

Le synchrotron à protons de 25 GeV de l'Organisation européenne pour la Recherche nucléaire est maintenant entré en service. Vers la fin de novembre 1959, des protons y ont été accélérés jusqu'à une énergie cinétique de 24 GeV. Quelques semaines plus tard, à la suite de modifications apportées à la forme du champ magnétique au moyen d'enroulements polaires, l'énergie maximum est passée à 28 GeV pour les valeurs de champ dépassant 12 Kgauss. Les mesures ont révélé que l'intensité du faisceau de protons accélérés s'élevait à 10^{10} protons par impulsion et qu'il n'y avait pratiquement pas de perte de particules pendant la période d'accélération jusqu'à l'énergie maximum. Ainsi, le synchrotron à protons du CERN a donné les résultats qu'en attendaient ses constructeurs, et justifie les espoirs des douze pays européens qui ont participé à cette réalisation pendant les six dernières années. Le moment semble donc opportun pour faire la genèse de cette entreprise et pour exposer brièvement certains des problèmes afférents à la construction de cet accélérateur, ainsi que quelques-unes des mesures préliminaires de ses caractéristiques de fonctionnement.

En juin 1952 le Conseil intérimaire du CERN décida, lors d'une conférence tenue à Copenhague, de mettre à l'étude un projet de synchrotron à protons de 10 GeV destiné à être le principal accélérateur de haute énergie pour la recherche nucléaire en Europe. Comparé aux autres dépenses effectuées dans le domaine de la recherche en physique, le coût d'une telle machine était considéré comme tellement élevé qu'aucun des pays d'Europe ne se croyait justifié d'en assumer seul le financement. Aussi plusieurs pays avaient-ils mis en commun leurs ressources pour donner aux physiciens, en Europe, le plus puissant accélérateur dont la construction paraissait possible à l'époque. Un groupe d'études de trois spécialistes fut créé dès juillet 1952 sous la direction de M. O. Dahl. Or, au cours d'une visite effectuée à Brookhaven (Long Island) au mois d'août de la même année pour y examiner le Cosmotron, ce groupe apprit la découverte d'un nouveau principe dont l'application permettrait de construire à meilleur prix des machines d'énergie plus élevée. Vu l'intérêt de ce principe, le Conseil du CERN fut convaincu au mois d'octobre 1952 qu'il convenait d'en entreprendre l'examen théorique et d'abandonner l'étude du synchrotron à protons de 10 GeV. Il semblait en effet possible de construire une machine de 30 GeV pour le même prix qu'un accélérateur de 10 GeV du type Cosmotron. Il n'est pas sans intérêt de remarquer qu'à la même époque, à l'insu du monde occidental, des savants russes avaient en projet un modèle d'accélérateur de 10 GeV du même type que le Bévatron de Berkeley,

Le Synchrotron

mais plus grand et plus puissant.

En décembre 1952 fut constitué le groupe du SP pour renforcer l'équipe initiale de trois physiciens : la plupart des membres de ce groupe participèrent d'abord à ses activités à titre bénévole et pendant une partie de leur temps, tout en restant dans leurs propres laboratoires et instituts de recherche. Les membres de la Section théorique travaillaient à Harwell et à l'Institut de physique théorique de Copenhague. Les travaux relatifs à l'aimant étaient centralisés au laboratoire de radioélectricité de l'Université de Paris. Les problèmes concernant la haute fréquence étaient étudiés à l'Institut Max Planck à Heidelberg. Les problèmes de protection contre les radiations à des énergies aussi élevées étaient examinés à l'aide des renseignements fournis par les rayons cosmiques à l'Institut de physique de l'Université de Fribourg-en-Brisgau, en Allemagne. Enfin, les problèmes généraux de construction continuaient d'être centralisés à l'Institut Chr. Michelsen de Bergen, en Norvège, où les travaux relatifs au projet d'ensemble de la nouvelle machine bénéficièrent du concours inestimable de deux membres du personnel supérieur du Cosmotron, J. P. Blewett et M. H. Blewett, venus y passer six mois.

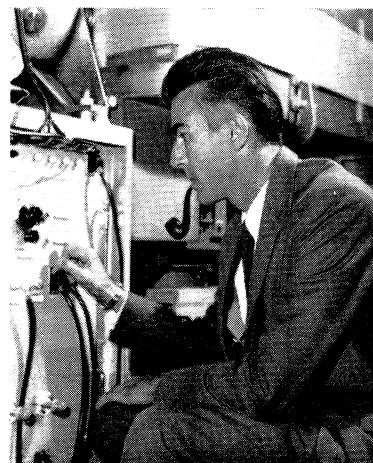
Dès octobre 1953, les incidences du nouveau principe étaient suffisamment connues pour permettre la présentation d'un avant-projet d'accélérateur au Conseil du CERN. Entretemps, les mêmes problèmes avaient été étudiés par le groupe de Brookhaven et un groupe de l'Institut de Technologie du Massachusetts à Boston, Etats-Unis. A la fin d'octobre, une conférence se tint à l'Institut de Physique de l'Université de Genève, à laquelle furent invités des représentants des groupes américains, les savants membres du Conseil du CERN et d'autres savants européens. Le Groupe du SP du CERN fit une série d'exposés relatifs à ses activités au cours des dix mois précédents et présenta un projet de synchrotron à protons de 30 GeV basé sur le nouveau principe de focalisation à gradient alterné. Il s'avéra que le groupe de Brookhaven avait abouti de son côté à un projet de conception très voisine.

Immédiatement après cette conférence, le Conseil du CERN fixa l'énergie de la machine à 25 GeV, et fut d'avis que les membres du Groupe du SP devraient s'installer à Genève, ville au voisinage de laquelle on projetait de construire le nouveau laboratoire européen. L'Etat et l'Université de Genève mirent généreusement à la disposition du



O. Dahl et F. Goward, respectivement second et quatrième de gauche à droite sur cette photo, furent les premiers responsables de l'étude du synchrotron à protons du CERN. Ce document les montre en 1952, avec G. Collins et R. Wideroe dans la salle de commande du Cosmotron de Brookhaven.

rotons du CERN



par **J.B. Adams**
Directeur
Division SP

groupe des laboratoires provisoires, ce qui permit à la plupart de ses membres de s'installer à Genève avec leurs familles dès le mois de décembre 1953, et de se mettre au travail pour établir le projet définitif de la machine. Peu après, M. O. Dahl résilia ses fonctions de Directeur du groupe; ce dernier fut presque en même temps frappé par la mort subite de M. F. Goward, son Directeur adjoint. Malgré ces contretemps, le groupe s'installa sans difficulté à Genève, dans un cadre nouveau pour la plupart de ses membres et leurs familles. A partir du début de 1954, il fut procédé progressivement au recrutement du personnel dans toute l'Europe. Le tableau ci-dessous indique l'évolution du personnel prenant directement part à l'étude et à la construction de la machine.

Fin d'année	Activités principales	Effectifs
1953	Etudes préliminaires.	20
1954	Etablissement du projet définitif de la machine	75
1955	Etude des éléments principaux	120
1956	Passation des principaux contrats pour les divers éléments	150
1957	Fabrication des éléments par l'industrie	163
1958	Montage des éléments au CERN	176
1959	Essais des éléments et mise en service du SP du CERN	180

* * *

Le principe de focalisation à gradient alterné a fait l'objet de nombreux exposés. L'idée en a été émise pour la première fois dans une publication de E. D. Courant, M. S. Livingston et H. S. Snyder (1), bien qu'à leur insu ce principe ait déjà été découvert par N. Christofilos. Dans un synchrotron de type classique, la focalisation des particules en mouvement est obtenue en assurant une légère décroissance vers l'extérieur du champ magnétique qui guide les particules tournant sur un rayon fixe. La focalisation obtenue de cette manière n'est pas très intense; les particules effectuent par conséquent des oscillations libres ou bétatroniques d'amplitude élevée et l'entrefer de l'aimant doit en conséquence être d'assez grandes dimensions.

L'aimant constitue l'élément principal du prix de revient des

synchrotrons de ce type: par exemple, l'aimant du synchro-phasotron russe de 10 GeV et de 30,5 m de rayon contient 35 000 tonnes d'acier, alors que l'entrefer mesure 150 cm de large et 40 cm de haut. Bien qu'il soit possible d'obtenir une focalisation plus intense dans le plan vertical en augmentant le gradient du champ magnétique, une telle solution n'est pas possible car elle violerait les critères de stabilité radiale. Le grand avantage du principe de focalisation alternée réside dans le fait qu'il permet théoriquement de focaliser des particules en mouvement avec la force désirée et de réduire au minimum l'amplitude de leurs oscillations. On aboutit à un tel résultat en alternant régulièrement le signe du gradient du champ magnétique sur la circonférence de la machine. L'application de ce principe de focalisation forte se solde par une réduction considérable du poids de l'aimant: ainsi, l'aimant du PS de 25 GeV du CERN possède une section utile de 14 cm x 7 cm et n'est constitué que par 3 400 tonnes d'acier. Cet accélérateur a un rayon de 100 m, c'est-à-dire trois fois plus que le rayon de la machine russe, alors que la quantité totale d'acier utilisé est dix fois moindre.

Ces avantages considérables sont obtenus grâce à une précision beaucoup plus grande dans la fabrication et l'alignement de l'aimant du synchrotron. De plus, une fois monté avec la précision voulue, l'aimant doit rester stable, ce qui pour une machine de 200 m de diamètre présente des problèmes intéressants en ce qui concerne les fondations. L'aimant du SP du CERN est composé de 100 unités magnétiques identiques en théorie et mesurant chacune 4,3 m de longueur. Pour un même courant d'excitation, l'écart maximum du champ magnétique au long de ces diverses unités ne doit pas dépasser 1/1000; les tolérances pour le montage des unités ne doivent pas dépasser quelques millièmes (0,3 mm

pour un rayon de 100 m). Les unités reposent sur un anneau rigide de béton, suspendu librement et mesurant 200 m de diamètre, de 2 m x 2 m de section. La machine est construite dans un tunnel circulaire souterrain où la température reste constante entre $\pm 1^{\circ}$ C. A titre de précaution supplémentaire, des tuyaux d'acier sont disposés à l'intérieur de la poutre de béton afin d'y permettre une circulation d'eau destinée à empêcher toute élévation de température locale. Les procédés techniques mis au point pour la construction de l'aimant et de ses fondations ont été exposés dans divers rapports du CERN (2) (3).

Un autre avantage du principe de focalisation à gradient alterné réside dans le fait qu'il rend l'amplitude des oscillations des quantités de mouvement beaucoup plus faible que dans un synchrotron de type classique. Ces oscillations se traduisent par des excursions radiales dans un synchrotron, et ces excursions doivent être maintenues dans les limites de l'entrefer. Le synchrotron à gradient alterné est en conséquence plus économique que le synchrotron classique, en ce qui concerne l'entrefer de l'aimant: il s'agit en l'occurrence d'une économie par un facteur 60 environ dans les dimensions. En revanche, cette amélioration n'est réalisable qu'au prix de difficultés qui paraissent presque insurmontables au moment de l'élaboration du projet du SP.

L'une de ces difficultés réside dans le comportement très particulier de la machine à une énergie que l'on appelle "énergie critique". Lors de l'oscillation des quantités de mouvement dans un synchrotron, les particules dotées d'une quantité de mouvement supérieure à la moyenne se déplacent sur un rayon supérieur au rayon moyen. Le temps de révolution de ces particules est fonction de deux facteurs ayant des effets contraires. Etant donné que leur quantité de mouvement est supérieure à la moyenne, la vitesse de ces particu-

Dans un synchrotron, les particules se déplacent sur une orbite de rayon moyen fixe ; pour les maintenir au centre de la chambre à vide durant tout le cycle d'accélération il est donc nécessaire de synchroniser avec beaucoup de précision la fréquence de la tension accélératrice et la montée du champ magnétique. L'écart de fréquence relatif correspondant à un déplacement de 1 cm du rayon de l'orbite des particules dans le SP est indiqué dans le tableau ci-dessous.

Outre ces problèmes spéciaux posés par le synchrotron à gradient alterné, il a été procédé à une étude approfondie des problèmes théoriques de caractère général que posent les critères de stabilité en régime non linéaire. Le SP est muni de lentilles hexapolaires et octopolaires pour ajuster les termes non linéaires dans le champ magnétique de la machine. Un exposé complet relatif au SP est actuellement en préparation (2) (4) (5).

Les mesures effectuées jusqu'à présent sur le SP présentent évidemment un caractère préliminaire et sont encore incomplètes. Il faudra continuer ces mesures pendant au moins six mois avant de connaître suffisamment le comportement de la machine pour l'utiliser comme instrument de recherche scientifique.

L'intensité du faisceau de protons est remarquablement élevée à ce stade initial de fonctionnement. Les protons sont injectés dans le synchrotron à une énergie de 50 MeV par un accélérateur linéaire construit selon des conceptions très voisines de celles qui ont été mises au point au laboratoire Lawrence de Berkeley. L'accélérateur linéaire du CERN présente toutefois cette originalité que ses tubes de glissement sont munis de lentilles quadripolaires de focalisation à gradient alterné, au lieu du système de focalisation à grilles utilisé initialement dans la machine américaine.

L'accélérateur linéaire du SP a produit une intensité maximum de 5 mA, mais pour les essais effectués jusqu'à présent avec le synchrotron, on a utilisé un faisceau de protons aligné de 1 mA. Un groupeur et un dégroupéur ont été construits pour cet accélérateur linéaire, mais ni l'un ni l'autre n'a encore été utilisé jusqu'à présent. Pour un faisceau de 1 mA injecté dans le synchrotron et une injection sur un seul tour, on a mesuré un rendement de particules de 20 à 25 %, ce qui correspond à un faisceau de protons en circulation

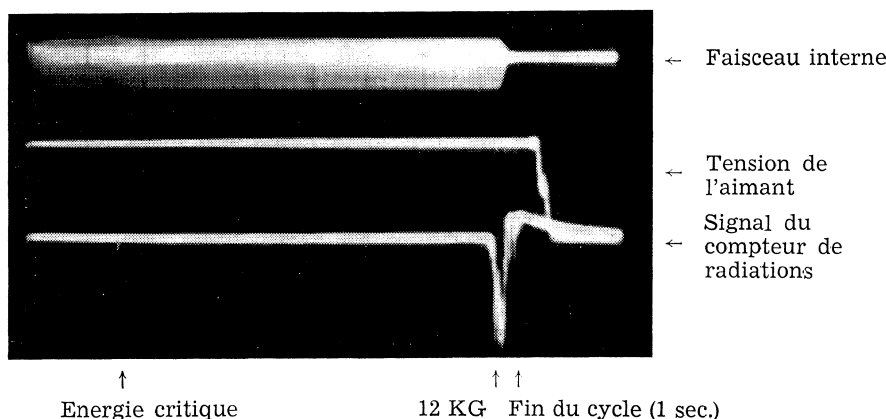


Fig. 1 : Faisceau accéléré jusqu'à environ 24 GeV sans perte

la lumière, l'effet de vitesse décroît en raison de la relativité. En conséquence, à un certain moment du cycle d'accélération du SP, les particules atteignent un point où l'effet radial est égal à l'effet de vitesse. L'énergie atteinte à ce moment s'appelle "énergie critique". C'est à cette énergie que la fréquence des oscillations synchrotroniques devient nulle, que les particules perdent leur stabilité de phase et qu'il est nécessaire de changer rapidement la phase de la tension accélératrice, afin de capturer à nouveau au-delà de l'énergie critique toutes les particules qui ont été accélérées jusqu'à cette énergie.

Il est possible de construire une machine à gradient alterné dans laquelle l'énergie critique se situe au delà de l'énergie maximum de la machine, mais ce résultat ne peut être

Energie cinétique des protons	$\Delta t/t$ pour un déplacement radial de 1 cm
50 MeV (injection)	$3,5 \cdot 10^{-3}$
1 GeV	$8,3 \cdot 10^{-4}$
2 GeV	$2,7 \cdot 10^{-4}$
3 GeV	$1,2 \cdot 10^{-4}$
4 GeV	$4,5 \cdot 10^{-5}$
5 GeV ("critique")	0
10 GeV	$7 \cdot 10^{-5}$
25 GeV	$7,5 \cdot 10^{-5}$

On peut ainsi constater que l'énergie critique a également l'effet regrettable d'imposer des tolérances impossibles à la fréquence de la tension accélératrice au voisinage de cette énergie. Dans le SP, ce problème a été résolu de la manière suivante. De l'énergie d'injection de 50 MeV jusqu'à environ 1 GeV, la fréquence de la tension accélératrice est déterminée automatiquement à partir du champ magnétique par un calculateur analogique ayant

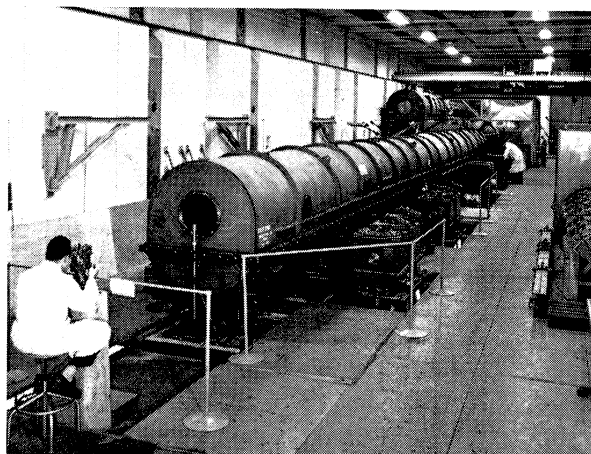
de 10^{10} par impulsion. A 25 GeV, le taux de répétition des impulsions est de 20 par minute.

L'énergie des protons dans le synchrotron a jusqu'à présent été calculée d'après le champ magnétique au moment de la disparition du faisceau et d'après le rayon de la machine. Les premiers essais de fonctionnement ont été effectués sans utiliser les dispositifs de correction, à l'exception des enroulements polaires auto-excités nécessaires à la correction des courants de Foucault dans la chambre à vide en métal à l'injection, lorsque le champ magnétique du guidage ne s'élève qu'à 140 gauss. Le faisceau de protons disparaissait lorsque le champ magnétique atteignait environ 12 Kgauss, car le nombre des oscillations bêta-troniques des particules par tour approchait d'un nombre entier. La saturation de la culasse de l'aimant a pour effet de diminuer légèrement les forces focalisatrices ; au lieu de se trouver dans une région stable entre des bandes de résonance instables, le point de fonctionnement est graduellement poussé vers une résonance et les particules se perdent dans les parois de la chambre à vide. Au cours d'essais plus récents, les enroulements polaires ont été excités par des générateurs programmés destinés à maintenir les forces de focalisation constantes jusqu'à des champs magnétiques dépassant 14 000 gauss, et on a observé que la totalité du faisceau de protons atteignait alors une énergie légèrement supérieure à 28 GeV, énergie qui n'était limitée que par la valeur maximum du champ magnétique disponible dans le SP.

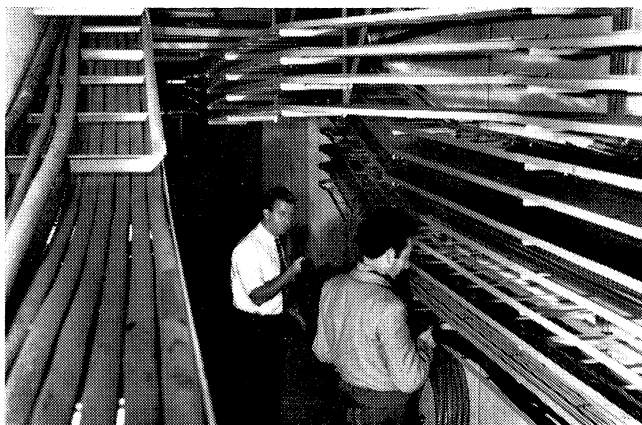
On a essayé de mesurer le nombre des oscillations bêta-troniques par tour dans les directions verticales et radiales (Q_v et Q_R) pendant le cycle d'accélération. A l'injection, sans exciter le déflecteur pulsé et en injectant une impulsion de protons de 2 μ s, le faisceau décrit une trajectoire spirale pendant un peu plus de 100 microseconde, trajectoire qui se rapproche du centre de l'orbite en raison de la montée du champ magnétique : les valeurs de Q peuvent être observées dans les deux directions au moyen d'électrodes de détection sensibles aux oscillations dans l'une ou l'autre des directions. Pour ces mesures, le faisceau est injecté de manière à donner lieu soit à des oscillations verticales, soit à des oscillations radiales. Pendant le cycle d'accélération, les valeurs de Q ont été mesurées en faisant varier le degré d'excitation des lentilles quadripolaires de correction à différents stades du cycle, et en notant le moment où le faisceau est perdu. Les valeurs nominales de Q sont environ 6,25 dans les deux directions et, lorsqu'à un moment donné les lentilles quadripolaires sont excitées à un degré qui fait passer la valeur de Q_R à 6,0 par exemple, le

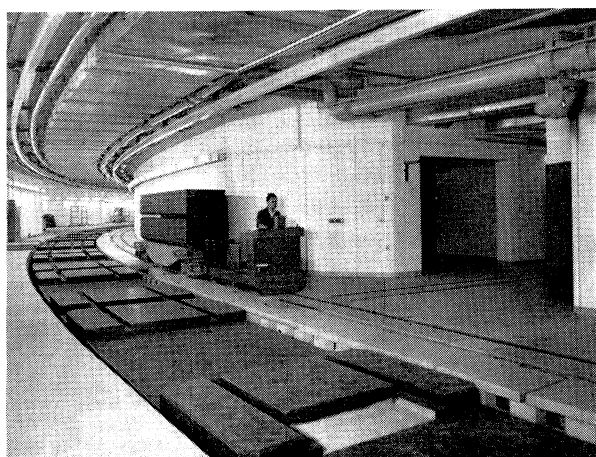
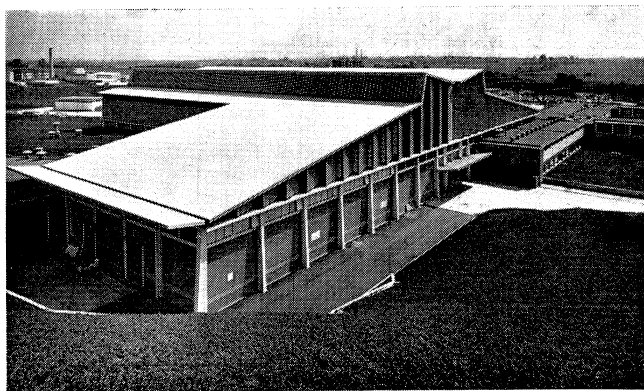


La photo ci-dessus, prise pendant la construction du SP, montre le tunnel annulaire et l'axe de l'accélérateur linéaire (à gauche), avant que la structure en béton ne soit recouverte de terres. A droite, l'alignement des trois sections de l'accélérateur linéaire de 50 MeV. La sortie des particules se trouve à l'avant-plan.

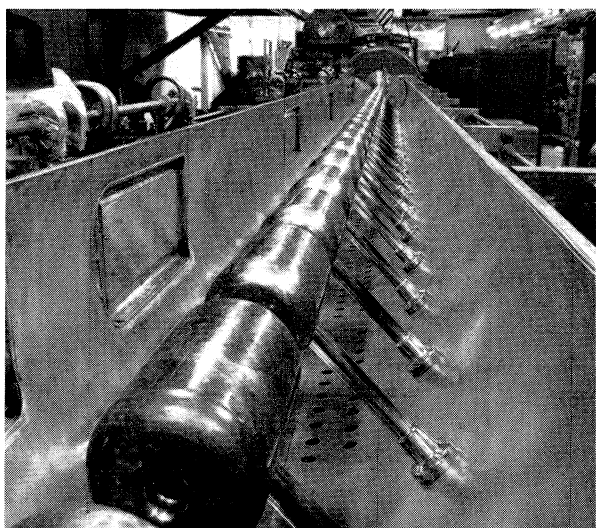


Les blocs d'aimant destinés au SP furent emmagasinés dans la salle d'expérience sud avant leur assemblage en unités de 10 blocs chacune. Ci-dessous, une vue du réseau souterrain de câbles du SP, totalisant quelque 3 600 km.

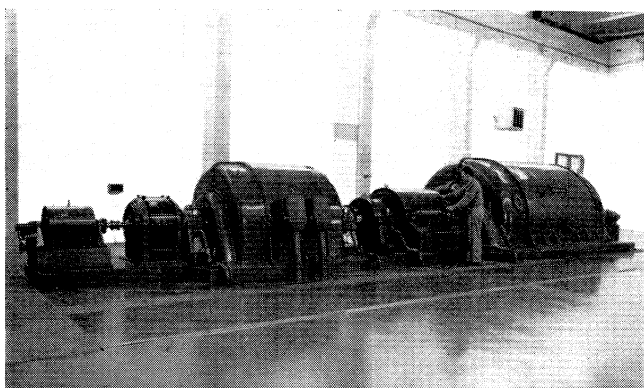




La salle d'expérience sud (ci-dessus) est la plus grande des deux qui recevront l'appareillage expérimental du SP. Sa superficie est de 3 200 m². A gauche, une phase du transport d'une unité d'aimant dans le tunnel annulaire. L'unité repose sur deux bogies pivotants, tirés par une locomotive à accumulateurs. La poutre en béton à l'avant-plan, supporte à présent les éléments de l'accélérateur ; elle est indépendante du reste du bâtiment.



Vue de l'accélérateur linéaire de 50 MeV montrant les tubes de glissement montés dans l'une des trois cavités, avant placement de son couvercle (à gauche). Un alternateur entraîné à 3 000 tours/minute par un moteur à induction, fournit à l'aimant une puissance de pointe de 34 600 kW. Un volant de 8,6 t. (devant l'opérateur) est utilisé pour emmagasiner l'énergie récupérée lors de la désexcitation de l'aimant (ci-dessous).



faisceau se perd en raison de l'instabilité à la résonance radiale principale. De même une excitation identique des lentilles d'un même degré dans la direction opposée, conduit à la perte du faisceau en raison de l'instabilité à la résonance radiale du second ordre lorsque $Q_R = 6,5$. A l'exception du changement qui se produit lors de la saturation de l'aimant, il semble que les valeurs de Q ne diffèrent pas sensiblement de $Q_V = 6,3$ et $Q_R = 6,2$ pendant la plus grande partie du cycle d'accélération.

Jusqu'à présent, aucune résonance d'ordre supérieur due à une instabilité non linéaire n'a été observée, bien qu'il soit trop tôt pour déterminer si cela tient à la linéarité de la machine ou si, au contraire, les mesures ont manqué de précision.

Il a été procédé à la mesure du déplacement de l'orbite fermée en 20 points de la circonférence de la machine, ce qui permet de calculer l'amplitude et la forme de l'orbite fermée. L'orbite fermée est l'orbite autour de laquelle toutes les particules effectuent des oscillations bétatroniques. Dans une machine parfaite n'ayant aucun secteur sans champ, cette orbite aurait la forme d'un cercle parfait dans un plan. Dans une machine imparfaite, sa forme et son amplitude sont les résultantes des diverses imperfections. A l'injection, l'amplitude maximum de l'orbite fermée dans la direction radiale est d'environ 4 cm, alors qu'elle se limite à quelques millimètres dans la direction verticale. A un stade plus avancé du cycle, l'amplitude maximum radiale décroît jusqu'à environ 1 cm ; l'amplitude verticale demeure négligeable. Etant donnée que les dimensions de la chambre à vide sont de 14 cm dans la direction radiale et 7 cm dans la direction verticale, il n'y a donc aucun danger de perte de faisceau en raison du mauvais alignement des aimants.

L'énergie critique qui paraissait être un obstacle presque infranchissable lors de l'établissement des projets, n'a pas en fait posé de problèmes difficiles lors du fonctionnement. On a constaté que pour éviter une perte sensible de particules à l'énergie critique il fallait changer la phase avec une précision d'environ ± 3 ms, soit ± 36 gauss.

Le calculateur et le dispositif d'asservissement du faisceau, destinés à déterminer la fréquence de la tension accélératrice, se sont avérés très satisfaisants après un légère mise au point. Pendant les essais de fonctionnement effectués jusqu'à présent sur la machine, le dispositif d'asservissement du faisceau a été mis en œuvre environ 1 ms après l'injection et ce changement n'a entraîné aucune perte sensible de particules. Pendant les premières études d'accélération, le dispositif d'asservissement radial agissait sur l'amplitude de la tension accélératrice, ce qui constitue en principe un moyen aussi efficace de

contrôler la position radiale du faisceau que la méthode consistant à changer la phase ou la fréquence de la tension accélératrice. Ce dispositif n'a pas donné satisfaction, en raison peut-être d'instabilités dans la boucle d'accrochage de phase : aussi le système a-t-il été modifié de manière que le système d'asservissement radial agisse sur la phase de la tension accélératrice. Cette seconde méthode s'est révélée entièrement satisfaisante et il n'y a eu aucune perte de particules au cours de l'accélération. Des mesures préliminaires ont indiqué que le faisceau ne déviait pas de plus de 1 cm du centre de la chambre à vide au cours du cycle d'accélération. Le système d'asservissement du faisceau ne peut fonctionner que si les protons sont bien groupés. Au-dessous d'une certaine intensité du faisceau en circulation, le système n'est plus à même de fonctionner en raison des bruits de fond dans les boucles d'asservissement. D'après les premières mesures, il semble que le système puisse fonctionner avec une intensité de 10^8 protons par impulsion.

L'intensité moyenne constitue l'un des paramètres importants d'un accélérateur. Il ressort de la Fig. 2 qu'à une énergie de 6 GeV, l'intensité moyenne du faisceau dans le SP est presque aussi élevée que celle du Bévatron et qu'elle dépasse beaucoup celle de l'accélérateur russe à 10 GeV.

La mise en service du groupeur et du dégroupier de l'accélérateur linéaire devrait permettre, par l'injection d'un plus grand nombre de protons dans le synchrotron, d'augmenter par un facteur de 10 environ l'intensité du faisceau circulant dans le SP. A 25 GeV, la production de particules secondaires est beaucoup plus élevée que dans la région de 6 à 10 GeV, et les mesures préliminaires de production de particules secondaires dans le SP laissent supposer que cette machine fera concurrence aux accélérateurs de haute intensité mais de plus faible énergie qui sont à présent en construction, pour obtenir de fortes intensités de particules secondaires.

* * *

Une confrontation avec les autres synchrotrons à protons fait nettement ressortir toute l'importance de cet accélérateur. Le SP accélère des protons à une énergie presque trois fois supérieure à celle du plus grand accélérateur actuellement en service, à savoir le synchro-phasotron russe de Dubna. Ainsi l'Europe disposera pendant un certain temps du plus grand accélérateur du monde. En 1960, une autre machine d'énergie un peu plus élevée (30 GeV) doit entrer en service à Brookhaven, aux Etats-Unis, et vers 1962 les Russes prévoient la mise en route d'une machine deux fois plus grande que le SP (50 GeV). Posséder l'accélérateur le plus puissant du monde ne constitue jamais qu'un phénomène éphé-

Accélérateurs	Energie max. (GeV)	Int. moyenne (particules par sec.)	Date d'achèvement
Synchrotron à protons de Brookhaven (COSMOTRON)	3	2.10^{10}	1952
Synchrotron à protons de Saclay (SATURNE)	3	10^{10}	1958
Synchrotron à protons de Princeton-Pennsylvanie	3	2.10^{12*}	1960
Synchrotron à protons de Berkeley (BEVATRON)	6	2.10^{10}	1954
Synchrotron à protons du Laboratoire Rutherford (NIMROD)	7	10^{12*}	1961/62
Synchrotron à protons russe à gradient alterné	7	$\approx 2.10^{9*}$	1960
Synchrotron à protons russe (Synchrophasotron)	10	$\approx 10^9$	1957
Synchrotron à protons australien	10	10^{12*}	1962/63
Synchrotron à protons à gradient zero du Laboratoire d'Argonne	12.5	2.10^{12*}	1962
Synchrotron à protons du CERN	$\left\{ \begin{array}{l} 28 \\ 25 \\ 6-10 \end{array} \right.$	$\left\{ \begin{array}{l} 2.10^9 \\ 3.10^9 \\ 10^{10} \end{array} \right.$	$\left. \vphantom{\left\{ \begin{array}{l} 28 \\ 25 \\ 6-10 \end{array} \right.}} \right\}$ 1959
Synchrotron à protons de Brookhaven (AGS)	30	$\approx 3.10^{9*}$	1960
Synchrotron à protons russe à gradient alterné	50	$\approx 10^{9*}$	1961/62

Fig. 2 : Accélérateurs de protons.

(*) = performance escomptée.

mère, mais l'importance de l'événement actuel réside dans le fait que, pour la première fois depuis vingt ans, l'Europe peut s'enorgueillir d'une telle possession. De très gros efforts ont été déployés en Europe depuis la guerre pour doter de l'équipement nécessaire les laboratoires de recherche dans le domaine de la physique des hautes énergies. Le tableau ci-dessous témoigne de l'intensité de l'effort financier accompli :

	Energie maximum	Coût en millions de F. suisses
Synchrotron à protons du CERN	28 GeV	120
Synchrotron à protons du Laboratoire Rutherford	7 GeV	84
Synchrotron à protons de Saclay	3 GeV	53
Synchrotron à électrons de Hambourg	6 GeV	60

Le montant des frais impliqués par l'exploitation des laboratoires et par la construction de l'appareillage expérimental complétant les accélérateurs est du même ordre de grandeur. D'ailleurs, du fait que de nouveaux appareils d'expérimentation deviennent nécessaires au fur et à mesure de la réalisation des expériences, ces frais restent sensiblement constants. Ainsi, le budget annuel du CERN, qui dispose d'un synchro-cyclotron de 600 MeV en plus du SP, s'élève à environ 60 millions de Fr. suisses par an.

Les réalisations dans ce domaine de la recherche fondamentale en Europe résultent de l'initiative des physiciens responsables des projets de laboratoires, et de l'appui apporté par les gouvernements en fournissant les fonds nécessaires.

RÉFÉRENCES

- (1) *Physical Review*, Vol. 88(5), pp 1190-1196, 1952. "The Strong-Focusing Synchrotron, a New High Energy Accelerator". E. D. Courant, M. S. Livingstone, H. S. Snyder.
- (2) CERN 58-6a. "Le Synchrotron à protons du CERN 1e partie, Chap. I : Théorie élémentaire du synchrotron à gradient alterné. Chap. II : Le projet du SPC et choix des paramètres. Chap. III : L'électro-aimant. Chap. IV : Le dispositif radio-électrique d'accélération." E. Regenstreif.
- (3) CERN 56-21 : "The design of the Foundations for the Magnet of the CERN Alternating Gradient Proton Synchrotron". J. B. Adams.
- (4) CERN 59-26 : "Le Synchrotron à protons du CERN, 2e partie, Chap. V : L'injection des particules." E. Regenstreif.
- (5) CERN... : "Le Synchrotron à protons du CERN, 3e part.". E. Regenstreif. (à paraître)