



TECHNIQUES
DE L'INGÉNIEUR

Réf. : **E4510 V1**

Date de publication :
10 septembre 1982

Accélérateurs linéaires à électrons

Cet article est issu de : **Archives**

par **Hubert LEBOUTET**

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 // bu08 SNDL // 193.194.82.178**

© Techniques de l'Ingénieur | tous droits réservés

Accélérateurs linéaires à électrons

par **Hubert LEBOUTET**

Agrégé de l'Université

Docteur ès Sciences

Conseiller Scientifique de CGR-MeV (Compagnie Générale de Radiologie)

| | |
|---|------------|
| Introduction | E 4510 - 2 |
| 1. Équations générales du mouvement d'un électron | - 3 |
| 1,1 Mouvement uniformément accéléré | - 3 |
| 1,2 Mouvement dans un champ magnétique | - 4 |
| 1,3 Mouvement dans un champ HF | - 5 |
| 1,4 Rayonnement de l'électron accéléré | - 6 |
| 2. Accélérateurs linéaires | - 8 |
| 2,1 Ligne | - 8 |
| 2,2 Échanges d'énergie entre le faisceau et l'onde HF | - 10 |
| 2,3 Lignes résonnantes. Cas des accélérateurs très courts | - 12 |
| 2,4 Constitution d'un accélérateur linéaire à électrons | - 13 |
| 2,5 Microtron | - 14 |
| 2,6 Accélérateurs linéaires à induction | - 15 |
| 2,7 Grands accélérateurs linéaires à électrons | - 16 |
| 3. Accélérateurs dans l'industrie et la médecine | - 19 |
| 3,1 Accélérateurs utilisés en thérapie | - 19 |
| 3,2 Accélérateurs de radiographie industrielle | - 21 |
| 3,3 Accélérateurs d'irradiation | - 22 |
| Index bibliographique | - 24 |

Les accélérateurs à électrons font partie de ce que l'on a appelé la prodigieuse croissance que le monde a connue durant un quart de siècle, et cependant, le nombre des industriels dans le monde qui se sont lancés dans la fabrication de ces appareils est étonnamment réduit: guère plus d'une dizaine.

Le premier triomphe de l'accélérateur à électrons en physique des hautes énergies fut la mise en évidence de la structure complexe du proton par Hofstadter en 1955, après des mesures effectuées sur l'accélérateur linéaire de Stanford au niveau de 500 MeV, ce qui lui valut le prix Nobel de Physique. On a réalisé depuis plusieurs grands accélérateurs capables de dépasser cette énergie. Ensuite, pour augmenter l'énergie disponible dans la réaction, on a construit des anneaux de collisions.

Sur le plan de la technologie et du développement industriel, les accélérateurs directs et les accélérateurs linéaires en micro-ondes ont atteint leur maturité et il n'y a pas de progrès essentiel à attendre dans leur domaine. Toute la partie grands appareils de recherche fondamentale est à un palier, essentiellement pour des raisons économiques, mais elle est susceptible de repartir très vite.

Les applications en radiothérapie ont aussi atteint leur maturité technique et les développements à prévoir portent essentiellement sur le couplage des accélérateurs aux ordinateurs, qui ne pourra d'ailleurs pas aller très loin, car dans ce domaine l'action humaine est essentielle. Les accélérateurs remplacent progressivement les bombes au cobalt. Mais l'équipement du monde n'est réalisé que dans quelques grands pays, et l'effort industriel est encore immense. Seule une découverte sensationnelle en chimiothérapie pourrait les rendre caducs. Ils seront complétés mais certainement pas concurrencés par la neutronothérapie.

On peut considérer comme certain que les problèmes de plus en plus aigus de conservation des aliments et de pollution d'une part, l'élaboration de nouvelles techniques de fabrication de certains produits chimiques d'autre part, entraîneront le développement fulgurant à plus ou moins long terme des techniques d'irradiation, pour lesquelles vraisemblablement de nouveaux appareils sont à concevoir.

Dès 1927, un principe d'accélération applicable seulement aux électrons a été imaginé. C'est le *bétatron*. Il fallut une dizaine d'années pour venir à bout des problèmes technologiques et théoriques et faire fonctionner un premier *bétatron*.

Une centaine d'appareils ont été construits de par le monde dans de grands laboratoires et aussi par plusieurs constructeurs parmi lesquels Siemens (République fédérale d'Allemagne), Allis Chalmers (États-Unis), Shimadzu (Japon).

Les premiers accélérateurs linéaires à électrons ont été essayés vers 1950-1952, aux États-Unis, en Angleterre et en France. Ils ont été une retombée presque directe des réalisations des radars de puissance et des études de tubes à ondes progressives. Leur appellation vient du fait que l'interaction entre le faisceau et l'onde électromagnétique accélératrice se fait le long de l'axe d'une ligne de propagation.

Actuellement, il en existe près d'un millier, et l'évolution des modèles dans le domaine des applications est encore très rapide.

Introduction

Dans cet article, où nous nous intéressons aux accélérateurs et non à la physique nucléaire, nous utiliserons uniquement le fait que l'électron est une particule légère (la plus légère, à part le photon et le neutrino), chargée négativement.

Pour le physicien, l'électron est une particule stable, de durée de vie infinie, de masse $m = 0,910\,953 \times 10^{-30}$ kg, de charge $e = 1,602\,189 \times 10^{-19}$ C, de spin $1/2$, et de moment magnétique $\mu_e = 9,284\,832 \times 10^{-24}$ A . m².

C'est un **fermion**, c'est-à-dire qu'il obéit à la **statistique de Fermi**, et au **principe d'exclusion de Pauli**: dans le même ensemble, deux particules ne peuvent pas occuper la même position dans l'espace des phases, c'est-à-dire avoir strictement les mêmes caractéristiques de position et de mouvement. Cela s'applique en particulier à l'agencement des couches atomiques et à ses applications en physique du solide et intervient dans les réactions nucléaires à très haute énergie.

Les interactions de l'électron avec la matière sont relativement simples, car purement électromagnétiques. L'électron ne participe pas aux interactions fortes, c'est-à-dire à celles où interviennent les forces spécifiquement nucléaires qui assurent la cohésion des noyaux.

L'électron est ainsi une excellente sonde d'exploration de la constitution des noyaux, et même des nucléons, à cause de la simplicité relative de l'interprétation des résultats.

Même aux très grandes énergies, la notion de *longueur d'onde associée* λ et de *pouvoir séparateur* est encore valable, et donne un ordre de grandeur de la limite des dimensions observables

$$\lambda = h/mv$$

avec h constante de Planck,
 v vitesse de l'électron.

A une énergie de 500 MeV, $\lambda \approx 0,8 \times 10^{-15}$ m.

L'électron a une autre propriété due essentiellement à sa faible masse relative, mise en évidence dès 1930: c'est sa possibilité d'émettre par rayonnement une partie très importante de son énergie lorsqu'il est accéléré ou ralenti.

Un faisceau d'électrons rapides tombant sur une cible peut devenir une source très intense de rayons X durs, beaucoup plus durs, beaucoup plus intenses que les rayons γ issus des éléments radioactifs.

Il y a **deux grandes classes d'applications** de tels rayonnements:

- la *radiographie industrielle* qui vise à contrôler des pièces de plus en plus épaisses et complexes, donc pousse à l'augmentation de puissance et de pénétration;
- la *radiothérapie* qui, en l'attente de la découverte d'une chimiothérapie du traitement du cancer, est le complément presque obligatoire de la chirurgie.

Ces deux domaines ont été assez puissants pour que s'engage une industrialisation de certains types d'accélérateurs à électrons, qui sont devenus à l'heure actuelle des instruments de travail au fonctionnement très sûr et même automatisé.

1 Équations générales du mouvement d'un électron

1.0. Jusqu'à la limite de précision de toutes les mesures sur les faisceaux accélérés, les résultats prévus par les équations de la relativité restreinte sont parfaitement en accord avec la réalité physique. Le fonctionnement des accélérateurs est une preuve directe de la validité de cette théorie.

L'équation fondamentale de la dynamique s'écrit sous la forme simple

$$\vec{F} = \frac{d}{dt} (m\vec{v})$$

avec \vec{F} force appliquée au mobile,

m masse non plus considérée comme une constante mais dépendant de la vitesse v par $m = m_0 / \sqrt{1 - \beta^2}$.

m_0 étant la masse au repos du mobile et c la vitesse de la lumière, $\beta = v/c$. Le travail produit par la force F sur une distance dz est égal à l'accroissement d'énergie du mobile

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{z} = \frac{d}{dt} (m\vec{v}) \cdot d\vec{z} = \vec{v} \cdot d(m\vec{v})$$

On peut vérifier que

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

les variations d'énergie du mobile sont décrites par l'évolution du terme

$$U = m_0 c^2 / \sqrt{1 - \beta^2}$$

Il se trouve aussi que, lors des créations de particules dans les réactions nucléaires, l'énergie dépensée pour créer une particule de masse au repos m_0 est au moins égale à $m_0 c^2$ (énergie au repos de la particule).

1,1 MOUVEMENT UNIFORMÉMENT ACCÉLÉRÉ

Dans un champ électrique uniforme, d'intensité E , créé par deux plateaux portés à des potentiels différents, on a :

$$eE = \frac{d}{dt} \left(\frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \beta^2}} \right)$$

avec e charge de l'électron.

On trouve en intégrant

- équations des espaces :

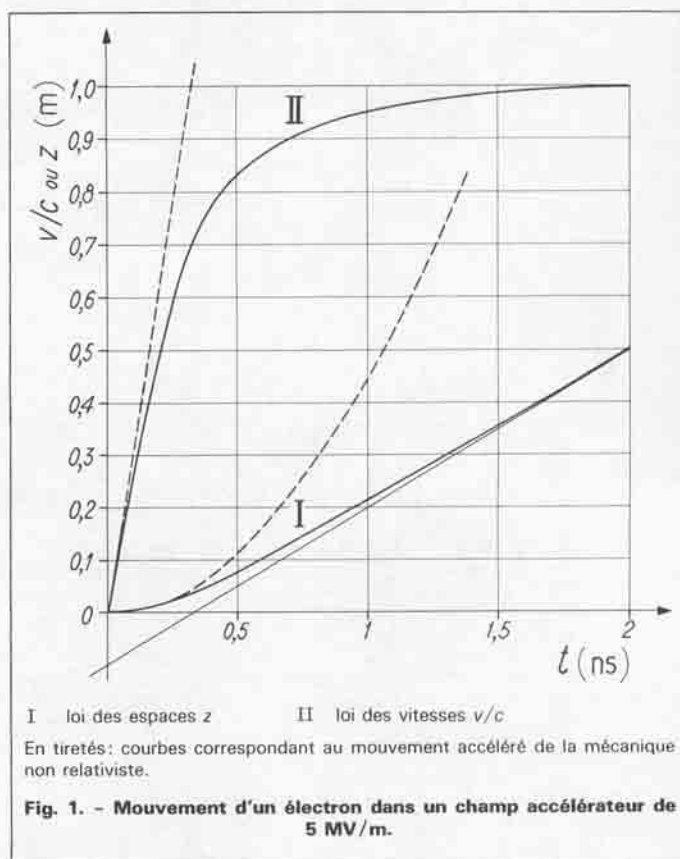
$$z = \frac{m_0 c^2}{eE} \left[\sqrt{1 + \frac{e^2 E^2 t^2}{m_0^2 c^2}} - 1 \right]$$

- loi des vitesses :

$$\beta = \frac{v}{c} = \frac{eEt}{m_0 c \sqrt{1 + \frac{e^2 E^2 t^2}{m_0^2 c^2}}}$$

Le produit du champ par la distance parcourue est la différence de potentiel (volts) subie par l'électron, eEz est son *énergie cinétique*. Il est pratique d'exprimer les énergies en électronvolts ($1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$).

$m_0 c^2$ est l'énergie au repos de l'électron, soit :
 $m_0 c^2 = 0,9 \times 10^{-30} \times 9 \times 10^{16} = 8,1 \times 10^{-14} \text{ J}$ soit $0,51 \times 10^6 \text{ eV}$



I loi des espaces z II loi des vitesses v/c

En tiretés : courbes correspondant au mouvement accéléré de la mécanique non relativiste.

Fig. 1. - Mouvement d'un électron dans un champ accélérateur de 5 MV/m.

avec m_0 masse de l'électron dans le vide ($\approx 0,9 \times 10^{-30} \text{ kg}$),
 c vitesse de la lumière dans le vide ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

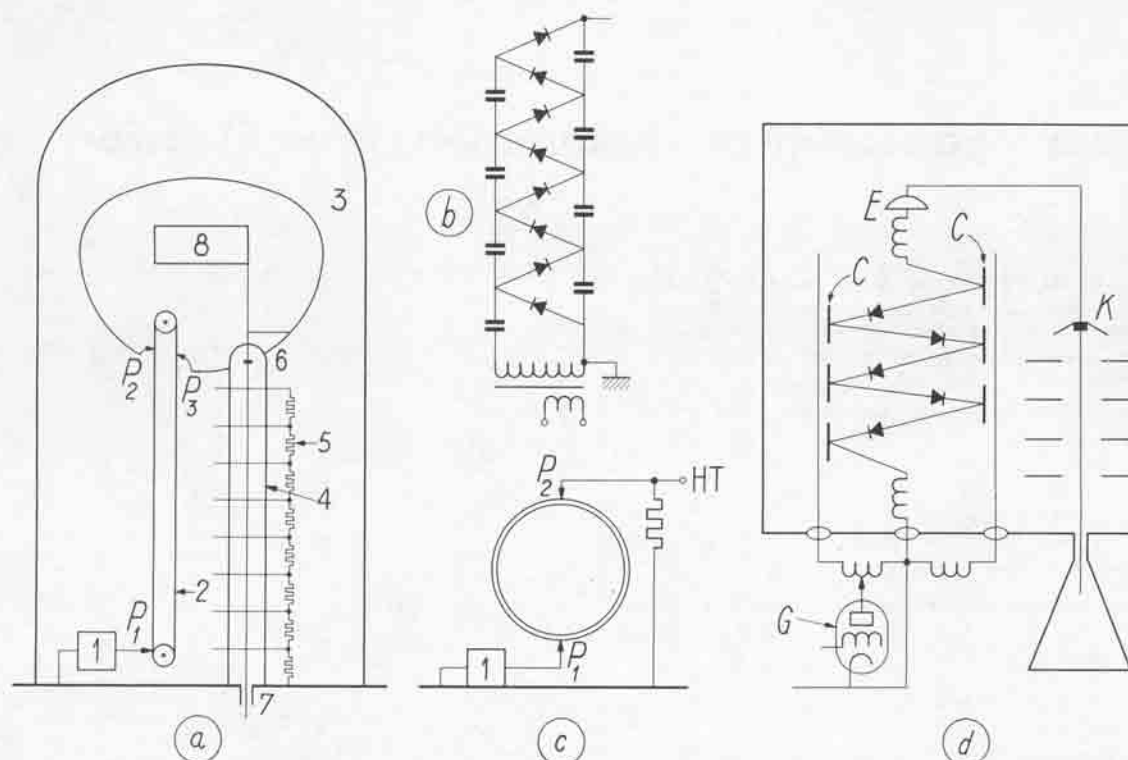
Ce que l'on exprime en disant que l'énergie au repos de l'électron est de 0,51 MeV.

La figure 1 montre que, pour l'électron, le mouvement s'éloigne de façon importante de celui décrit par les équations de la mécanique non relativiste dès que l'énergie cinétique atteint 0,1 à 0,2 MeV. Il ne s'agit pas d'une correction de relativité, mais d'ordres de grandeur différents.

A 500 keV, la vitesse de l'électron est 0,86 c ,
 à 1 MeV, elle atteint 0,94 c ,
 à 2 MeV, elle est de 0,985 c .

Un système dans lequel on confère de l'énergie à des particules chargées en les faisant se déplacer dans un champ électrique créé par deux plaques portées à des potentiels différents est appelé *accélérateur direct*.

Ce type d'accélérateurs fonctionne parfaitement, mais comporte néanmoins une difficulté fondamentale : la tenue des isolants qui supportent des plaques à haut potentiel. Il se produit, même sous vide, des claquages soit directement d'une plaque à l'autre, soit le long des supports, qui peuvent les endommager. Dès que l'on dépasse 10^6 V , ces appareils deviennent très encombrants et difficiles à construire, du fait des grandes distances qu'il faut ménager entre les électrodes pour éviter des claquages spontanés.



- 1 source de tension
2 courroie transportant les charges déposées par le peigne P_1
3 sphère réceptrice recevant les charges par les peignes P_2 et P_3
4 tube à décharge dans vide, constitué par un empilement de plateaux isolés
5 résistances d'équilibrage des potentiels
6 source d'électrons
7 sortie de faisceau accéléré
8 alimentation du canon à électrons prélevant son énergie soit sur la poulie haute de la courroie, soit sur un arbre de transmission tenant l'isolement électrique.

- (a) accélérateur direct de type Van de Graaff
(b) multiplicateur de tension de type Greinacher

- 1 source de tension

Le peigne P_1 dépose des charges sur un cylindre isolant tournant qui les transporte vers le peigne récepteur P_2 . Il peut atteindre quelques centaines de kilovolts mais ne délivre que de faibles puissances.

- (c) cylindre isolant de Félici

- C condensateurs
K canon à électrons
G colonne de Greinacher
E électrode haute tension

- (d) dynamitron

Fig. 2. - Accélérateurs directs.

Plusieurs types de sources haute tension sont utilisées: le transport des charges par courroie isolante inventé par Van de Graaff (fig. 2a), ou le cylindre isolant de Félici (fig. 2c), les cascades de Greinacher (fig. 2b), dont une variante est le *dynamitron* (fig. 2 d), qui utilise des condensateurs sous vide et une fréquence de 200 kHz, etc.

Le développement des redresseurs semiconducteurs a donné une nouvelle jeunesse à ce type de générateur de haute tension, inventé vers 1930, et qui à cette époque posait des problèmes technologiques considérables pour le chauffage des cathodes des diodes à vide.

On utilise maintenant des diodes à semiconducteurs. Les réalisations industrielles vont jusqu'à 600 à 800 kV, mais on peut atteindre 4 à 5 MV.

Les accélérateurs de ce type ont été de bons instruments de physique nucléaire; ils sont aussi utilisés pour l'irradiation.

Pour les énergies inférieures à 2 MeV, le système le plus fiable semble bien être le transformateur à noyau isolé (ICT, *Isolated Current Transformer*) qui peut délivrer une puissance allant jusqu'à:

- 30 kW à 300 keV,
- 40 kW à 2 MeV,
- 37,5 kW à 2,5 MeV

avec un rendement hors tout de 60 % à haute énergie et près de 70 % aux énergies plus basses.

1,2 MOUVEMENT DANS UN CHAMP MAGNÉTIQUE

Dans un champ magnétique uniforme constant dans le temps, une particule subit une force

$$\vec{F} = e \cdot \vec{v} \wedge \vec{B}$$

avec B induction magnétique.

Cette force est constamment perpendiculaire au vecteur vitesse, donc le produit $\vec{F} \cdot \vec{v} dt$ est toujours nul. Elle n'exerce aucun travail sur la particule, dont l'énergie n'est pas modifiée, mais la direction de la vitesse est changée.

Dans un champ magnétique uniforme, la trajectoire projetée sur un plan normal au champ est une circonférence.

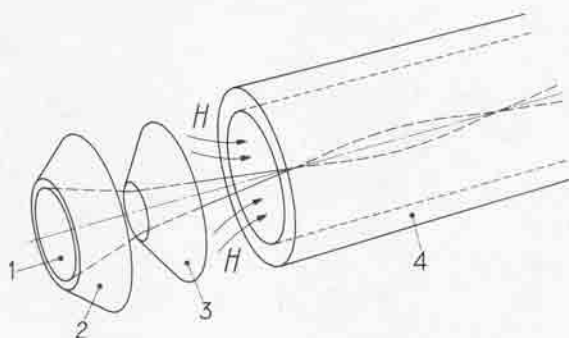
Dans la direction du champ, la particule ne subit aucune force, puisque le vecteur $\vec{v} \wedge \vec{B}$ a une composante nulle sur \vec{B} , le mouvement est donc uniforme.

$$z = v_{//} t$$

La trajectoire résultante est une hélice enroulée sur un cylindre de rayon

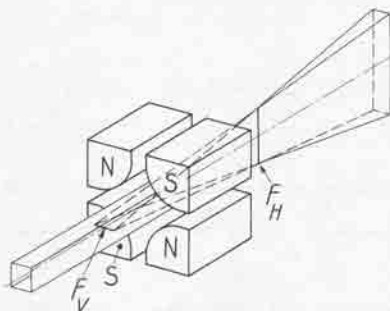
$$R = mv_{\perp} / eB$$

$v_{//}$ et v_{\perp} étant respectivement les composantes parallèle et perpendiculaire de la vitesse sur le champ magnétique.



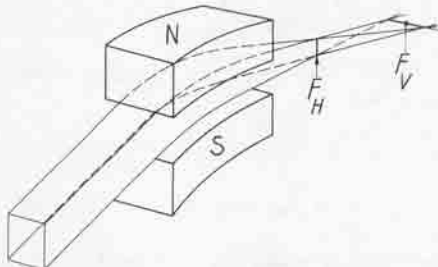
1 cathode émissive d'électrons 3 anode d'accélération
2 électrode dite de Wehnelt 4 solénoïde
H champ magnétique

(a) confinement d'un faisceau au voisinage d'un axe



Les pièces polaires sont des portions d'hyperboles équilatères. La lentille est convergente en projection sur un plan, divergente dans un plan perpendiculaire.

(b) lentille quadrupolaire



Contrairement au prisme optique, ce prisme est focalisant en projection dans son plan de symétrie.

(c) prisme magnétique

F_H foyer horizontal réel N nord
 F_V foyer vertical virtuel S sud

Fig. 3. - Optiques magnétiques.

Application numérique: en exprimant R en m, B en T, U en MeV, on a : $BR = mv/e = U/300$. Dans une induction de 1 T, des électrons de 300 MeV ont une trajectoire de 2 m de diamètre.

Il n'y a aucune différence entre les résultats de mécanique classique et relativiste, si ce n'est la valeur de la quantité de mouvement $|m\vec{v}|$ qui a une expression différente.

La période de rotation est:

$$\tau = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{eB}$$

Pour trouver un renseignement, consulter la table alphabétique en brochure rouge annexée au présent traité.

et la fréquence correspondante:

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

$$f \approx 14300 B/U$$

f étant exprimé en MHz, B en T et U en MeV.

Applications.

a) Confinement d'un faisceau le long d'un axe (fig. 3a): les électrons du faisceau faiblement divergent dans un champ magnétique uniforme parallèle à son axe ont des trajectoires en hélice très allongée, et sont donc maintenus au voisinage de l'axe. Cela est utilisé dans tous les accélérateurs linéaires et dans les amplificateurs comme les klystrons ou les tubes à ondes progressives.

b) Pour les électrons de grande énergie, les seules lentilles efficaces que l'on sache construire sont des lentilles magnétiques quadrupolaires. Elles ont une propriété qui n'a pas d'équivalent optique: celle d'être convergentes en projection sur un plan méridien et divergentes en projection sur le plan méridien perpendiculaire (fig. 3b). En les associant deux par deux tournées de 90°, on obtient des doublets convergents dans les deux plans.

c) Des aimants en forme de secteurs sont équivalents à des prismes en optique. Ils ont en plus des propriétés de focalisation obtenues soit par la réalisation d'un champ inhomogène, soit par l'orientation des faces d'entrée et de sortie (fig. 3c).

1,3 MOUVEMENT DANS UN CHAMP HF

Soit un champ HF uniforme dont la partie électrique est $E \cos \omega t$ entre deux plaques distantes de la longueur ℓ et un électron entrant à un instant t_0 , c'est-à-dire à une phase initiale $\varphi_0 = \omega t_0$ à la vitesse v_0 .

L'équation du mouvement est:

$$\frac{d}{dt} (mz') = eE \cos (\omega t + \varphi_0)$$

Pour intégrer, posons $z'/c = \cos \alpha$.

L'énergie totale de l'électron est alors $U = U_0 / \sin \alpha$ et l'on obtient:

$$\cotg \alpha_s - \cotg \alpha_e = \frac{eE}{\omega m_0 c} [\sin (\omega t + \varphi_e) - \sin \varphi_e]$$

avec φ_e , φ_s phases respectives à l'entrée et à la sortie, équation qui devient dans le cas de grande énergie incidente:

$$U_s - U_e = eE\ell \cos \frac{\varphi_s + \varphi_e}{2} \frac{\sin [(\varphi_s - \varphi_e)/2]}{(\varphi_s - \varphi_e)/2}$$

La particule subit donc l'équivalent d'une chute de potentiel variant sinusoidalement dans le temps et dont le module est:

$$V = E\ell \frac{\sin [(\varphi_s - \varphi_e)/2]}{(\varphi_s - \varphi_e)/2}$$

On utilise en pratique, non pas des condensateurs, mais des cavités résonnantes excitées sur le mode TM_{01} , pour lequel la composante de champ électrique est maximale sur l'axe.

Un résonateur est caractérisé par trois paramètres :

a) la *fréquence de résonance* sur le mode intéressant, déterminée par les dimensions géométriques ;

b) la *surtension*, qui est le coefficient de pertes Q , rapport de l'énergie emmagasinée W aux pertes par effet Joule P

$$Q = \frac{\omega \frac{1}{2} \iiint (\epsilon E^2 + \mu H^2) dV}{P} = 2\pi \frac{W}{(P/f)}$$

avec H composante magnétique du champ ;

c) la *réactance équivalente*, qui est le facteur de forme : par rapport à un trajet, sur lequel on calcule l'intégrale, c'est le rapport $V^2/2 \omega W = L \omega$ ($V = \int E dz$) de l'accroissement d'énergie maximal qu'un électron peut acquérir, rapporté à la quantité d'énergie emmagasinée.

De ces deux relations, on tire :

$$L \omega Q = V^2/2 P$$

$L \omega Q$ représente l'impédance shunt, c'est-à-dire l'énergie transférable à une particule, rapportée à la puissance perdue par effet Joule.

Ces trois paramètres peuvent être mesurés expérimentalement avec une bonne précision. On peut ensuite, à une fréquence donnée, faire varier les dimensions pour chercher la forme optimale. C'est une cavité de révolution autour de l'axe du faisceau, représentée sur la figure 6a (p. 8).

A cause des difficultés d'usinage, cette forme est soit cylindrique, soit un peu plus compliquée telles celles représentées sur les figures 6b et 6c (p. 8).

Si l'on change de fréquence, les structures géométriques sont homothétiques, et l'impédance shunt croît comme \sqrt{f} .

On consomme, par exemple, moins de puissance à 10 000 MHz qu'à 3 000 MHz. Des accélérateurs à usage médical ont été construits sur des fréquences de 10 000 MHz. Mais les difficultés mécaniques de réalisation et le manque de fiabilité et de durée de vie des magnétrons à ces fréquences ont fait que ces appareils sont restés sans suite.

La plupart des accélérateurs linéaires à électrons ont été construits sur des longueurs d'onde de 10 ou 23 cm.

Ordres de grandeur :

- surtension à la température ordinaire : 14 000 à 18 000,
- $L \omega = 80$ à 350Ω .

Dans le cas de cavités supraconductrices, des surtensions de l'ordre de 10^{10} ont été mesurées.

Des accélérateurs à cavité unique ont été construits. On n'a guère dépassé 1 MV à cause des claquages. Le microtron (§ 2.5) est un accélérateur qui utilise une cavité unique, au niveau de 0,5 MV.

Une réalisation en URSS en 1978 (Laboratoire de Novossibirsk) permet d'obtenir un faisceau de 2 MeV transportant 30 kW, à l'aide d'une cavité fonctionnant à 120 MHz (longueur d'onde : 2,50 m), excitée par une triode de puissance. Cet appareil est destiné aux applications en irradiation industrielle.

Pour aller beaucoup plus haut en énergie, on associe plusieurs résonateurs en série, de façon à constituer une ligne à retard, analogue dans son principe aux lignes à retard des tubes amplificateurs à ondes progressives, mais optimisée pour le meilleur transfert d'énergie du champ HF aux faisceaux d'électrons.

1,4 RAYONNEMENT DE L'ÉLECTRON ACCÉLÉRÉ

Une particule chargée rayonne de l'énergie lorsqu'elle traverse un champ de forces électromagnétiques. Le phénomène a lieu que la particule soit accélérée, retardée ou seulement déviée. Il entraîne une perte d'énergie. Cette énergie est émise sous la forme d'un rayonnement électromagnétique : ondes hertziennes, lumière, rayons X.

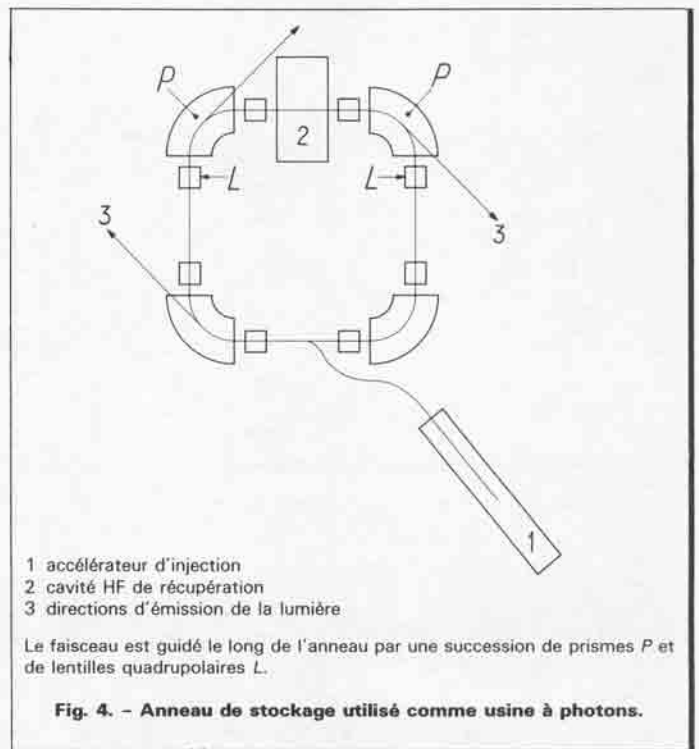


Fig. 4. - Anneau de stockage utilisé comme usine à photons.

Le calcul, même en mécanique classique (non quantique), est relativement complexe, et nous n'en donnerons que le résultat ; la puissance totale rayonnée a pour expression :

$$P = \frac{e^2}{6 \pi \epsilon_0 c^3 (1 - \beta^2)^3} \left[\gamma^2 - \left(\frac{\vec{v}}{c} \wedge \vec{\gamma} \right)^2 \right]$$

avec γ vecteur accélération

• Si $\vec{\gamma}$ et \vec{v} sont colinéaires, c'est le cas, par exemple, de l'accélérateur linéaire, on a :

$$P = \frac{e^2 \gamma^2}{6 \pi \epsilon_0 c^3 (1 - \beta^2)^3}$$

L'accélération provenant d'un champ électrique axial E , on peut évaluer γ fonction de E .

On s'aperçoit alors que, dans tout le domaine possible technique, ce phénomène est absolument négligeable pour l'accélérateur linéaire.

• Si $\vec{\gamma}$ et \vec{v} sont perpendiculaires, c'est le cas d'un électron dévié par un champ magnétique, on a :

$$P = \frac{e^2 \gamma^2}{6 \pi \epsilon_0 c^3 (1 - \beta^2)^2}$$

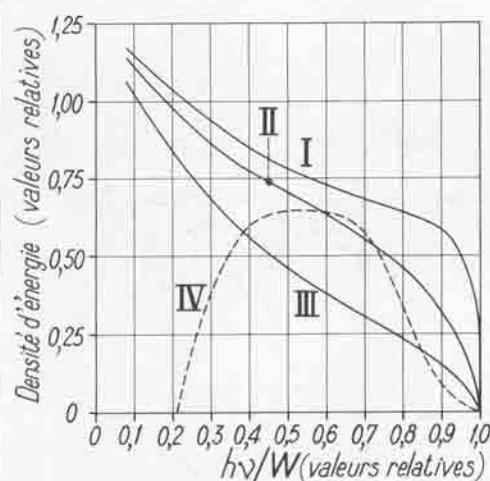
Pour une particule d'énergie totale $U = m_0 c^2 (1 - \beta^2)^{-1/2}$ et de vitesse $v \approx c$ se déplaçant sur une trajectoire circulaire de rayon R , on a $\gamma \approx c^2/R$, et par suite la quantité d'énergie rayonnée sur un tour dans le temps $\tau = 2 \pi R/c$ vaut :

$$\Delta W = \frac{e^2}{3 \epsilon_0 R} \left(\frac{U}{m_0 c^2} \right)^4$$

Pour l'électron uniquement, le rapport $U/m_0 c^2$ peut être suffisamment grand pour que ΔW soit significatif. En exprimant ΔW en MeV, et l'énergie U en GeV, R en m, on a :

$$\Delta W \approx 0,1 U^4 / R$$

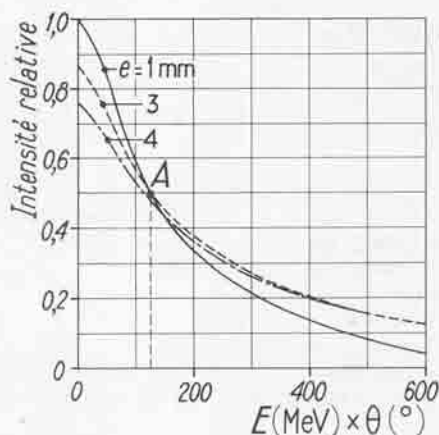
La croissance avec la puissance quatrième de l'énergie fait que ce phénomène devient la limitation principale des accélérateurs circulaires aux hautes énergies.



En ordonnées, la densité d'énergie transportée par les photons, en valeur relative

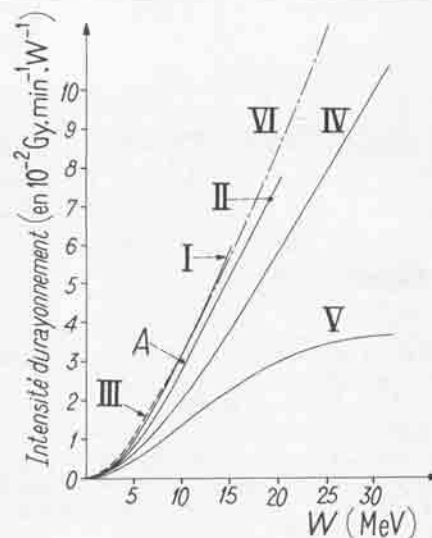
Les courbes I, II et III correspondent à des électrons d'énergie 100, 40 et 20 MeV. La courbe IV représente des résultats expérimentaux pour 1,4 MeV, et montre l'influence de l'absorption dans la cible.

(a) répartition spectrale



Le point A correspond au demi-angle d'ouverture α .

(b) répartition angulaire en fonction de l'épaisseur e de la cible



- I cible en or, d'épaisseur optimale (résultats publiés par McGrégor en 1958)
- II extrapolation pour une cible en tungstène
- III résultats obtenus par Buechner en 1948
- IV point A: résultat donné par Miller
- V résultat obtenu avec une cible en tungstène épaisse (4 mm)
- V intensité obtenue en pratique lorsque l'on utilise un filtre absorbant au centre qui assure un éclairage uniforme sur un diamètre de 40 cm à 1 m
- VI loi $0,129 E^{1,4}$ (MeV) (empirique)

(c) intensité du faisceau de photons sur l'axe produit par un faisceau d'électrons tombant sur une cible située à 1 m

Fig. 5. - Rayonnement de l'électron.

Par exemple, pour une orbite de diamètre 50 m, un faisceau d'électrons d'énergie à 10 GeV, la perte d'énergie par tour atteint 20 MeV.

Le rayonnement ainsi produit est exploitable. Les anneaux de stockage à électrons de la première génération, à une énergie de l'ordre du gigaélectronvolt, sont actuellement reconvertis en usines à photons, (par exemple LURE, Laboratoire d'Utilisation du Rayonnement Électromagnétique, cf article *Accélérateurs de particules* dans le présent traité). Le rayonnement obtenu est dans une bande d'énergie très large, s'étendant très loin vers l'ultraviolet et les rayons X, et ce sont les sources de rayonnement ultraviolet les plus puissantes que l'on sache construire.

En plus des expériences de physique fondamentale que ces sources permettent, une application industrielle immédiate en est la fabrication des circuits intégrés à grand échelle.

La rentabilité est difficile à établir lorsqu'il s'agit d'une technique de pointe. Cependant il existe plusieurs projets dans le monde d'anneaux de stockage à électrons construits spécialement pour être des usines à photons, les anneaux actuels n'ayant fait qu'ouvrir la voie (fig. 4).

Le même phénomène se manifeste d'une façon différente lors de l'émission de rayons X par des électrons frappant une cible.

Lorsqu'un électron pénètre dans la matière, il perd son énergie, principalement par deux phénomènes prépondérants:

- l'ionisation par choc sur les électrons des atomes, qu'il arrache en leur conférant à chaque fois un peu de son énergie;
- le rayonnement, lors des changements brusques de direction, lorsque l'électron passe près d'un noyau positif; cet effet est d'autant plus grand que ces noyaux sont plus chargés (numéro atomique Z élevé).

On l'appelle rayonnement de freinage ou *Bremsstrahlung*.

Le rapport des ordres de grandeur de ces deux phénomènes est donné par l'expression de Bethe:

$$\frac{\text{énergie perdue par rayonnement}}{\text{énergie perdue par ionisation}} = \frac{\Delta U_r}{\Delta U_i} \approx \frac{Z W}{800}$$

W étant exprimée en MeV.

Dans une cible en or, de numéro atomique $Z = 79$, on voit que des électrons ayant une énergie de 10 MeV pourraient perdre la moitié de leur énergie par rayonnement.

On utilise plutôt le tungstène ($Z = 74$), un peu moins efficace, mais permettant des densités de puissance un peu plus élevées. Ce phénomène est donc extrêmement important, car c'est une conversion à bon rendement d'une énergie cinétique en rayonnement dur et a justifié le développement industriel d'accélérateurs pour la radiothérapie, la radiographie et la chimie sous rayonnement.

Caractéristiques de ce rayonnement:

a) répartition spectrale (fig. 5a), dans le cas d'une cible mince: dès que l'énergie de l'électron dépasse quelques mégaelectronvolts, on se rapproche d'un spectre blanc;

b) répartition géométrique (fig. 5b):

- dans le cas d'une cible mince, le demi-angle correspondant à l'intensité moitié est en gros $\alpha \approx m_0 c^2 / W$ donc le rayonnement est dirigé très fortement vers l'avant;

- dans le cas d'une cible épaisse, le spectre est un peu plus aplati mais toujours très directif;

c) intensité du rayonnement sur l'axe (fig. 5c) exprimé en $\text{Gy} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{W}^{-1}$ ($1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$).

Cette courbe est particulièrement importante pour les utilisations en radiographie et en radiothérapie (§ 2).

2 Accélérateurs linéaires

2,1 LIGNE

2,10. Réalisons une ligne (fig. 6) par la juxtaposition d'un grand nombre de résonateurs cylindriques, accordés sur la même fréquence $f_0 = \omega_0/2\pi$, couplés entre eux capacitivement par un orifice axial qui permettra par ailleurs au faisceau de traverser l'ensemble.

Une telle ligne est un filtre : excitée à une pulsation ω , dans sa bande passante, les cellules successives résonnent avec un retard de phase ψ compris entre 0 et π . La courbe $\psi(\omega)$ est la courbe de dispersion de la ligne.

ψ étant une fonction de la fréquence et variant de 0 à π dans la bande passante de la ligne, il s'ensuit que les taux de retard varient avec la fréquence.

2,11 Vitesses synchrones. – Soit p le pas géométrique de la ligne, la condition pour qu'une particule traversant les centres des résonateurs rencontre toujours la même phase HF est que son temps de parcours de l'intervalle p corresponde à une variation de phase du champ HF égale à ψ à $2k\pi$ près

$$\omega \frac{p}{v_\psi} = \psi \pm 2k\pi$$

ou

$$\frac{c}{v_\psi} = \frac{\lambda}{p} \left(\frac{\psi}{2\pi} \pm k \right)$$

Pour un même régime de fonctionnement de la ligne, il y a une infinité de vitesses synchrones (on désigne le rapport c/v_ψ par *taux de retard*, v_ψ étant la vitesse de phase).

Pour chacune de ces vitesses, le voyageur rencontrant chaque cellule dans le même état HF que la précédente, a l'impression d'être accompagné par le champ HF, mais il s'agit là d'un effet stroboscopique. Les vitesses correspondantes sont appelées les *vitesses de phase*. Elles peuvent être négatives : on peut avoir interaction synchrone entre un faisceau et une onde dont l'énergie se propage en sens inverse. Cette propriété est utilisée dans les oscillateurs dits à onde inverse ou *carcinotrons*.

Dans les accélérateurs à électrons, on utilise en général l'onde directe qui correspond au plus petit déphasage. Mais dans certains accélérateurs à protons, ou à ions lourds, on utilise aussi des déphasages d'ordre plus élevé.

2,12 Vitesse de l'énergie. – De l'énergie est transmise sur la ligne d'une cavité à la suivante. La puissance transmise P est égale au produit de la densité d'énergie par unité de longueur W_u par la vitesse de déplacement de l'énergie v_e .

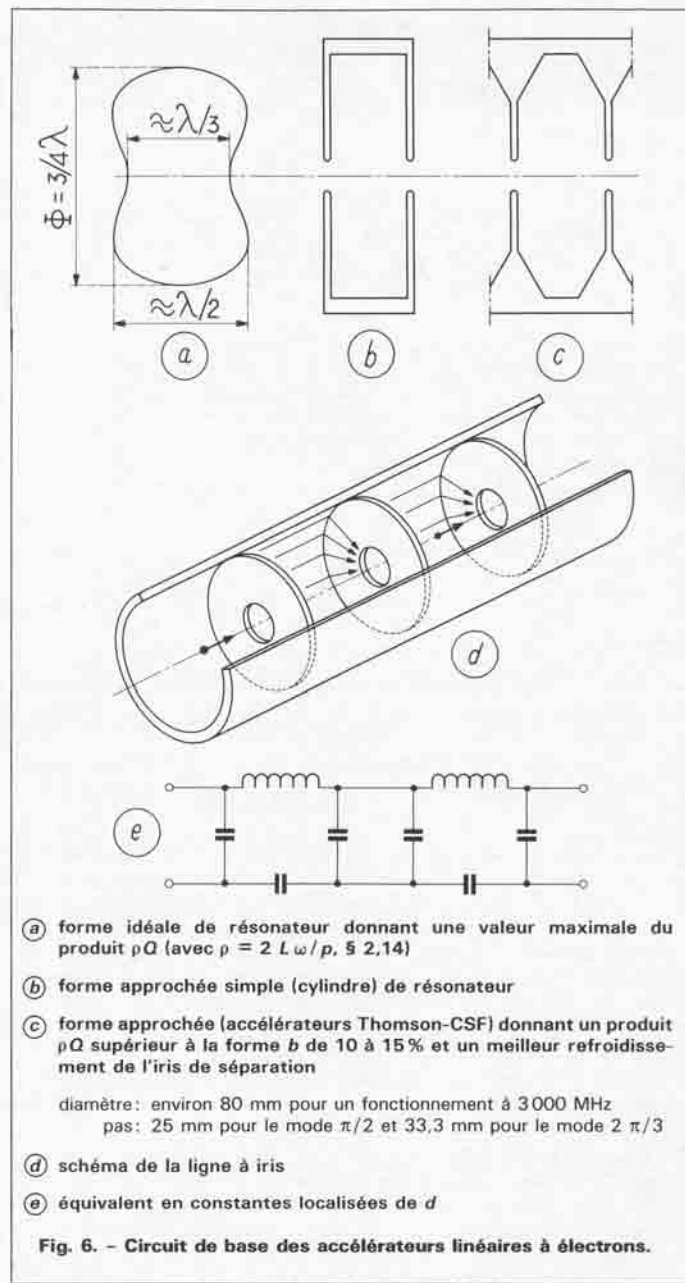
$$P = v_e W_u$$

d'où

$$v_e = \frac{P}{W_u}$$

P est la puissance circulant le long de la ligne, ou celle que débite le générateur à l'entrée. Cette puissance n'est pas perdue dans la ligne elle-même, mais transmise à la charge terminant la ligne.

La vitesse de l'énergie est une grandeur physique, malheureusement très difficile à mesurer directement. Mais on peut démontrer que, dans des conditions très générales qui englobent tous les cas physiques qu'on peut rencontrer, la *vitesse de l'énergie* v_e est égale



à la vitesse de groupe v_g , c'est-à-dire à la vitesse de déplacement du maximum d'amplitude d'un train d'ondes légèrement modulé en fréquence.

$$v_g = p \frac{d\omega}{d\psi}$$

et cette dernière est accessible directement à la détermination expérimentale. C'est donc elle qu'on va employer par la suite, en lieu et

place de la vitesse d'énergie, et utiliser le rapport $\frac{c}{v_g} = \frac{c}{v_e}$.

Il existe en effet une relation simple entre la vitesse de groupe et les vitesses de phase.

En dérivant par rapport à la longueur d'onde λ l'expression de c/v_ψ , on obtient :

$$\frac{c}{v_g} = \frac{c}{v_\psi} - \lambda \frac{d(c/v_\psi)}{d\lambda}$$

La valeur de c/v_g est l'ordonnée du point où la tangente à la courbe $\frac{c}{v_\psi} = f(\lambda)$ coupe l'axe vertical. Elle est la même à une fréquence donnée quelle que soit la vitesse de phase choisie.

2,13 Sensibilité de la vitesse de phase à une variation de fréquence.

On a : $v_e = p \frac{d\omega}{d\psi}$
 $d\psi = p \frac{d\omega}{\omega} \frac{\omega}{c} \frac{c}{v_e}$

Si, par exemple, on a construit une ligne de pas $p = \lambda/4$ où la vitesse de groupe est $c/80$ à une fréquence donnée, cherchons l'écart de fréquence qui entraînerait un décalage de phase de π au bout de 100 cellules :

$$\frac{d\omega}{\omega} = \frac{\pi}{100} \frac{\lambda}{2\pi p} \frac{1}{80} \approx 2,5 \times 10^{-4}$$

Comme on recherche des écarts de phase inférieurs à π , et que les lignes utilisées dans les accélérateurs ont quelquefois plusieurs centaines de cellules, on voit que la fréquence de fonctionnement doit être maintenue stable avec une précision inférieure à 10^{-5} .

2,14 Relation entre la puissance circulante P et l'intensité du champ sur l'axe, pour une ligne, en tenant compte des pertes par effet Joule.

Reprenons la relation $W_u v_g = P$ liant l'énergie emmagasinée par unité de longueur à la puissance circulante.

Pour une cavité de pas p , on peut définir une inductance équivalente $L\omega$, telle que la tension aux bornes (§ 1,3) en fonction de la puissance perdue sur les parois soit donnée par :

$$V^2 = 2 P Q L \omega = 2 \omega W L \omega$$

En rapprochant ces deux relations et en sachant que $W = W_u p$, on en tire l'expression liant la puissance circulante à l'intensité moyenne du champ E :

$$(Ep)^2 = 2 \omega W_u p L \omega = 2 \omega \frac{P}{v_g} p L \omega$$

$$E^2 = \frac{\omega}{c} \frac{c}{v_g} \frac{2 L \omega}{p} P$$

Le terme $2 L \omega / p$ est une impédance par unité de longueur. Il caractérise la façon dont le champ électrique est réparti dans la ligne. Par la suite nous le désignerons par ρ .

$$\rho = E^2 / \omega W_u$$

On peut aussi en déduire la relation entre l'intensité du champ et la perte d'énergie par effet Joule P_J par unité de longueur :

$$E^2 p^2 = 2 P_J \rho L \omega$$

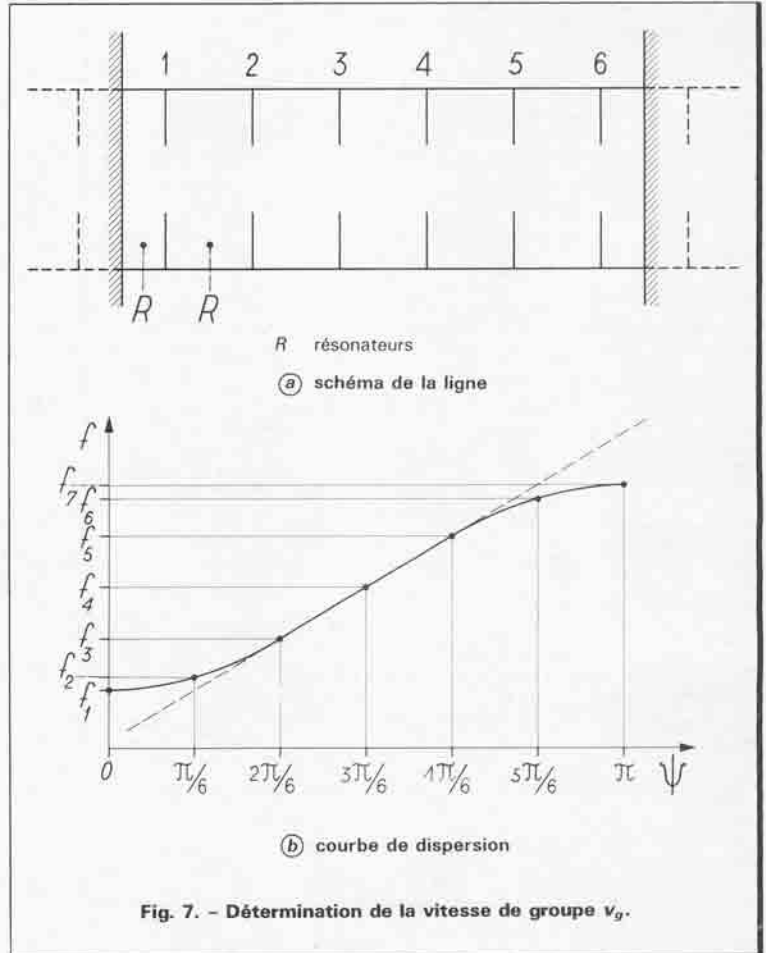


Fig. 7. - Détermination de la vitesse de groupe v_g .

Le produit ρQ est appelé l'impédance shunt de la ligne. Il a les dimensions d'une résistance par unité de longueur, il caractérise la puissance perdue par unité de longueur pour établir un champ donné le long de la ligne et l'on en déduit la longueur de la ligne et la puissance nécessaire pour obtenir l'énergie souhaitée.

2,15 Détermination expérimentale de c/v_g et ρ .

On détermine c/v_g en traçant la courbe de dispersion de la structure (fig. 7), et en calculant pour le déphasage ψ choisi la valeur

$$de p \frac{d\omega}{d\psi}.$$

Pour cela, on réalise une ligne résonnante de N cellules et on repère les fréquences des N résonances, pour lesquelles on connaît ψ . On

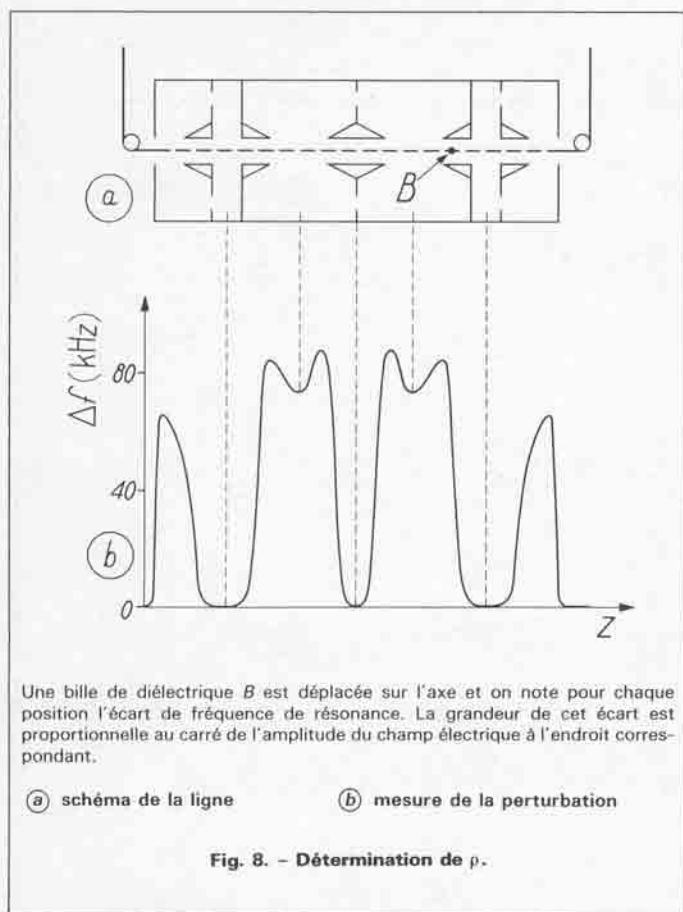
peut donc tracer la courbe $\psi(f)$ et $\frac{c}{v_g} = \frac{c}{2\pi p} \frac{d\psi}{df}$.

c/v_g est le rapport entre l'énergie emmagasinée et la puissance circulante.

On diminue v_g en réduisant la surface du trou de couplage entre les cavités.

On détermine ρ de la façon suivante (fig. 8, p. 10) : on sait que si l'on déforme la paroi d'un résonateur d'une très petite quantité, ou si l'on perturbe le champ à l'intérieur sur un petit volume ΔV , on provoque une variation de la fréquence propre de résonance dont l'expression est :

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{1}{4} \frac{\int_{\Delta V} \epsilon E^2 dV}{W_e}$$



On fait la perturbation dans la région où se trouve le faisceau et on a expérimentalement le rapport E^2 / W_0 , dont on déduit la valeur de ρ en ajoutant les coefficients qui sont directement calculables.

Résultats pratiques : dans les lignes habituellement construites, les vitesses de groupe sont dans le domaine $c/20$ à $c/200$. L'impédance ρ dépend étroitement de la forme des résonateurs et de c/v_g et est par exemple :

– pour la figure 6 b :

$$\rho = \frac{4660 (c/v_g - 8)}{c/v_g} \quad (\text{en } \Omega/\text{m})$$

– pour la figure 6 c :

$$\rho = \frac{5820 (c/v_g - 9)}{c/v_g} \quad (\text{en } \Omega/\text{m}).$$

2,2 ÉCHANGES D'ÉNERGIE ENTRE LE FAISCEAU ET L'ONDE HF

Ce qui suit est destiné à donner une idée des ordres de grandeur des principaux paramètres, dans le cas où le faisceau est groupé en paquets très étroits et a une énergie suffisante pour qu'il n'y ait pas de modulation de vitesse.

2,21 Équation d'échange. – Chaque résonateur élémentaire de pas p a une surtension Q .

L'énergie emmagasinée par unité de longueur est W_u .

L'énergie perdue par effet Joule sur ses parois est :

$$\Delta P_J = \frac{\omega W_u p}{Q}$$

Cela permet de définir un coefficient d'atténuation γ :

$$\gamma = \frac{1}{P} \frac{dP}{dz} \approx \frac{1}{P} \frac{\Delta P_J}{p} = \frac{\omega}{c} \frac{c}{v_g} \frac{1}{Q}$$

La puissance totale perdue par unité de longueur est la somme de l'effet Joule et de la puissance cédée au faisceau, d'intensité I , par un champ d'intensité efficace E . Le bilan d'énergie permet d'écrire l'intégrale première suivante :

$$\frac{dP}{dz} = -\gamma P - EI$$

avec $E^2 = \rho \frac{\omega}{c} \frac{c}{v_g} P$.

2,22 Ligne uniforme constituée de cellules identiques. – Les paramètres γ , ρ , c/v_g sont constants le long de la ligne.

On trouve après intégration :

a) l'évolution de la puissance :

$$P(z) = P_0 \exp(-\gamma z) - \sqrt{\rho \frac{\omega}{c} \frac{c}{v_g} P_0} I z$$

avec P_0 puissance injectée à l'entrée ;

b) la tension correspondant à l'énergie cédée au faisceau pour une longueur ℓ

$$V(\ell) = E_0 \ell \frac{1 - \exp(-\gamma \ell/2)}{\gamma \ell/2} - \rho Q I \ell \left[1 - \frac{1 - \exp(-\gamma \ell/2)}{\gamma \ell/2} \right]$$

avec E_0 champ correspondant à la puissance P_0 .

C'est la loi d'Ohm-Pouillet de la tension aux bornes d'un générateur de force électromotrice

$$\mathcal{E}_0 = E_0 \ell \frac{1 - \exp(-\gamma \ell/2)}{\gamma \ell/2}$$

et de résistance interne

$$\mathcal{R} = \rho Q \ell \left[1 - \frac{1 - \exp(-\gamma \ell/2)}{\gamma \ell/2} \right]$$

La force électromotrice, ou énergie à vide, dépend de la vitesse de groupe choisie et de la longueur ℓ .

$$\mathcal{E}_0 = \sqrt{\rho P_0} Q \ell \frac{1 - \exp(-\omega \ell/2 v_g Q)}{\sqrt{\frac{1}{2}} \sqrt{\frac{1}{2} \frac{\omega \ell}{v_g Q}}}$$

Cette expression a un maximum pour $\frac{\omega \ell}{2 v_g Q} \approx 1,22$

$$\mathcal{E}_{0 \text{ opt}} \approx 0,9 \sqrt{\rho P_0} Q \ell$$

On remarque que si $P_0 = 0$ l'énergie $V(\ell)$ est négative : un faisceau qui traverse une ligne non alimentée lui cède de l'énergie.

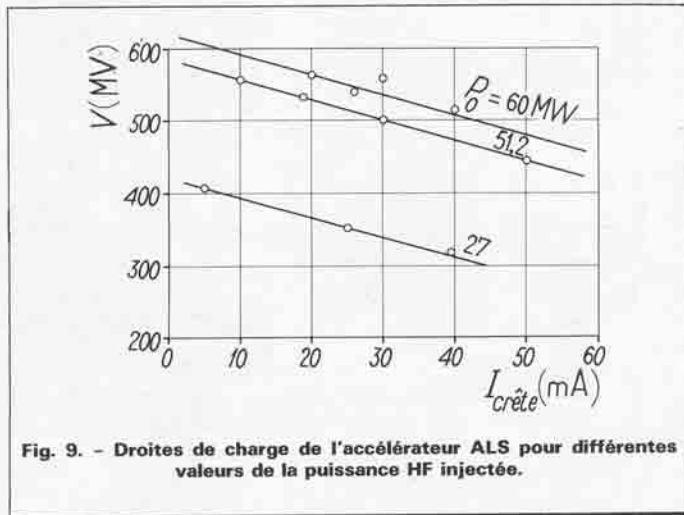


Fig. 9. - Droites de charge de l'accélérateur ALS pour différentes valeurs de la puissance HF injectée.

2,23 Ligne à champ constant. — Si l'on cherche la fonction $\frac{c}{v_g} = f(z)$ qui rend V maximal, on a un problème classique de recherche d'extremum d'une intégrale. On trouve que V est maximal si c/v_g est tel que $dP/dz = Cte$.

Le calcul est un peu plus compliqué; on trouve pour la tension correspondante:

$$V(z) = LE_0 \frac{1 - [1 - (z/L)]^{\eta/2}}{1 - (\eta/2)} - \frac{LE_0}{I_0} \left[-\frac{z}{L} + \frac{[1 - (z/L)]^{1-\eta/2}}{1 - (\eta/2)} \right] I$$

C'est encore une expression de la forme (fig. 9)

$$V(z) = \mathcal{E} - \mathcal{R}I$$

L est la longueur d'épuisement de la puissance HF, $L = \frac{P_0}{dP/dz}$,

η le rendement de transfert de l'énergie HF au faisceau;

$$\eta = \frac{EI}{\gamma P + EI_0} \text{ pour le courant nominal choisi } I_0.$$

Pour une longueur donnée

$$V_{max} = LE_0 \frac{\ell}{L} = E_0 \ell$$

avec

$$E_0 = \sqrt{\rho \frac{\omega}{c} \left(\frac{c}{v_g} \right)_0 P_0}$$

$$L = \frac{1}{\gamma_0} \left(\frac{c}{v_g} \right)_0 = \frac{Q}{(\omega/c) L}$$

$$V_{max} = \sqrt{\rho Q P_0 \ell}$$

La ligne de champ constant donne pour la même longueur et la même puissance d'entrée une énergie supérieure de 10 % environ à celle de la ligne uniforme.

Applications numériques:

pour $\rho = 40 \text{ M}\Omega/\text{m}$
 $\ell = 1 \text{ m}$
 $P = 1 \text{ MW}$

on a $W = 6,3 \text{ MeV}$.

Ce sont les caractéristiques d'un petit accélérateur de radiographie.

Les lignes du grand accélérateur de Stanford (SLAC) ont 3 m, sont alimentées à 7 MW, et fournissent 20 MeV. Il y en a 1000 pour atteindre 20 GeV.

Les lignes de l'accélérateur linéaire de Saclay (ALS) ont 6 m, sont alimentées à 2 MW et fournissent 20 MeV. Il y en a 30 pour atteindre 600 MeV.

La ligne de champ constant est plus courte que la ligne uniforme pour les mêmes performances. Elle offre en plus un avantage très important de mal propager les autres modes d'oscillations des cavités qui risquent dans le cas de la ligne uniforme, d'entrer en interaction avec le faisceau et de donner des phénomènes gênants.

C'est le cas, par exemple, pour le mode transverse magnétique TM_{01} qui a une composante de champ électrique normale au faisceau, donc à effet défléchissant, et aussi en dehors de l'axe une composante axiale, avec laquelle le faisceau peut interagir et exciter ce mode.

Il se produit alors un effet d'amplification du type amplificateur à ondes progressives qui, partant du bruit du faisceau dans la bande de fréquence de ce mode, peut, si l'accélérateur est assez long, atteindre un niveau d'intensité tel que le faisceau est défléchi suffisamment loin de l'axe pour se perdre sur les parois.

Ce phénomène, constaté à Stanford et à Kharkov, est appelé *Beam Break Up* aux États-Unis. Les lignes à champ constant ont été utilisées en premier sur l'accélérateur de 28 MeV installé à Saclay en 1956. Leur utilisation est maintenant généralisée.

On voit que si l'on s'impose une tension V , on a une seule équation faisant intervenir le produit $P_0 \ell$ de la puissance HF par la longueur de l'accélérateur.

Le choix de P_0 et de ℓ n'est pas donné par la physique du faisceau, mais est tiré de l'examen du coût total de l'appareil, et vise à chercher le coût minimal.

Le plus long des accélérateurs construits à ce jour est celui de l'Université de Stanford; il a 3 km de longueur et atteint 20 GeV.

Celui qui a la puissance moyenne de faisceau la plus élevée est l'ALS, construit près de Saclay qui atteint 600 MeV et plus de 200 kW de puissance moyenne.

Données pratiques: pour des raisons de facilité de contrôle de la vitesse de phase à la fréquence imposée, les lignes construites sont soit sur le mode $\frac{\pi}{2}$ ($\psi = \frac{\pi}{2}$) $p = 25 \text{ mm}$ à

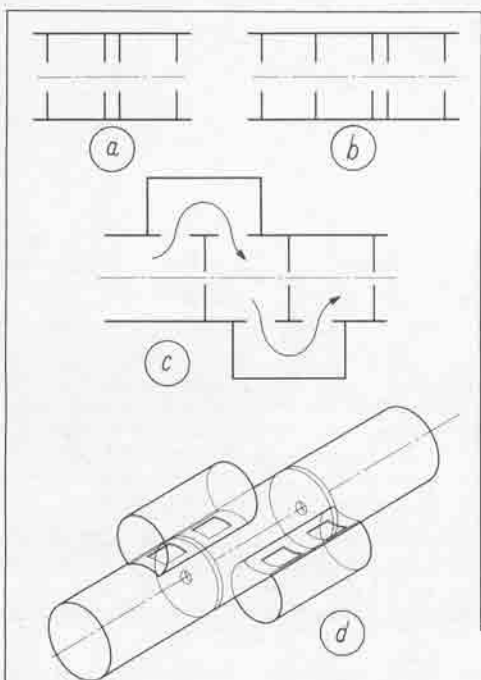
2998 MHz, soit sur le mode $\frac{2\pi}{3}$ ($\psi = \frac{2\pi}{3}$) $p = 33,33 \text{ mm}$.

Le mode $2\pi/3$ a une impédance shunt un peu supérieure à celle du mode $\pi/2$, et convient mieux aux accélérateurs de grande énergie (Stanford, ALS).

Le mode $\pi/2$ est un peu plus aisé à contrôler, et convient mieux aux petits accélérateurs, ou aux accélérateurs à grand courant crête, où les pertes en ligne ont une influence moindre.

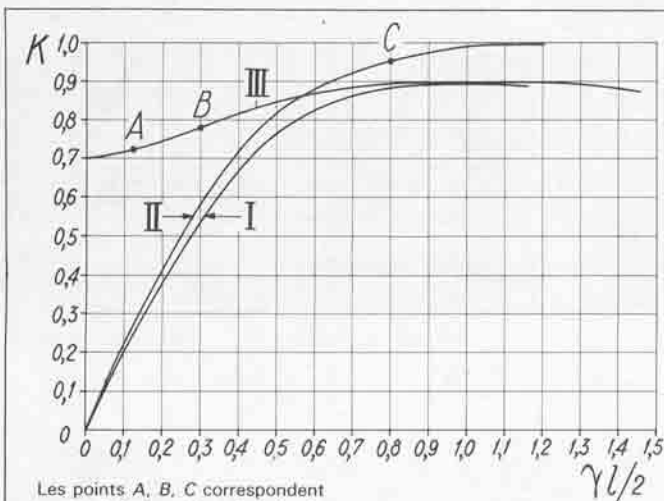
Toujours à 2998 MHz, le diamètre extérieur est de l'ordre de 80 mm et le diamètre de l'iris central varie entre 26 et 18 mm, pour une valeur de c/v_g passant de $c/20$ à $c/100$ environ.

Les puissances HF nécessaires pour obtenir un champ électrique accélérateur de l'ordre de 3 à 10 MV/m sont de l'ordre de 1 à 20 MW. Dans ce domaine de puissance, les amplificateurs ne peuvent pas fonctionner en régime continu. Ils fonctionnent en impulsions de quelques microsecondes avec une fréquence de répétition de 50 à 1000 Hz.



(a) bipériodique (b) tri périodique
(c) et (d) bipériodiques avec cellules de couplage latérales (Los Alamos) (perspective et coupe)

Fig. 10. - Lignes résonnantes.



Les points A, B, C correspondent à un accélérateur de radiothérapie:

A ligne courte de 4 MeV
B Neptune (CGR MeV)
C Sagittaire (CGR MeV)

I ligne uniforme
II ligne à champ constant
III ligne résonnante

Fig. 11. - Facteurs d'efficacité K comparée des lignes à ondes progressives, et des lignes résonnantes, en fonction de leur longueur l .

2,3 LIGNES RÉSONNANTES. CAS DES ACCÉLÉRATEURS TRÈS COURTS

Dans certains cas d'utilisation, on cherche à avoir une ligne accélératrice aussi courte que possible. Mais alors l'atténuation de la ligne est insuffisante et une proportion importante de l'énergie n'est pas consommée, elle est perdue dans la charge à l'aval de la ligne.

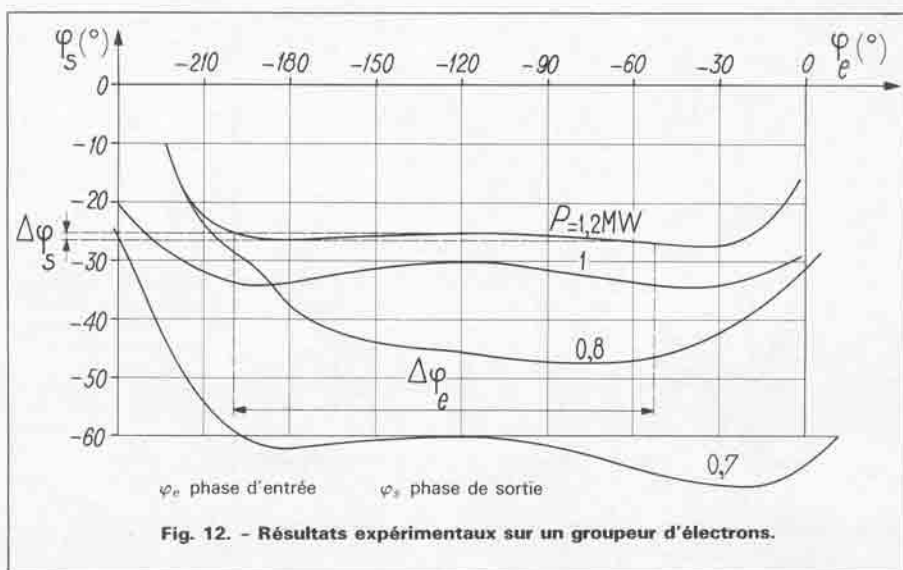


Fig. 12. - Résultats expérimentaux sur un groupeur d'électrons.

Pour essayer d'employer cette puissance, on peut monter la ligne dans un recirculateur HF (mais cela rend les réglages assez critiques) ou bien terminer la ligne sur un court-circuit, et la transformer en résonateur.

Considérons une ligne à n cellules à n modes de résonance correspondant aux n valeurs de ψ

$$\psi = k\pi/n \quad 0 \leq k \leq n$$

Le mode π où toutes les cavités sont excitées au même niveau d'intensité n'est pas utilisé à cause du caractère très critique des réglages sauf si la ligne comporte cinq ou sept cellules. Par exemple dans l'anneau de stockage électron-positon SPEAR à Standford, les lignes HF d'entretien sont des lignes à cinq cellules au mode π fonctionnant à 360 MHz. On emploie plutôt le mode $\pi/2$. Dans ce mode de résonance, un résonateur sur deux a un champ nul, donc ne participe pas à l'accélération, la longueur utile de la ligne est ainsi la moitié de sa longueur réelle. Mais ce caractère défavorable peut être corrigé de plusieurs façons:

a) faire les cavités de champ nul beaucoup plus courtes que les cavités actives, portant ainsi la proportion de la partie utile à 75 ou 80 % (fig. 10a);

b) au prix d'une complication technologique, coupler ces cavités latéralement par rapport aux cavités actives, ces dernières occupant alors toute la partie utile; ce dessin a été inventé à Los Alamos et est utilisé dans l'accélérateur linéaire à protons de 800 MeV (fig. 10c et d).

c) faire des lignes tri périodiques au mode $2\pi/3$ où une cavité sans champ est très étroite (fig. 10b).

Énergie obtenue dans une section résonnante: en admettant que la ligne soit adaptée à sa résonance, et en supposant l'atténuation et la charge du faisceau faibles, on peut écrire directement le bilan des puissances: si $P(0)$ est la puissance circulant côté entrée, elle est côté sortie:

$$P(l) = P(0) \exp(-\gamma l) - E(0) I l$$

avec l longueur de la section résonnante.

Cette énergie se réfléchit et il revient au niveau de l'entrée:

$$P(l) \exp(-\gamma l);$$

le niveau $P(0)$ est rétabli par la puissance P fournie par le générateur, et l'on a

$$P(0) = \frac{P_0 - E(0) I l \exp(-\gamma l)}{1 - \exp(-2\gamma l)}$$

La figure 11 montre la comparaison des performances en tension de ces différents types de lignes: uniforme, à champ constant, résonnante. Le facteur K est l'estimation du rapport $V^2/P l$ obtenu en pratique.

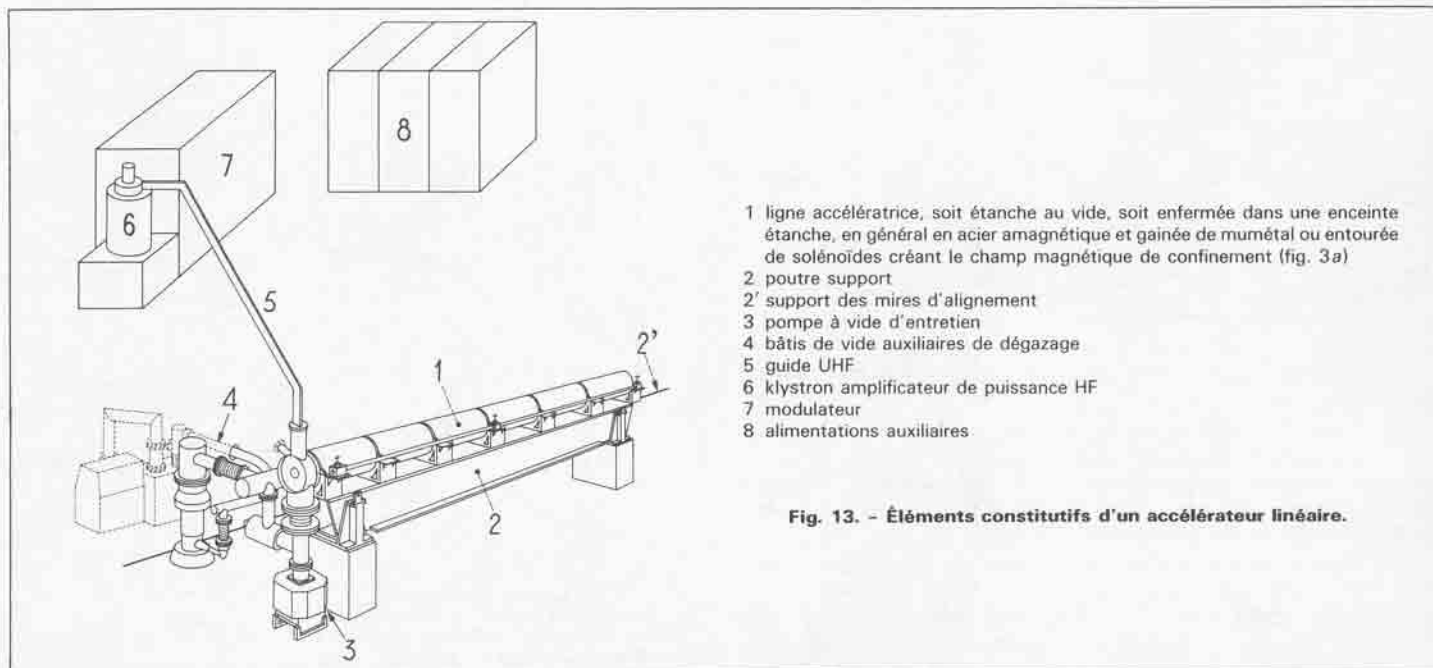


Fig. 13. - Éléments constitutifs d'un accélérateur linéaire.

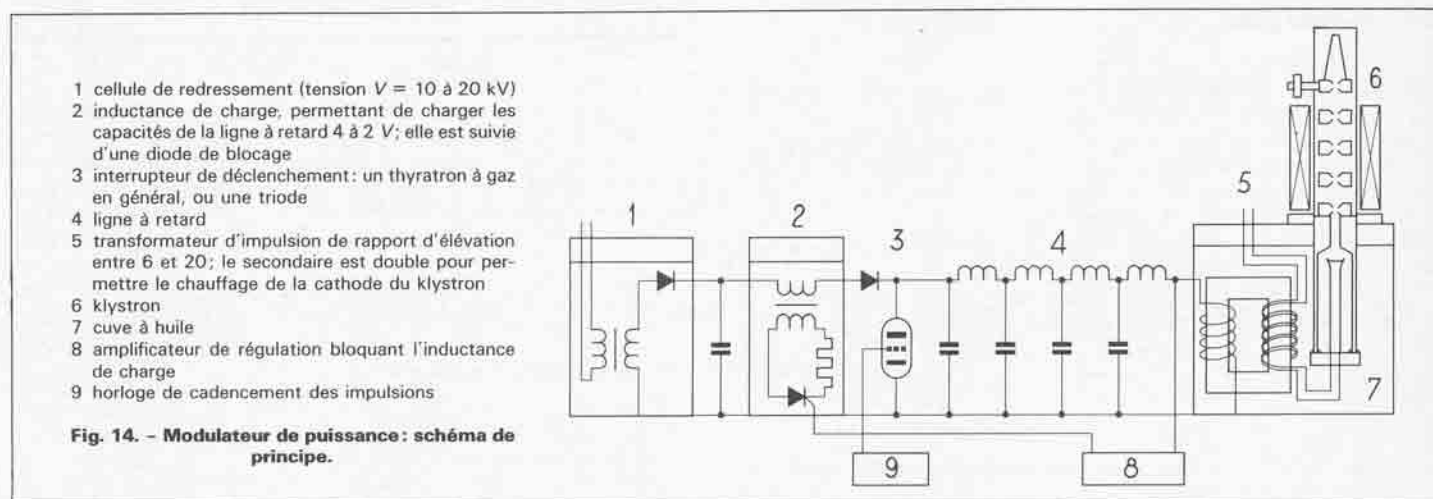


Fig. 14. - Modulateur de puissance: schéma de principe.

Grouperment au début de l'accélération: dans la première partie de l'accélérateur, les électrons sont injectés avec une énergie de l'ordre de 30 à 150 keV ($0,3$ à $0,63$ c) et leur vitesse varie progressivement pour se rapprocher de $0,98$ c à 2 MeV. La vitesse de phase de l'onde HF dans la ligne est donc croissante, pour conserver le synchronisme et on met à profit la possibilité de modulation de vitesse pour effectuer le grouperment des électrons en paquets étroits. C'est le même problème que celui du grouperment dans un klystron multicavités, mais poussé beaucoup plus loin, car ici on cherche un grouperment beaucoup plus serré.

Le calcul de l'interaction onde-faisceau est maintenant conduit à l'ordinateur. Le faisceau entrant est divisé en tranches minces que l'on suppose se comporter comme un tout. Le champ de charge d'espace de toutes les tranches est calculé et le champ total sur chacune en est déduit. On calcule alors le mouvement de chaque tranche, et le programme de calcul permet d'optimiser les lois de variation de la vitesse de phase et de l'intensité du champ, de manière à avoir un grouperment de plus de 50% du courant dans un paquet de 1 à 2° d'extension en phase.

Les courbes de la figure 12 donnent un exemple des résultats obtenus.

2,4 CONSTITUTION D'UN ACCÉLÉRATEUR LINÉAIRE À ÉLECTRONS

Un accélérateur linéaire à électrons est donc constitué (fig. 13):

- d'une ligne accélératrice, formée de un ou plusieurs tronçons ou sections;
- d'une ou plusieurs sources d'énergie HF; (pour les petits accélérateurs, ce peut être un magnétron; ces oscillateurs sont capables de délivrer des puissances de crête allant jusqu'à 4 MW à 3000 MHz et 2 MW à 10000 MHz; pour les grands accélérateurs, ce sont des klystrons amplificateurs de 4 à 30 MW de puissance de crête, pilotés par un auto-oscillateur très stable);
- de modulateurs des sources HF (fig. 14).

En effet les puissances crêtes importantes qui sont nécessaires imposent un régime de fonctionnement en impulsions brèves (quelques microsecondes). Le cycle utile est limité par la puissance moyenne maximale que peuvent supporter les amplificateurs HF et les lignes accélératrices.

Les générateurs d'impulsions de puissance sont des meubles relativement volumineux comprenant :

- un ensemble d'alimentation et de circuits auxiliaires;
- un ensemble logique de pilotage et de surveillance de l'accélérateur et du faisceau;
- un dispositif d'exploitation du faisceau:
- s'il s'agit d'un grand accélérateur de physique nucléaire, ce dispositif peut être plus important que l'accélérateur lui-même, comprenant des aimants d'analyse, des cibles, des cellules de comptage et une électronique de détection très élaborée;
- s'il s'agit d'un petit accélérateur à utilisation spécifique, il sera doté de systèmes d'adaptation du faisceau à la fonction à remplir: irradiation industrielle, gammagraphie, radiothérapie.

2,5 MICROTRON

2,51 Principe. — Dans un microtron, l'énergie est communiquée aux projectiles par un champ HF localisé au voisinage d'un point où les trajectoires successives circulaires sont tangentes intérieurement. Ces trajectoires ne sont pas synchrones, mais le processus d'accélération est cumulatif lorsque les durées de révolution diffèrent d'un nombre entier de périodes du champ HF.

Soit $\Delta U = \alpha m_0 c^2$ le gain d'énergie à chaque tour, et τ_0 la période HF.

L'électron part du repos. La première orbite se fait avec l'énergie $U = U_0 (1 + \alpha)$. Le temps de parcours de cette orbite est

$$\tau_1 = \frac{2\pi U_0 (1 + \alpha)}{e B c^2}$$

avec B induction magnétique.

Pour qu'il y ait synchronisme au deuxième passage, il faut que

$$\tau_1 = k_1 \tau_0 \quad \text{avec } k_1 \text{ entier}$$

$$\text{soit} \quad 1 + \alpha = \frac{e B c^2}{2\pi U_0} k_1 \tau_0$$

Pour les tours suivants,

$$\tau_n - \tau_{n-1} = k \tau_0 \quad \text{avec } k \text{ entier}$$

$$\text{soit} \quad \alpha = \frac{e B c^2}{2\pi U_0} k \tau_0$$

$$\text{d'où} \quad 1 = \frac{e B c^2}{2\pi U_0} (k_1 - k) \tau_0$$

$$\alpha = \frac{k}{k_1 - k}$$

Pour $\alpha = 1$ valeur minimale, on a

$$k = 1 \text{ et } k_1 = 2$$

Le gain d'énergie par tour est 0,51 MeV à une induction $B = 0,11$ T, pour la fréquence de 3000 MHz.

La figure 15 montre comment est réalisé un microtron. L'élément essentiel est la cavité du type rhumbatron dans laquelle apparaît le champ électrique accélérateur. La source d'électrons est particulière: dans les premiers appareils, on utilisait l'émission froide.

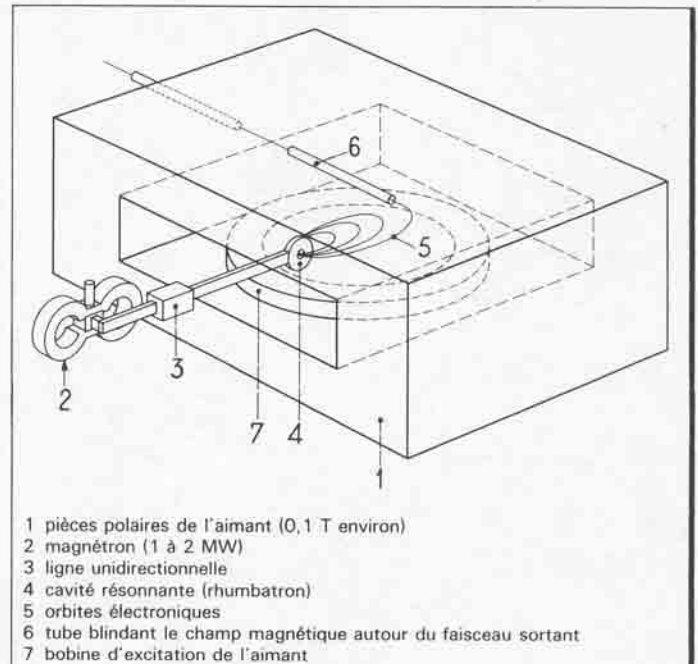


Fig. 15. - Microtron.

Lorsque le champ électrique alternatif atteint une valeur suffisante, il y a émission importante d'électrons et ceux-ci sont accélérés, sous l'action de ce champ, le long des trajectoires qui sont déterminées par les directions des vitesses initiales et par la forme du champ entre les becs; une certaine proportion des électrons émis est perdue, mais quelques-uns passent à travers l'ouverture et sont susceptibles de constituer un faisceau utile.

Les microtrons plus récents sont équipés d'un canon à électrons permettant un meilleur contrôle du courant injecté.

2,52 Exemples de réalisations.

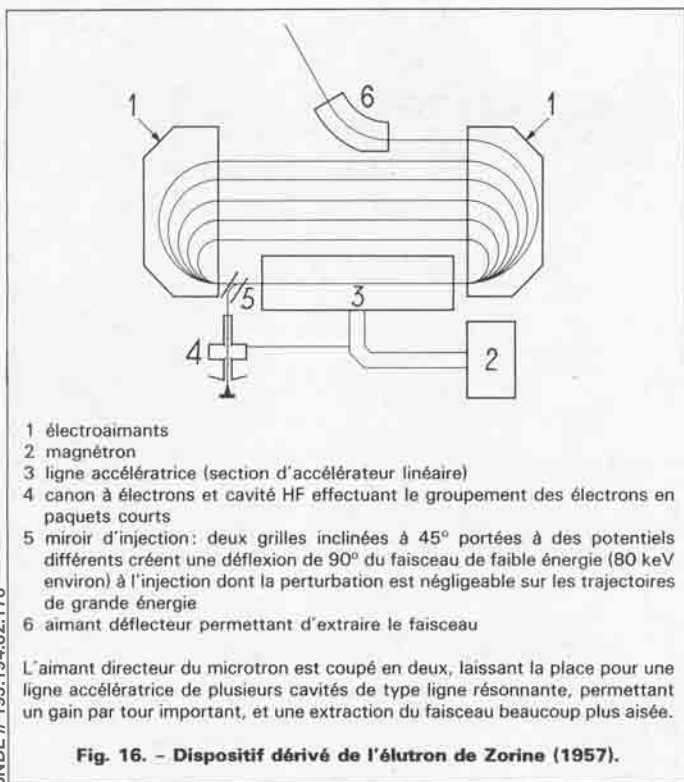
• Henderson a décrit un microtron donnant des électrons de 1,5 MeV dont les principales caractéristiques sont les suivantes: l'appareil fonctionne à une fréquence de 3000 MHz, l'induction magnétique est de 0,1 T, le diamètre de l'orbite finale est environ de 30 cm, la puissance d'entrée est de 500 kW avec une durée d'impulsion de 2 μ s et une fréquence de répétition de 200 Hz. Une charge résistive est couplée en série avec les cavités et un déphaseur est réglé pour que le générateur soit exactement à un nombre entier de demi-longueurs d'onde du résonateur, afin d'assurer une stabilité de fréquence maximale.

• Un microtron de 3 MeV fonctionnant à une fréquence de 9,5 GHz a été construit par Kaiser et Mayes. Avec une puissance de 100 kW à l'entrée, il est possible d'obtenir des modes de fonctionnement avec un gain d'énergie de 102, 127, 225 keV par tour.

2,53 Avantages et possibilités. — Un avantage du microtron est la simplicité de construction de ses éléments, et ses dimensions réduites.

Le microtron a fait l'objet d'études intensives et d'au moins une trentaine de réalisations, surtout en URSS et dans les pays de l'Est. Un microtron de 12 MeV est utilisé comme injecteur dans le synchrotron à électrons de Frascati (Italie). Un constructeur (Scanditronix en Suède) propose des microtrons de 15 MeV pour la thérapie.

Le problème difficile est celui de la perte progressive du faisceau. Au-delà d'une trentaine d'orbites, il semble très difficile de maintenir correctement les trajectoires. Les courants accélérés peuvent atteindre une intensité en crête de 30 à 50 mA, donc restent nettement en dessous de ce que peut donner un accélérateur linéaire.



Une version beaucoup plus modeste est aussi envisagée: l'aller et retour ou *duotron* qui vise à faire repasser le faisceau en sens inverse au travers d'une section accélératrice résonnante au mode π . Pour une telle section la vitesse de phase est la même dans les deux sens. On obtient ainsi un doublement de l'énergie. Ce dispositif a été proposé par Kyhl en 1954. Le problème consiste à réaliser un miroir renvoyant le faisceau sur sa droite incidente, ceci avec une certaine bande passante en énergie pour permettre les réglages, et avec des trajectoires de même longueur pour ne pas entraîner de décalage de phase entre les électrons. Un tel miroir n'est pas simple, mais peut être obtenu par une association de trois ou quatre prismes magnétiques. Une vérification expérimentale a été faite au Canada (Laboratoire de Chalk River).

2,6 ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES À INDUCTION

Un nouveau type de machine est encore au stade de l'étude de laboratoire, mais les performances potentielles peuvent en faire des outils très puissants.

2,61 Principe. — Il fut découvert par Christophilos vers 1962 dans le cadre d'études de confinement d'un plasma par un faisceau d'électrons, puis repris en URSS.

Soit une cavité cylindrique (fig. 17) analogue aux cavités décrites précédemment (fig. 6, p. 8), mais de diamètre de 50 à 60 cm, dans laquelle est logé un tore de matériau magnétique muni d'une spire formant le primaire d'un transformateur d'impulsions. Si l'on envoie une impulsion de courant dans ce primaire à l'aide d'une batterie de condensateurs, la variation d'induction $d\Phi/dt$ provoque une force électromotrice dans toute spire entourant le noyau, et en particulier sur l'axe. C'est un transformateur de rapport 1/1, de forme un peu particulière.

On peut mettre n transformateurs identiques en série, et l'on obtient une tension n fois plus grande.

Si l'on a $V = -d\Phi/dt$, la variation totale de flux $\Delta\Phi$ est égale au produit $V\tau$ de la tension obtenue par la durée de l'impulsion:

$$V\tau = \Delta\Phi = S \Delta B$$

avec B induction magnétique,
 S section totale du matériau magnétique.

Ordres de grandeur pour un élément:

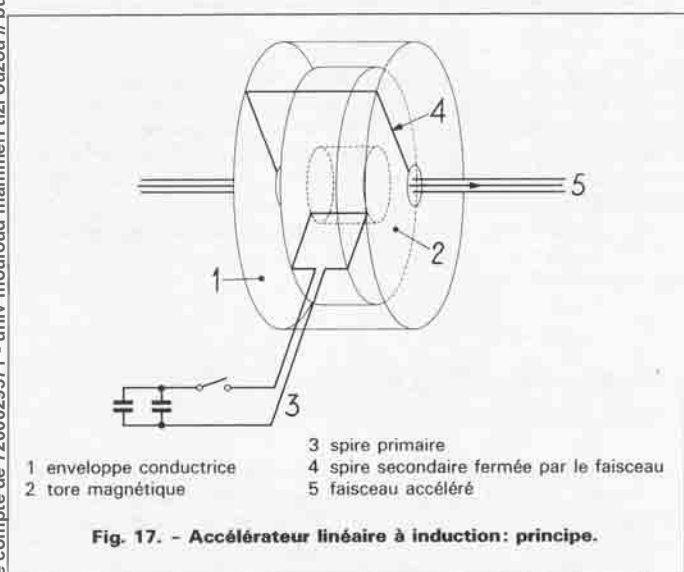
Avec un courant magnétisant $I = 1600$ A
 $S = 1$ dm²
 $V\tau = 2 \cdot 10^{-2}$ Wb

$$\text{on a } V = 200 \text{ kV pendant } \tau = \frac{2 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^5} = 10^{-7} \text{ s}$$

Mais pendant ces 100 ns, on peut accélérer un courant de 5000 A, soit une puissance de crête de $5000 \times 200 \times 10^3 = 1000$ MW et donc une énergie de $10^9 \times 10^{-7} = 100$ J, cela pour un seul élément.

En accolant des éléments en cascade, déclenchés simultanément, on peut obtenir un champ électrique entre 2 et 5 MV/m.

Il s'agit donc d'une nouvelle classe d'accélérateurs, qui resteront vraisemblablement à des énergies de quelques dizaines de MeV, mais capables d'accélérer quelques milliers d'ampères, et transportant des puissances moyennes de quelques mégawatts.



Un certain nombre de perfectionnements sont en cours de réalisation dans le sens du schéma de la figure 16: séparation de l'aimant en deux parties, permettant d'utiliser non plus une cavité HF unique mais un élément de ligne résonnante, d'atteindre un gain de plusieurs mégaélectronvolts par tour, et de réduire ainsi le nombre des orbites ou d'augmenter l'énergie. On peut alors avoir assez de place pour loger un système d'injection du faisceau plus efficace et loger des lentilles, modifier localement les faces des électroaimants pour assurer une bonne focalisation tout en conservant une certaine compacité à l'appareil. Un important projet de plusieurs appareils de ce type montés en cascade est en cours de réalisation à Mayence en République fédérale d'Allemagne.

Une extrapolation plus hardie vise à utiliser une ligne accélératrice supraconductrice pour atteindre de grandes énergies et un fonctionnement en régime continu. Ces appareils sont encore au stade de l'étude de laboratoire à l'Université d'Illinois aux États-Unis.

On peut aller encore plus loin et supprimer le matériau magnétique en utilisant l'énergie électrostatique stockée dans des lignes radiales repliées : ce sont les **accélérateurs linéaires à induction sans fer** (fig. 18).

La ligne est constituée par une succession de cavités cylindriques, chacune contenant un disque isolé. Une série d'éclateurs très spéciaux peut court-circuiter chaque disque avec un côté de la paroi. On charge tous les disques à une tension élevée V_0 , et on déclenche tous les éclateurs en même temps.

L'énergie électrique contenue dans chaque ligne s'écoule dans les éclateurs, mais il faut quelques dizaines de nanosecondes pour que le disque soit déchargé. Pendant tout ce temps, la tension V_0 reste appliquée entre l'autre côté du disque et la paroi qui lui fait face.

Le courant de court-circuit peut atteindre plusieurs centaines de milliers d'ampères, d'où la possibilité de gagner un facteur de près de 100 en intensité instantanée sur les appareils précédents.

2,62 Performances. – On a obtenu à l'heure actuelle :

5 MeV et 5 000 A pendant 50 ns à Drouba (URSS),
9 MeV et 25 000 A pendant 15 ns (appareil RADLAC aux États-Unis),
13,5 MeV et 50 000 A pendant 20 à 40 ns (appareil LIU-10 en URSS),
20 MeV et 4 000 A pendant 60 ns à Livermore (États-Unis) avec un appareil utilisé en radiographie-éclair (publication septembre 1982).

2,63 Applications envisagées. – Il en existe plusieurs actuellement (1982) qui sont les suivantes.

- **Accélération collective** : un paquet très dense d'électrons peut retenir des ions dans l'intense champ de charge d'espace qui y règne. Si l'on accélère ensuite ce paquet, les ions se déplacent avec lui à la même vitesse, ce qui correspond pour eux à une énergie beaucoup plus élevée que celle des électrons.

On a déjà obtenu des ions accélérés par ce procédé, mais il faut encore beaucoup de développements technologiques pour atteindre des faisceaux utilisables.

- **Génération d'ondes hyperfréquences très intenses** : les très grandes intensités peuvent permettre dans un montage de type klystron d'obtenir des puissances instantanées très élevées (plusieurs centaines de mégawatts).

- **Accélération des ions lourds** : l'accélérateur linéaire à induction se présente pendant la durée de l'impulsion, comme un accélérateur direct, dans lequel aucune condition de phase n'est imposée. On peut donc accélérer aussi bien des ions que des électrons.

- **Applications en chimie sous rayonnement et stérilisation** : du fait des très grandes puissances moyennes et de la rusticité relative des éléments constitutifs, ces appareils pourraient prendre la relève des accélérateurs actuels à ligne hyperfréquence, dans ces applications pour lesquelles la finesse du faisceau, la précision de son énergie ne sont pas des éléments critiques.

- **Utilisations spéciales** : il existe un projet russe d'un accélérateur de 5 MeV, 5 000 A, 1 μ s, 360 impulsions/seconde, soit une puissance moyenne de 9 MW, utilisable pour le percement des tunnels dans les sols rocheux ; il peut s'agir de creusement de cavités dans lesquelles on peut disposer des charges explosives.

De tels faisceaux peuvent aussi être intéressants pour les études de fusion thermonucléaire par confinement inertiel : un ou plusieurs

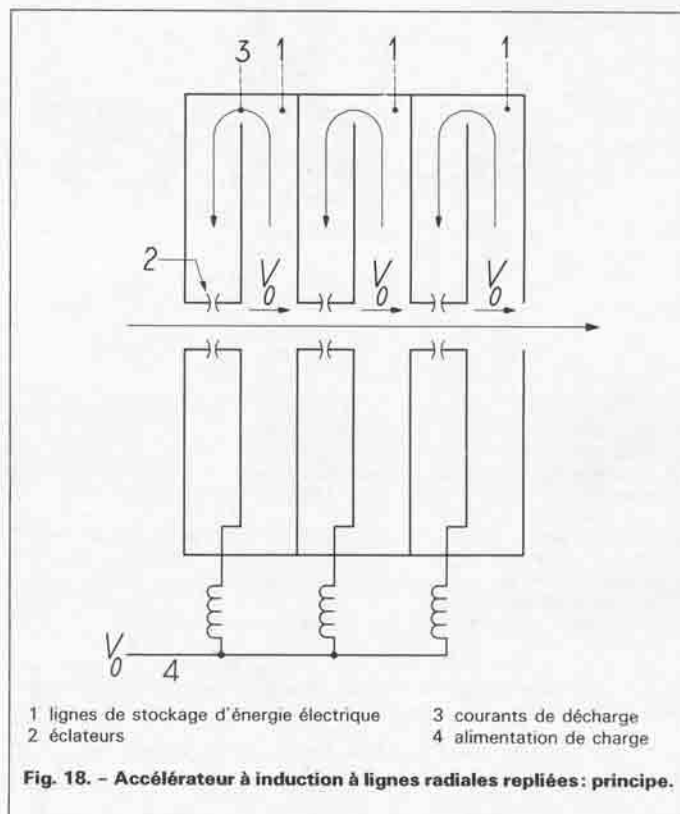


Fig. 18. – Accélérateur à induction à lignes radiales repliées : principe.

faisceaux de grande puissance instantanée focalisés sur une petite boule d'un mélange de deutérium-tritium peuvent la porter à une température suffisante pour déclencher les réactions de fusion, en un temps beaucoup plus court que celui nécessaire à l'éclatement mécanique de la boule et à la chute de densité correspondante, d'une façon plus efficace qu'un faisceau laser.

Mais, actuellement (1982), ce ne sont que des projets à moyen et long terme, comme la possibilité d'utiliser de tels faisceaux dans des applications militaires.

2,7 GRANDS ACCÉLÉRATEURS LINÉAIRES À ÉLECTRONS

Le plus grand est celui de Stanford qui a une longueur de 3 km, une énergie de 20 GeV, est composé de 1 000 sections de 3 m alimentées par 250 klystrons amplificateurs d'une puissance de 30 MW.

Ensuite vient l'accélérateur d'Orsay qui a une longueur de 250 m, une énergie de 2,5 GeV et est composé de 37 sections de 6,3 m de longueur.

Ces appareils ont été construits pour les études de *physique nucléaire* et de *physique des particules*.

Les progrès réalisés au cours des années sont :

a) *Augmentation de l'énergie des particules* :

Stanford : 0,5 GeV (1954)

Orsay : { 1 GeV (1962)

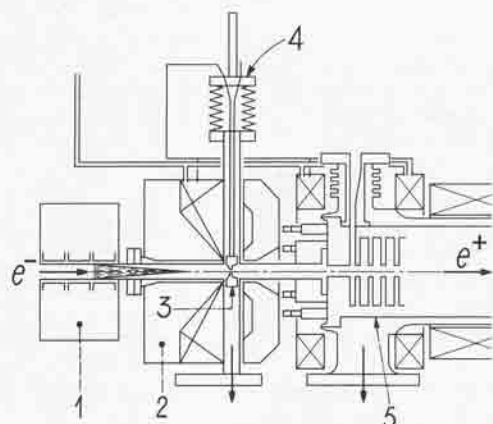
{ 1,3 GeV (1963)

{ 2,5 GeV (1968)

Stanford : 20 GeV (1972)

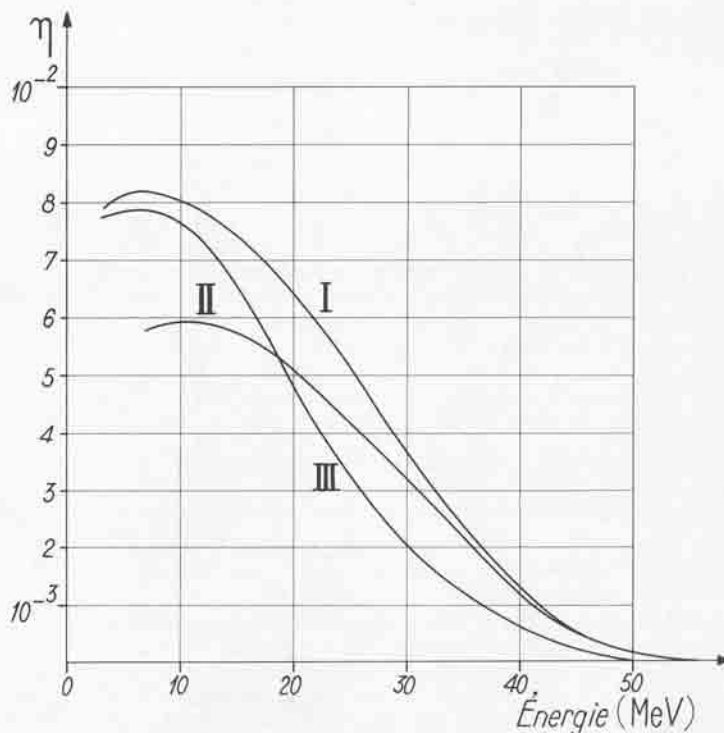
Cela, essentiellement parce que le pouvoir séparateur de l'appareil augmente dans les mêmes proportions.

Par ailleurs, l'énergie disponible dans une réaction nucléaire avec une cible fixe croît comme la racine carrée de l'énergie du projectile.



- 1 triplet de quadripôles permettant une focalisation du faisceau d'électrons incident sur une tache fine de la cible
- 2 électroaimant de la lentille d'immersion dans laquelle se trouve la cible
- 3 cible
- 4 mécanisme de commande du mouvement de la cible qui permet une densité de faisceau plus élevée
- 5 début de la section d'accélération recevant le faisceau de positons

(a) schéma de principe



En ordonnées, le nombre de positons par MeV et par stéradian pour trois épaisseurs de cibles :

- I une longueur de radiation X_0
- II $0,4 X_0$
- III $2 X_0$

Ces courbes ont été tracées pour une énergie des électrons incidents de 55 MeV.

Les positons produits sont post-accélérés dans un deuxième accélérateur linéaire et on ne peut prendre dans le spectre que la partie basse énergie (en gros inférieure à 10 MeV). Lorsque l'énergie des électrons primaires varie, cette région de basse énergie n'est pratiquement pas modifiée sur ces courbes.

 (b) rendement de conversion η (d'après Burnod)

Fig. 19. - Production de positons.

La course aux hautes énergies est maintenant terminée. Il se révèle beaucoup plus intéressant d'utiliser ces appareils comme injecteurs dans des anneaux de stockage électrons-positons, dans lesquels l'énergie disponible dans les collisions est beaucoup plus élevée, les problèmes de contrôle de la stabilité des faisceaux dans les anneaux étant maintenant maîtrisés.

b) *Augmentation du cycle utile* : les accélérateurs linéaires fonctionnent en impulsions courtes, de l'ordre de la microseconde, ce qui fait que les détecteurs reçoivent de grosses bouffées d'informations qui peuvent les saturer, et attendent ensuite la prochaine impulsion.

Si, par exemple, l'objectif de l'étude est une détection de l'émission simultanée de deux particules caractéristiques d'une réaction, la finesse de la détection va dépendre essentiellement du rapport de la durée d'impulsion à la constante de temps propre du détecteur. On a une meilleure *définition* en utilisant un faisceau permanent de plus faible intensité, plutôt qu'un faisceau intense en impulsions trop courtes.

Pour cela, les synchrotrons qui permettent une extraction de l'ordre de 0,1 s sont dans une position très favorable, malgré leur faible intensité relative.

Les accélérateurs linéaires à ligne supraconductrice qui fonctionneraient en régime permanent marqueraient un progrès très important. Plusieurs prototypes sont réalisés, par exemple à Stanford University (États-Unis) et à Karlsruhe (République fédérale d'Allemagne). Ils se heurtent encore à des difficultés technologiques importantes.

Le matériau qui semble actuellement le plus prometteur est le *niobium*. Devant les difficultés et le coût de la construction d'une ligne accélératrice supraconductrice, on s'oriente plutôt vers des dispositifs dérivés du microtron (fig. 16, p. 15).

c) *Augmentation de la puissance moyenne* : elle a suivi les progrès réalisés dans la construction des klystrons amplificateurs, de puissance moyenne de plus en plus élevée : de 2 kW en 1955 on est passé en 1966 à 60 kW à une fréquence de 3 000 MHz. Il est intéressant d'avoir de grandes puissances moyennes lorsque l'accélérateur est utilisé pour produire des faisceaux secondaires par exemple de pions ou de positons. Le rendement de production est assez faible et, pour avoir un faisceau secondaire utilisable, il faut un faisceau primaire de grande intensité.

La figure 19 montre la cible de génération des positons de l'accélérateur linéaire de Saclay.

En tant que générateur de mésons π , cet appareil est du même ordre de puissance que l'accélérateur linéaire à protons de 800 MeV construit à Los Alamos, ou que le cyclotron à protons de 500 MeV du SIN (Schweizerisches Institut für Nuklearforschung) à Zurich.

Mais le faisceau de mésons π produits avec des électrons est un peu plus difficile à exploiter à cause de la grande quantité de photons et de positons qui sont engendrés en même temps.

Accélérateur linéaire de Saclay (ALS): il est caractérisé essentiellement par sa grande puissance moyenne supérieure à 100 kW, un cycle utile élevé (2 %) et une très grande stabilité de fonctionnement.

Comme tous les grands accélérateurs de particules, l'accélérateur linéaire de Saclay s'apparente davantage à une usine qu'à un appareil de laboratoire.

Le bâtiment mesure près de 450 m dans sa plus grande dimension et s'étale sur une surface de 11 000 m², l'accélérateur proprement dit occupant avec ses servitudes environ la moitié de cette surface sur une longueur de 200 m, le reste étant constitué par les salles d'aiguillage et d'expérimentations ainsi que par les servitudes et les divers laboratoires.

La puissance électrique installée est de 9 000 kVA pour l'accélérateur seul: 6 000 pour assurer la fourniture de la puissance UHF et 3 000 pour la focalisation du faisceau accéléré.

La consommation d'eau en marche normale est de 800 m³/h. Il y a près de 80 000 litres d'huile dans les différentes cuves ou alimentations où règnent des tensions élevées. Enfin, le réseau de câblage représente 400 km de fils.

Le détail de la conception d'ensemble est le suivant:

L'accélérateur est constitué de trente sections au pas de 6,32 m:

- la fréquence de fonctionnement est de 2 999 MHz, au mode $2\pi/3$, la première section est réglée au mode $\pi/2$;

- les dix-huit premières sections sont focalisées par bobines et solénoïdes;

- les dernières sont focalisées par triplets de quadrupôles à raison d'un triplet par section.

Associés aux trente sections, on compte quinze klystrons à deux sorties.

Leurs caractéristiques sont les suivantes:

- au cycle utile 1 %:

- puissance crête : 4 MW (2 × 2 MW),
- puissance moyenne : 60 kW (2 × 30 kW);

- au cycle utile 2 %:

- puissance crête : 2 MW (2 × 1 MW),
- puissance moyenne : 60 kW (2 × 30 kW).

3 Accélérateurs dans l'industrie et la médecine

3.1 ACCÉLÉRATEURS UTILISÉS EN THÉRAPIE

Les effets nocifs des radiations sont utilisés pour le traitement des tumeurs malignes. La fabrication en grandes quantités de cobalt 60 émettant un photon d'énergie 1,3 MeV (la production annuelle est de 20 millions de curies) a permis le développement, à partir de 1952, de la radiothérapie à haute énergie. Depuis 1960, progressivement, d'abord les bétatrons, ensuite les accélérateurs linéaires, sont venus en complément du cobalt 60, délivrant des faisceaux plus intenses, avec une meilleure définition des dimensions des taches irradiées, des énergies plus élevées, qui permettent de mieux traiter des tumeurs profondes en ménageant les tissus sains et la peau.

L'essentiel des conditions d'utilisation est contenu dans les figures 5 (p. 7) et 20.

La figure 20 représente les courbes de pénétration d'un certain nombre de particules dans l'eau (très représentatives de la pénétration dans le corps humain).

L'efficacité biologique de ces rayonnements dépend dans de larges proportions de plusieurs facteurs :

- elle n'est pas la même pour les neutrons et les photons pour les mêmes cellules ;

- elle dépend du tissu cellulaire, organe, muscle, etc., de son âge et de sa rapidité de renouvellement ;

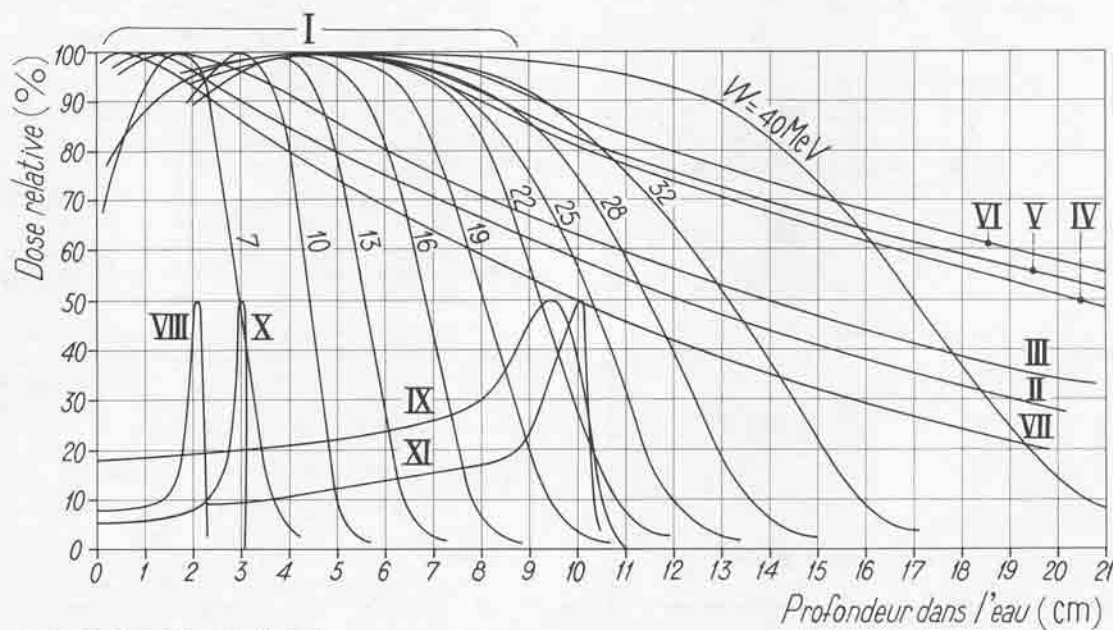
- elle dépend du taux d'oxygénation des cellules (effet oxygène) ; or certaines tumeurs sont insuffisamment vascularisées dans leur centre, donc ont une certaine proportion de cellules sous-oxygénées.

Il peut y avoir un facteur 2 à 3 de différence d'action pour les électrons et les photons, 1,5 à 1,8 seulement pour les neutrons, entre ces cellules et les autres normalement alimentées.

L'objectif du traitement est de délivrer aux cellules indésirables une dose suffisante pour les détruire, compte tenu de tous ces facteurs, tout en protégeant les tissus sains alentour.

Les courbes VIII à XI correspondant aux ions et aux mésons π ont les formes les plus intéressantes : dose très faible à l'entrée ; maximum de dose très accusé, bien localisé, de profondeur variable avec l'énergie, donc réglable à volonté.

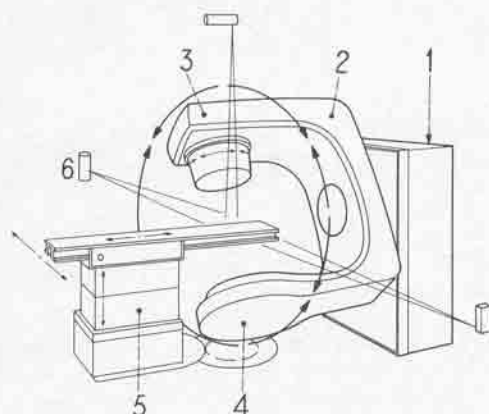
Malheureusement, ces particules sont très coûteuses à produire, elles exigent des appareils de très grandes dimensions (au moins comme celles de l'ALS), et elles resteront au stade des essais isolés. Actuellement (en 1982), seuls les photons et les électrons sont utilisés ; l'emploi des neutrons est encore au stade expérimental.



- I électrons pour diverses valeurs de l'énergie
 II photons du cobalt 60
 III photons provenant d'un faisceau d'électrons de 6 MeV d'un accélérateur linéaire
 IV photons provenant d'un faisceau d'électrons de 20 MeV d'un bétatron
 V photons provenant d'un faisceau d'électrons de 20 MeV d'un accélérateur linéaire
 VI photons provenant d'un faisceau d'électrons de 25 MeV d'un accélérateur linéaire

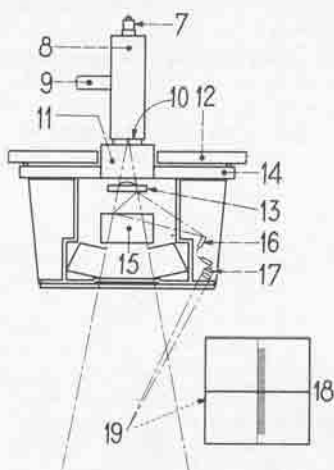
- VII neutrons de 14 MeV provenant d'une source deutérium tritié
 Avec des ordonnées réduites de moitié :
 VIII protons de 50 MeV
 IX protons de 180 MeV
 X ions néon de 150 MeV
 XI mésons π de 52 MeV

Fig. 20. - Atténuation des rayonnements dans l'eau ou des tissus de densité voisine de 1.



- 1 bâti support contenant les modulateurs et les alimentations
- 2 bâti tournant
- 3 tête d'irradiation
- 4 bouclier contrepoids absorbant les rayonnements
- 5 table d'opération
- 6 dispositifs optiques

(a) montage isocentrique d'un accélérateur très court



- 7 canon à électrons
- 8 accélérateur
- 9 guide d'arrivée de l'énergie HF
- 10 cible
- 11 cône collimateur fixe
- 12 support de la partie mobile
- 13 écran égalisateur
- 14 partie tournante
- 15 mâchoires mobiles délimitant le cône utile
- 16 lampe d'illumination du cône utile
- 17 dispositif de télémètre optique
- 18 grille de télémètre projetée à l'isocentre
- 19 isocentre

(b) tête d'irradiation

Fig. 21. - Accélérateur 4 MeV de thérapie.

Par rapport au rayonnement du cobalt 60, on voit que les électrons de haute énergie, ou les photons provenant d'eux, donnent un maximum de dose beaucoup plus profond et la dose à l'entrée est beaucoup plus faible, réduisant les effets secondaires de brûlures de la peau.

Seuls les photons, avec une courbe d'atténuation d'allure exponentielle, permettaient d'atteindre les tumeurs un peu profondes, jusqu'à la mise au point des sources d'électrons d'énergie assez grande.



Fig. 22. - Accélérateur Saturne (cliché Thomson - CSF).

Mais le calcul des doses dans un cas réel où la densité de la cible varie considérablement entre les os et le tissu conjonctif, est beaucoup plus difficile qu'avec les photons et l'utilisation vraiment systématique des électrons n'a guère commencé que depuis 1970.

L'utilisation d'un accélérateur dans un hôpital, en tant qu'appareil de traitement, est beaucoup plus contraignante pour l'appareil que son utilisation dans un laboratoire. L'infirmière qui est chargée de l'appareil est qualifiée en thérapie, mais l'est moins en électronique ou en électrotechnique. Il faut alors que les paramètres de réglage soient très simplifiés, que la dose délivrée soit très précisément contrôlée, que le faisceau puisse être orienté aisément dans des directions multiples, la plage illuminée doit pouvoir être modifiée, tous les accessoires doivent être suffisamment sûrs pour ne demander que les visites d'entretien espacées.

Il a donc fallu que ces appareils subissent une phase très dure d'industrialisation et de maturation, pour qu'ils deviennent simples à utiliser et parfaitement fiables.

L'une des caractéristiques qui a demandé le plus de travail est la nécessité pour le faisceau de pouvoir tourner autour du malade, dans un plan, l'axe du faisceau coupant l'axe de rotation. On peut ainsi disposer le malade sur l'axe, normalement étendu, et l'on vient placer le faisceau dans la direction adéquate pour l'irradiation.

Mais les caractéristiques mécaniques et électriques sont très strictes. Les déformations mécaniques ne doivent pas entraîner des déplacements supérieurs au millimètre, et quelle que soit la position du faisceau, ses caractéristiques de densité du courant, d'uniformité, doivent être rigoureusement conservées.

Trois solutions mécaniques sont utilisées.

a) Le tir direct: il suppose que la ligne accélératrice a une longueur ne dépassant pas 50 cm. Il a été employé vers 1960 avec une ligne fonctionnant sur 10 000 MHz, puis abandonné et est repris actuellement avec une ligne résonnante sur 3 000 MHz (Clinac 4 de Varian, États-Unis). La figure 21 schématise les éléments principaux d'un appareil de ce type.

b) L'accélérateur d'une longueur de l'ordre de 2 m est porté par la tête tournante ou bien le générateur HF est un magnétron et est lui aussi dans la partie mobile, ou bien c'est un klystron, et la puissance est transmise au travers d'un joint HF tournant, du type de ceux employés dans les radars. C'est le cas de l'accélérateur Saturne de CGR-MeV (fig. 22).

c) L'accélérateur a une longueur supérieure à 3 m, et il est mécaniquement plus aisé de ne faire tourner qu'un ensemble optique qui focalise le faisceau hors de l'axe de rotation. C'est le cas du Sagittaire de CGR-MeV.

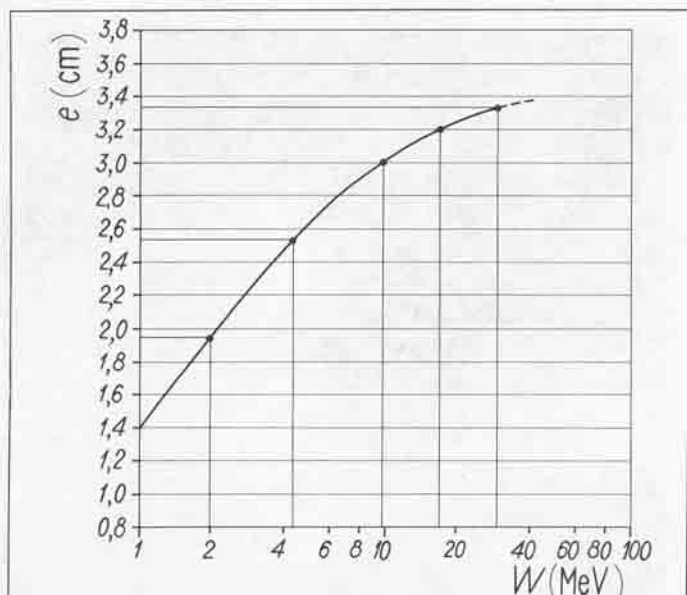


Fig. 23. - Épaisseur e de demi-absorption de l'acier (épaisseur pour laquelle l'intensité du faisceau de photons a décré de moitié) en fonction de l'énergie W .

A partir de 10 MeV, les accélérateurs sont conçus pour délivrer soit un faisceau d'électrons d'énergie variable, soit un faisceau de photons, obtenu en interposant une cible en métal lourd.

Chaque faisceau doit être étalé de façon aussi uniforme que possible sur une plage de dimensions variables, pouvant aller jusqu'à 40 cm X 40 cm au niveau du malade. Un plan de traitement doit prévoir les dimensions de champ, et les orientations qui donnent une dose bien déterminée dans le volume à traiter, en protégeant tous les tissus sains (peau, organes) qui se trouvent aux alentours. L'irradiation se fait par doses de 200 à 400 rad par séance avec un temps de récupération entre les deux séances. Le collimateur du faisceau est un ensemble d'une assez grande complexité mécanique.

La stabilité et la précision avec laquelle on peut contrôler les limites du faisceau, le développement des techniques de mesure, ont fait de ces appareils des instruments très puissants, mais de plus en plus complexes. Pour les plus modernes, le fonctionnement est pris en charge par des mini-ordinateurs qui peuvent assurer, en plus, la tenue des registres.

Les électrons de très faible énergie (2,5 à 3 MeV) sont utilisés pour le traitement d'affections cutanées. Les traitements profonds se font avec des énergies beaucoup plus élevées. On voit d'ailleurs, sur les courbes de la figure 20, que l'énergie maximale nécessaire est entre 30 et 40 MeV. L'expérience montre par ailleurs que plus de 90 % des traitements sont faits à des énergies ne dépassant pas 20 MeV, le praticien jouant avec les courbes d'absorption des photons ou des électrons.

L'équipement mondial de la radiothérapie à haute énergie comprend :

- 3 000 têtes de cobalt 60,
- 250 bétatrons de 15 à 45 MeV,
- 660 accélérateurs linéaires de 4 à 40 MeV.

On considère actuellement qu'un équipement minimal devrait comporter un gros appareil et deux petits par million d'habitants.

3,2 ACCÉLÉRATEURS DE RADIOGRAPHIE INDUSTRIELLE

La radiographie industrielle s'intéresse essentiellement au contrôle non destructif des soudures des grosses pièces métalliques (soudures de cuves de réacteurs, de tôles de navire, par exemple), au contrôle sur place de l'état des grosses vannes, etc.

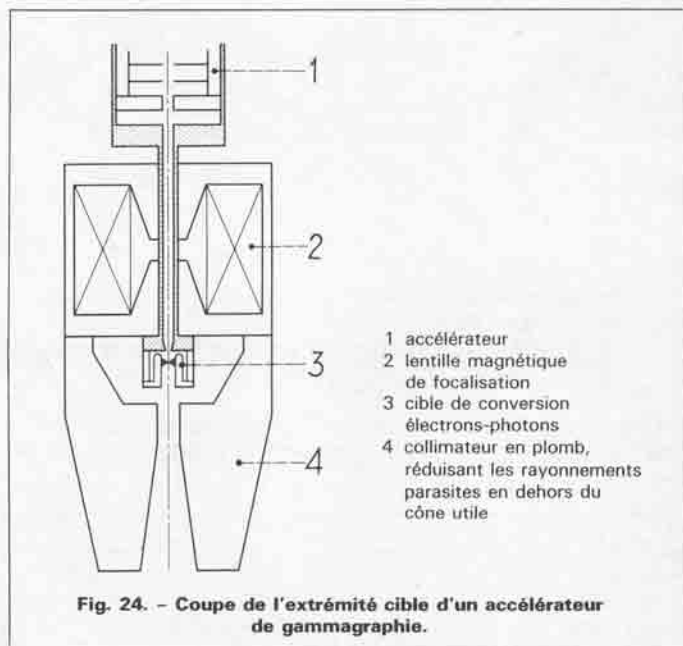


Fig. 24. - Coupe de l'extrémité cible d'un accélérateur de gammagraphie.

Les sources utilisées sont le plus fréquemment des tubes à rayons X de 200 ou 400 kV ou bien des sources radioactives de césium 137 ou de cobalt 60. Le plus communément, l'opération de contrôle est l'impression d'un film sensible.

Lorsque les épaisseurs de métal à contrôler dépassent quelques centimètres, on obtient des temps de pose qui ne sont pratiquement utilisables qu'avec des appareils délivrant plusieurs mégaelectrons-volts, avec des puissances moyennes de l'ordre du kilowatt. Cependant, ces appareils doivent rester maniables et transportables. Seul l'accélérateur linéaire peut actuellement apporter une solution acceptable. Le bétatron ne délivre pas un faisceau suffisamment intense, bien qu'il y ait actuellement une renaissance d'études, notamment au Japon (Japan Accelerators Company) ou en URSS (Institut de Tomsk), de petits bétatrons de 3 à 6 MeV, de volume et de masse réduits, destinés à cet usage.

Pour impressionner une plaque photographique, il faut un flux qui varie suivant les films de l'ordre de 10^{-5} à 10^{-4} J/cm². Le problème essentiel, dans ce cas, est le pouvoir de résolution qui est la variation d'épaisseur de cible décelable par une variation de noircissement de la plaque photographique, ou la dimension de détails que l'on peut mettre en évidence. Il dépend de la sensibilité du film, mais aussi du niveau d'énergie des photons. La netteté des détails et l'absence de pénombre sont fonction des dimensions de la source et de la distance de la pièce au foyer (qui influe sur le temps de pose), mais aussi de la diffusion des photons dans la pièce, importante aux grandes énergies.

Les machines, pour être bien adaptées aux besoins, doivent :

- avoir une grande souplesse de fonctionnement permettant un emploi dans des conditions variables ;
- être robustes et d'un fonctionnement sûr (ce sont des appareils de contrôle destinés le plus souvent à l'industrie lourde) ;
- être relativement peu coûteuses, compte tenu de l'amortissement ;
- être mobiles ;
- pouvoir être manipulées par un personnel très peu compétent en électronique.

Pour examiner des pièces épaisses, avec un temps de pose qui ne soit pas exagérément long, on a intérêt à augmenter l'énergie du faisceau primaire d'électrons, mais on ne gagne pas beaucoup au-delà de 15 MeV (fig. 23).

Pour augmenter le pouvoir de résolution, on a plutôt intérêt à fonctionner à plus faible énergie compatible avec le temps de pose, mais la limite est alors donnée par la tenue de la cible productrice de photons (fig. 24).

Pour la tenue au bombardement électronique, celle-ci est caractérisée par un facteur de mérite

$$\eta = \frac{\text{conductivité thermique} \times \text{température de fusion}}{\text{masse volumique}}$$

L'aptitude à produire des photons dépend en gros du produit $Z\eta$. Nous donnons ci-après pour quelques métaux, la valeur de ces facteurs :

| Métal | η | $Z\eta$ |
|------------------|--------|---------|
| Cuivre | 500 | 14 500 |
| Tungstène | 350 | 25 900 |
| Molybdène | 380 | 16 000 |
| Beryllium | 1 030 | 4 100 |
| Titane | 168 | 3 700 |
| Aluminium | 530 | 7 000 |
| Argent | 370 | 17 400 |
| Platine | 59 | 4 600 |
| Plomb | 58 | 4 750 |
| Tantale | 100 | 7 300 |
| Or | 160 | 12 600 |
| Mercur | 16 | 1 280 |
| Acier inoxydable | 30 | 780 |

En pratique, on arrive à arrêter jusqu'à 400 μA sur une tache de l'ordre de 1 mm^2 , ce qui représente pour une énergie de 10 MeV une puissance de faisceau de 4 kW.

Performances classiques des appareils :

- en accélérateurs linéaires (fig. 25) ;
- 15 à 20 Gy/min à 1 m et à 10 MeV pour une masse de 1,2 t ;
- 2,5 à 4 Gy/min à 1 m et à 4 MeV pour une masse de 400 kg ;
- en petits bétatrons :
- 0,2 à 0,3 Gy/min à 1 m et à 3 MeV pour une masse de 50 kg ;
- en gros bétatrons :
- 1,5 à 3 Gy/min à 1 m et à 15 MeV pour une masse de 15 t.

3,3 ACCÉLÉRATEURS D'IRRADIATION

3,30. Les effets chimiques provoqués par l'irradiation peuvent être utilisés industriellement et les accélérateurs à électrons dans le domaine de 2 à 10 MeV environ sont la meilleure source possible pour cet usage, en concurrence avec les irradiateurs à sources radioactives. Les accélérateurs ont sur les sources radioactives l'avantage important de ne présenter aucun danger de contamination, danger toujours présent lorsque l'on est amené à manier des millions de curies de produits radioactifs, et de pouvoir faire face sans difficulté à la demande croissante de puissance, alors que la multiplication de sources intenses poserait des problèmes de fabrication. L'accélérateur est plutôt plus coûteux pour les faibles puissances que l'irradiateur à radioéléments artificiels, et beaucoup moins coûteux pour les très grandes installations.

Il faut distinguer plusieurs voies.



Fig. 25. - Accélérateur de radiographie de CGR-MeV (10 MeV, 15 Gy/min) (cliché Thomson-CSF).

3,31 Chimie sous rayonnement. - Peuvent être envisagées :

- les polymérisations : polyéthylène ;
- les greffes de matières plastiques ;
- les greffes plastique-métal ;
- la vulcanisation du caoutchouc ;
- la production de l'ozone ;
- la production d'acide sulfurique, etc.

On caractérise l'efficacité d'une réaction par le rendement radiochimique qui exprime le nombre de modifications (radicaux libres formés ou molécules transformées) par 100 eV effectivement absorbés.

On exprime, par ailleurs, plutôt en gray, la dose nécessaire pour créer un effet donné. (10⁴ Gy (1 Mrad) correspondent à 10 J absorbés par gramme.)

De toutes ces possibilités, très étudiées, en particulier au Japon depuis plusieurs années, seule actuellement (en 1982) la production de polyéthylène a fait l'objet d'une exploitation industrielle.

Il existe des installations expérimentales en France et dans la plupart des pays industrialisés, mais aussi des installations industrielles de production, notamment au Japon et aux États-Unis. En URSS, on assiste à un développement très rapide de ce type d'appareil :

- séchage rapide des peintures sur panneaux de métal ou de bois ;
- traitement des bois imprégnés de méthacrylate de méthyle pour les rendre très durs et imputrescibles (parquets de halls à grand passage, revêtements extérieurs) ;

– traitement des isolants des câbles électriques; la polymérisation et la réticulation obtenues les rendent beaucoup plus résistants aux températures plus élevées, donc permettent des câblages plus serrés. Au Japon, 65 % des câbles utilisés dans l'industrie électronique sont ainsi traités par plus de vingt accélérateurs installés dans les câbleries;

– traitement du caoutchouc; la solution de bonne rentabilité n'est pas encore au point;

– traitement des textiles à fibres synthétiques (augmente considérablement la solidité et permettrait une meilleure prise des teintures).

Un résultat expérimental obtenu au Japon sur le traitement des fumées de cheminées pour l'élimination de l'anhydride sulfureux et des oxydes d'azote, par traitement en continu par un faisceau d'électrons de 5,5 MeV.

Pour ces applications, l'énergie maximale autorisée est 10 MeV. Cette énergie est au-dessous des seuils de réactions électrons-neutrons et rayons gamma-neutrons qui entraîneraient la création de produits radioactifs. Le choix de l'énergie est déterminé par ailleurs par des questions de pénétration, la figure 20 permet de voir qu'à 80 % du maximum l'épaisseur de matière est (en g/cm²) environ $W/3$ (en MeV); on peut aller jusqu'à 0,8 W (MeV) par un traitement *double face*. Si l'on veut traiter des films de peinture de 1 mm, il suffit de 300 kV. Pour traiter un isolant de 10 mm d'épaisseur, il faut 3 MeV.

3,32 Stérilisation. — Il existe deux possibilités: la stérilisation des produits pharmaceutiques et la stérilisation des produits alimentaires; la première est déjà développée: ampoules de prises de sang jetables, seringues, par exemple. Il faut pour cela mettre en place certaines techniques de production et de conditionnement des appareils.

La dose appliquée est de l'ordre de 10⁴ Gy. Le problème pour cette utilisation est la saturation rapide du marché. Quelques appareils en Europe (dont celui exploité à Orsay par Sodeteg depuis 1966) d'une puissance de quelques kilowatts, absorbent l'essentiel de la demande. Cela montre la puissance du procédé, mais en fixe tout de suite les limites d'emploi industriel.

Pour la stérilisation des produits alimentaires, son utilisation se développe beaucoup plus lentement, et avec prudence, par suite de la possibilité de créer des modifications chimiques secondaires qui pourraient produire des composés nocifs.

Un pas en avant a été enregistré en 1976: la commission internationale de Vienne a admis cinq produits pouvant être traités par rayonnements. Un premier comité en 1969 reconnaissait déjà l'irradiation comme un procédé acceptable. On admet définitivement les traitements suivants:

- pommes de terre: 150 Gy;
- blé: 1 000 Gy;
- papayes: 1 000 Gy;
- fraises: 3 000 Gy;
- poulet: 7 000 Gy;

et à titre provisoire:

- riz: 1 000 Gy;
- poisson: 2 200 Gy;
- oignons: 150 Gy.

Au fur et à mesure des essais, probablement d'autres produits vont venir s'ajouter à cette liste; mais les modalités même de ces traitements, les époques optimales où ils doivent être faits par rapport à la récolte ou à la consommation ont encore besoin d'être précisées.

En 1982, les nouveaux domaines d'utilisation les plus prometteurs sont les suivants:

– *traitement des graines et des légumes*: dans les silos ou les cageots, pour éviter les pertes par moisissures;

– *traitement des boues* provenant des eaux usées, pour détruire tous les germes pathogènes et permettre leur réemploi en agriculture. Cependant il reste à éliminer les métaux lourds (mercure, cadmium, etc.);

– *stérilisation des eaux potables* pour permettre de réduire la quantité de chlore ajoutée, et rendre l'eau plus agréable à boire, procédé intéressant surtout pour les pays des zones désertiques où l'eau est obtenue par dessalement de l'eau de mer et recyclage.

Le nombre de germes pathogènes restant dans une eau irradiée décroît approximativement exponentiellement en fonction de la dose, une réduction de 10 est obtenue pour des doses très variables suivant les germes, par exemple: *escherichia coli* 650 Gy; *streptococcus faecalis* 6 000 Gy; *pseudomonas seruginosa* 280 Gy; polyvirus 23 000 Gy, etc.

Il existe deux obstacles essentiels.

a) *Crainte de la création d'espèces chimiques indésirables* dans les denrées destinées à la consommation entraînant des changements d'aspect et de goût; elle ne peut être levée que par une longue et patiente expérimentation.

b) *Prix de revient de l'opération* par tonne de denrée traitée: pour éliminer les bactéries il faut environ 500 Gy, pour détruire les virus 5 000 Gy.

En gros, pour stériliser les liquides, on admet qu'il faut une dose de l'ordre de 2 000 Gy.

Par ailleurs, un faisceau de 1 kW entièrement utilisé délivre 3 600 t. Gy/h. Par comparaison, on obtient un résultat équivalent avec 70 000 Ci de cobalt 60.

Par exemple, 1 kWh absorbé stérilise 1,8 t au niveau de 2 000 Gy. Le coût de l'opération même avec les rendements ne dépassant pas 20 % est relativement faible en tant que dépense d'énergie: l'équivalent pour le secteur d'une énergie massive de 3 kWh/t.

Mais en fait, l'essentiel du coût provient de l'amortissement du bâtiment et de l'appareillage, et du conditionnement des produits. Il faut pouvoir rentabiliser cette installation en la faisant travailler presque en régime continu pour pouvoir l'amortir sur une quantité de traitements suffisants.

Les types d'accélérateurs susceptibles d'être utilisés pour ces applications ont une énergie maximale en dessous de 10 MeV, pour éviter les risques d'activation des produits; l'énergie minimale peut être 500 keV (accélérateur direct, du type *gross tube à rayons X classique*, pour l'irradiation de films minces), mais le rendement de pénétration est faible, et la fenêtre de sortie isolant le tube à vide de l'atmosphère, traversée par le faisceau d'électrons, est un gros problème technologique.

Les matériaux que l'on peut envisager sont le beryllium, l'aluminium, le titane ou des aciers inoxydables.

Il y a deux difficultés.

a) *L'évacuation de l'énergie perdue* par le faisceau dans la masse: au-dessus de 500 keV, cette énergie est constante, égale à

2 MeV . g⁻¹ . cm⁻². La fenêtre étant très mince, le refroidissement par conduction est faible. Il faut donc souffler violemment avec de l'air ou un gaz neutre, mais on évacue ainsi au maximum 0,01 à 0,02 W . cm⁻² . °C⁻¹.

b) L'attaque chimique: le faisceau ionise ou dissocie la couche d'oxyde protectrice de la surface d'aluminium, ionise ou dissocie les molécules de gaz de refroidissement, donc permet l'attaque chimique du matériau de la fenêtre, l'aluminium et ses alliages sont ainsi écartés. Par ailleurs le beryllium ne peut être obtenu en feuilles minces de grandes dimensions et de bonne stabilité mécanique. Seul le titane en feuilles pas trop minces (0,05 mm) est utilisable et la limite pratique est actuellement (en 1982) de l'ordre de 50 µA/cm². On peut donc faire passer une nappe de 2 m de longueur sur 5 cm de large, soit une intensité de 50 mA, ce qui, à une énergie de 4 MeV, fait une puissance moyenne de 200 kW.

Au niveau de 1 à 3 MeV la source haute tension est un accélérateur de Van de Graaff, un dynamitron, ou des transformateurs en cascade.

Au-delà, pour des profondeurs de pénétration plus grandes, l'accélérateur linéaire est le seul dispositif utilisable.

La figure 26 donne le schéma d'une installation industrielle d'irradiation avec un accélérateur linéaire. Les objets à irradier, pré-

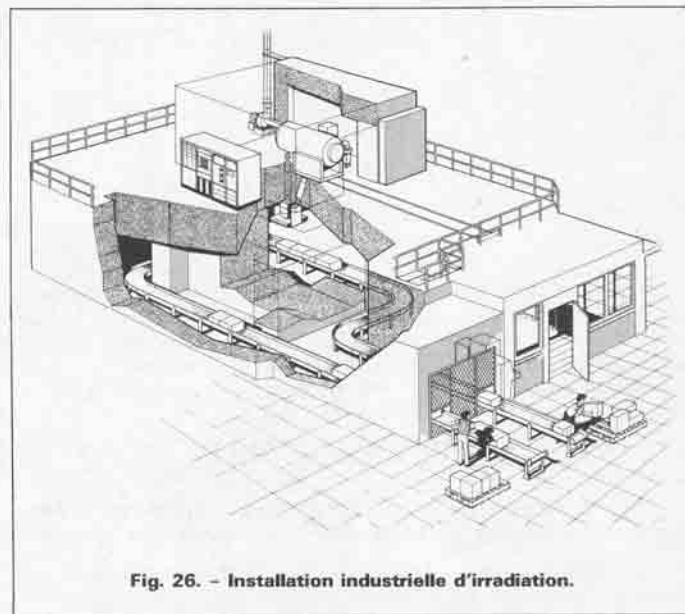


Fig. 26. - Installation industrielle d'irradiation.

emballés dans des enveloppes étanches, sont acheminés dans un blockhaus au travers de chicanes, et passent sous le faisceau d'électrons, qui balaie en largeur un tapis roulant, à une cadence de l'ordre de 10 Hz, à une vitesse de quelques décimètres par seconde, variable suivant la dose désirée.

INDEX BIBLIOGRAPHIQUE

Des mises au point sont publiées dans des numéros spéciaux de IEEE Transactions on Nuclear Science, à la suite de conférences sur les accélérateurs qui ont lieu tous les deux ans (la dernière date de 1981).

Outre ces publications le lecteur pourra également consulter:

Conference on the application of accelerators in research and industry (1980). IEEE Transactions on Nuclear Science, avril 1981, vol. NS 28, n° 2.
LAPOSTOLLE (P.) et SEPTIER (A.), - *Linear accelerators*. 1970 North Holland Publishing Co.

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