

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE

INSTITUT NATIONAL DES SCIENCES APPLIQUEES  
TOULOUSE



Département de Génie Electrique & Informatique

PROJET DE FIN D'ETUDES

---

CONSOLIDATION DES SYSTEMES DE DECLENCHEMENT DES THYRATRONS  
POUR LES AIMANTS A IMPULSIONS RAPIDES DU COMPLEXE PS

---

CERN - Organisation Européenne pour  
la Recherche Nucléaire, Genève, Suisse

Cyril Royer  
AE – PTP Energie

Juin 2019



## RESUME

Ce document synthétise le travail réalisé au CERN dans le cadre de mon stage de fin d'études INSA. Au CERN, l'outil principal permettant d'étudier la composition de la matière (au sens large) est l'accélérateur de particules. Le CERN utilisant plusieurs accélérateurs en série, il est nécessaire de pouvoir faire passer les particules entre ces différents accélérateurs. Un tel transfert nécessite des électroaimants de forte puissance commutés, entre autres, à l'aide d'interrupteurs de type thyatron. Ce rapport décrit ma contribution à la finalisation d'un nouveau système de déclenchement de thyatrons nommé « ThyPTU », censé remplacer à terme tous les systèmes équivalents déjà existants au CERN. Les deux premières parties explicitent davantage le contexte du projet, et apportent au lecteur certaines connaissances techniques nécessaires à la compréhension du sujet. Puis les parties 3 à 6 détaillent mes réalisations pour le projet ThyPTU, qui sont la modélisation sous PSpice du ThyPTU et de ses charges (incluant le thyatron), le choix d'une stratégie d'alimentation en haute tension des différents modules, le test du prototype sur un équipement réel, et enfin son intégration dans un châssis afin d'obtenir un exemplaire complet de pré-série.



## REMERCIEMENTS

Je remercie dans un premier temps pour m'avoir recommandé pour ce stage :

- M. Jean-Yves FOURNIOLS, enseignant à l'INSA,
- M. Yvain SUBRA, enseignant à l'Université Paul Sabatier,
- M. Michel BOURZEIX, chef du service des Effets Radiatifs et Electromagnétiques du CEA Gramat.

Je remercie ensuite l'ensemble des personnes au CERN qui m'ont guidé tout au long de ce stage, en particulier, pour leur accueil et leur accompagnement tout au long du projet :

- M. Etienne CARLIER, chef de section TE-ABT-EC,
- M. Pieter VAN TRAPPEN, chef d'équipe Hardware au sein de la même section,
- Mme Lorane ALLONNEAU, ingénieur projet, ainsi que mon superviseur officiel.

Pour leur contribution scientifique et technique à la réalisation de mes objectifs, je tiens à remercier :

- Le Dr. Michael John BARNES, pour ses conseils éclairés sur la simulation des thyratrons,
- M. Laurent DUCIMETIERE, également pour ses conseils en simulation,
- M. Janusz Pawel RODZIEWICZ, pour m'avoir prêté une tonne de matériel et m'avoir appris à m'en servir.

Plus généralement, je souhaite remercier l'ensemble des personnes du groupe TE-ABT impliquées dans le projet, et qui par leur assistance et leurs conseils m'ont permis de progresser au sein d'une Organisation aussi prestigieuse.

Pour finir, j'adresse tous mes remerciements aux personnes à qui je dois d'être arrivé aussi loin dans mes études, tout particulièrement :

- Mes parents, Sylvie et Jean-François ROYER, pour m'avoir supporté financièrement et moralement dans mes études,
- Mes enseignants au collège, lycée et à l'INSA, pour m'avoir apporté les connaissances et méthodes de travail nécessaires, au travail d'ingénieur,
- Les membres de l'Association TIM, que je considère comme ma deuxième famille, et qui ont fait de moi un (presque) ingénieur, tout autant que l'INSA.



# TABLE DES MATIERES

RESUME .....	3
REMERCIEMENTS.....	5
TABLE DES MATIERES.....	7
GLOSSAIRE .....	9
CHAPITRE 1. INTRODUCTION.....	11
CHAPITRE 2. CADRE ET OBJECTIFS DU STAGE.....	13
2.1. Cadre technique du stage .....	13
2.2. Motivation du projet ThyPTU.....	16
2.3. Avancement initial du projet ThyPTU .....	17
2.4. Objectifs du stage.....	17
2.5. Ressources disponibles.....	18
CHAPITRE 3. SIMULATION DU THYPTU ET DES DIFFERENTES CHARGES.....	19
3.1. Modèle du ThyPTU.....	19
3.2. Modèle du thyatron de type CX1171 .....	22
3.3. Modèle du circuit de polarisation de grille du KFA45.....	27
3.4. Résultats de simulation .....	30
CHAPITRE 4. EVALUATION DE DIFFERENTES STRATEGIES D'ALIMENTATION EN HAUTE TENSION DU THYPTM .....	39
4.1. Stratégies d'alimentation envisagées.....	39
4.2. Prospection du marché et choix de la stratégie d'alimentation.....	40
4.3. Test des alimentations à haute tension disponibles .....	42
CHAPITRE 5. TEST DU THYPTU SUR UN SYSTEME REEL.....	45
5.1. Formations préliminaires.....	45
5.2. Tests de cyclage.....	45
5.3. Tests sur un équipement réel .....	49
CHAPITRE 6. INTEGRATION MECANIQUE POUR LA PRE-SERIE .....	53
6.1. L'intégration mécanique des systèmes au CERN.....	53
6.2. Etude d'une solution de ThyPTU en 3U .....	53
6.3. Etude d'une solution de ThyPTU en 6U .....	55
CHAPITRE 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES .....	57
BIBLIOGRAPHIE.....	59
LISTE DES ILLUSTRATIONS.....	61
TABLE DES ANNEXES.....	63
Annexe 1 : Plaque de présentation du CERN .....	63
Annexe 2 : Agrandissement du modèle de thyatron à trois gaps.....	63
Annexe 3 : Schématique du circuit de polarisation .....	63





## GLOSSAIRE

**Altium** : Logiciel de conception de circuits imprimés, édité par Altium Limited.

**CERN** : Organisation Européenne pour la Recherche Nucléaire basée à Genève.

**CS (Clipper Switch)** : Dans une ligne de puissance d'un kicker, thyatron permettant d'obtenir un front descendant très raide sur le courant du thyatron.

**Drift-space** : Dans un thyatron, espace inter-électrodes de grande taille capable de s'ioniser sous une tension modérée (300 V à 2 kV).

**DS (Dump Switch)** : Dans une ligne de puissance d'un kicker, thyatron permettant de terminer l'impulsion du kicker en déchargeant le PFN/PFL à la masse au travers d'une résistance.

**Gap** : Dans un thyatron, espace inter-électrodes de petite taille capable de supporter de très hautes tensions de l'ordre de plusieurs dizaines de kV.

**Gigue (Jitter en anglais)** : Dispersion temporelle de la forme d'onde du courant entre plusieurs commutations.

**FIDS (First Interlock Detection System)** : Dispositif surveillant un certain nombre de paramètres sur les équipements des kickers. Le FIDS déclenche un **Interlock** qui inhibe le fonctionnement du kicker lorsqu'une situation anormale est détectée.

**HVPS (High Voltage Power Supply)** : Alimentation à haute tension.

**Interlock rapide** : Voir FIDS.

**Kicker (magnet)** : Electro-aimant à impulsion rapide utilisé pour dévier de façon précise le faisceau de particules lors de l'injection/extraction dans/depuis un accélérateur.

**LHC (Large Hadron Collider)** : Le plus grand et le plus puissant collisionneur de particules au monde. Le LHC reçoit les paquets de particules depuis le SPS, les accélère, et les fait entrer en collision sur différentes zones d'expérience.

**LS2 (Long Stop 2)** : Période d'arrêt prolongé des accélérateurs au CERN, durant deux ans, en vue d'une mise à jour pour supporter un fonctionnement du LHC à haute luminosité.

**MS (Main Switch)** : Dans une ligne de puissance d'un kicker, thyatron assurant la connexion du PFN, PFL au kicker.

**PFL (Pulse Forming Line)** : Ligne génératrice d'impulsion. Similaire au PFN, mais utilisant une ligne de transmission comme moyen de stockage d'énergie.

**PFN (Pulse Forming Network)** : Réseau générateur d'impulsion. Il est constitué d'une série d'éléments passifs réactifs (condensateurs en parallèle et inductances en série) simulant une ligne de transmission. Un PFN est capable de stocker de l'énergie et de la délivrer très rapidement sous la forme d'une impulsion à forte puissance.

**PS (Proton-Synchrotron)** : Accélérateur circulaire du CERN. Le PS reçoit les paquets de particules depuis le booster, les accélère, et les distribue à différents accélérateurs et expériences.

**PSpice** : Logiciel de simulation électronique édité par Cadence Design Systems. Basé sur un simulateur open-source nommé SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis).

**PTM/PTU (Power Trigger Module/Unit)** : Générateur d'impulsion à haute tension pour le déclenchement d'interrupteurs à haute puissance pulsée.

**PTP (Parcours Transversal Pluridisciplinaire)** : A l'INSA, spécialité de dernière année impliquant une collaboration avec des élèves ingénieurs issus de toutes les disciplines (mécanique, électronique, génie civil, génie physique, génie des procédés et études de business). Centré autour d'un thème, il s'agit d'avantage d'une ouverture que d'une spécialisation.

**SCR (Start Resonant Charging)** : Signal d'avertissement, envoyé 7 à 10ms avant la commutation du thyatron.

**SPS (Super Proton-Synchrotron)** : Accélérateur circulaire du CERN. Le SPS reçoit les paquets de particules depuis le PS, les accélère, et les distribue à différents accélérateurs et expériences.

**TE** : Unité de largeur pour les modules des châssis 19 pouces. 1TE vaut 5.08mm.

**ThyPTM (Thyatron Power Trigger Module)** : Module du ThyPTU permettant de générer l'impulsion à haute tension.

**ThyPTU (Thyatron Power Trigger Unit)** : Système générateur d'impulsion à haute tension pour le déclenchement d'aimants à impulsion rapides. Le ThyPTU sera amené à remplacer à long terme la plupart des systèmes équivalents du CERN, avec priorité aux systèmes du PS.

**Thyatron** : Interrupteur à haute puissance pulsée utilisant un gaz ionisé à faible pression comme moyen de conduction.

**U** : Unité de hauteur pour les modules des châssis 19 pouces. 1U vaut 44.45mm.

## CHAPITRE 1. INTRODUCTION

Ce rapport s'inscrit dans le cadre de la formation d'ingénieurs dispensée au sein du département de Génie Électrique et Informatique de l'INSA de Toulouse. Il consiste en une synthèse de mon stage de fin d'études effectué au CERN, sur le Site de Préveressin.

Le CERN est l'organisation européenne pour la recherche nucléaire. Il s'agit du plus grand centre de recherche au monde concernant la physique des particules. Dans le cadre du CERN, des personnes issues du monde entier travaillent en collaboration afin de pousser toujours plus loin notre compréhension des lois de l'univers. Pour ce faire, des particules sont portées à de très hauts niveaux d'énergie à l'aide d'accélérateurs de particules. Ces particules entrent alors en collision avec une cible, ou avec d'autres particules possédant la même énergie à l'intérieur de zones d'expériences équipées de détecteurs extrêmement complexes (ATLAS, CMS, LHCb, ALICE...). La nature et la trajectoire des particules secondaires produites lors de ces collisions nous permettent de répondre à des questionnements tels que le perfectionnement du Modèle Standard, l'origine de la masse, ou encore la composition de l'Univers (matière ordinaire, matière sombre et énergie sombre) [1]

Bien que la théorie des accélérateurs soit décrite par la physique, leur réalisation et leur opération nécessitent des compétences de pointe en ingénierie, et ce dans toutes les disciplines (génie physique, génie mécanique, génie civil, électronique, automatique, systèmes électriques et industriels, et bien d'autres encore). Le CERN est donc une organisation de choix pour réaliser mon stage de fin d'études en ingénierie.

Mon stage s'est déroulé au sein du département TE (Technology) du CERN, dans le groupe ABT (Accelerator Beam Transfer), dont la problématique générale est la conception, la construction, l'installation et le maintien des différents équipements permettant le transfert de faisceaux de particules d'un accélérateur à un autre. J'ai plus précisément intégré la section EC (Electronics and Controls) responsable des parties Hardware, Software, ainsi que des Automates Industriels Programmables liés aux systèmes électroniques des équipements de transfert de faisceau.

Le sujet du stage est l'étude et la finalisation d'un système de déclenchement d'aimants à impulsion rapide, nommé ThyPTU, dont la conception initiale et le prototypage ont déjà été réalisés avant mon arrivée au CERN. Le ThyPTU peut être décrit comme un générateur d'impulsion à haute tension. Ainsi, son principe est basé sur des notions issues à la fois d'électronique de signal et d'électronique de puissance. Des compétences en conception de circuits imprimés, et en simulation PSpice sont également nécessaires pour la réalisation de ce stage.

Je préciserai dans un premier temps le contexte du projet ThyPTU, ainsi que son avancement lors de mon arrivée au CERN. Cela nous permettra ensuite de définir précisément les objectifs du stage et d'identifier les rendus attendus par le CERN.

Par ailleurs, la majeure partie de ce rapport est une synthèse des réalisations liées à ces objectifs. Nous verrons ainsi dans un second temps comment fonctionne le ThyPTU ainsi que les éléments placés directement en sortie de ce système. Une telle compréhension nous permettra de créer en parallèle un modèle de simulation basé sur PSpice.

Nous nous intéresserons ensuite à la stratégie d'alimentation en haute tension des modules du ThyPTU. L'identification des différentes solutions, l'étude du marché, le test de différentes alimentations à haute tension ainsi que les décisions prises lors de la conception du ThyPTU nous amèneront à faire certains choix pour la suite du projet.

Par la suite, nous décrirons les différents tests réalisés afin de vérifier le bon fonctionnement du ThyPTU, ainsi que sa compatibilité avec l'un des équipements les plus contraignants sous la responsabilité de TE-ABT-EC : l'aimant à impulsion rapide KFA45. Nous verrons entre autres que de tels tests sont parfois contraignants à réaliser compte-tenu de la taille et de la complexité des équipements du CERN, et que les résultats expérimentaux ne sont pas toujours simples à comparer avec la théorie.

Enfin dans une dernière partie, nous parlerons de ma contribution à l'intégration mécanique du ThyPTU dans un châssis 19 pouces. Nous nous intéresserons principalement aux problèmes rencontrés lors de cette intégration, et aux solutions proposées et retenues afin d'obtenir un exemplaire complet de présérie répondant aux exigences actuelles du CERN.

## CHAPITRE 2. CADRE ET OBJECTIFS DU STAGE

Dans ce chapitre, j'expliquerai en détail le cadre du projet ThyPTU. J'introduirai tout d'abord le cadre technique du projet, les raisons pour lesquelles il a été entrepris, ainsi que son avancement à mon arrivée. Cela me permettra ensuite d'explicitier les objectifs du stage, et de détailler les différentes ressources à ma disposition pour atteindre ces objectifs.

### 2.1. Cadre technique du stage

L'une des vocations du CERN est de retracer les premiers instants de l'univers en étudiant des particules n'ayant existé que quelques instants après le Big Bang. L'outil principal permettant de recréer ces particules est l'accélérateur de particules. Le CERN possède actuellement le plus grand et le plus puissant collisionneur de particules au monde : Le Large Hadron Collider (LHC).

Le LHC est situé à 100m sous terre, en Suisse dans le Canton de Genève et en France dans le Pays de Gex. Avec ses 27 km de circonférence, il est capable d'accélérer des protons jusqu'à une énergie de 6.5 TeV, portant leur vitesse à 99.999999% de la vitesse de la lumière. Toutefois, malgré ces chiffres impressionnants, le LHC n'est pas conçu pour accélérer des particules ayant une vitesse initiale nulle. C'est pourquoi plusieurs autres accélérateurs, souvent antérieurs au LHC, sont utilisés pour pré-acceler les protons jusqu'à une énergie de 450GeV. Ces accélérateurs sont dans l'ordre le LINAC, le Booster (PSB), le Proton-Synchrotron (PS) et le Super Proton-Synchrotron (SPS). La Figure 1 montre l'intégralité du complexe d'accélérateurs du CERN [2]. Sur cette image, vous pourrez suivre le trajet des protons depuis le LINAC 4, au travers du Booster, du PS, du SPS, jusqu'au LHC. Notez que le PS2 n'est pour le moment qu'une proposition d'accélérateur.

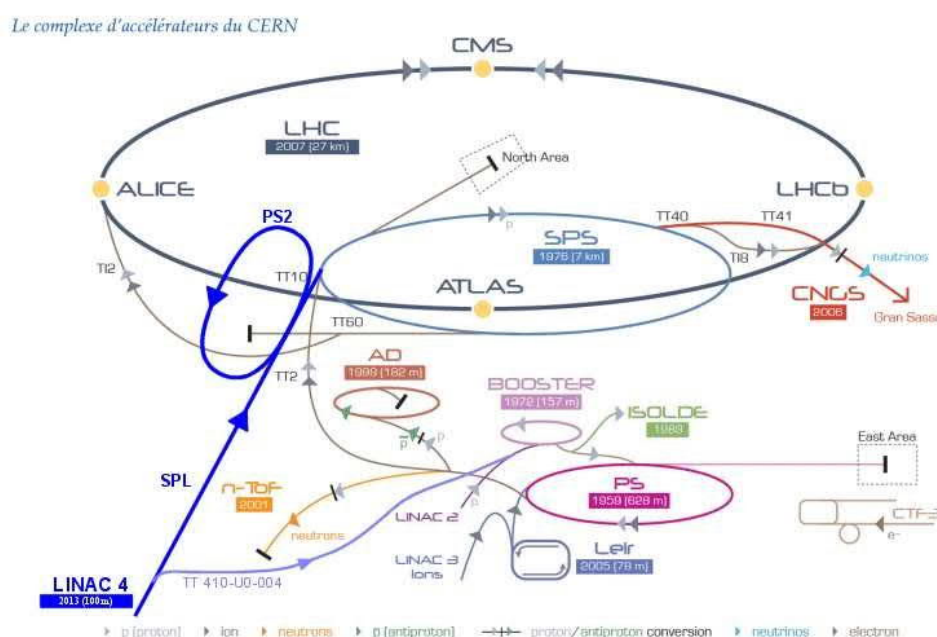


Figure 1 : Complexe d'accélérateurs du CERN

La présence de plusieurs accélérateurs en série (dont une majorité d'accélérateurs circulaires) implique qu'il est nécessaire de pouvoir transférer les paquets de protons d'un accélérateur à un autre. Autrement dit, extraire le faisceau d'un accélérateur et l'injecter dans l'accélérateur suivant, le tout avec une perte minimale d'énergie.

La dernière étape de l'injection (respectivement la première étape de l'extraction) du faisceau est réalisée à l'aide d'un ou plusieurs électro-aimants à impulsion rapides appelés « kicker magnets », ou plus simplement « kickers » [3]. Le kicker génère un champ magnétique au moment de l'injection/extraction afin de dévier le faisceau vers la trajectoire désirée. L'injection du faisceau dans un accélérateur est illustrée sur la Figure 2. L'extraction suit simplement le chemin inverse.

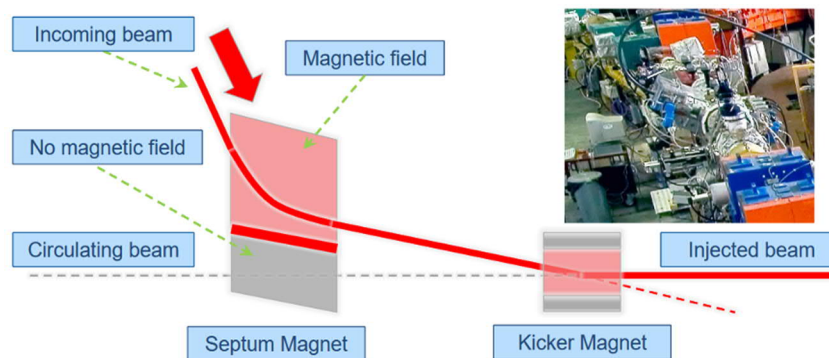


Figure 2 : Schéma d'injection du faisceau

Pour générer un champ magnétique, les kickers nécessitent un courant de plusieurs kiloampères, obtenu en envoyant une impulsion à haute tension au travers du kicker sur une ligne terminée par une résistance de faible valeur. Pour cela, un réseau générateur d'impulsion (en anglais Pulse Forming Network ou PFN) ou une ligne génératrice d'impulsion (en anglais Pulse Forming Line ou PFL) est chargé(e) à plusieurs dizaines de kV au moyen d'une alimentation haute tension (RCPS) et est connectée au kicker au moment voulu à l'aide d'un interrupteur nommé Main Switch (MS). La durée de l'impulsion délivrée au kicker peut être réglée à l'aide du Dump Switch (DS). La largeur de l'impulsion vue par le kicker est donc déterminée par le timing du Dump Switch relatif au Main Switch. Enfin, un troisième interrupteur nommé Clipper Switch (CS) peut être inséré entre l'anode du Main Switch et la masse afin d'obtenir si nécessaire un temps de descente très faible sur le courant du kicker.

Les trois interrupteurs (Main Switch, Dump Switch et Clipper Switch) sont le plus souvent des tubes de puissance de type thyatron, capables de commuter de très hautes puissances en quelques centaines de nanosecondes. Ces thyatrons nécessitent chacun une ou plusieurs impulsions jusqu'à 2kV pour entrer en conduction. Le fonctionnement précis des thyatrons sera explicité dans la partie simulation.

La Figure 3 illustre l'agencement du PFN, du kicker et des différents thyatrons (Main Switch et Dump Switch) au sein d'une ligne de puissance typique du CERN. Le Clipper Switch n'est pas représenté ici.

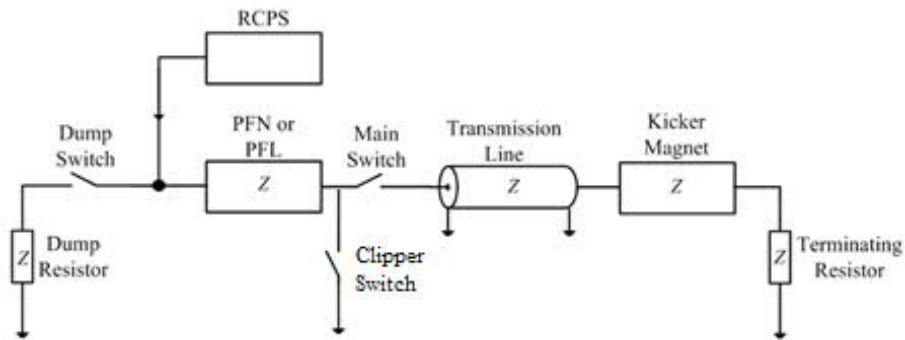


Figure 3 : Ligne de puissance typique d'un kicker au CERN

Le système générant la ou les impulsions haute tension nécessaires à la commutation des thyratrons est nommé PTU (Power Trigger Unit).

Les PTU fonctionnent tous sur le même principe : Dans un premier temps, une alimentation à haute tension charge une batterie de condensateurs. Puis ces condensateurs sont connectés à la charge du PTU à l'aide d'un interrupteur basé sur des technologies à semi-conducteurs<sup>1</sup> (MOSFETS ou IGBT). Le fonctionnement détaillé du ThyPTU sera décrit dans la partie simulation.

Il existe actuellement trois types de PTU au sein des accélérateurs PS et SPS selon la technologie des interrupteurs (MOSFET ou IGBT) et la tension de sortie :

- 3500V Power MOS Trigger Amplifier
- 1600V MOSFET/IGBT Trigger unit
- 400V MOSFET/IGBT Trigger unit (Version modifiée du module précédent)

Pour comprendre la variété des PTU au CERN, il est nécessaire de prendre en compte un certain nombre d'éléments, incluant :

- La variété des équipements et des stratégies de commutation des thyratrons :  
Les thyratrons au CERN nécessitent en général deux impulsions à 400V et 1600V sur ses grilles de contrôle G1 et G2 afin de commuter. Certains équipements reçoivent directement les deux impulsions de deux PTM, tandis que d'autres génèrent ces deux impulsions à partir d'une seule impulsion à 3500V issue d'un seul PTM.
- L'âge des différents équipements et la technologie disponible à l'époque :  
Certains systèmes en opération ont été conçus dans les années 1970.

Le Tableau 1 explicite les raisons derrière l'utilisation des technologies MOSFET et IGBT, tandis que le Tableau 2 décrit les différentes tensions fournies par les PTU selon le contexte dans lequel ils sont employés.

<sup>1</sup> Ne pas confondre les interrupteurs de type thyatron et les interrupteurs basés sur des technologies à semi-conducteurs. Ces derniers font partie du PTM, tandis que les thyratrons font partie de la charge du PTM.

Technologie	Avantages	Inconvénients
IGBT	Supporte la HT jusqu'à 4kV.	Commutation plus lente
MOSFET	Commutation rapide	Limité à ~600V.

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des technologies d'interrupteurs à semi-conducteurs

Accélérateur	Thyratron – grille de contrôle G1	Thyratron – grille de contrôle G2
PS	3500V Power MOS Trigger Amplifier	
SPS	400V MOSFET/IGBT Trigger unit	1600V MOSFET/IGBT Trigger unit

Tableau 2 : Répartition globale des différents PTM dans les accélérateurs PS et SPS

## 2.2. Motivation du projet ThyPTU

Dans le cadre du second long arrêt du LHC (LS2), l'un des projets est la consolidation des systèmes de déclenchement de tous types, et plus particulièrement ceux du PS. Pour ce faire, le CERN prévoit de moderniser ses systèmes électroniques afin d'en combattre l'obsolescence, de réduire de façon significative la variété des systèmes électroniques, et d'employer autant que possible des solutions « sur étagère », existant dans l'industrie.

Or, pour les accélérateurs PS et SPS, le CERN possède actuellement trois PTU différents pour assurer la même fonction. De plus, les PTM actuels du PS sont alimentés en haute tension par des alimentations résonantes spécifiques au CERN. L'avantage de ces alimentations est leur haute puissance de sortie, qui permet au PTU associé de pulser à des fréquences allant jusqu'à 1kHz. Elles ont cependant le désavantage d'être très complexes et ne peuvent être utilisées que dans des conditions bien particulières (tension de sortie et timing fixés). Ces alimentations n'existent pas dans le commerce.

Le but du projet ThyPTU est de créer un nouveau type de PTU capable de remplacer les trois types de PTU actuellement utilisés, et en adéquation avec la stratégie de consolidation des systèmes de déclenchement du CERN. Ainsi, le ThyPTU :

- Utilisera une alimentation haute tension du commerce ;
- Exploitera les avantages de la technologie IGBT (simplicité de commutation et haute tenue en tension) ;
- Possèdera un circuit de commande optimisé pour l'IGBT, afin compenser la faible vitesse de commutation inhérente à cette technologie.



## 2.3. Avancement initial du projet ThyPTU

Lors de mon arrivée au CERN, les phases de conception et de prototypage du ThyPTU étaient déjà réalisées. J'avais ainsi à ma disposition un exemplaire de chaque carte électronique composant le ThyPTU, assemblé et testé en laboratoire. Les tests réalisés étaient les suivants :

- Test unitaire de chaque carte électronique : Succès (les fonctions de base sont assurées) ;
- Test de la carte de puissance seule dans une cage de test équipée d'un exemplaire complet du kicker MKDV : Succès (le thyatron du MKDV commute).

J'avais également à ma disposition plusieurs alimentations à haute tension. Des tests avaient été commencés afin de vérifier l'adéquation entre les performances de ces alimentations et les spécifications attendues. Les premiers résultats semblaient indiquer que toutes les alimentations à notre disposition présentaient un temps de charge hors-spécification (voir chapitre 4, partie 2.1). Toutefois, l'une des alimentations n'était pas fonctionnelle et les tests n'ont pas pu être finalisés.

Enfin, le plan général du châssis pour la production d'un exemplaire de présérie était déjà réalisé. Toutefois, certains problèmes d'intégration mécanique et de sécurité électrique subsistaient et devaient être résolus au préalable.

## 2.4. Objectifs du stage

- Continuer l'étude préliminaire déjà réalisée au CERN

Il s'agit d'un objectif très ouvert impliquant de m'approprier le sujet, de reprendre le projet là où mon prédécesseur l'a laissé, d'analyser le besoin et les choix techniques effectués, et enfin de valider et de compléter ces choix techniques afin de continuer le projet sur une base saine.

- Evaluer différentes stratégies d'alimentation en haute tension

Cet objectif inclut l'évaluation de deux stratégies envisagées pour alimenter les modules du ThyPTU en haute tension : La stratégie centralisée, et la stratégie distribuée. Cette analyse doit être basée sur une prospection du marché afin de déterminer s'il est possible de trouver des alimentations à haute tension conformes aux spécifications attendues, ou si au contraire ces spécifications doivent être relaxées. Enfin, l'évaluation doit être complétée par des tests sur les alimentations sélectionnées.

- Tester et évaluer le prototype sur un équipement réel utilisé dans le complexe PS

Pour cela, je dois me familiariser avec le fonctionnement de la cage de test Salève 6 et avec l'équipement lié au kicker KFA45. Après m'être assuré du bon fonctionnement du prototype existant, je dois organiser une série de tests sur le KFA45 sous la supervision du responsable de la cage de tests.

- Créer un modèle de simulation du ThyPTU et de sa charge, et l'affiner à l'aide des résultats obtenus en pratique

Plus précisément, je dois créer à l'aide du logiciel PSpice un modèle du ThyPTU ainsi que de l'intégralité de sa charge, incluant le thyatron et le circuit de polarisation de grille situé entre le ThyPTU et le thyatron. Ce modèle doit être validé et affiné à l'aide de divers résultats de tests obtenus par moi-même ou par d'autres personnes du groupe ABT.

- Finaliser le design et l'intégration mécanique en fonction des résultats obtenus pendant la phase de validation

Je dois m'occuper des détails liés à la production d'un exemplaire de présérie du ThyPTU. En particulier, je dois m'assurer de la bonne intégration de l'alimentation à haute tension choisie précédemment, ainsi que des cartes électroniques du ThyPTU dans un rack 19 pouces de hauteur 3U ou 6U. Cela implique d'évaluer les solutions de connexion et de prévoir des modifications sur les plans déjà existants.

## 2.5. Ressources disponibles

Travailler au sein du CERN me permet de disposer d'un certain nombre de ressources, autant au niveau matériel que technique. Bien que je sois en principe seul à travailler sur le projet ThyPTU, je dispose en réalité d'une forte assistance de la part des membres du groupe ABT. Ainsi, lorsque je rencontre des obstacles, ou si j'ai besoin de conseils sur la direction globale du projet, je peux m'adresser à mon superviseur, au chef d'équipe ou au chef de section. De façon plus générale, l'ensemble des membres de l'équipe EC sont capables de me fournir de l'aide pour toutes les questions d'ordre technique.

Au niveau théorique, le groupe ABT comporte plusieurs experts mondialement reconnus dans le domaine des accélérateurs et des équipements associés. Ces personnes peuvent entre autres répondre à mes questions sur le fonctionnement des accélérateurs et des thyatrons. Je peux aussi me référer à leurs publications scientifiques lorsque je rédige des documents techniques.

Concernant la production, des équipes de support technique (Field Support Unit ou FSU) proposent leurs services en interne. Ces équipes doivent être consultées pour tous les travaux de réalisation mécanique et électronique au-delà de la phase de prototypage.

Du côté équipement, le CERN me fournit l'intégralité du matériel de laboratoire nécessaire au projet, au travers du service de location de matériel (Electronic Pool). Les bureaux du groupe ABT sont également attenants à de petits laboratoires permettant d'effectuer des tests à haute tension en toute sécurité.

Enfin, j'ai à ma disposition une certaine quantité de matériel, cartes électroniques et composants issus des phases précédentes du projet. Une enveloppe conséquente me permet de commander les composants/modules nécessaires, mais également de profiter des services fournis par les différentes FSU.

## CHAPITRE 3. SIMULATION DU THYPTU ET DES DIFFERENTES CHARGES

Ce chapitre décrit l'utilité du ThyPTU, et explique la démarche que j'ai suivi pour en obtenir un modèle PSpice. Nous nous intéresserons d'abord aux modèles individuels du ThyPTU et de sa charge, puis nous les assemblerons par la suite afin de pouvoir prédire le comportement du ThyPTU en situation réelle. Le modèle de simulation est disponible en ligne sur le repository GitLab de TE-ABT-EC : <https://gitlab.cern.ch/te-abt-ec/thyptm-simulation>, ou rechercher « TE-ABT-EC Gitlab », puis naviguer jusqu'au projet « thyptm-simulation ».

### 3.1. Modèle du ThyPTU

#### 3.1.1. Fonctionnement global du ThyPTU

Le ThyPTU, également appelé « 3500V IGBT Trigger Unit » est un nouveau système de déclenchement (PTU) pour les interrupteurs thyatron des « kicker magnets » utilisés au sein des accélérateurs PS et SPS.

Le ThyPTU est constitué d'une alimentation haute tension (HVPS), d'une carte de contrôle pour l'alimentation à haute tension (HVPS control), et jusqu'à trois exemplaires de modules de trigger pour la conception de hauteur 3U d'origine (cinq pour une solution de taille 6U).

Sur réception d'un signal nommé SCR, l'alimentation haute tension délivre à sa sortie une tension continue de 400, 1600 ou 3500 volts. La haute tension continue est utilisée pour charger des batteries de condensateurs situées à l'intérieur des modules de déclenchement. Le signal SCR n'agit que sur l'alimentation à haute tension et est donc commun aux trois modules de trigger.

Puis sur réception d'un signal de déclenchement, nommé « Trigger IN », un interrupteur de type IGBT situé à l'intérieur du module de trigger force la batterie de capacités associée à se décharger au travers de la charge située en aval du module. En parallèle, la sortie de l'alimentation à haute tension est réglée à zéro volts jusqu'à réception du prochain signal SCR. Le signal « Trigger IN » agit à la fois sur l'alimentation et sur l'un des modules de déclenchement. Il est donc nécessaire d'avoir un signal « Trigger IN » distinct par module.

La Figure 4 montre un schéma de principe du ThyPTU. Vous y trouverez les principaux constituants du ThyPTU et le routage des signaux les plus importants. Notez que l'alimentation haute tension n'est pas forcément unique, et peut être interne aux modules de trigger.

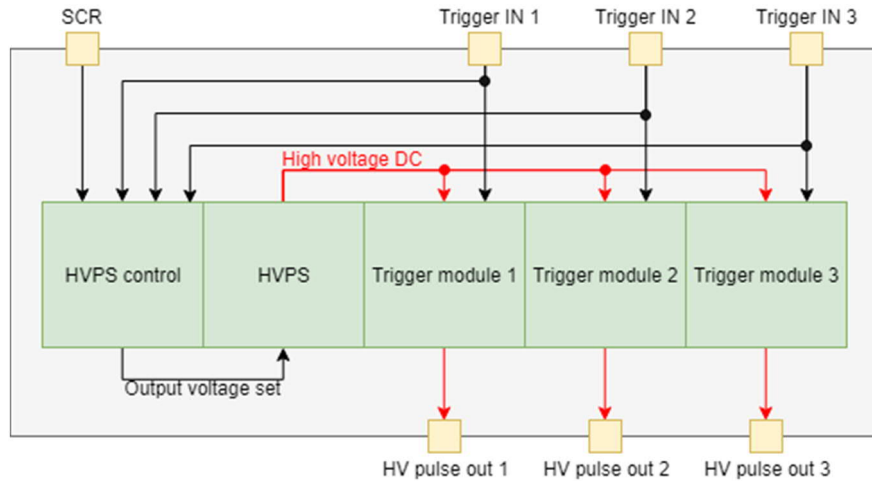


Figure 4 : Schéma de principe du ThyPTM et des principaux signaux

### 3.1.2. Modèle de l'alimentation haute tension

L'alimentation haute tension est un chargeur de capacité conçu pour délivrer un certain courant en sortie (régulation en courant) jusqu'à atteindre la tension de sortie désirée, qui est ensuite maintenue (régulation en tension). Pour modéliser une telle alimentation, j'ai utilisé le bloc « GValue » de PSpice, qui est un générateur de courant contrôlé en tension. Le bloc délivre le courant maximum de l'alimentation jusqu'à ce que la tension de sortie souhaitée soit atteinte.

Toutefois en pratique, l'alimentation passe de la régulation en courant à la régulation en tension avant d'atteindre la tension de sortie afin d'éviter les dépassements de consigne. C'est pourquoi le modèle calcule une seconde valeur de courant proportionnelle à la différence de tension entre la sortie et la consigne. Le générateur de courant délivre ce courant calculé seulement s'il est plus petit que le courant maximum de l'alimentation (ce qui ne se produit que lorsque la tension de sortie s'approche de la consigne). Un paramètre servant de facteur proportionnel permet de régler le seuil de passage entre la régulation en courant et celle en tension.

Ce type de « régulation simulée » implique que la tension et le courant de sortie de l'alimentation soient positifs, et ne peut pas simuler les alimentations qui présentent un dépassement de consigne. Ce n'est heureusement pas un obstacle dans notre cas puisque les spécifications n'autorisent pas de dépassement de consigne.

Les caractéristiques de l'étage de sortie (résistance série, résistance parallèle et capacité parasite) sont également simulées et sont ajustables. Notre modèle permet donc de simuler n'importe quelle alimentation, afin de déterminer le temps de charge des batteries de condensateurs.

Il est également possible de « sauter » l'étape de montée en tension en réglant la tension de sortie initiale à l'aide d'un bloc CI (condition initiale). Cela permet de réduire le temps de calcul lors de la simulation du ThyPTU complet.

Sur la Figure 5, on voit les différents composants du modèle de l'alimentation. On observe en particulier le générateur de courant G2, les composants de l'étage de sortie (R49, Rdis et C11), ainsi que le bloc permettant de régler la tension initiale (IC).

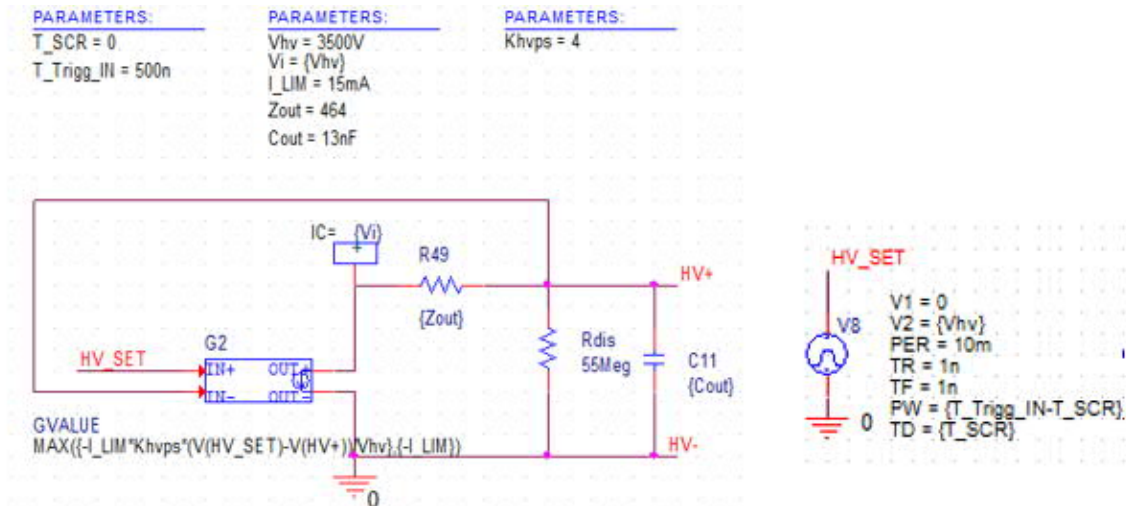


Figure 5 : Modèle PSpice de l'alimentation à haute tension

### 3.1.3. Driver d'IGBT

Le driver d'IGBT est le premier étage du module de déclenchement. Il reçoit le signal Trigger IN, conditionne la durée de l'impulsion à l'aide d'un circuit monostable, et commute un ensemble d'interrupteurs MOSFET servant à connecter une tension continue +24V sur la grille de l'IGBT.

Le modèle de ce circuit, présenté en Figure 6 est une transcription sous PSpice du schéma électrique du module de trigger existant sous Altium. J'ai téléchargé les modèles de tous les composants non-génériques (MOSFETs et circuits logiques) depuis les sites des fabricants. Seul le modèle d'un circuit monostable n'était pas disponible. Pour compenser cela, j'ai configuré le bloc servant à simuler le signal Trigger IN de façon à reproduire la sortie du circuit monostable (délai initial, temps de montée et durée de l'impulsion).

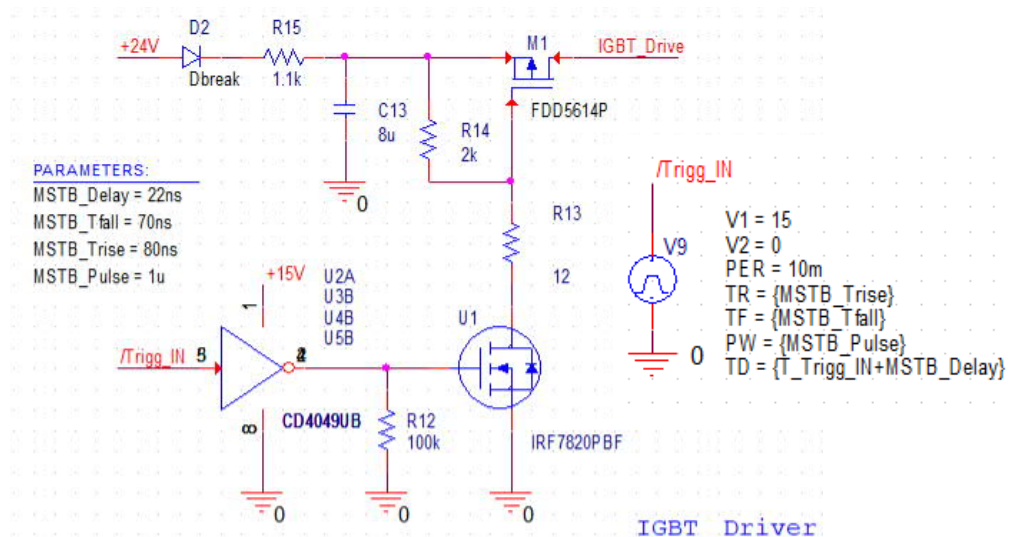


Figure 6 : Modèle PSpice du driver d'IGBT

### 3.1.4. Etage de puissance

De la même façon, j'ai basé le modèle de l'étage de puissance sur le schéma électrique du ThyPTU réel. Cependant, le modèle de l'IGBT (IXG50I4500KN) utilisé n'était pas disponible. J'ai donc décidé d'utiliser un modèle d'IGBT similaire du même constructeur (IXEL40N400).

Le Tableau 3 compare les caractéristiques connues des deux IGBT. Ces caractéristiques étant très similaires, j'ai décidé d'utiliser ce modèle faute d'une solution plus adaptée.

	IXG50I4500KN	IXEL40N400
Tension maximum collecteur-émetteur	4500V	4000V
Tension max de saturation collecteur-émetteur	3.2V	3.2V
Courant de colleteur continu autorisé à 25°C	74A	90A
Courant de colleteur continu autorisé à Tmax	42A (Tmax=100°C)	40A (Tmax=110°C)
Energie de désactivation	60mJ	205mJ
Temps de descente du courant à 125°C	400ns	455ns

Tableau 3 : Comparaison des paramètres connus des deux IGBT

La Figure 7 montre le modèle du circuit de puissance. La haute tension est présente sur le net HV+ et charge les capacités C7, C8, C9 au travers des diodes D6, D7 et D8, ou au travers de la charge. Puis sur réception du signal Trigger IN (préalablement conditionné par le circuit de driver), l'IGBT (noté M2) court-circuite l'entrée des condensateurs à la masse, et leur tension est appliquée sur la charge sous forme d'une impulsion à haute tension négative.

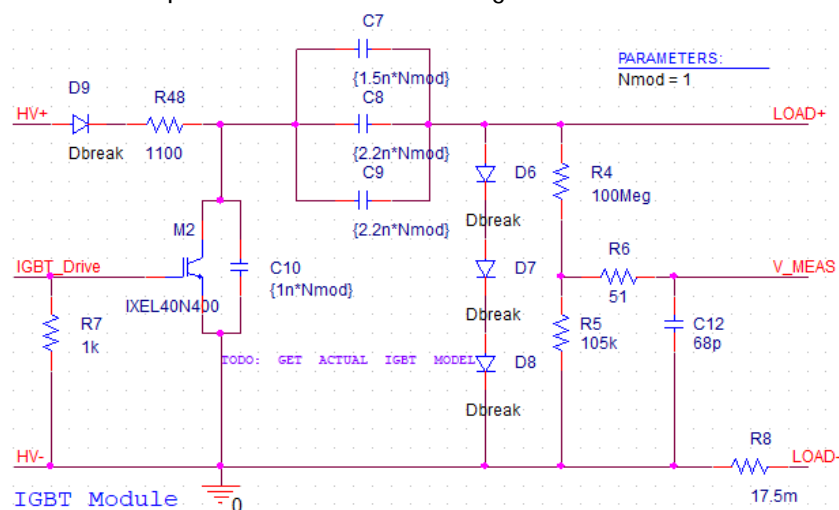


Figure 7 : Modèle de l'étage de puissance du ThyPTU

## 3.2. Modèle du thyatron de type CX1171

### 3.2.1. Principes de base du thyatron

Un thyatron est un tube en verre ou en céramique rempli d'un gaz à très faible pression (typiquement 0.5 Torr). Pour rendre le thyatron conducteur, on cherche à ioniser le gaz présent à l'intérieur de celui-ci afin de créer un plasma conducteur. [4]

Le thyatron est constitué d'une série de cavités situées entre ses différentes électrodes. Les cavités présentant la plus grande distance inter-électrodes sont nommées « drift-spaces » et les cavités les plus petites sont nommées « gaps ». Chacune de ces cavités est capable de supporter une certaine

tension sans que le gaz présent à l'intérieur ne s'ionise. Cette tension est fonction du produit entre la pression et la distance inter électrodes, et suit la courbe de Paschen, visible en Figure 8.

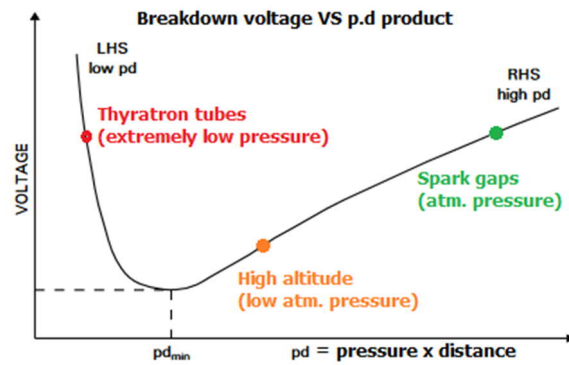


Figure 8 : Courbe de Paschen

Ainsi, nous pouvons voir sur cette courbe qu'à pression atmosphérique, pour des distances relativement petites, une plus grande distance inter-électrodes implique une tension de claquage plus élevée. Inversement, à la pression d'un thyatron, une plus grande distance inter-électrodes implique une tension de claquage plus faible.

L'idée du thyatron est d'utiliser des gaps de petite taille pour supporter la haute tension entre l'anode et la cathode, alternés avec des drift-spaces de grande taille, qui vont générer à partir d'une tension plus modérée le plasma nécessaire au passage en conduction du thyatron.

La Figure 9 illustre l'agencement des différentes cavités dans un thyatron de type CX1171, avec la position des différents gaps/drift-spaces et des électrodes G1 et G2 [5] :

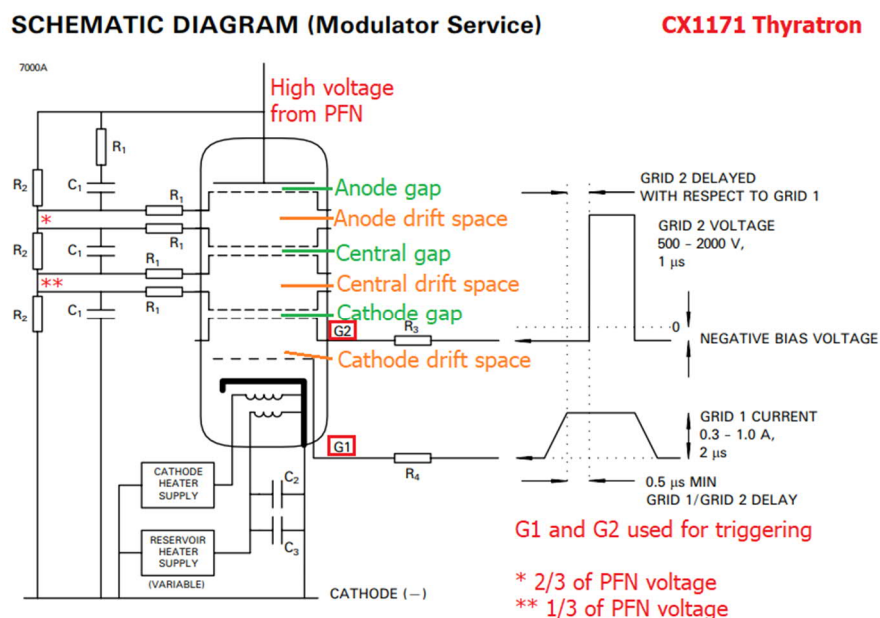


Figure 9 : Agencement du thyatron de type CX1171

Pour commuter un thyatron, on utilise deux électrodes de contrôle, nommées G1 et G2 (grid 1 et grid 2), insérées dans le drift-space le plus proche de la cathode (sur l'image : cathode drift-space). En envoyant une impulsion à tension modérée sur G1, puis sur G2, du plasma est généré dans ce drift-space. Le thyatron étant sous haute tension, le plasma dérive au travers de G1 et G2 sous



l'effet du champ électrique jusqu'à remplir le prochain gap supportant la haute tension (cathode gap). Le gap devient alors conducteur et le potentiel de ses électrodes est ramené à celui de la cathode. Cela a pour effet d'augmenter la tension aux bornes du prochain drift-space (central drift-space) et d'y générer du plasma... Cet effet se propage ainsi en cascade jusqu'à ce que l'intégralité du thyatron soit conducteur.

Pour obtenir un modèle de thyatron, il est donc nécessaire de créer les modèles des gaps et des drift-spaces, et enfin de les assembler afin de simuler un thyatron complet. J'ai cherché en particulier à simuler le comportement non-linéaire des grilles de contrôle G1 et G2, qui constituent une partie de la charge du ThyPTU.

### *3.2.2. Modèle de gap/drift-space*

Les modèles des gaps/drift-spaces sont très importants car ce sont les constituants de base du thyatron. La principale difficulté est de simuler sous PSpice un élément qui obéit davantage aux lois de la physique des plasmas qu'aux lois de l'électronique.

Heureusement, les modèles PSpice des gaps/drift-spaces existaient déjà au CERN. La base du modèle provient des travaux de M. Michael Barnes, ingénieur au CERN, qui a effectué lors de ses précédentes recherches des campagnes de mesures sur des thyatrons. [6]

Le principe de base du modèle est le suivant. Sachant qu'un gap ou un drift-space passe successivement de l'état haute impédance (non conducteur) à l'état faible impédance (conducteur) en suivant une loi en exponentielle inverse, il suffit de créer un composant PSpice dont l'impédance passe d'un niveau à un autre suivant la même fonction. Ce composant doit :

1. Générer au moment voulu une tension image de l'impédance souhaitée, en utilisant par exemple un bloc générateur exponentiel de PSpice
2. Générer une tension image du courant instantané parcourant le gap/drift-space
3. Appliquer aux bornes du gap/drift-space une tension égale au produit des deux tensions générées précédemment (image du courant actuel, et image de l'impédance souhaitée)

Cela permet de créer artificiellement un composant « générateur exponentiel » dont l'impédance suit une exponentielle inverse.

Toutefois, dans le modèle de M. Barnes, le changement d'impédance du gap/drift-space se fait au moment de la mise en route du générateur exponentiel, à un moment précis de la simulation. Or, dans la réalité, un drift-space devient conducteur lorsque la tension à ses bornes dépasse un certain seuil, tandis qu'un gap devient conducteur lorsqu'il contient du plasma.

Pour obtenir les conditions de déclenchement souhaitées, j'ai modifié le modèle existant de la façon suivante :

- J'ai créé dans un premier temps un nouveau composant de type « générateur exponentiel » qui se déclenche une seule fois lorsque sa tension d'entrée dépasse un seuil réglable.
- J'ai ensuite séparé le modèle unique existant en deux modèles : Gap et drift-space.



- Dans le modèle du drift-space, visible en Figure 10, j'ai connecté l'entrée du générateur exponentiel aux bornes du bloc drift-space. Ainsi, le drift-space est initialement à l'état haute impédance, et si la tension à ses bornes dépasse le seuil du générateur exponentiel, le drift-space passe à l'état faible impédance. Le nouveau bloc drift-space génère également un signal de synchronisation qui symbolise le plasma généré lors de sa fermeture.

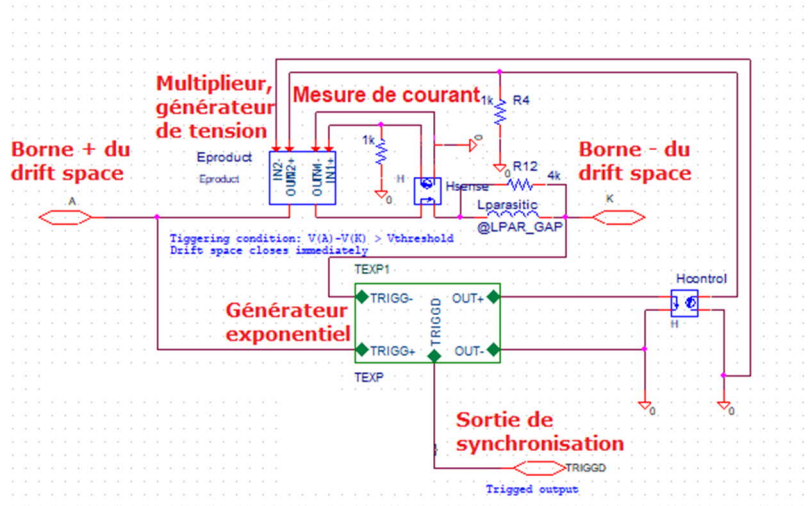


Figure 10 : Modèle de drift-space

- Dans le modèle du gap, visible en Figure 11, j'ai connecté l'entrée du générateur exponentiel sur une entrée de synchronisation, qui reçoit le signal de synchronisation émis par le précédent drift-space. Une ligne de transmission parfaite permet de délayer le signal de synchronisation afin de simuler le temps de propagation du plasma. Ainsi, un gap passera de l'état haute impédance à l'état faible impédance un certain temps après le précédent drift-space.

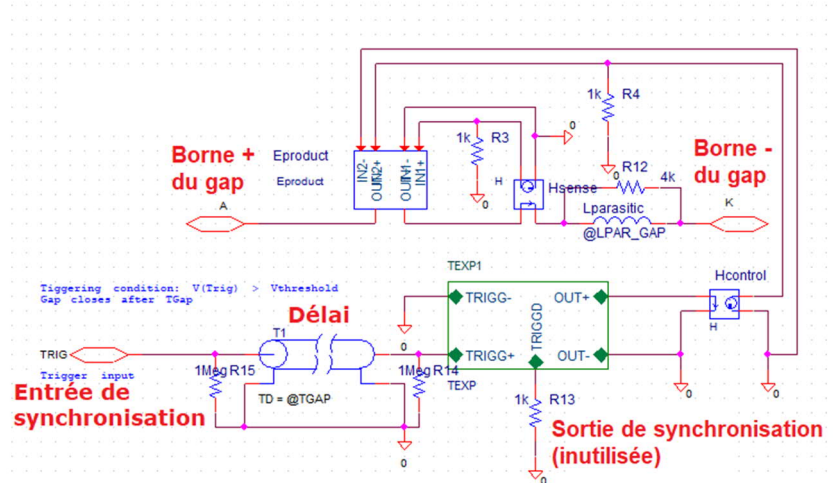


Figure 11 : Modèle de gap

Nous disposons ainsi du modèle de M. Barnes, mais qui se déclenche dans des conditions plus proches de la réalité.

### 3.2.3. Modèle du thyatron complet

Le thyatron modélisé est un thyatron de type CX1171 possédant 3 gaps à haute tension. La nature des cavités présentes au niveau des grilles de contrôle n'est pas aussi évidente que celle des autres cavités. Dans notre modèle, on les considère comme des drift-spaces puisque leur rôle est de générer du plasma à partir des tensions et courants de grille.

Le modèle complet du thyatron est illustré en Figure 12. Un agrandissement de cette figure est également disponible en Annexe 2. Vous trouverez sur la droite de la figure la cathode du thyatron. Puis de droite à gauche sont disposés dans l'ordre :

- Les drift-spaces associés à G1 et G2
- Le gap le plus proche de la cathode
- Le drift-space central
- Le gap central
- Le drift-space le plus proche de l'anode
- Le gap de l'anode.

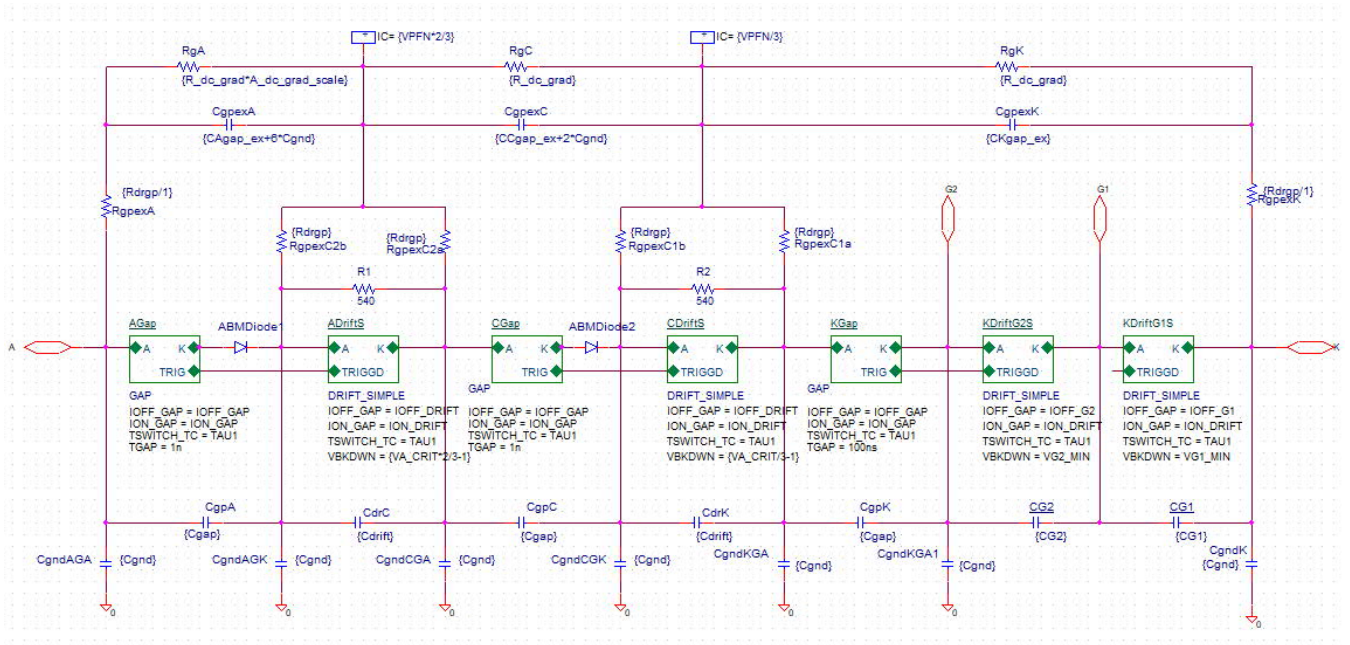


Figure 12 : Modèle complet du thyatron CX1171

Notez la présence d'un pont diviseur résistif et capacitif au-dessus des cavités. L'objectif de ce pont est de fournir une fraction de la haute tension issue du PFL aux bornes des drift-spaces. En effet, lorsque le précédent gap se ferme, le potentiel de la cathode locale du drift-space est ramené au potentiel de la cathode du thyatron. La présence de haute tension sur l'anode locale du drift-space lui permet de s'ioniser à son tour et de poursuivre la fermeture du thyatron.

Enfin, il m'a fallu choisir différentes valeurs pour régler le comportement du modèle :

- Tensions de seuil de G1 et G2 : Régler respectivement à 300V et 800V, ce qui correspond aux valeurs minimales indiquées dans la documentation du thyatron [5].

- Tensions de seuil des autres drift-spaces : La documentation du thyatron indique une valeur minimale de 5kV à fournir par le PFN/PFL pour commuter le thyatron. J'ai supposé qu'il s'agissait de la tension minimale nécessaire pour déclencher l'ionisation. J'ai donc réglé le seuil au tiers de cette valeur (résultant du pont diviseur expliqué plus haut)
- Impédance à l'état ON et OFF des gaps/drift-spaces : Les valeurs exactes n'influencent que peu le fonctionnement du thyatron. J'ai donc réglé ces valeurs de manière à obtenir le comportement non-linéaire souhaité pour les grilles des thyatrons (Ce comportement sera décrit plus loin dans cette partie)
- Délais et constante de temps des gaps/drift-spaces : Ces valeurs sont réglées empiriquement pour obtenir la même forme d'onde mesurée par M. Barnes lors de ses recherches.

Le modèle de thyatron ainsi obtenu est condensé dans un bloc hiérarchique, et est inséré comme un composant dans un modèle simplifié de la ligne de puissance du KFA45. La Figure 13 montre le modèle cette ligne de puissance. Le PFL est modélisé par une ligne de transmission idéale possédant un fort délai et une tension initiale de 80kV (tension de la PFL).

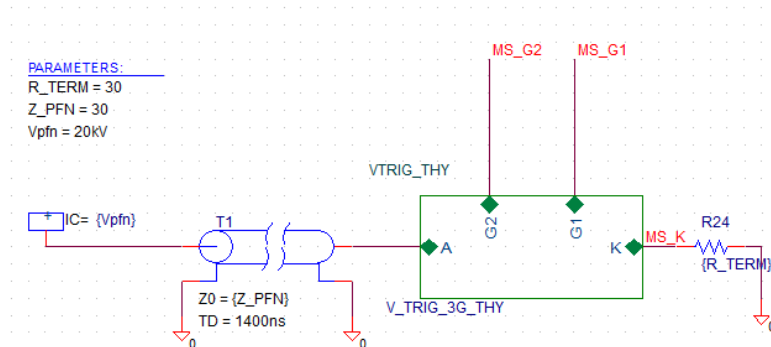


Figure 13 : Modèle simplifié de la ligne de puissance du kicker KFA45

Le travail décrit précédemment m'a permis disposer d'un modèle de thyatron à interfacer avec le ThyPTU. Toutefois, le thyatron ne constitue qu'une partie de la charge. En effet, il existe un circuit supplémentaire situé entre le module de déclenchement et le thyatron. Il est donc nécessaire de simuler également ce circuit.

### 3.3. Modèle du circuit de polarisation de grille du KFA45

#### 3.3.1. Utilité du circuit de polarisation

L'un des désavantages du thyatron est la difficulté à le placer dans des conditions idéales de commutation. Selon les valeurs de tension au repos appliquées sur les grilles de contrôle, le thyatron peut mal se déclencher (trop lentement ou de façon peu stable), ou encore se déclencher spontanément. Ainsi, le constructeur du thyatron recommande :

- D'appliquer en permanence une tension positive continue sur G1 afin de pré-polariser le drift-space associé. Cela permet de commuter le thyatron plus rapidement et plus précisément, et réduit la gigue sur le courant du kicker.
- D'appliquer en permanence une tension négative continue sur G2 afin de créer une barrière de potentiel empêchant le thyatron de commuter spontanément.

Le rôle du circuit de polarisation est de créer ces tensions continues, et de les superposer aux impulsions haute tensions issues du ThyPTU lors du déclenchement du thyatron.

Il existe plusieurs types de circuits de polarisation selon le système étudié

- Dans l'accélérateur PS, le circuit de polarisation génère les deux impulsions de grille (400V pour G1 et 1600V pour G2) à partir d'une seule impulsion à 3500V issue du module de déclenchement. Dans certains cas, G1 est fortement pré-polarisée ce qui permet de n'envoyer qu'une impulsion unique sur G2. Ce circuit est nommé « Faraday cage ».
- Dans les accélérateurs SPS et LHC, on utilise deux modules de déclenchement pour directement générer les deux impulsions 400V et 1600V. Le circuit de polarisation n'a alors pour rôle que de d'y ajouter les tensions continues décrites précédemment. Ce circuit est nommé « Bias board »

L'un de mes objectifs est donc de simuler tous les types de circuits de polarisation existants. Ce rapport ne décrit cependant que le circuit de polarisation du kicker KFA45 (équipement du PS). Cet équipement a été choisi car il s'agit de l'équipement le plus restrictif parmi tous. En effet, dans cet équipement, un seul ThyPTU doit piloter les deux grilles de contrôle, et leur fournir assez de courant pour maintenir le plasma jusqu'à la fermeture complète du thyatron.

### *3.3.2. Modèle de base du circuit de polarisation*

Le circuit de polarisation du KFA45 est constitué de plusieurs éléments, comme indiqué sur la Figure 14 :

- Un transformateur d'impulsion, dont le rôle est d'isoler galvaniquement le circuit de déclenchement et le thyatron.
- Un étage de polarisation permettant de générer la tension négative nécessaire à G2 pour inhiber le déclenchement du thyatron. Notez que le KFA45 ne pré-polarise pas G1 (une capacité bloque la tension continue de polarisation pour G1).
- Une ligne de transmission à fort délai permettant de délayer l'impulsion sur G2 de 550 ns par rapport à l'impulsion sur G1.

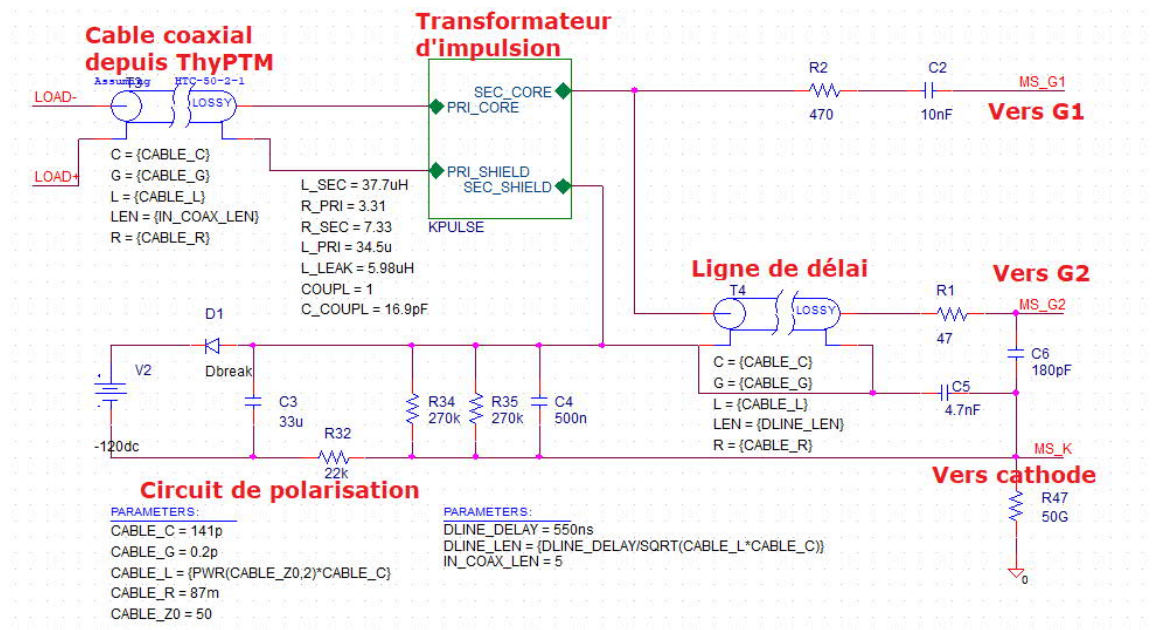


Figure 14 : Modèle du circuit de polarisation

J'ai créé le modèle PSpice de ce circuit à partir de schématiques fournies par M. Alvaro Ferrero Colomo, responsable du KFA45. Ces schématiques sont disponibles en Annexe 3.

### 3.3.3. Prise en compte des imperfections

Pour obtenir un modèle qui se rapproche de la réalité, j'ai dû prendre en compte les imperfections des éléments suivants, qui affectent significativement les formes d'onde en sortie du ThyPTU :

- Les câbles coaxiaux, en particulier le câble qui transmet l'impulsion à haute tension depuis le ThyPTU.
- Le transformateur d'impulsion, conçu et fabriqué par le CERN

Pour modéliser les câbles, j'ai recherché les caractéristiques électriques des câbles dans la documentation (capacité, résistance série et résistance de fuite par unité de longueur). Puis connaissant l'impédance caractéristique du câble à 1MHz, j'en ai déduit son inductance par unité de longueur. Ces informations ont été insérées dans un composant « ligne de transmission non-parfaite » de PSpice. Les valeurs utilisées sont résumées dans le Tableau 4.

Caractéristique câble	Méthode	Valeur
Impédance caractéristique $Z_0$	Donné	50 $\Omega$
Capacité par mètre $C$	Donné	141 pF/m
Inductance par mètre $L$	$L = Z_0^2 * C$	352.5 nH/m
Pertes diélectrique $G$	Donné	0.2 $p\Omega^{-1}m^{-1}$
Délai de propagation par mètre d	$d = \sqrt{L * C}$	7.05 ns/m

Tableau 4 : Valeurs retenues pour les câbles coaxiaux

La modélisation de ce câble fut d'ailleurs l'occasion de déterminer que le délai de propagation dans un câble possédant une couche de décharge semi-conductrice autour du conducteur central (7.05 ns/m dans mon cas) est plus long que le délai de propagation dans un câble similaire, mais sans couche semi-conductrice (5 ns/m habituellement pour ce type de câble). Ceci semble dû au fait que le diamètre additionnel de la couche semi-conductrice contribue à augmenter la capacité par unité de longueur du conducteur principal, mais ne contribue pas à augmenter son inductance.

Pour modéliser le transformateur d'impulsion, j'ai créé un modèle de transformateur non-parfait prenant en compte les résistances série, les inductances de couplage et l'inductance de fuite du transformateur. J'ai obtenu les valeurs en caractérisant un exemplaire réel de transformateur à l'aide d'un RLC-mètre. Ces valeurs sont résumées dans le Tableau 5.

Caractéristique transformateur	Méthode	Valeur
Résistance série primaire	Mesuré au RLC-mètre à $f = 100$ Hz Secondaire en circuit-ouvert	16 m $\Omega$
Résistance série secondaire	Mesuré au RLC-mètre à $f = 100$ Hz Primaire en circuit-ouvert	55.3 m $\Omega$
Inductance de couplage primaire	Mesuré au RLC-mètre à $f = 100$ kHz Primaire en circuit-ouvert	34.4 $\mu$ H
Inductance de couplage secondaire	Mesuré au RLC-mètre à $f = 100$ kHz Secondaire en circuit-ouvert	37.8 $\mu$ H
Inductance de fuite référée au primaire	Mesuré au RLC-mètre à $f = 100$ kHz Secondaire en court-circuit	5.98 $\mu$ H
Capacité de couplage entre primaire et secondaire	Mesuré au RLC-mètre à $f = 100$ kHz sur les blindages et sur les âmes	15 pF

Tableau 5 : Valeurs retenues pour le transformateur d'impulsion du KFA45

### 3.4. Résultats de simulation

#### 3.4.1. Simulation unitaire du ThyPTU

Le modèle obtenu précédemment nous permet d'évaluer les performances du ThyPTU, simulé seul sur une charge 50  $\Omega$ . Les paramètres les plus importants sont le délai entre le signal Trigger IN et l'impulsion haute-tension, le temps de montée de la grille de l'IGBT, le temps de montée de l'impulsion en sortie du ThyPTU, et enfin la valeur maximum de la tension en sortie.

Les Figures 15 et 16 comparent les performances du driver d'IGBT entre la simulation (Figure 15) et les mesures expérimentales réalisées avant mon arrivée (Figure 16) sur une charge résistive 50 $\Omega$ . La trace orange est le signal Trigger IN, et la trace verte est la tension de grille de l'IGBT. Le Tableau 6 compare le délai et le temps de montée du signal de grille pour les deux figures.



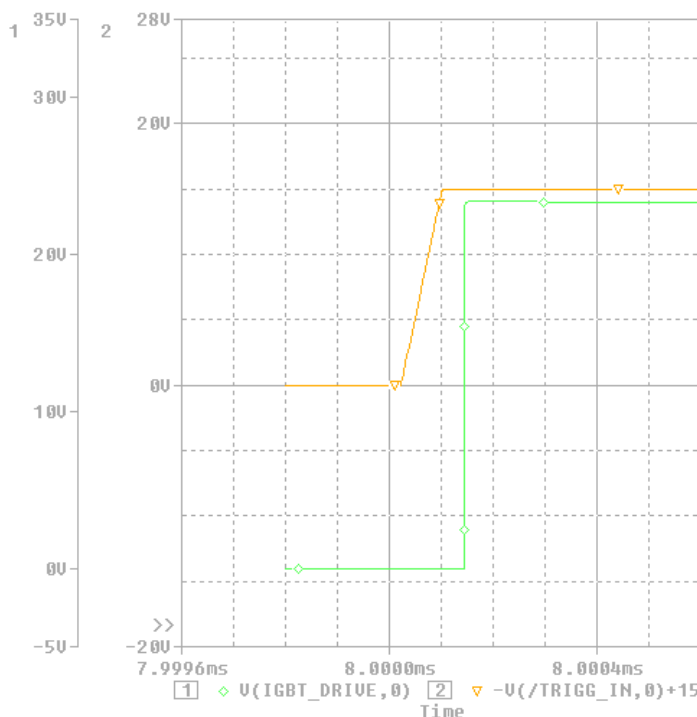


Figure 16 : Performances simulées du driver d'IGBT

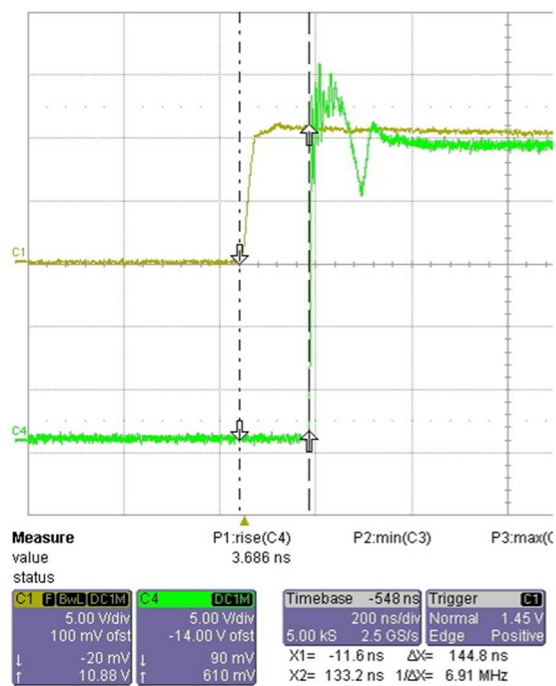


Figure 15 : Performances mesurées du driver d'IGBT (test unitaire)

	Simulation	Expérimental
Délai du signal de grille par rapport au signal Trig IN	143 ns	144.8 ns
Temps de montée du signal de grille	< 5 ns	< 4 ns

Tableau 6 : Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour le driver d'IGBT

Les Figures 17 et 18 comparent le signal de grille de l'IGBT et l'impulsion haute tension issue de l'IGBT entre la simulation (Figure 17) et les mesures expérimentales (Figure 18).

La trace orange est le signal Trigger IN, et la trace bleue est la tension en sortie du ThyPTU. Le Tableau 7 compare le délai et le temps de descente de l'impulsion HT pour les deux figures.

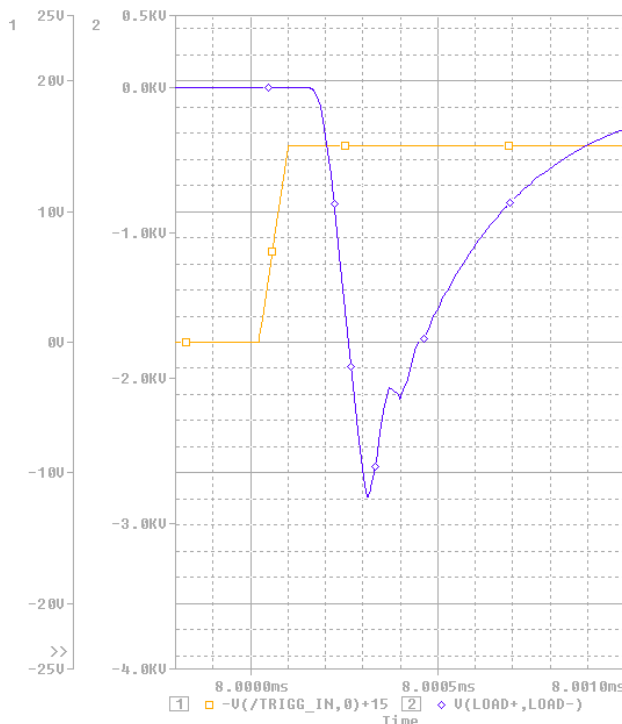


Figure 17 : Performances simulées de l'étage de puissance (test unitaire)

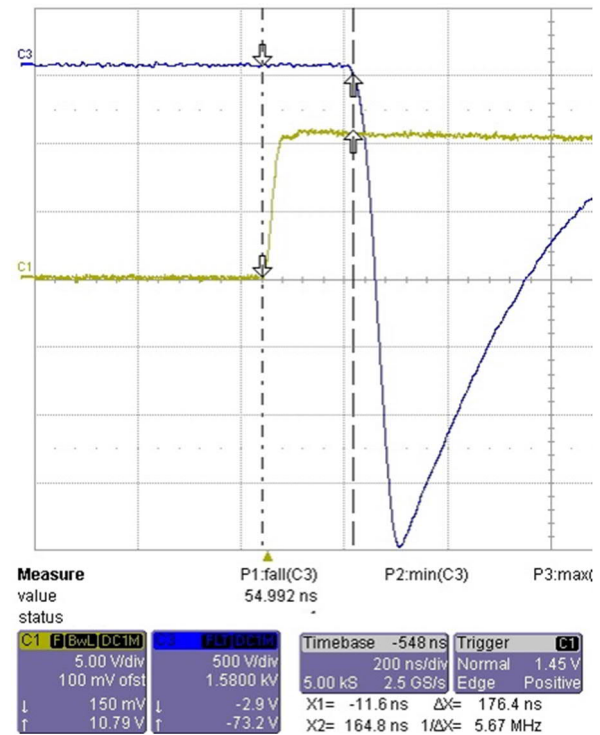


Figure 18 : Performances mesurées de l'étage de puissance (test unitaire)

	Simulation	Expérimental
Délai de l'impulsion HT par rapport au signal Trig IN	171 ns	176.4 ns
Temps de descente de l'impulsion HT	105 ns	~100 ns
Tension minimum en sortie	-2.82 kV	-3.5 kV

Tableau 7 : Comparaison des résultats expérimentaux et de simulation pour l'étage de puissance

J'ai ainsi observé que les formes d'ondes, les délais et les temps de montée étaient sensiblement les mêmes en simulation que lors des essais précédemment effectués. J'ai toutefois observé les éléments suivants :

- La tension de sortie en simulation présente une petite oscillation qui n'existe pas sur les résultats de tests. La différence entre les modèles d'IGBT utilisés pourrait être la cause de ce comportement.
- La valeur absolue de la tension en sortie est plus faible en simulation que dans les résultats de tests. En observant en simulation les tensions aux bornes de la batterie de condensateurs et de l'IGBT, j'ai observé une chute de tension significative aux bornes de l'IGBT, due aux pertes de commutation. La perte de tension mesurée lors des essais est moins importante car elle semble avoir été compensée par une augmentation de la tension de l'alimentation HT.



### 3.4.2. Simulation unitaire du modèle de thyatron

Le modèle de thyatron obtenu précédemment a été simulé dans un premier temps sans le ThyPTU à l'aide de deux blocs « générateur d'impulsion » de PSpice, placés entre la cathode et G1/G2. Le thyatron dans son environnement de simulation est illustré en Figure 19. Les résistances R52 et R53 représentent la partie réelle de l'impédance de sortie du circuit de polarisation, expliqué précédemment.

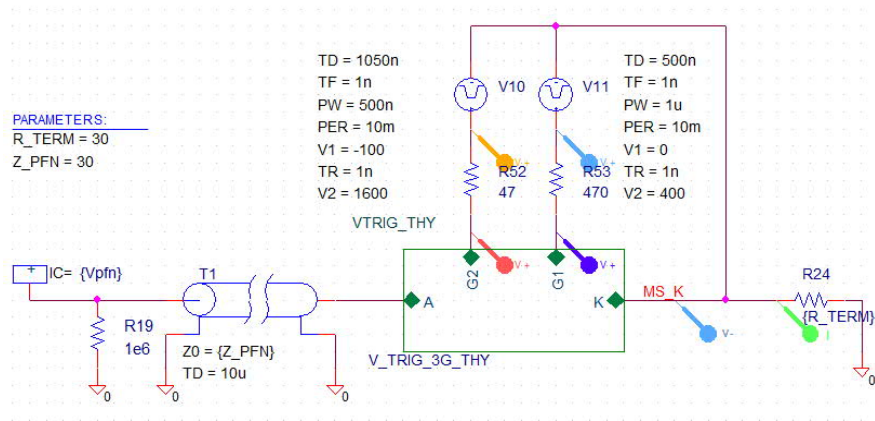


Figure 19 : Environnement de simulation du thyatron (test unitaire)

La Figure 20 montre les résultats de cette simulation. Une impulsion de 1  $\mu$ s et d'amplitude 400 V (en bleu sur la figure) est envoyée sur G1, puis 550 ns plus tard, une impulsion de 0.5  $\mu$ s et d'amplitude 1600 V (en orange sur la figure) est envoyée sur G2 (valeurs habituelles utilisées au CERN). Dans cette simulation, j'observe également la tension réellement présente sur G1 (en violet sur la figure) et sur G2 (en rouge sur la figure). Le comportement des grilles semble être le comportement non-linéaire attendu pour un thyatron :

1. G1 et G2 sont dans un premier temps au repos. La tension négative de polarisation est bien présente sur G2.
2. La tension de grille augmente au début de l'impulsion
3. La tension de grille atteint le seuil de commutation. Le drift-space associé passe en mode faible impédance
4. La tension de grille chute à 0 V malgré le fait que l'impulsion en entrée du thyatron soit toujours présente.

Enfin, j'observe sur la trace verte le courant parcourant la ligne de puissance du kicker. Les deux bosses présentes autour de  $t = 1.2 \mu$ s et la montée rapide du courant sont caractéristiques d'un thyatron à trois gaps qui commute correctement. L'ordre de grandeur du courant parcourant le kicker est également correct.

Afin de se rapprocher le plus possible des valeurs observées par le CERN, un délai supplémentaire a été rajouté plus tard entre la commutation de G2 et la fermeture du premier gap du thyatron (délai non-visible sur cette figure).

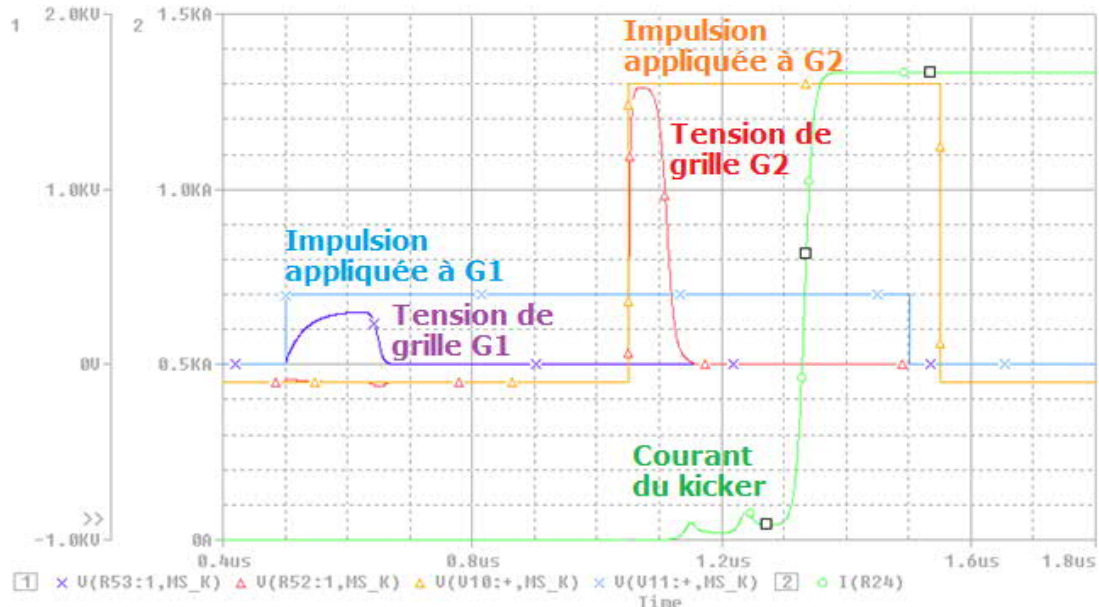


Figure 20 : Comportement simulé du thyatron (test unitaire)

### 3.4.3. Simulation du ThyPTU dans l'environnement du KFA45 (Main Switch)

Jusqu'ici, le ThyPTU a été simulé sur une charge  $50\ \Omega$ . Toutefois l'objectif réel de la simulation est de tester la compatibilité du ThyPTU avec le circuit de polarisation et le thyatron. Pour cela, j'ai agrégé les trois modèles réalisés précédemment dans un seul, grand modèle incluant le ThyPTU, le circuit de polarisation du KFA45, et le thyatron CX1171.

Les critères permettant de juger la compatibilité entre le ThyPTU et sa charge sont les suivants (voir Figures 21 et 22):

- Le thyatron commute correctement. Les deux bosses visibles sur le courant de kicker sont bien observables,
- Les grilles de contrôle des thyatrons présentent le comportement non-linéaire souhaité,
- La tension de polarisation de G2 est bien présente avant l'impulsion,
- La tension maximum de grille est comprise entre 300 V et 1000 V pour G1, et entre 500 V et 2 kV pour G2,

Et enfin, une condition importante pour que le thyatron commute dans la réalité :

- Le courant parcourant G1 lors de l'arrivée de l'impulsion sur G2 est encore suffisant pour maintenir le plasma (supérieur à 0.3 A pour le thyatron CX1171).

La Figure 21 illustre le comportement des grilles de contrôle du thyatron et le courant du kicker pour la simulation complète du KFA45. J'observe globalement les formes d'onde attendues et les amplitudes souhaitées. Tous les critères cités précédemment sont remplis. En particulier, le courant de grille G1, illustré en Figure 22 est encore suffisamment élevé lors de l'arrivée de l'impulsion sur G2. Les valeurs relevées en simulation sont données dans le Tableau 8.

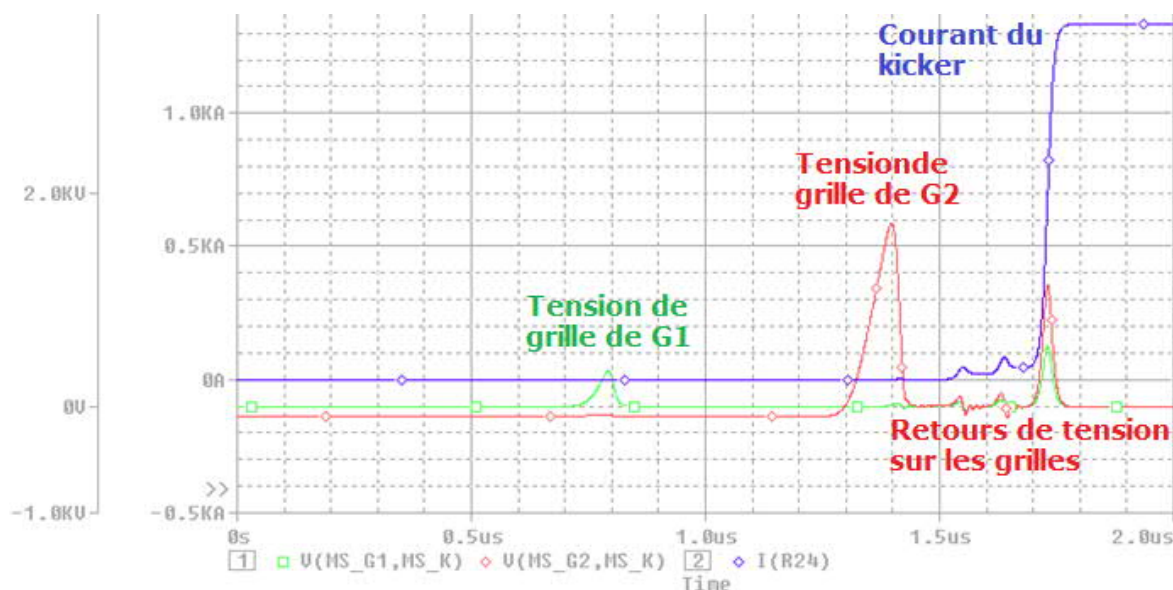


Figure 21 : Comportement simulé du thyatron (modèle complet)

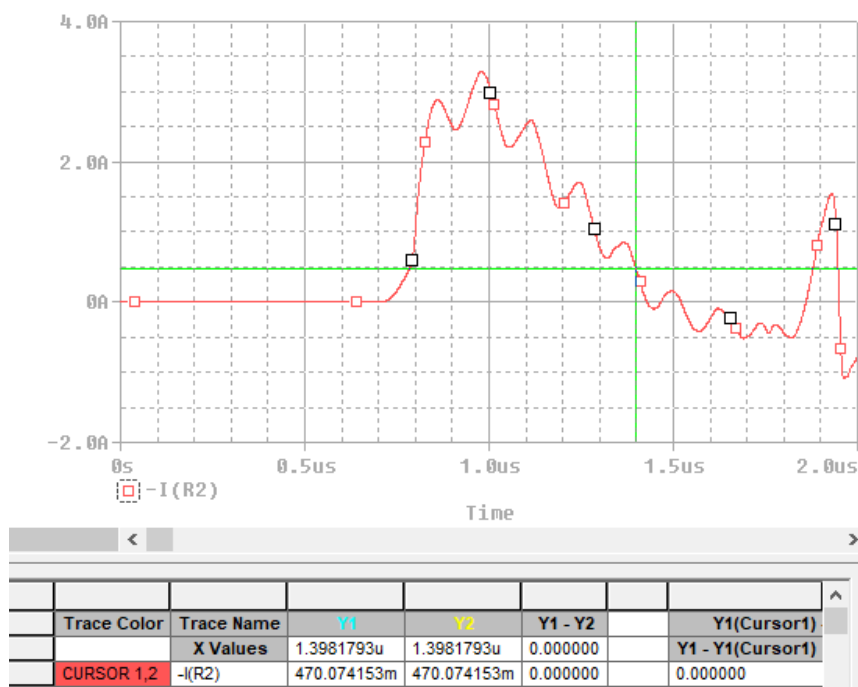


Figure 22 : Courant de grille G1

Paramètre	Valeur simulée
Tension max de grille G1	300 V
Tension max de grille G2	1750 V
Courant de grille G1 lors du max de tension sur G2	470mA

Tableau 8 : Grandeurs électriques simulées sur les grilles du thyatron

Les résultats de simulation semblent donc indiquer que le ThyPTU est compatible avec l'équipement KFA45. Le modèle dépasse également mes attentes puisqu'il permet de simuler les retours de tension sur les grilles suite à l'augmentation du courant dans le thyatron. La simulation

semble indiquer que ces retours de tension sont dus à l'inductance parasite des drift-spaces associés à G1 et G2. Cette inductance parasite s'oppose à la variation du courant sur la ligne de puissance du kicker (sans pouvoir l'empêcher) ce qui se traduit par un pic de tension sur les grilles au moment où le courant du kicker s'établit.

Une discussion avec M. Laurent Ducimetière, ingénieur au CERN, m'a permis de confirmer l'existence de ces retours de tension. L'étude de ce phénomène était d'ailleurs l'un des objectifs de la simulation du thyatron initialement réalisée par M. Barnes, suite à la destruction d'une « bias board » au sein du LHC à cause de ces retours de tension.

Il est également intéressant d'observer les formes d'ondes du ThyPTU connecté à sa charge complète. La Figure 23 illustre la tension et le courant de sortie simulés du ThyPTU.

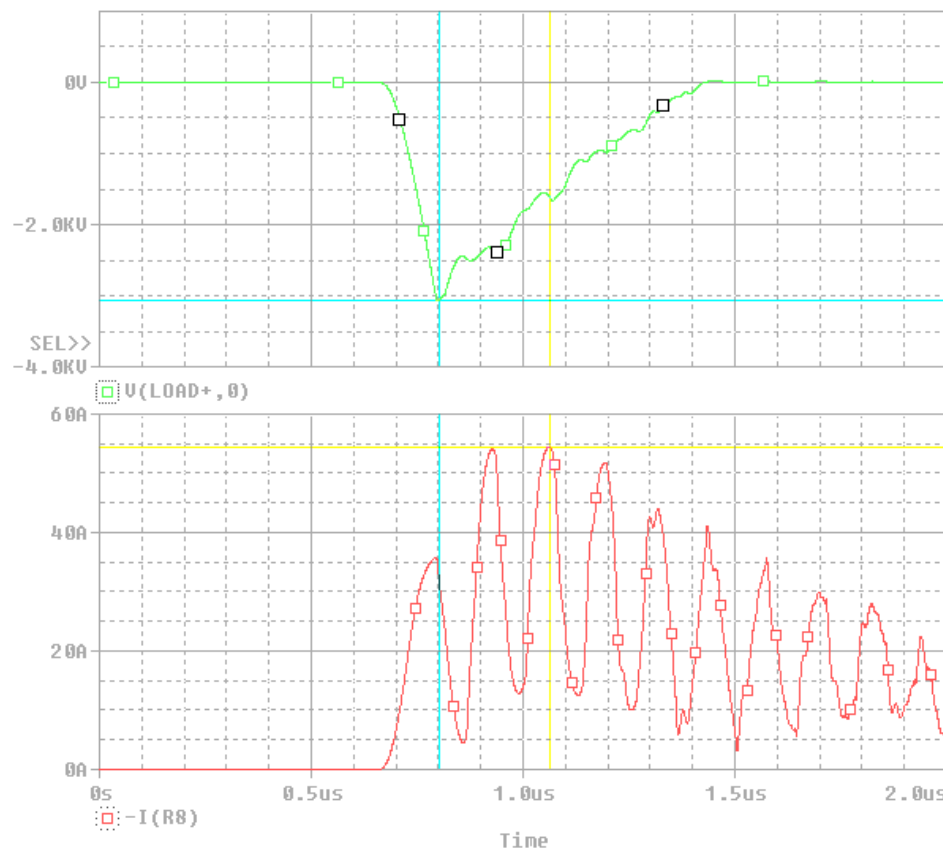


Figure 23 : Tension et courant simulés en sortie du ThyPTU (modèle initial)

La forme d'onde de la tension est sensiblement la même que pour la simulation avec une charge  $50 \Omega$ . J'observe toutefois une augmentation des oscillations sur la tension de sortie.

Le courant de sortie présente également de fortes oscillations, de fréquence  $f = 7.7 \text{ MHz}$ . Il est toutefois normal d'observer de telles oscillations car la sortie du ThyPTU n'est pas adaptée en impédance avec la charge. Il en résulte des réflexions liées à la ligne de transmission (câble coaxial) située entre le ThyPTU et le circuit de polarisation. En effet, ce câble agit comme un réseau LC possédant une infinité de composants avec  $L = 352 \text{ nH}$  et  $C = 141 \text{ pF}$  par mètre de câble.

Ces formes d'onde sont difficiles à interpréter plus en détail à ce stade, mais pourront servir à valider ou non notre modèle à partir des résultats de tests. Les valeurs à comparer sont listées dans le Tableau 9.

Paramètre	Valeur simulée
dI/dt moyen en sortie du ThyPTU	204 A/μs
Courant maximum en sortie du ThyPTU	54 A
dV/dt moyen en sortie du ThyPTU	23.4 kV/μs
Tension maximum en sortie du ThyPTU	2.980 kV

Tableau 9 : Grandeurs électriques simulées en sortie du ThyPTM (modèle initial)

Je dispose désormais d'un modèle de simulation du ThyPTU connecté au Main Switch du kicker KFA45. Bien que ce modèle semble donner les résultats attendus, il est probable que certains ajustements soient nécessaires avant d'obtenir des prédictions fiables sur le comportement du ThyPTU dans ce type d'environnement. Les résultats issus du modèle doivent être comparés avec des résultats obtenus à partir de tests sur l'équipement réel. Ces tests, ainsi que l'ajustement de la simulation seront détaillés dans la Partie 5.

Au final, ma contribution dans cette partie prend la forme de plusieurs projets PSpice (pour différents équipements), et d'un document qui explique ma démarche dans les moindres détails.

La simulation du ThyPTU fut pour moi l'occasion d'assimiler toutes sortes d'informations liées aux accélérateurs et aux système d'injection et d'extraction. Mais comme une simulation seule n'a pas grande utilité, j'ai tâché de poursuivre en parallèle un autre objectif nécessaire pour obtenir un exemplaire fonctionnel de ThyPTU : Le choix d'une alimentation haute tension.



## CHAPITRE 4. EVALUATION DE DIFFERENTES STRATEGIES D'ALIMENTATION EN HAUTE TENSION DU THYPTM

Je rappelle que ThyPTU est un générateur d'impulsion haute tension. Mais bien que la fonction de mise en forme de l'impulsion soit spécifique au CERN, la fonction de génération de haute tension peut être réalisée par une alimentation du commerce, ce qui est en accord avec le projet de consolidation des systèmes de trigger du CERN. Dans cette partie, j'expose mon analyse des différentes solutions d'alimentation en haute tension envisagées pour le ThyPTU, ainsi que les choix effectués pour la suite du projet.

### 4.1. Stratégies d'alimentation envisagées

Un seul châssis de ThyPTU peut supporter jusqu'à trois modules de trigger ayant la même tension de sortie. Cette tension peut varier selon les besoins entre 400 V et 4 kV. Chaque module de trigger doit donc être alimenté en haute tension lors de la charge des batteries de condensateurs.

Deux stratégies d'alimentation possibles ont été identifiées avant mon arrivée. Chaque solution présente des avantages et inconvénients déjà identifiables à ce stade :

1. La stratégie centralisée : Une seule alimentation à haute tension alimente les trois modules de trigger.

Avantages :

- Une seule alimentation nécessaire

Inconvénients :

- Nécessité d'utiliser des connexions haute tension dans le châssis,
- Peut s'avérer plus complexe (comprendre « plus cher ») à l'assemblage,
- Besoin d'utiliser une alimentation plus puissante ( $3 \times P$  pour 3 modules de trigger).

2. La stratégie distribuée : Chaque module de trigger génère sa propre haute tension.

Avantages :

- Pas de haute tension en dehors des modules de trigger
- Possibilité d'utiliser des modules haute-tension moins puissants

Inconvénients :

- Achat de trois modules pour un seul châssis.
- Très peu d'espace encore disponible dans les modules de trigger pour placer un module haute tension

Au final, le choix de la stratégie d'alimentation est conditionné par la faisabilité technique de cette stratégie, ainsi que par son coût. Une étude du marché est donc nécessaire pour ces alimentations à haute tension.

## 4.2. Prospection du marché et choix de la stratégie d'alimentation

### 4.2.1. Spécifications techniques et limites propres au CERN

Les modules recherchés doivent tenir à minima les spécifications techniques décrites dans le Tableau 10.

Paramètre	Valeur (stratégie centralisée)	Valeur (stratégie distribuée)	Justification
Tension d'entrée	+24 V ou secteur		Tensions disponibles dans le châssis
Tension de sortie	Réglable de 0 à 4 kV		Tensions pour les PTM. 0V nécessaire pour l'inhibition de la HT par la carte de contrôle.
Temps de charge max pour les 3 PTM	7 ms		Temps entre les signaux SCR et Trigger IN dans l'installation la plus restrictive.
Courant max de sortie	15 mA	5 mA	Courant nécessaire pour charger les batteries de condensateurs en 7 ms.
Dimensions	< 3U, 12TE <sup>2</sup>	50x50mm, h35mm	Espace disponible estimé.

Tableau 10 : Spécifications principales pour l'alimentation haute tension

De plus l'alimentation doit répondre aux exigences fonctionnelles suivantes :

- Présence d'un signal de monitoring de la tension
- Alimentation classée IP2x (parties sous tension protégées contre les corps solides de la taille d'un doigt).

Notez qu'il existe un document de spécification bien plus détaillé, mais qui n'a pas été approuvé et dont le contenu n'est pas clairement justifié. Il est également possible que cette spécification soit simplement une copie des caractéristiques techniques d'une des alimentations testées avant mon arrivée, et qu'elle soit donc destinée à l'appel d'offre futur. J'ai décidé d'effectuer mes recherches à partir de seulement certains points de la spécification, afin de ne pas me limiter à cette alimentation en particulier.

<sup>2</sup> Unités standard de hauteur et de largeur pour les châssis 19 pouces. Se référer au chapitre 6 pour plus de détails



Enfin, notez qu'il est très difficile au CERN de se procurer des modules provenant de fournisseurs basés aux Etats-Unis. Pour cela, je devrais justifier de l'absence d'une solution technique alternative, ainsi que de l'absence totale de produits similaires sur le marché européen. Une telle procédure durerait plus d'un an.

#### 4.2.2. Constructeurs et produits identifiés

Le Tableau 11 résume le résultat de ma prospection pour trouver une alimentation adaptée.

Constructeur	Produits	Remarques
XP Power	Convertisseurs régulés	Puissance maximale : 1W
	Convertisseurs proportionnels	Puissance maximale : 10W
	Montage en châssis (Série MK) [7]	Alimentations 5kV, 75W disponibles Temps de montée >50ms
Advanced Energy	Série 4C P60 [8]	Module 4kV, 60W. Déjà disponible pour les tests.
	Série 4C P20 [9]	Module 4kV, 20W. Trois fois moins puissant, mais prix du même ordre de grandeur que le type P60.
ISEG	Série EPS [10]	Module 4kV, 60W. Déjà disponible pour les tests.
Caen	-	Puissance maximale : 10W par sortie.
Ultravolt	-	Voir HVProducts.
Pulse EMC2	-	Pas de catalogue disponible.

Tableau 11 : Liste des constructeurs et des produits identifiés

Parmi tous ces constructeurs, certains ne possèdent que des alimentations de dimension élevée (3U à 6U, 84HP) qui ne sont pas adaptées à nos usages, ou qui sont trop peu puissantes. D'autres constructeurs comme Ultravolt ou XP Power sont basés aux Etats-Unis, ce qui nous empêche de profiter de leurs produits.

Les constructeurs restants sont donc ISEG, qui conçoit et produit ses propres alimentations, et Advanced Energy qui distribue certains produits d'Ultravolt en Europe.

Les deux alimentations retenues pour les tests sont donc l'ISEG EPS, et l'Ultravolt 4CP60 (distribuée par Advanced Energy). Ces deux alimentations avaient déjà été identifiées par mon prédécesseur, et sont disponibles au CERN pour des tests.

## 4.3. Test des alimentations à haute tension disponibles

### 4.3.1. ISEG série EPS

L'alimentation ISEG EPS est une alimentation délivrant une haute tension 0-4kV 60W. Dans notre cas, l'alimentation est livrée avec les options 3UC (adaptée aux racks 19 pouces) et CLD (chargeur de condensateur).

J'ai effectué des mesures de la tension de sortie de l'alimentation sous une cloche de protection afin de vérifier si l'alimentation est conforme aux spécifications attendues, en particulier le temps de montée ( $t < 7$  ms). Pour cela, j'ai assemblé une télécommande afin de pouvoir contrôler l'alimentation depuis l'extérieur de la cloche.

A mon arrivée l'alimentation présentait un comportement étrange qui la rendait inutilisable. J'ai longtemps échangé avec le service technique d'ISEG, avant de me rendre compte que le problème venait d'un mauvais contact dans le câble haute tension reliant l'alimentation à la charge.

J'ai pu finalement mesurer le délai et le temps de montée de l'alimentation pour une charge capacitive de trois fois la capacité d'un module de trigger. La Figure 24 illustre le signal ON (en jaune) et la tension de sortie (en violet) observés pour un test à 3500 V.

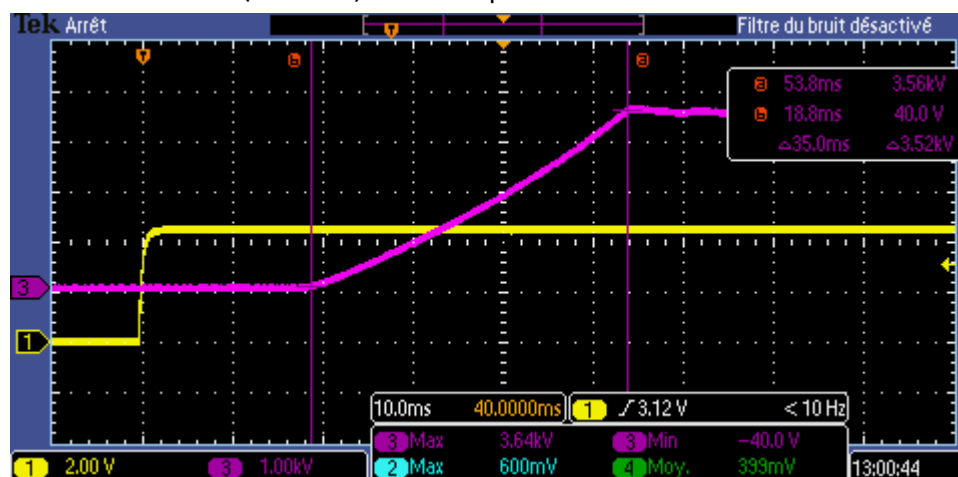


Figure 24 : Délai et temps de montée pour l'alimentation ISEG

Pour cette alimentation, j'observe un délai de 18 ms entre le signal ON et la montée initiale en tension, et un temps de montée de la tension de 35 ms, ce qui la rend trop lente pour notre spécification. La régulation semble également très agressive et un petit dépassement est observé.

### 4.3.2. Ultravolt série 4C haute puissance

L'alimentation Ultravolt est un module haute tension 0-4kV 60W, à monter sur PCB. Le prix est du même ordre de grandeur qu'une alimentation ISEG. Comme pour cette dernière, j'ai tout d'abord assemblé une télécommande me permettant de contrôler l'alimentation depuis l'extérieur de la cloche de test.

Pour différentes tensions de sortie, j'ai déterminé le délai et le temps de montée de l'alimentation pour une charge capacitive de trois fois la capacité d'un module de trigger. La Figure 25 illustre le signal ON (en bleu) et la tension de sortie (en violet) observés pour un test à 3700 V.

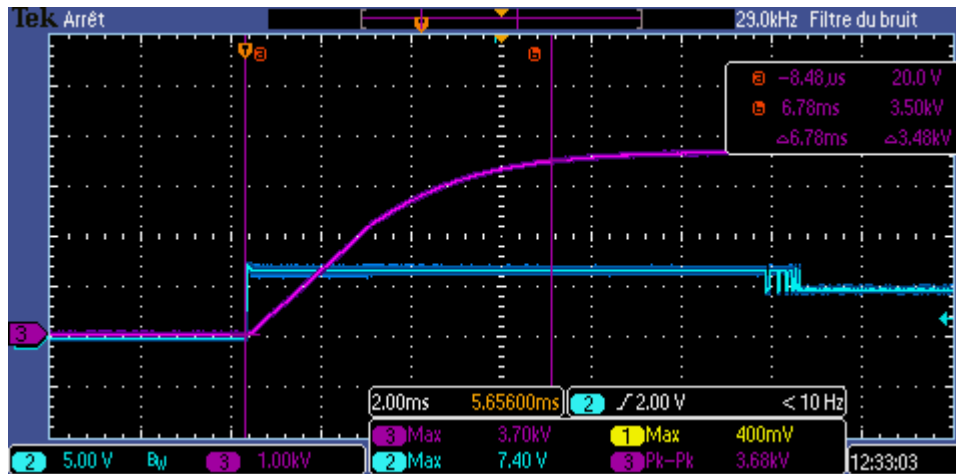


Figure 25 : Délai et temps de montée pour l'alimentation Ultravolt

Les tests réalisés par mon prédécesseur concluaient que l'alimentation Ultravolt était trop lente pour notre utilisation. Toutefois, j'ai réalisé que le temps de montée à 3500 V pouvait être réduit en augmentant la tension cible au-dessus de 3500 V. En particulier, le temps de montée est égal à 7 ms pour une tension cible de 3700V. L'alimentation Ultravolt présente également un délai négligeable, qui n'est même pas observable sur la Figure 25.

Les caractéristiques mesurées font donc de cette alimentation un candidat idéal pour la pré-série. Toutefois, elle possède deux inconvénients majeurs :

- Le constructeur est Américain (même si le distributeur est Allemand)
- Le module est trop large pour être intégré dans une cassette 3U.

En conclusion pour cette partie, trouver une alimentation adaptée à nos besoins a été très difficile. En particulier, aucune alimentation du commerce ne remplit officiellement la spécification liée au temps de montée ( $t < 7$  ms) dans un volume de 3U x 12TE. J'ai testé deux alimentations, dont une qui semble tenir la spécification dans les faits, mais qui s'avère trop large pour une cassette 3U. Au final, nous avons décidé de lever la contrainte du temps de montée en laissant l'alimentation allumée en permanence dans le ThyPTU. L'alimentation choisie pour la pré-série est l'alimentation ISEG, en raison de son format 3U prêt à l'emploi. Concernant la stratégie d'alimentation, nous avons choisi au final l'option centralisée.

La principale difficulté que j'ai rencontrée dans cette partie est la difficulté en tant que nouvel arrivant de distinguer ce qui est déjà défini, décidé, arrêté, de ce qui peut encore être modifié. En particulier, si j'avais eu à mon arrivée toute la liberté et les informations que je possède aujourd'hui, le choix de la stratégie d'alimentation aurait pu être totalement différent. Je retiens au final qu'il est toujours possible de remettre en question ce qui a été fait précédemment.



## CHAPITRE 5. TEST DU THYPTU SUR UN SYSTEME REEL

Les simulations effectuées précédemment semblent montrer que le ThyPTU est compatible à minima avec le kicker KFA45. Mais seuls des tests sur un équipement réel peuvent nous en donner la certitude. Cette partie décrit toutes les étapes de préparation, depuis les différentes formations nécessaires pour réaliser des essais, jusqu'aux tests de cyclage en laboratoire, ou encore les tests sur un équipement réel.

### 5.1. Formations préliminaires

#### 5.1.1. Formation radioprotection

Les tests sur les systèmes réels sont réalisés dans des cages de tests situées dans le bâtiment 867 du site de Prévessin. Les équipements présents dans ces cages de tests sont souvent des équipements de rechange ayant déjà fonctionné au sein des accélérateurs. En tant que tels, ils ont été soumis au rayonnement synchrotron des accélérateurs et présentent un faible niveau d'activité rémanente. De plus, certains composants en fonctionnement (les thyatron par exemple) sont des sources de rayonnements ionisants. Les cages de test du bâtiment 867 sont donc contrôlées pour les risques liés à la radioactivité.

L'accès aux zones contrôlées au CERN nécessite au préalable une formation d'une journée en radioprotection, ainsi qu'un suivi de la dose équivalente reçue à l'aide d'un dosimètre personnel.

#### 5.1.2. Habilitation électrique

Conformément à la réglementation française suivie par le CERN, la réalisation de travaux d'ordre électrique ne peut se faire que par des personnes habilitées et formées. J'ai donc suivi une formation d'une semaine afin d'obtenir un titre d'habilitation m'autorisant entre autres à réaliser des essais sur les installations sous la responsabilité de TE-ABT-EC (symboles BE Essais et HE essais).

### 5.2. Tests de cyclage

#### 5.2.1. Utilité des tests de cyclage

Lors d'une année normale au CERN, les accélérateurs PS, SPS et LHC sont amenés à fonctionner jusqu'à 10 mois consécutifs, si possible sans interruption. C'est pourquoi, les différentes cartes électroniques sont testées durant plusieurs semaines en laboratoire afin d'estimer leur fiabilité. C'est également l'occasion de mesurer la dispersion de certains paramètres avec le temps, ou encore de vérifier le comportement thermique des cartes électroniques.

J'ai effectué les tests de cyclage dans le laboratoire visible sur la Figure 26. On y voit sur la droite une cloche de protection en plexiglas munie d'un dispositif mettant hors-tension tous les systèmes connectés à l'intérieur lorsque la cloche est relevée. Sur la gauche en arrière-plan se trouve une cage d'expériences à accès restreint permettant de tester des équipements plus volumineux.



Figure 26 : Laboratoire 865/2-B04

Sur la Figure 27, on peut voir le montage d'essai que j'ai utilisé pour les tests de cyclage du ThyPTU. J'ai dans un premier temps assemblé un exemplaire supplémentaire de chaque carte (carte trigger et carte contrôle) Je les ai ensuite placés avec une alimentation haute tension ISEG sous la cloche de protection.

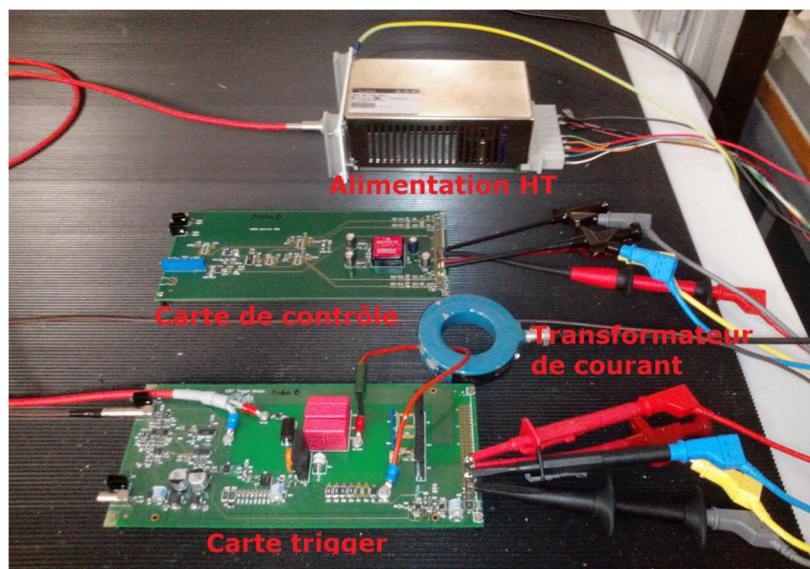


Figure 27 : Montage d'essai pour les tests de cyclage

Une alimentation 24V de laboratoire fournit la basse tension nécessaire aux différentes cartes et à l'alimentation ISEG. Le module de trigger est déclenché à intervalle régulier à l'aide d'un générateur d'impulsion très précis du CERN (slow pulse generator). Une charge  $50\Omega$  est connectée en sortie du module de trigger. J'observe à l'oscilloscope le courant de sortie du module de trigger, mesuré à l'aide d'un transformateur de courant.

### 5.2.2. Estimation de la dispersion temporelle (jitter) du courant de sortie

Dans un premier temps, j'ai cherché à estimer la dispersion temporelle du courant de sortie.

L'oscilloscope est placé en mode « persistant », et j'ai observé pendant plusieurs jours avec un fort zoom le courant de sortie. Durant tout ce temps, l'oscilloscope a accumulé les traces mesurées pour chaque déclenchement, comme illustré dans la Figure 28.



Un logiciel de traitement d'image me permet d'estimer le jitter à  $1.15 (\pm 0.08)$  ns. Cette valeur est à comparer avec la spécification du CERN, qui est à priori  $\pm 1$  ns. Je n'ai malheureusement pas pu faire des tests sur plusieurs semaines consécutives par manque de temps, et je suis passé au test suivant.

### 5.2.3. Estimation de la dispersion en amplitude du courant de sortie

Le second test consiste à estimer la dispersion en amplitude du courant de sortie. La méthode est exactement la même que pour la mesure de dispersion temporelle. Au moment de l'écriture de ce paragraphe, les tests sont en cours depuis 6h pour une durée d'une semaine au minimum.

### 5.2.4. Mesure de la perte de capacité

Le ThyPTU utilise des condensateurs haute tension de marque WIMA, qui sont très compacts pour la tension qu'elles peuvent supporter. Toutefois, les membres de mon équipe ont remarqué que pour des applications pulsées avec un très fort courant, ce type de condensateur perd de la capacité à cause de micro-claquages (phénomène de « self-healing »).

Entre les différents tests de cyclage, je dessoude les condensateurs haute tension pour les mesurer au RLC-mètre afin de caractériser une éventuelle perte de capacité dans mon cas d'utilisation.

Je ne dispose pour le moment que de deux points de mesure pour les trois condensateurs. La perte de capacité mesurée est actuellement non-significative (entre 80 et 500 ppm).



### 5.2.5. Considérations thermiques

Les mesures en température s'effectuent en principe en deux étapes :

- Observation de la carte électronique à l'aide d'une caméra thermique
- Mesure des composants les plus chauds lors des tests de cyclage à l'aide de thermocouples, et tracé de la température en fonction du temps.

En pratique, la cloche de protection en plexiglas m'interdit d'effectuer des observations à la caméra thermique lors du fonctionnement avec la haute tension. J'ai toutefois pris la liberté de contourner la sécurité de la cloche de protection pour effectuer des observations en absence totale de haute tension (alimentation ISEG déconnectée et non-alimentée).

Ces tests ont révélé une hausse significative et instantanée de la température de deux amplificateurs opérationnels (AOP) en fonctionnement. La Figure 29 montre une image thermique de la zone concernée du PCB, où l'un des AOP atteint une température en surface de 60°C. Cette température est atteinte très rapidement et reste ensuite stable.

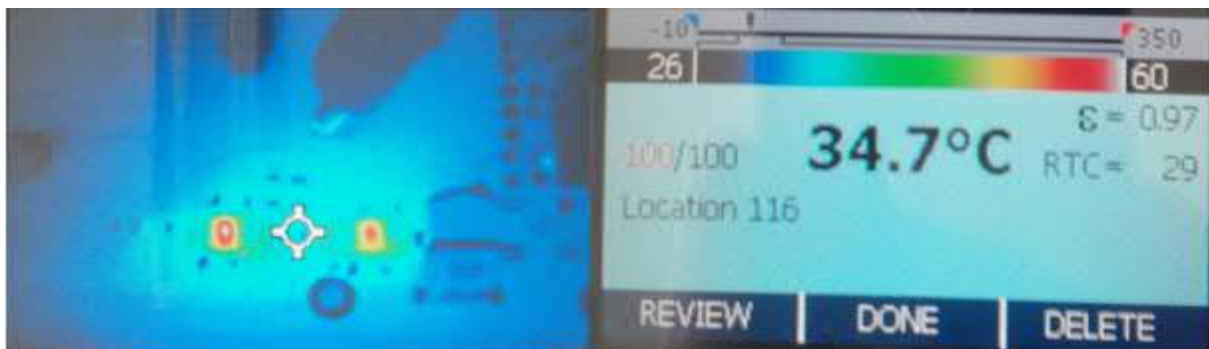


Figure 29 : Image thermique de l'étage de mesure du courant de sortie

J'ai identifié les éléments suivants comme étant des causes potentielles du problème :

- Nature du composant : L'AOP utilisé possède un slew-rate très élevé, ce qui le rend naturellement moins stable.
- Le faible gain des deux étages : Le premier étage est un étage inverseur et le deuxième étage est un suiveur. Or par nature, un AOP est plus stable avec un gain plus fort.
- La qualité de la soudure : L'AOP possède un pad thermique CMS sous le composant, que je n'avais pas soudé dans un premier temps.
- L'agencement des pistes du PCB autour du composant : En particulier, les plans de masse et d'alimentation sont superposés aux pads d'entrée et de sortie de l'AOP, ce qui ajoute une capacité parasite qui peut rendre le composant instable d'après la documentation.

Parmi ces quatre points, seuls les deux derniers peuvent être améliorés. Pour le moment, je n'ai pu qu'améliorer la qualité de la soudure pour l'AOP le plus chaud. Malheureusement, la petite taille du composant et mes compétences limitées en soudage augmentent significativement le risque d'endommager le composant ou le PCB.



Au final, la température des AOP a pu être abaissée à 50°C. J'ai réalisé une étude thermique pour déterminer la température normale de fonctionnement. Ainsi, à une température ambiante de 25°C, au repos et sans charge, l'AOP devrait atteindre 44°C pour le boîtier, et 45.8°C pour la jonction. Dans nos conditions de fonctionnement actuelles, l'AOP peut dissiper en chaleur 0.5W supplémentaires sans perte de performance, ce qui constitue une marge conséquente.

Concernant la partie haute tension du PCB, une observation à la caméra thermique immédiatement après l'arrêt des tests de cyclage n'indique aucune élévation anormale de température. Pour le moment, aucune mesure par thermocouple n'est prévue.

### 5.3. Tests sur un équipement réel

#### 5.3.1. Connexion du ThyPTM au kicker KFA45

En parallèle des tests de cyclage, j'ai installé le premier prototype de la carte trigger (ThyPTM) sur une paillasse mobile dans la cage de test du kicker KFA45, en vue de réaliser des tests sur l'équipement réel.

Le montage d'essai, visible en Figure 30 est le suivant : Une carte de trigger est alimentée en basse tension par deux alimentations de laboratoire, et en haute tension par une alimentation Ultravolt. La carte est substituée au module de trigger du Main Switch du KFA45, comme illustré en Figure 30. Enfin, le KFA45 est configuré pour pulser normalement à une fréquence de quelques Hertz.

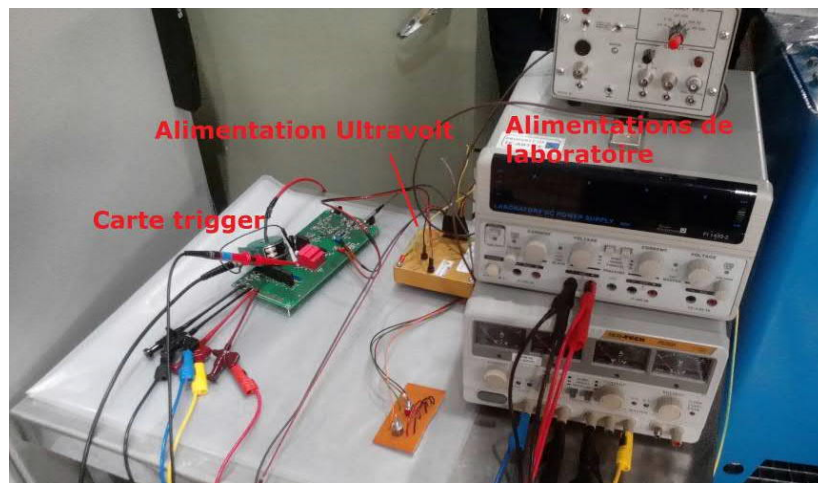


Figure 30 : Montage d'essai pour les tests sur le KFA45

Ces tests sont assez contraignants à réaliser. En effet, le KFA45 est un équipement critique, sujet en permanence à des tests de cyclage, qui ne peuvent pas toujours être interrompus. De plus, le KFA45 doit être en état de fonctionnement, et le responsable de la cage de test doit être présent.

La principale difficulté liée aux mesures sur le KFA45 est l'impossibilité d'effectuer des mesures sur le circuit de polarisation ou sur le thyatron. En effet, ces deux éléments sont enfermés dans le bâti du Main Switch et immergés dans de l'huile minérale.

Je dispose en revanche d'un certain nombre de points de mesure intégrés au MS, dont une mesure de courant (Current Pick-Up) sur l'anode du thyatron. Le signal passe toutefois par un intégrateur afin de lui donner une forme carrée. Cette mesure ne sert donc qu'à déterminer si le thyatron s'est bien déclenché, et ne permet pas de déterminer la forme réelle du courant dans le thyatron.

### 5.3.2. Résultats de tests et comparaison avec la simulation

La Figure 31 montre la tension (en bleu) et le courant (en rouge) en sortie du ThyPTM. A gauche, se trouvent les résultats de simulation, et à droite se trouvent les formes d'onde mesurées lors d'un déclenchement du KFA45.

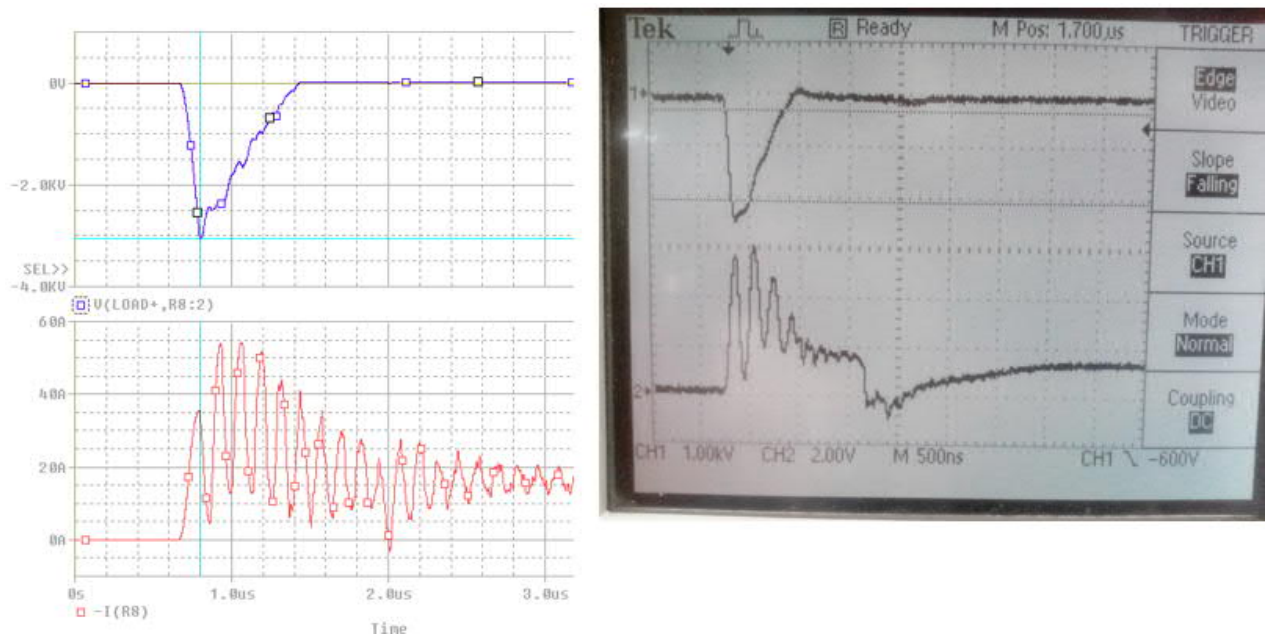


Figure 31 : Comparaison de la tension et du courant de sortie du ThyPTM entre la simulation et la réalité (modèle initial)

Les valeurs mesurées sur ces figures sont résumées dans le Tableau 12.

Paramètre	Valeur
Tension de l'alimentation haute tension	3.5kV
Tension de sortie du ThyPTM	2.5kV
Courant max de sortie	60A

Tableau 12 : Valeurs des tensions et courants de sortie mesurés lors du test sur le KFA45

Sur la Figure 32, se trouve le signal de pick-up (en jaune) mesuré sur l'anode du thyatron (en jaune). La présence de ce signal nous montre que le thyatron commute comme prévu.



Figure 32 : Signaux de pick-up du KFA45 lors du test avec le ThyPTM

Nous avons toutefois observé les problèmes suivants :

- Problème d'interlock : Le KFA45 est équipé d'un dispositif nommé FIDS (Fast Interlock Detection System), qui inhibe le fonctionnement de l'équipement lorsqu'un comportement anormal est détecté. A chaque déclenchement du KFA45 avec le ThyPTM, le FIDS enregistre une impulsion manquante pour le Main Switch. Selon mon superviseur, le délai de déclenchement du Main Switch pourrait être supérieur à celui configuré par le FIDS. Le délai autorisé peut être augmenté sans problème dans les paramètres.
- Perte de tension en sortie du ThyPTM : L'impulsion de sortie est de 2.5kV, contre 2.96kV prévu par la simulation.
- Présence d'un bruit important sur les différents signaux de pick-up : La cause de ce bruit n'est sans doute pas le ThyPTM puisque le même bruit apparaît également sur le pick-up de courant du Dump Switch, qui utilise un module de trigger d'origine du KFA45.

De plus, la forme d'onde du courant mesuré est très différente de celle prévue par la simulation.

Dans l'ensemble, les conclusions du test sont positives : Le ThyPTM est capable de commuter le Main Switch du KFA45, et l'amplitude du courant de sortie (qui est le paramètre le plus important) semble correcte.

Je regrette toutefois de n'avoir pas pu tirer pleinement avantage de ces tests. Je n'ai pas pensé à mesurer les valeurs de  $dV/dt$  et de  $dI/dt$  en sortie du ThyPTM, et je ne disposais pas d'une expérience suffisante avec la cage de test pour pouvoir manipuler librement, ou prendre des initiatives. D'autres tests sont prévus d'ici quelques jours et je ne manquerai pas d'effectuer les mesures manquantes. Une comparaison de la tension et du courant de sortie entre le ThyPTU et le PTU actuellement utilisé permettra également de valider ou non la compatibilité du ThyPTM avec l'équipement KFA45.

### 5.3.3. Ajustement du modèle de simulation

Suite au premier test sur le KFA45, le modèle de simulation a été ajusté afin de se rapprocher davantage de la réalité.

Je suis parti du constat que les fortes oscillations observées en simulation n'existent pas en réalité, malgré le fait que l'amplitude du courant soit correcte. L'élément le plus susceptible d'ajouter des oscillations est le câble coaxial situé entre le ThyPTM et le transformateur d'impulsion. Il existe en effet une forte désadaptation d'impédance entre le ThyPTM et sa charge, quelle que soit la situation. Une partie de l'énergie transmise par le câble est alors réfléchi, ce qui crée des oscillations sur la tension ou sur le courant.

J'ai également observé en simulation que les diodes de roue-libre en sortie du ThyPTM entraînent en conduction juste après l'impulsion. Or, des diodes de suppression que je n'avais pas intégrées au modèle sont présentes de l'autre côté de la ligne de transmission. Ces diodes sont également susceptibles d'entrer en conduction et de modifier l'impédance de l'étage d'entrée du circuit de polarisation (et donc la forme des oscillations). Modéliser correctement les diodes des deux côtés de la ligne de transmission m'a permis d'améliorer grandement la qualité du modèle.

Enfin, j'ai tâché d'identifier les différents effets capacitifs et inductifs parasites présents dans le circuit, et d'estimer leurs valeurs. Malheureusement, je manque toujours d'informations sur le composant central du ThyPTM qui est l'IGBT. La seule option restante serait de caractériser le composant expérimentalement, ce qui peut s'avérer complexe (mais pas impossible).

Actuellement, mon meilleur modèle donne les formes d'onde visibles sur la Figure 33. On y voit en bleu la tension de sortie et en rouge le courant de sortie simulés. Le courant simulé possède désormais la même forme d'onde globale, la même amplitude, et la même fréquence d'oscillation que le courant réel mesuré sur le KFA45 (visible à droite). La tension de sortie maximale simulée (2.75 kV) est également plus proche de la tension réelle mesurée (2.5 kV).

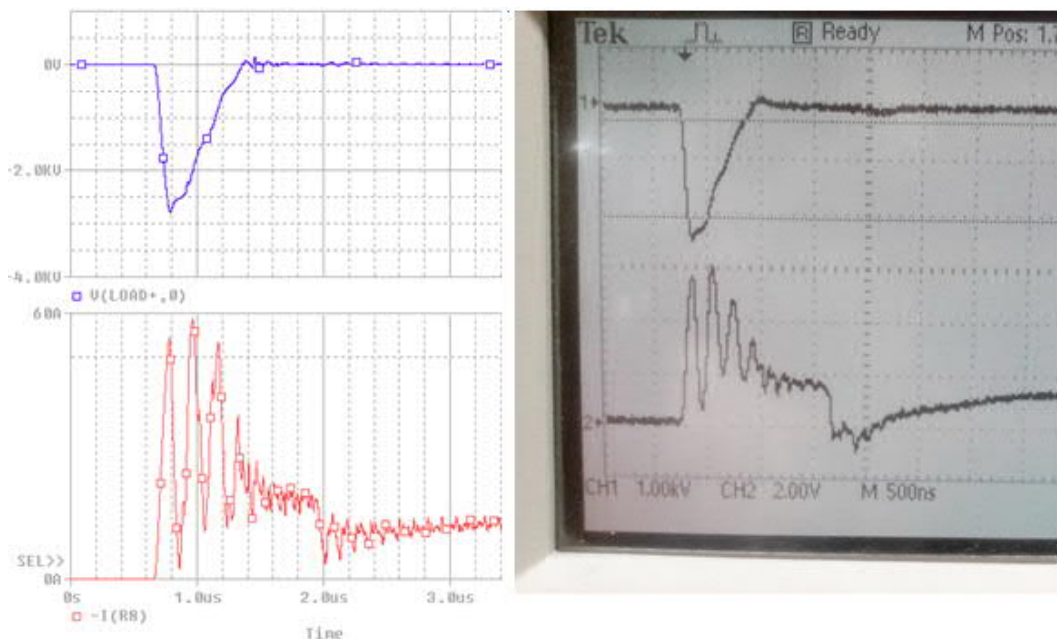


Figure 33 : Comparaison de la tension et du courant de sortie du ThyPTM entre la simulation et la réalité (modèle ajusté)

## CHAPITRE 6. INTEGRATION MECANIQUE POUR LA PRE-SERIE

Après avoir acquis une certaine confiance concernant les cartes électroniques du ThyPTU, la dernière étape afin d'obtenir un exemplaire de pré-série est l'intégration des différents modules dans une baie d'instrumentation. Dans cette partie, je décris la façon dont les différents systèmes sont habituellement intégrés au CERN, et je propose des solutions pour intégrer le ThyPTU de la même façon.

### 6.1. L'intégration mécanique des systèmes au CERN

Les équipements électroniques au CERN sont le plus souvent montés dans des baies 19 pouces au standard européen. Chaque circuit imprimé est monté dans une cassette possédant des connecteurs enfichables à l'arrière.

Un ou plusieurs circuits imprimés montés parallèlement au plan arrière de la baie (backplane PCB) sont munis de connecteurs correspondant à ceux des modules que l'on souhaite y monter. Les connexions entre les différentes cassettes sont faites autant que possible par des pistes en cuivre sur les circuits de backplane, ou à l'aide de câbles coaxiaux dans le cas contraire. Un montage mécanique à base de rails permet d'installer ou de retirer un module de son emplacement simplement en le poussant ou en le tirant depuis l'avant de la baie.

Un tel dispositif nécessite une conception mécanique assez lourde, mais facilite grandement l'installation et le dépannage des équipements. En effet, en cas de panne d'un module, celui-ci peut être remplacé très rapidement.

La hauteur des modules est exprimée en « U », et la largeur est exprimée en « HP ». Au CERN, la plupart des PTM sont agencés sur une hauteur de 6U. Toutefois, pour cause d'un manque de place dans certaines installations, le ThyPTU a été prévu sur une hauteur de 3U. Cet agencement inhabituel pose certains problèmes, dont nous parlerons plus loin dans cette partie.

### 6.2. Etude d'une solution de ThyPTU en 3U

#### 6.2.1. Agencement initial du châssis

La Figure 34 montre un châssis de ThyPTU, vu du dessus, tel qu'il a été prévu avant mon arrivée. En bas de l'image, on trouve les modules suivants (de gauche à droite)

- Une alimentation AC/DC standard euro 24V
- Une alimentation haute tension 0-4kV de chez ISEG



- Un module de contrôle pour l'alimentation haute tension
- Trois modules de trigger (ThyPTM)

Le boîtier vert en situé sur l'arrière du châssis sert à distribuer la haute tension reçue depuis l'alimentation ISEG aux trois modules de trigger.

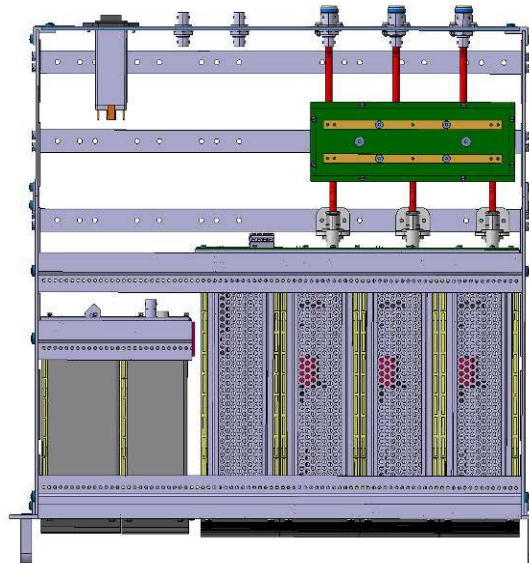


Figure 34 : Intégration partielle du ThyPTU en taille 3U

### 6.2.2. Re-routage de la haute tension

Dans sa configuration standard, l'alimentation ISEG fournit la haute tension sur un connecteur de type SHV situé à l'avant du module. Considérant qu'il ne restait aucun espace sur le panneau frontal, il était impossible d'amener la haute tension sur le boîtier de distribution.

Le constructeur est d'accord pour customiser l'alimentation haute tension afin de disposer d'un connecteur à l'arrière. Cette solution s'accompagne toutefois d'une forte augmentation du prix de l'alimentation.

C'est pourquoi j'ai proposé la solution suivante, illustrée en Figure 35 : La largeur du module de contrôle de l'alimentation à haute tension était prévue à 14TE, soit 71.12mm. Or, le composant le plus haut présent sur la carte électronique occupe moins du tiers de la largeur disponible. Après discussion avec les ingénieurs en mécanique du groupe, j'ai décidé de réduire la largeur de ce module à 8TE. De plus, j'ai repéré une erreur sur la largeur de l'alimentation AC/DC, qui m'a permis de gagner 2TE supplémentaires.

Dans cette nouvelle configuration, je dispose au final de 8TE (40.64mm) libres sur le panneau frontal pour re-router le câble haute-tension depuis l'avant de l'alimentation ISEG vers le boîtier de distribution.

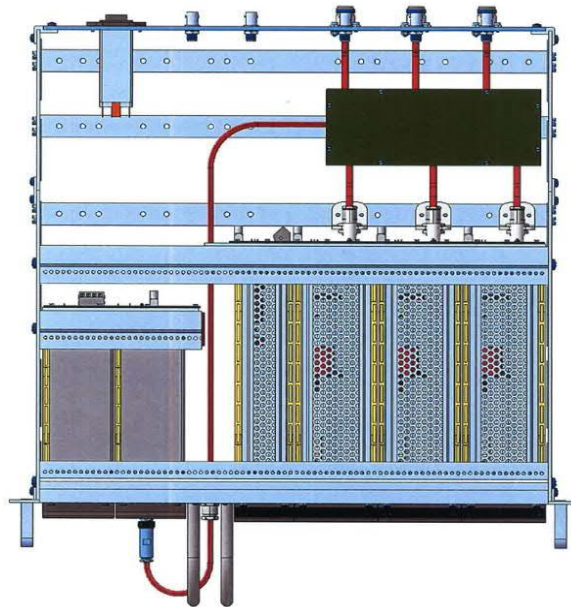


Figure 35 : Proposition finale d'intégration en taille 3U

### 6.2.3. Sécurité du connecteur haute tension

La solution précédente nécessite d'avoir un connecteur haute tension à l'avant du châssis. Or, les utilisateurs ne doivent courir aucun risque électrique tant qu'ils ne cherchent pas à accéder à l'intérieur du châssis.

J'ai échangé à ce sujet avec le responsable sécurité du département. Nous avons déterminé ensemble que le connecteur SHV de l'alimentation ISEG étant IP2x, l'utilisateur ne peut pas accéder aux parties sous tension sans utiliser un outil métallique, ce qui rendrait son acte délibéré.

Un autre problème est que le connecteur haute tension sur le câble est très long, ce qui l'oblige à dépasser de plusieurs centimètres du châssis. Dans cette configuration, le connecteur peut très facilement être endommagé par maladresse, ce qui mettrait en danger l'utilisateur. Pour contourner ce problème, j'ai proposé d'utiliser des connecteurs SHV coudés, beaucoup moins sensibles à un effet de levier. J'ai également trouvé un fournisseur pour ces connecteurs au Royaume-Uni, et je l'ai fait ajouter sur la base de fournisseurs du CERN.

## 6.3. Etude d'une solution de ThyPTU en 6U

La solution 3U présentée précédemment possède l'inconvénient d'utiliser un boîtier de distribution pour la haute tension, qui peut s'avérer coûteux à assembler, et qui n'est pas une solution standard au CERN.

Certains modules de trigger au CERN utilisent un agencement 6U particulier, illustré en Figure 36, et qui est presque considéré comme un standard pour les systèmes de trigger. Le module est observé

par l'arrière. On trouve à l'avant 6 modules de trigger, et à l'arrière l'alimentation haute tension utilisée actuellement dans ce type de PTU.



Figure 36 : Exemple de solution standard en taille 6U pour l'intégration des PTM

Cet agencement présente l'avantage de séparer sur deux étages les connexions haute tension des autres signaux. Cela laisse également toute la partie supérieure du châssis libre à l'arrière pour pouvoir accéder aux connexions haute tension.

Avec mon chef d'équipe, nous avons pu trouver une solution correspondant à ce standard, mais qui nécessite d'adapter tous les PCB au format 6U. Les alimentations AC/DC et haute tension sont enfichées par l'arrière du châssis. Au moment de l'écriture de ce chapitre, cette solution est en attente de validation par nos experts en mécanique et n'est donc pas entièrement arrêtée. La solution 6U ne possède qu'un seul inconvénient : Elle ne peut supporter que cinq modules de trigger sur une hauteur de 6U (contre 6 modules de trigger sur 2 fois 3U pour la solution 3U).

Ma contribution à l'intégration mécanique de la pré-série prend donc la forme de deux solutions : La solution 3U, compacte mais potentiellement plus chère à produire, et la solution 6U, qui reproduit une configuration standard du CERN, mais qui ne permet de disposer que de 5 modules de trigger (au lieu de 6 pour 2 châssis en version 3U). La production d'un châssis complet de ThyPTU est l'un des objectifs ultimes du stage. Cet objectif est encore atteignable, mais une certaine réactivité sera nécessaire de mon côté pour obtenir tous les éléments mécaniques et électroniques avant la fin du stage, en particulier les cartes électroniques, qui vont nécessiter un re-routage complet.



## CHAPITRE 7. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ma contribution au cours de ce stage a pris différentes formes, et doit désormais être comparée aux objectifs fixés au début du stage.

J'ai dans un premier temps mis en place un modèle du ThyPTU, ainsi qu'une partie des différentes charges, incluant les circuits de polarisation des équipements KFA4, KFA28, KFA45 et MKI2, et les thyatron CX1171 et CX1573. Le modèle n'a été éprouvé et ajusté que pour le KFA45, donc l'objectif de simulation n'est pas encore tout-à-fait atteint. Les modèles déjà effectués sont également documentés et ne demandent qu'à être améliorés. Le CERN peut donc espérer dans le futur pouvoir prévoir à l'avance le comportement d'un système de trigger en fonction de l'équipement sur lequel il est connecté afin d'optimiser l'installation. Le modèle de thyatron amélioré semble également déjà intéresser certaines personnes.

En parallèle à la simulation, le choix de la stratégie d'alimentation a été effectué, et une alimentation a été sélectionnée pour réaliser la pré-série, donc l'objectif associé est atteint. La prospection du marché et le test de différentes alimentations disponibles nous ont toutefois amené à supprimer certaines contraintes, ce qui devrait normalement aboutir à une nouvelle considération des différentes solutions du marché. Ce n'est pas un problème pour la pré-série, mais la spécification qui accompagnera l'appel d'offre devra prendre en compte les contraintes relaxées.

Le test d'une carte ThyPTM sur un système réel a été un succès partiel. En effet, bien que toutes les impulsions liées au ThyPTM soient considérées comme manquantes par le FIDS, le thyatron commute et les bonnes formes d'onde sont observées sur les signaux de pick-up. Le courant de sortie du ThyPTM est également conforme à nos attentes, ce qui semble indiquer qu'un simple ajustement des paramètres du FIDS est nécessaire. Je n'ai cependant pas été capable de tirer pleinement parti du test effectué sur le KFA45, et je compte corriger cela avec un nouveau test dans les jours qui suivent la rédaction de ce paragraphe. Je teste également en ce moment même, les performances et la fiabilité du ThyPTM à l'aide de tests de cyclage en laboratoire. J'estime donc l'objectif de test comme atteint pour le prototype actuel.

Enfin, j'ai pu trouver une solution d'intégration mécanique pour le ThyPTU en format 3U. Cette solution est considérée par mes supérieurs comme optimale en tenant compte des différentes contraintes, mais également trop compliquée. Cela nous a amené à considérer très récemment une solution en format 6U bien plus élégante, mais un peu plus limitée en termes de fonctionnalités. L'objectif d'intégration n'est donc pas atteint à ce jour, puisqu'une telle modification est fondamentale et nécessitera d'adapter les cartes électroniques existantes au format 6U.

De façon globale, les objectifs ne sont pas tous atteints, mais je dispose encore de deux mois pour faire progresser le projet autant que possible.

Plus généralement, j'ai trouvé le sujet du stage difficile à comprendre au début, mais passionnant et enrichissant par la suite. Je considère cette progression comme normale. En effet un certain

temps est nécessaire pour commencer à appréhender les concepts liés aux accélérateurs et aux kickers et pour pouvoir situer le ThyPTU dans tout cela.

L'organisation générale du CERN n'est pas non-plus triviale à appréhender. En effet, la taille de l'Organisation nécessite une excellente coordination des différentes ressources. Cela a pour conséquence qu'une opération qui serait simple et triviale dans une petite entreprise nécessite souvent une procédure spécifique au CERN. L'efficacité globale se trouve au final améliorée, à condition d'être familier avec tous les outils et les procédures existants.

Au niveau humain, j'ai pu observer que le CERN est un environnement exceptionnel pour les personnes qui aiment la technique, quel que soit leur niveau d'études. J'ai particulièrement apprécié le fait de pouvoir travailler avec des experts possédant non seulement des connaissances scientifiques et techniques exceptionnelles, mais aussi une envie de partager leur passion et leur savoir-faire.

Je retire principalement de ce stage une expérience supplémentaire et des connaissances accrues en électronique de puissance, une amélioration de ma capacité d'adaptation, et enfin la satisfaction d'avoir pu contribuer à un projet au sein d'une Organisation aussi exceptionnelle.

Pour conclure, les différents domaines de compétences concernés par le ThyPTU (électronique de puissance, simulation et conception de PCB) font de ce stage une parfaite continuité avec ma formation initiale d'ingénieur en électronique, avec ma spécialisation en PTP Energie, et également avec mon implication dans l'association TIM. Ce stage m'a conforté dans mon envie de travailler dans l'industrie ou dans la recherche sur des projets ayant un intérêt réel, au-delà des considérations financières.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1]  
CERN, « Science | CERN ». [Online]. Disponible sur: <https://home.cern/science>. [Consulté le: 05-juin-2019]
- [2]  
B. Choudhary, S. S. Chauhan, et CERN, « Layout of the LHC ring within the CERN accelerator complex », ResearchGate. [Online]. Disponible sur: [https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-the-LHC-ring-within-the-CERN-accelerator-complex\\_fig9\\_48410310](https://www.researchgate.net/figure/Layout-of-the-LHC-ring-within-the-CERN-accelerator-complex_fig9_48410310). [Consulté le: 30-avr-2019]
- [3]  
M. J. Barnes, « Kicker Systems - Part 1 - Introduction and Hardware », p. 63.
- [4]  
E2V Technologies, « Hydrogen Thyratrons Preamble », p. 23, mars 2002.
- [5]  
E2V Technologies Limited, « CX1171 », 10-avr-2002. [Online]. Disponible sur: <https://www.teledyne-e2v.com/shared/content/resources/File/documents/thyratrons/cx1171.pdf>. [Consulté le: 15-mars-2019]
- [6]  
M. J. Barnes et G. D. Wait, « A mathematical model of a three-gap thyatron, simulating turn-on », in Ninth IEEE International Pulsed Power Conference, Albuquerque, NM, USA, 1993, p. 293 [Online]. Disponible sur: <http://ieeexplore.ieee.org/document/513335/>. [Consulté le: 15-mars-2019]
- [7]  
XP Power, « High Voltage Power: MK Series », XP Power. [Online]. Disponible sur: <https://www.xppower.com/Product?slug=MK-Series>. [Consulté le: 05-juin-2019]
- [8]  
Advanced Energy, « High-Power C Series | Standard-Size Power Supplies ». [Online]. Disponible sur: <https://www.advancedenergy.com/products/high-voltage-power-supplies/standard-size-dc-to-high-voltage-modules/high-power-c-series/>. [Consulté le: 15-mars-2019]
- [9]  
ISEG Germany, « EPS - Versatile Built-in or System Capable HV Power-Module ». [Online]. Disponible sur: <https://iseg-hv.com/en/products/detail/EPS>. [Consulté le: 05-juin-2019]
- [10]  
Advanced Energy, « C Series | Standard-Size Power Supplies ». [Online]. Disponible sur: <https://www.advancedenergy.com/>. [Consulté le: 05-juin-2019]



## LISTE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 : Complexe d'accélérateurs du CERN .....	13
Figure 2 : Schéma d'injection du faisceau .....	14
Figure 3 : Ligne de puissance typique d'un kicker au CERN .....	15
Figure 4 : Schéma de principe du ThyPTM et des principaux signaux .....	20
Figure 5 : Modèle PSpice de l'alimentation à haute tension .....	21
Figure 6 : Modèle PSpice du driver d'IGBT .....	21
Figure 7 : Modèle de l'étage de puissance du ThyPTU .....	22
Figure 8 : Courbe de Paschen .....	23
Figure 9 : Agencement du thyatron de type CX1171.....	23
Figure 10 : Modèle de drift-space.....	25
Figure 11 : Modèle de gap.....	25
Figure 12 : Modèle complet du thyatron CX1171 .....	26
Figure 13 : Modèle simplifié de la ligne de puissance du kicker KFA45.....	27
Figure 14 : Modèle du circuit de polarisation.....	29
Figure 15 : Performances simulées du driver d'IGBT .....	31
Figure 16 : Performances mesurées du driver d'IGBT (test unitaire).....	31
Figure 17 : Performances simulées de l'étage de puissance (test unitaire).....	32
Figure 18 : Performances mesurées de l'étage de puissance (test unitaire).....	32
Figure 19 : Environnement de simulation du thyatron (test unitaire).....	33
Figure 20 : Comportement simulé du thyatron (test unitaire).....	34
Figure 21 : Comportement simulé du thyatron (modèle complet) .....	35
Figure 22 : Courant de grille G1.....	35
Figure 23 : Tension et courant simulés en sortie du ThyPTU (modèle initial) .....	36
Figure 24 : Délai et temps de montée pour l'alimentation ISEG.....	42
Figure 25 : Délai et temps de montée pour l'alimentation Ultravolt.....	43
Figure 26 : Laboratoire 865/2-B04 .....	46
Figure 27 : Montage d'essai pour les tests de cyclage .....	46
Figure 28 : Observation du jitter.....	47
Figure 29 : Image thermique de l'étage de mesure du courant de sortie.....	48
Figure 30 : Montage d'essai pour les tests sur le KFA45.....	49
Figure 31 : Comparaison de la tension et du courant de sortie du ThyPTM entre la simulation et la réalité (modèle initial) .....	50
Figure 32 : Signaux de pick-up du KFA45 lors du test avec le ThyPTM.....	51
Figure 33 : Comparaison de la tension et du courant de sortie du ThyPTM entre la simulation et la réalité (modèle ajusté) .....	52
Figure 34 : Intégration partielle du ThyPTU en taille 3U.....	54
Figure 35 : Proposition finale d'intégration en taille 3U.....	55
Figure 36 : Exemple de solution standard en taille 6U pour l'intégration des PTM.....	56



## TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : Plaquette de présentation du CERN

Annexe 2 : Agrandissement du modèle de thyatron à trois gaps

Annexe 3 : Schématique du circuit de polarisation