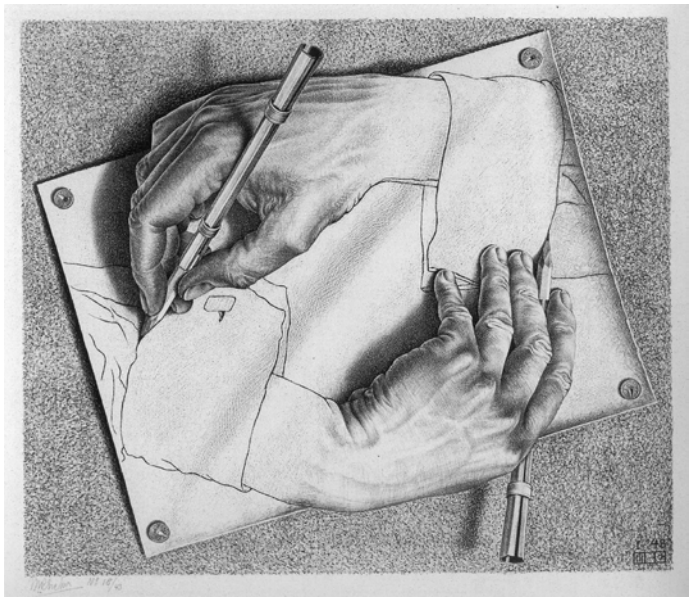


Figure 17-1 : *Mains dessinant*

M. C. Escher, Lithographie, 1948

752. *I am a strange loop*, Basic Books, 2007, p. 104.

« Les boucles étranges sont des créatures timides, qui craignent la lumière du jour. » (*Je suis une boucle étrange*, trad. J. Bambaggi, Dunod, 2008, p. 132.)

Paraphrasons et prolongeons Camus, cité en épigraphe de la partie III : « *Il y a un temps pour boucler.* » Boucler, c'est, dans l'acception la plus commune, terminer : boucler une affaire, boucler un dossier. C'est fermer la boucle de la sangle qui le contient. C'est donc boucler la boucle, au point de départ. C'est ainsi que nous nous retrouvons au prologue du chapitre 0, après avoir parcouru une bien étrange boucle. « *Le phénomène de Boucle Étrange se produit chaque fois que, à la suite d'une élévation (ou d'une descente) le long d'une échelle hiérarchique quelconque, nous nous retrouvons, à notre grande surprise, au point de départ.* » [753]

Pourquoi en sommes-nous revenus au point de départ ? Comparons les situations : un individu, au seuil d'un nouvel espace, muni d'une carte et d'une boussole, cherchant sa voie. Premiers cheminements. À l'époque, muni de sa petite carte en papier et de sa petite boussole magnétique, flottant dans la neige qui masquait les montagnes abolies, il avait trouvé. Nous voici, aux confins de cette thèse qui s'achève, munis de nouveaux espaces à explorer, et de nouveaux outils pour nous y aider : hypercompas de la trialectique, hypercartes de la modélisation de processus, hyperviatique du modèle transactionnel d'acteur d'interface. Et toujours, notre voie à trouver : celle d'un manageur technique en chemin, celle d'un chercheur en quête, celle d'un être humain en devenir. Moteur d'une boucle dialogique qui fonde la construction de la thèse et inspire son déploiement en *omegador.*

Un retour sur le passé, muni de ces nouveaux outils, pour imaginer « ce qui se serait passé si », c'est ce que cette boucle étrange apporterait. C'est simple : *da capo al coda*, dit le musicien, « *depuis la tête jusqu'à la queue* ». Recommencer au début, et aller jusqu'à la fin. Retourner au chapitre 0, relire la thèse, et re-parcourir l'ensemble des cas de la partie II en imaginant agir ↔ penser. Se replonger dans la matrice méthodologique, la relire au filtre des ternaires trialectiques, et élaborer des outils complexes sans cesse plus performants. Retrouver *Med*Austron et l'équiper de cette manière. Constater que c'est mieux que dans les cas de la partie II, et que ce n'est pas encore parfait. Et recommencer.

L'approche complexe exige cette humilité d'un horizon fuyant, d'une incomplétude congénitale, d'une indétermination immanente. S'imaginer autoréférentiellement en « *Sisyphe heureux* » qui recommence inlassablement, construit des espaces d'échanges, consulte son hypercompas dont le rôle est d'aider au dialogue, agir en acteur d'interfaces. Si donc il existe une approche complexe, c'est celle qui consiste à savoir qu'elle est en perpétuelle dynamique, et qu'elle inclut celui qui l'adopte.

Cette approche complexe, nous nous sommes attachés à l'adopter pour mieux saisir la nature du processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation. Nous avons vu que l'une des clés réside dans la mise en place de systèmes de gestion des données et du cycle de vie des articles pour espérer y inclure la dimension de réalisation [Fathallah et al. 2010]. Nous avons commencé par vouloir mettre un bateau dans une bouteille, et nous finissons en réinventant la boussole… C'est que la mise en place de ces processus de conception et d'intégration et de gestion des espaces est elle-même un processus en soi : « *auto-émergence récursive du processus* », avons-nous écrit à la fin du chapitre 12. Le manageur technique est comme ce capitaine de navire des temps antiques qui cherchait à traverser l'Adriatique [Reboton 2010] : il navigue encore à vue, tout en étant à l'affût de données satellite.

Les perspectives sur le plan de notre processus collaboratif devenu *Ω (Conception, Intégration, Réalisation)* appellent à se rapprocher des travaux sur la navigation

753. Première utilisation de l'expression *Hiérarchie Enchevêtrée* [Hofstadter 1985, 12]. Voir [Kubar 2008].

de projet dynamique [Freisleben et Vajna 2002], dont certains développements basés sur cette cartographie moderne qu'est devenue *Google Earth* [Hipp, Mutschler et Reichert 2011] sont certainement des sources d'inspiration possible pour cette écologie des espaces d'échanges qu'il nous faudra commencer à élaborer. Ce sont des perspectives qui tracent la route des prochaines traversées.

Une coda bien composée est une coda qui achève le morceau d'un rythme allant. Elle sera donc brève : elle contient le présent chapitre, les *Remerciements*, et un ultime *Clamot*, cette pièce qui lie différentes parties d'un ensemble de charpente. Tout comme le *Préambule* et son chapitre 0 en constituaient une interface d'entrée, nous sommes ici à l'interface de sortie entre la réalisation de cette thèse en recherche-action et le retour au terrain (en particulier du CERN). Nous sortons des profondeurs que nous avons creusées tout au long de ces quelque 460 pages (il ne s'en rajoutera guère désormais). Quels souvenirs allons-nous conserver de ce voyage ? Le présent chapitre s'articule autour de la récapitulation de quatre chemins parcourus lors de la thèse : professionnel, académique, intersubjectif, et personnel.

a. Une évolution professionnelle. Instrumenter l'action

ATLAS est un projet qui fonctionne admirablement, et dont le premier succès est la découverte (conjointement avec CMS, et grâce aux performances remarquables du LHC) en juillet 2012 d'un boson qui ressemble assez fortement au boson de Higgs. Après avoir souvent douté de la réussite de ce projet, j'éprouve la fierté, je crois légitime, d'avoir participé activement à une aventure collective extraordinaire, sans doute unique, et probablement destinée à le rester.

D'autres projets sont en préparation au CERN, outre le CLIC. La Figure 17.1 issue des perspectives dégagées par le directorat du CERN au mois de mars 2012 en donne une idée sur le très long terme : améliorer la luminosité, puis l'énergie du LHC, y injecter des électrons. Autant de projets qui nécessitent et nécessiteront de plus en plus souvent la mise en place de collaborations avec d'autres instituts. Déjà la structure de management du projet HL-LHC s'inspire fortement des innovations managériales d'ATLAS.

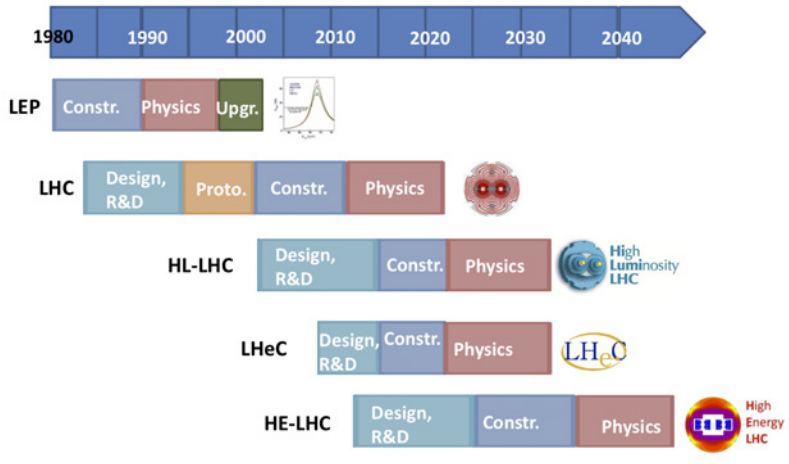


Figure 17.1: 1980-2040 : les grands programmes futurs du CERN

CERN, mars 2012

Ayant intégré début 2012 le *Projects support office*, le bureau d'appui aux projets rattaché au Directeur des accélérateurs et de la technologie, et chargée d'apporter soutien et conseil par implication active dans les projets du CERN, je suis certainement

au meilleur endroit pour poursuivre les réflexions sur l'agir ↔ penser, et sur les bonnes pratiques à développer pour ces projets hors norme d'installations scientifiques avec faisceaux de particules. J'espère aussi, de cette position, contribuer activement à ce qui, nous l'avons vu au chapitre 16, constitue une petite césure : l'implication du projet dans la dynamique collaborative du processus *Ω (Conception, Intégration, Réalisation).*

Je voudrais aussi souligner l'évolution dans mon ressenti professionnel au fil des ans. La parabole des tailleurs de pierre, dont j'ai exploitée les variations dans les clamots, l'illustre bien. J'ai connu des périodes où je me sentais comme le manœuvre de base, même pas fier de faire ce que l'on me demandait de faire ; j'ai eu des périodes où, œuvrant sur un sous-projet, je me heurtais à mes pairs avec la difficulté de tailler ma pierre de sorte qu'elle s'adapte aux exigences de l'ensemble ; j'ai eu des périodes où je me sentais exister parce que j'avais le pouvoir de demander à d'autres de faire ce que je voulais qu'ils fissent, que ce soit une cathédrale ou un bazar [Raymond 1999]. Et puis un jour, j'ai compris que c'était une fallacieuse manière de voir que de considérer le premier comme un repoussoir et le dernier comme un modèle à égaler. L'équilibre consiste à contacter en soi les trois instances, et à savoir en manifester concrètement l'expression. C'est la base de la congruence de l'acteur d'interface. Et c'est le fondement d'une pratique professionnelle respectueuse.

> *Et si, pour diriger des hommes, il fallait avant tout savoir soi-même où l'on va, personnellement d'abord, et puis professionnellement avec un job cohérent avec ses propres valeurs ?* [Fieux-Ruef 1997]

b. Des jalons académiques. La figure de l'interface

Recherche-action immergée, doctorant dans sa propre organisation : j'ai illustré que cette approche était fructueuse et propice à l'élaboration de savoirs actionnables. L'accès à des données issues du terrain, non archivées, participant de cette « *littérature grise* » [Vinck 1997, 175] constituée de toutes les notes, mémoranda, courriels, compte-rendus qui en disent tant sur la réalité quotidienne de ces grands projets dont on retient trop volontiers uniquement les grands résultats scientifiques de manière désincarnée. C'est donc aussi en songeant à contribuer à une autre histoire des sciences et des techniques que j'ai tenu à construire mes études de cas de manière assez approfondie pour donner à voir ces strates successives de documents et de traces laissées à la postérité par des acteurs peu préoccupés de la mémoire de leurs actions.

La contribution principale de la thèse au grand omega, celui de la communauté des chercheurs, est sans doute le modèle transactionnel de l'acteur d'interface, et l'approche nouvelle qui est proposée pour analyser la position et le rôle du manageur technique dans l'action quotidienne des grands projets complexes.

c. Une voie intersubjective. La co-construction et la complexité

Nous avons à plusieurs reprises cité Morin qui prône la « *réintroduction du sujet connaissant dans la connaissance* ». C'est une position épistémologique délicate, et parfois psychologiquement exigeante que de *réintégrer l'observateur dans le champ de son observation*. Ne serait-ce que du point de vue de l'écriture, elle exige une distanciation à la troisième personne [Coghlan 2007] dans laquelle la première soit incluse, y compris dans sa dynamique d'échanges avec la deuxième (§ 4.1.1 p. 102). C'était le premier obstacle de la construction complexe de la thèse, posé d'emblée. Bachelard le souligne :

> *En réalité, il n'y a pas de phénomènes simples ; le phénomène est un tissu de relations. Il n'y a pas de nature simple, de substance simple, la substance est une*

> *contexture d'attributs. Il n'y a pas d'idée simple, parce qu'une idée simple […] doit être insérée, pour être comprise, dans un système complexe de pensées et d'expériences.* [Bachelard 1934, 152]

La dynamique des espaces d'échanges est précisément de cette nature : s'ouvrir aux systèmes complexes de pensées que chacun recèle en lui (sans en avoir nécessairement conscience), et construire des ponts, des adaptations d'impédance, relier… « *Relier, relier toujours* » [Morin 2005, 48, n. 7]. Et accueillir dans ces espaces d'échanges le conflit dans sa dimension constructive [Benasayag et Del Rey 2007], accepter de considérer les phénomènes dans leur complexité intrinsèque, qui inclut aussi la variété des représentations que l'on s'en fait.

> *La lutte entre manichéisme et réductionnisme ne peut se borner à faire appel à la rationalité, elle ne peut devenir efficace que si l'on développe, à partir d'une réforme de l'enseignement, une pensée complexe capable de voir l'ensemble des caractères divers ou ambivalents d'un même phénomène, d'une même population, d'une même personne,* ***y compris soi-même****.* [Hessel et Morin 2011, 58]

Un espace d'échanges est un pas vers une co-construction co-construite intersubjective, qui est le fondement même de toute collaboration.

d. Interfaces mythologiques

Il est, pour finir, deux acteurs d'interface mythologiques dont je souhaite évoquer en contrepoint la symbolique : Atlas, et Prométhée (Figure 17.2).

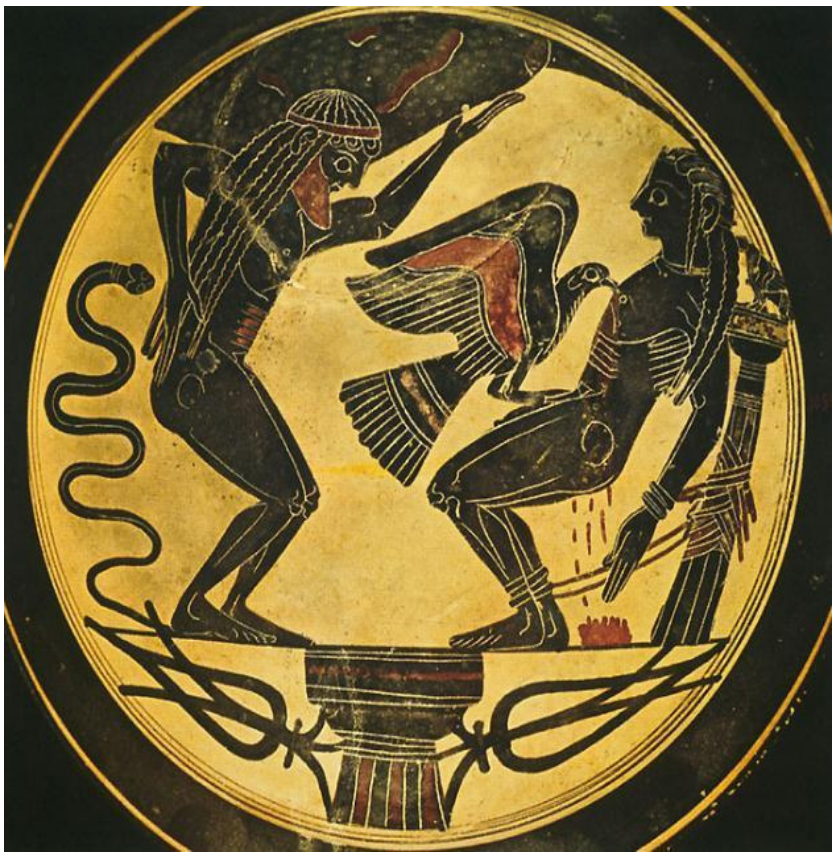


Figure 17.2 : Atlas et Prométhée

Coupe à figures noires dite laconique, attribuée au peintre d'Arcésilas, fabriquée à Sparte vers 550 avant notre ère, retrouvée à Cerveteri, conservée au musée du Vatican

Le premier d'entre eux est bien entendu le titan Atlas, éponyme de notre expérience, qui fut condamné par Zeus à séparer les Cieux de la Terre. Belle image d'un acteur d'interface, chantée par le poète Heine :

Ich unglücksel'ger Atlas! Eine Welt,

Die ganze Welt der Schmerzen muß ich tragen,

Ich trage Unerträgliches, und brechen

Will mir das Herz im Leibe.

Du stolzes Herz, du hast es ja gewollt !

Du wolltest glücklich sein, unendlich glücklich,

Oder unendlich elend, stolzes Herz,

Und jetzo bist du elend. [754]

L'autre figure mythologique est celle, bien connue, de Prométhée, condamné, lui aussi par Zeus, à se faire dévorer le foie pour avoir voulu dérober le feu aux Dieux et le donner aux hommes. Se constituer en acteur d'interface entre le panthéon et l'humanité est assurément une position non dénuée d'un certain danger.

Ce qui est moins connu, c'est que Prométhée (le LHC apportant aux physiciens le feu de sa haute densité d'énergie) et Atlas (recevant ce feu pour séparer le signal céleste du bruit terrestre), ces deux-là étaient *frères* selon la mythologie grecque. On pourra y voir une illustration particulière des relations d'interfaces hétérarchiques évoquées au chapitre 11.

e. Un chemin personnel et récursif

Nous avons au fil des pages beaucoup réfléchi sur le rôle du manageur technique. Nous avions souligné dès le chapitre 3 la résonance biographique de cette réflexion, qui en fait dépasse largement le cadre professionnel évoqué plus haut. Il s'agit d'un autre jeu qui se joue ici, le jeu du « *je* », celui du chercheur à la recherche de lui-même [Delessert et al. 1984].

Engager pareille réflexion à la dernière page de la thèse, c'est tenter de relever une gageure incommensurable. Et pourtant tellement fondamentale et tellement négligée, y compris du point de vue épistémologique :

> *Nous n'avons l'accès que d'un être humain – nous-même – et il est impossible d'inventorier les autres, si ce n'est par rapport à cet inventaire premier que nous ne pouvons trouver qu'en nous. Si l'on ne se connaît pas soi-même, on ne connaîtra jamais personne. Et oserais-je dire qu'on ne se connaît qu'à l'usage ?* [Tillion 2009, 49]

Ce n'est pas le philosophe qui donne un sens à la vie ; c'est la vie qui confère une signification aux phrases par lesquelles le philosophe pose la question de la vie, et tente d'y répondre. Or, le philosophe est un être vivant – qui donc lui donne un sens ?

Il convient de dépasser récursivement la question. Et ce dépassement est inaccessible à une écriture linéaire. D'où l'*écriture auto-récursive* suivante, en guise de colophon, inspirée du thème de *Je suis une boucle étrange* [Hofstadter 2008] : en répondant à la question « *qui suis-je* » – et ce n'est pas le moindre des acquis de la thèse –, il **boucle** le propos, dans tous les sens du terme :

754. « Moi l'infortuné Atlas ! Moi l'infortuné Atlas ! / Le monde, le monde entier des peines – je le dois porter. / Je porte l'insupportable, / Et en moi mon cœur voudrait se briser. / Ô cœur trop fier, tu l'auras bien voulu ! / Tu voulus être heureux – heureux sans partage ; / Ou pour jamais malheureux – cœur trop fier. / À présent tu es malheureux. » Heinrich Heine, *Buch der Lieder*, n°24, 1827, n°24. Trad. D. Le Marrec.


celui qui cherche qui je suis.

Remerciements

« Tu es le chef, Boria, et je t'obéirai.
– Je n'ai pas besoin de ta promesse, Stepan. Nous sommes tous frères. »

Albert Camus, *Les Justes*, Acte premier

Travail solitaire, véritable ascèse dont l'auteur sort, paraît-il, transformé, une thèse est aussi un travail d'équipe, dimension essentielle à son aboutissement. À l'issue de ce mémoire, je veux témoigner ma reconnaissance à celles et ceux qui m'ont accompagné sur le chemin.

Quelques non-humains

Toute ma gratitude à ces quatre Mac qui ont été mes plus proches compagnons lors des centaines d'heures de rumination, milliers de sauvegardes, millions de frappes de touches :

- dès le début, un petit MacBook 13" blanc, toujours actif, et vaillant suppléant ;
- un MacBookPro 15" du printemps 2009 à septembre 2011, malheureusement frappé de ***karōshi*** (過労死), ou "*mort par excès de travail*", en pleine campagne de Russie ;
- un MacBook Pro 8.2 15" série 2012,
- secondé pour la version définitive par un petit MacBook Air 11".

Le logiciel libre *NeoOffice* pour Mac (de la version 2.2 jusqu'à la version 3.3 Patch 3) est presque parvenu à satisfaire mes exigences, et n'a que rarement fait regretter *FrameMaker*, utilisé à l'époque de l'édition des *ATLAS Technical Design Reports*, qui n'a pas été porté sur Mac depuis sa version 8. Le navigateur libre *Firefox* et l'application de gestion bibliographique *Zotero* (dernière version 3.0.11.1) ont complété l'ouverture au reste du monde.

Quelques acteurs des terrains

Lors de la préparation du séminaire de la division EST sur les Pieds d'ATLAS donné en novembre 2004 et évoqué au chapitre 7, je m'étais prêté à l'exercice de dresser la liste alphabétique de toutes les personnes qui, à un titre ou un autre, étaient à ma connaissance intervenues sur le projet des *Pieds & Rails* d'ATLAS. Cela donne la liste suivante (l'organisme de rattachement correspondant à la date du séminaire ou à la date effective de la contribution au projet ; pour le personnel CERN, sont donnés la division et le groupe) :

• Yu. Arkhipov / Izhora • G. Arnau / EST-SM • G. Bachy / EP-ATI • J.-L. Baldy / ST-CE • D. Baynham / RAL (UK) • O. Beltramello / EP-ATI • G. Benincasa / EP-ATO • J. Bensinger / Brandeis Univ., Boston (US) • D. Bertet / EP-ATI • J.-P. Brachet / EST-MF • F. Bublex / PPE-EC • F. Butin / EP-ATI & EST-LEA • M. Cacciopoli / EST-MF • B. Calcagno / EP-TA3 • P. Charra / EP-TA3 • A. Chérif / EST-MF • L. Chevalier / CEA • V. D. Chevliouguine / Izhora • R. Colmagne / SPL • J.-P. Corso /

EP-TA3 • A. Dael / CEA • J.-M. Dalin / EST-SM • A. Dantchenko / Izhora • B. Daudin / EP-EC • C. Delamare / EST-ISS • A. Desirelli / TIS-GS • P. Deweulf / EST-MF • A. Doudarev / EP-ATI • N. Dudragne / PPE-EC • B. Duthion / EP-ATA • A. S. Evtouchenko / Izhora • L. Faisandel / EP-TA3 • G. Favre / EST-MF • A. B. Fenyuk / IHEP • W. Flegel / EP-TA3 • A. Foussat / EP-ATI • A. R. Ganine / Izhora • M. Gandel / EP-ATI • D. Geiss / EP-TA3 • H. Gerwig / EP-CMI • E. Gorbounov / Izhora • D. Gregorio / SPL • C. Guyot / CEA • M. Hatch / EP-ATI • H. Hoffmann / EP-ATO • E. Holtom / RAL (UK) • N. V. Iliuchechkine / Izhora • O. Jamet / EP-TA3 • B. Jean-Prost / EST-ME • G. A. Kislitsina / Izhora • T. Klioutchnikova / EP-ATI • P. G. Korobkov / Izhora • M. Kotamaki / EP-ATI • W. Kozanecki / CEA • N. Koulberg / DSU • N. V. Kourbatov / Izhora • T. Kurtyka / EST-ME • C. Lasseur / EST-SU • B. Lebègue / EST-LEA • P. Lécaille / CRISTO Grenoble • D. Lissauer / BNL • G. Lucas / EP-EC • A. LÜtke / EP-TA3 • D. Mergelkuhl / EST-SU • N. Mézin / EST-MF • G. Mikenberg / Weizmann, Israël • S. V. Minine / Izhora • T. Mirochnitchenko / Izhora • D. Mladenov / EP-ATI • G. Mouquin / ST-HM • D. Mouren-Provensal / EP-ATI • M. Nessi / EP-ATO • M. Nordberg / EP-ATO • T. Nyman / EP-ATI • Y. Pabot / CEA • R. Paul / EP-EC • S. Petit / EST-ISS • V. V. Petrov / Izhora • L. V. Pinaev / Gradan (Russie) • K. Pommès / EP-ATI • P. Ponsot / CEA • M. J. Price / EP-ATO • H. Rammer / ST-CE • V. S. Rogosine / Izhora • G. Rollinger / EP-EC • N. Roussakovitch / JINR Dubna • P. Schmid / EP-ATO • A. Seletski / EP-ATI • S. Sgobba / EST-SM • V. D. Shevlyuguine / Izhora • G. Suliaguine / Izhora • D. Steyaert / EP-ATI • Z. Sun / CEA • B. Szeless / EP-ATO • G. Tappern / RAL (UK) & EP-ATI • H. ten Kate / EP-ATI • V. Teterine / JINR Dubna • G. Titova / Izhora • W. van Emden / EP-EC • L. A. Vassiliev / Izhora • P. Védrine / CEA • R. Veness / LHC-VAC • R. von Boehn-Buchholz / EP • S. Vorojtsov / JINR Dubna • R. Vuillermet / TIS-GS • A. Wiart / EST-SU • W. Witzeling / EP-ATI • K. Wynn / Brandeis Univ., Boston (US) • J. Wotschak / EP-ATM • A. Zaitsev / IHEP Protvino• A. V. Zamichliaev / Izhora

Plus de cent dix personnes, rien que pour le cas du chapitre 7 ! Et cette liste est inévitablement incomplète (où tracer la frontière…) Elle est assez impressionnante à mes yeux pour que je ne prétende pas ici remercier nommément de leurs contributions conscientes ou inconscientes l'ensemble des personnes qui, au long de ces quelque vingt ans, ont croisé mon chemin, ou dont j'ai croisé le leur. Établir une liste exhaustive n'a donc tout simplement pas de sens. Après tout, ayant collaboré à ATLAS pendant près de dix ans, je suis co-auteur à la fois fier et modeste (parmi plus de deux mille co-signataires) de près de deux cents publications entre 2008 et 2012. L'une d'elles, [ATLAS collaboration, Aad et al. 2008], est évoquée dans la thèse (§ 2.5.2 p. 58). Elle est à ce jour (octobre 2012) citée près de mille trois cent fois ! Ainsi complétée, ma liste de personnes remerciées serait à la (dé)mesure de cette Collaboration. C'est pourquoi je remercie ici toutes celles et ceux qui figurent dans la liste de co-auteurs de cet article (p. ii–xxii), et également celles et ceux qui ont été inclus dans la liste des personnes remerciées pour leur contribution (*Annexe* p. 382–384).

Effectuer le travail de recension des collaborateurs pour les autres cas évoqués serait sans doute un peu moins difficile. Je m'en tiens à un remerciement collectif, qui n'est pas moins chaleureux, pour tous les membres des différents groupes de travail au CERN ou en dehors, que j'ai animés ou au sein desquels j'ai œuvré au mieux (CAEC, GrACQ, CoSAC, EDMS, SmT-Coord, PLM-BE, Club-PLM) : c'est souvent là que se sont discutées quelques-unes des idées qui ont parfois irrigué le présent travail de thèse. De même, les membres des bureaux d'études et d'intégration, au gré des différentes restructurations, ont été et demeurent des partenaires d'échanges nombreux. De toutes ces discussions, je retiens tout particulièrement celles aussi amicales qu'animées sur la gestion des données techniques avec (par ordre approximatif d'entrée en scène) Claude Hauviller, Antti Onnela, Werner Witzeling, Samy Chemli, Stéphan Petit, Philippe Trilhe, Claude Menot, Éric van Uytvinck, Christophe Delamare, Yvon Muttoni, Stéphane Maridor, Yann Boncompagni, Bruno Féral, …

Je remercie enfin tous les collègues du projet *Med*Austron, au CERN comme en Autriche, autrichiens, français, cernois ou autres, pour avoir partagé un remarquable terrain d'expérimentation, et m'avoir offert des retours nombreux et dynamiques sur les idées que j'ai prônées pendant près de deux ans. Merci à Pascal Landrot pour ses images précieuses. Une mention toute particulière pour Sylvain Bailly, auteur de quelques figures de la partie IV, et mon jeune compagnon sur la route parfois escarpée du déploiement *ex nihilo* d'un système de gestion de données du produit. Aux membres de l'équipe MAID que j'ai eu le plaisir de former et d'animer, et dont j'ai orienté les travaux, merci pour leur contribution, *vielen Dank*.

Quelques partenaires de thèse

Lorenza Salvatori, Anne Gentil-Beccot et Tullio Basaglia, de la bibliothèque du CERN, m'ont fourni, souvent dans des délais défiant toute concurrence, les articles dont j'avais besoin, même au bout du monde. Je les remercie de leur disponibilité sans faille.

Parmi les acteurs de terrain, certains ont été tenus au courant et ont accompagné le travail de la thèse proprement dite. Je les en remercie, en particulier les membres successifs de ma hiérarchie. Leur œil fut parfois interrogateur, voire dubitatif. Ils ont toutefois accepté, et parfois favorisé que des espaces de travail me soient octroyés : Claude Hauviller (aux tout débuts et tout au long) ; Hans Hoffmann, Mike Price, Wilfried Flegel et Vincent Vuillemin, à l'époque du cas n° 0 au tournant des années 2000 au sein de la division de Physique ; puis à nouveau Vincent Vuillemin et Paolo Ciriani, lors du lancement de la thèse en 2007 dans le département d'Ingénierie ; jusqu'à ceux qui m'ont permis de dégager du temps pour la rédaction : Simon Baird et Roberto Saban à EN ; et enfin Sylvain Weisz au *Projects Support Office*, que j'ai eu le plaisir de rejoindre début 2012.

Chacun en ce qui le concerne, et parfois ensemble, je remercie Markus Nordberg, ATLAS et CERN, et Saïd Yami, ERFI et Université de Montpellier, de m'avoir fortement encouragé à entreprendre ce travail. Le « *do it, you have to do it* » martelé et convaincu de l'un résonne encore dans mon esprit, tandis que l'autre argumentait sur l'intérêt de mes réflexions pour le domaine du management. L'organisation conjointe du colloque *ATLAS through the magnifying glass* en novembre 2008 a donné de belles retombées. J'aurais aimé que Max Boisot profite plus longtemps de son énorme et remarquable travail de synthèse.

Les philosophes Jean-Michel Besnier, Jean Gayon et Jean-Jacques Wunenburger, fidèles aux liens tissés depuis plus de vingt ans, ont bien voulu m'éclairer de leurs lumières lorsque le doute me prenait. Merci pour leurs encouragements au caractère transdisciplinaire de mes recherches (j'aimerais qu'ils les considèrent comme une forme de philosophie appliquée).

Au G-SCOP, j'ai été à la fois bien rarement présent et toujours chaleureusement accueilli. Merci à Yannick Frein, à son équipe, et aux collègues connus parfois de longue date – collaboration 3S/Cristo oblige – qui ont régulièrement suivi mes avancées.

Ma reconnaissance va aux membres du jury qui ont accepté de s'atteler à la tâche d'évaluer un travail de thèse un peu moins conventionnel qu'à l'habitude. Je les remercie en particulier de constituer un collectif aussi transdisciplinaire, depuis la physique jusqu'à la sociologie, en passant par la mécanique, le génie industriel, le management de projet et la gestion.

Avant que ce manuscrit soit soumis à ce digne aréopage, il a été, et avec quel soin, décortiqué par mon remarquable « cercle de lecteurs », dont je remercie la disponibilité et la vigilance, certains pour des morceaux choisis, quelques autres pour la quasi intégrale : Christian

Braesch, François Butin, Roger Eraers, Olivier Lavoisy et Éric Maertens. Michel Poss m'a fait l'amitié de commenter attentivement mes considérations sur le tolérancement, et Frédéric Charpentier celles sur la normalisation ISO GPS, au chapitre 5. Vincent Vuillemin a veillé à la qualité éthique de l'anonymisation et du respect des personnes citées au chapitre 3 et dans la partie II. Gérard Gigand a porté un intérêt croissant à mes travaux, et m'a offert des retours d'une rare pertinence et d'une profonde acuité : quel bel espace d'échanges. La variété de point de vue de tous ces lecteurs, de leur focalisation, de leur familiarité avec le sujet, de leurs critiques, tout cela a tissé un filet – une cotte de mailles – qui m'a protégé de bien des erreurs. Il en est de résiduelles, dont je porte seul la responsabilité.

Au cœur de ce cercle de lecteurs, qu'il me soit permis d'en distinguer trois : ils ont subi, le mot n'est pas trop faible, la quasi-totalité de mes ébauchons, ils ont tout su de mes doutes et de mes tâtonnements, ils m'ont accompagné dans les ténèbres, ils se sont réjouis quand la lumière atteignait la clairière.

À Pascal Lécaille, qui a cru plus tôt que moi que telle entreprise était possible. En fidèle miroir de ma thèse qui fait miroir à la sienne, il a partagé avec moi ses intuitions foudroyantes, et m'a sorti du doute quand lui-même y plongeait parfois. Cette thèse lui doit beaucoup plus qu'il ne le sait lui-même.

Dire de Jean-François Boujut que c'est un remarquable directeur de thèse, ce n'est pas tout dire. Il aura été au fil de ces années bien plus que cela. Seule son amitié indéfectible aura su me pardonner les délais non tenus, que le principe de Hofstadter ne suffit pas à tous justifier. Seule sa conviction inébranlable lui a fait me répéter inlassablement, lorsque j'étais à deux doigts de tout arrêter : « *Continue. C'est original, je te soutiens.* » Avec un tel ami comme directeur de thèse, je ne pouvais que reprendre l'effort. Comme de "*Justes*", il était le chef, je m'engageais à lui obéir ; et c'est sa fraternité qu'il m'offrait. C'est le plus beau des cadeaux.

Je remercie enfin, parmi ces lecteurs attentifs et sévères, exigeants et encourageants, la figure de mon père Xavier. En lui avouant à demi-mot ma folle entreprise d'écrire une thèse sur les vingt premières années de ma carrière, je n'avais pas idée d'à quel point il s'investirait dans son suivi. Chaque chapitre, chaque section, chaque paragraphe a bénéficié de son œil aiguisé – le mot n'est pas trop fort –, de ses mises en perspective étonnantes, de sa sagacité particulière. Pour ces moments partagés autour de ce mémoire, je le remercie infiniment, et j'aimerais symboliquement en partager les fruits espérés.

Que ma famille, proche et moins proche, ancienne et nouvelle, accepte ma gratitude pour avoir su comprendre que certaines vacances n'en étaient pas toujours pour moi. J'aimerais un jour savoir leur rendre le temps que je leur ai emprunté pour sacrifier à cette obnubilante thèse. Qu'ils veulent bien me pardonner. Au premier rang de ceux-ci, ma fille Charlotte et mon fils Justin, qui ont oscillé entre la curiosité et l'incompréhension ; j'espère un jour qu'ils trouveront intérêt, plaisir, et peut-être une once de fierté à lire ce mémoire.

La rédaction de ce mémoire s'est pour une large part déroulée sous l'égide d'une implacable, stimulante et empathique triple injonction : « пиши, пиши, пиши » [755]. Pour cela, et pour tout le reste, indicible et magique : спасибо моя любовь.

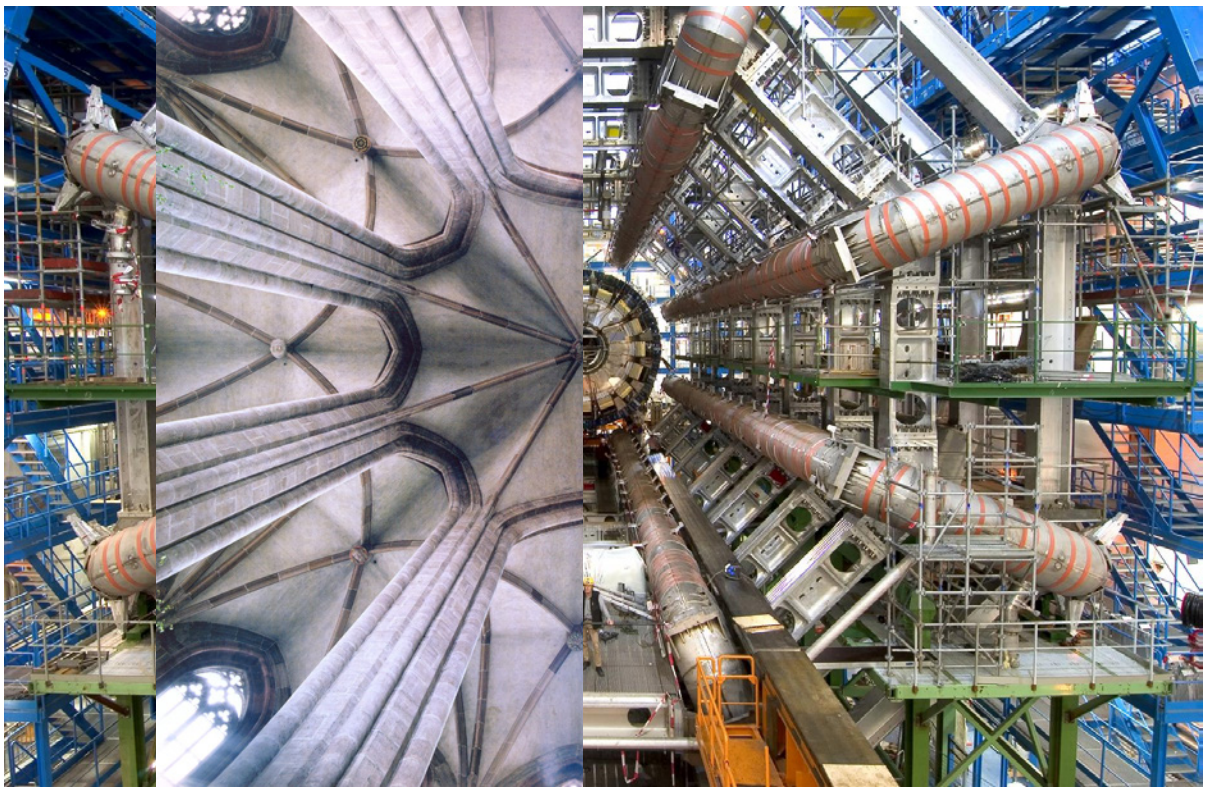
755. « *Écris, écris, écris !* » Оля, mars 2012.

Ultime clamot. *Construire*

> *Le verbe « construire » est parfait avec sa signification claire et précise et son nuage de métaphores. Il n'est pas adéquat pour exprimer les complexités et les nuances de l'histoire et des pratiques humaines.* [756]

Transcender cette réserve aura été l'un des objets de ce mémoire :

> *Every man-made structure, no matter how mundane, has a little bit of cathedral in it, since man cannot help but transcend himself as soon as he begins to design and construct.* [757]



En fond et à droite, expérience ATLAS au CERN (M. Brice, CERN-EX-0511013-01, novembre 2005). En superposition, chevet de la cathédrale de Nuremberg [Stephenson 2009, 109].

756. [Hacking 2008, 7].

757. « Chaque structure faite par l'homme, quelle qu'en soit la banalité, a un peu de cathédrale en elle, car l'homme ne peut s'empêcher de se transcender dès qu'il commence à concevoir et à construire. » [Florman 1976, 126]

Bibliographie

Cette bibliographie, extraite d'une base de données gérée par *Zotero*, est présentée selon les règles définies par le [*Lexique des règles typographiques en usage à l'Imprimerie nationale* 2002, 33].

Aad (G.), Abajyan (T.), Abbott (B.), Abdallah (J.), Abdel Khalek (S.), Abdelalim (A. A.) et al., « Observation of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson with the ATLAS detector at the LHC », *Physics Letters B* [En ligne], 17 septembre 2012, Vol. 716, n° 1, p. 1-29. DOI : 10.1016/j.physletb.2012.08.020 (consulté le 16 septembre 2012).

Ahearne (Jeremy), « "Vers un agir complexe": the Mouvement des Réseaux d'Échanges Réciproques de Savoirs and the writings of Edgar Morin », *French Cultural Studies* [En ligne], octobre 1997, Vol. 8, p. 341 -355. DOI : 10.1177/095715589700802406.

Aiosa (Barbara), Naït-Bouda (Farza) et Thévenon (Marie) (Sous la dir de.), *Repères et espace(s) : de la pluridisciplinarité à la polysémie : [actes du IVe Colloque des doctorants moniteurs de Grenoble, 28, 29 et 30 avril 2009]*, Grenoble : PUG, 2010.

Akkerman (Sanne F.) et Bakker (Arthur), « Boundary Crossing and Boundary Objects », *Review of Educational Research* [En ligne], 1 juin 2011, Vol. 81, n° 2, p. 132-169. DOI : 10.3102/0034654311404435.

Akrich (Madeleine), Callon (Michel) et Latour (Bruno), *Sociologie de la Traduction: Textes Fondateurs*, Presses des Mines, 2006. 69 p.

Albaladejo (C.) et Casabianca (F.), « Éléments pour un débat autour des pratiques de recherche-action », *La recherche-action. Ambitions, pratiques, débats. Etud. Rech. Syst. Agraires Dev.*, 1997, Vol. 30, p. 127–49.

Amaldi (U.) et Kraft (G.), « Hadrontherapy: Cancer Treatment With Proton and Carbon Beams », *Radiotherapy and Brachytherapy*, 2009, p. 165–171.

Ameri (F.) et Dutta (D.), « Product lifecycle management: closing the knowledge loops », *Computer-Aided Design and Applications*, 2005, Vol. 2, n° 5, p. 577–590.

Ameri (F.), Summers (J. D.), Mocko (G. M.) et Porter (M.), « Engineering design complexity: an investigation of methods and measures », *Research in Engineering Design*, 2008, Vol. 19, n° 2, p. 161–179.

Ameri (F.) et Summers (J. D.), « An ontology for representation of fixture design knowledge », *Computer Aided Design and Applications. v5*, 2008, p. 601–611.

Ancelin Schützenberger (Anne), *Aïe, mes aïeux! Liens transgénérationnels, secrets de famille, syndrome d'anniversaire, transmission des traumatismes et pratique du génosociogramme*, Paris : Desclée de Brouwer : La Méridienne, 2001.

Anderson (C.), « Russian Science Aid Falls Short », *Science* [En ligne], 10 septembre 1993, Vol. 261, p. 1380-1383. DOI : 10.1126/science.261.5127.1380.

ANSI, *ANSI/EIA 632:2003 - Processes for Engineering a System*, 2003.

Argyris (Chris) et Schön (Donald), *Theory in Practice: Increasing Professional Effectiveness*, 1re éd. Jossey-Bass, 1992. 260 p.

Argyris (Chris), *Savoir pour agir : Surmonter les obstacles à l'apprentissage organisationnel*, Nouv. éd.Dunod, 2003.

Argyris (Chris), « Actionable knowledge », in : *The Oxford Handbook of Organization Theory*, OUP Oxford, 2005. p. 423-452.

Artoos (K.), Capatina (O.), Huet (G.) et Nicquevert (B.), « Mechanical dynamic load of the LHC arc cryo-magnets during the installation », in : *Proceedings of EPAC, EPAC*. Luzern : 2004. p. 1849-1851.

Astley (W. G.) et Fombrun (C. J.), « Collective strategy: Social ecology of organizational environments », *Academy of Management Review*, 1983, p. 576–587.

Atlan (Henri), *Entre le cristal et la fumée*, Seuil, 1986. 285 p.

ATLAS collaboration, Aad (G.) et Al., « The ATLAS Experiment at the CERN Large Hadron Collider », *Journal of Instrumentation* [En ligne], 2008, Vol. 3, p. 1748–2221. DOI : doi:10.1088/1748-0221/3/08/S08003

ATLAS Collaboration, Armstrong (S. R.) et Al., *ATLAS: technical proposal for a general-purpose pp experiment at the large hadron collider at CERN*, Geneva : CERN, 1994.

ATLAS collaboration (The) et Foa (L.), *Memorandum of Understanding for Collaboration in the Construction of the ATLAS Detector*, 28 avril 1998,

ATLAS Technical Co-ordination Team, *ATLAS technical coordination: Technical Design Report*, CERN/LHCC/99-01 éd. Geneva : CERN, 1999. 622 p. (ATLAS TDR).

Aubert (Nicole), *Le culte de l'urgence : La société malade du temps*, Editions Flammarion, 2009. 375 p.

Auger (Pascale), *Manager des situations complexes : quelles compétences développer pour l'entreprise de demain ?*, Paris : Dunod, 2008.

Aumayr (Friedrich) et Technische Universität Wien, *Physics opportunities at MedAustron : white book*, 1st ed. Vienna : Univ. of Techn., 2009.

Avenier (Marie-José) et Schmitt (Christophe), « Élaborer des savoirs actionnables et les communiquer à des managers », *Revue française de gestion*, 2007, n° 5, p. 25–42.

Avenier (Marie-José) (Sous la dir de.), *La Stratégie «chemin faisant»* [En ligne], Economica, 1997. Disponible sur : < http://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00089940/>.

Avenier (Marie-José), « La complexité appelle une stratégie chemin faisant », *Revue Gestion 2000*, 1999, Vol. 16, n° 5, p. 13-34.

Avenier (Marie-José) (Sous la dir de.), *Ingénierie des pratiques collectives : la cordée et le quatuor*, Paris : l'Harmattan, 2000.

Avenier (Marie-José), « Designing a Collective Undertaking and Systemic Modelling: Potentially Fertile Concepts », in : *5th European Systems Science Congress*. Crete : Res-Systemica, 2002, p. 14–19.

Avenier (Marie-José), « Designing Management Systems for Coping with World Complexity: Lessons from Experience », in : *The Fourth Organization Studies Summer Workshop, Chypre, Juin*, 2008.

Avenier (Marie-José), « Franchir un fossé réputé infranchissable: construire des savoirs scientifiques pertinents pour la pratique », *Management & Avenir*, 2009, n° 10, p. 188–206.

Avison (D.), Lau (F.), Myers (M.) et Nielsen (P. A.), « Action research: making academic research relevant », *Communications of the ACM*, 1999, Vol. 42, n° 1, p. 94–97.

Axelrod (Robert), *Harnessing complexity : organizational implications of a scientific frontier*, New York : Basic Books, 2000.

Baccarini (D.), « The concept of project complexity – a review », *International Journal of Project Management*, 1996, Vol. 14, n° 4, p. 201–204.

Bachelard (Gaston), *Le nouvel esprit scientifique*, 7e éd. Paris : Presses universitaires de France, 1934.

Bachelard (Gaston), *La formation de l'esprit scientifique*, Librairie J Vrin, 2000. 304 p.

Bachy (Gérard) et Hameri (Ari Pekka), « What to be implemented at the early stage of a large-scale project », *International Journal of Project Management*, 1997, Vol. 15, n° 4, p. 211–218.

Bachy (Gérard), Hauviller (Claude), Messerli (Roland) et Mottier (Marcel), « Computer-aided engineering in high energy physics », *Civil Engineering*, 1988, Vol. 40, p. 120.

Bachy (Gérard), « Design, installation problems and criteria related to large accelerators », in : *Proceedings of the 1987 IEEE Particle Accelerator Conference: accelerator engineering and technology, March 16-19, 1987, Washington*, 1987, p. 1579.

Badawy (M. K.), *Developing managerial skills in engineers and scientists: Succeeding as a technical manager*, Wiley, 1995.

Bakhtine (Mikhail Mikhaïlovitch), *Problèmes de la Poétique de Dostoïevski*, L'Âge d'homme, 1929. 322 p.

Ballu (A.), Dufaure (J.) et Teissandier (D.), « An adaptive tolerance model for collaborative design », *Digital enterprise technology*, 2007, p. 233–240.

Bandara (W.), Gable (G. G.) et Rosemann (M.), « Factors and measures of business process modelling: model building through a multiple case study », *European Journal of Information Systems*, 2005, Vol. 14, n° 4, p. 347–360.

Barabási (A. L.) et Albert (R.), « Emergence of scaling in random networks », *Science*, 1999, Vol. 286, n° 5439, p. 509–512.

Barabási (A. L.), « Scale-free networks: a decade and beyond », *Science*, 2009, Vol. 325, n° 5939, p. 412–413.

Barbero-Soto (E.), Foraz (K.), Gaillard (H.), Hauviller (C.) et Weisz (S.), « Schedule evolution during the life-time of the LHC project », in : *Particle Accelerator Conference, 2007. PAC. IEEE* [En ligne], *Particle Accelerator Conference, 2007. PAC*. IEEE, 2007. p. 1592-1594. DOI : 10.1109/PAC.2007.4440833

Bardram (J. E.), « Plans as situated action: an activity theory approach to workflow systems », in : *Proceedings of the fifth conference on European Conference on Computer-Supported Cooperative Work*, 1997. p. 17–32.

Bartunek (J. M.) et Rynes (S. L.), « The Construction and Contributions of "Implications for Practice": What's in Them and What Might They Offer? », *The Academy of Management Learning and Education (AMLE)*, 2010, Vol. 9, n° 1, p. 100–117.

Batenburg (R.), Helms (R. W.) et Versendaal (J.), « PLM roadmap: stepwise PLM implementation based on the concepts of maturity and alignment », *International Journal of Product Lifecycle Management*, 2006, Vol. 1, n° 4, p. 333–351.

Baudlot (François), Buysse (Didier), Lamouri (Samir) et Paviot (Thomas), « La conception numérique modulaire de systèmes complexes », in : *Conception et Production Intégrées: CPI'2007, Conception et Production Intégrées: CPI'2007*. Rabat : 2007.

Baudlot (François), Buysse (Didier) et Lopes (Eric), *Procédé de modélisation tridimensionnelle d'un ensemble mécanique*, Brevet 2 872 314, 30 décembre 2005.

Beaune (Jean-Claude), *Philosophie des milieux techniques : la matière, l'instrument, l'automate*, Seyssel : Champ Vallon, 1998.

Bédard (J.), *Le pouvoir ou la vie: repenser les enjeux de notre temps*, Les Éditions Fides, 2008.

Bénaroya (Christophe), *L'économie de la Russie*, Paris : La Découverte, 2006.

Benasayag (Miguel) et Del Rey (Angélique), *Éloge du conflit*, Paris : La Découverte, 2007.

Bender (Bernd), Reinicke (Tamara), Wünsche (Tilo) et Blessing (Lucienne), « Application of methods from social sciences in design research », in : *Design 2002*. Dubrovnik : 2002.

Benedikt (Michael) et Bryant (Phil), « Head-to-head technology transfer for hadron therapy », *CERN Courier* [En ligne], 23 septembre 2011. Disponible sur : < http://cerncourier.com/cws/article/cern/47209 >.

Benedikt (Michael) et Wrulich (A.), « MedAustron—Project overview and status », *The European Physical Journal Plus*, 2011, Vol. 126, n° 7, p. 1–11.

Benedikt (Michael), « Optics design of the extraction lines for the MedAustron hadron therapy centre », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment* [En ligne], février 2005, Vol. 539, n° 1-2, p. 25-36. DOI : 10.1016/j.nima.2004.09.038

Benkirane (Réda) (Sous la dir de.), *La complexité, vertiges et promesses : 18 histoires de sciences*, [Nouvelle éd.]. Paris : Éd. le Pommier, 2006.

Berne (Eric), *Transactional Analysis in Pyschotherapy*, Grove Press/Evergreen Books, 1961.

Berne (Eric), *Des Jeux et des hommes*, Stock, 1984. 214 p.

Berne (Eric), *Analyse transactionnelle et psychothérapie*, Payot, 2001. 374 p.

Berners-Lee (Tim), *Weaving the Web: The original design and ultimate destiny of the World Wide Web by its inventor*, Harper San Francisco, 1999.

Berthet (Vincent) (Sous la dir de.), « De la technique à l'éthique: la responsabilité des ingénieurs », *Économie et Humanisme*, avril 1997, Vol. 340.

Berthoz (Alain), *La simplexité*, Odile Jacob, 2009. 256 p.

Besnier (Jean-Michel), *La croisée des sciences : questions d'un philosophe*, Paris : Seuil, 2006.

Bhattacharya (K.), Hull (R.) et Su (J.), « A data-centric design methodology for business processes ». In : *Handbook of Research on Business*, Citeseer, 2009. p. 503–531.

Biagioli (Mario) et Galison (Peter), *Scientific authorship : credit and intellectual property in science*, New York, NY : Routledge, 2003.

Biagioli (Mario), *The science studies reader*, New York : Routledge, 1999.

Blaeu (Joan), *Atlas maior*, Köln; London : Taschen, 2010.

Blanco (Eric), Grebici (Khadidja) et Rieu (Dominique), « A unified framework to manage information maturity in design process », *IJPD* [En ligne], 2007, Vol. 4, n° 3/4, p. 255. DOI : 10.1504/IJPD.2007.012495

Blanco (Eric), *L'émergence du produit dans la conception distribuée*, PhD thesis, Grenoble : Institut National Polytechnique de Grenoble, 1998.

Blessing (Lucienne), Chakrabarti (A.) et Wallace (K. M.), « An overview of descriptive studies in relation to a general design research methodology », *Designers–The Key to Successful Product Development*, 1998, p. 42–56.

Blessing (Lucienne) et Chakrabarti (Amaresh), « DRM: A Design Research Methodology », in : *The Sciences of Design*. Lyon : 2002.

Blessing (Lucienne T. M.) et Chakrabarti (Amaresh), *DRM, a Design Research Methodology*, Springer London Ltd, 2009. 416 p.

Bloor (David), *Knowledge and social imagery*, 2nd ed. Chicago : University of Chicago Press, 1976.

Bloor (David), *Socio-logie de la logique ou les Limites de l'épistémologie*, Pandore, 1983. 190 p.

Bocquet (JC), Patay (E.), Schindler (A.) et Dudezert (A.), « How to Build a Design System and its End-Product System? An Original Approach Called SCOS' », in : *Actes de conférence ICED 2007*, 2007.

Boisot (Max), Nordberg (Markus), Yami (Saïd) et Nicquevert (Bertrand) (Sous la dir de.), *Collisions and Collaboration: The Organization of Learning in the ATLAS Experiment at the LHC*, Oxford Univ. Press, 2011.

Bonnal (Pierre) et Braesch (Christian), « Une approche de gestion de projet orientée livrables peut-elle constituer les fondations d'une démarche «Lean»? », in : *Actes de la 1re Conférence internationale en gestion de projet, 1re Conférence internationale en gestion de projet*. Université du Québec à Trois-Rivières, Québec, Canada : 2012, p. 20.

Bossard (Pascale), Chanchevrier (Claude) et Leclair (Pierre), *Ingénierie concourante : de la technique au social*, [Paris]; Paris; [Montrouge] : AFITEP ; Economica ; ANACT, 1997.

Bottero (Pierre), *D'un monde à l'autre*, Rageot, 2003. 286 p.

Boujut (Jean-François) et Blanco (Eric), « Intermediary Objects as a Means to Foster Co-operation in Engineering Design », *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)* [En ligne], juin 2003, Vol. 12, n° 2, p. 205-219. DOI : 10.1023/A:1023980212097.

Boujut (Jean-François) et Laureillard (Pascal), « A co-operation framework for product-process integration in engineering design », *Design studies*, 2002, Vol. 23, n° 6, p. 497–513.

Boujut (Jean-François), *Des outils aux interfaces: Pour le développement de processus de conception coopératifs*, Mémoire d'habilitation à diriger les recherches, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.

Bourboulon (Isabelle), *Le livre noir du management*, Montrouge : Bayard, 2011.

Bourdet (Pierre), *Spécification géométrique des produits : cotation et tolérancement ISO*, Paris : Dunod, 2007.

Bourdieu (Emmanuel), *Savoir faire : contribution à une théorie dispositionnelle de l'action*, Paris : Seuil, 1998.

Bourdieu (Pierre), *Méditations pascaliennes : éléments pour une philosophie négative*, Seuil, 1997. 316 p.

Bourdieu (Pierre), *Science de la science et réflexivité : cours du Collège de France, 2000-2001*, Paris : Raisons d'agir, 2001.

Bourgine (Paul), Chavalarias (David) et Cohen-Boulakia (Claude) (Sous la dir de.), *Déterminismes et complexités : du physique à l'éthique. Autour d'Henri Atlan. Colloque de Cerisy*, Paris : La Découverte, 2008.

Bourim (L. D.) et Efimova (G. A.), *Ижорские заводы. Исторические очерки. [Izhorskiye Zavodi. Istoritcheskiye otcherki]*, A. O. Izhorskiye Zavodi : 1997.

Boutinet (Jean-Pierre), *Anthropologie du projet*, 2e éd. Presses Universitaires de France - PUF, 2012. 464 p.

Boutot (Alain), *L'Invention des formes*, O. Jacob, 1993. 376 p.

Bouveresse (Jacques), *Prodiges et vertiges de l'analogie : De l'abus de belles-lettres dans la pensée.*, Paris : Liber-Raisons d'agir, 1999.

Bowker (G. C.) et Star (S. L.), *Sorting things out: classification and its consequences*, The MIT Press, 1999.

Boy (G. A.) et Bradshaw (J.), « Perceived complexity versus internal complexity. Did we take into account expertise, reliability and cognitive stability? », in : *Proceedings of the Second Symposium on Resilience Engineering. November 8-10. Juan-Les-Pins*, 2006.

Boy (G. A.), « Cognitive function analysis for human-centered automation of safety-critical systems », in : *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*, 1998. p. 265–272.

Brézin (Édouard), *Demain, la physique*, Nouvelle éd. revue et augmentée. Paris : O. Jacob, 2009.

Brissaud (Ivan) et Baron (Eric), « La Course des Accélérateurs de Particules vers les Hautes Énergies et la Log Périodicité », *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], 11 décembre 2007, Disponible sur : < http://cybergeo.revues.org/14173 >.

Bruning (Oliver) et Collier (Paul), « Building a behemoth », *Nature* [En ligne], juillet 2007, Vol. 448, n° 7151, p. 285-289. DOI : 10.1038/nature06077.

Bryant (Phil), « A brief history and review of accelerators », in : *CAS - CERN Accelerator School : 4th General Accelerator Physics Course*. Jülich, Germany : CERN, 1990. p. 1-16.

Bucciarelli (Louis L.), *Designing engineers*, Cambridge, Mass. : MIT Press, 1996.

Burdea (Grigore) et Coiffet (Philippe), *La réalité virtuelle*, Hermès Sciences, 1993. 402 p.

Callon (M.), « Éléments pour une sociologie de la traduction: la domestication des coquilles Saint-Jacques et des marins-pêcheurs dans la baie de Saint-Brieuc », *L'Année sociologique*, 1986, Vol. 36, p. 169–208.

Callot (M.), Saint Marc (L.), Deschamps (J. C.), Moly (M.) et Others, « Collaborative process management in the extended enterprise », in : *Proceedings of European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS), European Conference for Aerospace Sciences (EUCASS)*. Russian Federation : 2005.

Campan (R.) et Scapini (F.), *Ethologie: approche systémique du comportement*, De Boeck Supérieur, 2002.

Camus (Albert), *Œuvres complètes, tome I*, Gallimard, 2006. 1584 p. (Pléiade).

Cantor (G.), « De la puissance des ensembles parfaits de points », *Acta Mathematica*, 1884, Vol. 4, n° 1, p. 381–392.

Capatina (O.), Artoos (K.) et Department (CERN. Geneva. TS), « Acceleration and support post deformation measurements during surface and tunnel transport of a LHC Short Straight Section », 2004.

Carlile (P. R.), « A pragmatic view of knowledge and boundaries: Boundary objects in new product development », *Organization science*, 2002, p. 442–455.

Carlile (P. R.), « Transferring, translating, and transforming: An integrative framework for managing knowledge across boundaries », *Organization Science*, 2004, p. 555–568.

Cartonnet (Yves), Lebeaume (Joël) et Vérillon (Pierre), *Comment former aux compétences de la conception ?*, Association Tour 123, 2002. 160 p.

Casti (JL), « Complexity and simplicity, in the eye of the beholder », *Complexity*, 1995, Vol. 1, n° 2, p. 2–3.

Caune (Jean), « Les territoires et les cartes de la médiation ou la médiation mise à nu par ses commentateurs », *Les Enjeux de l'information et de la communication*, 2010, Dossier 2010, p. 1-11.

Cazaubon (Christian), Gramacia (Gino) et Massard (Gérard), *Management de projet technique : méthodes et outils*, Paris : Ellipses, 1997.

CERN, *Infiniment CERN : Témoins de cinquante ans de recherches, 1954-2004.*, Genève : CERN et Editions Suzanne Hurter, 2004.

Cesarsky (Catherine), « Infiniment petit, infiniment grand, infiniment complexe », *La Technique moderne*, 1995, Vol. 87, n° 7-9, p. 15–18.

Chamberlain (P.), « Horses, Elephants and Camels... Challenges and Barriers to Interdisciplinary User-Centred Design Research », in : *Proceedings of the 11th International Design Conference DESIGN 2010*, 2010. p. 163–172.

Chanal (V.), « Communautés de pratique et management par projet », *M@n@gement*, 2000, Vol. 3, n° 1, p. 1–30.

Chao (Alexander), Davidson (R.), Dragt (A.) et Dugan (G.), *2001 Snowmass Accelerator R&D report* [En ligne], 2001. Disponible sur : <http://lss.fnal.gov/archive/2002/conf/Conf-01-422.pdf >

Chapurlat (Vincent) et Braesch (Christian), « Verification, validation, qualification and certification of enterprise models: Statements and opportunities », *Computers in Industry*, 2008, Vol. 59, n° 7, p. 711–721.

Charpak (Georges), *La vie à fil tendu*, Paris : O. Jacob, 1993.

Charue-Duboc (F.) et Midler (Christophe), « L'activité d'ingénierie et le modèle de projet concourant: Concurrent project management and engineering departments », *Sociologie du travail*, 2002, Vol. 44, n° 3, p. 401–417.

Chatain (Richard), Porcheray (Rémy), Coulon (Bertrand) et Nicquevert (Bertrand), « La chaîne numérique en usinage haute précision : Application au futur accélérateur de particules du CERN », in : *Actes d'Intercut 2010, Intercut 2010*. Cluny : 2010.

Chernet (Daniel), *Coacher avec l'analyse transactionnelle*, Eyrolles, 2009. 174 p.

Chevalley (JL), De Jonghe (J.), Faber (G.), Farthouat (P.), Ferran (M.), Flegel (W.), Hameri (AP), Hauviller (C.), Hervé (A.), Høimyr (N. J.) et Al., « Progress report of the Engineering Data Management System Task Force » CERN-CN-96-002, 1996,

Chow (T.) et Cao (D.), « A survey study of critical success factors in agile software projects », *Journal of Systems and Software* [En ligne], juin 2008, Vol. 81, n° 6, p. 961-971. DOI : 10.1016/j.jss.2007.08.020

Clarkson (John) et Eckert (Claudia) (Sous la dir de.), *Design process improvement. A review of current practice*, London : Springer, 2005.

Cleland (David) et King (Sous la dir de.), *Project management handbook*, 2nd ed. New York : Van Nostrand Reinhold, 1988.

Clemens (Walter), *The Baltic transformed : complexity theory and European security*, Lanham : Rowman & Littlefield Publishers, 2001.

Clément (André) et Bourdet (Pierre), « A study of optimal-criteria identification based on the small-displacement screw model », *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 1988, Vol. 37, n° 1, p. 503–506.

Coghlan (David) et Brannick (Teresa), *Doing Action Research in Your Own Organization*, Third Edition. Sage Publications Ltd, 2009.

Coghlan (David), « Insider action research doctorates: Generating actionable knowledge », *Higher Education*, 2007, Vol. 54, n° 2, p. 293–306.

Cohen-Tannoudji (Claude) (Sous la dir de.), *Virtualité et réalité dans les sciences*, Editions Frontières, 1995. 202 p.

Colman (K.), Hauviller (C.) et Mottier (M.), « La CAO pour la construction et l'installation du LEP », in : *Groupe des utilisateurs Euclid, décembre 1983*. Paris : 1984. p. 30. Disponible sur : <http://cdsweb.cern.ch/record/154766 >.

Conwell (C. L.), Enright (R.) et Stutzman (M. A.), « Capability maturity models support of modeling and simulation verification, validation, and accreditation », in : *Proceedings of the 32nd conference on Winter simulation*, 2000. p. 819–828.

Couture (M.) et Valcartier (D.), « Complexity and chaos-State-of-the-art; Overview of theoretical concepts », *Minister of National Defence, Canada*, 2007,

Couture (M.), *Complexity and chaos-state-of-the-art; formulations and measures of complexity*, DTIC Document, 2007a.

Couture (M.), *Complexity and chaos-state-of-the-art; list of works, experts, organizations, projects, journals, conferences and tools*, DTIC Document, 2007b.

Couture (M.), *Complexity and Chaos-State-of-the-Art; Glossary*, DTIC Document, 2007c.

Couvelaire (Bernard) et Demay (François) (Sous la dir de.), *Notionnaires. Idées*, Paris : Encyclopaedia Universalis France, 2005. 910 p.

Crawford (Matthew B.), *Éloge du carburateur. Essai sur le sens et la valeur du travail*, Paris : la Découverte, 2010.

Csikszentmihalyi (Mihaly) et Rathunde (Kevin), « The development of the person: An experiential perspective on the ontogenesis of psychological complexity. », in : *Handbook of child psychology: Volume 1: Theoretical models of human development- Damon, William (Ed); Lerner, Richard M. (Ed)*, Hoboken, NJ, US : John Wiley & Sons Inc, 1998. p. 635-684.

Csikszentmihalyi (Mihaly), *Vivre. La psychologie du bonheur*, Paris : R. Laffont, 2004.

Damien (Robert) et Tosel (André) (Sous la dir de.), *L'action collective : coordination, conseil, planification : [contributions au colloque international, Besançon, 20-22 octobre 1994]*, Besançon : Annales littéraires de l'Université de Franche-Comté, 1998.

Darses (Françoise), « L'ingénierie concourante: un modèle en meilleure adéquation avec le processus cognitif de conception », *Ingénierie concourante: de la technique au social*, 1997, p. 39–55.

Daucé (Françoise), *La Russie postsoviétique*, Paris : La Découverte, 2008.

David (A.), « La recherche-intervention, un cadre général pour la recherche en management », in : *Les nouvelles fondations des sciences de gestion*, Paris : 2000. p. 193–213.

Davier (Michel), *LHC : enquête sur le boson de Higgs*, Paris : Éd. le Pommier : Cité des sciences & de l'industrie, 2008.

De Gennes (P. G.), « La percolation: un concept unificateur », *La Recherche*, 1976, Vol. 7, n° 72, p. 919–927.

De Jonghe (J.), Delamare (C.), Dittus (F.), Faber (G.), Farthouat (P.), Ferran (M.), Hameri (AP), Hauviller (C.), Høimyr (N. J.), Kuipers (J.) et Others, « Second Progress Report of the Engineering Data Management System Taks Force, 31 January 1997 », 1997.

Debaecker (Denis), *PLM : la gestion collaborative du cycle de vie des produits : product life-cycle management.*, Paris : Hermès science, 2004.

Debray (Régis), *Eloge des frontières*, Paris : Gallimard, 2010.

Delessert (André), Freedmann (Lawrence), Hofstetter (Josef), Jéquier (François), Jufer (Marcel), Keller (Carl-Albert), Piguet (Jean-Claude), Rivier (Dominique), Schaller (François) et Schneider (Pierre-Bernard), *Le Chercheur à la recherche de lui-même. Sens et limites de la recherche scientifique*, Lausanne : Presses polytechniques universitaires romandes, 1984.

Deleuze (Gilles) et Guattari (Félix), *Capitalisme et Schizophrénie, tome 2 : Mille Plateaux*, Éditions de Minuit, 1980. 645 p.

Deleuze (Gilles), *Qu'est-ce que la philosophie?*, [Nouv. éd.]. Paris : Éditions de Minuit, 2005.

Demoly (F.), Toussaint (L.), Eynard (B.), Kiritsis (D.) et Gomes (S.), « Geometric skeleton computation enabling concurrent product engineering and assembly sequence planning », *Computer-Aided Design*, décembre 2011, Vol. 43, n° 12, p.1654-1673. DOI : 10.1016/j.cad.2011.09.006.

Demoly (Frédéric), Matsokis (Aristeidis) et Kiritsis (Dimitris), « A mereotopological product relationship description approach for assembly oriented design », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* [En ligne], décembre 2012, Vol. 28, n° 6, p. 681-693. DOI : 10.1016/j.rcim.2012.03.003 (consulté le 9 juin 2012).

Descartes (René), *Œuvres et lettres*, Paris : Gallimard, 1996. (Pléiade)

Dew (N.), « Serendipity in entrepreneurship », *Organization Studies*, 2009, Vol. 30, n° 7, p. 735.

Dortier (Jean-François) (Sous la dir de.), *Philosophies de notre temps : Penseurs d'aujourd'hui, la postmodernité, l'éthique, la politique, les sciences, l'esprit et la pensée*, Auxerre : Sciences humaines, 2000.

Du Preez (N. D.) et Pintelon (L.), « The industrial engineer- caught between two revolutions? », *Production Planning & Control* [En ligne], janvier 1997, Vol. 8, p. 418-430. DOI : 10.1080/095372897234993 (consulté le 15 novembre 2011).

Dubar (Claude), « Temps de crises et crise des temps », *Temporalités* [En ligne], juin 2011, Vol. 13,. Disponible sur : < http://temporalites.revues.org/1563 >

Duby (Georges), *L'Europe au Moyen Age : art roman, art gothique*, Paris : Arts et métiers graphiques, 1979.

Dutton (J. E.), Ashford (S. J.), O'Neill (R. M.), Hayes (E.) et Wierba (E. E.), « Reading the wind: How middle managers assess the context for selling issues to top managers », *Strategic Management Journal*, 1997, Vol. 18, n° 5, p. 407-425.

Earl (Chris), Eckert (Claudia) et Clarkson (John), « Design change and complexity », in : *Second Workshop on Complexity in Design and Engineering*, 2005.

Earl (Chris), Eckert (Claudia) et Johnson (Jeffrey), « Complexity models in design », in : *Design 2004*. Dubrovnik : 2004.

Earl (Chris), Johnson (Jeffrey) et Eckert (Claudia), « Complexity in planning design processes », in : *13th International Conference on Engineering Design, Glasgow, Scotland*, 2001.

Einstein (Albert), « On the Method of Theoretical Physics », *Philosophy of Science*, Avril 1934, Vol. 1, n° 2, p. 163-169.

Einstein (Albert), *Autobiographical Notes: A Centennial Edition*, Open Court Publishing Co, 1991.

Eisenhardt (K. M.), « Building theories from case study research », *Academy of management review*, 1989, p. 532–550.

Ellis (C.) et Wainer (J.), « A conceptual model of groupware », in : *Proceedings of the 1994 ACM conference on Computer supported cooperative work*, 1994, p. 79–88.

Ellis (John), « Gauguin's questions in particle physics: Where are we coming from? What are we? Where are we going? », *Journal of Physics: Conference Series* [En ligne], 1 mai 2008, Vol. 110, p. 012001. DOI : 10.1088/1742-6596/110/1/012001.

Emmeche (C.), « Aspects of complexity in life and science », *Philosophica*, 1997, Vol. 59, n° 1 (special issue on Complexity, Ed. by J. Braeckman), p. 41–68.

Englert (F.) et Brout (R.), « Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons », *Phys. Rev. Lett.* [En ligne], 1964, Vol. 13, n° 9, p. 321-323. DOI : 10.1103/PhysRevLett.13.321.

Estrella (F.), Kovacs (Z.), Le Goff (J. M.), McClatchey (R.), Solomonides (T.) et Toth (N.), « Pattern reification as the basis for description-driven systems », *Software and Systems Modeling*, 2003, Vol. 2, n° 2, p. 108–119.

Estrella (F.), Kovács (Z.), Le Goff (JM), McClatchey (R.) et Murray (S.), « Using Self-Description to Handle Change in Systems », CMS-CR-2002-010, 2002.

European Space Agency (ESA), *Software engineering guides (PSS-05-01 to PSS-05-11)*, Prentice Hall, 1996.

Evans (Lyndon) et Bryant (Phil) (Sous la dir de.), « LHC Machine », *Journal of Instrumentation* [En ligne], 2008, Vol. 3,. Disponible sur : < http://cdsweb.cern.ch/record/1129806 >

Evans (Lyndon) (Sous la dir de.), *The Large Hadron Collider : a marvel of technology*, Lausanne Switzerland : EPFL Press, 2009.

Ewenstein (B.) et Whyte (J.), « Knowledge practices in design: the role of visual representations as epistemic objects », *Organization Studies*, 2009, Vol. 30, n° 1, p. 7.

Farel (Alain), *Architecture et complexité : Le troisième labyrinthe*, Marseille : Parenthèses, 2008.

Fastrup (B.), Pedersen (E.), Lillestol (E.), Bosteels (M.), Gonidec (A.), Kirkby (J.), Mele (S.), Minginette (P.), Nicquevert (B.), Schinzel (D.) et Al, « CLOUD: an atmospheric research facility at CERN », *Arxiv preprint physics/0104076*, 2000.

Fastrup (B.), Pedersen (E.), Lillestol (E.), Thorn (E.), Bosteels (M.), Gonidec (A.), Harigel (G.), Kirkby (J.), Mele (S.), Minginette (P.) et Al., « A study of the link between cosmic rays and clouds with a cloud chamber at the CERN PS », *Arxiv preprint physics/0104048*, 2001,

Fathallah (Abir), Stal-Le Cardinal (Julie), Ermine (Jean) et Bocquet (Jean-Claude), « Enterprise modelling: building a product lifecycle management model as a component of the integrated vi-

sion of the enterprise », *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* [En ligne], 2010, Vol. 4, n° 3, p. 201-209. DOI : 10.1007/s12008-010-0098-0.

Feldman (Gary) et Steinberger (Jack), « Les trois familles de particules élémentaires », *Pour la science*, avril 1991, Vol. 162, p. 36-44.

Fenoglio (J.), « Au pays des physiciens, 2/6. La République des chercheurs », *Le Monde*, 28 juillet 2010a,

Fenoglio (J.), « Au pays des physiciens, 3/6. Signatures en masse », *Le Monde*, 29 juillet 2010b,

Fenves (S. J.), Sriram (R. D.), Sudarsan (R.) et Wang (F.), « A product information modeling framework for product lifecycle management », *Computer-Aided Design*, 2005, Vol. 37, n° 13, p. 1399–1411.

Ferber (J.) et Müller (J. P.), « Influences and reaction: a model of situated multiagent systems », in : *2nd International Conference on Multi-agent Systems, Japan, AAAI Press*, 1996.

Fieux-Ruef (B.), « Itinéraire d'un ingénieur, vingt ans pour comprendre », *Économie et Humanisme*, 1997, n° 340, p. 46.

Finger (Susan), Konda (Suresh) et Subrahmanian (Eswaran), « Concurrent Design Happens at the Interfaces », *AI EDAM* [En ligne], 1995, Vol. 9, n° 02, p. 89-99. DOI : 10.1017/S0890060400002146

Fiorèse (Serge), Meinadier (Jean-Pierre) et AFIS : Association Française d'Ingénierie Système (Sous la dir de.), *Découvrir et comprendre l'ingénierie système*, Cépaduès Éditions, 2012. 392 p.

Fleurance (Philippe) et Pérez (Sylvie), « Manager en actes? Réflexions sur le renouvellement de l'intelligence de la gouvernance des organisations complexes à partir de l'observation des managers sportifs », in : *Agir et Penser à la fois*, GERFLINT, 2009. p. 111-126.

Flichy (Patrice), *L'innovation technique : récents développements en sciences sociales, vers une nouvelle théorie de l'innovation*, Paris : La Découverte, 1995.

Florman (Samuel C.), *The existential pleasures of engineering*, New York : St. Martin's Press, 1976.

Floyd (Steven W.) et Wooldridge (Bill), « Dinosaurs or Dynamos? Recognizing Middle Management's Strategic Role », *The Academy of Management Executive (1993)*, novembre 1994, Vol. 8, n° 4, p. 47-57.

Foraz (Katy), Nicquevert (Bertrand) et Tommasini (Davide), « Logistics of LHC cryodipoles: from simulation to storage management », *EPAC '04, Luzern, July*, 2004,

Ford (D. N.) et Sterman (J. D.), « Overcoming the 90% syndrome: Iteration management in concurrent development projects », *Concurrent Engineering*, 2003a, Vol. 11, n° 3, p. 177–186.

Ford (D. N.) et Sterman (John D.), « Dynamic modeling of product development processes », *System Dynamics Review*, 1998, Vol. 14, n° 1, p. 31–68.

Ford (D. N.) et Sterman (John D.), « The Liar's Club: concealing rework in concurrent development », *Concurrent Engineering*, 2003b, Vol. 11, n° 3, p. 211–219.

Forrester (Jay Wright), *Industrial Dynamics*, Pegasus Communications, 1961. 479 p.

Fortin (Robin), *Comprendre la complexité*, Paris : L'Harmattan, 2007.

Fortin (Robin), *Penser avec Edgar Morin, lire La méthode* [En ligne], Chronique Sociale. Lyon : 2008. Disponible sur : < http://site.ebrary.com/id/10341526 >.

Foucault (Michel), *Le corps utopique* suivi de *Les hétérotopies*, Paris : Lignes, 2009.

Fraser (Gordon), Lillestøl (Egil) et Sellevåg (Inge), *A la recherche de l'infini : des quarks au big-bang*, [Paris] : Flammarion, 1996.

Fraser (Gordon), *The quark machines : how Europe fought the particle physics war*, Institute of Physics Pub., 1997.

Freisleben (D.) et Vajna (S.), « Dynamic Project Navigation: Modelling, Improving, and Review of Engineering Processes », *Proceedings of 2002 ASME, Design Engineering Technical Conferences*. DETC2002/DAC341322002. 2002.

Gable (G.), Rosemann (M.) et Sedera (D.), « Critical Success Factors of Process Modelling for Enterprise Systems », 2001.

Galison (Peter) et Hevly (B. W.), *Big science: The growth of large-scale research*, Stanford University Press, 1992.

Galison (Peter) et Stump (David J.) (Sous la dir de.), *The Disunity of science : boundaries, contexts, and power*, Stanford University Press, 1996.

Galison (Peter), *How experiments end*, Chicago : Univ. of Chicago Press, 1987.

Galison (Peter), *Image and logic : a material culture of microphysics*, Chicago : Univ. of Chicago Press, 1997.

Galison (Peter), *Ainsi s'achèvent les expériences : la place des expériences dans la physique du XXe siècle*, trad. B. Nicquevert. Paris : Éditions La Découverte, 2002.

Galison (Peter), « The Collective Author », in : *Scientific authorship : credit and intellectual property in science*, Routledge : 2003. p. 325-355.

Gao (J. X.), Aziz (H.), Maropoulos (P. G.) et Cheung (W. M.), « Application of product data management technologies for enterprise integration », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2003, Vol. 16, n° 7, p. 491–500.

Garel (Gilles), Giard (Vincent), Midler (Christophe) et Fondation nationale pour l'enseignement de la gestion des entreprises., *Faire de la recherche en management de projet*, Paris : Vuibert, 2004.

Garel (Gilles), Godelier (Eric) et Weil (Thierry), « Compte rendu: Les mythes du management de James G. March », *Annales des Mines. Gérer et comprendre*, septembre 1999, p. 4-12.

Garel (Gilles), « Pour une histoire de la gestion de projet », *Annales des Mines. Gérer et comprendre*, décembre 2003, Vol. 74, p. 77-90.

Garud (R.), Jain (S.) et Türtscher (Philipp), « Incomplete by Design and Designing for Incompleteness », *Organization Studies* [En ligne], 1 mars 2008, Vol. 29, n° 3, p. 351-371. DOI : 10.1177/0170840607088018.

Garud (R.), « Conferences as venues for the configuration of emerging organizational fields: the case of cochlear implants », *Journal of Management Studies*, 2008, Vol. 45, n° 6, p. 1061–1088.

Gaynor (Gerard), *Handbook of technology management*, New York : McGraw-Hill, 1996.

Geels (F. W.), « From sectoral systems of innovation to socio-technical systems: Insights about dynamics and change from sociology and institutional theory », *Research policy*, 2004, Vol. 33, n° 6-7, p. 897–920.

Gell-Mann (Murray), *Le Quark et le jaguar : voyage au cœur du simple et du complexe*, Paris : A. Michel, 1995a.

Gell-Mann (Murray), « What is complexity », *Complexity*, 1995b, Vol. 1, n° 1, p. 16–19.

Genelot (Dominique) et Avenier (Marie-José) (Sous la dir de.), *Agir et penser en complexité avec Jean-Louis Le Moigne. Témoignages de mises en actes*, L'Harmattan, 2012. 462 p.

Genelot (Dominique), *Manager dans la complexité. Réflexions à l'usage des dirigeants*, Insep Consulting, 2011.

Gérard (Christian), « Action-recherche/recherche-action en formation », *Revue Esprit*, 2006, Vol. 8, n° 01.

Giard (Vincent) et Midler (Christophe), « Management et gestion de projets: Une étude des mutations en cours », *Revue française de gestion industrielle*, 1995, p. 5–18.

Gibbons (Michael), Limoges (Camille), Nowotny (Helga), Schwartzman (Simon), Scott (Peter) et Trow (Martin), *The New Production of Knowledge: The Dynamics of Science and Research in Contemporary Societies*, SAGE Publications Ltd, 1994. 192 p.

Gigand (Gérard), *Ingénierie du regard transdisciplinaire. L'événement entre incomplétude, autoréférence et indétermination*, L'Harmattan, 2007. 312 p.

Gigand (Gérard), *Se cultiver en complexité. La trialectique, un outil transdisciplinaire*, Lyon : Chronique sociale, 2010.

Glaser (B. G.) et Strauss (A. L.), *The discovery of grounded theory: Strategies for qualitative research*, Aldine Publ., 1977.

Godé-Sanchez (C.) et Barbaroux (P.), « Gérer dans la complexité: quels rôles pour les technologies de collaboration? », *Association Internationale de Management Stratégique*, Grenoble, 2009. Disponible sur : http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00386399/

Gökalp (I.), « On the Analysis of Large Technical Systems », *Science, Technology & Human Values* [En ligne], janvier 1992, Vol. 17, n° 1, p. 57-78. DOI : 10.1177/016224399201700104

Gomes (S.) et Sagot (J. C.), « Vers une chaîne XAO intégrée pour une conception centrée sur l'homme », *Document numérique*, 2001, Vol. 5, n° 3, p. 135–154.

Gomes (Samuel), Demoly (Frédéric), Mahdjoub (Morad) et Sagot (Jean-Claude), « Integration of Design for Assembly into a PLM Environment », in : Yan (Xiu-Tian), Ion (William J), et Eynard

(Benoit) (dir.), *Global Design to Gain a Competitive Edge* [En ligne], Springer London, 2008, p. 117-126.
Disponible sur : < http://www.springerlink.com/content/hg51821115w8886g/abstract/> .

Granger (Gilles-Gaston), *Le probable, le possible et le virtuel*, Odile Jacob, 1995. 250 p.

Grebici (Khadidja), Blanco (Eric) et Rieu (Dominique), « Toward non mature information management in collaborative design processes », in : *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED05)*, 2005. p. 246–247.

Grebici (Khadidja), Blanco (Eric) et Rieu (Dominique), « Towards PDM extension to support the exchange of preliminary information in design », *International Journal of Product Lifecycle Management*, 2006, Vol. 1, n° 4, p. 352–366.

Grebici (Khadidja), Rieu (Dominique) et Blanco (Eric), « Les objets intermédiaires dans les activités d'ingénierie collaborative. », *Actes du XXIIIème Congrès INFORSID, Grenoble, France*, 2005,

Grebici (Khadidja), *La maturité de l'information et le processus de conception collaborative*, PhD thesis, Grenoble INP, 2007.

Green (Gina C.), « The impact of cognitive complexity on project leadership performance », *Information and Software Technology* [En ligne], mars 2004, Vol. 46, n° 3, p. 165-172. DOI : 10.1016/S0950-5849(03)00125-3.

Grey (Chris), *Studying organizations. A very short, fairly interesting and reasonably cheap book about studying organizations.*, London : Sage Publications, 2005.

Grinevald (Jacques), Gsponer (André), Hanouz (Lucile) et Lehmann (Pierre), *La Quadrature du CERN : essai indisciplinaire publié à l'occasion du 30e anniversaire du CERN le 29 septembre 1984*, Lausanne : Éd. d'En bas, 1984.

Guckenheimer (Sam) et Perez (Juan J.), *Software Engineering with Microsoft Visual Studio Team System (Microsoft .NET Development Series)*, Addison-Wesley Professional, 2006.

Guery (L.), *Légitimité et recherche d'adhésion chez le manager médiateur en contexte de réorganisation: analyse des implications de la redéfinition du rôle de l'encadrement de premier niveau à France Télécom*, 2003.

Guery (L.), « La conciliation de l'économique et du social par les managers de premier niveau à France Télécom: une analyse par les conflits de rôle ».

Guibert (S.), *Evaluation ergonomique de la performance d'un changement organisationnel*, 2009.

Gunn (J.), « Extended enterprise integration », *BT technology journal*, 2000, Vol. 18, n° 2, p. 83–99.

Gurov (G.) et Dernovoï (G.), « Ускровитель Протонов в Протвино (Uskrovitel protonov v Protvino - Un accélérateur de protons à Protvino) », *Наука и жизнь (Nauka i jizn - Science et vie)*, Avril 1995, Vol. 4.

Guyon (Etienne) et Hulin (Jean-Pierre), *Granites et fumées. Un peu d'ordre dans le mélange*, O. Jacob, 1997. 284 p.

Gzara Yesilbas (L.), Rose (B.) et Lombard (M.), « Specification of a repository to support collaborative knowledge exchanges in IPPOP project », *Computers in Industry* [En ligne], décembre 2006, Vol. 57, n° 8–9, p. 690-710. DOI : 10.1016/j.compind.2006.04.014.

Hacking (Ian), *Representing and intervening : introductory topics in the philosophy of natural science*, Cambridge University Press, 1983.

Hacking (Ian), *Concevoir et expérimenter*, Christian Bourgois, 1993.

Hacking (Ian), *The social construction of what?*, Harvard Univ. Press, 1999.

Hacking (Ian), *Entre science et réalité. La construction sociale de quoi?*, Paris : La Découverte, 2008. 298 p.

Hagge (L.), Herz (A.), Lang (S.), Rupprecht (V.), Sühl (S.) et Welle (N.), *3D Visualization, Simulation and Virtual Reality in Accelerator Development*, IPAC, [s.d.].

Hakulinen (T.), Andrews (C.), Feral (B.), Friman (P. O.), Mottier (M.), Pettersson (T.), Sørensen (C.) et Van (E.), « Towards a Unified General Purpose CAD System at CERN », in : *Proceedings of EPAC* [En ligne], 2004. Disponible sur : http://www.jacow.org/e04/PAPERS/WEPLT019.PDF.

Hakulinen (T.), Delamare (C.), Friman (P. O.), Pettersson (T.), Van Uytvinck (E.), Widegren (D.), Fournier (G.) et Numérique (S. P. I.), « Integration of CATIA/SMARTEAM into CERN's corportate Engineering Data Management System », 2008. Disponible sur : < http://epaper.kek.jp/e08/papers/tupc130.pdf >.

Hales (Crispin), *Analysis of the engineering design process in an industrial context.*, 2nd ed. Gants Hill, 1991.

Hameri (A. P.) et Nitter (P.), « Engineering data management through different breakdown structures in a large-scale project », *International Journal of Project Management*, 2002, Vol. 20, n° 5, p. 375–384.

Hanson (N. R.), *Patterns of discovery: An inquiry into the conceptual foundations of science*, Cambridge University Press, 1958a.

Hanson, *Les Modèles de la découverte*, Dianoia, 2000. 239 p.

Hatchuel (Armand), Sardas (J. C.), Kabeche (D.), Giacomoni (G.) et Notelet (F.), « The replanning of complex productions theoretical advances and developments in firm », 1994.

Hatchuel (Armand), « Coopération et conception collective U00F8e Variété et crises des rapports de prescription, in de Terssac, G », *Friedberg E.(1996). Coopération et conception, Octares Edition, Toulouse*, 1996,

Hatchuel (Armand), « Comment penser l'action collective? Théorie des mythes rationnels », in : *L'action collective : coordination, conseil, planification*, Paris : Diffusion par Les Belles Lettres, 1998. p. 177–202.

Hatchuel (Armand), « Towards design theory and expandable rationality: the unfinished program of Herbert Simon », *Journal of management and governance*, 2001, Vol. 5, n° 3, p. 260–273.

Hauviller (Claude) et Weisz (Sylvain), « Installation of a Particle Accelerator: from Theory to Practice. The LHC Example », in : *EPAC 2004*. Luzern : 2004. p. 1867-1869.

Hawking (Stephen) et Mlodinow (Leonard), *Y a-t-il un architecte dans l'univers ?*, Paris : O. Jacob, 2011.

Heimann (Jakob), *Envelope als Instrument der Integration*, Praktische Studiensemester, Eslingen : Hochschule Esslingen, 2011.

Heisig (P.), Clarkson (P. J.), Hemphälä (J.), Wadell (C.), Bergendahl (M. N.), Roelofsen (J.), Kreimeyer (M.) et Lindemann (U.), « Challenges and future fields of research for modelling and management of engineering processes », 2009. Disponible sur : < http://publications.eng.cam.ac.uk/16656/ > .

Helms (Remko W.), *Product Data Management as enabler for Concurrent Engineering. Controlling the flow of preliminary information in product development*, PhD thesis, Eindhoven, NL : Technische Universiteit Eindhoven, 2002.

Henderson (K.), *On line and on paper: Visual representations, visual culture, and computer graphics in design engineering*, The MIT Press, 1999.

Hermann (A.), Belloni (L.), Mersits (U.), Pestre (D.) et Krige (J.), *History of CERN, I: Volume I - Launching the European Organization for Nuclear Research*, North Holland, 1987. 622 p.

Hermann (A.), Weiss (L.), Pestre (D.), Mersits (U.) et Krige (J.), *History of CERN, II: Volume II - Building and Running the Laboratory, 1954-1965*, North Holland, 1990. 904 p.

Hermann (Charles F.), *International Crises: Insights from Behavioral Research*, The Free Press, 1972. 334 p.

Herzog (Erik), *An approach to systems engineering tool data representation and exchange*, Ph. D., Linköping : Univ., 2004.

Hessel (Stéphane) et Morin (Edgar), *Le chemin de l'espérance : aux actes, citoyens !*, Paris : Fayard, 2011.

Higgs (Peter W.), « Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons », *Phys. Rev. Lett.* [En ligne], 19 octobre 1964, Vol. 13, n° 16, p. 508-509. DOI : 10.1103/PhysRevLett.13.508.

Hines (Peter), Francis (Mark) et Found (Pauline), « Towards lean product lifecycle management: A framework for new product development », *Journal of Manufacturing Technology Management* [En ligne], 2006, Vol. 17, n° 7, p. 866-887. DOI : 10.1108/17410380610688214.

Hipp (M.), Mutschler (B.) et Reichert (M.), « Navigating in Process Model Collections: A new Approach Inspired by Google Earth », *Business Process Management*, 2011.

Hobday (Mike), « Product complexity, innovation and industrial organisation », *Research policy*, 1998, Vol. 26, n° 6, p. 689–710.

Hoffmann (Hans-Falk) et Nicquevert (Bertrand), *Dimension milestone-Release 0.6.1 dimensions*, ATL-TECH-96-019, 1996.

Hofstadter (Douglas), *Gödel, Escher, Bach : Les Brins d'une guirlande éternelle*, InterEditions, 1985. 884 p.

Hofstadter (Douglas), *Je suis une boucle étrange*, Paris : Dunod, 2008.

Höhne (G.), « Treatment of Decision Situations in the Design Process », in : *Proceedings of the 8th International Design Conference DESIGN 2004*, 2004. p. 1419–1424.

Hommes (B. J.) et Van Reijswoud (V.), « Assessing the quality of business process modelling techniques », in : *System Sciences, 2000. Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on*, 2002. p. 10.

Horgan (J.), « From complexity to perplexity », *Scientific American*, 1995, Vol. 272, n° 6, p. 104–109.

Horváth (Gábor), Barta (András), Pomozi (István), Suhai (Bence), Hegedüs (Ramón), Åkesson (Susanne), Meyer-Rochow (Benno) et Wehner (Rüdiger), « On the trail of Vikings with polarized skylight: experimental study of the atmospheric optical prerequisites allowing polarimetric navigation by Viking seafarers », *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* [En ligne], 12 mars 2011, Vol. 366, n° 1565, p. 772 -782. DOI : 10.1098/rstb.2010.0194.

Horváth (Imre) (Sous la dir de.), *Tools and methods of competitive engineering : proceedings of the Seventh international symposium on tools and methods of competitive engineering - TMCE 2008, April 21-25, Izmir, Turkey*, Delft : University of Technology, 2008.

Hübner (K.), « Designing and building LEP », *Physics reports*, 2004, Vol. 403, p. 177–188.

Hyppölä (J. M.), *A Strategy Absence or a Tacit Strategy? Case ATLAS Experiment at CERN*, Master, Helsinki : University of Helsinki, Faculty of Social Sciences, Department of Political Science Administration and Organizations, 2008.

Indulska (M.), Green (P.), Recker (J.) et Rosemann (M.), « Business process modeling: perceived benefits », *Conceptual Modeling-ER 2009*, 2009, p. 458–471.

Indulska (M.), Recker (J.), Rosemann (M.) et Green (P.), « Business process modeling: Current issues and future challenges », in : *Advanced Information Systems Engineering*, 2009. p. 501–514.

Innerarity (Daniel), *La démocratie sans l'état : Essai sur le gouvernement des sociétés complexes*, Paris : Climats, 2006.

ISO, *ISO 5457:1999 – Technical product documentation -- Sizes and layout of drawing sheets*, 1999.

ISO, *ISO 7200:2004 – Technical product documentation - Data fields in title blocks and document headers*, 2004a.

ISO, *ISO 11442:2006 – Technical product documentation — Document management*, 2004b.

ISO, *ISO 2692:2006 – Spécification géométrique des produits (GPS) -- Tolérancement géométrique -- Exigence du maximum de matière (MMR), exigence du minimum de matière (LMR) et exigence de réciprocité (RPR)*, 2006.

ISO, *ISO/IEC 15288:2008 - Systems and software engineering: system life cycle processes* [En ligne], 2nd ed. Geneva : ISO, 2008.

ISO, *ISO 690:2010 – Information and documentation -- Guidelines for bibliographic references and citations to information resources*, 2010.

Jacob (Jean), *Edgar Morin : la fabrique d'une pensée et ses réseaux influents*, Villeurbanne : Golias, 2011.

Jacob (Pierre), *De Vienne à Cambridge : l'héritage du positivisme logique : essais de philosophie des sciences*, Paris : Gallimard, 1996.

Jagodzinski (P.), Reid (F.) et Culverhouse (P.), « Special issue: Ethnographic Approaches to the Study of Engineering Design », *Design Studies*, 2000, Vol. 21, n° 4,.

Janczak (Sergio), *Knowledge integration: a new approach to the role of middle management*, Université du Québec à Montréal, 1999.

Janczak (Sergio), « How middle managers integrate knowledge within projects », *Knowledge and Process Management* [En ligne], 1 juillet 2004, Vol. 11, n° 3, p. 210-224. DOI : 10.1002/kpm.207

Jankovic (Marija), Stal Le Cardinal (Julie) et Bocquet (Jean-Claude), « Integration of Different Contexts in Collaborative Decision Making in New Product Development », in : *Proceedings of the 16th International Conference on Engineering Design (ICED07)* [En ligne], 2007. p. 179–187. Disponible sur : < http://papers.designsociety.org/integration_of_different_contexts_in_collaborative_decision_making_in_new_product_development.paper.25417.htm >.

Jeantet (Alain) et Boujut (Jean-François), « Dynamique et évolution des métiers dans la conception », in : *Conception de produits mécaniques : méthodes, modèles et outils*, Paris : Hermès, 1998. p. 139-162.

Jeantet (Alain), « Les objets intermédiaires dans la conception. Eléments pour une sociologie des processus de conception », *Sociologie du travail*, 1998, Vol. 40, n° 3, p. 291–316.

Jenni (Peter), Nordberg (Markus) et Boisot (Max), « What is ATLAS?, chapter 1 », in : *Collisions and Collaboration: Managing Big Learning from Small Events in the ATLAS Experiment at the LHC*, Oxford University Press, 2011. p. 8-27.

Jenni (Peter) et Al., « Status of ATLAS », in : *4th Conference on Physics at LHC, Split, Croatia, 29 Sep-04 Oct 2008*, 2008.

Jensen (Pablo), *Des atomes dans mon café crème : la physique peut-elle tout expliquer?*, Paris : Seuil, 2004.

Joshi (N.), Ameri (F.) et Dutta (D.), « Systematic decision support for engineering change management in PLM », 2005.

Kalpic (B.) et Bernus (P.), « Business process modelling in industry–the powerful tool in enterprise management », *Computers in industry*, 2002, Vol. 47, n° 3, p. 299–318.

Kane (Gordon), *Le jardin des particules : l'univers tel que le voient les physiciens*, Paris : Masson, 1996.

Kanoute (Pascale), Dumontet (Hélène), Hauviller (Claude) et Nicquevert (Bertrand), « Diffusive and hygroelastic behaviour of reinforced composite material », in : *Europhysics Conference Abstracts ECA*, 1997. p. 251–252.

Kanoute (Pascale), Dumontet (Hélène), Hauviller (Claude) et Nicquevert (Bertrand), « Hygrothermal behaviour of fiber reinforced composite materials », in : *International conference on fibre reinforced composites*, 1998. p. 317–324.

Kanoute (Pascale) et Nicquevert (Bertrand), *Alignment System of the ATLAS muon spectrometer: Influence of humidity variations on the dimensional stability of the bar system. Note technique TA1/97-09*, 1997.

Kant (Emmanuel), *Critique de la raison pure*, 11e éd. Paris : Presses Univ. de France, 1944. 640 p. (Quadrige).

Kaukonen (E.), « Science and Technology in Russia: Collapse or New Dynamics? », *Science Studies*, 1994, Vol. 7, n° 2, p. 23–36.

Kevles (Daniel Jo), *The Physicists: The History of a Scientific Community in Modern America*, 2nd Revised edition.Harvard University Press, 1995. 537 p.

Kinchla (R. A.) et Wolfe (J. M.), « The order of visual processing: "Top-down," "bottom-up," or "middle-out" », *Perception & Psychophysics* [En ligne], mai 1979, Vol. 25, n° 3, p. 225-231. DOI : 10.3758/BF03202991.

Klein (Étienne), *Discours sur l'origine de l'Univers*, Paris : Flammarion, 2010.

Klein (Katherine J.), Dansereau (F.) et Hall (R. J.), « Levels issues in theory development, data collection, and analysis », *Academy of Management Review*, 1994, p. 195–229.

Klein (Katherine J.) et Kozlowski (Steve W. J.), « From micro to meso: Critical steps in conceptualizing and conducting multilevel research », *Organizational Research Methods*, 2000, Vol. 3, n° 3, p. 211.

Knorr-Cetina (K.), *Epistemic cultures : how the sciences make knowledge*, Harvard University Press, 1999.

Koike (T.), Blanco (Eric) et Penz (B.), « Logistic Profile: a New Concept for Interfacing Designers and Logisticians in Concurrent Engineering Environment », in : *Proceedings of the 15th International Conference on Engineering Design (ICED05)*, 2005. p. 57–58.

Koike (T.), *Les interfaces pour l'intégration de la logistique dans les projets de conception. Une contribution basée sur le cas du projet d'un tracteur à chenilles*, PhD thesis, Grenoble INP, 2005.

Korzybski (Alfred), *Une carte n'est pas le territoire : Prolégomènes aux systèmes non aristotéliciens et à la sémantique générale*, Éditions de l'Éclat, 2007.

Koskela (L. J.) et Kagioglou (M.), « The Proto-theory of Design: the method of analysis of the ancient geometers », 2007, Disponible sur : < http://usir.salford.ac.uk/9364/ >.

Kourilsky-Belliard (Françoise), *Du désir au plaisir de changer : comprendre et provoquer le changement*, 3e éd. Paris : Dunod, 2004.

Kreinovich (V.), Longpre (L.), Ferson (S.) et Ginzburg (L.), « Why is selecting the simplest hypothesis (consistent with data) a good idea? a simple explanation », 2002.

Krige (J.), « The relationship between CERN and its visitors' in the 1970s », *History of CERN*, 1996, Vol. 3, p. 171–206.

Krige (J.) (Sous la dir de.), *History of CERN, III*, North Holland, 1997. 674 p.

Kristeva (Julia), *Sêméiotikê. Recherches pour une sémanalyse*, Éditions du Seuil, 1969.

Kubar (Joanna), « Le concept d'enchevêtrement hiérarchique dans la pensée de D. Hofstadter », *Noesis*, 15 décembre 2008, n° N°14, p. 149-163.

Kuhn (Thomas S.), *La tension essentielle : tradition et changement dans les sciences*, Paris : Gallimard, 1990.

Lacki (Jan), « The Physical Tourist. Geneva: From the Science of the Enlightenment to CERN », *Physics in Perspective (PIP)*, 2007, Vol. 9, n° 2, p. 231–252.

Lagadec (Patrick), *La gestion des crises : outils de réflexion à l'usage des décideurs*, Édiscience International, 1992. 326 p.

Lambooy (J. G.), « Room for Complexity; About changing structures, self-organisation and networks in economic geography », *Utrecht University.(Valedictory speech)*. 2002.

Lardeur (E.), Bocquet (J. C.) et Auzet (C.), « Using Systems Engineering to enhance Concurrent Engineering environment through a modelling problematic », in : *International Conference of Concurrent Enterprising, 9th International Conference of Concurrent Enterprising*. Espoo, Finland, 16-18 June 2003 : 2003.

Latour (Bruno), *Aramis, ou, l'amour des techniques*, Paris : La Découverte, 1993.

Latour (Bruno), *La science en action : introduction à la sociologie des sciences*, Paris : Gallimard, 1995.

Latour (Bruno), *Petites leçons de sociologie des sciences*, Seuil, 1996. 251 p.

Latour (Bruno), *La fabrique du droit : une ethnographie du conseil d'état*, Paris : La Découverte, 2004.

Laureillard (Pascal), *Conception intégrée dans l'usage : Mise en œuvre d'un dispositif d'intégration produit-process dans une filière de conception de pièces forgées*, PhD thesis, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2000.

Laurillau (Y.) et Nigay (L.), « Clover architecture for groupware », in : *Proceedings of the 2002 ACM conference on Computer supported cooperative work*, 2002a. p. 236–245.

Laurillau (Y.) et Nigay (L.), « Le modèle d'architecture Clover pour les collecticiels », in : *Proceedings of the 14th French-speaking conference on Human-computer interaction (Conférence Francophone sur l'Interaction Homme-Machine)*, 2002b. p. 113–120.

Lavoisy (Olivier) et Vinck (Dominique), « Le dessin comme objet intermédiaire de l'industrie », in : Delcambre (Pierre) (dir.), *Objets, dispositifs et pratiques en communications organisationnelles* [En ligne], Rennes : Presses Universitaires de Rennes, 2000. Disponible sur : < http://halshs.archives-ouvertes.fr/hal-00261643/ > .

Law (John) et Mol (Annemarie), *Complexities : social studies of knowledge practices*, Durham : Duke University Press, 2002.

Lawrence (P. R.) et Lorsch (J. W.), « Differentiation and integration in complex organizations », *Administrative science quarterly*, 1967a, Vol. 12, n° 1, p. 1–47.

Lawrence (P. R.) et Lorsch (J. W.), « New management job: the integrator », *Harvard Business Review*, décembre 1967b, p. 142-151.

Le Cardinal (Gilles), Guyonnet (Jean-François) et Pouzoullic (Bruno), « Management de la coopération dans les systèmes complexes », *Communication et organisation* [En ligne], 1 mai 1995, n° 7. Disponible sur : < http://communicationorganisation.revues.org/1786 >.

Le Masson (Pascal), Weil (Benoît) et Hatchuel (Armand), *Les processus d'innovation : conception innovante et croissance des entreprises*, Paris : Hermès science, 2006.

Le Moigne (Jean-Louis), *La théorie du système général : théorie de la modélisation*, 3e éd. mise à jour. Paris : Presses universitaires de France, 1990.

Le Moigne (Jean-Louis), *La modélisation des systèmes complexes*, Dunod, 1999. 178 p.

Le Moigne (Jean-Louis), *Le constructivisme : Tome 3, Modéliser pour comprendre*, L'Harmattan, 2004. 336 p.

Le Moigne (Jean-Louis), *Les épistémologies constructivistes*, Paris : PUF, 2007.

Le Moigne (Jean-Louis), « L'Intelligence de l'Action appelle l'exercice de la Pensée Complexe. Pragmatique et Épistémique sont inséparables. Sur "La Méthode" d'exercice de "la Pensée Complexe" pour conduire sa "Raison dans les Affaires Humaines". », in : *Agir et Penser à la fois*, GERFLINT, 2009. p. 23-48.

Le Moigne (Jean-Louis), « Agir <-> Penser en complexité. Le Discours de la Méthode de notre temps », in : *Grand débat 2010 du Réseau Intelligence de la complexité, Que peut être aujourd'hui une formation citoyenne à l'agir <-> penser en complexité?* Paris : 2010.

Lécaille (Pascal), Vinck (Dominique), Blanco (Eric), Jeantet (Alain), Nicquevert (Bertrand) et Others, *Aspects sociologiques et ergonomiques du monde virtuel*, 2000.

Lécaille (Pascal), *La trace habilitée. Une ethnographie des espaces de conception dans un bureau d'études mécaniques: l'échange et l'équipement des objets grapho-numériques entre outils et acteurs de la conception* [En ligne], Thèse de doctorat, Grenoble : UPMF, 2003. Disponible sur : < https://cdsweb.cern.ch/record/1416390? >

Lecourt (Dominique) (Sous la dir de.), *Dictionnaire d'histoire et de philosophie des sciences*, Paris : Presses universitaires de France, 1999.

Lederman (L.), « The God particle et al. », *Nature* [En ligne], 19 juillet 2007, Vol. 448, n° 7151, p. 310-312. DOI : 10.1038/nature06081.

Lederman (Leon) et Teresi (Dick), *The God Particle: If the Universe is the Answer, What is the Question?*, Bantam Press, 1993. 448 p.

Lederman (Leon) et Teresi (Dick), *Une sacrée particule*, Odile Jacob, 1996. 442 p.

Lee (C. P.), « Between chaos and routine: boundary negotiating artifacts in collaboration », in : *ECSCW 2005*, 2005. p. 387–406.

Lee (C. P.), « Boundary negotiating artifacts: Unbinding the routine of boundary objects and embracing chaos in collaborative work », *Computer Supported Cooperative Work (CSCW)*, 2007, Vol. 16, n° 3, p. 307–339.

Lefèvre (Marie-Françoise), « Aux confins du génie humain », *research*eu*, mars 2009, n° 59, p. 23-25.

Legardeur (Jérémy), *Méthodes et outils pour l'innovation produit/process* [En ligne], THESE, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2001. Disponible sur : < http://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00662411 > .

Legoff (O.), Villeneuve (François) et Bourdet (Pierre), « Geometrical tolerancing in process planning: a tridimensional approach », *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 1999, Vol. 213, n° 6, p. 635–640.

Lemaitre (Jean), Boucard (Pierre-Alain) et Hild (François), *Résistance mécanique des solides : Matériaux et structures*, Dunod, 2007. 299 p.

Leonard-Barton (Dorothy), « Implementation as mutual adaptation of technology and organization », *Research Policy* [En ligne], octobre 1988, Vol. 17, n° 5, p. 251-267. DOI : 10.1016/0048-7333(88)90006-6.

Levi (Lennart), *Guidance on work-related stress : spice of life or kiss of death?*, Office for Official Publications of the European Communities, 2000.

Lévy (Pierre), *Les technologies de l'intelligence. L'avenir de la pensée à l'ère informatique*, La Découverte, 1990. 234 p.

Lévy (Pierre), *Qu'est-ce que le virtuel ?*, La Découverte, 1995. 156 p.

Leydesdorff (L.), *A sociological theory of communication: The self-organization of the knowledge-based society*, Universal-Publishers, 2001.

Lindkvist (L.), Soderlund (J.) et Tell (F.), « Managing Product Development Projects: On the Significance of Fountains and Deadlines », *Organization Studies* [En ligne], 1 novembre 1998, Vol. 19, n° 6, p. 931-951. DOI : 10.1177/017084069801900602.

List (B.), Hagge (L.), Eucker (S.), Walker (NJ) et Welle (N.), « Organizing The ILC Technical Design Documentation », 2011.

Livingston (M. S.), *High-energy accelerators*, Interscience Publishers, 1954.

Lock (W. O.), *A History of the Collaboration between the European Organization for Nuclear Resarch (CERN) and the Joint Institute for Nuclear Research (JINR), and with Soviet Research Institutes in the*

USSR, 1955-1970 [En ligne], Geneva : CERN, 1975. Disponible sur : < https://cdsweb.cern.ch/record/186009?ln=en >

Lorino (P.), Tricard (B.) et Clot (Y.), « Research Methods for Non-Representational Approaches to Organizational Complexity: The Dialogical Mediated Inquiry », *Organization Studies*, 2011, Vol. 32, n° 6, p. 769–801.

Lorino (P.), « Concevoir l'activité collective conjointe: l'enquête dialogique », *Étude de cas sur la sécurité dans l'industrie du bâtiment. Activités*, 2009, Vol. 6, n° 1, p. 87–110.

Lowery (Kerry-Jane), Marcelloni (Claudia) et Smith (Kenway), *Exploring the mystery of matter : the ATLAS experiment*, Kimber : Papadakis, 2008.

Lucas (Sylvie), Nicquevert (Bertrand), Gaudiller (Luc), Der Hagopian (J.) et Dufour (Régis), « Dynamics of a straw tracker wheel-detector », *Mechanical systems and signal processing* [En ligne], juillet 2002, Vol. 16, n° 4, p. 547–559. DOI : 10.1006/mssp.2001.1421.

Lupasco (Stéphane), *Le Principe d'antagonisme et la logique de l'énergie : Prolégomènes à une science de la contradiction*, Hermann, 1951.

Macdonald (Stuart) et Williams (Christine), « Beyond the boundary: An information perspective on the role of the gatekeeper in the organization », *Journal of Product Innovation Management* [En ligne], novembre 1993, Vol. 10, n° 5, p. 417-427. DOI : 10.1016/0737-6782(93)90099-C.

Mandelbrot (Benoit B.), *The Fractal Geometry of Nature*, W.H.Freeman & Co Ltd, 1982. 460 p.

Mannisto (T.), Peltonen (H.), Soininen (T.) et Sulonen (R.), « Multiple abstraction levels in modelling product structures », *Data & Knowledge Engineering*, 2001, Vol. 36, n° 1, p. 55–78.

Mantere (Saku), « Role Expectations and Middle Manager Strategic Agency », *J Management Studies* [En ligne], novembre 2007, Vol. 45, n° 2, p. 294-316. DOI : 10.1111/j.1467-6486.2007.00744.x

Marchand (Donald) et Margery (Philippe), « Leadership through collaboration and harmony : how to lead without formal authority », *Perspectives for Managers*, 2009, Vol. 180, p. 4.

Marchant (Jo), « Did Vikings navigate by polarized light? », *Nature* [En ligne], 28 janvier 2011,DOI : 10.1038/news.2011.58.

Martin (Bertrand), Lenhardt (Vincent) et Jarrosson (Bruno), *Oser la confiance*, INSEP, 1997.

Martin (J.), Van Maercke (D.), Vian (JP), Bruder (P.), Nicquevert (B.), Bonello (C.) et Josse (R.), *Caractérisation des matériaux absorbants pour le contrôle du bruit dans les bâtiments de toutes destinations. Characterization of absorbent materials for controlling noise in all types of buildings*, CSTB, 1991.

Martinet (Alain-Charles), *Épistémologies et sciences de gestion*, Paris : Économica, 1990.

Martinet (Alain-Charles), « Les paradigmes stratégiques: l'éternel retour? », in : *Actes du séminaire Condor*, Paris : 1993.

Masclet (C.) et Boujut (Jean-François), « Using situated FBS to model design interactions in a distant synchronous collaborative situation », in : *Proceedings of the 11th International Design Conference DESIGN 2010* [En ligne], 2010. p. 1585–1594.

Massotte (Pierre) et Corsi (Patrick), *La complexité dans les processus de décision et de management*, Paris : Hermès science, 2006.

Mathieu (Luc) et Villeneuve (François) (Sous la dir de.), *Tolérancement géométrique des produits*, Paris : Hermès science, 2007.

Maurino (Michel), *La Gestion des données techniques : technologie du Concurrent engineering*, Paris : Masson, 1995.

McClatchey (R.), Kovacs (Z.), Goff (J. M. L.) et Murray (S.), « Using Self-Description to Handle Change in Systems », *Arxiv preprint physics/0204032*, 2002.

McDermott (R.), « Learning across teams », *Knowledge Management Review*, 1999, Vol. 8, n° 3, p. 32–36.

McKelvey (B.), « Complexity leadership: the secret of Jack Welch's success », *International Journal of Complexity in Leadership and Management*, 2010, Vol. 1, n° 1, p. 4–36.

McMahon (CA), Lowe (A.) et King (A.), « Managing Knowledge to Free the Designer's Mind », in : *Proceedings Workshop to Honour Herb Simon, International Conference « The Science of Design »*. Lyon : 2002.

Medvedev (Jaurès A.), « Savants à la dérive », *Le Monde Diplomatique*, juillet 1993, p. 32.

Meijer (P. H. ..), « Kamerlingh Onnes and the discovery of superconductivity », *American Journal of Physics*, 1994, Vol. 62, p. 1105.

Melão (N.) et Pidd (M.), « A conceptual framework for understanding business processes and business process modelling », *Information Systems Journal*, 2000, Vol. 10, n° 2, p. 105–129.

Mélèse (J.), *La gestion par les systèmes; essai de praxéologie*, Editions Hommes et techniques, 1968.

Meng (Z.), *Exploration of versioning in product lifecycle management software packages and theoretical enhancements*, Master of Science in Operations Management and Logistics, Eindhoven, NL : TU, 2010. 37 p.

Menzinger (Filippo) (Sous la dir de.), *L'Italia al CERN. Le ragioni di un successo*, INFN Laboratori Nazionali, Frascati, 1995.

Mer (Stéphane), *Les mondes et les outils de la conception. Pour une approche socio-technique de la conception de produit.* [En ligne], PhD thesis, Grenoble INP, 1998.

Merck (Bernard) et Sutter (Pierre-Éric), *Gestion des compétences, la grande illusion: Pour un new deal « compétences »*, De Boeck Supérieur, 2009. 300 p.

Merton (R. K.), « On Sociological Theories of the Middle Range », *Social Theory and Social Structure, Free Press, New York*, 1949, p. 39-53.

Merz (Martina) et Cetina (Karin Knorr), « Deconstruction in a "Thinking" Science: Theoretical Physicists at Work », *Social Studies of Science* [En ligne], 1 février 1997, Vol. 27, n° 1, p. 73 -111. DOI : 10.1177/030631297027001004.

Merz (Martina), « Multiplex and unfolding: Computer simulation in particle physics », *Science in context*, 1999, Vol. 12, n° 2, p. 293–316.

Mesihovic (S.), Malmqvist (J.) et Pikosz (P.), « Product data management system-based support for engineering project management », *Journal of Engineering design*, 2004, Vol. 15, n° 4, p. 389–403.

Messaadia (Mourad), Belkadi (Farouk), Gidel (Thierry), Troussier (Nadège) et Eynard (Benoît), « PLM as a strategic approach supporting requirement management process », in : *International Conference on Product Lifecycle Management*. Inderscience, 2009.

Metz (Thierry), *Le journal d'un manoeuvre*, Paris : Gallimard, 2004.

Meyer (John W.) et Rowan (Brian), « Institutionalized Organizations: Formal Structure as Myth and Ceremony », *Am J Sociol* [En ligne], septembre 1977, Vol. 83, n° 2, p. 340. DOI : 10.1086/226550

Meyer (M.), « Objet-frontière ou Projet-frontière? », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2009, Vol. 3, n° 1, p. 127–148.

Midler (Christophe), « Évolution des modèles d'organisation et régulations économiques de la conception », *Problèmes économiques*, 1998, Vol. 2.

Midler (Christophe), *L'auto qui n'existait pas : management des projets et transformation de l'entreprise*, Paris : Dunod, 2004.

Miller (Ed), « What is PDM », *Mechanical Engineering Magazine* [En ligne], octobre 1998.

Ming (X. G.), Yan (J. Q.), Lu (W. F.) et Ma (D. Z.), « Technology solutions for collaborative product lifecycle management–status review and future trend », *Concurrent Engineering* [En ligne], 2005, Vol. 13, n° 4, p. 311. DOI : 10.1177/1063293X05060135

Ming (X. G.), Yan (J. Q.), Wang (X. H.), Li (S. N.), Lu (W. F.), Peng (Q. J.) et Ma (Y. S.), « Collaborative process planning and manufacturing in product lifecycle management », *Computers in Industry*, 2008, Vol. 59, n° 2-3, p. 154–166.

Mintzberg (Henry), *Le management : voyage au centre des organisations*, Paris : Éditions d'Organisation, 2004.

Mintzberg, *Structure et dynamique des organisations*, Editions d'Organisation, 1998. 440 p.

Missonier (Stéphane), « Une typologie de la complexité », *Revue économique et sociale*, juin 2012, Vol. 70, n° 2, p. 11-19.

Moisdon (J. C.), *Du mode d'existence des outils de gestion*, Paris : Seli Arslan, 1997.

Moisdon (JC) et Weil (B.), « L'invention d'une voiture: un exercice de relations sociales? 1er épisode », *Annales des Mines. Gérer et comprendre*, septembre 1992a, Vol. 28, p. 30–41.

Moisdon (JC) et Weil (B.), « L'invention d'une voiture: un exercice de relations sociales? 2ème épisode », *Annales des Mines. Gérer et comprendre*, décembre 1992b, Vol. 28, p. 50–58.

Montel (N.), « L'administration de la preuve: des sciences expérimentales à l'histoire des sciences », *Genèses*, 2004, n° 3, p. 148–162.

Moody (D. L.) et Shanks (G. G.), « Improving the quality of data models: empirical validation of a quality management framework* 1 », *Information Systems*, 2003, Vol. 28, n° 6, p. 619–650.

Moody (D. L.), Sindre (G.), Brasethvik (T.) et Others, « Evaluating the quality of information models: empirical testing of a conceptual model quality framework », 2003,

Morin (Edgar), « Pour une crisologie », *Communications*, 1976, Vol. 25, n° 1, p. 149–163.

Morin (Edgar), *La méthode. Tome 1, La nature de la nature.*, Paris : Ed. du Seuil, 1977.

Morin (Edgar), *La méthode. Tome 2, La vie de la vie*, Paris : Ed. du Seuil, 1980.

Morin (Edgar), *La méthode. Tome 3, La connaissance de la connaissance : anthropologie de la connaissance*, Paris : Ed. du Seuil, 1986.

Morin (Edgar), *Science avec conscience*, Nouv. éd. revue et modifiée par l'auteur. Paris : Fayard ; Le Seuil, 1990.

Morin (Edgar), *La méthode. Tome 4, Les Idées. Leur habitat, leur vie, leurs moeurs, leur organisation*, Paris : Editions du Seuil, 1991.

Morin (Edgar), « Le besoin d'une pensée complexe », *Le magazine littéraire*, 1996, Vol. Hors-série, n° 1966-1996: La passion des idées, p. 120-123.

Morin (Edgar), *Introduction à la pensée complexe*, [Nouv. éd.]. Seuil, 2005. 158 p.

Morin (Edgar), *La méthode*, Paris : Ed. du Seuil, 2008a.

Morin (Edgar), *On complexity*, Hampton Press, 2008b.

Morin (Edgar), *Mon chemin : entretiens avec Djénane Kareh Tager*, Paris : Fayard, 2008c.

Morin (Edgar), *La voie. Pour l'avenir de l'humanité*, Paris : Fayard, 2011.

Morris (Peter W. G.), « Managing Project Interfaces - Key Points for Project Success », in : *Project management handbook*, 1988. p. 16-55.

Nah (Fiona Fui-Hoon), Lau (Janet Lee-Shang) et Kuang (Jinghua), « Critical factors for successful implementation of enterprise systems », *Business Process Management Journal* [En ligne], 2001, Vol. 7, n° 3, p. 285-296. DOI : 10.1108/14637150110392782.

Najman (L.), Gibot (O.) et Berche (S.), « Indexing technical drawings using title block structure recognition », in : *Document Analysis and Recognition, 2001. Proceedings. Sixth International Conference on*, 2002. p. 587–591.

Nalebuff (B. J.) et Brandenburger (A. M.), « Co-opetition: Competitive and cooperative business strategies for the digital economy », *Strategy & Leadership*, 1997, Vol. 25, n° 6, p. 28–35.

Nicquevert (Bertrand), Boujut (Jean-François) et Yami (Saïd), « Déploiement d'un système d'information centré sur l'usage de la maquette numérique pour l'intégration d'équipements de recherche en physique des particules », in : *11ème Colloque National AIP PRIMECA*. La Plagne : 2009.

Nicquevert (Bertrand), Boujut (Jean-François) et Yami (Saïd), « Design Process Modelling and Complexity: Which Key Success Factors for the Implementation of a PDM Tool? », in : *Proceedings of the 11th International Design Conference DESIGN 2010*, 2010. p. 1153–1162.

Nicquevert (Bertrand) et Boujut (Jean-François), « Item life cycles in product data management: a case study on how to implement a data approval process », in : *Proceedings of the 18th International Conference on Engineering Design (ICED11), International Conference on Engineering Design, ICED11*. Copenhagen, 2011. p. 12-23.

Nicquevert (Bertrand), Hauviller (Claude) et Benedikt (Michael), « Designing, Integrating and Coordinating the Installation of MedAustron », in : *Proceedings of IPAC'11, IPAC 2011*. San Sebastian, Spain : 2011. p. 1671-1673.

Nicquevert (Bertrand) et Hauviller (Claude), *International Workshop on Advanced Materials for High Precision Detectors: Archamps, Haute-Savoie, France, 28-30 September 1994: proceedings*, CERN, 1994.

Nicquevert (Bertrand), Petit (Stéphan) et Lécaille (Pascal), *Un système de gestion de dessins sur le projet scientifique ATLAS : motivation, implantation, exploitation*, octobre 1998.

Nicquevert (Bertrand), Yami (Saïd), Nordberg (Markus) et Boisot (Max), « From Russia With Love: A Contributing Country Perspective, chapter 9 », in : *Collisions and Collaboration: Mana-*

ging Big Learning from Small Events in the ATLAS Experiment at the LHC, Oxford : Oxford University Press, 2011. p. 182-200.

Nicquevert (Bertrand), *Essai introductif à la traduction de How Experiments End de Peter Galison*, DEA de philosophie, Dijon : Bourgogne, 1999.

Nicquevert (Bertrand), « Ressources, contraintes et difficultés dans les pratiques de conception d'un grand projet scientifique », in : *Comment former aux compétences de la conception ?*, Cachan : Association Tour 123, 2000. p. 35-58.

Nicquevert (Bertrand), *Science sans ingénierie: péril de l'expérience. L'apport de la technologie et du management à la fabrique des expériences*, juin 2008.

Nicquevert (Bertrand), « Intégrer un détecteur de physique des particules dans sa caverne ou Les défis de la gestion d'espace autour de repères multiples dans des grands projets innovants », in : *Repères et Espace(s). De la pluralité à la polysémie*, Grenoble : Presses universitaires de Grenoble, 2010. p. 139-146.

Nightingale (P.), « The product-process-organisation relationship in complex development projects », *Research Policy*, 2000, Vol. 29, n° 7-8, p. 913–930.

Noël (F.) et Roucoules (L.), « The PPO design model with respect to digital enterprise technologies among product life cycle », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2008, Vol. 21, n° 2, p. 139–145.

Nonaka (I.), « A dynamic theory of organizational knowledge creation », *Organization science*, 1994, p. 14–37.

Offe (C.), « Capitalism by democratic design? Democratic theory facing the triple transition in East Central Europe », *Social Research*, 1991, Vol. 58, n° 4, p. 865–892.

Offe (C.), « Capitalism by democratic design? Democratic theory facing the triple transition in East Central Europe », *Social Research: An International Quarterly*, 2004, Vol. 71, n° 3, p. 501–528.

Olmedo (Elena), « Complexity and chaos in organisations: complex management », *International Journal of Complexity in Leadership and Management*, 2010, Vol. 1, n° 1, p. 72–82.

OMG, *Business Process Model and Notation, v.2.0* [En ligne], 2011. Disponible sur : < http://www.omg.org/spec/BPMN/2.0 >

Onfray (Michel), *Théorie du voyage : poétique de la géographie*, Paris : Librairie générale française, 2007.

Onnes (H. Kamerlingh), « Further experiments with liquid helium. C. On the change of electric resistance of pure metals at very low temperatures etc. IV. The resistance of pure mercury at helium temperatures », *Koninklijke Nederlandse Akademie van Weteschappen Proceedings Series B Physical Sciences*, 1911, Vol. 13, p. 1274–1276.

Pahl (Gerhard) et Beitz (Wolfgang), *Engineering design : a systematic approach*, 3. ed. London : Springer, 2007.

Pels (HJ), « PLM niet voor engineers », *Constructeur*, 2008, Vol. 47, n° 10, p. 29.

Penaranda (N.), Mejia (R.), Romero (D.) et Molina (A.), « Implementation of product lifecycle management tools using enterprise integration engineering and action-research », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2010, Vol. 23, n° 10, p. 853–875.

Peng (T. K.) et Trappey (A. J. ..), « A step toward STEP-compatible engineering data management: the data models of product structure and engineering changes », *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 1998, Vol. 14, n° 2, p. 89–109.

Peng (Youjun), *La nation chez Alexandre Dumas*, L'Harmattan, 2003. 126 p.

Pepermans (Raymond), « "Proactif" dans le vocabulaire de la gestion », *L'Actualité terminologique*, 1985, Vol. 18, n° 9, p. 11.

Perry (M.) et Sanderson (D.), « Coordinating joint design work: the role of communication and artefacts », *Design Studies*, 1998, Vol. 19, n° 3, p. 273–288.

Pestre (Dominique) et Krige (John), « Some thoughts on the early history of CERN », in : *Big Science: The Growth of Large Scale Research*, Stanford University Press, 1992. p. 78–99.

Pestre (Dominique) et Krige (John), *Science in the twentieth century*, Harwood Academic Publishers, 1997.

Pestre (Dominique), *Physique et physiciens en France, 1918-1940*, Editions des archives contemporaines, 1984.

Pestre (Dominique), « The CERN System, its Legislative and Executive Arms and some global statistics on how it functioned », in : *History of CERN, II*, 1988. p. 341-415.

Pestre (Dominique), *Some characteristic features of CERN in the 1950s and 1960s*, CERN, 1989.

Pestre (Dominique), « Gargamelle and BEBC. How Europe's last two giant bubble chambers were chosen », *History of CERN*, 1996, Vol. 3, p. 39–64.

Peter (Lawrence) et Hull (Raymond), *Le principe de Peter, ou pourquoi tout va toujours plus mal*, Paris : Librairie Générale Française, 1988.

Peters (Suzanne) et Mesters (Patrick), *Vaincre l'épuisement professionnel : toutes les clés pour comprendre le burn out*, Paris : Robert Laffont, 2007.

Petit (J. C.), « The quality approach and fundamental research: Working towards a constructive alliance (Part I) », *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement*, septembre 1999a, Vol. 4, n° 7, p. 274–279.

Petit (J. C.), « The quality approach and fundamental research: Working towards a constructive alliance (Part II) », *Accreditation and Quality Assurance: Journal for Quality, Comparability and Reliability in Chemical Measurement* [En ligne], décembre 1999b, Vol. 4, n° 11, p. 458–462. DOI : 10.1007/s007690050412.

Philpotts (M.), « An introduction to the concepts, benefits and terminology of product data management », *Industrial Management & Data Systems*, 1996, Vol. 96, n° 4, p. 11–17.

Piaget (Jean), *La construction du réel chez l'enfant*, Delachaux & Niestlé, 1937.

Picasso (E.), « A few memories from the days at LEP », *The European Physical Journal H*, 2011, p. 1–12.

Pineau (Gaston) et Le Grand (Jean-Louis), *Les histoires de vie*, 4e édition. Presses Universitaires de France - PUF, 2007. 127 p.

Pineau (Gaston) et Michèle (Marie), *Produire sa vie : autoformation et autobiographie*, Éditions Saint Martin, 1983. 419 p.

Pinel (Muriel), Braesch (Christian), Pralus (Magali), Tabourot (Laurent) et Bonnal (Pierre), « Lean et PLM : deux piliers complémentaires à l'agilité de l'entreprise », in : *Actes de la 1re Conférence internationale en gestion de projet*, *1re Conférence internationale en gestion de projet*. Université du Québec à Trois-Rivières, Québec, Canada : 2012. p. 19.

Pinel (Muriel), Braesch (Christian), Tabourot (Laurent) et Berger (Aline), « Operational framework based on modeling languages to support product repository implementation », in : *Proceedings of 19th International Conference on Product Lifecycle Management*, *19th International Conference on Product Lifecycle Management*. Montréal : 2012.

Pinto (J. K.) et Prescott (J. E.), « Variations in Critical Success Factors Over the Stages in the Project Life Cycle », *Journal of Management* [En ligne], mars 1988, Vol. 14, n° 1, p. 5-18. DOI : 10.1177/014920638801400102.

Piore (M. J.), Lester (R. K.), Kofman (F. M.) et Malek (K. M.), « The organization of product development », *Industrial and Corporate Change*, 1994, Vol. 3, n° 2, p. 405.

PMI Standards Committee, *Guide du référentiel des connaissances en gestion de projet (Guide PMBOK) 2000*, Newtown Square, Penns. : Project Management Institute, 2003.

Pol (G.), Merlo (C.), Legardeur (J.) et Jared (G.), « Analysing collaborative practices in design to support project managers », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2007, Vol. 20, n° 7, p. 654–668.

Portree (D. S. F.), *Thirty years together: A chronology of U. S.-Soviet space cooperation* [En ligne], Lyndon B. Johnson Space Center, 1993. Disponible sur : < http://www.csa.com/partners/viewrecord.php?requester=gs&collection=TRD&recid=N9319975AH >.

Portree (D. S. F.), *Mir hardware heritage* [En ligne], Lyndon B. Johnson Space Center, 1995. (Reference Series). Disponible sur : < http://www.spaceflight.nasa.gov/history/shuttle-mir/references/documents/mirheritage.pdf >.

Price (Mike), Hatch (Mark), Butin (François) et Nicquevert (Bertrand), *Integration status and TC TDR matters/M Price, M Hatch, F Butin, B Nicquevert*. LHCC, 1999.

Quéau (Philippe), *Eloge de la simulation*, Champ Vallon, 1986. 257 p.

Quéau (Philippe), *Le virtuel : Vertus et vertiges*, Champ Vallon, 1993. 215 p.

Radevsky (Anton) et Sanders (Emma), *Voyage to the Heart of Matter: The Atlas Experiment at CERN*. Papadakis, 2010.

Ramachandran (R.), « The elusive “God particle” », *Frontline* [En ligne], 10 septembre 2011, Vol. 28, n° 19.
Disponible sur : < http://www.frontline.in/fl2819/stories/20110923281911600.htm > (consulté le 15 septembre 2011).

Raymond (E.), « The cathedral and the bazaar », *Knowledge, Technology & Policy*, 1999, Vol. 12, n° 3, p. 23–49.

Reboton (Joany), « Les flots incertains. Repères et frontières de l'espace adriatique à l'époque archaïque », in : *Repères et Espace(s). De la pluralité à la polysémie*, Presses universitaires de Grenoble, 2010. p. 103-115.

Recker (J. C.), Rosemann (M.), Indulska (M.) et Green (P.), « Business process modeling: a comparative analysis », 2010.

Reeves (Hubert), *Poussières d'étoiles*, Seuil, 1984. 195 p.

Renard (L.) et Saint Amant (G.), « Capacité, capacité organisationnelle et capacité dynamique: une proposition de définitions », *Les cahiers du Management Technologique*, 2003, Vol. 13, n° 1, p. 43–56.

Repenning (N. P.), Goncalves (P.) et Black (L. J.), « Past the Tipping Point. The Persistence of Firefighting in Product Development. », *California Management Review*, 2001, Vol. 43, n° 4, p. 44-63.

Repenning (N. P.) et Sterman (John D.), « Nobody ever gets credit for fixing problems that never happened: Creating and Sustaining Process Improvement. », *California Management Review*, 2001, Vol. 43, n° 4, p. 64-88.

Rifkin (Jeremy), *The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World*, Palgrave Macmillan, 2011. 304 p.

Robin (Vincent), Rose (Bertrand) et Girard (Philippe), « Modelling collaborative knowledge to support engineering design project manager », *Computers in Industry* [En ligne], février 2007, Vol. 58, n° 2, p. 188-198. DOI : 10.1016/j.compind.2006.09.006.

Roddier (François), *Thermodynamique de l'évolution. Un essai de thermo-bio-sociologie*, Éditions Parole, 2012.

Rohlf (James William), *Modern Physics from alpha to Z0*, 1st éd. Wiley, 1994. 664 p.

Rönkkö (M.), Kärkkäinen (M.) et Holmström (J.), « Benefits of an item-centric enterprise-data model in logistics services: A case study », *Computers in Industry*, 2007, Vol. 58, n° 8-9, p. 814–822.

Rosnay (Joël de), *Le Macroscope : vers une vision globale*, Paris : Éditions du Seuil, 1975.

Rossi (Lucio), « Nous étions tous devenus trop arrogants », *ECHO Magazine*, 7 janvier 2010, Vol. 1,.

Roy (Arpita), « Science and the Large Hadron Collider: a probe into instrumentation, periodization and classification », *Dialectical Anthropology* [En ligne], septembre 2012, p. 1-26. DOI : 10.1007/s10624-012-9278-6.

Ruiz-Dominguez (G.) et Boujut (Jean-François), « Modelling the Process of Creating a Mutual Understanding in Distributed Design Teams », in : *Proceedings of the 8th International Design Conference DESIGN 2004*, 2004. p. 1161–1166.

Saint-Augustin, *Saint-Augustin : Les Confessions - Dialogues Philosophiques*, Gallimard, 1998.

Saint-Marc (L.), Callot (M.), Reyterou (C.), Moly (M.), Girard (P.) et Deschamps (JC), « Toward a data maturity evaluation in collaborative design processes », in : *Proceedings of the 8th International Design Conference DESIGN 2004*, 2004. p. 69–76.

Salaün (Jean-Michel), *Vu, lu, su. Les architectes de l'information face à l'oligopole du Web.* Paris : La Découverte, 2012.

Salber (Daniel), *De l'interaction homme-machine individuelle aux systèmes multi-utilisateurs. L'exemple de la communication homme-homme médiatisée*, Ph. D., Grenoble UJF, 1995.

Samper (Serge), Adragna (P. A.), Favreliere (H.), Lottin (J.) et Nicquevert (Bertrand), « Form specification for a mechatronic design–Application to an accelerator Cell. », in : *Actes* [En ligne], *8th International Workshop on Research and Education in Mechatronics*. Tallinn, Estonie : 2007. Disponible sur : < http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00333124 >

Samuel Reich (Eugenie), « US physicists fight to save neutrino experiment », *Nature* [En ligne], 26 mars 2012,DOI : 10.1038/nature.2012.10305.

Sanders (Emma) et Radevsky (Anton), *Voyage au cœur de la matière : L'expérience Atlas au CERN, Livre animé*, Verlhac Editions, 2011.

Santalainen (Timo), Nordberg (Markus), Baliga (Ram B.) et Boisot (Max), « New Management Research Models: Lessons from the ATLAS Adhocracy, chapter 3 », in : *Collisions and Collaboration: Managing Big Learning from Small Events in the ATLAS Experiment at the LHC*, Oxford University Press, 2011. p. 55-76.

Sapsed (J.) et Salter (A.), « Postcards from the edge: local communities, global programs and boundary objects », *Organization Studies*, 2004, Vol. 25, n° 9, p. 1515–1534.

Schärlig (Alain), *Décider sur plusieurs critères : panorama de l'aide à la décision multicritère*, 1re éd. Lausanne : Presses polytechniques romandes, 1985.

Schön (Donald), *The reflective practitioner : how professionals think in action*, Aldershot [England] : Arena, 1995.

Schuette (R.) et Rotthowe (T.), « The guidelines of modeling - an approach to enhance the quality in information models », in : *Conceptual Modeling–ER'98*, 1998. p. 240–254.

Schuh (G.), Rozenfeld (H.), Assmus (D.) et Zancul (E.), « Process oriented framework to support PLM implementation », *Computers in Industry*, 2008, Vol. 59, n° 2-3, p. 210–218.

Schwarz (Stephan), *The Reverse of the Medal. Experiences of pratical ethics in the Social System of Big Science* [En ligne], 2004, Disponible sur : < http://www.stephanschwarz.se/dokument/The%20Reverse%20of%20the%20Medal.pdf >

Schwenk (Charles R.), « Management illusions and biases: Their impact on strategic decisions », *Long Range Planning* [En ligne], octobre 1985, Vol. 18, n° 5, p. 74-80. DOI : 10.1016/0024-6301(85)90204-3.

Sedera (W.), Gable (G. G.), Rosemann (M.) et Smyth (R. W.), « A success model for business process modeling: findings from a multiple case study », 2004.

Sedera (W.), Rosemann (M.) et Gable (G. G.), « Measuring process modelling success », in : *10th European Conference on Information Systems, Gdansk, Poland*, 2002. p. 331–341.

Sensevy (Gérard C.), « Modélisation: une approche épistémologique », *aster*, 2006, p. 43.

Serres (Michel), *Atlas*, Paris : Julliard, 1994.

Siller (H. R.), Estruch (A.), Vila (C.), Abellan (J. V.) et Romero (F.), « Modeling workflow activities for collaborative process planning with product lifecycle management tools », *J Intell Manuf* [En ligne], juin 2008, Vol. 19, n° 6, p. 689-700. DOI : 10.1007/s10845-008-0120-6.

Silver (Bruce), *BPMN method and style*, Aptos Calif. : Cody-Cassidy Press, 2009.

Simon (H. A.), *Models of man; social and rational*, Wiley, 1957.

Simon (H. A.), « The architecture of complexity », *Proceedings of the American philosophical society*, 1962, Vol. 106, n° 6, p. 467–482.

Simoulin (V.), « Une communauté instrumentale divisée... et réunie par son instrument », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2007, Vol. 1, n° 2, p. 221–241.

Sokoloff (Georges), *Métamorphose de la Russie : 1984-2004*, Paris : Fayard, 2003. 748 p.

Sosa (M. E.), Eppinger (S. D.) et Rowles (C. M.), « The misalignment of product architecture and organizational structure in complex product development », *Management Science*, 2004, p. 1674–1689.

Stal-Le Cardinal (J.) et Marle (F.), « Project: The just necessary structure to reach your goals », *International Journal of Project Management*, 2006, Vol. 24, n° 3, p. 226–233.

Stange (Thomas), « How European physics reached across the Wall - CERN Courier », *CERN Courier* [En ligne], novembre 2002.

Disponible sur : < http://cerncourier.com/cws/article/cern/28741 >.

Stapnes (Steinar), « Detector challenges at the LHC », *Nature* [En ligne], juillet 2007, Vol. 448, n° 7151, p. 290-296. DOI : 10.1038/nature06078

Star (S. L.) et Griesemer (J. R.), « Institutional Ecology, "Translations" and Boundary Objects: Amateurs and Professionals in Berkeley's Museum of Vertebrate Zoology, 1907-39 », *Social studies of science*, 1989, Vol. 19, n° 3, p. 387–420.

Star (S. L.), « Ceci n'est pas un objet-frontière ! », *RAC*, 2010a, Vol. 4, n° 1, p. 18-35.

Star (Susan Leigh), « This is Not a Boundary Object. Reflections on the Origin of a Concept », *Science Technology Human Values* [En ligne], 1 septembre 2010b, Vol. 35, n° 5, p. 601-617. DOI : 10.1177/0162243910377624.

Stark (J.), *Product lifecycle management : 21st century paradigm for product realisation.*, 2nd éd. Berlin : Springer, 2011.

Stephens (John), Barton (John) et Haslett (Tim), « Action Research: Its History and Relationship to Scientific Methodology », *Syst. Pract. Action. Res.* [En ligne], août 2009, Vol. 22, n° 6, p. 463-474. DOI : 10.1007/s11213-009-9147-7.

Stephenson (David), *Heavenly vaults : from Romanesque to Gothic in European architecture*, New York : Princeton Architectural Press, 2009.

Sterman (John D.), « Learning in and about complex systems », *System Dynamics Review*, 1994, Vol. 10, n° 2-3, p. 291–330.

Sterman (John D.), *Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World [With CDROM]*, McGraw Hill Higher Education, 2000. 993 p.

Sterman (John D.), « System Dynamics Modeling: Tools for Learning in a Complex World », *California management review*, 2001, Vol. 43, n° 4, p. 8.

Sterman (John D.), « All models are wrong. Reflections on becoming a systems scientist », *System Dynamics Review*, 2002, Vol. 18, n° 4, p. 501–531.

Stevens (Richard), Brook (Peter), Jackson (Ken) et Arnold (Stuart), *Systems Engineering: Coping with Complexity*, London : Prentice-Hall, 1998.

Stuckenbruck (L. C.), « Integration: The essential function of project management », in : *Project management handbook*, 1988. p. 56–81.

Subrahmanian (E.), Rachuri (S.), Fenves (S. J.) et Foufou (S.), « Product lifecycle management support: a challenge in supporting product design and manufacturing in a networked economy », *International Journal of Product Lifecycle Management*, 2005, Vol. 1, n° 1, p. 4–25.

Suchman (L. A.), « Practice-based design of information systems: Notes from the hyperdeveloped world », *The Information Society*, 2002, Vol. 18, n° 2, p. 139–144.

Sun (Zhihong), Blaquière (M.), Jamet (O.), Levesy (B.), Massinger (M.), Mayri (C.), Mladenov (D.), Nicquevert (B.), Pabot (Y.), Vedrine (P.) et Zaitsev (Y.), « Evolution of the design of the ATLAS barrel toroid structure », *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2004, Vol. 518, n° 1-2, p. 76–78.

Surbier (L.), Alpan (G.) et Blanco (Eric), « Interface modeling and analysis during production ramp-up », *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* [En ligne], 2010, Vol. 2, n° 4, p. 247-254. DOI : 10.1016/j.cirpj.2010.02.004.

Surbier (L.), *Problem and interface characterization during ramp-up in the low volume industry*, Grenoble : Grenoble INP, 2010.

Taubes (Gary), *Nobel dreams: power, deceit, and the ultimate experiment*, Random House, 1986. 294 p.

Teegavarapu (Sudhakar), Summers (Joshua D.) et Mocko (Gregory M.), « Design method development: a case study and survey », in : *Proceedings of the Seventh international symposium on tools and methods of competitive engineering - TMCE 2008*, Izmir, Turkey : 2008.

Terzi (S.), Bouras (A.), Dutta (D.) et Garetti (M.), « Product lifecycle management–from its history to its new role », *International Journal of Product Lifecycle Management*, 2010, Vol. 4, n° 4, p. 360–389.

Terzi (S.), *Elements of product lifecycle management: Definitions, open issues and reference models*, PhD, Nancy et Milan, 2005.

Théroude (F.), Braesch (C.) et Haurat (A.), « How Simulation Can Help In A Process Control Model », 2002. Disponible sur : < http://www.scs-europe.net/services/ess2002/PDF/design-2.pdf >.

Thom (René), *Paraboles et catastrophes : Entretiens sur les mathématiques, la science et la philosophie*, Flammarion, 1989. 190 p.

Thoreau (Henry), *Walden ou la vie dans les bois*, L'imaginaire. Paris : Gallimard, 2002.

Tillion (Germaine), *Fragments de vie*, Paris : Seuil, 2009.

Todorov (Tzvetan), *Mikhail Bakhtine, le principe dialogique*, Seuil, 1981. 315 p.

Tollenaere (Michel), Belloy (P.) et Tichkiewitch (S.), « A part description model for the preliminary design », *Advanced CAD/CAM Systems–State-of-the-art and future trends in feature technology*, 1995.

Tran (S.), « Quel (s) rôle (s) du SI dans le pilotage des organisations étendues? Le cas des roadmaps de management », 2009.

Trompette (Pascale) et Vinck (Dominique), « Retour sur la notion d'objet-frontière », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2009a, Vol. 3, n° 1, p. 5–27.

Trompette (Pascale) et Vinck (Dominique), « Revisiting the notion of Boundary Object », *http://www.cairn.info/*, 2009b, Vol. 3, n° 1, p. 3-25.

Tsoukas (H.), « Introduction: Chaos, Complexity and Organization Theory », *Organization* [En ligne], août 1998, Vol. 5, n° 3, p. 291-313. DOI : 10.1177/135050849853001.

Turchi (Peter), *Maps of the imagination : the writer as cartographer*, Trinity University Press, 2004.

Türtscher (Philipp), Garud (Raghu), Nordberg (Markus) et Boisot (Max), « The Concept of an ATLAS Architecture, chapter 4 », in : *Collisions and Collaboration: Managing Big Learning from Small Events in the ATLAS Experiment at the LHC*, Oxford University Press, 2011. p. 77-97.

Türtscher (Philipp), *The Emergence of Architecture in Modular Systems: Coordination across Boundaries at ATLAS, CERN*, PhD thesis, University of St. Gallen, 2008a.

Türtscher (Philipp), « The Atlas Collaboration: A Distributed Problem-Solving Network in Big Science », *SSRN eLibrary* [En ligne], 1 février 2008b. Disponible sur : <http://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=1326515 > .

Tyurin (Nikolai), « Forty years of high-energy physics in Protvino - CERN Courier », *CERN Courier* [En ligne], novembre 2003. Disponible sur : <http://cerncourier.com/cws/article/cern/28958 > (consulté le 9 novembre 2009).

Uhl-Bien (M.), Marion (R.) et McKelvey (B.), « Complexity leadership theory: Shifting leadership from the industrial age to the knowledge era », *The Leadership Quarterly*, 2007, Vol. 18, n° 4, p. 298–318.

Urry (J.), « The complexity turn », *Theory Culture and Society*, 2005, Vol. 22, n° 5, p. 1.

Vajna (S.), « Workflow for design », *Design process improvement*, 2005, p. 366–385.

Van de Ven (AH) et Johnson (P. E.), « Knowledge for theory and practice », *The Academy of Management Review*, 2006, Vol. 31, n° 4, p. 802–821.

Van den Hamer (P.) et Lepoeter (K.), « Managing design data: The five dimensions of CAD frameworks, configuration management, and product data management », *Proceedings of the IEEE*, 1996, Vol. 84, n° 1, p. 42–56.

Vannucci (François), *ATLAS. Le nouveau défi des particules élémentaires*, Ellipses, 2007. 128 p. (L'esprit des sciences, N°44)

Vassilef (Jean), *Histoires de vie et pédagogie du projet*, Chronique sociale, 1999. 188 p.

Vaughan (Diane), *The Challenger launch decision : risky technology, culture, and deviance at NASA*, University of Chicago Press, 1997.

Vergonjeanne (François), *Coacher les groupes et les organisations : Avec la Théorie Organisationnelle d'Eric Berne*, InterEditions, 2010. 280 p.

Vernant (Jean-Pierre), *Entre mythe et politique*, Paris : Seuil, 1996.

Vernier (F.), *Navigation collaborative dans un espace d'informations de grande taille*, Mastère, Grenoble : ENSIMAG, 1997.

Vico (Giambattista), *L'Antique sagesse de l'Italie*, Paris : Flammarion, 1993.

Vidaillet (Bénédicte), Estaintot (Véronique d') et Abecassis (Philippe), *La décision : une approche pluridisciplinaire des processus de choix*, Bruxelles : De Boeck, 2005.

Vidal (Ludovic-Alexandre), Marle (Franck) et Bocquet (Jean-Claude), « Modelling project complexity », in : *International conference on engineering design, ICED*, 2007.

Vidal (Ludovic-Alexandre), Marle (Franck) et Bocquet (Jean-Claude), « Interactions-based risk clustering methodologies and algorithms for complex project management », *International Journal of Production Economics*, 2010.

Vidal (Ludovic-Alexandre) et Marle (Franck), « Understanding project complexity: implications on project management », *Kybernetes* [En ligne], 2008, Vol. 37, n° 8, p. 1094-1110. DOI : 10.1108/03684920810884928.

Vincent (Robert), *Géométrie du nombre d'or*, 4e éd. Marseille : Chalagam édition, 2005.

Vinck (Dominique) et Jeantet (Alain), « Mediating and Commissioning Objects in the Socio-technical Process of Product Design: A Conceptual Approach », in : Maclean (Donald), Saviotti (Paolo), et Vinck (Dominique) (dir.), *Designs, Networks and Strategies*, Bruxelles : EC Directorat General Science R&D, 1995. p. 111-129.

Vinck (Dominique) et Penz (Bernard), *L'équipement de l'organisation industrielle. Les ERP à l'usage*, Paris : Hermès science, 2008. (collection Science informatique et SHS).

Vinck (Dominique), Pépiot (Grégoire) et Al., « La complexité socio-technique. Le cas de la re-conception d'une paroi de blindage », in : *Ingénieurs au quotidien : Ethnographie de l'activité de conception et d'innovation*, Presses universitaires de Grenoble, 1999. p. 19-32.

Vinck (Dominique), Pépiot (Grégoire) et Al., « Socio-technical complexity: redesigning a shielding wall », in : Vinck (Dominique) (dir.), *Everyday Engineering: An Ethnography of Design and Innovation*, 2003. p. 13–27.

Vinck (Dominique), Rivera (I.) et Penz (Bernard), « Des bonnes raisons d'échouer dans un projet technique: la construction sociale de l'impact », *Sciences de la société*, 2004, Vol. 61, p. 123–138.

Vinck (Dominique), *Sociologie des sciences*, Armand Colin, 1997. 292 p.

Vinck (Dominique), « Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales. », *Revue Française de Sociologie*, 1999a, Vol. XI, n° 2, p. 385-414.

Vinck (Dominique) (Sous la dir de.), *Ingénieurs au quotidien : Ethnographie de l'activité de conception et d'innovation*, Grenoble : Presses universitaires de Grenoble, 1999b.

Vinck (Dominique), « De l'objet intermédiaire à l'objet-frontière », *Revue d'anthropologie des connaissances*, 2009, Vol. 3, n° 1, p. 51–72.

Vinck (Dominique), « Taking intermediary objects and equipping work into account in the study of engineering practices », *Engineering Studies* [En ligne], 2011, Vol. 3, n° 1, p. 25-44. DOI : 10.1080/19378629.2010.547989

Von Hippel (E.), « The dominant role of users in the scientific instrument innovation process », *Research policy* [En ligne], 1976, Vol. 5, n° 3, p. 212–239. DOI : 10.1016/0048-7333(76)90028-7.

Von Koch (H.), « Une méthode géométrique élémentaire pour l'étude de certaines questions de la théorie des courbes planes », *Acta mathematica*, 1906, Vol. 30, n° 1, p. 145–174.

Walderseel (R.) et Sheather (S.), « The effects of strategy type on strategy implementation actions », *Human Relations*, 1996, Vol. 49, n° 1, p. 105.

Weaver (W.), « Science and complexity », *American scientist*, 1948, Vol. 36, n° 4, p. 536–544.

Weber (C.), « What Is "Complexity"? », in : *ICED 05: 15th International Conference on Engineering Design: Engineering Design and the Global Economy*, 2005. p. 1785.

Weick (K. E.) et Roberts (K. H.), « Collective mind in organizations: Heedful interrelating on flight decks », *Administrative science quarterly*, 1993, p. 357–381.

Weinberg (S.), *Les trois premières minutes de l'univers*, Seuil, 1980.

Wenger (Etienne), *Communities of Practice: Learning, Meaning, and Identity*, 1re éd. Cambridge University Press, 1999. 336 p.

Williams (T. M.), « The need for new paradigms for complex projects », *International Journal of Project Management*, 1999, Vol. 17, n° 5, p. 269–273.

Wilson (Edward O.) et Hölldobler (Bert), « Dense heterarchies and mass communication as the basis of organization in ant colonies », *Trends in Ecology & Evolution* [En ligne], mars 1988, Vol. 3, n° 3, p. 65-68. DOI : 10.1016/0169-5347(88)90018-3

Winograd (Terry) et Flores (Fernando), *L'intelligence artificielle en question*, Paris : Presses Univ. de France, 1989.

Wixom (B. H.) et Watson (H. J.), « An empirical investigation of the factors affecting data warehousing success », *MIS quarterly*, 2001, p. 17–41.

Wohed (P.), Van der Aalst (W. M. P.), Dumas (M.), Ter Hofstede (A.) et Russell (N.), « On the suitability of BPMN for business process modelling », *Business Process Management*, 2006, p. 161–176.

Wolynes (P. G.), « As simple as can be? », *Science*, 1995, Vol. 268, p. 1721–1727.

Wu (M. C.) et Wu (TY), « A skeleton approach for modelling assembly products », *Journal of Design and Manufacturing*, 1993, Vol. 3, p. 121–133.

Wunenburger (Jean-Jacques), *La raison contradictoire. Sciences et philosophie modernes : la pensée du complexe*, Paris : A. Michel, 1990. 286 p.

Yami (S.) et Le Roy (F.), *Les stratégies collectives : rivaliser et coopérer avec ses concurrents*, Colombelles : EMS Management & société, 2007. (Gestion en liberté).

Yami (S.), Nicquevert (B.) et Nordberg (M.), « Le consortium de recherche comme stratégie collective agglomérée: le cas de la «collaboration ATLAS» au CERN », *Revue Finance Contrôle Stratégie*, 2006, Vol. 9, n° 3, p. 191–217.

Yami (Saïd), Nicquevert (Bertrand) et Nordberg (Markus), « Research Consortium as Collective Strategy », in : *EURAM- European Academy of Management*. TUM Business School, Munich : 2005.

Yami (Saïd), « Fondements et perspectives des stratégies collectives », *Revue française de gestion*, 2006, n° 8, p. 91–104.

Yassine (A.) et Braha (D.), « Complex concurrent engineering and the design structure matrix method », *Concurrent Engineering*, 2003, Vol. 11, n° 3, p. 165–176.

Yatchinovsky (Arlette), *L'approche systémique : pour gérer l'incertitude et la complexité*, Paris : ESF éditeur, 1999.

Yeh (S. C.) et You (C. F.), « STEP-Based Data Schema for Implementing Product Data Management System », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 2002, Vol. 15, n° 1, p. 1–17.

Yin (Robert), *Case study research : design and methods*, 4th ed. Sage Publications, 2009.

Yves-Bonnet (Michel), *Jazz et complexité*, Paris : L'Harmattan, 2010.

Zarama (G.) et Vinck (Dominique), « Façonnage des espaces de travail d'un collectif de recherche en micro et nanotechnologies », *Terrains & travaux*, 2011, n° 1, p. 61–80.

Zimmer (C.), « Le regard sans objet », *Esprit*, février 1994, n° 199, p. 67-86.

Lexique des règles typographiques en usage à l'Imprimerie nationale, Nouv. éd. à jour. Paris : Imprimerie nationale, 2002. 195 p.

Index et tables

Sommaire des index et tables

Table des acronymes.....493

Index des noms propres.....495

Index des figures.....499

Index des tableaux.....502

Table des acronymes

2D	2 Dimensions
3D	3 Dimensions
ABS	*Assembly Breakdown Structure*
ATLAS	Expérience du LHC : *A Toroidal LHC ApparatuS*
ATL BE	Réunion des bureaux d'études CERN travaillant pour ATLAS (1995-2000)
BOM	*Bill Of Material*, nomenclature produit
BPMN	*Business Process Model and Notation*
CAO	Conception Assistée par Ordinateur
CDD	CERN *Drawings Directory*
CEA	Commissariat à l'énergie atomique (France)
CERN	Conseil, puis Centre Européen pour la Recherche Nucléaire
CMS	Expérience du LHC : *Compact Muon Solenoid*
DDMP	*Design Data Management Project* (*Med*Austron, 2010-2012)
DEA	Diplôme d'Études Avancées (équivalent du Master 2 Recherche)
EB	(ATLAS) *Executive Board*
ECR	*Engineering Change Request*
ECN	*Engineering Change Notification*
EDMS	*Engineering Data Management System*
EN	Département *Engineering*
EP	Division puis département *Experimental Physics*
ERP	*Enterprise Resource Planing*
GED	Gestion Électronique de Documents
HB (ou ATLHB)	(ATLAS) projet de support barrel (feet and rails system)
HEP	*High Energy Physics*
INFN	Istituto Nazionale de Fisica Nucleare (Italie)

KEK	Kō Enerugī Kasōki Kenkyū Kikō (Japon)
LHC	*Large Hadron Collider*
MAID	*MedAustron Integration and Design*
MDT	*Monitored Drift Tubes* (type de chambres à muon d'ATLAS)
MEF	Groupe Machines and Experimental Facilities (2009–)
MLM	(ATLAS) Muon Layout Meeting
MME	Groupe Materials and Mechanical Engineering (2009–)
MoU	Memorandum of Understanding
MPG	Magnet Project Group
MPI	Max Planck Institut (Allemagne)
NIKHEF	Nationaal instituut voor subatomaire fysica (Pays-Bas)
OBS	Organisational Breakdown Structure
PBS	Product Breakdown Structure
PDM	Product Data Management
PE	Division Physics Experiments
PH	Département Physics
PLM	Product Lifecycle Management
PPE	Division Particle Physics Experiments
PPT	Projet Progress Tracking
PRR	Production Readiness Review
QAP	Quality Assurance Plan
RPC	Resistive Plate Chambers (chambres à muon de déclenchement)
SGDT	Système de Gestion des Données Techniques
SX	Surface eXperiment : Bâtiment expérimental de surface (suivi du numéro du point d'interaction concerné)
STD	Standard, un type de modèle CAO permettant une standardisation de certains composants
TA3	Groupe Technical Assistance 3
TB (ou BT)	(ATLAS) Barrel Toroid (ou Toroïde Baril)
TC	(ATLAS) Technical coordination
TCM	(ATLAS) Technical Coordination Meeting (réunion mensuelle avec les représentants de chaque système, de 1995 à 1999)
TCSG	(ATLAS) Technical Steering Group (réunion mensuelle avec les représentants de chaque système, de 1999 à 2001)
TCT	(ATLAS) Technical Coordination Team (réunion hebdomadaire interne)
TDR	(ATLAS) Technical Design Report
TIE	(ATLAS) Team for Integration and Engineering
TMB	(ATLAS) Technical Management Board (réunion mensuelle avec les représentants de chaque système, à partir de 2001)
TS	Technical Support, division entre 2005 et 2009
TE (ou ECT)	(ATLAS) End-Cap Toroid (ou Toroïde d'Extrémité)
WP	Work Package, lot de travaux

Index des noms propres

A

Amaldi....70
Archimède....378
Argyris....104, 266
Astley....298
Atlan....341
Avenier....101, 266, 294, 342

B

Baccarini....48
Bachelard....14, 110, 287, 288, 290, 346, 373, 375, 453
Bachy....82, 129, 141, 160, 243, 246, 457
Beaune....346
Beitz....104
Berger....31, 33
Bergson....369, 371
Berne....317, 318, 323
Berthoz....310
Besnier....48, 290, 299, 459
Blanco....313
Blessing....109, 371
Bloor....120
Boisot....70, 114, 459
Boujut....39, 114, 313, 355, 372, 460
Bourdet....34, 39
Bourdieu....103
Bourgine....308, 309
Boy....91
Braesch....413
Brannick....102
Brout....51
Bryant....55
Bucciarelli....18, 106
Butin....135, 457

C

Callon....315
Camus....179, 251, 253, 451, 457
Cantor....22
Chanal....283, 312
Charpak....113
Clemens....50
Coghlan....102-104

D

De Broglie....48
De Staël....177
Debray....339, 353
Descartes....287
Dubar....264
Duby....269

E

Einstein....45, 287, 291-293
Ellis....51, 273, 274
Emmeche....349
Englert....51
Evans 55

F

Finger....198
Fleurance....312
Flores....320
Fombrun....298

G

Galison....34, 35, 39, 50, 53, 54, 71, 283, 348, 349, 354
Genelot....266, 267, 270, 287, 293, 313
Gide....18

Gigand.....21, 372, 438, 439, 442, 460
Grebici.....396-398, 401
Griesemer.....354, 422

H

H. Hoffmann.....113
Hauviller.....459
Hawking.....45
Hegel.....398
Heine.....455
Héraclite.....407, 409
Higgs.....50-54, 58, 113, 282, 298, 452
Hoffmann.....82, 128, 458, 459
Hofstadter.....119, 449, 460
Hugo.....77
Hyppölä.....344, 345, 347

J

Jacq.....115
Jeantet.....36
Jenni.....71, 74

K

Kant.....13, 14, 119, 253, 324
Knorr-Cetina.....50, 346
Koch.....22
Koulberg.....49, 186, 187, 458

L

Latour.....50, 107, 312, 315
Law.....230
Le Moigne.....48, 92, 105, 144, 283, 287-290, 293, 294, 371, 372
Lécaille.....19, 36-39, 93, 114, 119, 151-153, 161, 173, 236, 241, 274, 286, 309, 353, 354, 358, 360, 361, 396, 398, 401, 438, 458, 460
Lécaille,.....396
Leonard-Barton.....284
Lévy.....315
Livingston.....55
Lorentz.....56

M

M. Nessi.....113
M. Price.....113
Macdonald.....397
Mandelbrot.....151
Marchand.....129, 346
Margery.....129, 346
Martinet.....111, 283, 284, 322
Mélèse.....266
Moisdon.....315
Mol.....230
Morin.....20, 29, 106, 110, 263, 266, 279, 281, 288, 290, 291, 293, 294, 297, 299, 300, 307, 308, 317, 341, 342, 359, 371, 453

N

Nahman.....427
Nessi. 62, 82, 85, 89, 129, 146, 168, 181, 190, 226, 458
Nicquevert.....82, 167, 208, 226
Nietzsche.....253
Nordberg.....71, 74, 114, 344, 458, 459

O

Olmedo.....364
Oppenheimer.....49

P

Pahl.....104
Pascal (Blaise).....290
Pennac.....15
Pépiot.....37, 38
Perec.....149, 151
Pérez.....312
Pestre.....68, 86
Piaget.....442
Platon.....254
Price. 82, 85, 89, 111, 128, 129, 141, 170-172, 190, 458, 459
Prométhée.....455
Proust.....257

R

Ricard.....27, 29
Richter.....58
Rocard.....309, 310
Roddier.....284
Rohlf.....55
Rubbia.....58

S

Saint-Exupéry.....25
Salber.....274
Saxe (John).....337
Schmid.....190, 458
Schön.....120, 266
Soyinka.....117, 119
Star.....353, 354, 422
Sterman.....264
Stuckenbruck.....303, 314, 316

T

Tesson....41
Thoreau....33
Tichkiewitch....36
Tillion....99, 101
Ting....58
Türtscher....309, 346, 347, 355, 362

U

Urry....288, 290

V

Valéry....288, 447
Vernant 305
Vico....101
Vidal....310
Vinck....39, 114, 353, 354, 358, 360

W

Weber....281, 282, 291, 349
Wenger....312
Williams....92, 281, 397
Wilson....334
Winograd....320
Wunenburger....311, 438
Wunenburger,....330

Y

Yami....40, 114, 309
Yami, ...459
Yin....106, 107

Index des figures

Figure 0.1: Carte de navigation dans la thèse « en oméga d'or », la cartomegador....23
Figure I-1: Un métier à tisser en Russie....27
Figure 2.1: le LHC à la manière de Léonard de Vinci....41
Figure 2.2 : Cueilleuse de Higgs, pas chasseuse de Higgs !....46
Figure 2.3: Extrait de la convention établissant le CERN, 1954....47
Figure 2.4: Graphe radar des performances d'un accélérateur....54
Figure 2.5: Diagrammes de Livingston, évolution des accélérateurs depuis 1930....55
Figure 2.6: Photo et modèle CAO correspondant de l'interconnexion entre aimants du LHC....57
Figure 2.7 : Schéma en vue aérienne des zones expérimentales du LHC....59
Figure 2.8 : Vue partielle du détecteur ATLAS en cours d'installation....60
Figure 2.9 : Vue schématique du détecteur ATLAS....62
Figure 2.10 : Reconstruction d'un événement réel....63
Figure 2.11: Organigramme global du CERN pour le mandat 2009-2013....65
Figure 2.12: Évolution de la structure organisationnelle du CERN, de 1955 à 2012....67
Figure 2.13 : Schéma de l'organisation d'ATLAS en 2004, période de construction....72
Figure 2.14: Questions fréquemment posées sur le LHC....75
Figure 3.1: Organigramme partiel du CERN en 1996....81
Figure 3.2: Organigramme partiel du CERN fin 2000 83
Figure 3.3 : Relations entre l'organisation de projet d'ATLAS et la structure du CERN....84
Figure 3.4 : Organigramme de la Coordination technique d'ATLAS, 01.1996–04.1999....85
Figure 4.1: Observer le terrain ?!....99
Figure 4.2: Le cadre général de la DRM....109
Figure 5.1 : L'outil “Enveloppe”, gestation et émergence....121
Figure 5.2: ATLAS en bouteille, vue d'artiste....124
Figure 5.3: La situation : pourquoi le processus n'a-t-il pas encore convergé ?....126
Figure 5.4: Extrait des minutes du TCSG, 10.11.1999....127
Figure 5.5: État du tableau de bord des enveloppes au 10.11.1999....128
Figure 5.6: Évolution de la configuration du projet ATLAS....129
Figure 5.7: Définition de l'enveloppe géométrique d'un sous-système....131
Figure 5.8 : Proposition de définition d'un volume enveloppe au maximum de matière....133
Figure 5.9 : Symbole du « Tout autour volumique »....133
Figure 5.10: Enveloppe individuelle et volume de réservation....135
Figure 5.11 : Modélisation schématique du processus d'approbation des enveloppes....137
Figure 6.1: Dieu, architecte de l'univers....149
Figure 6.2 : Image 3D de la région concernée de l'extrémité des bobines toroïdales....152
Figure 6.3 : Région de la latte n°3 après installation de la bobine du toroïde dans les pieds....153
Figure 6.4 : Installation de la première bobine du toroïde dans les pieds, novembre 2004....153
Figure 6.5 : Dessin de la région de la bobine inférieure, moitié gauche, d'ATLAS....154
Figure 6.6 : Détail des éléments....155
Figure 6.7: Position et coupe d'une latte....155
Figure 6.8 : Position des chambres à muon MEE par rapport aux pieds....157
Figure 6.9: L'état des lieux selon l'équipe du layout des muons....158
Figure 6.10 : Installation d'une chambre trapézoïdale MEES....165
Figure 6.11 : Liste des ECRs closes....166

Figure 6.12: Deux concepts de gestion des espaces....173
Figure 7.1: Un penseur, Atlas, Sisyphe….....177
Figure 7.2 : « Bons baisers de Russie »....181
Figure 7.3 : Structure de management (simplifiée) du projet des Pieds et rails....191
Figure 7.4 : Vue d'ensemble des délivrables du projet « Feet & Rails »....192
Figure 7.5 : Montage à blanc dans la caverne....193
Figure 7.6 : Inspection sur site du premier pied 195
Figure 7.7: La structure chaude du toroïde avec les pieds....196
Figure 7.8: Le maillage du modèle global....197
Figure 7.9: Schéma du supportage....199
Figure 7.10 : Résultat de calcul....199
Figure 7.11: Chargement sur les interfaces: comparaison entre différents calculs....201
Figure 7.12 : Intégration des chemins optiques....205
Figure 7.13 : Étude cinématique d'installation de la chambre MBMF sous le girder....214
Figure 7.14 : Schéma de principe d'une solution libre en rotation....215
Figure 7.15 : Modélisation CAO de la version dite « tiltée »....215
Figure 7.16 : Étude d'intégration....215
Figure 7.17 : Vérification du support de la version « tiltée »....215
Figure 7.18 : Analyse par éléments finis de la version « renforcée »....216
Figure 7.19 : Adaptation au pied de la version « renforcée »....216
Figure 7.20 : Modélisation sous logiciel FEA de la géométrie « renforcée »....217
Figure 7.21 : Étude comparative d'intégration des trois solutions de girder....218
Figure 7.22 : Émergence d'une solution hybride....219
Figure 7.23 : Esquisse de la solution de compromis hybride du girder et de ses supports....222
Figure 7.24 : Esquisse du girder hybride, et sa modélisation en 3D....222
Figure 7.25 : Esquisse de la solution définitive....223
Figure 7.26 : Coupe des interfaces avec le girder final au niveau de la boîte de connexion....224
Figure 8.1 : Quelques métadonnées d'un plan issu de la CAO....232
Figure 8.2 : Le plan AT712484PL retrouvé par Yvon dans les BD Euclid grâce à l'outil ECC....233
Figure 8.3 : Métadonnées du plan Euclid AT712484PL....234
Figure 8.4 : Le « Master PBS », arborescence produit globale du détecteur ATLAS....235
Figure 8.5 : Cartouche d'un plan validé, exemple d'un plan d'enveloppe....236
Figure 8.6: Cycle de vie d'un dessin dans CDD....237
Figure 8.7 : Arborescence du projet des Pieds et rails, code racine ATLHB....238
Figure 8.8 : Le cartouche d'un plan de production Izhora....239
Figure 8.9: Le tampon CERN sur le cartouche IZ....239
Figure 8.10: Vue axonométrique incluse dans les plans-vecteur....242
Figure 8.11 : Dessin d'ensemble montrant la cote entre pieds de 5400 mm....246
Figure 8.12 : Les trois piliers du rôle de manageur technique....248
Figure 9.1: Une courbe de dépendance de la performance en fonction du niveau de stress 263
Figure 9.2: Définition embryonnaire des interfaces....271
Figure 9.3: Modèle du trèfle des systèmes collaboratifs....274
Figure 9.4 : Représentation concentrique du modèle de circulation du manageur technique....275
Figure 10.1 : Couples en tension du management « paradoxal »....283
Figure 10.2: Frontispice de l'article d'Einstein [1934]....292
Figure 10.3: Représentation graphique de la relation dialogique dans La Méthode de Morin…299
Figure 10.4 : Le trade-off entre différentiation et intégration....303
Figure 11.1 : Le concept de broker (courtier), parallèle à celui d'objet-frontière....313
Figure 11.2 : Interfaces de management....314
Figure 11.3 : L'acteur en relation avec trois types d'interlocuteurs....316
Figure 11.4: Comportement local d'un agent d'un système multi-agents....317
Figure 11.5 : les bases de l'Analyse Transactionnelle....318
Figure 11.6: maille élémentaire du modèle d'acteur d'interface....319
Figure 11.7 : Réseau d'interfaces en forme de “cotte” de mailles....319
Figure 11.8: Décomposition/agrégation fractales....320
Figure 11.9: Modèle en cotte de mailles....321
Figure 11.10: Représentation en mailles tripolaires des acteurs....322
Figure 11.11 : Les pôles de l'acteur central et de ses voisins de réseau....323
Figure 11.12: Interface entre A et C via O....324
Figure 11.13 : Interface directe....325
Figure 11.14 : Interface composée....326
Figure 11.15: Comparaison des modes direct commissionnaire et composé médiateur....326

Figure 11.16: Les six types de transaction....328
Figure 11.17: Les trois types de traduction....329
Figure 11.18: Les trois traductions en boucles internes....330
Figure 11.19 : Lien d'interface et lien de composition....335
Figure 11.20 : Cycle en V pour le projet Pieds et rails d'ATLAS....336
Figure 12.1: Modèle interfacial entre l'acteur d'interface O et un homologue B....350
Figure 12.2: Représentation d'une interface entre trois homologues....351
Figure 12.3: Interface bouclante entre homologues....352
Figure 12.4: Modèle de l'évolution d'un objet intermédiaire lors du processus de conception...361
Figure IV-1: Schéma général de « l'Agir ↔ Penser en complexité »....369
Figure 13.1 : Disposition générale du complexe d'accélération de MedAustron....376
Figure 13.2 : Matrice organisationnelle de MedAustron....377
Figure 13.3 : Tâches de l'intégration, et liens avec les autres activités du projet MedAustron...379
Figure 13.4: Modèle à mailles tripolaires des acteurs en présence pour le déploiement des outils PLM....383
Figure 14.1: Première version du nouveau cartouche, avec distinction des entités....394
Figure 14.2 : Phases de la tâche de documentation de la conception....396
Figure 14.3 : Les espaces de conception de Lécaille vus par Grebici....397
Figure 14.4 : Une autre vision de la traversée des frontières....398
Figure 14.5 : Articulation entre cycle de vie des données et cycle de vie de l'article....400
Figure 14.6 : Modèle simplifié BPMN du processus de validation des données de conception...403
Figure 14.7 : Exemple de boucle....404
Figure 14.8 : Exemple d'activité multi-instance....404
Figure 14.9 : Gateways : parallélisation....404
Figure 14.10 : Processus interne vertical....405
Figure 14.11 : Fusion de lignes de nage avec interdiction d'activités simultanées....405
Figure 14.12 : Solution hybride avec boucle et activités multi-instances associées....406
Figure 15.1: Modélisation partielle du processus BE : la phase de pré-étude....412
Figure 15.2 : Exemple de layout partiel....414
Figure 15.3: Intégration de la région de l'injection / extraction....415
Figure 15.4 : Premier squelette, un aimant dipolaire du SPS, avec ou sans le 3D....416
Figure 15.5: Enveloppe d'un équipement....417
Figure 15.6: L'article fédérateur d'objets intermédiaires....418
Figure 15.7 : Le processus BPMN complet de conception et intégration....420
Figure 15.8: Interface technologiquement typée....423
Figure 15.9 : Une interface entre trois homologues, version tridimensionnelle....424
Figure 15.10 : Le processus collaboratif Ω (Conception, Intégration), coupe 3D....425
Figure 15.11: Le processus collaboratif Ω (Conception, Intégration)....425
Figure 16.1: Sommet du PLM....431
Figure 16.2 : L'arroseur arrosé....436
Figure 16.3: Trialectique du management technique....440
Figure 17.1: 1980-2040 : les grands programmes futurs du CERN....452
Figure 17.2 : Atlas et Prométhée....454

Index des tableaux

Tableau 2.1: Correspondances indicatives entre aspects systémiques et modalités de complexités intrinsèques du CERN....48
Tableau 2.2: Liste des divisions et départements du CERN depuis sa création....66
Tableau 4.1: Les différents cas traités....113
Tableau 4.2: Une frise chronologique des cas – 1992 à 2012....113
Tableau 4.3: Traitement des cas : quelques indicateurs....114
Tableau 6.1: Proposition de répartition des rôles par équipe (vue très simplifiée…)....170
Tableau 7.1 Proposition de phasage de la crise de 2002....211
Tableau 7.2: Signataires du protocole de lancement de la production à IZ, 11 avril 2001....226
Tableau 9.1 Synthèse des critères de crise selon Hermann (1972)....261
Tableau 9.2: Analyse des phases des crises....262
Tableau 10.1 Comparaison de la méthode analytique et du paradigme systémique....287
Tableau 10.2 Correspondance indicative entre observations et principes....293
Tableau 10.3: Matrice croisant dominantes complexes et questions de recherche....295
Tableau 10.4: Élaboration matricielle du tissu complexe : matrice méthodologique....296
Tableau 11.1 Les neuf types d'interfaces orientées....328
Tableau 11.2 Boucles, traductions et transactions....331
Tableau 11.3: Composition des interfaces....331
Tableau 12.1: Matrice méthodologique complétée par mots-clé....365
Tableau 14.1: Différents champs à mettre en correspondance et concepts à réconcilier....400

Table des matières

Manager l'interface.....3

Sommaire.....8

Préambule.....11

Introduction ”kantique”.....13

Chapitre 0. Premiers cheminements.....15

0.1. Partie I – Genèse(s) : déjà entre action et recherche.....17

0.2. Partie II – Agir sans trop penser : un parcours, un marcheur, des étapes.....18

0.3. Partie III – Repenser avant d'agir : que faire de la complexité.....19

0.4. Partie IV – Agir et penser à la fois : vers un hypercompas.....20

0.5. Un itinéraire de lecture, une carte du territoire.....21

Premier clamot . Penser cathédrale.....25

Partie I – Genèse(s).....27

Chapitre 1. Les fils d'un parcours.....31

1.1. Le fil de la démarche : l'attrait pour la recherche-action.....33

1.2. Le fil de la thématique : la figure de l'interface.....35

1.3. Le fil du terrain : intégrer.....36

1.4. La présente thèse en gésine : le fil de la coopération.....38

1.5. Le projet de thèse, les fils conceptuels.....39

Chapitre 2. Le CERN, une trame 41

2.1. Deux ou trois infinis.....44

2.2. Le CERN, un système complexe.....45

2.3. Complexité géopolitique : un laboratoire international.....48

2.4. Complexité scientifique : théories, expériences et instruments.....50

2.5. Complexité technologique : la science lourde....54
2.5.1. Collisionner....54
2.5.2. Détecter....58
2.5.3. Traiter les données....63
2.6. Complexité organisationnelle : gérer de grands projets scientifiques....64
2.6.1. Organigramme du CERN....64
2.6.2. Les organisations transversales (dites "CERN-wide")....69
2.6.3. Les expériences et les Collaborations de physique....70
a. Évolution vers les "mégacollaborations"....70
b. Organisation interne des collaborations....71
c. Relations entre CERN et collaborations....73

Chapitre 3. Quel rôle pour le manageur technique ?....77
3.1. Une étude de cas : le rôle du Bureau technique....79
3.1.1. Un Bureau d'études sur la sellette....80
3.1.2. Intrications organisationnelles....82
3.1.3. Réorganisations inabouties....86
3.2. Premiers enseignements....87
3.2.1. Le rôle dual du CERN....88
3.2.2. Recomposition du paysage organisationnel....89
3.2.3. Personnalités et figures....89
3.2.4. Définition de tâche : le rôle du manageur technique....90
3.2.5. Quels outils, quelles ressources....91
3.3. Caractéristiques de la complexité perçue....91
3.4. Trois questions de recherche entrelacées....92
3.4.1. La question première du rôle du manageur technique....93
a. Le manageur technique, ébauche de définition....94
b. La place des outils de gestion....94
c. Le contexte des grands projets scientifiques....95
3.4.2. La question sous-jacente des processus de conception et d'intégration....95
3.4.3. La question englobante d'une approche par la complexité....96
3.5. Une triple réponse 96

Chapitre 4. La méthode....99
4.1. Une recherche-action immergée....102
4.1.1. Différents types de recherche-action....102
4.1.2. Une épistémologie constructiviste ? Une perspective constructionniste ?....104
4.2. Étude de cas multiples....106
4.3. La Design Research Methodology....109
4.4. Quelques cas sur la ligne du temps....111

Deuxième clamot. Trois tailleurs de pierre....115

Partie II -
Agir sans trop penser....117

Chapitre 5. Gestion d'espaces (1). Enveloppes....121
5.1. Mettre ATLAS en bouteille....124
5.2. Un processus qui ne converge pas....125

5.3. Sous-détecteurs et Coordination technique....127
5.4. « Emballez, c'est pesé » : l'enveloppe comme outil de définition....130
5.4.1. Les enveloppes géométriques individuelles....131
a. Volet géométrique....132
b. Volet gestionnaire....134
5.4.2. Enveloppes globales et repères multiples : l'enveloppe comme outil d'intégration....134
5.4.3. Représentation des enveloppes....137
5.5. Origines d'une non-convergence....138
5.6. D'Eilat aux lattes (I) : tensions au Proche-Orient....141
5.6.1. Discussions à l'ATLAS Muon Workshop....141
5.6.2. Divergences....142
5.7. Réorganisations stratégiques....144
5.7.1. Des relations révisées entre système des muons et Coordination technique....144
5.7.2. La nouvelle organisation de la Coordination technique....146

Chapitre 6. Gestion d'espaces (2). Négociation de marges....149
6.1. D'Eilat aux lattes (II) : feuille de route pour une résolution de conflit....151
6.2. Lattes, chambres, corridors et pieds....152
6.2.1. La bobine de l'aimant toroïdal....155
6.2.2. Les pieds....156
6.2.3. Le spectromètre à muons....156
6.3. Une contrainte technique : « We MUST increase the size » 157
6.4. Construire un espace d'échanges : « play the same team game » 160
6.5. Formalisations des décisions....165
6.5.1. La procédure des Engineering Change Requests....166
6.5.2. La fin d'une époque....168
6.5.3. Remarques sur le fonctionnement effectif....170
6.6. Intégration : frontières et voisins....172

Chapitre 7. Gestion de projet.
Les pieds d'ATLAS et la Russie....177
7.1. Un chargement changeant, une production changée....180
7.2. La Russie, le CERN et ATLAS....182
7.2.1. La situation de la Russie au tournant du siècle....183
7.2.2. La Russie et le CERN....185
7.2.3. Un “Common Fund Item”....188
7.3. Le projet Pieds et rails d'ATLAS....190
7.3.1. Le périmètre technique du projet....191
7.3.2. Contribution in kind et choix d'une firme....193
7.3.3. Un projet réussi ?....195
7.4. Simuler le comportement....196
7.4.1. Interfaces entre modèles....197
7.4.2. Flottements sur les conditions d'interfaces....200
7.4.3. Convergence autour des calculs....203
7.5. Un pied dans le chaudron, l'autre dans le glacis....204
7.5.1. Dilemme : « Shall I ask Izhora to stop production? » 206
7.5.2. Phasage de la révision....210
7.6. Concevoir, c'est convaincre....213
7.6.1. Deux à trois solutions en lice....213

7.6.2. Trancher le dilemme....217
7.6.3. Sortie de crise....221
7.6.4. Une galerie de pièces à convictions....225
Chapitre 8. Gestion de données techniques....227
8.1. Besoin de gérer des données techniques....230
8.2. Créer et structurer les données....232
8.3. Valider et partager les données....236
8.3.1. Les mécanisme de gestion de workflow dans CDD....236
8.3.2. Archivage de dessins externes : le cas d'Izhora....237
8.3.3. Approbation de volumes : le cas des enveloppes....241
8.4. Gérer les demandes de modifications....243
Troisième clamot. Les tailleurs de pierre quelques mois plus tard....249
Partie III -
Repenser avant d'agir....251
Chapitre 9. Émergence du manageur technique....257
9.1. Crises et pompiers....260
9.1.1. Phasages des crises....260
9.1.2. Stress, ou intensité ?....262
9.1.3. Une dynamique de systèmes complexes....264
9.2. La figure émergente du manageur technique....265
9.2.1. Degré 1 : le MT animateur de la conception collaborative....267
a. Espaces d'échanges....267
b. Mode de gestion de projet....268
9.2.2. Degré 2 : le manageur technique concepteur d'outils de conception collaborative....270
9.2.3. Degré 3 : le manageur technique concepteur d'organisation(s)....272
9.3. Un modèle “concentrique” du manageur technique....274
9.4. Vers un modèle complexe du manageur technique en action....277
Chapitre 10. Pour une complexité féconde....279
10.1. La complexité des cas....281
a. Les carences en termes d'approche systémique....283
b. Les dilemmes....283
c. Les émergences d'organisations....284
d. Les effets multi-échelles....285
10.2. Qu'est-ce que la complexité ?....286
10.2.1. Le paradigme systémique....287
10.2.2. La pensée complexe....288
10.2.3. Einstein et le paradoxe de la complexité....291
10.3. Fécondité de l'approche par la pensée complexe....293
10.3.1. Trois principes séminaux....293
10.3.2. Élaboration matricielle d'un tissu complexe....294
10.3.3. Constitution de la matrice méthodologique....295
10.4. Cellule majeure c11 : une boucle dialogique....297
10.5. Cellule mineure c21 : le manageur technique, moteur de boucle....300
10.6. Cellule mineure c31 : une dialogique Ω (Conception, Intégration)....301

Chapitre 11. Acteur d'interface.....305
11.1. Cellule mineure c12 : le principe hologrammique.....307
11.1.1. Le tout est dans la partie qui est dans le tout.....307
11.1.2. Décomplexifier ?.....309
11.1.3. Le chiffre trois.....311
11.2. Cellule majeure c22 : un modèle d'acteur d'interface.....312
11.2.1. Acteurs et interfaces.....312
11.2.2. Constituants du modèle.....315
a. Quelles interfaces ?.....316
b. Les systèmes multi-agents.....317
c. L'analyse transactionnelle.....317
11.2.3. Une maille à trois pôles.....318
a. Mailles et cotte.....319
b. Les pôles de la maille.....322
11.2.4. Modélisation d'interfaces.....323
a. Le sens d'une flèche.....324
b. Deux modes d'interfaces.....325
c. Une traduction en adaptation d'impédance.....327
11.2.5. Une typologie d'interfaces.....327
a. Types de transactions.....328
b. Types de traductions.....329
c. Traductions en boucles.....330
d. L'ensemble des relations.....330
11.2.6. Situations limites du modèle.....332
11.3. Cellule mineure c32 : relations d'interdépendances hétérarchiques.....334

Chapitre 12. Jusqu'aux frontières des espaces d'échanges.....339
12.1. Cellule mineure c13 : le principe d'auto-éco-organisation.....341
12.1.1. Éco-organisation et autopoïèse.....341
12.1.2. ATLAS, ou l'auto-organisation tacite.....343
12.2. Cellule mineure c23 : vers l'acteur-frontière.....347
12.2.1. Construire un espace d'échanges collectif.....348
12.2.2. De l'acteur d'interface à l'acteur-frontière.....352
12.3. Cellule majeure c33 : traverser les espaces.....356
12.3.1. Un processus élémentaire au sein des espaces d'échanges.....357
12.3.2. Les processus de conception et d'intégration.....360
12.3.3. Le processus collaboratif Ω (Conception, Intégration, Réalisation) 363
12.4. Vers l'agir ↔ penser.....365

Quatrième clamot. Faire et avoir pour être.....367

Partie IV -
Agir et penser à la fois.....369

Chapitre 13. Périmètres ?.....373
13.1. Un nouveau terrain : MedAustron.....375
13.1.1. L'organisation globale du projet.....375
13.1.2. Le périmètre du lot de travaux “Intégration”.....378

13.2. Un périmètre favorable....381
13.2.1. D'une gouvernance fragmentée....381
13.2.2. … à une égide unifiée....384
Chapitre 14. Équipement de l'équipage....387
14.1. Un projet de gestion des données de conception....390
14.2. Le cartouche, partie visible du processus....392
14.3. Du cartouche au cycle de vie....395
14.3.1. Limites au cartouche....395
14.3.2. Espèces d'espaces....396
14.3.3. Étape, état, statut....398
14.3.4. Implantation effective....399
14.4. Modélisation du processus de vérification et validation....401
14.4.1. Une modélisation BPMN....401
14.4.2. Extension du domaine de la boucle....402
Chapitre 15. Intégration de l'intégration....407
15.1. Le processus d'intégration....410
15.1.1. Approches du processus élémentaire d'intégration....410
15.1.2. Intégration proactive....411
15.2. Entre optique et mécanique : le lien manquant....414
15.2.1. Layout et design....414
15.2.2. Le squelette : anatomie d'un concept....416
15.2.3. Implantation effective....417
a. Squelette, enveloppe et article....417
b. Le processus....419
c. Rééquilibrages organisationnels....421
15.3. De l'objet-frontière au processus sans frontières....422
15.3.1. Le squelette, archétype de l'objet-frontière....422
15.3.2. Modélisation interfaciale du processus Ω (Conception, Intégration)....423
Chapitre 16. Pro-cube et hypercompas....427
16.1. Sorties de terrain....430
16.1.1. Article squelettique, squelette désarticulé, PLM hors les rails....431
16.1.2. Péremption de périmètres....433
16.1.3. Jeu de cubes....436
16.2. Un hypercompas....437
Cinquième clamot. Vision des choses....445
Coda....447
Chapitre 17. Bouclages et ouvertures....449
a. Une évolution professionnelle. Instrumenter l'action....452
b. Des jalons académiques. La figure de l'interface....453
c. Une voie intersubjective. La co-construction et la complexité....453
d. Interfaces mythologiques....454
e. Un chemin personnel et récursif....455
Remerciements....457

Ultime clamot. Construire.....461

Bibliographie.....463

Index et tables.....491

Table des acronymes.....493

Index des noms propres.....495

Index des figures.....499

Index des tableaux.....502

Bertrand Nicquevert Novembre 2012

Manager l'interface

Approche par la complexité du processus collaboratif de conception, d'intégration et de réalisation : modèle transactionnel de l'acteur d'interface et dynamique des espaces d'échanges

Résumé

Dans de grands projets tels qu'accélérateurs ou détecteurs de particules, les interfaces et les frontières se révèlent à la fois critiques et sous-estimées. Le manageur technique, acteur parmi les autres, se trouve placé à des nœuds de réseau où il doit mettre en œuvre des espaces d'échanges afin de susciter des conduites collaboratives. À partir d'études de cas issus du terrain du CERN, la thèse adopte trois principes issus de la littérature de la complexité, les principes dialogique, hologrammique et d'auto-éco-organisation. Elle propose une construction méthodologique matricielle originale menant à l'élaboration d'un modèle transactionnel de l'acteur d'interface.
L'espace d'échanges collaboratif devient le lieu où se déploie la dynamique de transformation de l'acteur d'interface en acteur-frontière. Les objets intermédiaires élaborés lors du processus de conception / intégration y sont simultanément transformés en objets frontières, qui sont mobilisés pour la réalisation du produit dans le cadre récursivement déterminé du projet. L'intérêt d'une approche globale et couplée de cette dynamique des espaces d'échanges conduit à proposer un « hypercompas » afin d'orienter « l'agir ↔ penser » du manageur technique.

Mots-clés

CERN, science lourde, grands projets, physique des particules, complexité, ingénierie collaborative, modélisation de processus, concourance, management de la conception, interfaces organisationnelles, intégration mécanique, conception intégrée de produits, cycle de vie

---

Managing the interface

An approach through the complexity of the collaborative process of design, integration and realization: a transactional model of the interface actor and dynamics of exchange spaces

Abstract

In large projects such as particle accelerators or detectors, interfaces and boundaries reveal themselves to be both critical and underestimated. The technical manager, an actor among others, finds himself placed at network nodes where he must set up exchanges spaces in order to generate collaborative behaviours. Starting with case studies from the field of CERN, the thesis follows three principles based on the dialogical, the hologramic and the self-eco-organization principles, as expanded in the writings on complexity. It puts forward an original methodological matrix construction leading to a transactional model of the interface actor.
The collaborative exchanges spaces builds itself as a place for the dynamic transformation of the interface actor into a boundary actor. Intermediate objects, created during the design / integration process, are simultaneously transformed into boundary objects. They are instrumental in the realization of the product: this takes place in the framework of the project which has been determined through a recursive process. The interest generated by such a global and combined approach of this dynamic process leads to the proposal of a "hypercompass", with the aim of providing the means for the technical manager to orient his "acting ↔ thinking".

Keywords

CERN, Big Science, large projects, particle physics, complexity, collaborative engineering, process modeling, concurrent engineering, design management, organisational interfaces, mechanical integration, product integrated design, product lifecycle

---

CERN-THESIS-2012-238 **https://cds.cern.ch/record/1511891**