

**J. B. ADAMS**

*Directeur de la division  
du synchrotron à protons du CERN*

# **LA CONSTRUCTION DES ACCÉLÉRATEURS**

Extrait de la revue « INDUSTRIES ATOMIQUES » n° 4/1957

Éditions KISTER, 33, quai Wilson

GENÈVE

J. B. ADAMS

Directeur de la division  
du synchrotron à protons au CERN

## LA CONSTRUCTION DES ACCÉLÉRATEURS

Introduction à la  
première semaine du symposium du CERN



*J. B. Adams a travaillé avec le groupe britannique de recherches sur le radar de 1940 à 1945. Il a participé au développement des composantes à haute fréquence des ondes de radar, particulièrement des systèmes de guidage d'ondes dans les bandes des 10 et 3 cm. A la fin de cette période, il contribua à l'étude d'un système de communication à impulsions par ondes centimétriques.*

*Il entra, en 1946, au Centre de recherches atomiques de Harwell et travailla au projet et à la construction du synchro-cyclotron d'Harwell, le premier accélérateur de protons à haute énergie construit après la guerre. Cette machine, qui accélère les protons à 180 MeV, a fonctionné sans interruption depuis 1949.*

*De 1950 à 1952, il a développé à Harwell les klystrons de haute fréquence avec un débit pulsé de 20 MW, qui sont utilisés pour les accélérateurs linéaires.*

*En 1953, il a quitté Harwell, envoyé en mission par Sir John Cockcroft, pour participer à l'étude du synchrotron à protons du CERN, actuellement en construction à Meyrin, près de Genève. Il a été nommé, en 1954, directeur de la division du synchrotron à protons au CERN.*

Du 11 au 16 juin 1956, Genève a été le lieu de rencontre de plus de deux cents physiciens et ingénieurs, venus de presque tous les centres du monde spécialisés dans la physique nucléaire des hautes énergies pour y présenter les résultats de leurs travaux et examiner les problèmes relatifs aux accélérateurs de particules de haute énergie. Ils se sont réunis dans le cadre d'une confé-

rence de deux semaines organisée par le CERN (Organisation européenne pour la Recherche nucléaire) à l'Institut de Physique de l'Université de Genève sous le nom de « Symposium du CERN sur les accélérateurs de haute énergie et la physique des mésons  $\pi$  ».

Environ quatre-vingts mémoires traitant de tous les aspects du problème des accélérateurs ont été reçus, et cinquante-six de ces mémoires ont fait l'objet de communications au cours des onze séances consacrées à ces questions. Les comptes rendus du symposium réunissent tous les mémoires soumis ainsi que des notes prises pendant les discussions qui ont complété ces séances. Grâce à des tirages préliminaires, il a été possible de distribuer les mémoires aux participants avant l'ouverture de la conférence et d'étayer ainsi les discussions sur des documents plus complets que n'auraient pu présenter les auteurs dans le temps limité dont chacun d'eux disposait au cours des séances.

Le présent article a pour but de donner un aperçu général rétrospectif des communications faites au cours de la première semaine de la conférence et des discussions auxquelles elles donnèrent lieu.

Les deux séances du jour d'ouverture de la conférence, le lundi 11 juin, furent consacrées aux projets de nouveaux accélérateurs susceptibles de fournir des énergies beaucoup plus élevées que les appareils actuels

ou des intensités beaucoup plus fortes à énergie égale. L'évolution des accélérateurs rappelle quelque peu celle des grands monstres préhistoriques, en ce sens que leur taille va en croissant jusqu'au moment où se révèle une solution plus efficace pour obtenir le même résultat. Ce processus de sélection naturelle est en général conditionné par des considérations d'ordre financier. C'est ainsi que les accélérateurs du type synchro-cyclotron ont été utilisés jusqu'au moment où le prix de l'électro-aimant circulaire devint inabordable (appareils de 600 à 700 MeV). Afin d'atteindre des énergies toujours plus élevées il a ensuite été fait appel à des accélérateurs du type synchrotron à protons dont l'électro-aimant annulaire revenait meilleur marché. L'électro-aimant annulaire s'étant lui-même révélé trop cher pour atteindre la gamme d'énergie supérieure à 10 GeV, il s'est avéré nécessaire d'élaborer une variante du synchrotron à protons, c'est-à-dire le synchrotron à protons à gradient alterné, équipé d'un électro-aimant annulaire dont la section droite est beaucoup plus petite. Il peut fort bien être envisagé de construire des machines de ce genre susceptibles d'accélérer des particules jusqu'à 100 GeV, à condition de mettre au point des méthodes adéquates de réglage du faisceau et d'alignement des électro-aimants. Deux appareils destinés à fonctionner dans la gamme d'énergie de 20 à 30 GeV sont déjà en construction et plusieurs accélérateurs susceptibles de fonctionner à des énergies encore plus élevées sont à l'étude. Un tel progrès est le résultat de l'évolution normale d'une espèce.

Au cours de la conférence, plusieurs nouvelles espèces ont été présentées. Dans tous les accélérateurs mentionnés ci-dessus il est fait usage de culasses d'électro-aimants en fer, avec lesquelles il n'est pratiquement pas possible d'obtenir des champs magnétiques supérieurs à 10-15 kilogauss en raison de la saturation de la culasse.

Le rayon des accélérateurs de haute énergie utilisant des culasses en fer croîtra linéairement avec l'augmentation d'énergie, même si l'automatisation est extrêmement poussée et si la section de l'électro-aimant est considérablement réduite grâce à une

très forte focalisation. Ainsi le maintien à un niveau stable du coût des électro-aimants n'empêchera pas les prix de construction de devenir rapidement excessifs, surtout pour les accélérateurs à gradient alterné qui exigent des fondations extrêmement soignées. D'autre part, la majorité des physiciens préfèrent effectuer le tour de leurs machines en quelques minutes plutôt qu'en quelques heures. Le groupe de Canberra, en Australie, a été l'un des premiers à se dégager des restrictions imposées aux champs magnétiques par l'emploi des électro-aimants à culasse en fer, en étudiant les possibilités d'emploi de champs magnétiques élevés produits par des bobines sans fer. Toutefois, même si les méthodes révolutionnaires qu'il propose pour la production des courants élevés nécessaires aux électro-aimants s'avèrent satisfaisantes, un accélérateur de 100 GeV n'en exigerait pas moins un rayon de 80 m et la consommation d'énergie serait énorme.

Au cours de cette première séance, deux groupes de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. ont fait état de données qui permettraient d'obtenir des champs magnétiques d'ordres de grandeur plus élevés qu'il n'est possible d'obtenir à l'heure actuelle. Ils proposent de mettre en œuvre un faisceau toroïdal d'électrons à très haute densité de courant qui serait rétréci au moyen de champs magnétiques externes relativement faibles et de neutraliser ce faisceau d'électrons en un plasma par l'introduction de protons. Le rétrécissement que subirait ainsi la section du faisceau toroïdal aurait pour résultat de produire une telle concentration de courant qu'il est prévu d'obtenir des champs magnétiques de l'ordre de  $10^6$  gauss dans le tore. Il serait possible, au moyen de champs aussi élevés, de construire un accélérateur de 3 m de rayon capable de maintenir à l'intérieur de son orbite des protons de 100 GeV qui seraient toujours focalisés par les champs magnétiques. Les réactions que ce projet a suscitées dans l'audience ont suffi à prouver l'intérêt que présenterait une telle machine. Les expériences destinées à confirmer ces travaux théoriques extrêmement poussés, qui ont été décrites au cours de la séance, ne sont encore qu'à un stade

préliminaire. Les problèmes les plus difficiles sont ceux qui touchent à la stabilité du plasma toroïdal (instabilité de cintrage et de torsion) et aux méthodes d'accélération des protons dans le plasma. Bien que personne ne s'attende à ce que la théorie en question soit immédiatement confirmée à tous points de vue, il est évident que l'enthousiasme des théoriciens et l'ampleur des efforts consacrés à l'étude du problème produiront, d'ici un an, des résultats appréciables. Il est également possible que des échanges de vues entre ces chercheurs et les savants qui étudient les questions relatives au plasma dans les réactions thermonucléaires auto-entretenuës soient fort utiles aux uns comme aux autres.

Une autre idée, que les spécialistes des accélérateurs ont maintes fois discutée depuis qu'elle fut avancée en 1943 par Wideröe, a fait l'objet de plusieurs mémoires présentés au cours de cette séance. Si les noyaux de la cible sur laquelle tombent les particules accélérées pouvaient être animés d'un mouvement opposé à celui des particules incidentes, les réactions qui résulteraient de cette collision seraient équivalentes à celles obtenues par le bombardement d'une cible immobile avec des particules d'énergie beaucoup plus haute. Dans un tel cas, la cible mobile serait naturellement constituée par un faisceau de particules accélérées et les deux faisceaux entreraient en collision dans une région d'interaction déterminée. Aucune suite n'avait été donnée à cette idée jusqu'à présent, en raison de la faible probabilité d'une collision frontale des particules accélérées par rapport aux collisions susceptibles de se produire entre les particules de chaque faisceau et des atomes de gaz plus ou moins stationnaires, et également en raison du faible nombre absolu de collisions auquel il est permis de s'attendre. Les groupes américains de MURA (Association de recherche des Universités du centre-ouest des Etats-Unis d'Amérique), de Berkeley et de Princeton proposèrent des systèmes basés sur ce même principe dans lesquels les difficultés seraient surmontées en emmagasinant les impulsions d'un faisceau sortant d'un accélérateur primaire; de cette manière l'intensité des faisceaux conver-

gents serait environ cent fois supérieure à celle des faisceaux d'un synchrotron à protons ordinaire. Le vide dans la région d'interaction serait amélioré afin de minimiser les réactions avec des atomes de gaz. Bien que le nombre des réactions non désirées avec les atomes de gaz soit encore très supérieur à celui des réactions désirées, il a été démontré que le rapport entre ces deux nombres serait suffisant pour procéder aux expériences voulues, à condition que ces expériences soient effectuées perpendiculairement à la direction des faisceaux afin que les réactions non désirées avec les atomes de gaz stationnaires soient de faible énergie et, par conséquent, faciles à masquer. Cependant, à moins que l'intensité (c'est-à-dire la période des impulsions) des accélérateurs primaires ne soit très élevée, « l'intensité » équivalente d'un appareil de ce genre est très inférieure aux intensités normales d'un synchrotron à protons; la machine en question est toutefois la seule susceptible, à l'heure actuelle, de permettre l'étude des réactions dans la gamme des TeV ( $10^{12}$  eV). Un appareil mettant en œuvre deux faisceaux convergents de 25 GeV chacun est à même de produire des réactions équivalentes à celles que produirait un accélérateur de 1,25 TeV dont le faisceau tomberait sur une cible immobile. Pour atteindre une énergie de 1 TeV, même avec un accélérateur à plasma, il faudrait une machine de 25 m de diamètre ou un synchrotron à protons de type classique à culasse en fer qui aurait 4 000 m de rayon et 25 km de circonférence.

Il a aussi été proposé de mettre en œuvre des systèmes utilisant un seul accélérateur primaire et des électro-aimants à champ constant dans lesquels les particules pourraient être emmagasinées jusqu'au moment où elles seraient relâchées pour effectuer des collisions frontales. Ce système présente un gros intérêt pour les spécialistes des accélérateurs, car il permettrait l'adjonction d'anneaux d'emmagasinage à un accélérateur en fonctionnement ou en cours d'élaboration, qui serait ainsi susceptible d'augmenter son énergie une fois qu'il aurait été suffisamment utilisé à l'énergie pour laquelle il avait été originellement conçu. Un autre système proposé par le groupe MURA

comporterait deux accélérateurs à gradients alternés et champs fixes ayant une section droite commune, où les faisceaux se rencontreraient lorsque les appareils atteindraient leur maximum d'énergie.

Il a également été proposé diverses machines d'une énergie inférieure à 10 GeV dont les faisceaux auraient une intensité environ cent fois plus grande que celle des faisceaux du Bévatron et du Cosmotron. L'exploitation de ce domaine d'énergie vient de commencer avec le Bévatron à Berkeley et doit bientôt se poursuivre avec l'accélérateur russe de 10 GeV (synchrophasotron). De puissants arguments ont été avancés, principalement par le groupe de Harwell, en faveur de la construction d'un accélérateur de forte intensité (dont la production essentielle consiste en faisceaux de mésons K et d'antiprotons qui ne peuvent être obtenus avec des machines d'énergie moindre). En effet, l'entrée en service d'un tel accélérateur plusieurs années après le Bévatron et le synchrophasotron ne présenterait d'intérêt qu'à condition d'élargir les possibilités d'expérimentation offertes par ces deux machines et de produire des faisceaux d'une intensité beaucoup plus élevée que celles-ci ne sont capables de fournir. Le groupe de Harwell décrit un projet de synchrotron à protons de 6 GeV dans lequel les pièces polaires sont munies de rainures en spirale disposées de manière à obtenir une focalisation radiale semblable à celle obtenue dans un synchrotron de type classique, mais à donner par contre aux oscillations verticales une focalisation plus forte. Ce système permet l'injection sur plusieurs tours et par conséquent la production d'un courant fortement injecté; l'entrefer vertical de l'électro-aimant est suffisamment petit et l'énergie moyenne emmagasinée est ainsi suffisamment faible pour permettre l'emploi d'un ensemble de condensateurs en résonance avec l'inductance de l'électro-aimant à une fréquence de répétition élevée pour l'alimentation en courant. Les chercheurs de Harwell espèrent obtenir, par ce moyen, une intensité cent fois supérieure à celle du Bévatron et accroître ainsi sans aucun doute le nombre des expériences susceptibles d'être réalisées dans ce domaine d'énergie.

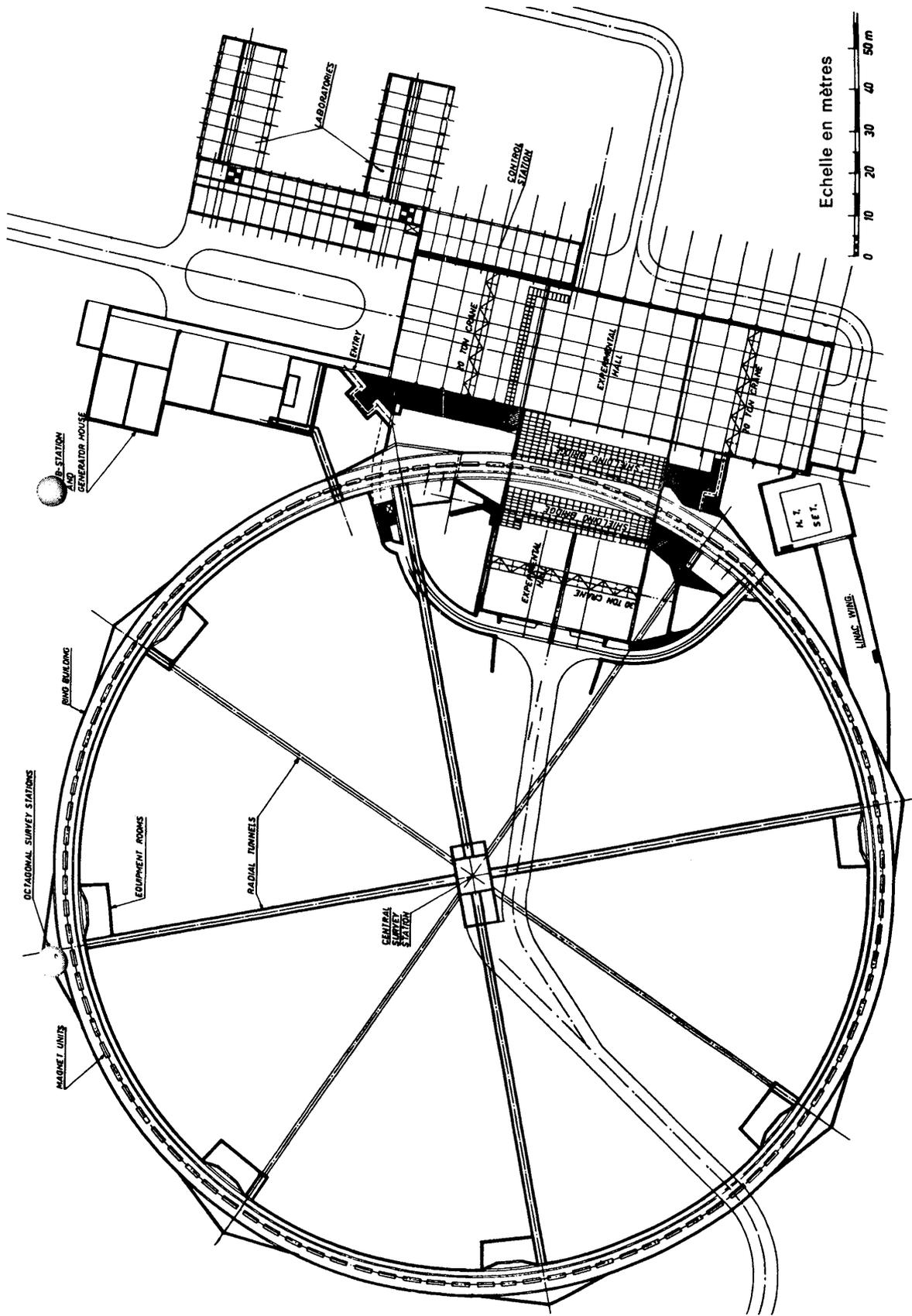
Pendant la séance du samedi matin, le groupe de Princeton a fait état d'un autre projet d'accélérateur d'énergie relativement faible, constitué par un synchrotron à protons de 3 GeV à haute intensité et à gradient constant, utilisant également un ensemble de condensateurs pour emmagasiner l'énergie et doté d'une fréquence d'impulsion élevée.

Il est intéressant de remarquer que c'est la physique des rayons cosmiques qui a jusqu'ici fourni la raison principale de la construction d'accélérateurs d'énergie de plus en plus élevée et que ce sont les expériences effectuées sur les rayons cosmiques qui ont indiqué les types de particules susceptibles d'être produits par les accélérateurs. L'intensité du rayonnement cosmique suffit juste à aiguïser l'appétit des spécialistes en physique expérimentale sans pour autant leur enlever le goût des nourritures plus substantielles que les accélérateurs sont à même de leur offrir. Il est ainsi permis de comparer le rayonnement cosmique à un apéritif et de dire que la première série d'accélérateurs construite était une sorte d'entrée. Les accélérateurs de haute intensité, qui doivent constituer le plat principal, n'ont pas encore fait leur apparition. Il semble pour l'instant que les expériences effectuées sur les rayons cosmiques n'ont pas fourni de résultats poussant à la construction d'accélérateurs d'une énergie supérieure à 50 GeV.

Le groupe MURA exposa les recherches qu'il a effectuées au sujet de machines à gradient alterné et à champ fixe en vue d'obtenir des intensités élevées dans la gamme d'énergie de 20 à 50 GeV, pour laquelle aucun accélérateur de « faible » intensité n'est encore entré en service. Ces recherches comprenaient des travaux sur un modèle à électrons mettant en œuvre une de leurs idées (machine à secteur radial marque I). Les études théoriques et expérimentales ont prouvé que ce type de machine pourrait fort bien s'avérer l'accélérateur de haute intensité de l'avenir.

Après un aussi fascinant début, la conférence s'est ensuite attachée à la discussion de questions de détail concernant la construction des accélérateurs.

La séance du mardi matin fut consacrée au problème de l'énergie de transition ou



Plan d'ensemble du bâtiment du synchrotron à protons du CERN

énergie critique affectant les accélérateurs à gradient alterné qui sont en cours de construction à Brookhaven et au CERN. Le groupe de Brookhaven rend compte des expériences réalisées sur un modèle à électrons de leur machine, selon lesquelles les pertes de particules seraient très faibles au moment où l'énergie de celles-ci passerait par la valeur critique. Il apparut toutefois, lors de la discussion qui suivit cette communication, que les résultats de Brookhaven étaient peut-être de nature à engendrer un trop grand optimisme. Néanmoins le groupe de Brookhaven et celui du CERN ne semblent pas douter qu'en effectuant les modifications voulues aux champs magnétiques, ainsi peut-être qu'à l'amplitude H.F. au moment de la transition, il sera non seulement possible d'éviter la perte de la majeure partie des particules, mais également d'accélérer celles-ci jusqu'à leur énergie maximum.

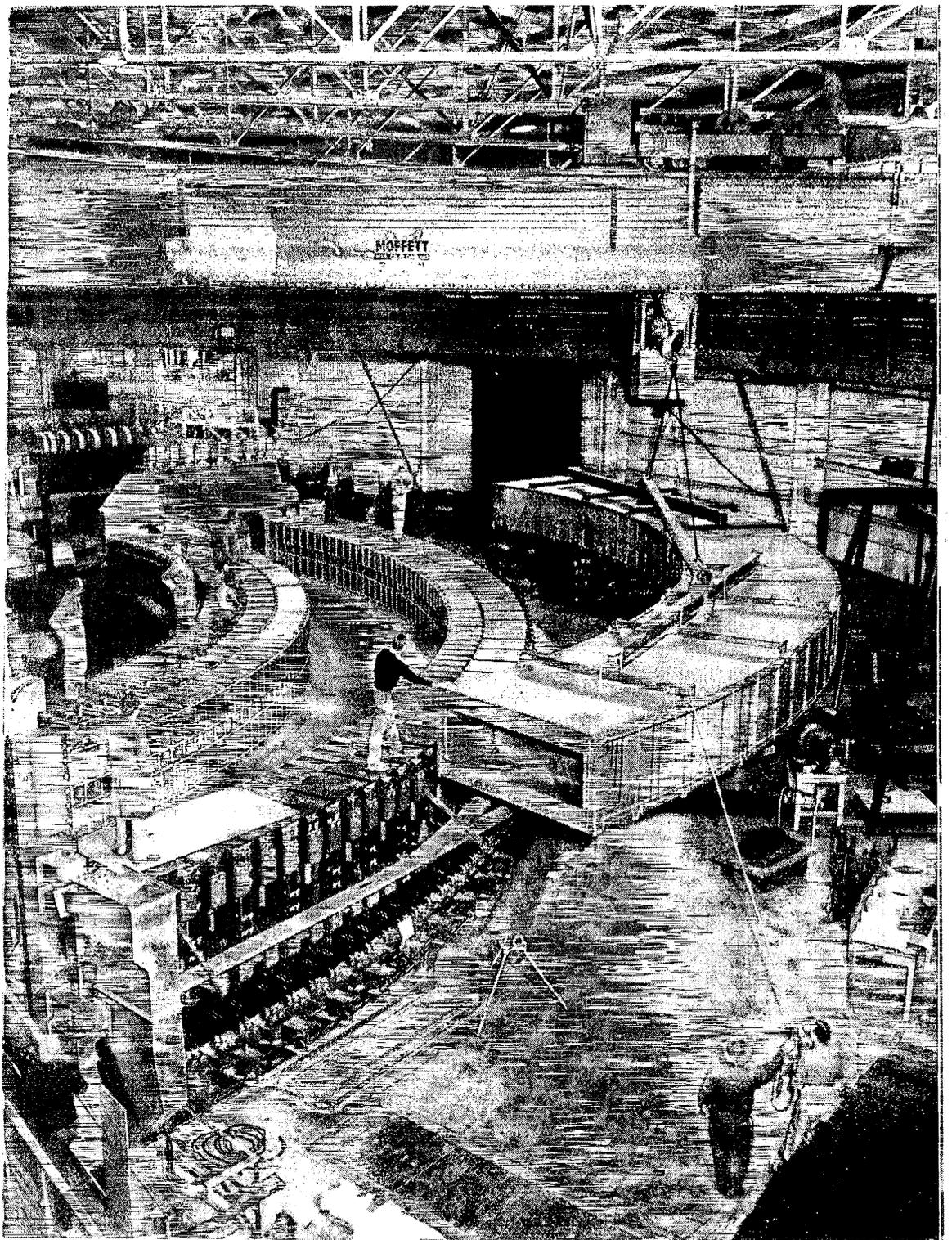
Le groupe de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. décrit un projet de machine dans laquelle l'énergie critique n'apparaîtrait qu'au-dessus de l'énergie maximum, de telle manière qu'il ne se poserait aucun problème relatif au franchissement de l'énergie critique lors de la période d'accélération. Ce projet, qui ressemble à certains égards à celui de la machine marque I à gradient alterné et à champ fixe du groupe MURA, prévoit l'utilisation d'un électro-aimant dans lequel le champ magnétique d'un certain nombre de secteurs est de signe opposé à celui du champ de guidage général. L'orbite fermée qui en résulte est déformée de telle sorte qu'il est possible de situer l'énergie critique au-dessus de l'énergie maximum de la machine. Bien qu'il permette d'éviter les inconvénients relatifs à l'énergie critique, un tel système crée de nouveaux problèmes susceptibles d'être aussi difficiles à résoudre, ainsi que la discussion le révéla.

L'étude théorique présentée par le CERN sur les effets non linéaires survenant au moment de la transition qui causent la perte de particules (puisque'il est possible d'éviter cette perte dans l'approximation linéaire), ainsi que l'étude théorique générale soumise par le groupe de l'Institut de Physique (Académie des Sciences de

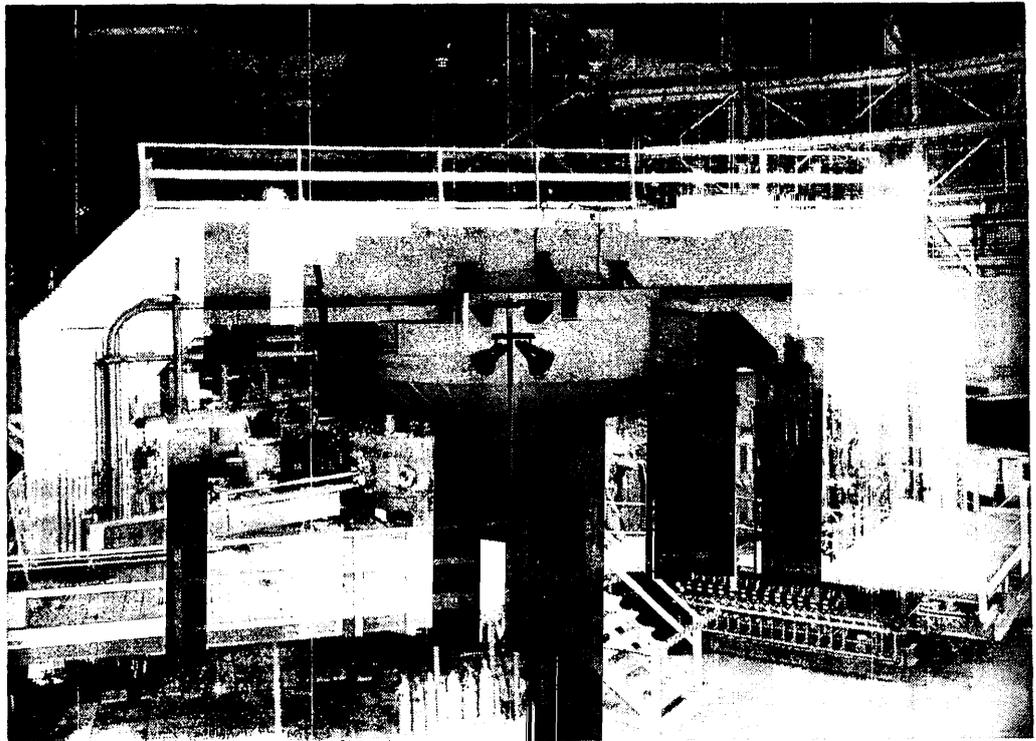
l'U.R.S.S.), ont démontré que leurs auteurs avaient assez bien compris le problème et que des méthodes capables d'éliminer la plus grande partie des pertes de particules seraient susceptibles d'être mises au point.

Le mardi après-midi, la conférence examina les problèmes posés par l'éjection des particules des synchrotrons et des synchroclotrons.

Le groupe de Brookhaven décrit le système d'éjection utilisé avec succès sur le Cosmotron et le groupe de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. expliqua le dispositif qu'il est envisagé d'utiliser sur le synchrotron de 7 GeV à gradient alterné qu'il élabore actuellement. Le groupe du CERN présenta un mémoire ayant trait aux problèmes spéciaux qu'il avait étudiés pour un dispositif d'éjection destiné à son synchrotron de 25 GeV. Les dispositifs prévus par Brookhaven et le CERN reposent sur l'utilisation d'une cible à perte d'énergie qui permettrait d'établir pour les particules frappant la cible une orbite fermée déplacée. Seules les particules qui frappent la cible sortent de l'accélérateur; les autres demeurent sur leur orbite initiale et ne sont pas perturbées par le champ qui agit sur les particules défectées. Ainsi l'extraction des particules de la machine s'étend sur une longue période et permet donc d'obtenir des longueurs d'impulsion dans le faisceau extrait convenant aux appareils de comptage utilisés actuellement en physique nucléaire. Plusieurs conférenciers abordèrent les problèmes très importants que constituent l'élaboration du meilleur dispositif d'éjection, le transport des particules jusqu'aux appareils d'expérimentation et l'élaboration de l'appareillage expérimental lui-même. Il y a peu de temps que cet ensemble de problèmes soulève autant d'intérêt que celui normalement suscité par l'accélération des particules dans les machines elles-mêmes. Une machine ne peut pas être considérée comme définitivement au point avant d'être capable d'éjecter la majeure partie des particules d'une part, et d'autre part de faire effectivement passer ces particules dans les télescopes des compteurs; il est donc évident que les progrès réalisés dans ce domaine sont susceptibles d'améliorer autant le rendement



*Vue du Bévatron de Berkeley, en Californie, prise pendant la mise en place de la chambre à vide*



*Synchro-cyclotron de Berkeley, en Californie  
A droite, le générateur des tensions accélératrices à haute fréquence*

d'une machine que l'accroissement de l'intensité de son faisceau de plusieurs ordres de grandeur. Il conviendrait sans nul doute d'accorder plus d'attention à la notion « d'acceptance » (produit de l'ouverture angulaire par l'amplitude) lors de l'élaboration des systèmes de transport de particules ; dans le cas des machines de haute énergie pour lesquelles les électro-aimants ordinaires de guidage et de focalisation atteignent des dimensions et des prix inabordables, il y aurait lieu de s'attendre à ce que soient utilisés des systèmes de lentilles quadrupolaires disposées entre l'éjecteur de la machine et l'endroit où s'effectuent les expériences et à ce que les appareils de comptage soient conçus pour que l'acceptance soit en harmonie avec l'émission du faisceau de particules sur lequel ils opèrent. Il a ainsi été signalé au cours de la conférence que le rendement du Bévatron en anti-protons avait été augmenté de quinze fois,

principalement grâce à des améliorations dans le système de transport du faisceau.

Le groupe de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. présente deux systèmes d'éjection de particules prévus pour son synchrotron à protons de 7 GeV, le premier étant constitué par un déflecteur de faisceau pulsé qui éjecte les particules sur un seul tour, et le second consistant en un déflecteur « adiabatique » effectuant l'éjection des particules sur plusieurs tours. Le premier système, semblable au dispositif constitué par un barreau déflecteur magnétique pulsé qui avait été originellement utilisé sur le synchro-cyclotron « Berkeley 184 », présente l'inconvénient de ne fournir qu'une impulsion très courte dont l'utilisation efficace dans les expériences de comptage s'avère difficile. L'éjecteur « adiabatique » ne repose pas sur le principe de la cible à perte d'énergie employée pour le Cosmotron, mais sur la résonance paramétrique,

c'est-à-dire une modification des paramètres de la machine telle que la valeur de  $Q$  devient semi-entière. L'amplitude des oscillations bêta-troniques au voisinage de l'orbite fermée augmente et les particules situées dans l'une des régions de l'orbite fermée, où une « bosse » a au préalable été introduite, passent dans une région où elles peuvent être séparées du faisceau en circulation et éjectées. Il est prévu que le rendement théorique d'un tel dispositif sera de 10 à 14 %, c'est-à-dire un rendement comparable à celui que l'on attend du système de la cible à perte d'énergie. Ces chiffres n'ont cependant pas encore été confirmés par l'expérience.

Au cours de la seconde partie de la séance du mardi après-midi, il fut procédé à un examen des systèmes d'éjection pour les synchro-cyclotrons. Les mémoires présentés par le groupe de Chicago et celui de l'Institut de Recherche nucléaire russe ont montré qu'il y a peu de différence entre les diverses méthodes d'éjection utilisées pour cette catégorie de machine. Le rapport entre l'intensité des faisceaux défectés et celle des faisceaux en circulation varie entre 2 et 6 % et le rendement de l'éjection est donc encore faible, bien qu'il soit de loin supérieur au rendement que donnaient les cibles à simple diffusion. Un grand nombre des synchro-cyclotrons les plus puissants semblent posséder une autre caractéristique commune: leur faisceau circulant est d'environ  $1\mu\text{A}$ , en moyenne. Comme il peut difficilement s'agir là d'une constante fondamentale, il est permis d'espérer que des faisceaux de  $10\mu\text{A}$ , ou davantage, pourront être obtenus à l'avenir.

La séance du mercredi matin avait à son programme les accélérateurs linéaires pour l'injection et les techniques d'injection. Tous les synchrotrons à protons d'énergie égale ou supérieure à 6 GeV utilisent des accélérateurs linéaires comme pré-accélérateurs et, dans leurs caractéristiques principales, ces appareils sont très voisins du Linac original de 32 MeV construit il y a quelques années à Brookhaven par Alvarez.

Le groupe de Brookhaven fit état des recherches qu'il a entreprises afin de déterminer si d'autres structures de cavités ne

donneraient pas de meilleurs résultats que la structure du type Alvarez. Il en a conclu qu'il n'était pas possible de substituer à la structure d'Alvarez à cavité cylindrique et tubes de glissement une structure suffisamment meilleure pour justifier l'élaboration de plans entièrement nouveaux. Certaines modifications apportées à la forme des tubes de glissement ont toutefois considérablement réduit la consommation d'énergie. Le système Alvarez a subi un changement dans le cas de l'accélérateur linéaire pour injection de 50 MeV de Brookhaven et de celui du CERN. Dans l'accélérateur linéaire du type Alvarez, la focalisation du faisceau est assurée par l'emploi de grilles placées dans les tubes de glissement; ces grilles provoquent une diminution considérable de l'intensité du faisceau. Dans son projet d'accélérateur linéaire à protons de 600 MeV présenté au cours de cette séance, le groupe de Harwell a exposé qu'il prévoyait l'emploi d'aimants quadrupolaires à l'intérieur des tubes de glissement aux derniers étages de l'accélérateur linéaire, afin d'assurer la focalisation tout en évitant les pertes d'intensité. De même le groupe de Brookhaven et celui du CERN ont l'intention d'utiliser des aimants quadrupolaires pour assurer la focalisation qui, en raison du faible coefficient de répétition des cycles du synchrotron (environ une impulsion par seconde), pourront être pulsés afin d'éviter les sérieux problèmes que poserait l'échauffement à l'intérieur des tubes de glissement. La substitution de la focalisation par aimants quadrupolaires à celle obtenue au moyen de grilles, surtout dans les phases initiales de l'accélérateur linéaire, devrait permettre d'accroître d'environ dix fois l'intensité du faisceau.

Le groupe du CERN exposa les études qu'il avait entreprises sur l'injection dans le synchrotron des particules provenant de l'accélérateur linéaire. La possibilité d'harmoniser l'acceptance de l'appareil à l'émission du faisceau fit l'objet d'explications détaillées. Le dispositif du CERN comprend un électro-aimant à double courbure permettant l'injection de particules d'énergies différentes provenant de l'accélérateur linéaire dans le synchrotron sur des orbites

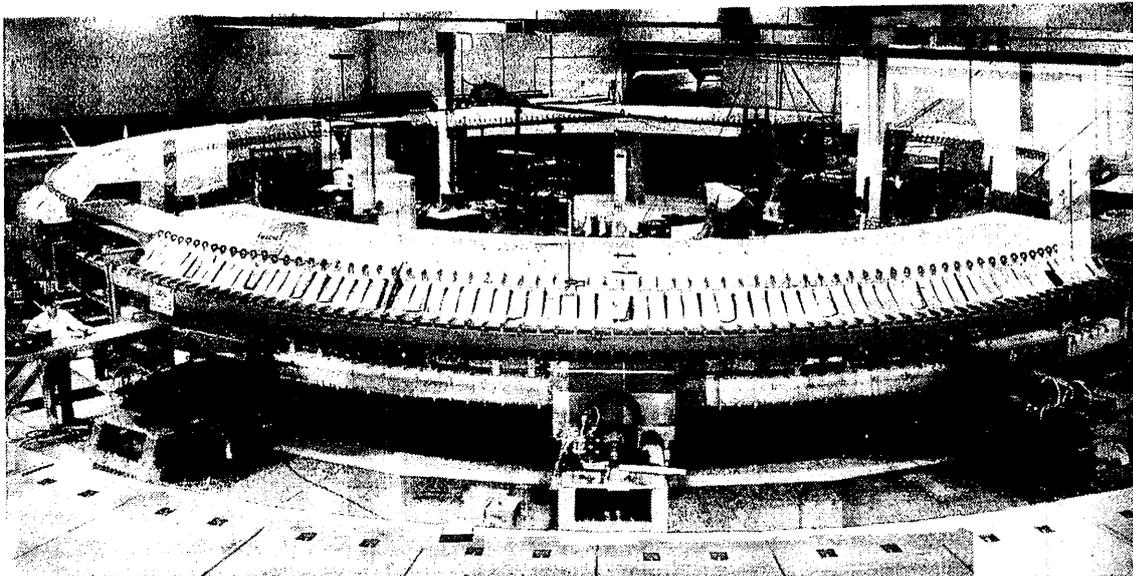
fermées convenant chacune à l'énergie de ces particules. Un tel procédé supprime les oscillations bétatroniques supplémentaires lors de l'injection ainsi que l'accroissement de la section du faisceau qui en résulte. Le groupe de Saclay fit également un exposé relatif à un « inflecteur achromatique » et indiqua dans quelle mesure l'emploi d'un tel procédé permettrait d'améliorer la capture du faisceau lors de l'injection.

Au cours de cette séance, il fut également question des accélérateurs linéaires à ions lourds prévus pour fonctionner indépendamment et non seulement pour servir d'injecteurs aux synchrotrons. Le groupe de Harwell communiqua les données relatives à son accélérateur à protons de 600 MeV qui, pour le moment du moins, n'est en construction que pour fournir une énergie de 50 MeV. Le groupe de l'Institut de Physique technique de l'Académie des Sciences de l'Ukraine a émis une idée nouvelle tendant à la construction d'un accélérateur à ions lourds qui serait essentiellement un accélérateur « linéaire » en forme d'arc de cercle. Il est ainsi proposé d'éviter les pertes d'intensité subies par les accélérateurs cycliques lors de l'injection et de l'éjection, grâce à l'utilisation d'un accélérateur linéaire en forme d'arc, et d'éliminer les problèmes de focalisation que posent les accélérateurs linéaires, grâce à l'emploi d'un champ magnétique analogue à celui dont il est fait usage dans les machines cycliques à forte focalisation. La focalisation radiale et la focalisation en phase peuvent être obtenues simultanément dans une telle machine en choisissant les paramètres de telle sorte que la phase stable soit la même que celle d'un synchrotron, auquel cas la défocalisation radiale usuelle de l'accélérateur linéaire est supprimée. La machine fonctionnerait en fait au-dessus de l'énergie critique. Les particules seraient déviées le long de l'arc de cercle (ou de toute autre courbe convenable) par le champ magnétique, comme dans une machine cyclique, et si le rayon de courbure de l'arc était constant, il serait nécessaire de prévoir une augmentation spatiale de l'intensité du champ magnétique le long de l'arc afin de compenser l'augmentation d'énergie des particules. Le champ

magnétique n'est toutefois pas une fonction du temps comme dans un accélérateur cyclique. Il est vraisemblablement trop tôt pour se prononcer sur les avantages que pourrait avoir une machine de ce genre sur un accélérateur linéaire de type courant utilisant des aimants quadrupolaires comme dispositif de focalisation. Dans les deux cas, la longueur de la machine reste déterminée par les données relatives à la chute de tension, que l'accélérateur soit rectiligne ou en forme d'arc. La question n'est pas encore résolue de savoir s'il vaut la peine d'étudier les accélérateurs linéaires à particules lourdes fonctionnant dans le domaine des GeV. Aucune machine de ce type appelée à fonctionner dans ce domaine d'énergie n'est à l'heure actuelle en construction et la seule machine de haute énergie (600 MeV) qui ait fait l'objet de plans détaillés a été abandonnée pour faire place à un synchrotron à protons de plus haute énergie.

Un mémoire concernant les accélérateurs linéaires à haute intensité fut présenté par le groupe de l'Institut de Chimie-Physique (Académie des Sciences de l'U.R.S.S.). Ce groupe exposa les travaux qu'il a effectués sur des accélérateurs linéaires dans lesquels il était possible d'accélérer des faisceaux d'une intensité voisine d'une centaine de milliampères. Lors de la Conférence de Genève en août 1955, le professeur E. O. Lawrence avait également fait état de ses travaux concernant les accélérateurs linéaires à haute intensité. Des machines d'intensités aussi hautes et de plusieurs puissances de 10 plus élevées qu'il n'avait été jusqu'à présent prévu ou réalisé dans des accélérateurs constitueront sans nul doute un précieux apport dans l'arsenal des spécialistes des accélérateurs, quel que soit le but de leur développement.

La séance du mercredi après-midi fut consacrée à la théorie non linéaire des oscillations bétatroniques dans les accélérateurs cycliques. Les mémoires présentés par le groupe du CERN, le groupe de Brookhaven et celui de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. ont fait ressortir une identité de vues quant aux effets de la non-linéarité dans le champ de guidage des accélérateurs cycliques sur la stabilité du



*Cosmotron de Brookhaven. Au fond, la sortie du Van de Graaff*

*Cosmotron de Brookhaven. Vue de l'aimant et de l'une des sections droites, entre les quadrants.  
Le mur de béton, à droite, fait partie de l'écran de protection*



mouvement des particules. Jusqu'à présent la théorie n'a toutefois pas été parfaitement mise au point, car les lignes d'instabilité non linéaires sont bien déterminées dans le cas « statique », c'est-à-dire celui dans lequel la fréquence bétatronique n'est pas fonction du temps, mais la théorie est pour ainsi dire muette sur les instabilités dans des conditions « dynamiques », telles qu'elles apparaissent dans toutes les machines qui ont des oscillations synchrotroniques et des erreurs de fréquence. Les calculs basés sur les résultats obtenus ainsi que les expériences effectuées sur des modèles permettent cependant de se faire quelque idée du comportement dynamique de tels systèmes non linéaires. Le mémoire du CERN a, en effet, fourni un exemple du phénomène de « capture »<sup>1</sup> dans les systèmes dynamiques non linéaires. Le groupe du CERN décrit une machine analogique mécanique, qu'il a construite pour étudier le comportement dynamique des systèmes non linéaires et qui jusqu'ici n'a fait que confirmer les instabilités prévues par la théorie pour le cas statique. Le groupe de Brookhaven fit part des résultats obtenus avec son modèle analogique à électrons qui confirment eux aussi les prévisions dérivées de l'instabilité statique. Il fut également procédé à l'examen détaillé des méthodes de stabilisation des systèmes non linéaires, qui furent illustrées par des exemples tirés des résultats d'expériences fournis par les modèles. Il reste encore à savoir s'il s'avérera possible, dans un proche avenir, de construire des modèles ou de procéder à des études théoriques qui permettront de traiter de l'aspect dynamique du problème.

Le groupe MURA fit état des calculs qu'il avait effectués sur le comportement non linéaire des particules dans des accélérateurs à gradient alterné et à champ fixe, et particulièrement dans des machines à rainures en spirale, où les non-linéarités sont

---

<sup>1</sup> Le mot « capture » signifie le déplacement des particules d'un système dynamique qui, après avoir oscillé sur l'orbite fermée normale (linéaire), décident d'osciller sur une nouvelle orbite fermée lors du passage de la fréquence bétatronique par la résonance.

beaucoup plus fortes que dans les machines à gradient alterné ordinaires. Malheureusement le travail accompli jusqu'à présent sur les non-linéarités n'est pas nécessairement susceptible d'être applicable au cas des fortes non-linéarités. Bien que les diagrammes de phases relatifs au cas statique présentés par le groupe MURA soient indéniablement semblables à ceux qu'ont obtenus les autres groupes, les études ne sont vraisemblablement pas assez avancées pour indiquer avec certitude si les machines à rainures en spirale seront plus ou moins affectées par les non-linéarités que les machines de type courant.

Les problèmes dont il a été discuté à la séance du jeudi matin avaient trait aux électro-aimants des accélérateurs. Le rendement des accélérateurs est fonction de l'efficacité de leurs électro-aimants et les communications faites par les groupes du CERN, de Saclay et de l'Institut de Recherche nucléaire (Académie des Sciences de l'U.R.S.S.) ont manifesté l'importance que l'on attache aujourd'hui à l'élaboration de ces aimants. Il fut procédé à un examen de détail des méthodes habituelles de correction, au moyen de bobinages auxiliaires, des défauts qui sont le propre des électro-aimants, et le groupe de Saclay proposa une méthode pour corriger les effets de saturation des électro-aimants par un crénelage de la surface polaire sans bobinage auxiliaire. Le mémoire présenté par le groupe australien, traitant du champ magnétique produit par des bobines sans fer, et de l'alimentation en énergie de son synchrotron à protons de 10 GeV, montra jusqu'à quel point ce groupe a osé pousser la technologie en construisant une machine à électro-aimants sans fer, dotée d'un champ magnétique plus élevé que ne le permet l'emploi d'aimants à culasses en fer. Le groupe MURA fit un exposé sur ses travaux expérimentaux concernant le secteur radial et les aimants à rainures en spirale de ses machines à gradient alterné et champ fixe.

La séance du jeudi après-midi fut consacrée aux problèmes relatifs à l'accélération H.F. Pendant la première partie de la séance furent traités les problèmes de commande du faisceau qui se révèlent

extrêmement importants dans le cas des synchrotrons les plus puissants, et particulièrement dans celui des machines à gradient alterné, dans lesquelles se pose la question de l'énergie critique. Une communication faite par le groupe du CERN décrit les études théoriques effectuées en vue de découvrir les meilleures méthodes pour le réglage du faisceau, pour connaître le genre d'indications à demander aux électrodes de détection et pour déterminer la manière dont ces indications devraient être appliquées aux cavités d'accélération pour maintenir le faisceau au centre de la chambre à vide. Au cours de la discussion, le groupe de Brookhaven fit part de ses expériences relatives aux systèmes de commande du faisceau qu'il a utilisés sur le modèle analogique à électrons de son synchrotron de 30 GeV.

La seconde partie de la séance fut réservée aux systèmes H.F. des synchro-cyclotrons. Le groupe de Berkeley et celui du CERN exposèrent leurs projets concernant l'utilisation de condensateurs à tiges vibrantes comme éléments actifs pour moduler la fréquence du système H.F. Le groupe de l'Institut de Recherche nucléaire (Académie des Sciences de l'U.R.S.S.) donna une explication détaillée du système H.F. de son synchro-cyclotron de 680 MeV dans lequel le modulateur de fréquence est un condensateur rotatif. Des nombreux mémoires relatifs à l'élaboration des cavités, un seul a été présenté en cours de séance.

Les problèmes que pose la construction de synchrotrons à électrons de haute énergie furent examinés pendant la séance du vendredi matin. Le groupe MIT-Harvard fit une communication au sujet de son projet de machine à électrons de 6 GeV dont le plan d'ensemble vient à peine d'être achevé. Le système H.F. de cette machine présente un problème très ardu, car le rayonnement fait subir aux électrons de très grosses pertes d'énergie. Dans une machine de 30 m de rayon, cette perte d'énergie s'élève à plus de 4,4 MeV par tour pour une énergie électronique de 6 GeV et elle atteint 10,7 MeV par tour lorsque l'énergie électronique est de 7.5 GeV, la perte d'énergie augmentant comme la

quatrième puissance de l'énergie de la particule. Seize cavités réparties autour de la machine et ayant chacune une tension H.F. de pointe de 1 MeV compenseront ces pertes et accéléreront les particules. La puissance H.F. de pointe nécessaire est de 25 kW par cavité à une énergie de 6 GeV. Comme la machine est prévue pour fonctionner à 30 impulsions par seconde afin de fournir la haute intensité nécessaire, la puissance moyenne exigée des amplificateurs H.F. est également élevée et se situe aux environs de 5 kW par cavité à une énergie de 6 GeV. L'intensité élevée obtenue dans cette machine, qui doit être plusieurs centaines de fois supérieure à celle d'une machine à protons d'énergie équivalente, s'avère nécessaire en raison du fait que les réactions nucléaires ne représentent qu'environ 1 % des réactions électro-magnétiques. Une telle machine serait utile à l'étude de la production des paires protons antiprotons (seuil 3,8 GeV pour les rayons X), de la production des mésons et hypérons, de la production des paires de « gerbes », de la photoproduction des mésons  $\pi$ , des muons et des nucléons, ainsi qu'à l'étude de la structure des électrons.

Le problème important que constituent le rayonnement et le mouvement relativiste dans les synchrotrons à électrons fut traité de manière très complète par le groupe de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S. dans son mémoire, ainsi qu'au cours de la discussion que celui-ci suscita. Il semble que l'accord entre les différentes prévisions théoriques relatives à ce sujet soit meilleur maintenant que dans le passé.

La séance du vendredi après-midi fut différente des autres, car la question discutée avait autant trait à l'organisation qu'à la technologie. Les mémoires soumis concernaient l'emploi des accélérateurs après leur construction, ou, en d'autres termes, l'utilisation et l'exploitation des machines. Lorsque la construction d'un accélérateur a duré de nombreuses années et exigé des sommes considérables, il est essentiel d'exploiter la machine à fond en réalisant des expériences de physique nucléaire pendant la totalité du temps durant lequel elle est à même de fonctionner. Les machines se

démodent assez rapidement et il convient donc d'en tirer le plus grand parti possible. Les communications faites par le groupe de Brookhaven sur le Cosmotron, par celui de Berkeley sur le Bévatron, et par le groupe de l'Institut de Recherche nucléaire (Académie des Sciences de l'U.R.S.S.) sur le synchro-cyclotron de 680 MeV, illustrèrent la complexité de l'organisation d'un programme d'expérimentation capable d'assurer une exploitation optimum. Les spécialistes de la physique nucléaire qui ignorent la physique des machines et sont habitués à un horaire de travail universitaire ont dû être scandalisés par les rigueurs de la discipline à laquelle doivent se soumettre les spécialistes de la physique des hautes énergies.

La dernière séance de la semaine, celle du samedi matin, fut consacrée aux sujets qui n'avaient pas été traités jusque-là. Il a déjà été fait mention du mémoire présenté par le groupe de Princeton au sujet de son synchrotron à protons à haute intensité de 3 GeV. Le groupe de Stanford fit une communication concernant ses accélérateurs linéaires à électrons de haute énergie et décrit ses projets d'accélérateurs linéaires d'une énergie supérieure à 10 GeV, domaine dans lequel il n'est pas possible d'utiliser une machine à électrons cyclique en raison des pertes causées par le rayonnement. Le nombre d'amplificateurs à klystrons nécessaires pour alimenter une aussi grande machine et la courte durée d'utilisation des klystrons créent d'énormes problèmes d'ali-

mentation et entraînent des frais d'entretien élevés.

Le groupe de l'Institut de Physique et celui de l'Institut de Recherche nucléaire (Académie des Sciences de l'U.R.S.S.) présentèrent les deux derniers mémoires de la séance, l'un concernant un cyclotron utilisant des électro-aimants divisés en sections et semblable au cyclotron en feuille de trèfle décrit l'an dernier par le groupe de Berkeley, et l'autre traitant de l'expérience acquise en utilisant le modèle de synchrotron à protons de 10 GeV.

La conférence se termina par une visite des laboratoires du CERN à Genève, et des chantiers du CERN à Meyrin, où il est procédé à la construction d'un synchro-cyclotron de 600 MeV et du synchrotron à protons de 25 GeV.

S'il est permis de tirer une conclusion de cette conférence, c'est que les projets de construction d'accélérateurs ne sont certes pas près de mourir d'inanition. Les fonds mis à la disposition des constructeurs de machines sont plus abondants que jamais, le nombre de physiciens et d'ingénieurs travaillant sur des projets de machines est plus élevé qu'il ne semble l'avoir été à aucun moment dans le passé, et les nouvelles conceptions relatives aux accélérateurs et à leur construction abondent. Il y a donc certainement lieu de s'attendre à ce que la prochaine conférence sur ces questions, qui doit se tenir à Genève en 1958, soit tout aussi passionnante.

