



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Réf. : **E4500 V1**

Date de publication :
10 décembre 1989

Accélérateurs de particules

Cet article est issu de : **Archives**

par **Pierre LAPOSTOLLE**

Pour toute question :
Service Relation clientèle
Techniques de l'Ingénieur
Immeuble Pleyad 1
39, boulevard Ornano
93288 Saint-Denis Cedex

Par mail :
infos.clients@teching.com
Par téléphone :
00 33 (0)1 53 35 20 20

Document téléchargé le : **27/01/2020**

Pour le compte : **7200029571 - univ mouloud mammeri tizi ousou // bu07 SNDL // 193.194.82.178**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Accélérateurs de particules

par **Pierre LAPOSTOLLE**

Ancien Élève de l'École Polytechnique

Docteur ès Sciences

Ancien Conseiller Scientifique du Grand Accélérateur National d'Ions Lourds (GANIL)

1. Recherche fondamentale. Applications	E 4 500-2
2. Genèse des accélérateurs. Divers principes d'accélération	— 3
2,1 Premiers accélérateurs de particules : accélérateurs électrostatiques	— 3
2,2 Accélérateurs linéaires	— 3
2,3 Bétatrons	— 4
2,4 Cyclotrons	— 5
2,5 Synchrocyclotrons	— 5
2,6 Synchrotrons	— 5
2,7 Synchrotrons à focalisation forte	— 7
2,8 Anneaux de stockage et de collisions	— 8
3. Accélérateurs récents. État actuel et évolution	— 9
3,1 Accélérateurs électrostatiques	— 9
3,2 Postaccélérateurs pour tandems. Ions lourds de grande énergie	— 10
3,3 Accélérateurs linéaires à focalisation radiofréquence pour protons et ions	— 11
3,4 Accélérateurs linéaires d'électrons à cavités supraconductrices	— 11
3,5 Cyclotrons à secteurs. Cyclotrons supraconducteurs	— 12
3,6 Grands synchrotrons et anneaux de collision. Techniques de refroidissement	— 14
3,7 Perspectives d'avenir	— 15
Bibliographie	— 16

Le milieu du siècle a été marqué par ce que certains ont appelé l'entrée dans l'ère atomique dont le début a coïncidé avec la fin de la Dernière Guerre mondiale.

Ce qui frappa alors le plus l'opinion fut la possibilité d'employer, à des fins militaires, l'énergie disponible dans certains noyaux atomiques.

Si cette menace continue à peser sur le monde, un autre sujet retient aujourd'hui l'attention : l'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire dans les centrales, toute inquiétante qu'elle paraisse aux yeux de certains à cause des risques qui pourraient en résulter pour la population, devra continuer à apporter une contribution importante à la solution de l'angoissant problème de l'énergie pour les générations à venir.

Il est pourtant un secteur, moins connu, car sans danger similaire, qui a bénéficié d'une progression comparable : celui de la recherche nucléaire et, notamment, comme outils essentiels, celui des accélérateurs de particules.

1 Recherche fondamentale. Applications

Les accélérateurs de particules sont, en premier lieu, des outils de recherche; ils ne produisent pas d'énergie et en consomment parfois beaucoup. Pourtant, si l'on ne peut prétendre que les recherches poursuivies aujourd'hui auront une incidence sur le développement de futures centrales énergétiques, on ne saurait oublier que c'est de l'étude des noyaux, de leurs constituants et des diverses formes d'énergie qui y résident, étude qui remonte principalement aux premières décennies de ce siècle, qu'ont résulté les développements actuels de l'énergie nucléaire. Les énergies mises en jeu dans les processus sur lesquels portent aujourd'hui les recherches sont énormes.

Depuis Bohr, des progrès considérables ont été faits dans la connaissance de la constitution de la matière. Après le proton, l'électron et le neutron, dont l'assemblage forme le monde dans lequel nous vivons, ont été découvertes leurs antiparticules, les **neutrinos**, des particules de masse intermédiaire ou lourdes, **mésons** et **baryons**, dont les durées de vie sont souvent extrêmement courtes et les propriétés parfois très subtiles [1].

L'énergie, cachée dans la matière, qui se manifeste sous des formes variées dans les divers rayonnements ou les particules étranges (fig. 1), peut avoir des effets sur les matériaux ou sur les êtres vivants. Les dangers des explosions atomiques, ou même des centrales nucléaires, ont suffisamment alerté l'opinion pour qu'il ne soit pas nécessaire d'insister sur ce point. Mais, à côté des incidences nuisibles, on passe souvent sous silence les effets bénéfiques ou utiles des rayonnements ionisants. Certaines sortes de cancer peuvent être traitées, on le sait, par des applications de corps radioactifs et des progrès sont encore à attendre dans cette voie. Les accélérateurs qui offrent la possibilité de choisir et d'optimiser les particules constituant le rayonnement et leur énergie, d'ajuster leur focalisation sur une zone bien déterminée, possèdent une souplesse de caractéristiques plus étendue que la gamme des sources radioactives classiques, même si ces dernières sont d'un emploi clinique plus aisé grâce à leur faible encombrement. Il faut citer également les applications de stérilisation où les accélérateurs sont employés; dans certaines recherches biologiques et agronomiques, par ailleurs, peuvent se réaliser en quelques années des sélections d'espèces que les seuls rayons cosmiques auraient mis des millénaires à accomplir; enfin, des applications industrielles, soit dans le domaine de l'analyse métallurgique, comme la gammagraphie, soit pour l'obtention, par irradiation, de nouvelles propriétés physiques ou chimiques de certains corps, doivent être mentionnées et il faut citer aussi les possibilités offertes aujourd'hui par la production de rayonnements UV ou X extrêmement intenses des **sources de lumière synchrotron**.

À côté de leur rôle d'outils de recherche nucléaire ou de physique des particules et en prolongement de celui-ci, il existe donc

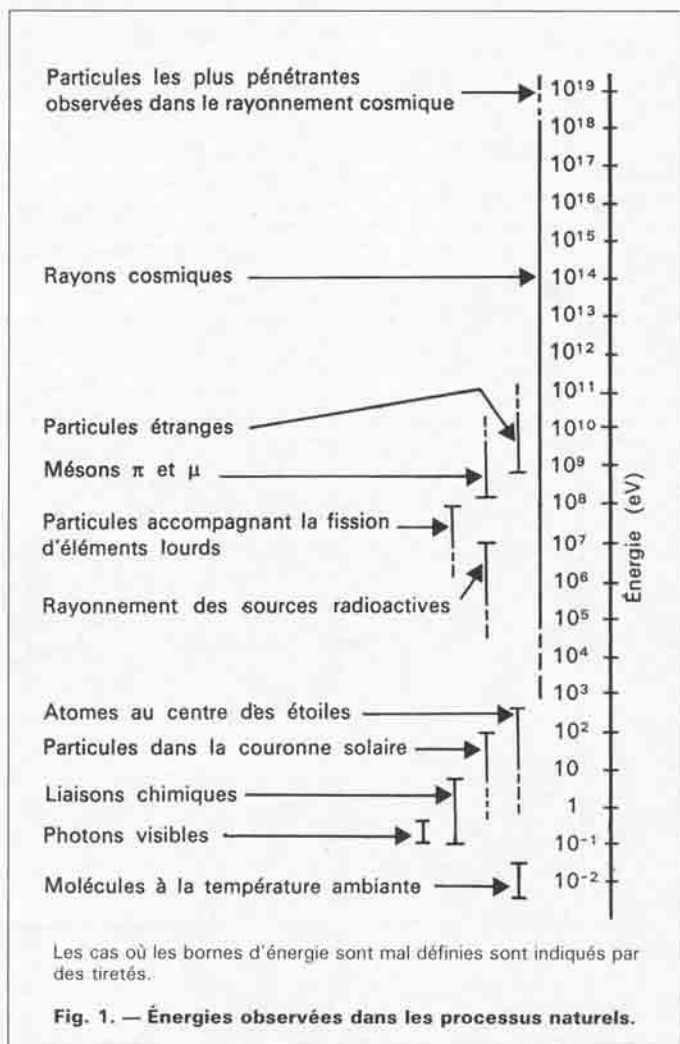


Fig. 1. — Énergies observées dans les processus naturels.

un deuxième volet d'utilisation des accélérateurs de particules comportant des applications pratiques qui, si limitées soient-elles, sont d'une très grande importance et se développeront.

2 Genèse des accélérateurs. Divers principes d'accélération

2,1 PREMIERS ACCÉLÉRATEURS

DE PARTICULES :

ACCÉLÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES

Pour arriver à disloquer l'édifice atomique, vaincre ses forces de liaison et libérer les éléments constitutants, il faut disposer d'une artillerie puissante. Les projectiles utilisés ne sont pas autre chose que des particules : électrons, protons, etc., auxquelles on a communiqué une très grande vitesse avoisinant la vitesse de la lumière. Les premières expériences de réaction nucléaire ont été faites en utilisant les particules rapides émises par les corps radioactifs. Mais les expérimentateurs souhaitèrent vite disposer de sources de particules d'énergie mieux définie, puis plus élevée. Cockroft et Walton, les premiers, ont construit un générateur de haute tension capable de fournir à des particules chargées une énergie comparable à celle des sources radioactives ; Rutherford put, avec ce générateur, faire de nombreuses recherches sur la structure du noyau des atomes.

Un générateur de très haute tension constitue en effet l'élément essentiel d'un accélérateur électrostatique. Si une source de particules de charge qe (q fois la charge de l'électron), ou un canon à électrons de charge $-e$, est portée au potentiel V ($-V$ pour des électrons) et que ces particules suivent le champ électrique dans une colonne dite accélératrice, elles atteindront la masse avec une énergie qeV (il est d'usage d'adopter l'électronvolt et ses multiples comme unité d'énergie). Les travaux de Greinacher puis Van de Graaf et Herb ont conduit à la possibilité d'atteindre aujourd'hui des tensions de l'ordre de 20 MV.

2,2 ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES

Exploitant l'idée de Ising qui, dès 1924, suggérait l'emploi de champs impulsionnels, en 1928, un physicien norvégien, Widerøe, proposait d'accroître l'énergie communiquée à des particules en faisant appel à des champs radiofréquences : avec des champs électrostatiques qui dérivent d'un potentiel, il n'est pas possible d'additionner plusieurs accélérations successives sans produire en un point le potentiel total ; mais, en utilisant des champs alternatifs qui ne soient qu'au passage des particules, on peut arriver à surmonter cette difficulté.

La figure 2 représente le principe de l'accélérateur linéaire construit en 1931 par Sloan et Lawrence. A_0 est une source de particules ; les rectangles hachurés représentent une suite de tubes dans l'axe desquels peuvent passer les particules ; ils sont connectés à une source de potentiel alternatif. Une particule part de A_0 et est accélérée par le potentiel V du premier tube. Après avoir traversé le tube où elle n'est soumise à aucun champ, la particule arrive entre le premier et le deuxième tubes. Si, à ce moment, la phase des potentiels alternatifs est telle que le champ soit accélérateur, la particule recevra une nouvelle quantité d'énergie (deux fois le potentiel V) ; de même entre le deuxième et le troisième tubes. Comme l'énergie de la particule s'accroît, sa vitesse augmente et, pour qu'elle mette toujours le même temps (demi-période du potentiel alternatif) pour traverser les tubes (dits **tubes de glissement**), ceux-ci doivent être de plus en plus longs à mesure que l'on s'éloigne de la source.

On sait que la vitesse d'une particule croît avec son énergie, mais sans jamais atteindre la vitesse de la lumière. Ce n'est pas le lieu ici de rappeler la théorie de la relativité ; disons seulement que si l'on désigne par m_0 la masse au repos de la particule, il correspond à cette masse une certaine énergie eV_0 que l'on peut exprimer en électrons-volts d'après la relation :

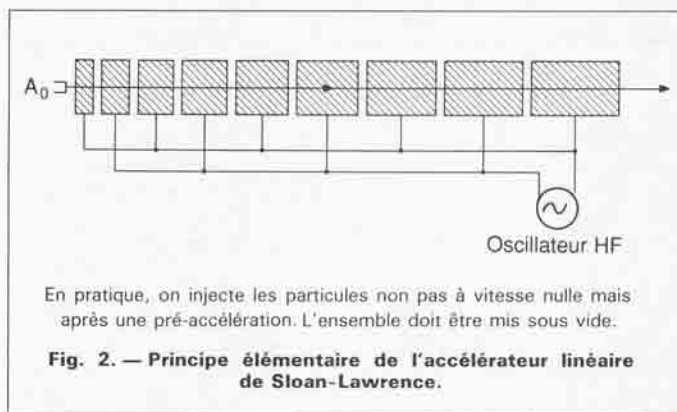


Tableau I. — Valeurs de m/m_0 et de v/c pour les électrons et les protons en fonction de leur énergie.

Énergie (MeV)	1	10	10 ²	10 ³	10 ⁴	10 ⁵
Électrons	m/m_0	2,96	20,6	197	1 960	19 600
	v/c	0,941	0,999	≈ 1	≈ 1	
Protons	m/m_0	1,001	1,01	1,11	2,07	11,7
	v/c	0,046	0,145	0,428	0,875	0,996
						≈ 1

$$eV_0 = m_0 c^2$$

avec c vitesse de la lumière,
 e charge de la particule.

Si alors, on communique à cette particule une énergie cinétique eV , elle acquiert une vitesse v et sa masse m change ; on a :

$$e(V_0 + V) = mc^2$$

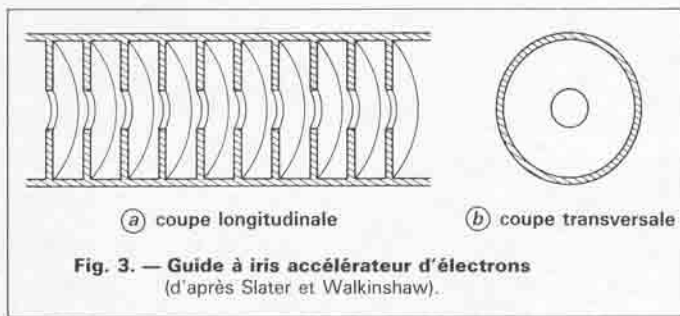
et

$$m = m_0 / \sqrt{1 - (v^2 / c^2)}$$

Pratiquement : $eV_0 = 511$ keV pour des électrons,
 $eV_0 = 938$ MeV pour des protons ;

on en déduit le tableau I.

On voit que les vitesses sont très sensiblement différentes suivant le type de particules. Pour les électrons, on atteint très vite la vitesse de la lumière. Slater et Walkinshaw [2] ont alors modifié le dispositif de Sloan et Lawrence. Le circuit électrique qu'ils ont utilisé est analogue à un guide d'ondes électromagnétiques formé d'un cylindre métallique creux. Le champ électrique de l'onde peut accélérer les particules et l'onde se déplace en phase avec les électrons. Pour assurer le synchronisme de l'onde et des électrons, il faut ralentir les ondes, ce qui est fait en obturant partiellement le cylindre par une suite d'iris (fig. 3, p. 4) de diamètre convenablement choisi. L'accélération est alors continue le long de l'appareil (mais elle n'a lieu que pour les particules qui se présentent à l'entrée lorsque le champ est accélérateur).



De nombreux accélérateurs de ce type ont été construits en France et à l'étranger. La fréquence des ondes utilisées est généralement 3 000 MHz (longueur d'onde 10 cm), fréquence couramment utilisée dans les radars. Le plus grand accélérateur de ce type a été construit à Stanford en Californie : il a plus de 3 km de longueur et atteint aujourd'hui une énergie de 50 GeV.

Pour les protons, Alvarez [3] a conservé les tubes de glissement de Sloan et Lawrence et les a disposés dans une cavité résonnante (fig. 4).

L'accélération a toujours lieu entre les tubes dont la longueur est calculée pour que les particules les traversent exactement en une période du champ alternatif. Les longueurs d'ondes utilisées sont généralement métriques ; les énergies atteintes de plusieurs dizaines ou centaines de mégaelectronvolts. Pour augmenter l'énergie, il faut une grande puissance et une grande longueur : 5 à 10 MW de puissance radiofréquence sont nécessaires pour atteindre 100 MeV sur une longueur d'une cinquantaine de mètres.

Aux États-Unis, il existe deux accélérateurs de 200 MeV et un autre, encore plus grand, de 800 MeV ; ce dernier se trouve à Los Alamos, au Nouveau-Mexique ; il a près d'un kilomètre de longueur.

A part la grande longueur et la puissance nécessaires pour accroître l'énergie dans les accélérateurs linéaires, une difficulté est relative au problème de la stabilité des trajectoires des particules accélérées. On n'a considéré jusqu'à présent qu'une particule idéale passant exactement dans l'axe de l'appareil avec une phase rigoureusement correcte. Pour pouvoir accélérer un nombre appréciable de particules, il est nécessaire que, même si les particules sont injectées légèrement en dehors de l'axe ou obliquement, ou avec un léger écart de phase par rapport à la phase correcte du champ accélérateur, elles traversent l'appareil et reçoivent une accélération sensiblement égale. Pour assurer cette stabilité longitudinale et latérale, il faut mettre en œuvre une focalisation auxiliaire dont la complexité, aux vitesses faibles devant c , a retardé le développement de ce type d'accélérateur (§ 3,3).

2,3 BÉTATRONS

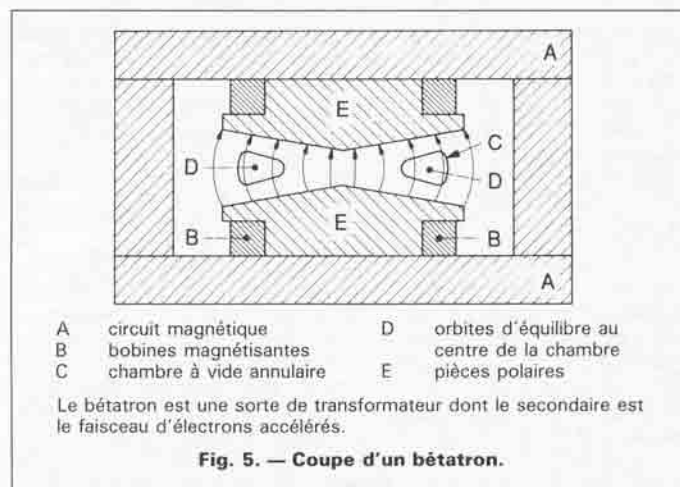
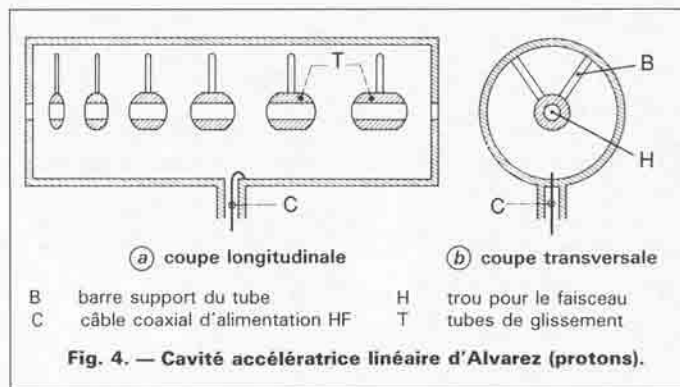
En 1927, Breit et Widerøe ont proposé un autre moyen de se soustraire à la limitation d'énergie des accélérateurs électrostatiques. C'est l'emploi du champ électrique d'induction produit par un champ magnétique variable. Le champ d'induction, on le sait, ne dérive pas d'un potentiel et il est possible, en le décrivant plusieurs fois, de multiplier les accélérations, de la même façon que la tension au secondaire d'un transformateur croît avec le nombre de tours.

La figure 5 montre le schéma du bétatron : on crée un champ magnétique alternatif dans l'entrefer (le circuit magnétique est feuilleté). Dans ce champ, les particules décrivent une orbite circulaire de rayon R tel que :

$$R = mv / eB$$

avec B induction magnétique,
 e charge des particules,
 m masse des particules,
 v vitesse des particules.

Lorsque le champ augmente, le flux embrassé par l'orbite croît, produisant un champ d'induction accélérateur. Pour un profil conve-



nable des pièces polaires, l'augmentation du moment mv correspond exactement à l'augmentation du champ et l'orbite reste fixe. Pour des raisons d'ordre pratique, ce principe n'est applicable qu'aux électrons.

Le choix du profil des pièces polaires permet aussi d'assurer la stabilité des trajectoires. La figure 6 représente une distribution de champ d'induction où la longueur des lignes de force augmente avec le rayon r ; le champ B_z va donc en diminuant d'intensité du centre vers les bords. La variation de la composante B_z avec la coordonnée radiale r entraîne l'existence d'une composante B_r .

On peut voir sur la figure que si :

$$\frac{\partial B_z}{\partial r} < 0$$

la composante B_r a pour effet de ramener les particules vers le plan médian si elles s'en sont écartées. On a donc une stabilité verticale.

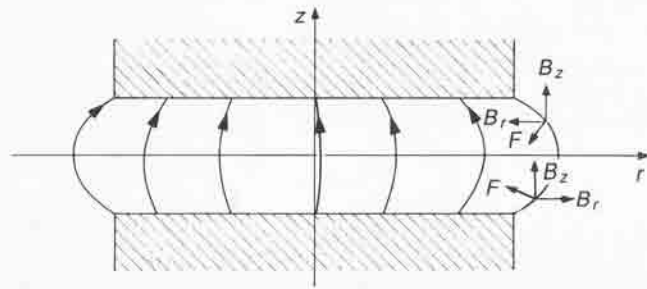
La stabilité latérale est de même assurée si le rayon de courbure d'une trajectoire à la distance $r_0 + \Delta r$ du centre, en un point où le champ vaut $B_0 - \Delta B$, est inférieur à $r_0 + \Delta r$; ces conditions peuvent s'écrire :

$$0 < \frac{r}{B} \frac{\partial B_z}{\partial r} = n < 1$$

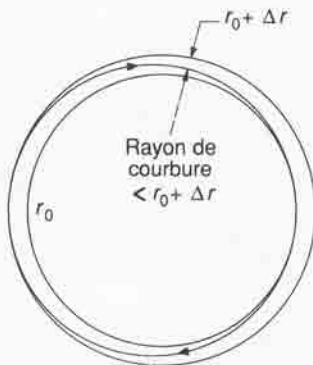
n quantité sans dimension est appelée *index de l'induction* ou encore *index du champ*.

L'énergie atteinte dans un bétatron est limitée par le rayonnement des électrons ; soumis à une accélération transversale intense, les électrons rayonnent de l'énergie. Quand l'énergie rayonnée par tour devient égale à l'énergie communiquée par le champ d'induction, l'accélération cesse.

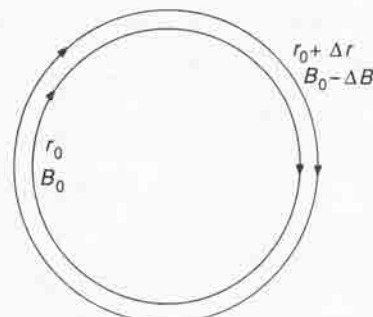
Malgré un certain essor à l'origine et quelques applications médicales, peu de bétatrons ont été construits ; l'idée, partiellement modifiée, est pourtant reprise aujourd'hui en vue d'obtenir des courants d'électrons très intenses.



(a) distribution du champ d'induction assurant la focalisation axiale



(b) focalisation radiale



(c) limite de focalisation radiale

F force de rappel Focalisation axiale si $\partial B_z / \partial z < 0$

Fig. 6. — Stabilités axiale et radiale dans le bétatron.

$$T = \frac{2\pi m}{eB}$$

Les particules décrivent des orbites en forme de spirale partant du centre où elles sont injectées vers le bord d'où elles sont extraites. À l'intérieur des électrodes, les particules ne sont soumises à aucun champ haute fréquence, mais au passage d'une électrode à l'autre, elles sont toujours accélérées. C'est, en quelque sorte, un accélérateur linéaire dont la trajectoire aurait été enroulée. Dans la mesure où l'isochronisme est assuré, il n'y a pas de problème de stabilité azimutale; la stabilité radiale est assurée comme dans le bétatron, mais, suivant la direction de l'axe, les particules ne sont ramenées dans le plan médian de l'accélérateur que si l'on accepte une légère décroissance radiale de l'induction B_z ; celle-ci entraîne, après un certain nombre de tours, un déphasage tel que les particules, au lieu d'être accélérées, peuvent être freinées. Pour cette raison, l'énergie atteinte dans les cyclotrons classiques (fig. 8, p. 6) ne dépasse guère 10 MeV en protons et 20 MeV en deutons [4].

Thomas [5], imaginant en 1938 le cyclotron à variation azimutale de champ — préfigurant le principe de la focalisation forte (ou alternée) dont il sera question par la suite (§ 2,7) — devait tourner cette limite; la version moderne de ces *cyclotrons isochrones* sera décrite au paragraphe 3,5.

2,5 SYNCHROCYCLOTRONS

Dès 1945, Mac Millan aux États-Unis et Veksler en URSS, étudiant le mouvement en phase dans les cyclotrons, proposaient simultanément un autre moyen de repousser largement la limite d'énergie de ce type d'accélérateurs.

Leur appareil reçut le nom de *synchrocyclotron* aux États-Unis et de *phasotron* en URSS.

Dans le cyclotron, l'accélération a lieu tant que la relation :

$$f = eB / 2\pi m$$

reliant la fréquence f du champ alternatif accélérateur à l'induction magnétique B et à la masse m des particules reste vérifiée. Mais on a vu (§ 2,3) qu'il fallait faire légèrement décroître B avec le rayon; de plus, quand l'énergie augmente, la masse m croît.

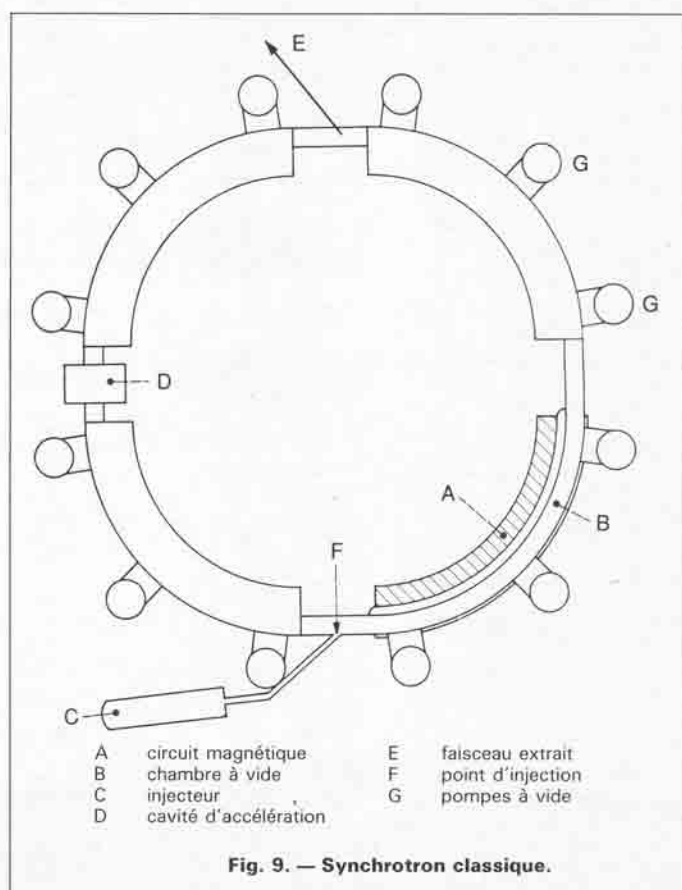
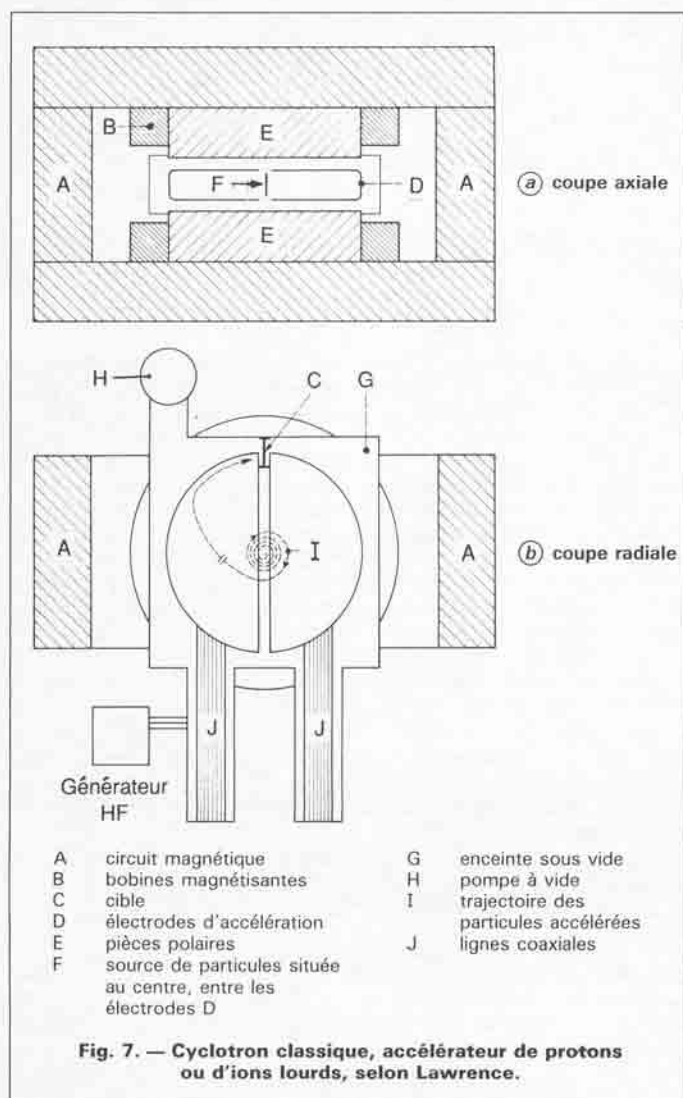
Mac Millan [6] et Veksler [7] proposèrent de réduire la fréquence f en fin d'accélération, de manière à assurer le maintien d'une relation de phase favorable.

Quelques grandes machines de ce type ont été construites, mais la mise au point des *cyclotrons isochrones* (§ 3,5) les a supplantées, car leur caractère cyclique rend leur intensité sensiblement plus faible.

2,6 SYNCHROTRONS

Le principe du synchrocyclotron pourrait être utilisé pour atteindre des énergies très élevées. Cependant, il faudrait alors agrandir considérablement l'électroaimant, ce qui augmenterait démesurément la masse et le prix de revient. Le phasotron de Dubna dont les pièces polaires ont 6 m de diamètre, par exemple, pèse 7 000 t.

Il semble que ce soient Oliphant et Crane [9] qui, peu de temps après l'invention du synchrocyclotron, en 1946, aient les premiers proposé un moyen pour réduire sensiblement la masse de l'électroaimant de l'accélérateur. Au lieu d'avoir une orbite spirale, leur machine, appelée *synchrotron*, a une orbite circulaire. Il n'est plus



nécessaire que le champ magnétique de déflexion soit appliqué sur tout l'intérieur d'un cercle, il suffit qu'il existe sur une couronne entourant l'orbite, maintenue fixe tout au long de l'accélération. De même, le champ électrique haute fréquence d'accélération peut être localisé en quelques points le long de cette orbite.

D'après les relations :

$$B = mv / eR$$

$$f = eB / 2\pi m$$

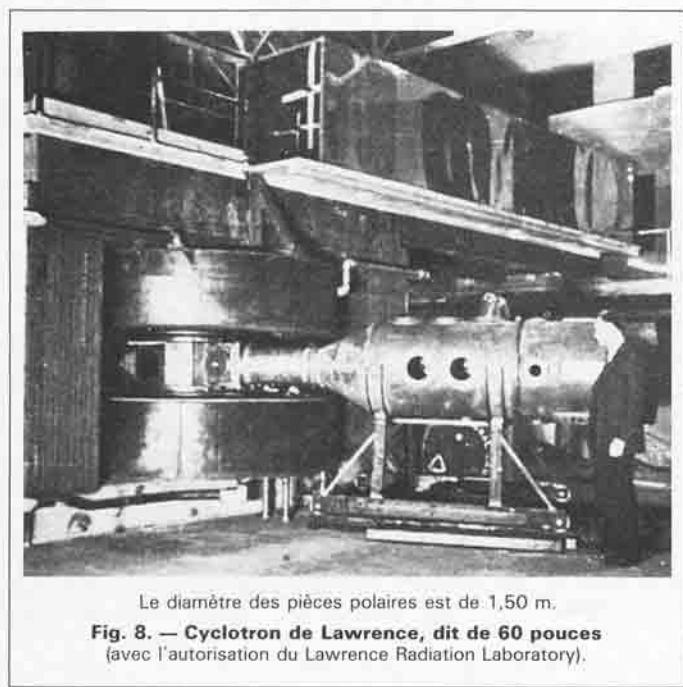
et

on voit que, pour maintenir constant le rayon R de l'orbite, il faut faire varier simultanément l'induction magnétique B et la fréquence du champ accélérateur (égale à f ou à un multiple de f).

La figure 9 montre le schéma d'un synchrotron classique à protons. L'électroaimant est composé de quatre quadrants entre lesquels on injecte le faisceau de protons, on l'accélère et on l'extrait. Le champ magnétique doit croître progressivement au cours de l'accélération : l'alimentation de l'électroaimant (qui doit être feuilleté) exige une installation de plusieurs mégawatts dans les grands accélérateurs.

Il n'est pas possible de commencer l'accélération avec un champ nul à cause du champ rémanent des circuits magnétiques; les particules injectées dans la machine doivent donc être déjà douées d'une assez grande vitesse. On les accélère au préalable dans un accélérateur électrostatique ou linéaire. Ce n'est plus au moyen d'électrodes en forme de D, mais en créant un champ alternatif dans une fente pratiquée dans une cavité résonnante entourant l'orbite (semblable aux cavités de klystrons) que se fait l'accélération dans le synchrotron.

L'accélération est cyclique, mais ce n'est plus seulement la fréquence qui doit varier mais également le champ magnétique; même sur une couronne seulement, celui-ci peut accumuler une énergie élevée et la période du cycle est souvent de l'ordre de la seconde. L'intensité accélérée se trouve donc assez faible.



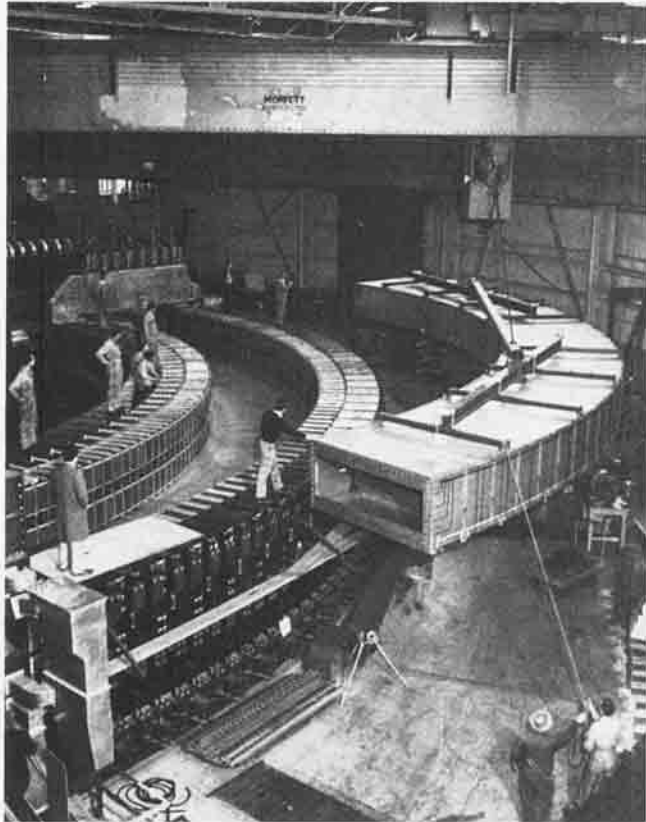


Fig. 10. — Bévatron de Berkeley lors de sa construction (avec l'autorisation du Lawrence Radiation Laboratory).

Il existe des synchrotrons à électrons et à protons. Celui de Berkeley, qui accélère des protons à 6,2 GeV et a permis, dès sa mise en service en 1955, la découverte de l'antiproton, est montré lors de sa construction, sur la figure 10.

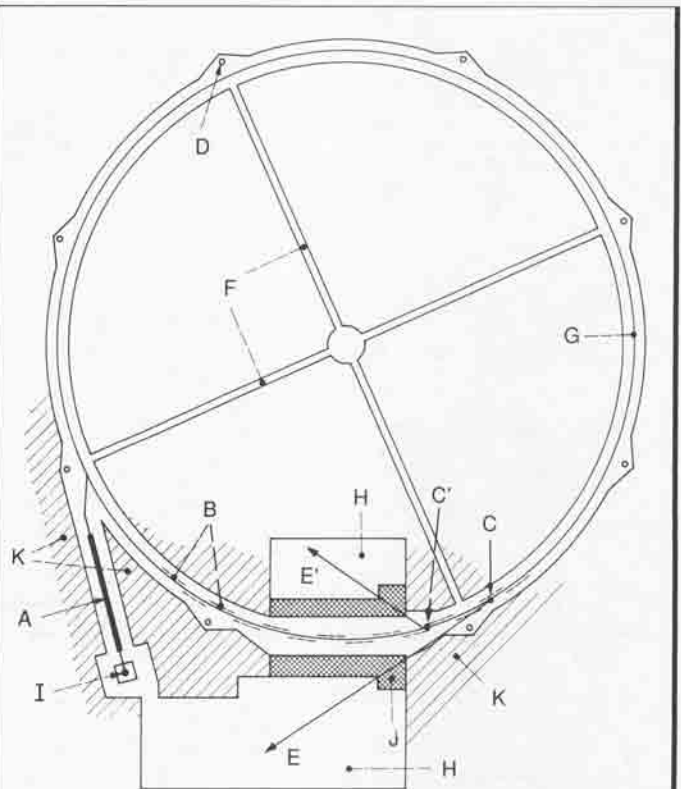
2.7 SYNCHROTRONS À FOCALISATION FORTE

Le principe du synchrotron a permis de reculer largement la limite d'énergie des accélérateurs. Cependant, les dimensions du Bévatron par exemple pouvaient faire penser, dès sa construction, qu'une nouvelle limite était atteinte (fig. 10).

Dans le synchrotron (§ 2.6), le champ magnétique de déflexion est créé par une couronne d'électroaimants entourant l'orbite circulaire des particules. En pratique, les particules sont susceptibles d'osciller autour de cette orbite et le champ magnétique doit s'étendre sur un volume annulaire assez grand.

En 1952, Courant, Livingston et Snyder [11] à Brookhaven, puis le grec Christophilos imaginèrent un nouveau moyen de canaliser efficacement les particules accélérées autour de leur orbite théorique. Il devenait ainsi possible de réduire très sensiblement les dimensions de l'électroaimant.

Quel est ce principe nouveau qui reprend, en réalité, l'idée de Thomas mentionnée (§ 2.4) à propos des cyclotrons ? On a expliqué à propos du bévatron (§ 2.3) comment, en profilant les pièces polaires, on pouvait assurer une focalisation transversale des particules. En particulier, on a vu que, pour assurer une focalisation verticale, il fallait que l'index du champ n soit positif ; la focalisation est d'autant plus intense que n est plus grand. Mais, pour assurer la focalisation radiale, n doit être inférieur à 1 ; cette focalisation radiale est d'autant plus intense que n est plus inférieur à 1 ou négatif. Ces deux exigences contradictoires semblent limiter la focalisation possible. Dans les synchrotrons classiques, les particules peuvent alors



- | | | | |
|-------|------------------------------|---|---------------------------------|
| A | accélérateur linéaire 50 MeV | G | orbite (diamètre : 200 m) |
| B | électroaimant | H | salles d'expériences (hall sud) |
| C, C' | cibles | I | source d'ions |
| D | repères de triangulation | J | mur de béton amovible |
| E, E' | particules secondaires | K | murs de terre ou de béton |
| F | couloirs de contrôle | | |

L'accélérateur est dans un tunnel recouvert d'au moins 5 m de terre.

Fig. 11. — Synchrotron à protons (PS) de 28 GeV du CERN dans son état initial, à l'issue de sa construction.

effectuer des oscillations de grande amplitude autour de leur orbite moyenne : pour le Bevatron, la figure 10 donne une idée des dimensions ; la chambre à vide du *synchrophasotron* russe a même une section de 200 cm sur 40 cm.

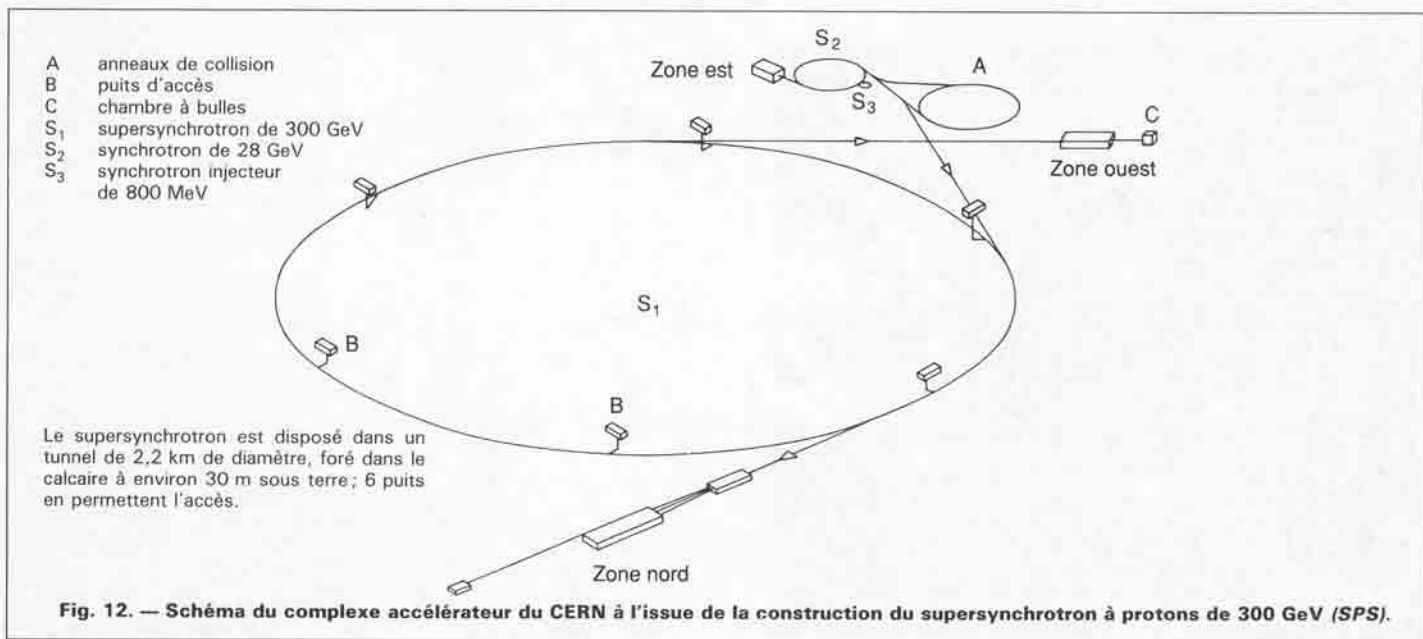
Le procédé nouveau consiste à employer des index très élevés, de plusieurs centaines, alternativement positifs et négatifs, le long de l'orbite. Si un secteur est focalisant verticalement, il est alors défocalisant radialement et inversement. Les intensités de focalisation et défocalisation sont pratiquement égales ; on pourrait alors penser que l'effet global est nul. Mais, considérons en optique un système composé d'une lentille convergente et d'une lentille divergente de distances focales f , séparées par la longueur d . Le système total a une distance focale égale à :

$$d / f^2$$

toujours positive ; il est alors convergent. En choisissant convenablement la longueur des éléments convergents et divergents et leur index, on peut aisément décupler l'intensité de focalisation par rapport au synchrotron classique. Dans les deux premiers **synchrotrons à gradients alternés** construits à Genève et à Brookhaven, d'une énergie de 25 à 30 GeV, la chambre à vide n'a que 15 cm sur 8 cm.

La figure 11 donne un schéma de l'accélérateur du CERN, dans sa conception initiale. La masse des électroaimants est d'environ 3500 t, la puissance nécessaire pour les alimenter 1,5 MW. Le cycle d'accélération, d'une durée de 1 s, est répété toutes les 3 ou 4 s.

L'appareil de Brookhaven a des caractéristiques très voisines. Ces deux accélérateurs ont été achevés en 1959 et 1960.



Après les deux grands accélérateurs de Genève et Brookhaven, d'autres projets plus ambitieux ont été réalisés.

L'URSS a construit à Serpukhov, au sud de Moscou, un grand *synchrophasotron* qui fonctionne depuis 1967. L'énergie atteint 75 GeV et l'injection se fait par un accélérateur linéaire de 100 MeV.

Deux grands accélérateurs fournissant des protons de 300 à 400 GeV ont été achevés aux États-Unis, à Batavia, près de Chicago, en 1972, et au CERN, à Genève, en 1976.

L'accélération dans ces machines se fait par étapes multiples : un accélérateur linéaire (lui-même précédé comme toujours d'un accélérateur électrostatique) suivi de deux ou trois synchrotrons de dimensions croissantes : l'étape finale a un diamètre supérieur à 2 km.

Le schéma des installations du CERN, après la mise en route du synchrotron de 300 GeV, appelé aussi supersynchrotron, est indiqué sur la figure 12. On y voit les diverses accélérations successives. L'injection dans le grand anneau de 2,2 km de diamètre disposé à environ 30 m sous la surface du sol, dans un tunnel foré dans le calcaire, se fait à partir de l'ancien synchrotron de 28 GeV ; celui-ci a été rénové et doté d'un synchrotron injecteur de 800 MeV formé de quatre anneaux superposés fonctionnant en parallèle. Ce synchrotron injecteur est alimenté par un accélérateur linéaire plus récent installé depuis 1979.

À la zone d'expériences initiale du synchrotron de 28 GeV qui continue à être utilisé simultanément pour des expériences de physique, deux ont été ajoutées : la zone est et la zone ouest, terminée en 1972, sur une extension située en territoire français. Cette zone, qui dispose de très grosses installations expérimentales, dont une grande chambre à bulles à hydrogène de 3 m de diamètre où règne une induction de 3,5 T produite par un bobinage supraconducteur, est partagée pour son utilisation entre le synchrotron de 28 GeV et celui de 300 GeV. Une autre très grande zone d'expériences, propre au 300 GeV, s'étend vers le Nord.

2,8 ANNEAUX DE STOCKAGE ET DE COLLISIONS

La figure 12 montre qu'au CERN existe une autre installation : des anneaux de stockage et de collisions, dont la construction a été achevée en 1970-1971 [12 et 13].

Dans les expériences réalisées avec des accélérateurs, on envoie habituellement les particules produites (protons, électrons) sur une cible ; des mesures sont alors faites sur les rayonnements secondaires issus des collisions obtenues.

Or, dans nombre de cas, ces collisions concernent essentiellement des protons et des électrons (les cibles sont souvent d'ailleurs constituées d'hydrogène) et ces particules cibles sont alors pratiquement au repos.

Si, au lieu de produire des collisions entre des particules en mouvement et des particules au repos, on peut faire se heurter des particules se déplaçant en sens inverse, on accroît l'énergie du choc. Les relations de la relativité montrent même qu'alors cette énergie n'est pas celle qui correspondrait au choc sur une particule au repos d'une particule ayant une vitesse double (ce qui ne serait d'ailleurs pas possible si cette vitesse avoisine c), soit quatre fois l'énergie de chaque particule en mécanique classique, mais on dispose d'un facteur multiplicatif élevé en mécanique relativiste quand cette énergie dépasse largement l'énergie au repos. Deux protons de 28 GeV se heurtant de front ne développent pas la même énergie que le choc sur un proton au repos d'un proton d'énergie quadruple (vitesse double), mais d'un proton de 1700 GeV. Le facteur multiplicatif peut être encore plus élevé pour des électrons dont la masse au repos est faible et des anneaux ont surtout été construits pour des électrons.

La différence essentielle entre les anneaux à protons et à électrons réside pourtant dans le fait que, pour ces derniers, le rayonnement électromagnétique, dû à la courbure des trajectoires, joue un rôle prépondérant. Croissant comme la quatrième puissance de l'énergie, c'est lui qui limite l'énergie atteinte et oblige à avoir des machines de grand rayon, donc de grandes dimensions. Il faut, pour maintenir les électrons en circulation, leur fournir une grande puissance d'accélération, qui se trouve ensuite dissipée en rayonnement.

Mais, c'est aussi là un des domaines d'intérêt tout particulier de ces machines, car ce rayonnement, localisé sur les harmoniques de la fréquence de révolution des particules, s'étend sur un spectre tellement large que sa distribution paraît continue, allant, suivant l'énergie, jusqu'à l'ultraviolet lointain et les rayons X. Cet effet, considéré à l'origine comme un obstacle majeur dans la construction des anneaux à électrons, est aujourd'hui en passe de devenir le moyen de disposer d'une source de rayonnement UV ou X d'exceptionnelle qualité.

3 Accélérateurs récents. État actuel et évolution

3,1 ACCÉLÉRATEURS ÉLECTROSTATIQUES

La performance de ces machines est caractérisée par la tension atteinte. Malgré une progression marquée par des étapes successives, la tension de 20 MV représente aujourd'hui une limite dépassée seulement par deux accélérateurs de ce type au monde. Les accélérateurs électrostatiques d'ions généralement de type **tandem** (comme proposé par L. Alvarez au début des années 60) sont soit verticaux, soit horizontaux.

• Dans les **tandems verticaux**, une colonne accélératrice verticale est posée sur le sol ; à son sommet une électrode terminale est portée à un potentiel HT élevé, de signe positif (fig. 13). L'ensemble est disposé dans une enceinte métallique remplie de gaz sous pression ; ce gaz assure une meilleure tenue en tension en cas de claquage électrique. Le potentiel de l'électrode terminale est produit en la chargeant électriquement au moyen d'un système de courroie ou de chaîne qui transporte des charges entre la masse et l'électrode ; le transfert des charges depuis la masse vers le transporteur et de ce dernier vers l'électrode HT se fait par effluve.

À l'intérieur de la colonne est disposé un tube en verre ou en céramique dans lequel règne un vide poussé permettant aux particules accélérées par le champ électrique de circuler librement. Une source, située à la masse, produit des **ions négatifs**, c'est-à-dire des atomes possédant un électron supplémentaire. Ces ions sont d'abord accélérés de la masse vers la haute tension. Dans l'électrode terminale ils sont épluchés ou **strippés** en leur faisant traverser une feuille très mince de carbone ou un rideau de gaz : en passant à proximité des atomes du réseau de carbone ou de molécules de gaz, des électrons périphériques des ions rapides accélérés se trouvent arrachés, rendant **positive** la charge totale (la charge positive du noyau de l'atome n'est plus compensée par un nombre suffisant d'électrons).

Après déflexion par un champ magnétique à l'intérieur du terminal, les ions maintenant positifs sont déviés et renvoyés à nouveau vers le tube où ils sont accélérés en sens inverse, atteignant la base de la colonne d'où ils sont dirigés vers des salles d'expériences. Suivant l'état de charge après stripping (q fois la charge e de l'électron), l'énergie atteinte est plus ou moins élevée : $(q + 1) eV$ si V est le potentiel HT. Cet état de charge dépend du nombre d'électrons arrachés, celui-ci étant fonction de la vitesse des ions au moment du stripping et de l'épaisseur du strippeur, qui doit être optimisée.

• Dans les **tandems horizontaux**, l'électrode HT est disposée au milieu d'une colonne de longueur double tenue à la masse à ses deux extrémités et placée dans une enceinte sous pression (fig. 14). Le principe de l'accélération est identique, mais le faisceau n'a pas à être recourbé dans l'électrode HT : entrée et sortie des ions à haute énergie se font aux extrémités opposées de la machine.

La limite du potentiel où peut être portée l'électrode terminale est imposée par les conditions de tenue en tension et les risques de claquage. Les claquages peuvent se produire soit entre l'électrode HT ou la colonne et l'enceinte, dans le gaz, soit le long du tube accélératrice ou de la colonne ; le mécanisme détaillé est complexe car une petite décharge locale peut, par le jeu des transitoires, en déclencher une totale à un autre endroit.

Dans le tube accélératrice, des claquages peuvent être initiés en particulier par des phénomènes d'émission secondaire. Le potentiel le long de la colonne est distribué par une série d'électrodes qui, dans le tube, sont percées d'un trou pour le passage du faisceau. Quelques ions peuvent, accidentellement, frapper une électrode et émettre des électrons secondaires ; le faisceau peut aussi libérer des électrons en frappant les molécules du gaz résiduel malgré un vide

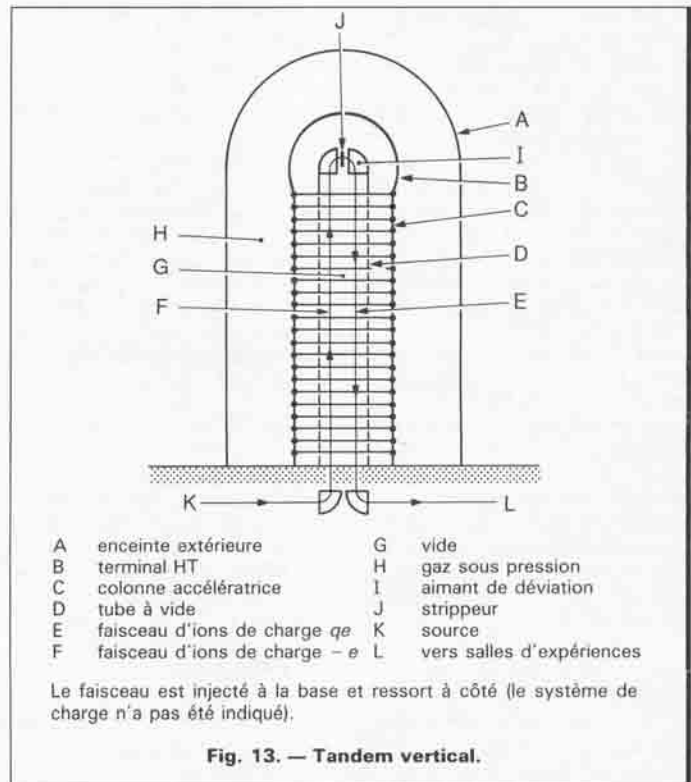


Fig. 13. — Tandem vertical.

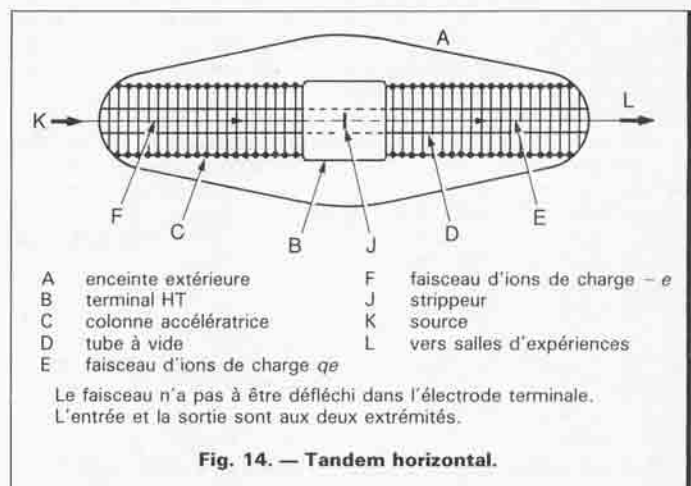


Fig. 14. — Tandem horizontal.

poussé. De tels électrons, accélérés par le champ électrique du tube, risquent, surtout si leur énergie est élevée, en frappant une autre électrode, de libérer de nouveaux électrons et, de proche en proche, de déclencher une décharge. Un tel mécanisme est fortement réduit par l'emploi d'électrodes inclinées par rapport à l'axe, alternativement dans un sens ou dans l'autre ou en disposition hélicoïdale (le faisceau d'ions serpente alors un peu, mais les électrons sont éliminés latéralement) ; d'autres formes d'électrodes sont aussi utilisées avec succès.

Les risques de claquage entre la colonne ou l'électrode terminale et l'enceinte extérieure sont réduits par l'emploi d'un gaz sous pression (généralement l'hexafluorure de soufre, parfois additionné d'azote ou de dioxyde de carbone) dans lequel se dissipe une grande partie de l'énergie électrostatique délivrée au système au cours de la charge (analogue à l'énergie d'un condensateur). Le champ électrique admissible est pourtant limité, ce qui entraîne, pour des tensions élevées, l'adoption de très grandes dimensions. Pour les plus grandes machines (où le diamètre de l'enceinte avoisine dix mètres), l'énergie électrique stockée sous tension peut devenir très élevée; sa libération sur une surface limitée d'électrode dans une décharge qui, dans un temps de l'ordre du centième de microseconde, peut atteindre plusieurs dizaines de milliers d'ampères risque de conduire à de graves dommages. Ces deux considérations : risque de détérioration en cas de claquage et dimensions excessives, imposent une limite aux tensions accessibles. En ce qui concerne les dimensions, dans une géométrie cylindrique coaxiale, le champ varie de façon inversement proportionnelle au rayon; c'est sur la colonne ou l'électrode terminale qu'il est le plus élevé et atteint sa valeur limite. Pour un rapport de diamètre usuel voisin de 3, on est conduit à un diamètre extérieur très grand et le champ sur l'enceinte est relativement faible. Pour pallier cet inconvénient, une méthode adoptée sur plusieurs accélérateurs électrostatiques est de disposer un écran porté à un potentiel intermédiaire entre l'enceinte et l'ensemble électrode-colonne (fig. 15). Dans une telle disposition se trouve aussi assuré un certain partage de l'énergie électrostatique. En cas de claquage, pourtant, les courants de décharge circulent extrêmement vite et peuvent atteindre la valeur dangereuse de plusieurs dizaines de kiloampères.

Un progrès important semble aujourd'hui devoir résulter d'un principe un peu différent proposé par M. Letournel et en cours d'applications dans la réalisation du *Vivitron* à Strasbourg.

Dans cette machine, jusqu'à sept électrodes intermédiaires sont introduites; mais au lieu d'être constituées d'écrans cylindriques, elles sont faites de barres entretroisées (fig. 16) en forme de cages. Par une disposition et un profil convenables, le champ est rendu relativement homogène entre la colonne et l'enceinte dont le diamètre est maintenant plus petit. De plus, en cas de décharge, le trajet du courant sur le treillis des barres doit, selon les calculs, répartir son intensité et ralentir son débit de manière à éviter des valeurs trop élevées dans les claquages. Enfin, ces barres seront supportées par des isolateurs spécialement étudiés donnant à la structure une bonne rigidité mécanique. Le tube accélérateur proprement dit doit aussi être protégé par un système d'électrodes colonne de conception nouvelle.

Le principe du *Vivitron* a été essayé sur un tandem de 13 MV, sur lequel diverses modifications et l'adjonction d'une couronne de barres ont permis d'élever la tension à une valeur comprise entre 17 et 18 MV.

3,2 POSTACCÉLÉRATEURS POUR TAMDÉMS. IONS LOURDS DE GRANDE ÉNERGIE

Depuis longtemps des accélérateurs électrostatiques ont été employés conjointement avec d'autres accélérateurs, synchrotrons ou plus récemment cyclotrons, dont ils constituent l'injecteur ou comme premier élément d'une cascade, par exemple devant un accélérateur linéaire puis un synchrotron. Pour la physique, c'est la machine finale qui, normalement, fixe les caractéristiques : énergie, intensité, mais aussi qualité du faisceau, finesse et précision de l'énergie, souplesse de fonctionnement.

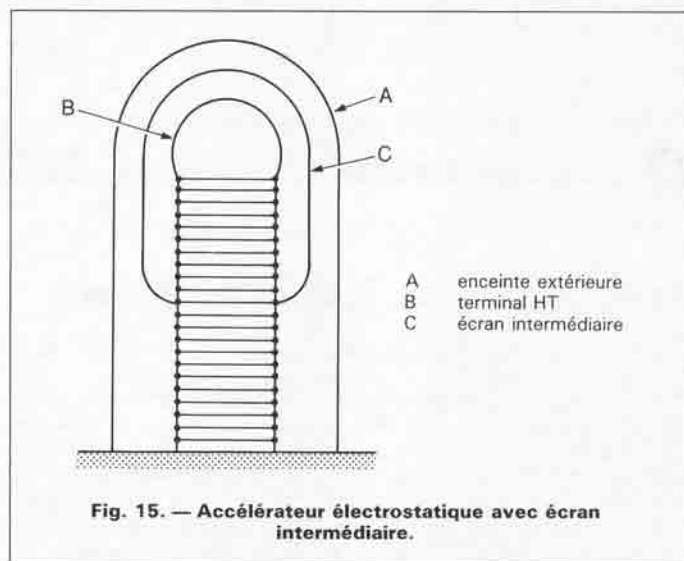


Fig. 15. — Accélérateur électrostatique avec écran intermédiaire.

Depuis la fin des années 70 et surtout depuis la décennie suivante, on a vu apparaître des installations destinées à satisfaire les besoins d'ions énergétiques normalement couverts par les accélérateurs électrostatiques, mais avec des énergies plus élevées, facilement réglables comme celles des tandems, et avec un faisceau de même qualité très fine.

Ce résultat est obtenu par l'adjonction d'une suite de cavités radiofréquences très courtes, possédant deux ou trois intervalles accélérateurs au maximum, de fréquence fixe mais de phase réglable individuellement sur chaque cavité. Le faisceau du tandem est préalablement haché et groupé en paquets très courts occupant une dizaine de degrés de phase RF à une fréquence d'une centaine de mégahertz, par exemple. Par un choix et un réglage précis de l'amplitude et de la phase du champ dans les cavités et la mise en place d'une focalisation appropriée, il est possible d'accélérer le faisceau sans détériorer ses qualités. Avec quelques dizaines ou centaines de cavités, on peut aisément fournir des tensions accélératrices de plusieurs dizaines, voire une centaine de mégavolts.

Le premier postaccélérateur, construit à Munich et en service depuis 1979, employait une cavité longue mais de fréquence et de géométrie réglables. Depuis lors, ce sont des cavités indépendantes courtes qui sont adoptées. A Heidelberg, ces cavités fonctionnent à température ordinaire. Mais aujourd'hui on a recours à des cavités supraconductrices. C'est le cas à Argonne, près de Chicago, à Stonybrook près de New York, à l'Université de Floride et tout récemment à Saclay où sont employées des hélices courtes comme structures accélératrices. De nombreux autres projets sont en cours de réalisation.

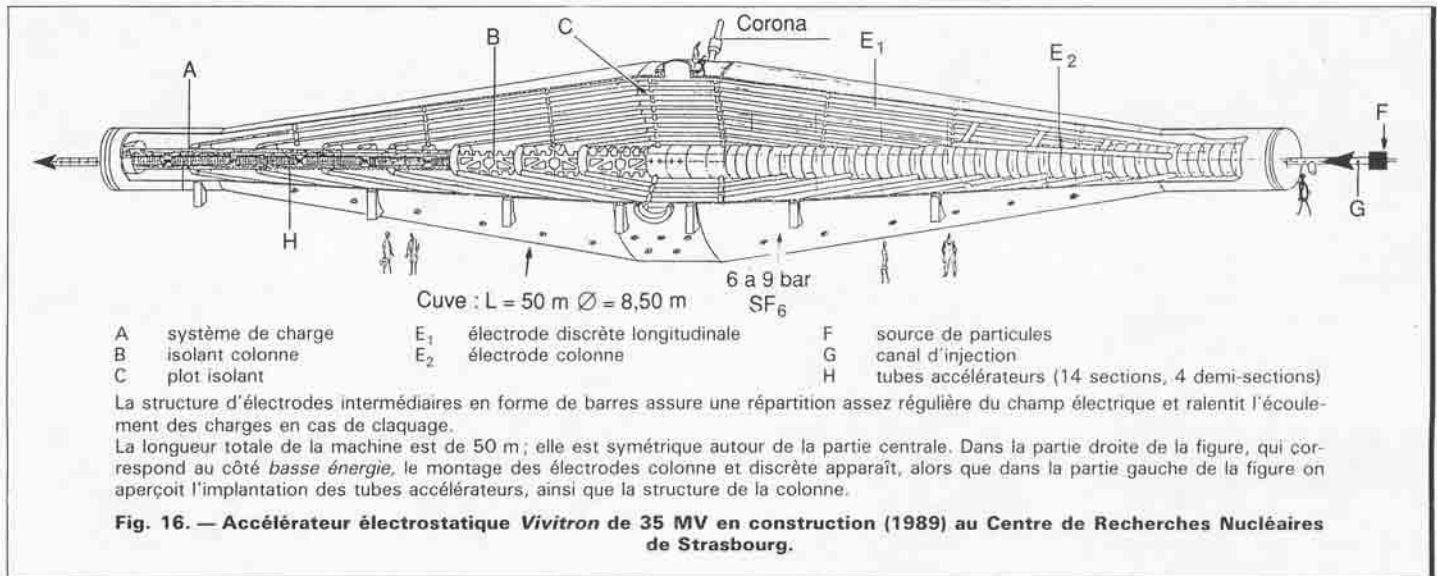
Ce développement rapide, apparu au cours des années 80, résulte à la fois de la maîtrise atteinte en supraconductivité radiofréquence et de l'emploi de commandes par ordinateur très élaborées permettant le réglage de nombreuses cavités suivant des lois de phase variables selon la particule accélérée et l'énergie requise.

Pour atteindre des énergies plus élevées, le type d'accélérateur le plus couramment utilisé est le *cyclotron*. Pour aller au-delà, on a utilisé des synchrotrons destinés précédemment à l'accélération de protons.

Ce fut le cas à Berkeley avec le Bevatron qui, avec pour injecteur l'accélérateur linéaire d'ions lourds du laboratoire, est devenu le *Bevalac*.

C'est le cas à Saclay où, avec un accélérateur linéaire à focalisation radiofréquence (RFQ, § 3,3) et un petit synchrotron postaccélérateur dénommé MIMAS, construit pour cet usage, le synchrotron Saturne accélère actuellement des ions lourds.

C'est aussi le cas à Brookhaven où l'association d'un tandem et de l'AGS (*Alternating Gradient Synchrotron*, § 2,7), aujourd'hui en service, a pour projet d'être complétée par la construction d'un grand anneau d'accélération et de collision RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*).



3,3 ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES A FOCALISATION RADIOFRÉQUENCE POUR PROTONS ET IONS

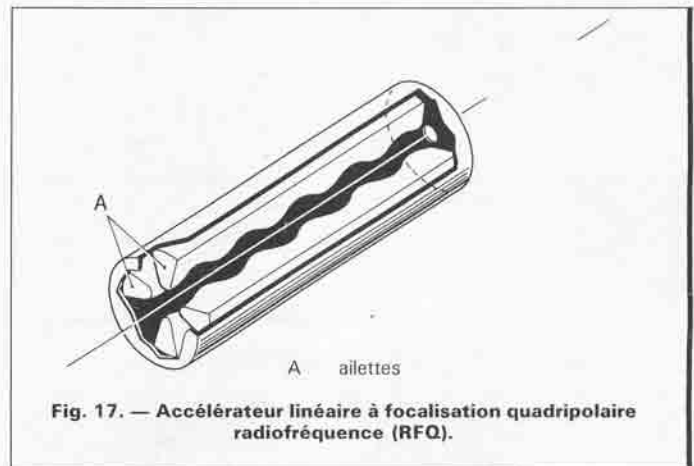
Dans un accélérateur linéaire d'ions, la focalisation des particules est réalisée habituellement par l'emploi de lentilles magnétiques quadripolaires disposées dans les tubes de glissement. Comme des champs magnétiques relativement intenses doivent être créés et que la dimension des tubes de glissement ne peut être trop grande sous peine d'entraîner des pertes radiofréquences élevées sur leurs parois, on est conduit à un compromis ; la situation est particulièrement défavorable aux très basses énergies (tubes de glissement courts, faible action du champ magnétique, l'emploi de lentilles électrostatiques présentant d'autres difficultés). D'où la nécessité d'avoir recours à un préinjecteur électrostatique de tension élevée (0,5 ou 0,75 MV, voire davantage).

Depuis 1956, il avait été proposé d'utiliser le champ accélérateur lui-même, en lui conférant une composante quadripolaire, pour assurer la focalisation. Après plusieurs propositions infructueuses mettant en œuvre ce principe (paires de doigts sur les faces opposées des tubes de glissement dans les intervalles accélérateurs, emploi de tubes de glissement de forme rectangulaire ou, du moins percés d'orifices rectangulaires), un progrès décisif a été réalisé à la fin des années 70 par la mise au point à Los Alamos [14] aux États-Unis (développant une idée proposée par I. Kapchinskij [15] en URSS) d'un accélérateur dont la géométrie est schématisée sur la figure 17.

Quatre ailettes (*vanes*), disposées dans une cavité radiofréquence, sont portées à un potentiel correspondant à une configuration quadripolaire (répartition $+-+-$ sur les ailettes). Le champ résultant, pour une particule circulant au voisinage de l'axe de la cavité, assure une focalisation quadripolaire alternée, puisque le champ varie sinusoidalement au cours du temps. Si le profil des ailettes était continu, aucune accélération n'aurait lieu. Si, par contre, leur profil est modulé en se déplaçant le long de l'axe, le champ électrique présente une composante parallèle à l'axe ; avec une périodicité convenable (comme pour les tubes de glissement classiques), on peut obtenir une accélération régulière.

L'originalité de l'accélérateur RFQ est que la forme du profil des ailettes autour du faisceau est calculée de manière à supporter un champ purement théorique, somme d'un champ accélérateur et d'un champ quadripolaire de focalisation.

Les accélérateurs RFQ se révèlent, aux basses énergies, extrêmement performants, assurant le groupement du faisceau et son accélération même à des intensités élevées, avec un rendement voisin de 100 %. Ils remplacent couramment aujourd'hui les installations de préinjecteurs à haute tension des accélérateurs linéaires de protons de type Alvarez. Ils se révèlent également très efficaces pour les ions de faible énergie.



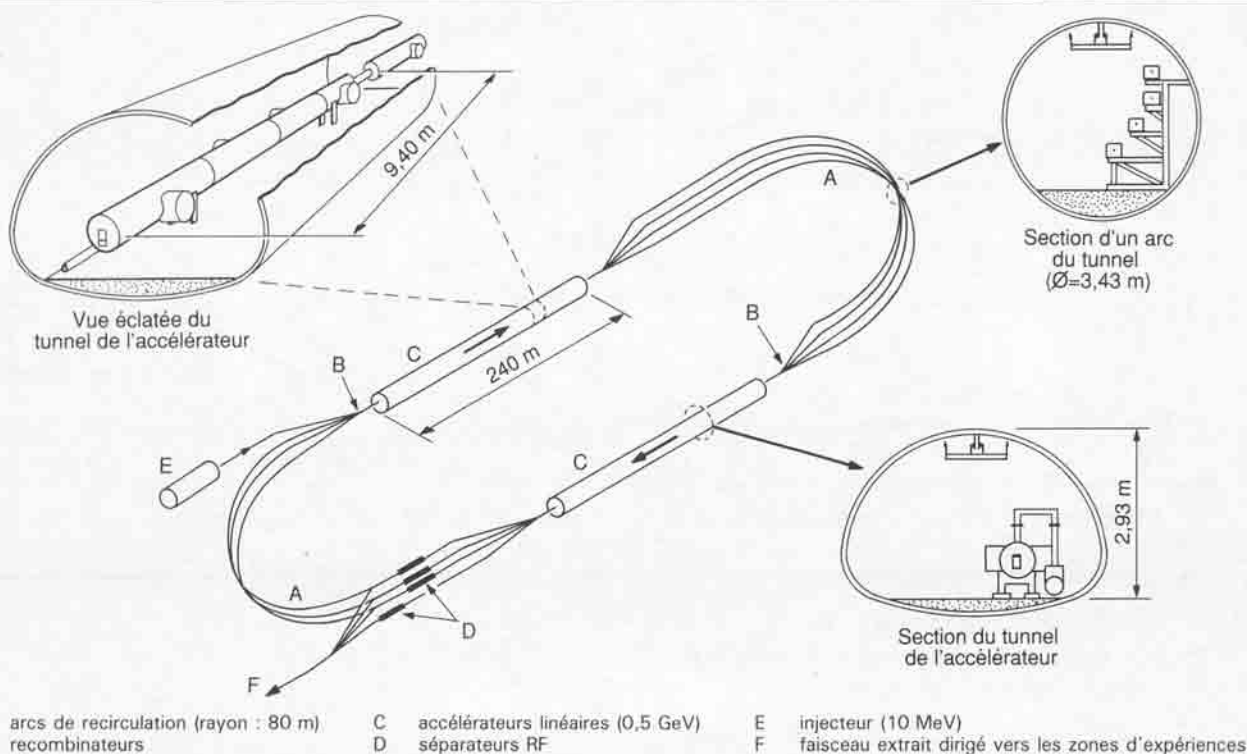
3,4 ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES D'ÉLECTRONS A CAVITÉS SUPRACONDUCTRICES

Pour obtenir une accélération assez rapide dans une machine linéaire, il faut mettre en œuvre des champs intenses qui entraînent des grandes pertes radiofréquences dans les cavités accélératrices : dans les grands accélérateurs linéaires d'électrons, les puissances RF crête se chiffrent en milliers de mégawatts, malgré l'optimisation de la forme des cavités.

Les progrès dans la maîtrise de la supraconductivité radiofréquence apportent aujourd'hui une solution à ce problème de puissance : un accélérateur linéaire de 6 à 8 GeV faisant appel à cette technique a été entrepris aux États-Unis dans l'état de Virginie en 1987.

Contrairement aux accélérateurs classiques qui ne peuvent fonctionner qu'en impulsions brèves (1 microseconde, voire moins), les cavités supraconductrices sont normalement alimentées en ondes radiofréquences entretenues ou, sinon, en impulsions longues ; l'intensité moyenne du faisceau peut alors être plus élevée.

En contrepartie, la supraconductivité est sujette à certaines contraintes ; en particulier, elle disparaît lorsque le champ magnétique dépasse certaine valeur critique ou, surtout, si des échauffements locaux atteignent la température critique. Aussi le champ accélérateur dans les cavités supraconductrices est-il généralement limité à une valeur plus faible que dans les cavités à tempéra-



Cette installation utilise deux accélérateurs linéaires supraconducteurs où les électrons circulent plusieurs fois, recevant dans chaque segment une énergie de 0,5 GeV. Sur chacun d'eux sont disposées 200 cavités RF d'environ 50 cm de longueur, opérant à une fréquence de 1,5 GHz.

Fig. 18. — Accélérateur linéaire d'électrons à cavités supraconductrices.
Projet CEBAF (Continuous Electron Beam Accelerator Facility)
à Newport News (Virginie, USA).

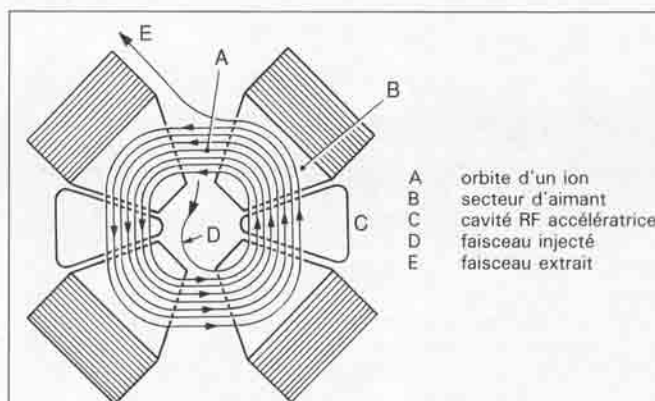
ture ordinaire. Pour circonvenir cet inconvénient, on a recours dans la machine américaine à plusieurs passages du faisceau dans les cavités accélératrices. Dans cet accélérateur à recirculation (recyclotron), on peut avoir ainsi quatre accélérations successives dans les sections linéaires sur lesquelles sont installées plusieurs centaines de cavités d'environ 50 cm de longueur. Le retour se fait, après chaque passage, dans des boucles différentes puisque l'énergie des électrons n'y est pas la même (fig. 18). Dans chaque boucle on peut extraire le faisceau en totalité ou en partie pour l'envoyer vers des aires expérimentales. On peut ainsi disposer de faisceaux de plusieurs énergies.

Une telle machine est séduisante ; sa mise au point et ses réglages exigeront pourtant encore des études. Si la supraconductivité élimine ou, du moins, réduit considérablement les pertes, elle rend aussi les cavités très sensibles aux possibilités d'excitation de champs parasites par le faisceau lui-même, surtout si celui-ci est intense.

3,5 CYCLOTRONS A SECTEURS. CYCLOTRONS SUPRACONDUCTEURS

Le cyclotron classique a son énergie limitée par le fait que la focalisation axiale du faisceau ne peut être assurée qu'au prix d'un défaut de synchronisme qui limite le nombre d'orbites susceptibles d'être accélérées.

L'invention par Thomas du cyclotron à variation azimutale de champ [5] a dû attendre plus de vingt ans pour que des machines utilisant ce principe voient le jour, au cours de la décennie 1960. Depuis la fin des années 70, de gros cyclotrons ont été construits et sont aujourd'hui en service. Ils sont, en général, du type à secteurs séparés à faces radiales (exceptionnellement spiralées).

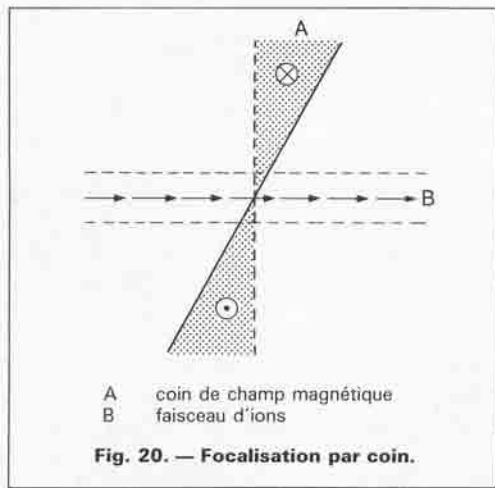


Des systèmes de déflexion non représentés sur la figure permettent d'injecter le faisceau sur une orbite du cyclotron et, après accélération, de l'en extraire.

Fig. 19. — Cyclotron à secteurs séparés.

Dans une telle machine, les orbites ont l'allure représentée sur la figure 19. On a montré le cas de quatre secteurs (il y en a au minimum trois), c'est-à-dire quatre aimants séparés assurant chacun une déviation de 90° avec un champ uniforme et des faces rigoureusement radiales par rapport au centre de la machine. Comme les orbites sont rectilignes entre les secteurs (dans les sections droites), elles n'y pénètrent pas normalement à leurs faces d'entrée. Cela produit un effet de focalisation par coin.

Par rapport à des faces normales, un coin introduit une zone triangulaire de champ (fig. 20) et les particules sont soumises à une déviation qui varie linéairement avec leur position radiale ; cet effet



radial est donc exactement semblable à celui d'une lentille quadripolaire. Comme les champs de fuite au bord d'un coin sont obliques, ils produisent par ailleurs une action dans la direction perpendiculaire, c'est-à-dire axiale pour le cyclotron; on peut montrer que cet effet complète exactement l'effet de lentille quadripolaire radiale mentionné précédemment. L'ensemble d'un cyclotron à secteurs de déviation comporte ainsi une succession de lentilles et de secteurs de déviation, sa focalisation est périodique et alternée dans le sens radial. Pour un angle convenable des secteurs, suivant leur nombre, on peut avoir une bonne focalisation tant dans la direction radiale que dans la direction axiale, tout en maintenant un parfait isochronisme (même en assurant les corrections relativistes).

Comme on l'a dit, plusieurs grandes machines de ce type ont été construites aujourd'hui. Dans le GANIL (Grand Accélérateur National d'Ions Lourds), à Caen, par exemple, trois cyclotrons en cascade assurent l'accélération (fig. 21).

Le premier est un cyclotron injecteur de petit diamètre. Comme on le voit sur la figure, il en existe deux : de cette façon, l'exploitation de l'ensemble accélérateur peut se poursuivre pendant que des transformations sont apportées à l'un des injecteurs; ce fut le cas pour tirer parti des progrès réalisés dans les sources d'ions.

Le faisceau issu du petit cyclotron injecteur (diamètre inférieur à deux mètres) est ensuite injecté dans un grand cyclotron à quatre secteurs, dont l'orbite externe atteint 6 m de diamètre (les aimants, dont le retour de culasse se fait par l'extérieur, occupent plus du double en dimension transversale).

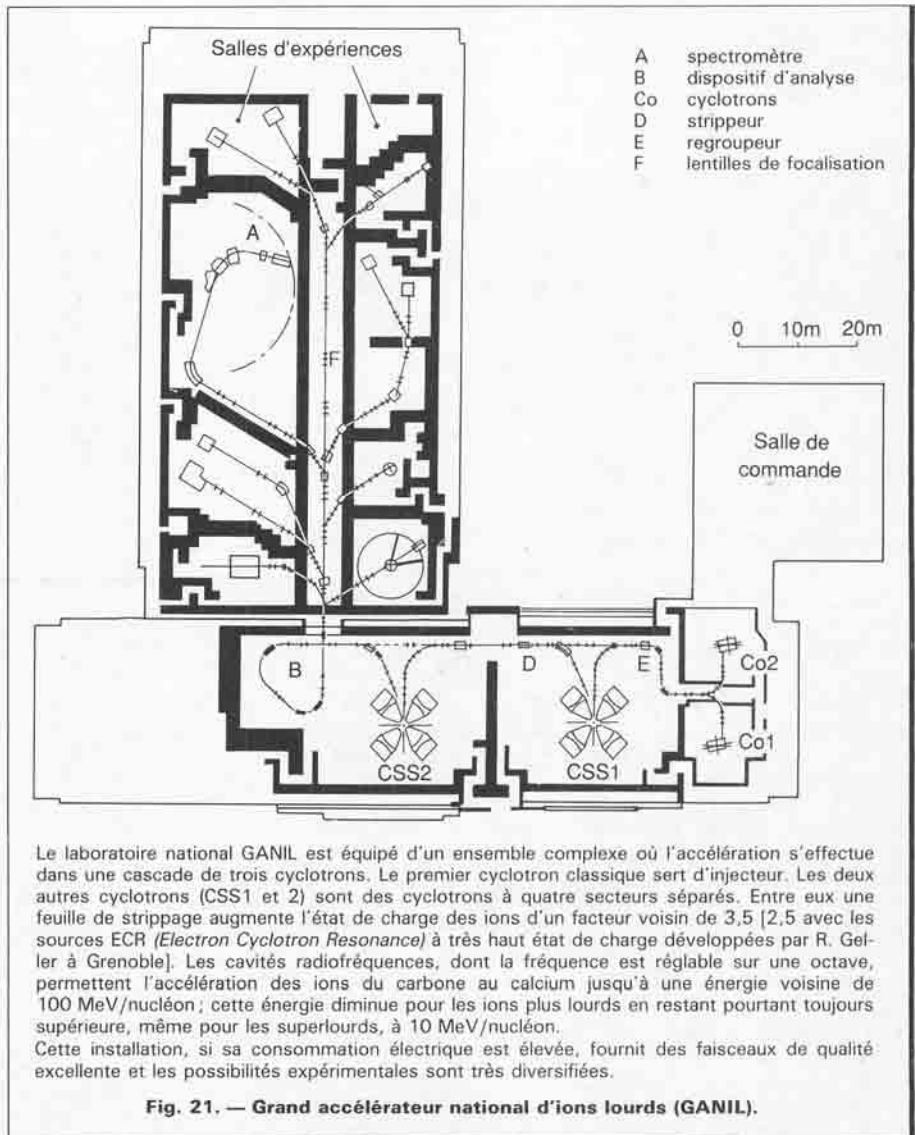
Le faisceau d'ions est ensuite épluché pour augmenter son état de charge et injecté dans un deuxième cyclotron à secteurs similaire au premier.

Enfin le faisceau est envoyé vers des aires expérimentales et dirigé sur la cible d'une des salles d'expériences pour la physique.

Si la machine décrite est l'une des plus performantes, il en existe un certain nombre de plus petites, entre autres à Grenoble, en République fédérale d'Allemagne (à Berlin en particulier), aux Pays-Bas, en Belgique, en Suède, sans parler des États-Unis et du Japon. De grandes machines tirant parti de l'expérience du GANIL ont été construites en Chine et au Japon.

L'inconvénient de telles installations est leur **grande consommation d'énergie** (plusieurs mégawatts, simplement pour créer le champ magnétique des secteurs). Aussi a-t-on cherché à tirer parti, pour la construction des grands cyclotrons, des progrès de la supraconductivité.

On sait, assez couramment, construire aujourd'hui des aimants supraconducteurs avec des champs magnétiques de 5 ou 6 T. L'emploi de tels champs réduit le diamètre des orbites des cyclo-



trons. Une telle réduction n'a pourtant pas que des avantages. D'abord pour un même nombre de tours au cours de l'accélération, les orbites successives sont plus serrées ce qui ne facilite pas l'injection et l'extraction. Ces opérations se font d'ailleurs normalement par l'emploi combiné de champs électriques et magnétiques (dispositifs à septum); or, si l'induction magnétique *B* peut être multipliée par un facteur de l'ordre de 3, grâce à la supraconductivité, le champ électrique limite conserve sa valeur habituelle; il a donc fallu mettre au point des dispositifs plus complexes. Par ailleurs, dans les cyclotrons à secteurs non supraconducteurs, le champ magnétique se referme dans des culasses en fer doux. De telles culasses ne peuvent assurer le guidage de champs de 5 ou 6 T et il est impossible d'éviter la présence de champs de fuite intenses s'étendant loin autour du cyclotron. Pour que le faisceau puisse traverser sans dommage des champs de fuite, dont la distribution dépend de l'intensité du champ principal, des précautions particulières doivent être prises et, de toute façon, une zone assez large doit être laissée libre autour de la machine.

Quoiqu'il en soit, si l'intensité de ces cyclotrons est un peu réduite par rapport à ceux utilisant des aimants à secteurs classiques, la finesse des faisceaux accélérés est en contrepartie très bonne.

De gros cyclotrons supraconducteurs ont été construits aux États-Unis (Université de Michigan) et au Canada (Chalk River près d'Ottawa). Un certain nombre d'autres sont en construction, en particulier à Milan, pour l'université de Catane en Italie, et à Orsay, pour Groningen aux Pays-Bas.

Les plus gros cyclotrons, qu'ils soient à aimants conventionnels ou supraconducteurs, peuvent fournir à des ions de charge q et de masse atomique A une énergie de l'ordre de 100 A MeV pour des ions dont le rapport q/A est égal à ou proche de $1/2$ et au maximum $(A/2q)^2$ fois moins pour les ions très lourds.

3,6 GRANDS SYNCHROTRONS ET ANNEAUX DE COLLISION. TECHNIQUES DE REFROIDISSEMENT

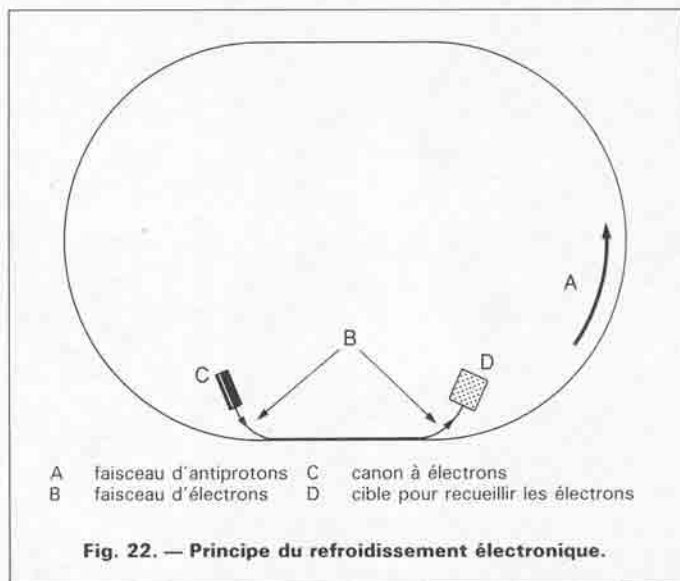
La poussée vers les énergies très élevées pour les besoins de la physique des particules élémentaires avait conduit, au milieu des années 70, à la construction de deux grands synchrotrons à protons (§ 2,7). Ces réalisations faisaient suite à celle d'un anneau de stockage et de collision de protons au CERN.

Même si les expériences réalisées avec des anneaux de collisions sont peu variées, leur qualité résultant de la grande stabilité de l'opération (circulation des faisceaux pendant des heures ou des journées entières) et l'énergie de collision très élevée qu'elles permettent d'observer ont suscité un grand intérêt pour ce type de machines. La mise au point réussie en URSS, après près de vingt ans de travail, de la *méthode de refroidissement* inventée par le Professeur Budker et ensuite celle d'une autre méthode complémentaire devaient renforcer cet intérêt et étendre encore le développement de la technique des collisionneurs.

La probabilité de collisions entre particules de deux faisceaux dépend non seulement du nombre de particules qui circulent dans chacun d'eux, mais aussi de la façon dont ces particules sont distribuées. Plus les faisceaux sont denses, c'est-à-dire plus ils sont concentrés, avec des dimensions plus petites, plus les collisions sont nombreuses. Or la dimension transversale d'un faisceau résulte du fait que toutes ses particules n'ont pas la même trajectoire, mais oscillent autour de la trajectoire d'équilibre avec des amplitudes plus ou moins grandes, c'est-à-dire avec des énergies transversales plus ou moins grandes. La terminologie de *température* assimile ce mouvement transversal à une agitation de même type que l'agitation thermique : la température caractérise l'énergie transversale moyenne.

En réalité, un renforcement de la focalisation peut réduire les dimensions du faisceau mais, comme le montre la théorie, il existe un invariant, appelé *émittance*, qui, s'il reste constant dans un système parfait, ne peut qu'augmenter en présence de perturbations ou de défauts de caractère statistique, tels que les collisions sur le gaz résiduel. Il y a alors une certaine analogie entre l'émittance d'un faisceau et l'entropie d'un gaz. Dans ces conditions, le bon fonctionnement d'anneaux de collisions suppose que l'on y a injecté des faisceaux de la meilleure qualité possible et, surtout, que les anneaux sont assez parfaits (pression de 10^{-9} Pa) pour que cette qualité ne se dégrade pas. Améliorer le fonctionnement au-delà de ces règles simples semble donc impossible. L'objectif des méthodes de refroidissement est de contourner cette limite théorique.

• L'idée du Professeur Budker, appelée **refroidissement électronique** repose sur le principe suivant. Si un faisceau de protons de température élevée circule dans un faisceau dense d'électrons, de même vitesse moyenne, mais de basse température (faisceau laminaire, à trajectoires presque rectilignes), les collisions entre les deux *gaz de particules*, même rares, auront pour effet, en tendant vers une égalisation des températures, de refroidir le gaz de protons, c'est-à-dire de le rendre plus dense. Le dispositif pratique est schématisé sur la figure 22 : sur un tronçon rectiligne de l'anneau de stockage



de protons, on fait circuler un faisceau très intense d'électrons, issu d'un canon spécialement étudié pour assurer une qualité optimale du faisceau ; celui-ci est amené par une accélération électrostatique à une vitesse rigoureusement égale à celle de circulation des protons (il faut noter que pour obtenir cette égalité de vitesses la tension d'accélération des électrons n'est qu'environ $1/2000$ de celle correspondant à l'énergie des protons). A chaque passage, si les protons se refroidissent, les électrons s'échauffent mais à chaque tour ce sont de nouveaux électrons *frais* qui interagissent en partant toujours d'une très basse température. Si l'intensité du faisceau d'électrons est suffisante, sa densité assez grande et sa température basse, on peut observer un refroidissement notable du faisceau de protons en des temps souvent très inférieurs à la seconde.

L'intérêt de la technique ne s'applique pourtant pas aux faisceaux de protons dont la qualité initiale peut être bonne : la méthode semblerait alors bien complexe pour un gain limité. Par contre, elle a permis d'envisager la possibilité de réaliser des collisions avec un *faisceau d'antiprotons*. Les antiprotons sont produits par paires protons-antiprotons dans des collisions de très grande énergie et ils y sont émis dans toutes les directions (dans le centre de masse) ; les faisceaux que l'on peut en extraire, à moins de n'en prendre qu'une partie infime, ont une mauvaise qualité, une *température élevée*. Sans refroidissement on ne peut ainsi, si l'on réalise, par exemple, des collisions proton-antiproton, obtenir que des statistiques très pauvres. Par contre, des mesures précises deviennent possibles si l'on dispose d'une bonne méthode de refroidissement.

• Une autre méthode de refroidissement est le **refroidissement stochastique**. Cette méthode a pu être considérée comme analogue au *démon de Maxwell* en thermodynamique : celui-ci repèrerait les particules de grande amplitude et les ramènerait sur l'axe. On fait en pratique appel à une sorte d'amplification à contre-réaction qui amortit les oscillations du faisceau résultant de son caractère granulaire, écrétant tout défaut et réalisant un effet de lissage. Dans ce dispositif (fig. 23), on dispose le long de la circonférence de l'anneau de stockage des systèmes d'électrodes sensibles aux déplacements transversaux du faisceau (dans les deux directions transversales) et, après amplification dans un circuit à très large bande (plusieurs gigahertz), on applique ultérieurement aux particules observées, grâce à des électrodes de déviation, un signal de nature à amortir ces déplacements. Un autre jeu d'électrodes mesure l'écart de la vitesse du faisceau par rapport à la vitesse théorique et applique une correction. Après un temps de l'ordre de la seconde, ou un peu plus suivant l'intensité du faisceau, l'émittance peut être réduite dans des proportions notables.

Grâce à cette technique qu'il a développée, S. Van der Meer a pu stocker dans un anneau au CERN un faisceau relativement intense d'antiprotons et ces travaux se sont poursuivis par l'étude du refroidissement électronique. Des faisceaux d'antiprotons à basse énergie

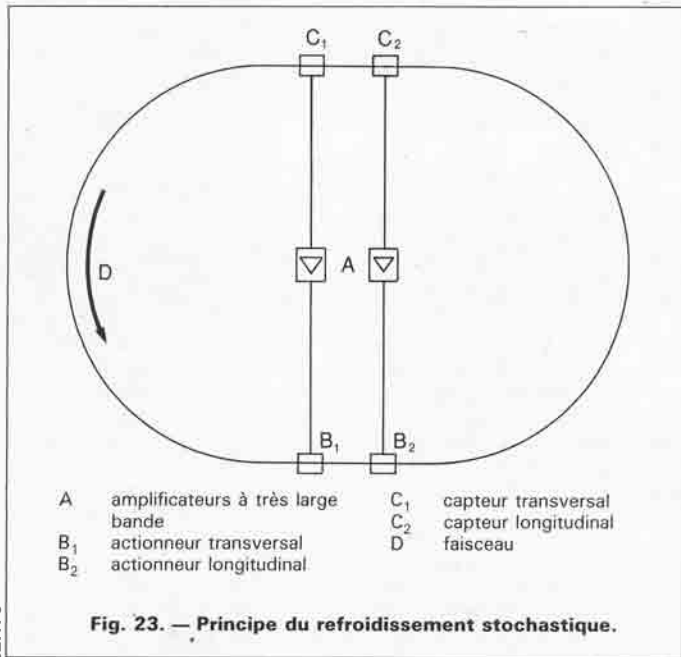


Fig. 23. — Principe du refroidissement stochastique.

ont aussi suscité un très grand intérêt et de multiples expériences ont été réalisées sur cette antiparticule jusque-là peu accessible.

Les succès du CERN ont encouragé les efforts analogues entrepris au laboratoire Fermi aux États-Unis. Là c'est la technique du refroidissement électronique qui a d'abord été choisie. Par ailleurs, il y a été décidé de tirer parti des progrès de la supraconductivité pour accroître l'énergie dans l'anneau et la porter à 1 TeV (1 téraélectron-volt = 1 000 gigaélectronvolts). C'est le *Tevatron*. La compétition se poursuit donc entre les deux laboratoires.

L'étape suivante, envisagée aux États-Unis, est un grand anneau dont le diamètre pourrait atteindre 40 km de diamètre dans lequel seraient accélérés et stockés des faisceaux de protons et d'antiprotons pour produire des collisions. Cet anneau, faisant appel à la supraconductivité, pourrait atteindre des énergies de 20 ou même 40 TeV : c'est le SSC (*Superconducting Super Collider*).

L'Europe a, au contraire, misé sur les électrons. Le LEP (*Large Electron Positron*) d'une trentaine de kilomètres de circonférence, construit au CERN, fait aujourd'hui entrer en collision des faisceaux d'électrons et de positons d'une cinquantaine de GeV. Pour porter l'énergie de ces électrons et positons à une valeur de près de 100 GeV, on envisage d'utiliser des cavités radiofréquences supraconductrices.

Il faut citer aussi, en Europe, la construction du grand anneau HERA, à Hambourg, qui doit permettre des collisions électrons-protons.

En République fédérale d'Allemagne également on ne saurait passer sous silence le grand centre accélérateur d'ions lourds (GSI) à Darmstadt où, en plus d'un gros accélérateur linéaire construit dans les années 70, sont maintenant en fonctionnement ou en construction un grand synchrotron (SIS) et un anneau de refroidissement.

3,7 PERSPECTIVES D'AVENIR

L'étude des constituants ultimes de la matière exige des énergies de plus en plus élevées, ce qui conduit à des machines toujours plus grandes. Les dimensions citées précédemment font penser qu'un butoir technologique est proche. Cela est particulièrement vrai pour les électrons ; ces particules présentent pourtant, au point de vue expérimental, des avantages sérieux ; les interactions produites lors des collisions sont plus simples, les densités de faisceaux sont plus élevées par suite d'une compression relativiste plus forte, sans parler des effets du rayonnement synchrotron qui sont de nature à les refroidir.

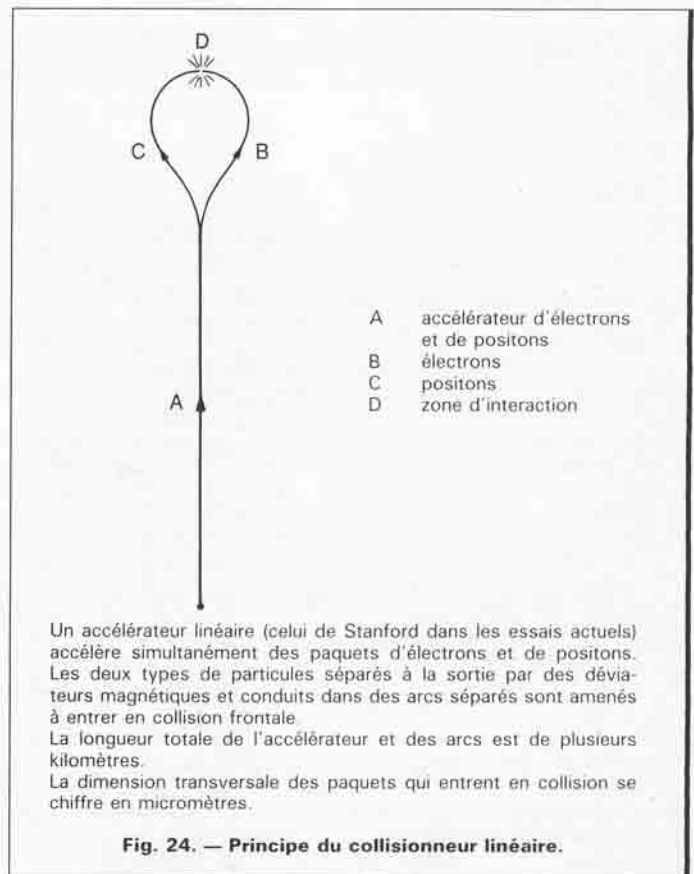


Fig. 24. — Principe du collisionneur linéaire.

Un accélérateur linéaire (celui de Stanford dans les essais actuels) accélère simultanément des paquets d'électrons et de positons. Les deux types de particules séparés à la sortie par des déviateurs magnétiques et conduits dans des arcs séparés sont amenés à entrer en collision frontale. La longueur totale de l'accélérateur et des arcs est de plusieurs kilomètres. La dimension transversale des paquets qui entrent en collision se chiffre en micromètres.

Une autre limitation apparaît pourtant. A haute énergie, la concentration des faisceaux d'électrons (ou de positons) peut devenir telle que leurs champs propres atteignent des valeurs si élevées que des particules qui les traversent (pour obtenir des collisions) sont violemment déviées : il leur devient impossible de continuer à circuler dans un anneau. Dans ces conditions deux faisceaux peuvent entrer une seule fois en collision ; il faut remplacer les collisionneurs circulaires par des collisionneurs linéaires.

Cette technique est en cours d'essai à Stanford en Californie sur le grand accélérateur linéaire (§ 2,2) ; c'est le SLC (*Stanford Linear Collider*). Dans cette installation, deux faisceaux d'électrons et de positons produits dans l'accélérateur sont amenés en collision après une demi-boucle de transport (voir la figure 24 sur laquelle n'ont pas été représentés les détails de production des positons). Les dimensions des faisceaux entrant en collision se mesurent en micromètres ; on devine la précision requise dans toute la construction.

Si les résultats obtenus à Stanford sont attendus pour poursuivre l'exploitation de cette technique, c'est néanmoins plus pour choisir la meilleure façon de réaliser les collisions linéaires que pour confirmer l'intérêt de la méthode : il semble acquis que les machines du futur seront de ce type.

Cette décision soulève alors deux problèmes technologiques majeurs : comment atteindre des champs très intenses pour produire les accélérations linéaires requises et quelles sont les limites infranchissables ? Comment produire les puissances radiofréquences nécessaires pour obtenir ces champs ?

Le premier sujet est abordé par deux voies différentes. A long terme est envisagé l'emploi d'ondes radiofréquences dans des plasmas de décharge très denses (cette idée a été proposée il y a bientôt trente ans, en URSS, par le professeur Budker) ; là aucun claquage n'est à redouter et l'intensité des champs n'est limitée que par les phénomènes de saturation, repoussés très haut si le plasma est suffisamment dense ; bien sûr, les instabilités devront être évitées et les problèmes de contrôle exigeront des études poussées.

A plus court terme, des travaux sont entrepris pour déterminer et maîtriser les limites de claquage dans des structures métalliques en impulsions très brèves et à fréquence très élevée (une longueur d'onde de l'ordre de 1 cm est aujourd'hui considérée comme optimale). De nouveaux types de structures accélératrices à ces très hautes fréquences, font l'objet de recherches; bien des méthodes sont envisagées: par exemple, l'emploi de deux structures parallèles fonctionnant sur des fréquences harmoniques; dans l'une un faisceau relativiste intense est maintenu groupé en paquets très courts pour pouvoir céder leur énergie sur la fréquence harmonique de la structure accélératrice haute énergie; un effet de transformateur coaxial a entre autres été proposé pour accroître les champs.

Il faut aussi disposer de puissances radiofréquences extrêmement élevées (plus de 100 MW en impulsions par structure). A ces niveaux de puissance le rendement des tubes devient primordial. Celui des klystrons est de l'ordre de 50 % seulement. Des études portent sur le *lasertron*. Dans ces tubes, au lieu de moduler un faisceau continu, on emploie une photocathode illuminée par des impulsions *laser* très courtes à la fréquence RF; après accélération par une tension continue de quelques centaines de kilovolts, le faisceau cède directement de la puissance radiofréquence dans une cavité de sortie; le rendement théorique est élevé. Sont étudiés aussi des *klystrons relativistes*, c'est-à-dire à très haute tension.

On devine que ces recherches suscitées par l'étude de nouvelles méthodes d'accélération peuvent avoir des applications dans bien d'autres domaines; elles se développent d'ailleurs souvent en liaison avec d'autres laboratoires, y compris des laboratoires industriels.

Mais les accélérateurs eux-mêmes continuent à offrir des applications soit actuelles, soit potentielles. Les applications médicales, la stérilisation, l'analyse se poursuivent, ainsi que l'emploi d'ions lourds pour percer des membranes destinées à l'ultrafiltration. Aujourd'hui

les anneaux d'électrons pour le rayonnement synchrotron se multiplient avec des tailles diverses suivant les objectifs visés (diverses recherches multidisciplinaires ou applications industrielles remplaçant les sources de rayons X, par exemple). Après les premières expériences au Japon, à Orsay (ACO et LURE) et ailleurs sur des anneaux consacrés à la physique, des machines destinées uniquement aux applications du rayonnement synchrotron sont aujourd'hui en service ou en construction un peu partout dans le monde; citons en France super-ACO à Orsay, en République fédérale d'Allemagne BESSY à Berlin et en Europe la source ESRF (*European Synchrotron Radiation Facility*) en construction à Grenoble. Une autre application complémentaire du rayonnement synchrotron fait l'objet de développements assez importants; c'est celle des lasers à électrons libres, susceptibles de délivrer de très grandes puissances RF monochromatiques sur des longueurs d'onde micrométriques ou plus courtes, suivant l'énergie des électrons.

Les protons sont utilisés comme sources de neutrons de spallation avec des flux sensiblement supérieurs à ceux des piles atomiques. La source ISIS (800 MeV, plus de 100 μ A en moyenne) est en fonctionnement à Harwell en Angleterre et d'autres projets ont été élaborés à plusieurs endroits dans le monde. Des faisceaux intenses de 1 GeV ont aussi été envisagés pour l'incinération de déchets radioactifs ou pour provoquer et contrôler les réactions de surgénération.

Des faisceaux de plus haute énergie (environ 30 à 40 GeV) font l'objet de projets comme sources de hadrons pour la physique: AHF et EHF (*American et European Hadron Facilities*).

Enfin des faisceaux d'ions lourds pulsés (10 ns) très intenses (10 kA) pourraient avec une énergie d'une dizaine de gigaélectronvolts contrôler les réactions de fusion.

Il est difficile de prévoir l'avenir de tous ces projets.

BIBLIOGRAPHIE

- WARNECKE (R. R.). — *Introduction à l'étude des accélérateurs de particules* (2 tomes). 1976 Masson Séditas.
- SLATER (J. C.). — *Review of Modern Physics*, 20, juillet 1948, p. 473.
WALKINSHAW (W.). — *Proceedings of the Physical Society*, 61, p. 246.
- ALVAREZ (L. W.). — *Physical Review*, 70, 1946, p. 799 et *Review of Scientific Instruments*, 26, février 1955.
- LIVINGSTON (M. S.). — *Journal of Applied Physics*, 16, 1944, p. 2 et 128.
- THOMAS (L. H.). — *Physical Review*, 54, 1938, p. 580.
- Mac MILLAN (E. M.). — *Physical Review*, 68, 1945, p. 143.
- VEKSLER (V.). — *Journal de Physique de l'URSS*, 9, 1945, p. 153.
- Physical Review*, 71, 1947, p. 449.
Review of Scientific Instruments, 23, 1952, p. 707.
- CRANE (H. R.). — *Physical Review*, 70, 1946, p. 800.
- Review of Scientific Instruments*, 24, sept. 1953.
- COURANT (E. D.), LIVINGSTON (M. S.), SNYDER (H. S.). — *Physical Review*, 88, 1952, p. 1190.
- LAPOSTOLLE (P.) et MARTIN (A.). — *Les anneaux de collision du CERN*. Bull. d'Informations Scientifiques et Techniques du CEA, n° 106, juillet-août 1966, p. 1 à 12.
- JOHNSON (K.). — *The CERN intersecting storage rings*. Nuclear Instruments and methods, n° 108, 1973, p. 205 à 223.
- POTTER (J.) and al. — *RFQ research at Los Alamos*. IEEE Transactions on Nuclear Science NS26, 1979, p. 3745.
- KAPCHINSKI (I. M.). — *The linac with space uniform quadrupole focusing*. IEEE on Nuclear Science NS26, 1979, p. 3462.

Outre les références précédentes qui ont un caractère général, les principales publications concernant les accélérateurs apparaissent dans les revues faites lors de conférences internationales. On peut consulter, par exemple, les comptes rendus des dernières d'entre elles et y sélectionner les pages suivantes:

- 1983 Particle Accelerator Conference (P.A.C.). Santa Fe IEEE, NS30, n° 4, août 1983, pp. 1950 à 1997 et 2056 à 2076.
- 1985 P.A.C. Vancouver. IEEE, NS32, n° 5, oct. 1985, pp. 1582 à 1613, 1713 à 1735, 2638 à 2661, 3134 à 3153, 3277 à 3301, 3471 à 3485.
- 1987 P.A.C. Washington. IEEE Catalog. n° 87, CH2387-9, pp. 1 à 42, 178 à 198, 233 à 263, 804 à 833, 1375 à 1392, 1960 à 1982.
- 1988 E.P.A.C. (European P.A.C.) Rome (1^{er} tome) World Scientific Publishers, Singapour, p. 1 à 300.
- 1989 P.A.C. Chicago (à paraître).

Toute reproduction sans autorisation du Centre Français du Copyright est strictement interdite.

© Techniques de l'Ingénieur, traité Électronique.

GAGNEZ DU TEMPS ET SÉCURISEZ VOS PROJETS EN UTILISANT UNE SOURCE ACTUALISÉE ET FIABLE

Techniques de l'Ingénieur propose la plus importante collection documentaire technique et scientifique en français !

Grâce à vos droits d'accès, retrouvez l'ensemble des **articles et fiches pratiques de votre offre**, **leurs compléments et mises à jour**, et bénéficiez des **services inclus**.



RÉDIGÉE ET VALIDÉE
PAR DES EXPERTS



MISE À JOUR
PERMANENTE



100 % COMPATIBLE
SUR TOUS SUPPORTS
NUMÉRIQUES



SERVICES INCLUS
DANS CHAQUE OFFRE

- + de 350 000 utilisateurs
- + de 10 000 articles de référence
- + de 80 offres
- 15 domaines d'expertise

- ☐ Automatique - Robotique
- ☐ Biomédical - Pharma
- ☐ Construction et travaux publics
- ☐ Électronique - Photonique
- ☐ Énergies
- ☐ Environnement - Sécurité
- ☐ Génie industriel
- ☐ Ingénierie des transports
- ☐ Innovation
- ☐ Matériaux
- ☐ Mécanique
- ☐ Mesures - Analyses
- ☐ Procédés chimie - Bio - Agro
- ☐ Sciences fondamentales
- ☐ Technologies de l'information

**Pour des offres toujours plus adaptées à votre métier,
découvrez les offres dédiées à votre secteur d'activité**

Depuis plus de 70 ans, Techniques de l'Ingénieur est la source d'informations de référence des bureaux d'études, de la R&D et de l'innovation.

www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com

LES AVANTAGES ET SERVICES compris dans les offres Techniques de l'Ingénieur

ACCÈS



Accès illimité aux articles en HTML

Enrichis et mis à jour pendant toute la durée de la souscription



Téléchargement des articles au format PDF

Pour un usage en toute liberté



Consultation sur tous les supports numériques

Des contenus optimisés pour ordinateurs, tablettes et mobiles

SERVICES ET OUTILS PRATIQUES



Questions aux experts*

Les meilleurs experts techniques et scientifiques vous répondent



Articles Découverte

La possibilité de consulter des articles en dehors de votre offre



Dictionnaire technique multilingue

45 000 termes en français, anglais, espagnol et allemand



Archives

Technologies anciennes et versions antérieures des articles



Impression à la demande

Commandez les éditions papier de vos ressources documentaires



Alertes actualisations

Recevez par email toutes les nouveautés de vos ressources documentaires

*Questions aux experts est un service réservé aux entreprises, non proposé dans les offres écoles, universités ou pour tout autre organisme de formation.

ILS NOUS FONT CONFIANCE



www.techniques-ingenieur.fr

CONTACT : Tél. : + 33 (0)1 53 35 20 20 - Fax : +33 (0)1 53 26 79 18 - E-mail : infos.clients@teching.com