

Laboratori Nazionali di Frascati

LNF-55/49 (1955)

E. Persico: LE SINCHROTRON ET SES PROBLEMES.

Estratto dal: Journ. de Phys. et le Radium 16, 360 (1955)

Ces particules viennent d'un *injecteur*, qui est, généralement, une autre machine accélératrice (par exemple van de Graaf, ou accélérateur linéaire) destinée à donner aux particules une énergie préalable de quelques mégaélectrons-volts et à les lancer dans la chambre, sous forme d'un faisceau intermittent, mince et bien collimé.

Il y a, naturellement, un grand *aimant* annulaire, partagé en quatre secteurs, et construit avec une précision extrême. Il est alimenté par un courant alternatif ou pulsant à basse fréquence (par exemple 20 c/s, ou, dans les grandes machines, moins de 1 c/s).

Entre le groupe générateur de ce courant et l'aimant, il faut mettre en dérivation une grande batterie de *condensateurs* pour compenser la self-induction de l'aimant. L'aimant et les condensateurs absorbent une partie considérable du coût de la machine.

Et n'oublions pas l'organe qui doit accélérer les particules : la *cavité résonnante* à radiofréquence, dont le champ électrique doit vibrer, autant que possible, en synchronisme avec la rotation des particules. Par conséquent, la fréquence de l'oscillateur qui excite la cavité doit aller en croissant au fur et à mesure que la vitesse des particules augmente. Les cavités peuvent être plusieurs, comme dans le cas de la figure où elles sont deux.

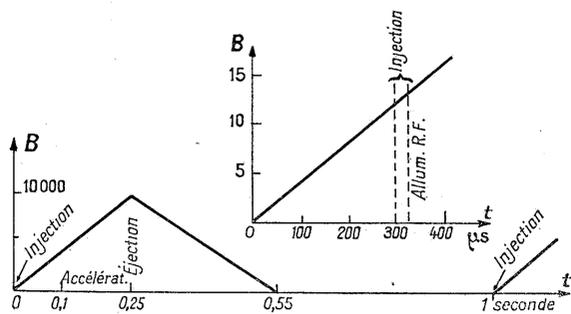


Fig. 2.

Il y a enfin les innombrables appareils de *mesure et de contrôle* à distance, et les automatismes électroniques qui déclenchent au moment voulu les différentes phases du cycle.

Et voici un exemple du *cycle de fonctionnement* d'un synchrotron (fig. 2). Celui-ci se rapporte à un électrosynchrotron de 500 MeV du Caltech. Le diagramme représente l'allure du champ magnétique, qui est excité par un courant pulsant d'environ 1 c/s. La partie initiale du cycle est reproduite à part, agrandie 100 fois. Les électrons sont injectés, à 1 MeV d'énergie, quand le champ passe par la valeur de 14 gauss : l'injection ne dure que 20 μ s. Immédiatement après, la radiofréquence est allumée, et les électrons sont accélérés jusqu'à 500 MeV

pendant que le champ atteint sa valeur maximum de 10 000 gauss : alors les électrons sont déviés et frappent la cible, donnant lieu à un court éclair de rayons X.

L'accélération dure donc un quart de seconde et tout cela se répète toutes les secondes.

Comme à 6 ou 7 MeV les électrons ont déjà pratiquement la vitesse de la lumière, la radiofréquence ne doit être modulée que dans la partie initiale du cycle et la modulation est, en ce cas, de 14 pour 100.

On peut la réduire, et même la supprimer, si l'on injecte les électrons à une énergie plus grande ou si (comme on le fait dans la plupart des électrosynchrotrons existants) on accélère les électrons, dans la première partie du cycle, jusqu'à 6 ou 7 MeV, par induction magnétique comme dans le bétatron.

Dans les synchrotrons à protons, les choses se passent bien différemment : ici la vitesse reste toujours fort inférieure à celle de la lumière, et une ample modulation de fréquence est inévitable.

Le mouvement des particules. — De ce tableau d'ensemble on déduit aisément quelle foule de problèmes de technologie et d'électronique pose la construction d'un synchrotron. Ces problèmes, s'ils ont été tant bien que mal résolus dans les machines existantes, n'ont pas toujours trouvé la solution la meilleure, car le nombre de ces machines est encore petit et l'expérience n'est pas étendue.

Je ne parlerai ici que des questions dont je me suis un peu plus spécialement occupé, c'est-à-dire du mouvement des particules dans la chambre à vide du synchrotron.

Le mouvement des ions ou des électrons dans une machine accélératrice pose des problèmes de mécanique rationnelle qui sont parfois d'une complexité, et même d'une élégance, insoupçonnées. L'ancienne « *mécanique du point dans le vide* », à qui Lagrange a donné cette admirable forme analytique, et Poincaré tant de développements et d'applications astronomiques, a connu récemment un nouvel épanouissement par l'optique électronique et, plus récemment encore, par la théorie des accélérateurs. Mais c'est, cette fois, la mécanique relativiste qu'il faut appliquer. Et, chose remarquable, la relativité n'intervient pas pour apporter des petites retouches au sixième chiffre décimal, comme c'était sa coutume jusqu'ici : bien au contraire, c'est elle qui impose à la machine ses dimensions et ses caractéristiques principales.

Si les électrons obéissaient à Newton plutôt qu'à Einstein, un électrosynchrotron de 300 MeV, comme ceux de Cornell et du M. I. T., au lieu d'avoir un diamètre de 2 m n'en aurait un que de 12 cm. Mais, en revanche, le problème de la modulation de sa radiofréquence serait bien plus difficile et peut-être insoluble.

Il est vrai que, dans ce monde imaginaire où la relativité ne serait pas valable, il ne serait nullement nécessaire de faire un synchrotron pour les électrons; le vieux cyclotron à fréquence fixe servirait parfaitement, car il n'y aurait pas l'augmentation de masse avec la vitesse qui est ce qui empêche le cyclotron de fonctionner avec les électrons. Mais il est vrai aussi que dans un monde non relativiste, où la masse n'est pas convertible en énergie, les physiciens ne trouveraient probablement pas l'argent pour construire des machines si coûteuses.

Revenons donc au monde réel, si mauvais qu'il soit, et voyons ce qu'il en est du mouvement des particules dans la chambre à vide d'un synchrotron. Ce mouvement est bien loin d'être tout bonnement circulaire: il y a des oscillations aussi bien en direction verticale qu'horizontale, et c'est sur l'amplitude de ces oscillations qu'il faut dimensionner la section de la chambre et, par conséquent, l'aimant, les condensateurs et les machines excitatrices. Chaque millimètre supplémentaire de largeur ou de hauteur de la chambre se paie, dans une machine de puissance moyenne, un prix de l'ordre du million de francs.

Les oscillations transversales sont excitées principalement par les conditions de l'injection. Voyons donc un peu comment cela se passe.

La quantité de mouvement donnée, p , d'une particule à l'injection, détermine évidemment un cercle idéal de rayon

$$r_i = \frac{cp}{eB}$$

(B étant le champ magnétique vertical) tel que, si la particule était lancée tangentiellement à ce cercle, elle le suivrait exactement. On l'appelle « le cercle instantané ». Si la particule n'est pas lancée tangentiellement à ce cercle, ou si, pendant qu'elle le suit, une collision la fait dévier, il faut qu'elle y soit rappelée par une force convenable. Cette force de rappel on peut la demander à la force de Lorentz même. En effet, on peut démontrer que la force de Lorentz aura une composante qui agit comme force de rappel vers le cercle instantané, pourvu que le champ magnétique soit légèrement décroissant vers l'extérieur, ce qu'on obtient en donnant à l'entrefer une section légèrement évasée. La décroissance est mesurée par le nombre

$$n = - \frac{d \log B}{d \log r}$$

qu'on appelle « indice du champ ».

On trouve que, si la particule s'écarte d'une distance z dans la direction verticale, elle est rappelée par une force proportionnelle à nz et, si $n > 0$, oscille verticalement avec une fréquence qui est

$$\sqrt{n} \nu,$$

où ν est la fréquence de rotation des particules. Pareillement, dans la direction horizontale on a une force de rappel proportionnelle à $(1-n)z$ et des oscillations (si $1-n > 0$) de fréquence

$$\sqrt{1-n} \nu.$$

Pour qu'il y ait à la fois *stabilité* (ou, comme on dit, « focalisation ») verticale et horizontale, il faut donc que $0 < n < 1$.

Or, les particules sont lancées dans la chambre par le *défecteur*, placé au bord extérieur de la chambre même (fig. 3). Puisque le champ B va en croissant,

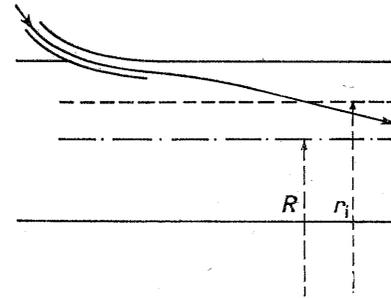


Fig. 3.

le rayon du cercle instantané diminue graduellement. A un moment donné, ce cercle passe par la bouche du défauteur; et la particule qui sort à ce moment suit le cercle instantané décrivant une spirale très serrée, comme celle d'un disque microscillon. Mais toutes les particules qui sortent après celle-ci sont lancées au-dehors de leur cercle instantané et commencent à osciller autour de celui-ci, en le suivant à mesure qu'il se contracte. Ce sont les oscillations dites de *bétatron*, parce qu'elles ont été étudiées d'abord dans cette machine. Il faut ajouter que, comme le faisceau injecté a une certaine ouverture linéaire et angulaire, il y a des oscillations de *bétatron* aussi en direction verticale.

Quand le cercle instantané est arrivé à peu près à moitié de la largeur de la chambre, il faut l'arrêter. C'est ce qu'on fait en allumant l'oscillateur à radio-fréquence. Alors les particules commencent à être accélérées; leur quantité de mouvement p augmente dans la même mesure que B et donc r reste constant et égal à R . Les oscillations de *bétatron* s'accomplissent alors autour de la ligne moyenne de la chambre. Je reviendrai là-dessus dans un instant.

Je dois dire maintenant que, quand le cercle instantané est parvenu au centre de la section, l'injection est terminée. Or, un des problèmes qui se posent est celui d'éviter que les particules, après un ou plusieurs tours, frappent contre le défauteur. Pour cela on peut profiter, en partie, des oscillations de *bétatron* en s'arrangeant pour qu'elles déplacent la particule, après le premier tour, vers l'intérieur

de la chambre, mais cela ne serait pas toujours suffisant pour les tours successifs. Il faut compter sur la contraction du cercle instantané, c'est-à-dire sur la spiralisation de l'orbite. On peut augmenter cette contraction, en faisant monter rapidement le champ magnétique; mais alors le cercle instantané arrive vite au centre de la section, l'injection dure un temps trop court et (comme l'intensité du faisceau injecté est celle qu'elle est) le nombre des particules injectées est trop petit.

Si, au contraire, on fait monter lentement le champ, l'injection dure assez longtemps mais, comme la spirale est très serrée, une partie des particules est perdue par collision contre le déflecteur dans les premiers tours. Il faut faire un compromis entre les deux exigences. Le problème de l'injection est un des plus délicats de la théorie du synchrotron.

Je viens de dire que, quand on allume la radiofréquence, r_i reste constant et égal au rayon moyen R de la chambre. Cela n'est vrai qu'en première approximation.

Comme les particules ne traversent pas la cavité résonnante toujours dans la même phase, leur quantité de mouvement n'augmente pas de la même quantité à chaque passage. Il s'ensuit que r_i ne reste pas exactement constant mais oscille autour de la valeur R correspondante à la ligne moyenne de la chambre. Ce sont les oscillations dites de *synchrotron*, parce qu'elles sont typiques de cette machine. Elles sont beaucoup plus lentes que les autres, et leur amplitude est déterminée essentiellement par la valeur de la tension de la cavité résonnante.

La section de la chambre à vide doit accommoder les oscillations de synchrotron et celles de bétatron, avec une marge pour les irrégularités du champ et les erreurs de modulation de la radiofréquence. Voici les largeurs adoptées dans certaines machines, en pour-cent du rayon

	Énergie (MeV).	Largeur (pour 100).	Hauteur (pour 100).
M. I. T.....	330	8,9	4,6
Cornell.....	300	14	4,6
Caltech.....	520	16	13
Cornell (foc. Int.).....	1 000	2,6	0,66
Cosmotron.....	2 900	7	1,75

Toutes ces oscillations ne sont importantes qu'à l'injection et dans la première partie du cycle, quand les particules ont encore une énergie relativement petite. Ensuite les oscillations s'amortissent rapidement, et dans la chambre à vide ne circule qu'un paquet de particules, mince et relativement court.

C'est pour cela qu'il a été proposé récemment, par Salvini, de donner à l'aimant et à la chambre la forme indiquée par la figure 4. Les particules circulent d'abord dans la partie la plus large et puis, quand leurs oscillations sont convenablement

amorties, elles glissent dans la partie étroite, et c'est là qu'elles sont accélérées jusqu'aux grandes énergies. Ainsi, le champ magnétique n'atteint des

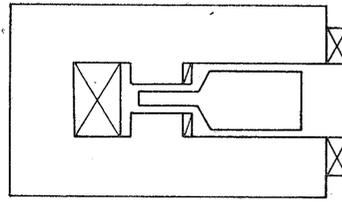


Fig. 4.

valeurs élevées que dans la section étroite, ce qui permettrait d'économiser beaucoup de fer et d'énergie. Cette proposition n'a pas encore été essayée.

La focalisation intense. — Il faut dire maintenant quelques mots des synchrotrons à *focalisation intense* (strong-focusing). C'est, comme vous le savez, une proposition non moins ingénieuse qu'audacieuse, qui a été lancée en 1950 par Courant, Livingston et Snyder, et a bouleversé le monde des synchrotronistes. Voici, en peu de mots, quelle est cette idée.

Dans le synchrotron ordinaire la force focalisante ne peut jamais être très grande parce que la focalisation horizontale et celle verticale sont, d'une

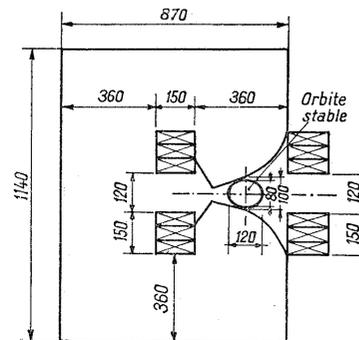


Fig. 5. — Étude du profil de l'entrefer et de l'aimant de 30 GeV.

Ouverture utile : 8 cm verticalement et 12 cm radialement; Poids d'acier : 4 000 t; Poids de cuivre : 250 t; Énergie emmagasinée : $14 \cdot 10^6$ J; Pointe de densité de courant : 440 A.cm²; Puissance moyenne dépensée : 12 000 kW; Rayon moyen de l'orbite : 112,1 m.

certaine façon, complémentaires, car l'une est proportionnelle à n et l'autre à $1-n$: si l'on augmente l'une, on diminue l'autre. Eh bien : renonçons à les obtenir toutes les deux en même temps, et contentons-nous de les avoir une à la fois, alternativement. Alors, il n'y aura plus de limite théorique à leur

intensité, et l'on pourra espérer faire tenir les oscillations dans une chambre très étroite.

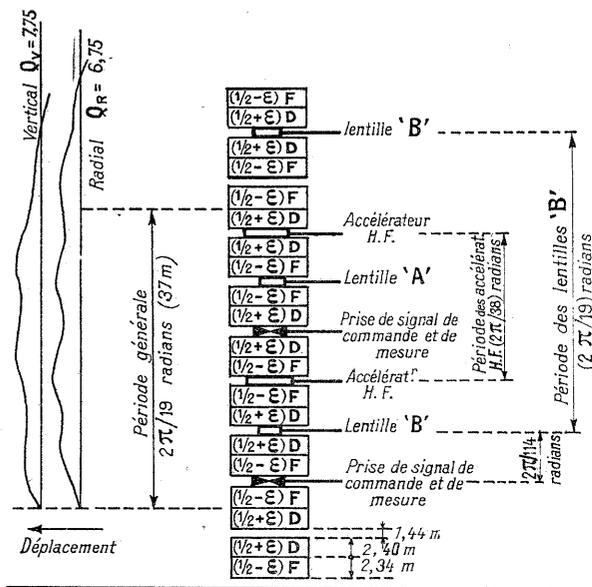


Fig. 6. — Arrangement pour la machine de 30 GeV; $n = 392$; rayon moyen, 112,0 m.

Un synchrotron à focalisation intense est donc formé de plusieurs secteurs où n est très grand et alternativement positif et négatif, c'est-à-dire que le champ décroît avec r dans certains secteurs (qui sont donc focalisants pour les oscillations verticales et défocalisants pour les autres), il croît avec r dans les autres secteurs, où le contraire arrive. Il peut y avoir aussi des secteurs avec $n = 0$ (*champ-guide*) et il y a toujours des sections sans champ (*sections droites*) qui sont nécessaires pour y placer les cavités résonnantes, l'injecteur, etc.

Voici un exemple de synchrotron à focalisation intense (fig. 5, 6, 7) ⁽²⁾. C'est un des projets qu'on avait envisagés au C. E. R. N. pour un proto-synchrotron de 30 GeV : ce n'est pas le projet définitif. La figure 5 montre la section d'un élément de l'aimant : la forme hyperbolique de l'entrefer donne $n = 392$. Les secteurs sont placés alternativement avec l'évasement à droite et à gauche.

La figure 6 montre l'ordre dans lequel se suivent les secteurs focalisants, défocalisants et les sections sans champ. Il y a 114 éléments focalisants et un même nombre défocalisants. Ils ont une petite différence de longueur pour qu'il n'y ait pas de résonance entre les oscillations horizontales et les verticales.

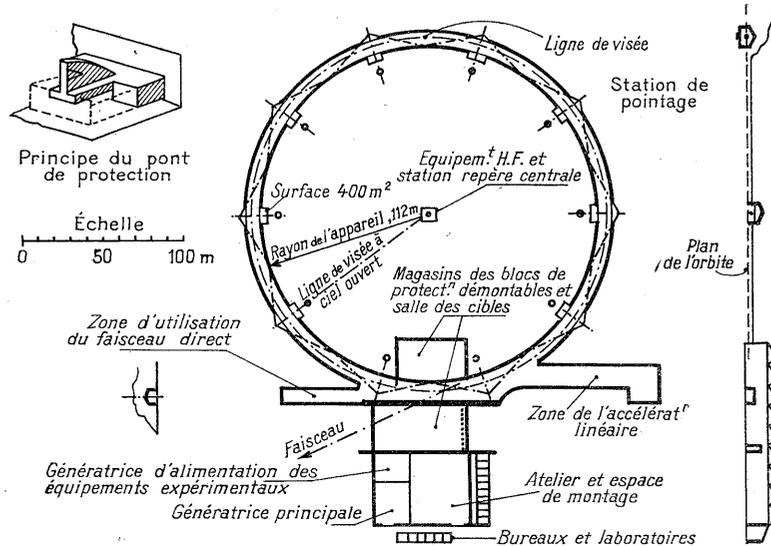


Fig. 7.

La figure 7 montre le plan général de ce proto-synchrotron, dont le rayon est de 112 m. La section de la chambre à vide n'est que de 8×12 cm.

Comment se fait-il qu'il soit permis d'insérer des secteurs défocalisants sans que les particules soient chassées contre les parois ? Voici ce qui se passe, par exemple pour le mouvement vertical.

Dans un secteur avec $n > 0$ (qui est donc focalisant pour les mouvements verticaux) la trajectoire est un arc de sinus, comme dans le synchrotron

ordinaire, mais d'une période beaucoup plus courte à cause de la grande valeur de n . Alors, à parité d'inclinaison initiale, l'amplitude de la sinusoïde sera plus petite, et c'est là un des avantages de la méthode, celui précisément qui l'a suggérée. Cet avantage se paie, naturellement, dans le secteur

⁽²⁾ Extraites de *Lectures on the theory and design of an alternating-gradient proton synchrotron*, C. E. R. N., Genève, 1953 et reproduites ici grâce à l'aimable autorisation du Secrétariat du C. E. R. N.

suivant ($n < 0$) qui est défocalisant : ici la particule est repoussée vers la paroi et sa trajectoire est convexe vers l'axe. La trajectoire est, somme toute, une courbe du genre de celle de la figure 8. Comme

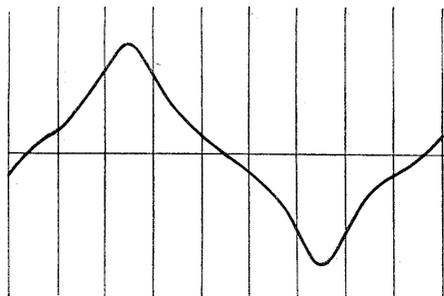


Fig. 8.

la force transversale est proportionnelle au déplacement, et que la particule, en moyenne, a un déplacement plus grand dans les secteurs focalisants que dans les secteurs défocalisants, l'effet de focalisation prédomine, et la particule ne s'écarte guère de l'axe. Mais il y a aussi un autre avantage, qui en certains cas est plus important que le premier. C'est que des particules de vitesse différente de celle qui correspond, à chaque instant, à l'orbite idéale, ne s'écartent que très peu de celle-ci, tandis que, dans un synchrotron ordinaire, elles suivraient des cercles de rayons très différents, et demanderaient ainsi une section beaucoup plus large. Ceci réduit aussi considérablement l'amplitude des oscillations de synchrotron.

L'étude des orbites dans un synchrotron à gradients alternés est très compliquée bien que, en principe, il ne s'agisse que de fonctions trigonométriques et hyperboliques. Heureusement, on a trouvé dans l'*algèbre des matrices* un instrument mathématique très adaptable à ces problèmes.

L'un des premiers résultats de cette étude a été que les valeurs énormes du nombre de secteurs et de l'indice n , proposées par Courant et ses collaborateurs (qui allaient jusqu'à 240 secteurs avec $n = \pm 3\ 600$), ne sont pas acceptables en pratique. En effet, une machine bâtie d'après ces valeurs devrait être réalisée avec une précision extrême : il suffirait d'une très petite erreur d'alignement entre deux secteurs successifs pour perdre le faisceau. Par conséquent, on ne pense plus aujourd'hui qu'à des n beaucoup plus petits, de l'ordre de 20 pour un électrosynchrotron de 1 GeV, de l'ordre de 300 pour le grand protosynchrotron du C. E. R. N. de 25 GeV.

Cela réduit considérablement l'avantage économique de la focalisation intense par rapport à ce que l'on avait espéré, mais l'avantage est toujours énorme pour les grandes machines.

Un phénomène tout à fait caractéristique des

machines à gradients alternés est le suivant. On sait que le fonctionnement du synchrotron est rendu possible par le principe de la *stabilité de phase*. D'après ce principe, il n'est pas nécessaire que la fréquence de l'oscillateur s'adapte fidèlement à la vitesse angulaire des particules : au contraire, ce sont celles-ci qui ont une heureuse tendance à adapter leur vitesse à la radiofréquence. Eh bien, la théorie fait prévoir que, dans une machine à focalisation intense, il existe une valeur de l'énergie pour laquelle il n'y a pas de stabilité de phase. On l'appelle *énergie de transition*. Pour le projet du C. E. R. N. que j'ai décrit tout à l'heure, elle est de 6,7 GeV.

Qu'est-ce qui se passe quand les particules traversent l'énergie de transition ? Le calcul fait prévoir que le paquet de particules subit une crise, mais qu'il peut survivre pourvu que l'oscillateur change convenablement de phase au moment voulu. Alors, le paquet se rétrécit d'abord, en direction radiale, pour se dilater ensuite, mais pas dangereusement.

Évidemment il serait préférable d'éviter ce passage critique, en projetant la machine de telle sorte que l'énergie de transition reste au-dessous de l'énergie d'injection, ou au-dessus de l'énergie finale. Mais si cela est possible pour les machines à électrons, ce n'est pas toujours possible pour un synchrotron à protons comme celui envisagé par le C. E. R. N.

Comme vous le savez, aucune machine à focalisation intense n'est encore achevée ; la plus avancée est le synchrotron pour électrons d'au moins 1 GeV de la Cornell University, projeté et dirigé par Wilson et fonctionnant déjà à basse énergie. Le monde des spécialistes suit avec un extrême intérêt les progrès de cette machine, qui sont très encourageants, et dont le succès donnera la confirmation définitive de la valeur de la méthode.

Conclusion. — J'ai intitulé cette conférence : *Le synchrotron et ses problèmes*, mais, en réalité, je n'ai pu parler que très peu de ces problèmes. J'imagine pourtant que vous, qui êtes des physiciens, pouvez deviner derrière les principes, apparemment simples, que j'ai esquissés, quelle foule de questions théoriques et pratiques se présentent, dès qu'on essaie de les approfondir.

Et j'espère aussi que vous pourrez entrevoir comment l'étude de ces questions, bien que dirigée vers le but tout pratique de construire une machine, peut devenir passionnante en elle-même et réserver des surprises. Car, même dans ce domaine de la Physique, où tout est régi par des lois parfaitement connues, il a été possible de faire des découvertes nouvelles, comme le principe de la stabilité de phase et celui de la focalisation intense, qui ont permis d'atteindre, après les mégaélectrons-volts, les gigaélectrons-volts. Faudra-t-il inventer, dans un proche avenir, une nouvelle unité d'énergie ?