

PANORAMA DES ACCELERATEURS DE PARTICULES

PATRICK AUSSET

*Institut de Physique Nucléaire
15 rue Georges Clémenceau
91406 Orsay Cedex*

Résumé

Le concept d'accélérateur de particules est né au début du siècle dernier pour répondre au besoin de disposer de particules suffisamment énergétiques pour sonder les atomes et les noyaux de la matière. Depuis de nombreux accélérateurs de particules de plus en plus puissants ont ensuite été construits pour la physique des hautes énergies. Les principes fondamentaux des accélérateurs électrostatiques, du Linac, du cyclotron et du synchrotron sont expliqués.

Les accélérateurs de particules se sont développés et des techniques nouvelles ont été explorées.

Le but de ce cours est d'essayer de rassembler toutes ces informations pour donner un aperçu de ce domaine de la physique.

Abstract

The concept of the particle accelerators was born at the beginning of the last century for the sole purpose of endowing particles with large quantities of kinetic energy so they may serve as projectiles to alter the structure of other nuclei or to act as probes to discover relevant information on the structure of the matter. Very large new accelerators are now being designed and built for high energy physics. The fundamental ideas behind electrostatic acceleration, Linac, cyclotron and synchrotron are introduced.

Particle accelerators have proliferated in both types and number. Over the years new methods and advance in technologies are being explored and utilized in accelerators.

The intent of this lecture is to try to coherently organize these principles and materials for a balanced overview of this interesting subject.

PREAMBULE

Rutherford propose en 1911 un modèle planétaire de l'atome après l'interprétation de la célèbre expérience de bombardement d'une feuille d'or, d'épaisseur 0,6 μm , par des particules alpha émises par une source de radium. Historiquement, ce fut la première expérience visant à comprendre la structure nucléaire en utilisant des particules chargées énergétiques. Cette expérience a été le point de départ d'une recherche fantastique pour produire de manière artificielle des particules beaucoup plus énergétiques que celles produites par les sources radioactives. Citons Ernest Rutherford :

1 927 E. Rutherford says, addressing the Royal Society :“... *if it were possible in the laboratory to have a supply of electrons and atoms of matter in general, of which the individual energy of motion is greater even than that of the alfa particle, this would open up an extraordinary new field of investigation....*”

1- INTRODUCTION. RAPPELS ELEMENTAIRES

Les « accélérateurs de particules » n'accélèrent que les particules chargées électriquement et utilisent pour fonctionner les champs électrique \vec{E} et d'induction magnétique \vec{B} liés par les équations de Maxwell.

1-1 Nature des particules accélérées:

Une première classe importante de ces particules est constituée par les :

- Electrons : Energie au repos $E_0 = m_{\text{electron}}c^2 = 511 \text{ keV}$
- Protons : Energie au repos de $E_0 = m_{\text{proton}}c^2 = 938,26 \text{ MeV}$

Les électrons et les protons sont les particules les plus faciles à produire.

Une deuxième classe de particules est représentée par les ions lourds allant du deutérium (isotope ^2H de l'hydrogène) et tritium (isotope ^3H de l'hydrogène) jusqu'à l'uranium dont la masse au repos est $E_0 \approx A \cdot m_{\text{u}}$ avec A : nombre de masse ($m_{\text{u}} \approx 931,5 \text{ MeV}$)

. Ces ions peuvent être mono chargés ou plus fréquemment multi chargés. Les plus légers sont :

- Ion $^2\text{H}^+$: $A=2,014$; masse au repos : 1875,585 MeV.
- Ion $^3\text{H}^+$ et $^3\text{H}^{2+}$: $A=3,016$; masse au repos : 2808,86 MeV et 2808,35 MeV
- Ion $^4\text{H}^+$ et $^4\text{H}^{2+}$ (alpha : Noyau de l'hélium ^4H) : $A = 4,0026$; masse au repos 3727,83 MeV et 3727,32 MeV

1-2 Trajectoire et accélération des particules chargées :

Une particule chargée de charge q animée d'une vitesse \vec{v} , en interaction avec un champ électrique \vec{E} et un champ d'induction magnétique \vec{B} , est soumise à la force de Lorentz \vec{F} :

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

La variation de la quantité de mouvement de la particule mobile soumise à cette force est donnée par :

$$\Delta\vec{p} = \int \vec{F} dt$$

Le gain d'énergie cinétique correspondant est :

$$\Delta E_c = \int \vec{F} \cdot \vec{v} \cdot dt$$

En remplaçant \vec{F} par sa valeur:

$$\Delta E_c = q \int \vec{E} \cdot \vec{v} \cdot dt + q \int (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} \cdot dt$$

Et en notant que $(\vec{v} \times \vec{B}) \cdot \vec{v} = 0$, il vient :

$$\Delta E_c = q \int \vec{E} \cdot \vec{v} \cdot dt = \Delta E_{tot}$$

$E_{tot} = E_{cin} + E_{repos}$ représente l'énergie totale de la particule, somme de l'énergie cinétique et de l'énergie au repos de la particule.

En conclusion, le gain d'énergie ne peut être apporté à une particule chargée que par l'action de la force $\vec{F} = q\vec{E}$ exercée par le champ électrique extérieur et indépendante de la vitesse \vec{v} de la particule. La force de Laplace $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$, normale à la vitesse et au champ magnétique \vec{B} , proportionnelle à \vec{v} ne contribue pas au gain d'énergie et est utilisée pour le guidage transverse des faisceaux.

La trajectoire des particules est contrôlée dans les accélérateurs par les dipôles magnétiques pour la courbure et par les quadropôles pour la focalisation horizontale et verticale sur l'axe. L'accroissement d'énergie des particules est produit par un champ électrique.

1-3 Gain d'énergie et accroissement de vitesse :

Considérons par exemple le cas d'un électron et d'un proton initialement au repos et accélérés jusqu'à une énergie de 10 MeV.

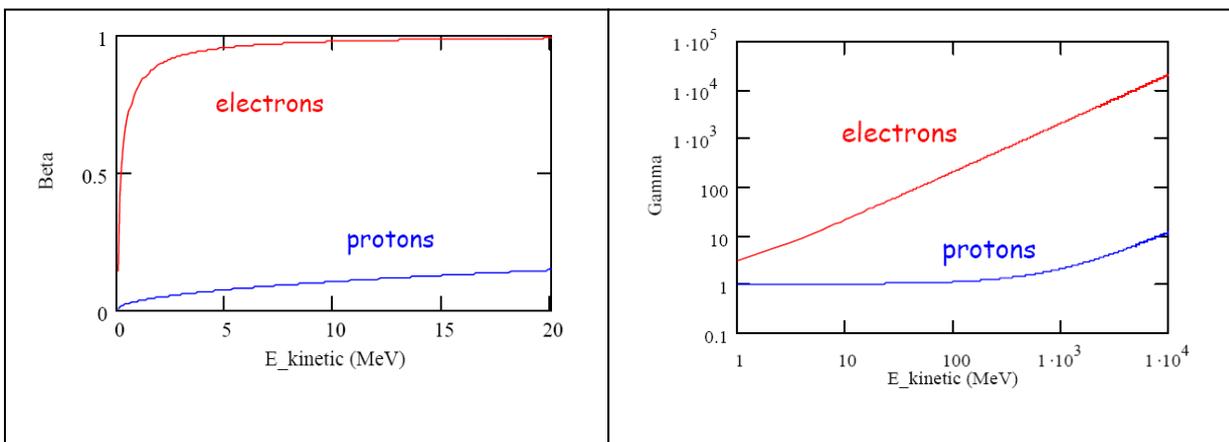


Fig1: Evolution de β en fonction de l'énergie

Fig 2 : Evolution de γ en fonction de l'énergie

- Le gain d'énergie pour l'électron comme pour le proton est de 10 MeV.

- Le gain de vitesse se calcule en utilisant les relations données par la théorie de la relativité :

a) Cas de l'électron :

$$\gamma_e = \frac{E_{tot}}{E_{repos}} = 1 + \frac{E_{cin}}{E_{repos}} \approx 1 + \frac{10}{0,511} \approx 20,6$$

Le rapport $\beta_e = \frac{v}{c}$ de la vitesse de l'électron à celle de la lumière s'exprime en fonction de γ_e par :

$$\beta_e = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_e^2}} = 0,9988$$

b) Cas du proton :

$$\gamma_p = \frac{E_{tot}}{E_{repos}} = 1 + \frac{E_{cin}}{E_{repos}} \approx 1 + \frac{10}{938,3} \approx 1,01$$

$$\beta_p = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_p^2}} = 0,145$$

Le gain de vitesse est sensiblement 7 fois plus grand pour l'électron que pour le proton quand l'énergie cinétique passe de 0 MeV à 10 MeV. L'électron devient donc beaucoup plus rapidement « relativiste » que le proton avec l'accroissement de l'énergie cinétique.

2- ACCELERATEURS ELECTROSTATIQUES

C'est l'idée la plus simple à mettre en œuvre : Une source de particules chargées portée à un potentiel positif produit des charges électriques positives qui sont accélérées jusqu'à une électrode au potentiel de la masse.

J.J. Thomson découvre expérimentalement l'électron en 1897 en utilisant un tube de Crookes comportant une cathode et une anode circulaire autorisant le passage des électrons jusqu'à un écran de phosphore. La tension du générateur était de 300V.

Dans ce cas, le champ électrique \vec{E} régnant entre la cathode et l'anode accélère les particules chargées. Ce champ \vec{E} dérive d'un potentiel scalaire V :

$$\vec{E} = -gradV$$

Le gain d'énergie cinétique pour une particule de charge q est :

$$W = \Delta E_c = q \cdot V$$

Dans le domaine des accélérateurs, l'énergie d'un ion est exprimée en divisant W par le nombre de nucléon A . C'est l'énergie par nucléon $W_n = \frac{W}{A}$:

$$W_n = \left(\frac{q}{A} \right) \cdot V$$

W_n s'exprime alors en KeV/A, MeV/A,....

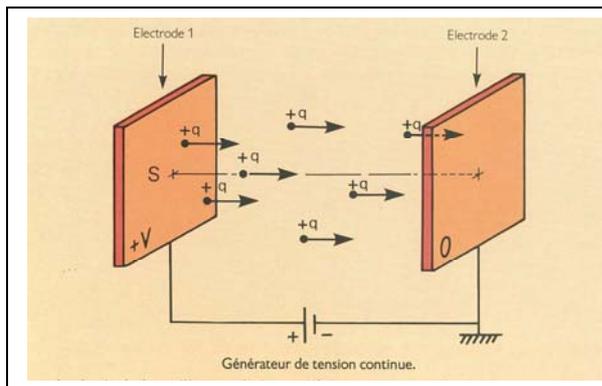


Fig 3 : Accélération de charges électriques positives par une tension continue

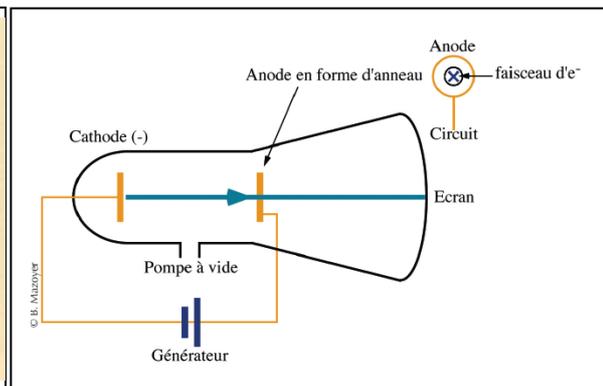


Fig4: Tube de Crookes utilisé par J.J. Thomson. Le générateur produit 300V

La montée progressive en énergie a conduit à développer deux catégories d'accélérateur caractérisées par leur dispositif de production de la tension continue :

- a)- Les accélérateurs dont la haute tension est obtenue par redressement d'une tension alternative. Ce sont les accélérateurs de type « Cockroft-Walton »
- b)- Les accélérateurs dont la haute tension est obtenue par transport et accumulation de charges électriques. Ce sont les accélérateurs de type « Van de Graaff »

2.1 Les accélérateurs de type « Cockroft – Walton »

Le générateur de tension asymétrique « **Cockroft-Walton** » est un multiplicateur de tension développé en 1932 par **John Douglas Cockroft** et **Ernest Thomas Sinton Walton**. Son principe est basé sur le montage en « **cascade de Greinacher** » (développé initialement en 1919), lui même constitué par une pile de doubleurs de tension de « **Schenkel** ».

Le principe de fonctionnement du doubleur de tension de **Schenkel**, constitué par la cellule élémentaire C1, C2, D1, D2 peut être décrit simplement en l'absence de courant débité et pour des condensateurs et des redresseurs idéaux (Fig 5) :

Au point A du circuit, la tension alternative au secondaire du transformateur oscille entre +U et -U. Le condensateur C1 se charge à la tension U lorsque l'alternance de la tension au secondaire du transformateur permet à la diode de conduire (son anode est positive). Pendant l'alternance suivante, D1 ne conduit plus, C1 ne peut pas se décharger et le potentiel du point B va monter jusqu'à 2U et osciller entre 0 et 2U. C2 va alors se charger à travers D2 à la tension 2U. Le raisonnement se répète de proche en proche et la tension d'un générateur de N étages, composé de 2N condensateurs et 2N redresseurs sera égale à 2.N.U.

Lorsque le générateur est connecté à un tube accélérateur dans lequel circule un courant I (dont la valeur est égale à celui du faisceau de particules chargées), les condensateurs se déchargent partiellement et une ondulation de tension apparaît dont l'amplitude est

inversement proportionnelle à $f.C$ où f est la fréquence de la tension alternative. La tension de sortie du générateur doit donc être filtrée pour limiter la dispersion d'énergie du faisceau. Dans la pratique, f est de quelques kHz, C de quelques nF, les redresseurs sont au silicium et supportent une tension inverse de 200kV environ. Les générateurs industriels actuels atteignent dans ces conditions une énergie de quelques MeV et sont capables de délivrer des courants de quelques mA.

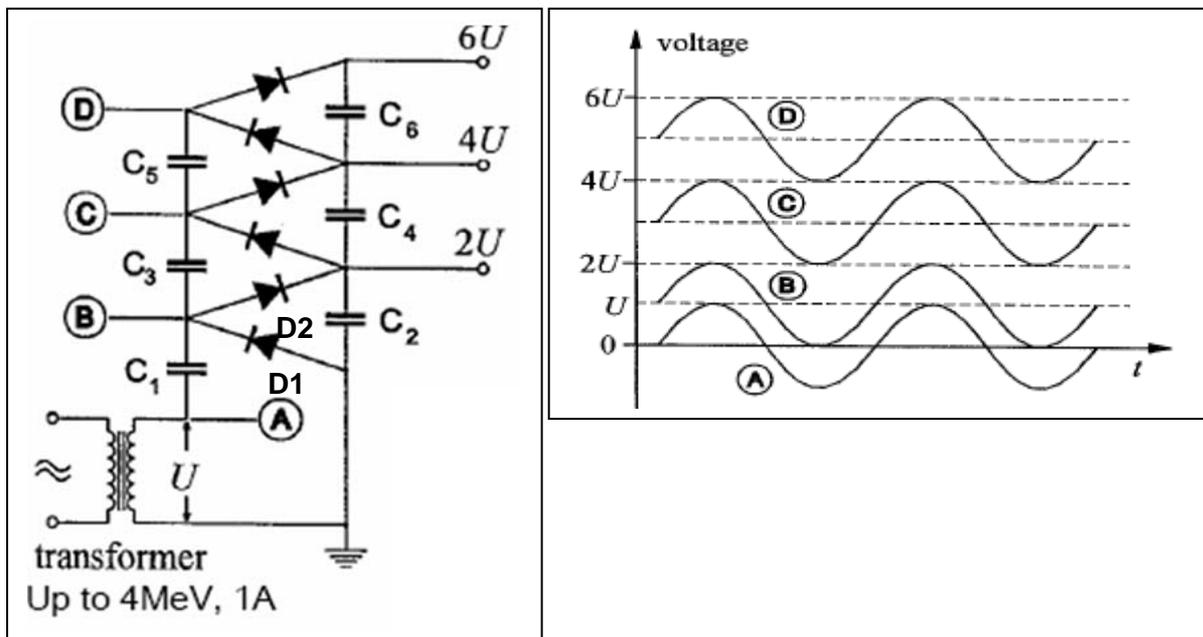


Fig 5 : Générateur asymétrique de type « **Cockroft – Walton** »

« **Cockroft et Walton** » ont obtenu le prix Nobel en 1951 en transmutant (1932) des atomes de Lithium par des protons accélérés à 800 keV à l'aide de ce générateur [1].

Le générateur de type « **Cockroft – Walton** » est maintenant encore utilisé comme injecteur d'ions dans les accélérateurs linéaires.

Finalement, la faible valeur de l'énergie maximum atteignable et l'amplitude de l'ondulation résiduelle (malgré les améliorations apportées : montage symétrique, diminution de la valeur de la capacité C_1) ont fait que l'on préfère utiliser en physique nucléaire l'accélérateur de type « **Van de Graaff** ».

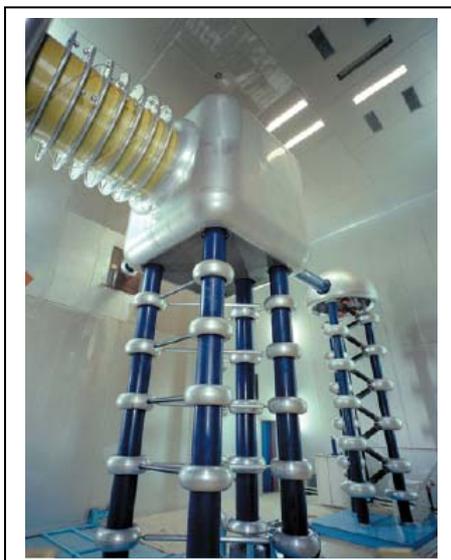


Fig 6 : Générateur de type **Cockroft-Walton** Fermilab (750 kV)

2.2 Les accélérateurs de type « Van de Graaff »

Robert Van de Graaff propose en 1930 une machine électrostatique dont le principe de fonctionnement est illustré Fig 7.

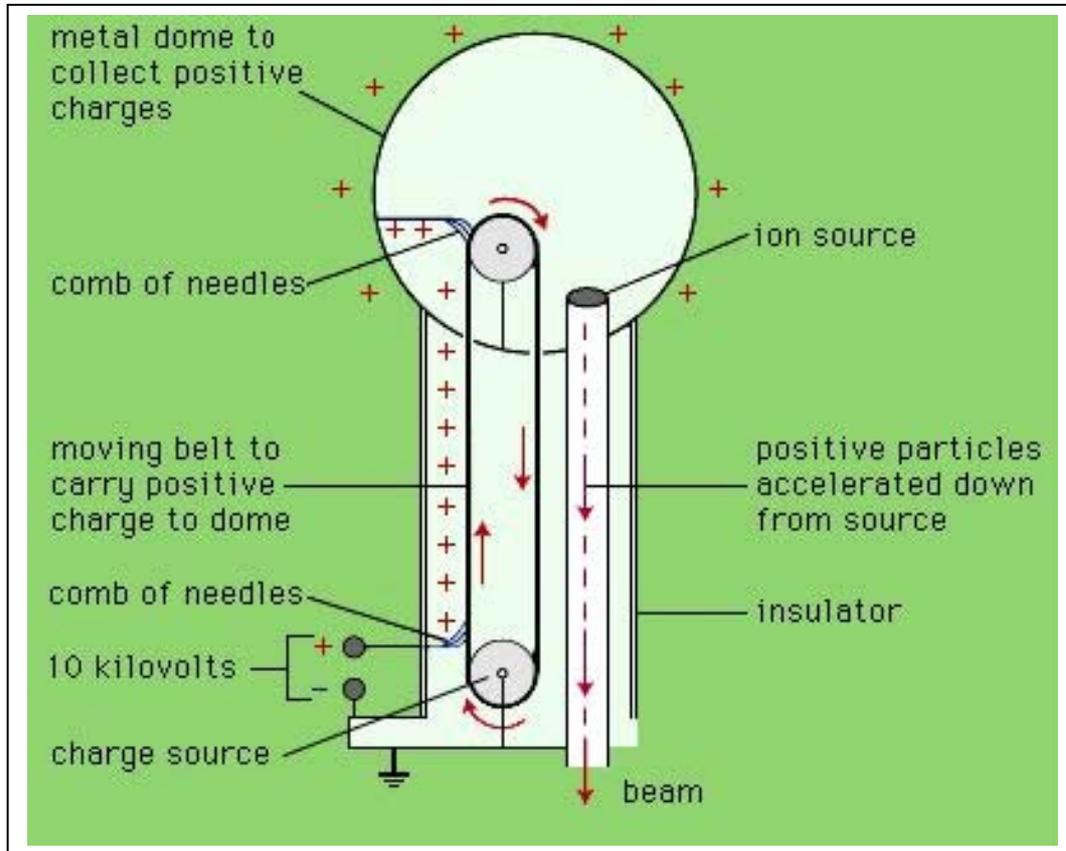


Fig 7 : Schéma de principe d'un générateur de type **Van de Graaff**.

Une courroie isolante sans fin, entraînée par un moteur électrique à une vitesse linéaire pouvant atteindre plusieurs dizaines de m/s, circule entre deux poulies. Dans la partie inférieure de la machine, la courroie est chargée électriquement par ionisation du gaz entourant un peigne métallique porté à une dizaine de kV. Les charges électriques sont déposées pratiquement uniformément sur la courroie et transportées dans la partie supérieure de la machine. Les charges sont alors déposées par effet « **Corona** » par un peigne collecteur relié à une électrode de « collection » dont le potentiel augmente progressivement. Une source d'ions reliée électriquement à cette électrode se trouve donc portée à la tension de l'électrode.

Comme pour les générateurs **Cockroft-Walton**, l'ensemble est enfermé dans une enceinte contenant un gaz sous pression (azote, SF6 ou un mélange de gaz). La réalisation d'un accélérateur de type **Van de Graaff** pose de grands problèmes technologiques notamment celui de la courroie isolante pouvant circuler à vitesse élevée et présentant les caractéristiques mécaniques et électriques adaptées. En pratique, on peut obtenir une tension de plusieurs MV et un courant maximum de protons de plusieurs dizaines de μA environ.

2.3 Le Tandem « Van de Graaff »

Le principe du Tandem proposé par « Alvarez » est illustré Fig 8. Il comporte deux colonnes d'accélération de part et d'autre d'une plate forme centrale portée à une Haute tension positive. L'ensemble est enfermé dans une enceinte contenant un gaz sous pression.

La source d'ions positifs est située hors de l'enceinte. Les ions positifs sont convertis en ions négatifs par addition d'électrons avant d'entrer dans la première colonne. La haute tension

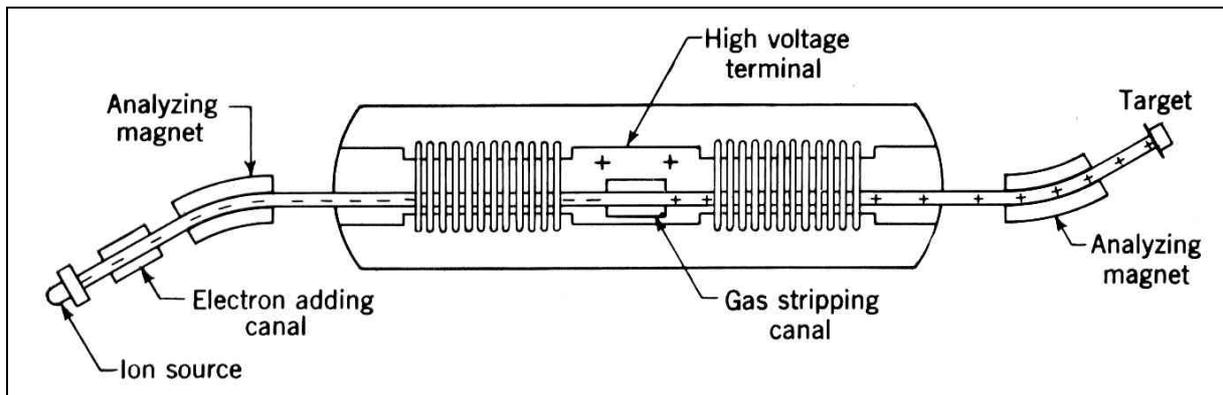


Fig 8 : Schéma de principe d'un Tandem « Van de Graaff ».

de la plate forme centrale accélère les ions négatifs. Un stripping (jet gazeux ou feuille métallique mince) retransforme l'ion négatif en ion positif qui se retrouve repoussé par la haute tension positive et subit ainsi une nouvelle accélération.

Le Tandem « Van de Graaff » permet d'atteindre 25 MeV environ en proton avec un courant continu de quelques μA environ. Le grand avantage de ce type de machine est d'avoir une source d'ions au potentiel nul. Un autre avantage est de délivrer un faisceau de faible dispersion d'énergie. De ce fait le Tandem est très employé maintenant comme injecteur dans les machines.

Malgré toutes les améliorations et perfectionnements apportés, l'énergie maximum des machines électrostatiques se situe vers 25 MeV à 30 MeV. Au dessus apparaissent inévitablement les claquages haute tension. L'idée qui est à la base de tous les accélérateurs qui ont suivi a été apportée par **Gustaf Ising** en 1924 qui a proposé d'accélérer les particules par étapes successives en les soumettant le long de leur parcours à une succession d'impulsions de tension et non pas à une seule tension accélératrice comme dans les machines électrostatiques [2]. Le LINAC était né, la première machine de type utilisait une tension alternative radiofréquence.

3- LES ACCELERATEURS LINEAIRES RADIOFREQUENCE

Dans un accélérateur linéaire, la trajectoire de référence des particules est rectiligne. Le gain d'énergie est obtenu quand la particule passe en synchronisme avec le champ électrique dans une suite d'intervalles accélérateurs appelés « gaps accélérateurs ». Par conséquent, il faudra « protéger » la particule du champ électrique quand celle ci « verra » un champ décélérateur. Il existe deux grandes familles d'accélérateurs linéaires : l'une pour les particules lourdes : protons et ions, l'autre pour les électrons.

3.1 LINAC à ions à structure « Wideröe ».

C'est en fait **Rolf Wideröe** en 1928 qui réalise la première machine accélérant des ions K et Na à 50 keV en mettant en application l'idée de **Gustaf Ising**. Plutôt que des impulsions électriques, **Rolf Wideröe** a utilisé une tension alternative radiofréquence.

Les ions se déplacent à l'intérieur d'électrodes métalliques cylindriques et portées à une tension alternative (Fig 9). Les ions sont accélérés dans l'intervalle entre deux tubes (le « gap » accélérateur). Les tensions sont en opposition de phase entre deux tubes consécutifs. La longueur des tubes est variable pour s'adapter progressivement à l'augmentation de vitesse des ions. Si $k\pi$ est la différence de phase d'un gap accélérateur au suivant, T et λ la période et la longueur d'onde du champ accélérateur, $k\pi$ est la différence de phase d'un gap au suivant (il faut $k \cdot \frac{T}{2}$ pour voir le même champ accélérateur), la condition de synchronisme s'écrit avec v_n vitesse de l'ion à la n-ième fente :

$$L = k \cdot v_n \cdot \frac{T}{2} = k \cdot \frac{v_n}{c} \cdot \frac{\lambda}{2} = k \cdot \beta \cdot \frac{\lambda_0}{2}$$

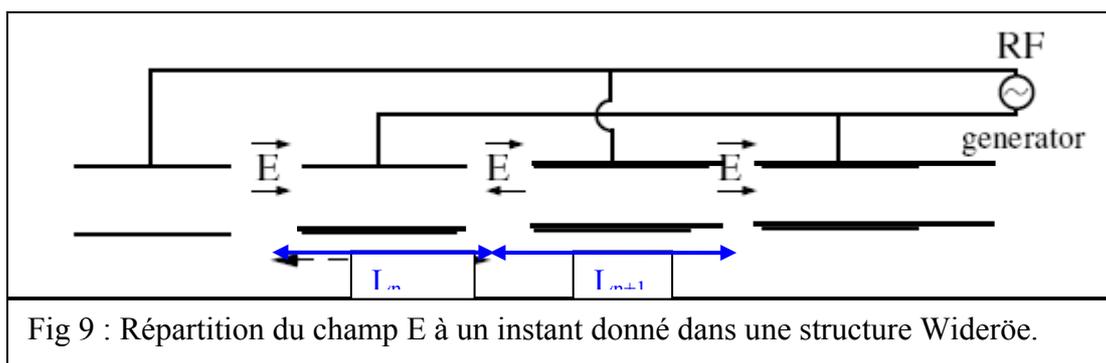


Fig 9 : Répartition du champ E à un instant donné dans une structure Wideröe.

Le linac **Wideröe** est une structure dite de mode π ($k=1$) ou encore $\frac{1}{2} \cdot \beta \cdot \lambda$. La différence de phase entre deux gaps successifs est de π . Les fréquences employées vont de quelques centaines de kHz à quelques dizaines de MHz.

En pratique l'accélérateur type **Wideröe** n'est intéressant que pour l'accélération des ions et c'est pour cette raison que **David Sloan et Ernest Orlando Lawrence** ont accéléré des ions mercure ($A=200$) à 1,2 MeV avec une intensité de 1 μ A à l'aide d'une machine (1,14m de long) de 30 électrodes. En proton l'énergie ne dépasse guère 600 keV et l'accélérateur **Wideröe** n'est pas compétitif avec les cyclotrons. L'accélérateur ALICE de l'IPN Orsay comportait 56 électrodes et fonctionnait à 24,4MHz.

La longueur des tubes augmente proportionnellement avec la vitesse des ions et par conséquent celle de l'accélérateur qui devient rapidement prohibitive.

4- LES ACCELERATEURS LINEAIRES A CAVITES RESONNANTES

Une solution possible pour limiter la longueur des électrodes est d'employer des fréquences de plus en plus grande (par exemple à 25 MHz, $\lambda = 12$ m). Cependant la puissance rayonnée par ces électrodes va augmenter proportionnellement et finalement, il faut alors faire appel à une cavité électromagnétique. Une cavité électromagnétique « parfaite » est un volume de diélectrique parfait limité par des parois infiniment conductrices. Les pertes électriques sont nulles.

- Des ondes électromagnétiques stationnaires satisfaisant les conditions aux limites (fréquences et configurations spatiales) peuvent y exister et y rester indéfiniment (système résonnant).
- Diélectrique parfait: homogène, linéaire, isotrope, invariant dans le temps, sans pertes. Une très bonne approximation : le vide pour lequel $\epsilon_0 \cdot \mu_0 \cdot c^2 = 1$

Le champ accélérateur va donc se trouver « enfermé » dans cette cavité qui aura un volume « adapté » aux vitesses des particules. La composante électrique du champ électromagnétique régnant dans la cavité sera aussi alignée que possible avec l'axe du faisceau. Les pertes électromagnétiques seront localisées sur les parois de la cavité. Chaque cavité pourra être alimentée par une source radiofréquence indépendante.

L'exemple le plus simple est un tronçon cylindrique appelé cavité de type « pill box » :

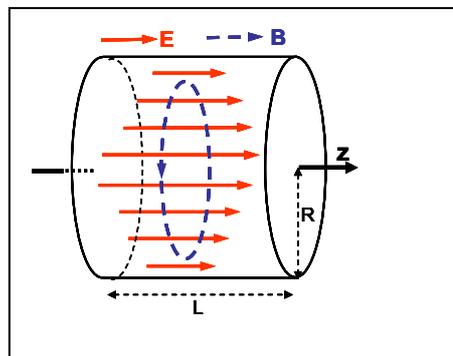


Fig 10 : Cavité de type « pill box » en mode TM 010

Les ondes électromagnétiques, solution des équations de Maxwell, ne peuvent exister dans une cavité de ce type que pour certaines fréquences (longueurs d'onde) qui sont déterminées par les dimensions géométriques. Afin de pouvoir accélérer au mieux les particules, on choisit donc un mode pour lequel le champ électrique est parallèle à l'axe de la trajectoire des particules. La fréquence de résonance la plus basse est obtenue avec le mode TM010. Par exemple pour $R=16,4$ cm on obtient 700 MHz.

Cavité électromagnétique réelle :

- Parois à conductivité finie: pertes électriques ohmiques

- Diélectrique non parfait: pertes électriques
- Ouvertures (couplage à la source): pertes électriques par rayonnement
- Si la cavité présente des pertes électriques, elle sera le siège d'ondes amorties après l'extinction de la source d'excitation. Si ces pertes sont faibles les configurations de champ électriques resteront inchangées en première approximation. La grandeur caractéristique permettant l'évaluation des pertes est le coefficient de qualité :

$$Q = 2\pi \cdot \frac{\text{Energie stockée dans la cavité}}{\text{Energie perdue par période}}$$

4.1 Les accélérateurs linéaires à structure « Alvarez »

Dans la structure de type **Alvarez** proposé par **Luis Alvarez** les tubes de glissement sont introduits dans une longue cavité électromagnétique résonnant sur le mode TM₀₁₀. Les tubes, appelés tubes de glissement (« drift tube » en anglais) servent alors à protéger le faisceau lorsque le champ électrique est décélérateur.

La différence de phase entre 2 gaps successifs est de 2π . La structure est donc de mode 2π ($k=2$) ou encore $\beta \cdot \lambda_0$.

En pratique, compte tenu d'une injection en proton toujours à une énergie voisine de 700 keV – 800 keV, la fréquence de travail se situe vers 200 MHz. Ces accélérateurs servent maintenant d'injecteur dans les machines de plus grande énergie.

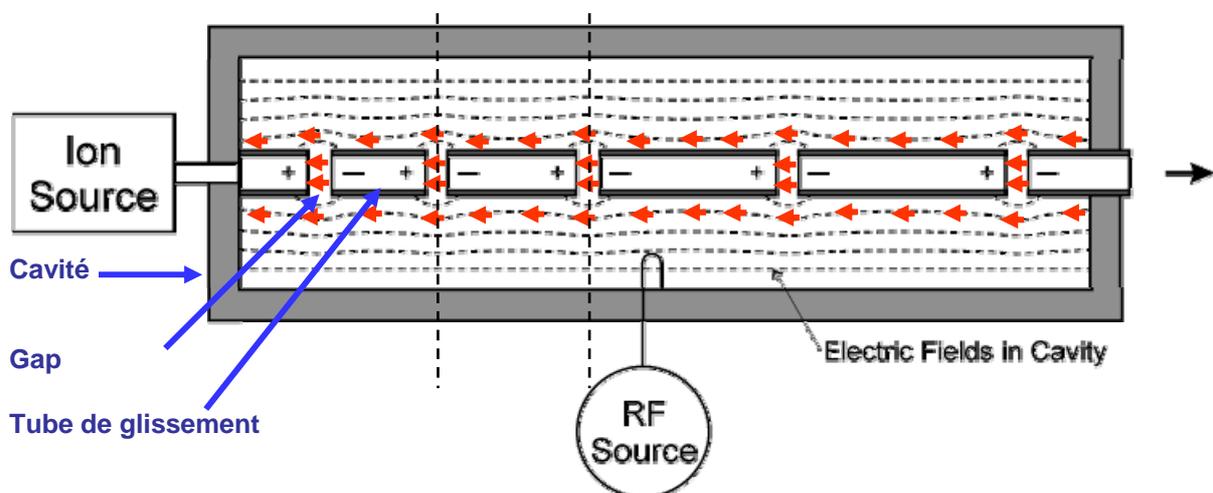


Fig 11: Accélérateur linéaire Drift Tube Linac de structure **Alvarez**

4.2 LINAC à électrons

Quand les particules deviennent ultra relativiste, par exemple l'électron dont la vitesse avoisine rapidement celle de la lumière dès que son énergie atteint quelques MeV, la fréquence de travail doit alors augmenter sinon la longueur des tubes de glissement deviendrait prohibitive. Le développement de sources hyper fréquences a permis d'accéder à des fréquences aussi hautes que 3 GHz et la structure à laquelle on a alors pu penser est celle du guide d'ondes.

Cependant la vitesse de phase des ondes dans un guide d'onde est supérieure à celle de la lumière. On peut montrer par des considérations relativistes qu'un guide d'onde cylindrique à parois internes lisses ne peut pas propager des ondes ayant une vitesse de phase inférieure à celle de la lumière. La condition de synchronisme exige que l'on ralentisse cette vitesse de phase jusqu'à c si l'on veut que l'électron soit accéléré par cette onde. La solution consiste à « charger » un guide d'onde (mode TM_{01}) par une succession d'iris qui ralentissent la vitesse de phase. Celle-ci est pour une onde de longueur d'onde λ donnée, alors fonction des dimensions relatives de a et b . La distance entre deux iris est généralement choisie à $\lambda/4$ pour

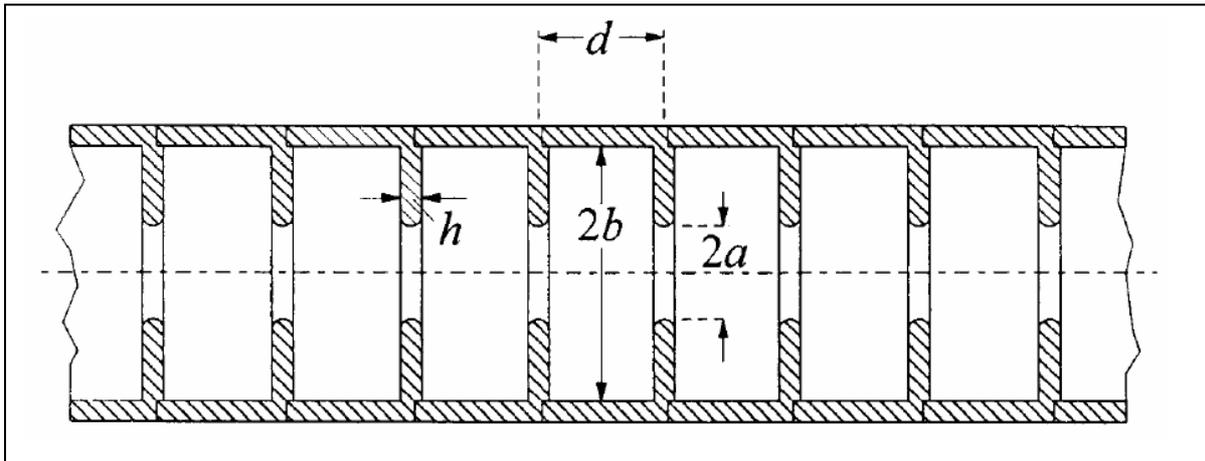


Fig 12: guide d'ondes à iris

des raisons technologiques. Cette configuration équivaut à une séquence périodique de cavités électromagnétiques couplées en leur centre. La fréquence de travail est de 3 GHz et correspond à $\lambda = 10$ cm. Le guide d'onde est terminé par une charge adaptée afin d'éviter les ondes réfléchies.

L'accélérateur linéaire d'Orsay a été le premier à dépasser le GeV en 1962. L'accélérateur linéaire de SLAC atteint une énergie de 50 MeV et mesure 3 km de long.

Les limites des accélérateurs linéaires à électrons sont technologiques et proviennent de l'accroissement prohibitif de la longueur.

4- 3 Les RFQ

Le concept a été inventé en 1970 par Kapchinskii et Teplyakov. Il repose sur l'utilisation d'une cavité résonnante sur un mode non fondamental. L'idée consiste à utiliser le champ électromagnétique pour grouper le faisceau continu entrant dans le RFQ, accélérer ce faisceau tout en le focalisant. Cette structure est principalement utilisée pour accélérer les protons et les ions H⁻.

a) Les R.F.Q. à « vane »

La cavité résonnante sur le mode TE_{210} est chargée par 4 électrodes : les « vane ». Ces électrodes présentent une modulation de leur forme qui crée un champ électrique ayant une composante longitudinale accélératrice et transversale

focalisante. Cette structure nécessite un usinage des vane avec une tolérance très faible pour pouvoir accélérer des faisceaux de forte intensité. Le RFQ « LEDA » du LANL a accéléré un faisceau continu de protons de 100 mA à 6 MeV

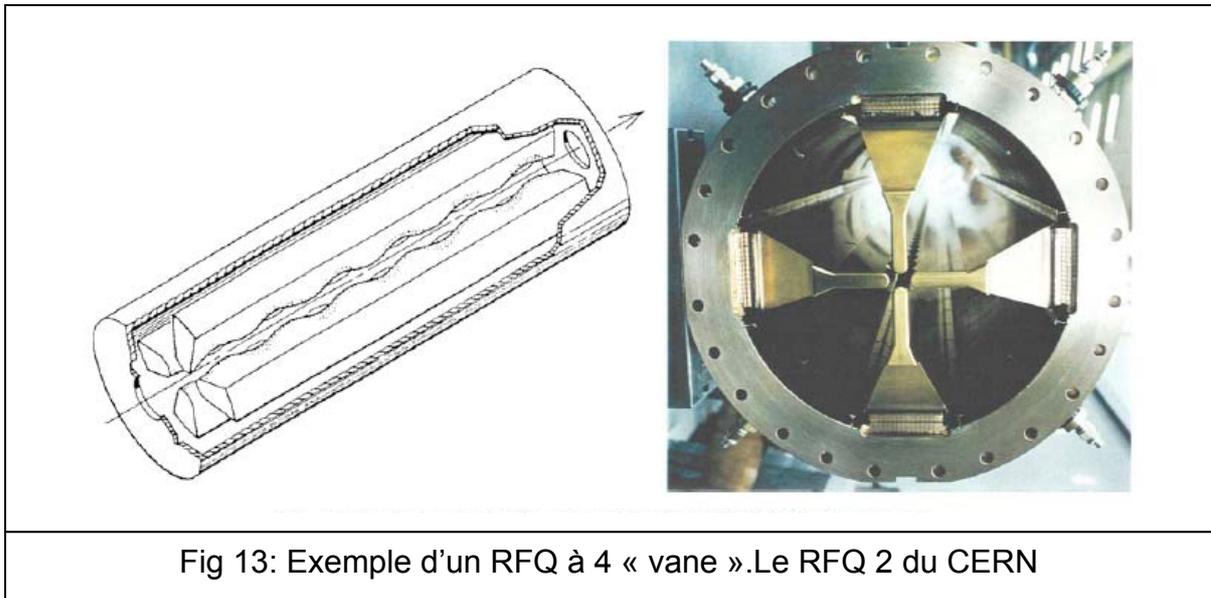


Fig 13: Exemple d'un RFQ à 4 « vane ».Le RFQ 2 du CERN

b) Les RFQ à barres (« rod »)

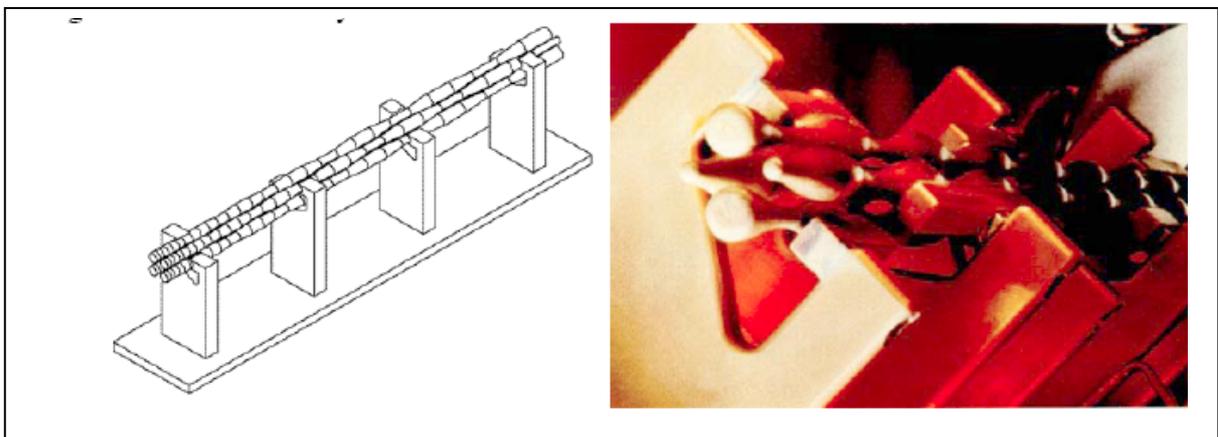


Fig14 : Schéma d'un RFQ à barres (« rods »). Le RFQ de DESY

Les barres de ce type de RFQ sont excitées par une structure périodique (les stems) dans un mode TE₂₁₀. Les barres ont une structure circulaire (donc facile à usiner). Cette structure ne permet pas d'accélérer des faisceaux d'intensité aussi forte que les RFQ à lames.

Les RFQ sont devenus incontournables et toutes les machines modernes utilisent des RFQ dans les sections de pré-accélération. Ils sont particulièrement bien adaptés à l'accélération des protons et des ions lourds.

5. LES ACCELERATEURS CIRCULAIRES : LE CYCLOTRON

5.1 Le cyclotron classique

L'augmentation de la longueur des accélérateurs linéaires avec l'énergie, les performances des sources radiofréquences disponibles vers les années 30 à 40 conduisent à considérer l'accélération des particules d'une manière différente: Plutôt que de passer dans de nombreux gaps accélérateurs successifs, les particules vont passer un grand nombre de fois dans le même gap accélérateur. Cette idée a été exploitée sous différentes formes :

- En 1923, **Rolf Wideröe** avait déjà inventé le concept de l'accélérateur circulaire à induction, mais c'est **Donald William Kerst** (université de l'Illinois) qui construisit plus tard en 1941 le premier accélérateur à électrons de 2,3 MeV utilisant un champ électrique produit par induction magnétique [3] après avoir résolu en 1940 les problèmes théoriques liés à la stabilité de la trajectoire. C'était le premier «bétatron».

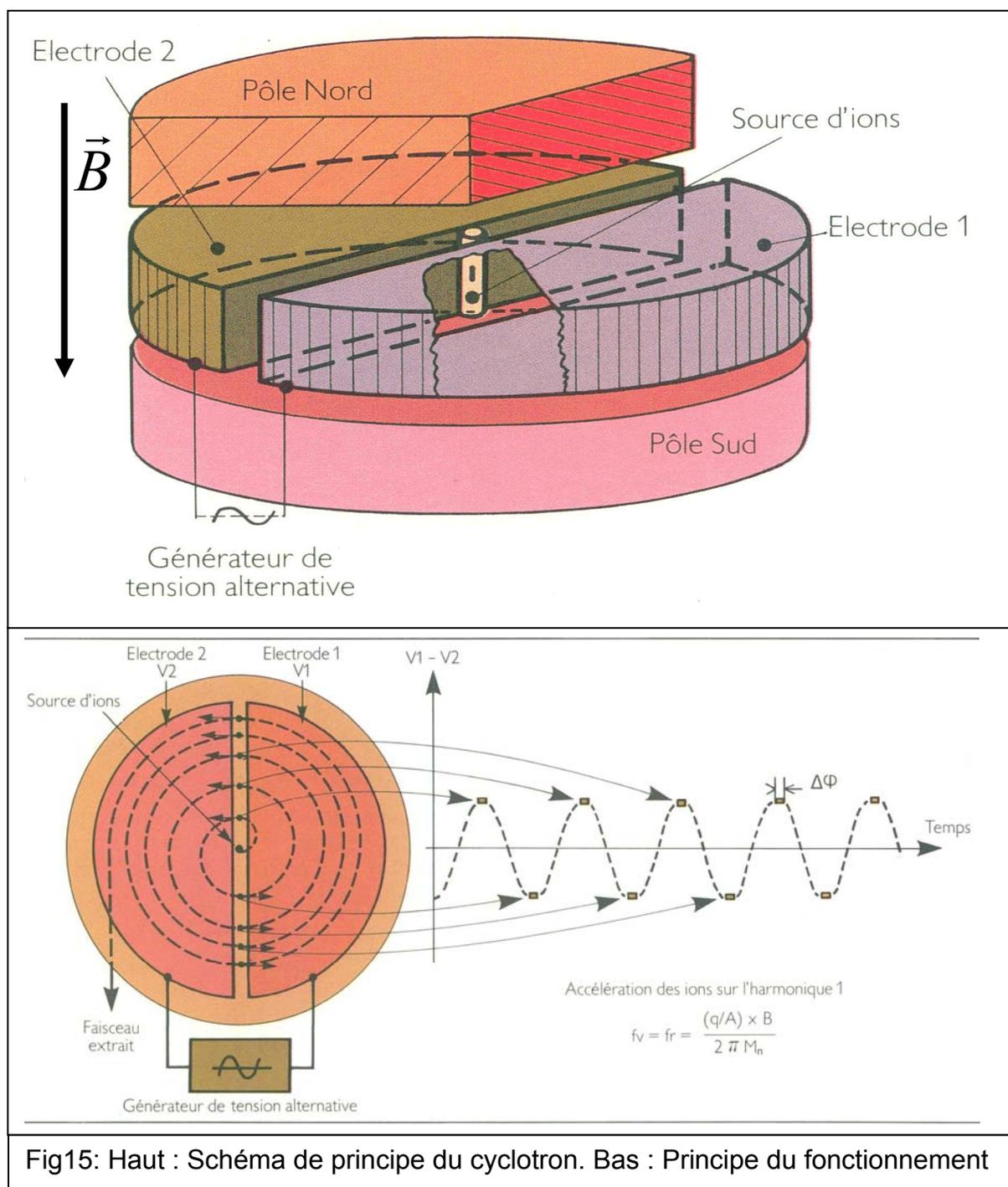


Fig15: Haut : Schéma de principe du cyclotron. Bas : Principe du fonctionnement

En janvier 1931, **Ernest Orlando Lawrence** et son étudiant **Milton Stanley Livingstone** construisent le premier cyclotron et accélèrent des protons à 80 keV. La machine fait 11 cm de diamètre et la « haute tension » est voisine de 2000V (donc une quarantaine de tours pour les particules). Immédiatement après **E. O. Lawrence** construit un cyclotron de 11 inches (septembre 1931) et atteint 1,1 MeV.

Le principe de fonctionnement d'un cyclotron classique est illustré fig 15. Les particules décrivent une trajectoire dans un plan perpendiculaire à un champ magnétique uniforme et indépendant du temps. Les particules sont accélérées à chaque fois qu'elles passent dans l'intervalle situé entre deux électrodes semi circulaires, appelées « dee ». Elles sont reliées à un générateur de tension alternative de fréquence (Une tension continue ne communiquerait aucun accroissement d'énergie sur un tour). Les dee jouent ici le rôle de tube de glissement. L'équilibre de la force centrifuge et de Lorentz s'écrit :

$$\gamma \cdot m_0 \cdot \frac{v^2}{R} = |q| \cdot v \cdot B = |q| \cdot (\omega \cdot R) \cdot B \text{ soit pour } f_{\text{générateur}} : f = \frac{|q| \cdot B}{2\pi \cdot \gamma \cdot m_0}$$

Pour des particules non relativistes (cyclotron classique), γ vaut 1 et la fréquence f cyclotron est constante. La trajectoire ressemble à une spirale et le temps mis par une particule non relativiste pour décrire un demi cercle dans un dee est indépendant de sa vitesse et est donc constant car B est aussi constant.

Le cyclotron produit un courant continu. L'énergie maximum possible est voisine de 20 MeV pour un cyclotron classique car au dessus l'effet relativiste commence à apparaître : Les deux limites du cyclotron sont :

- La perte de l'isochronisme pour les particules relativistes : la fréquence de rotation décroît.
- L'augmentation nécessaire du diamètre de l'aimant à champ magnétique constant.

5.2 Le synchrocyclotron

Pour les ions relativistes le facteur γ augmente. En 1945 **Edwin Mattison Mac Millan** (USA) et **Vladimir Iosifovich Veksler** (Russie) proposent le synchrocyclotron (« phasotron » en Russie). Dans un synchrocyclotron, la fréquence f du générateur est abaissée pendant l'accélération en raison inverse de $\gamma \cdot m_0$. Cette variation de fréquence est obtenue par la rotation d'un condensateur variable de l'oscillateur. On obtient ainsi des protons d'énergie 600 MeV (CERN, $B=1,94$ T; $r=2,25$ m) à 1 GeV (Gatchina, $B=1,9$ T ; $r=3,18$ m) mais les intensités sont de 1 à 100 fois inférieures à celles des cyclotrons, car le faisceau est pulsé par principe. C'est ici la limitation du synchrocyclotron.

5.3 Le cyclotron isochrone

Llewellyn Hilleth Thomas propose en 1938 une modulation azimutale (pour la stabilité verticale du faisceau) et radiale (car le rayon de la trajectoire augmente) du champ magnétique (**Azimuthally - Varying – Field cyclotron**) tout en gardant la fréquence constante. Cependant les difficultés technologiques repoussent la

réalisation vers les années 1960 et on aboutit à la construction de « cyclotron isochrone à secteurs » qui donne naissance à des zones de champ fort (colline) et champ faible (vallée) par ajout de matériau magnétique (secteurs) sur le pôle principal.

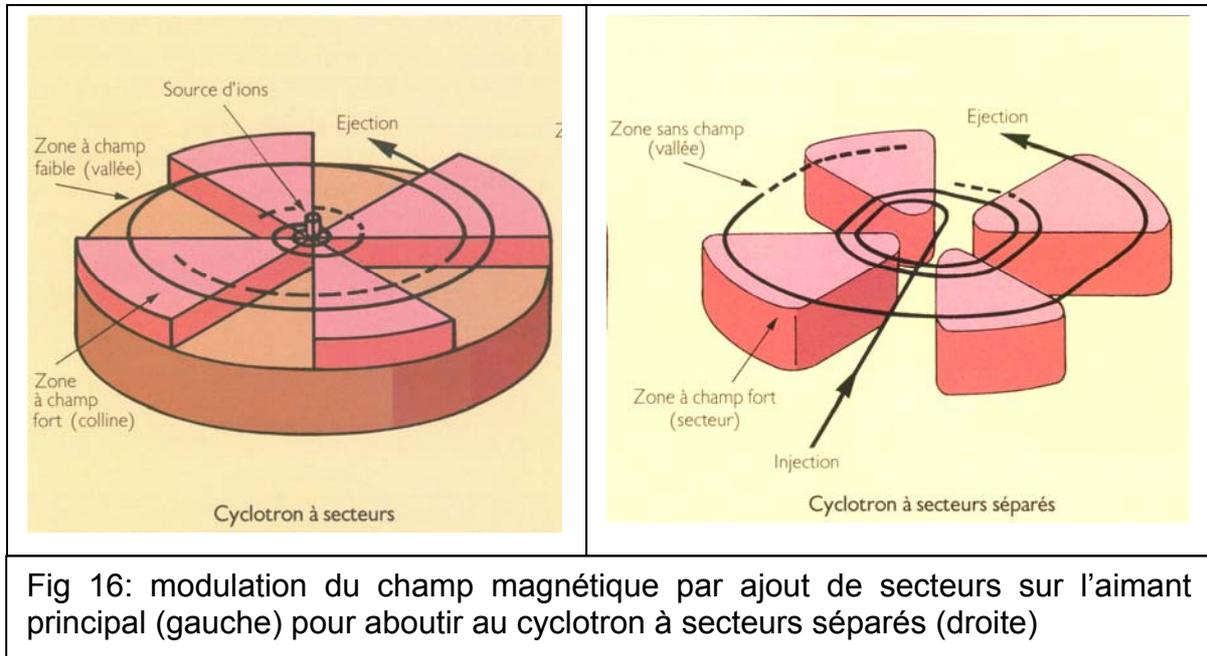


Fig 16: modulation du champ magnétique par ajout de secteurs sur l'aimant principal (gauche) pour aboutir au cyclotron à secteurs séparés (droite)

A l'extrême, on aboutit en supprimant totalement le matériau magnétique dans les vallées au cyclotron à secteurs séparés. La place laissée ainsi libre est dédiée aux systèmes accélérateurs.

Tous les cyclotrons modernes fonctionnent sur ce principe et les exemples les plus représentatifs sont GANIL (France) machine à 4 secteurs, champ magnétique de 1,6T et P.S.I. (Suisse) qui est une machine à 8 secteurs avec une fréquence de travail de 50,63 MHz en protons pour un champ magnétique de 2 T.

Ces machines ne peuvent dépasser environ 600 MeV en proton. Les limitations proviennent de la taille des aimants à réaliser : 430t pour un circuit magnétique d'un secteur d'un cyclotron CSS du GANIL.

Actuellement, la tendance est à l'emploi d'aimants supraconducteurs pour ce type de machine. Ceux-ci permettent en effet d'obtenir un champ magnétique plus important et avec un encombrement moindre.

6- LES ACCELERATEURS CIRCULAIRES : LE SYNCHROTRON

6.1 Principe de fonctionnement

Les aimants devenant techniquement infaisables et les effets relativistes (notamment pour les électrons) très importants, monter en énergie nécessite donc de changer de principe de fonctionnement. En 1943, **Marcus Oliphant** décrit le principe du synchrotron dans une simple note :

"Particles should be constrained to *move in a circle of constant radius* thus enabling the use of an *annular ring* of magnetic field ... which would be varied in such a way that the *radius of curvature remains constant* as the *particles gain energy* through successive accelerations by an alternating electric field applied between coaxial hollow electrodes."

Le synchrotron proposé en 1945 par **E. M. MacMillan** et **V. I. Veksler** (après avoir résolu le problème du synchronisme de phase) est la machine qui permettra d'atteindre les énergies les plus élevées (Fig 17). Le rayon de courbure ρ de la trajectoire des particules est maintenu constant pendant l'accélération. Dans ces conditions la fréquence f et le champ magnétique $B(r,t)$ doivent varier simultanément pendant que la vitesse $v_{particule}$ des particules augmente:

$$\rho = \left| \frac{p(t)}{q \cdot B(r,t)} \right| \qquad \omega_{RF} = 2 \cdot \pi \cdot f = 2 \cdot \pi \cdot \frac{v_{particule}}{L} \cdot n$$

n étant le nombre harmonique. (La fréquence de la tension accélératrice peut être aussi un multiple entier de celle de révolution des particules)

L'avantage est immédiat : les aimants peuvent rester « petits » car la trajectoire des particules est contenue dans un tube à vide de quelques cm de diamètre. Une seule section d'accélération est nécessaire (en théorie) et le gain d'énergie par tour ΔE des particules est constant et vaut :

$\Delta E = q \cdot V_0 \cdot \sin \Phi_s$ dans lequel V_0 est l'amplitude de la tension alternative d'accélération et Φ_s la phase de la particule par rapport à cette tension.

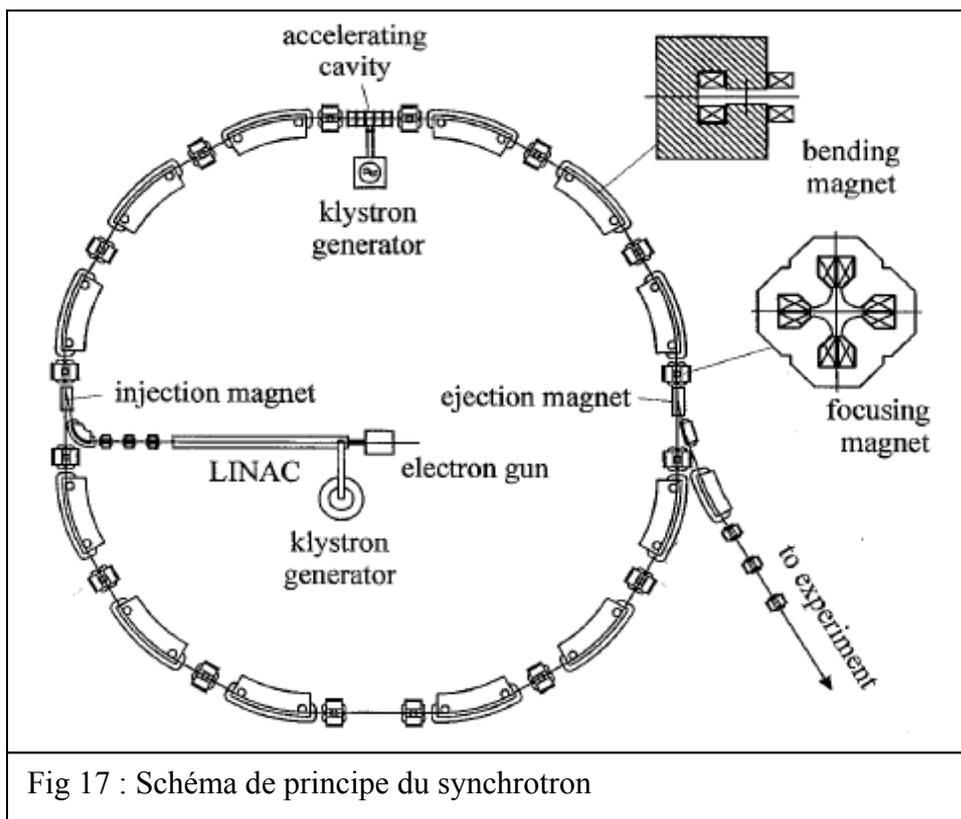


Fig 17 : Schéma de principe du synchrotron

Le principe de fonctionnement des synchrotrons permet l'accélération des électrons comme des hadrons mais la réalisation nécessite de prendre en compte les propriétés spécifiques de ces particules.

6.2 Le synchrotron à électrons

Les particules rayonnent de l'énergie sous forme électromagnétique lorsqu'elles sont accélérées. En particulier, lorsqu'elles passent dans les dipoles d'un synchrotron, la direction du rayonnement est tangentielle à la trajectoire (l'accélération est centrifuge) et après un tour de la machine, l'énergie totale perdue par rayonnement synchrotron est :

$$\Delta E [\text{GeV}] = \frac{6,034 \times 10^{-18}}{\rho [\text{m}]} \cdot \beta^3 \cdot \left(\frac{E [\text{GeV}]}{E_0 [\text{GeV}]} \right)^4$$

Le rapport de l'énergie perdue par rayonnement par un électron sur celle d'un proton (le rapport des masses au repos étant de 1/ 1836) pour la même énergie et le même rayon de trajectoire vaut donc:

$$\frac{\Delta E_e}{\Delta E_p} \approx 10^{13}$$

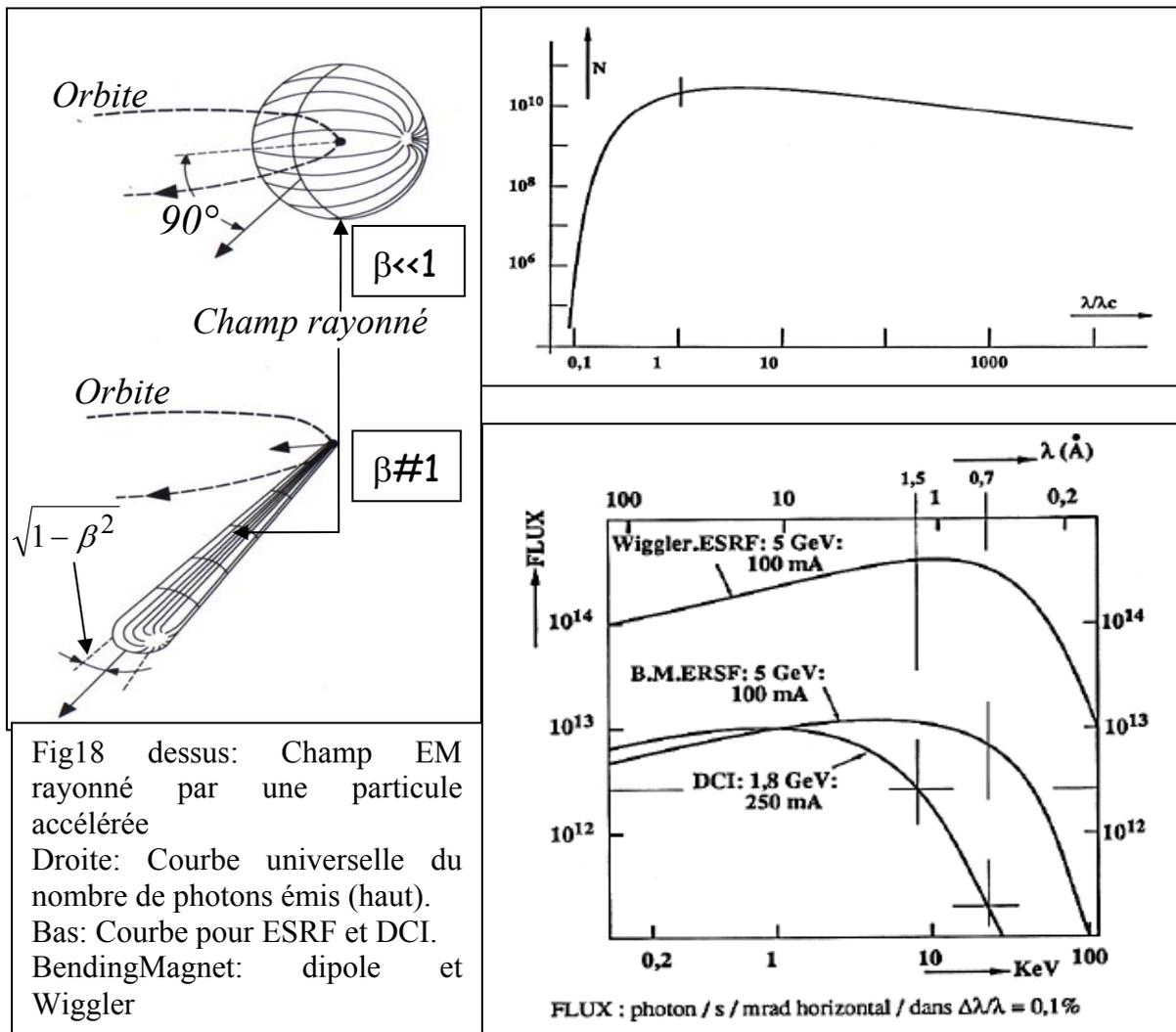
L'énergie perdue par rayonnement synchrotron par l'électron dépend fortement de son énergie et cette perte d'énergie doit être compensée par le dispositif accélérateur de la machine. Pour les électrons considérés dans les synchrotrons $\beta \sim 1$ et l'énergie perdue par tour de machine s'écrit simplement :

$$\Delta E(\text{GeV}) = 8,85 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{E^4(\text{GeV})}{\rho(\text{m})}$$

Cette simple considération conduit à considérer deux grandes familles de synchrotron à électrons suivant l'utilisation qui est prévue.

a) Machine à rayonnement synchrotron :

Le rayonnement synchrotron de l'électron a été mis en évidence pour la première fois sur un synchrotron de 70 MeV construit à la General Electric en 1946 par **Robert Langmuir** et ses collègues et annoncé en 1947 [6]. Il s'est révélé à partir des années 1970 particulièrement intéressant comme source de rayonnement X et ultraviolet. De nombreux synchrotrons, dédiés uniquement à la production de ce rayonnement ont depuis été construits. L'intérêt de ces machines se situe dans les domaines de la physique fondamentale et appliquée.



Les électrons (ou positons) relativistes soumis à une accélération centripète émettent un rayonnement tangentiellement à leur trajectoire. Plus précisément, on peut donc observer ce rayonnement à la sortie des dipoles. Il est contenu dans un cône de lumière (Fig 18) centré dans la direction de propagation des électrons et d'angle quadratique moyen θ . Pour les particules ayant une vitesse voisine de c:

$$\theta \approx \frac{1}{\gamma} = \frac{511}{E[\text{keV}]}$$

Lorsque l'énergie des particules et le courant injecté dans la machine sont fixés, on définit le flux de photons $N(\lambda)$ émis par seconde, par milliradian d'ouverture dans le plan horizontal (tout le plan vertical est pris en compte) et compris dans une bande d'énergie à 0,1%.

Ce rayonnement présente un spectre continu depuis les rayons X jusqu'à l'infrarouge et est associé à une courbe universelle qui donne $N(\lambda)$ en fonction de la longueur d'onde. Cette courbe présente un maximum d'intensité pour une longueur d'onde appelée longueur d'onde critique λ_c qui divise le spectre d'émission en deux parties égales. λ_c est caractéristique de la machine ($|\rho|$ est le rayon de courbure).

$$\lambda_c = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot |\rho| \cdot \gamma^{-3}$$

Les accélérateurs modernes utilisent également pour la production de rayonnement synchrotron les « insertions » qui sont les onduleurs et les wigglers. Un onduleur est une structure périodique d'aimants dans lesquels les faisceaux décrivent une trajectoire sinusoïdale de faible amplitude. On obtient ainsi un rayonnement présentant un spectre de raies au lieu du spectre continu créé par le passage des électrons dans les dipoles.

Un exemple d'accélérateur dédié au rayonnement synchrotron est « SOLEIL » en France. Le synchrotron mesure 354m de circonférence et l'énergie est de 2,75 GeV. L'intensité du faisceau atteint 500 mA.

b) Synchrotrons à électrons de forte énergie

L'obtention de fortes énergies avec les synchrotrons à électrons nécessite d'augmenter le rayon de la machine afin de diminuer la puissance perdue par le faisceau par rayonnement synchrotron. Le L.E.P en est le meilleur exemple :

L'énergie perdue par un électron à 50 GeV est de 0,18 GeV par tour pour un rayon de courbure de la trajectoire de 3,1 Km. (circonférence de 27 km).

6.3 Le synchrotron à hadrons

Depuis la découverte en 1952 du principe du gradient alterné par **Ernest D. Courant, Hartland S. Snyder, Milton Stanley Livingston et John Blewett** (et indépendamment par **N. Christofilos**) pendant la construction du Cosmotron (protons de 3 GeV) au Brookhaven National Laboratory en 1952 [5], les synchrotrons modernes sont tous à focalisation « forte »: Les fonctions de focalisation verticale et focalisation horizontale des faisceaux sont assurées par des quadripôles magnétiques séparés. La déviation de la trajectoire est assurée par les dipôles.

En 1954, une équipe se forme autour de **John Adams** du **C.E.R.N** pour débiter les travaux de réalisation du « **Proton Synchrotron** » [7]. Les caractéristiques sont intéressantes à noter :

Rayon magnétique : 70m,

Rayon de la machine : 100m

Einjection : 50 MeV à B= 147 G

E_{max}= 28,3 GeV à B = 1,4 T,

Gain d'énergie par tour : 54 keV,

Dynamique de fréquence du système accélérateur : 2,9 – 9,55 MHz.

Ces machines ont nécessité la réalisation de dispositifs accélérateurs basés sur l'utilisation de résonateurs à ferrite dont la fréquence d'accord peut être ajustée pendant le cycle d'accélération.

Par la suite en 1963, les dispositifs d'extraction rapide et lente du faisceau ont été ajoutés (le PS fonctionnait jusqu'alors sur cible interne pour produire des particules secondaires).

L'énergie fournie par ces machines n'a fait que croître par la suite et dès 1963 fut lancé au CERN un programme de 300 GeV en proton. Les problèmes liés au coût de

ces machines apparurent nettement et réclamaient des solutions adaptées. Dans ce but, **John Adams** eut l'idée d'utiliser le P.S. comme injecteur et de construire cette nouvelle machine dans un tunnel. Le **S.P.S.** était né :

Rayon de la machine : 2200 m
EInjection : 10 GeV à B = 0,045 T
E_{max} = 450 GeV à B = 2 T,

Finalement, les développements successifs des synchrotrons ont permis des conditions de fonctionnement uniques :

- Travailler en cible fixe.
- Accélérer une très grande variété de particules. Le **P.S.** a accéléré: p, \bar{p} , d, α , O, S, Pb, e⁻, e⁺
- Délivrer des faisceaux avec une grande dynamique en énergie.
- Injecter dans des machines plus grandes lorsqu'elles devenaient « vieillissantes » : Le P.S. a ainsi injecté dans le SPS, le LEP, ISOLDE.
- De fonctionner en collisionneur (e⁺ e⁻ ; pp, p \bar{p} , ..) et en anneau de stockage dans lequel les particules sont stockées pendant des durées importantes. La pression résiduelle requise est par conséquent plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle des machines conventionnelles, les champs ont une valeur beaucoup plus précise (pour ne pas cumuler les erreurs sur des millions de tour) et beaucoup plus stables. Ces anneaux ne communiquent pas d'énergie supplémentaire aux particules mais nécessitent tout de même des sections accélératrices pour compenser les pertes radiatives et assurer la focalisation en phase du faisceau.
- Simon Van der Meer a inventé le cooling stochastique aux ISR du CERN : Ce dispositif consiste à mesurer les fluctuations statistiques du faisceau et à les compenser par rétroaction active sur le faisceau. Le dispositif a ensuite été appliqué au faisceau d'antiprotons du SPS en 1981 et a permis à Carlo Rubbia de découvrir les particules W⁺, W⁻, Z⁰ et d'obtenir pour cela le prix Nobel

Les synchrotrons sont des machines à fonctionnement pulsé.

7- LA SUPRACONDUCTIVITE DANS LES ACCELERATEURS

Atteindre des énergies de plus en plus élevées en conservant des dimensions « raisonnables » pour les machines nécessite :

- De disposer de champs d'induction magnétique dont l'intensité est supérieure à 2T correspondant sensiblement à la saturation du fer (donc la limite technologique possible), pour courber les trajectoires,
- Des cavités accélératrices capables de produire si possible en régime C.W., des gradients accélérateurs supérieurs à ceux obtenus par les cavités en cuivre. En effet les pertes ohmiques dans les parois des cavités augmentent avec le carré de la tension accélératrice, ce qui limite en pratique

l'utilisation des cavités en cuivre à des gradients de l'ordre du MV/m. Le coût des cavités et de l'installation électrique nécessaire deviendrait alors vraiment prohibitif. De plus l'échauffement excessif des parois de ces cavités en cuivre entraîne une augmentation de la pression résiduelle dans l'accélérateur, des déformations et des fatigues mécaniques rendant difficile son fonctionnement et son entretien.

La supraconductivité apporte une amélioration décisive à ces problèmes :

- Pendant la construction du SPS la collaboration « GESSS » regroupant trois laboratoires (CEA Saclay, KfK Karlsruhe et Rutherford Abington) a proposé de développer des aimants supraconducteurs. Finalement 4,5T ont été atteints par l'aimant « CESAR » qui présentait une ouverture de 150 mm. Par la suite les dipôles supraconducteurs (4,5 T) ont été adoptés au « FERMILAB » puis à HERA par exemple.
- Les premiers essais débutent en 1965 par l'accélération d'électrons avec des cavités plaquées au plomb à l'HEPL de Stanford. Par la suite le niobium s'est imposé comme matériau pour la construction des cavités supraconductrices. Le LINAC de Jefferson Laboratory (CEBAF – TJNAF) possède la plus grande installation au monde : 338 cavités (1,5 GHz – 2°K).
- Le projet de collisionneur TESLA
- La cavité accélératrice de l'anneau SOLEIL est supraconductrice. Le projet SPIRAL2 en cours de réalisation comporte un LINAC équipé intégralement de cavités supraconductrices.
- Le projet de collisionneur à e+ e- TESLA de 500 GeV utilise également la technologie des cavités supraconductrices : L'étude des cavités dans le cadre de la collaboration « Tesla Test Facility » a démontré qu'il était possible d'atteindre 23,5 MEV/m avec un facteur de qualité de 10^{10} . Les cavités sont en Niobium refroidies à l'hélium superfluide à 2°K en bande L (1,3GHz). Des améliorations technologiques successives ont porté le gradient à 30MV/m. La meilleure performance a permis d'atteindre 42 MV/m.
- La cavité accélératrice de l'anneau SOLEIL est supraconductrice. Le projet SPIRAL2 en cours de réalisation comporte un LINAC équipé intégralement de cavités supraconductrices.

Les cavités supraconductrices couvrent maintenant presque toute la gamme utile à l'accélération des particules de $\beta = 0.01$ à $\beta \sim 1$. Par exemple, des gradients de 20 MV/m sont atteints en fonctionnement à CEBAF pour des puissances de 15 kW environ [8]. Les études menées dans le cadre de TTF ont montré que 30MV/m peuvent être espérés en fonctionnement journalier. La contre partie est d'une part une installation cryogénique et d'autre part un processus de réalisation extrêmement sophistiqué de ces cavités.

8- LES COLLISIONNEURS DE PARTICULES

L'obtention de très hautes énergies fait appel aux collisionneurs dont le concept a été énoncé par Wideroe en 1943 :

R. Wideroe again.. "...I had thus come upon *a simple method for improving the exploitation of particle energies available .. for nuclear reactions*. As with cars (collisions), when a target particle (at rest) is bombarded, a considerable portion of the kinetic energy (of the incident particle) is used to hurl it (or the reaction products) away.
Only a relatively small portion of the accelerated particle's energy is used to actually to split or destroy the colliding particles. However, *when the collision is frontal, most of the available kinetic energy can be exploited.*
For nuclear particles, relativistic mechanics must be applied, and .. the effect .. be even greater "

Il propose simultanément le principe de l'anneau de stockage de particules :

"... If it were possible to *store the particles in rings for longer periods*, and if these 'stored' particles were *made to run in opposite directions*, the result would be one opportunity for collision at each revolution.
Because the accelerated particles would move very quickly they would make many thousand revolutions per second and one could expect to obtain a collision rate that would be sufficient for many interesting experiments."

Les anneaux de stockage permettent d'accumuler un grand nombre de particules Il est ensuite possible de les faire collisionner avec un autre faisceau produit lui aussi par stockage. L'énergie disponible dans le centre de masse est alors beaucoup plus importante.

Le premier anneau de stockage « AdA » pour positons ou électrons à 250 MeV est construit à Frascati en 1961.

Le LEP2 a été un collisionneur électron positron construit pour 2 x 100 GeV et qui a atteint finalement 208 GeV en septembre 1999 à l'aide de 272 cavités supraconductrices.

Le « Large Hadron Collider » du CERN est actuellement la démonstration la plus élaborée de collisionneur. Le LHC est prévu pour faire entrer en collision des faisceaux de protons de 7 TeV et plus tard des ions Pb54+ à 2,76 TeV/A. Les caractéristiques sont exceptionnelles :

- 1232 dipôles principaux cryogéniques : 1,9 °K ; 8,33 T max ; 11700 A
- Energie stockée dans les aimants : 11 GJ
- 8 cavités supraconductrices par faisceau. Champ : 5 MV/m. F= 400 MHz
- Durée de remplissage : 4' 20" par anneau ; Durée d'accélération : 20' ; durée de vie du faisceau : 10h
- Faisceau : 2808 bunches de $1,1 \times 10^{11}$ protons
- Luminosité : $10^{34} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$
- 600×10^6 collisions par seconde

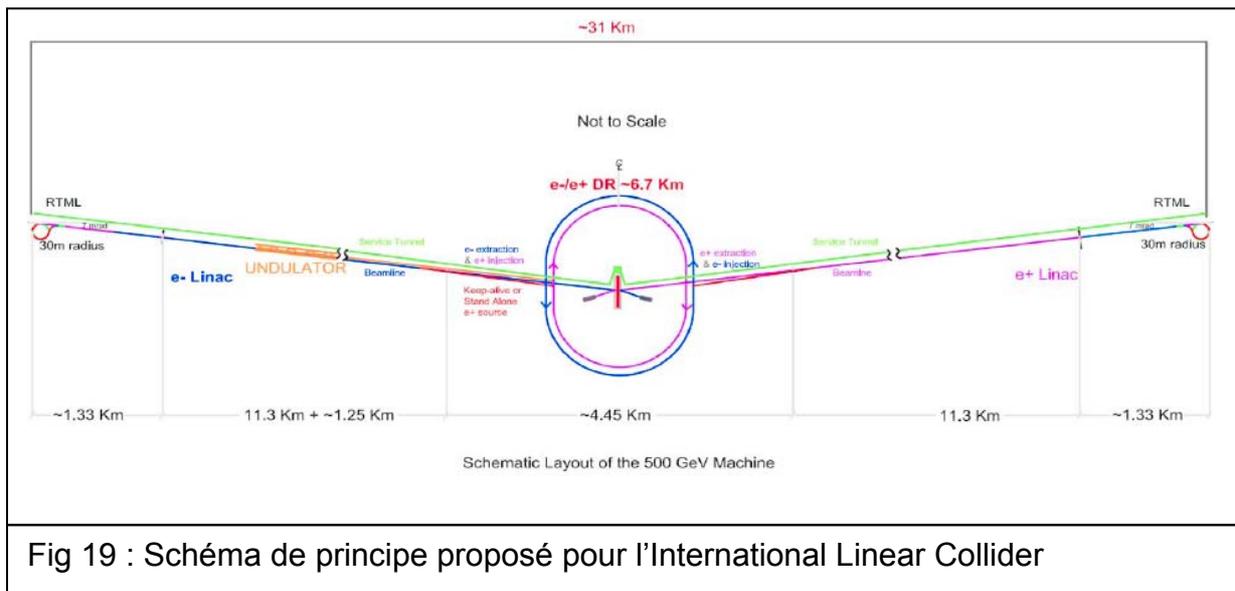
9- PERSPECTIVES

Les différents types de machine inventés depuis le début du siècle précédent ont permis d'offrir aux expérimentateurs une grande variété de projectiles jusqu'à des énergies bientôt supérieures au TeV pour les protons. Les perspectives semblent se dessiner comme suit :

9 -1 Machines à électrons à haute énergie :

Le LEP semble avoir indiqué la limite maximum que l'on pouvait atteindre pour les synchrotrons à électrons tant la puissance totale perdue par radiation est importante : de l'ordre de 20 MW. Doubler l'énergie avec le même dispositif accélérateur nécessiterait une machine 16 fois plus grande. Obtenir des énergies plus importantes en électrons ou en positon nécessite d'accélérer les électrons en ligne droite, donc au moyen d'un ou plusieurs LINAC et d'utiliser la technologie supraconductrice. Choisir un collisionneur permettrait en outre d'accroître l'énergie disponible dans le centre de masse.

Le collisionneur TESLA a déjà été évoqué dans le chapitre ci dessus à propos de la supraconductivité. L'International Linear Collider est également un collisionneur dont la conception proposée en 2007 intègre également les développements les plus sophistiqués disponibles actuellement.



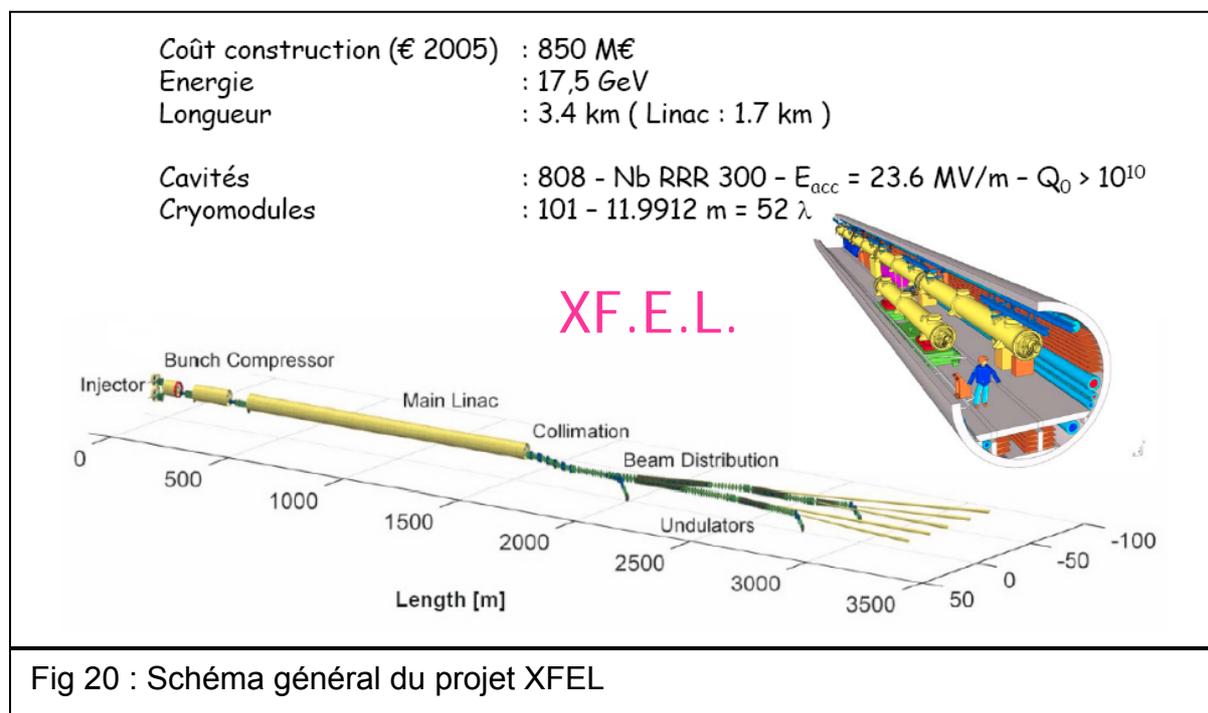
Les électrons polarisés sont éjectés d'une photocathode par une impulsion laser de 2 ns durée et sont ensuite accélérés à 5 GeV par un LINAC de 250 m de longueur. Les électrons ainsi accélérés produiront des paires électron-positron dans une cible de titane. Les positrons ainsi produits sont accélérés également à 5 GeV dans un autre LINAC de 5 GeV. Deux anneaux de 7 km de circonférence sont utilisés ensuite pour regrouper les faisceaux produits afin qu'ils aient une taille assez petite (100 μm de diamètre et quelques mm de longueur) pour être injectés dans les LINAC supraconducteurs principaux de 250 GeV chacun. La puissance de chaque faisceau avant collision est de 10 MW.

La conception détaillée, le choix du site, la réalisation et le financement d'une telle machine ne peuvent se concevoir que dans un cadre international.

9 -2 Machines à électrons pour l'utilisation du rayonnement synchrotron:

La brillance et l'intensité des sources de rayonnement synchrotron ont gagné dix ordres de grandeur en 30 ans. Cependant les rayonnements émis par les électrons de ces machines n'ont aucune relation de phase entre eux et leur superposition est donc incohérente. Un progrès décisif est possible grâce aux lasers à électrons libres. Les FEL (Free Electron Laser) basés sur l'utilisation de l'effet SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) rendent possibles la réalisation de sources dont la brillance peut être supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des synchrotrons de troisième génération comme SOLEIL. Le projet européen X-FEL propose une machine basée sur l'utilisation d'un LINAC à cavités supraconductrices pour accélérer un faisceau d'électrons. Ceux ci sont ensuite introduits dans un onduleur dans lequel ils décrivent une trajectoire oscillante et produisent de ce fait un rayonnement X qui s'amplifie progressivement.

L'amplification provient de l'interaction du rayonnement X produit dont la vitesse de propagation est supérieure à celle du faisceau d'électrons dans l'onduleur. De ce fait, le faisceau d'électrons se trouve alors regroupé sous forme de disques très fins qui constituent une source de rayonnement cohérent. Ce processus de formation des disques est assez long et nécessite des onduleurs de 100 m de long environ.



Comme le LINAC peut piloter plusieurs onduleurs, le projet X-FEL comporte dans l'immédiat 5 onduleurs qui produiront des rayonnements de caractéristiques différentes.

9 - 3 Machines à protons et ions lourds:

- Le projet SPIRAL2 est actuellement en construction sur le site du GANIL concerne la production de faisceaux d'ions stables et radio actifs. Il est basé sur l'utilisation un LINAC pouvant accélérer des deutons à 40 MeV ainsi que les ions lourds à 14,5 MeV/A. L'objectif est d'atteindre un taux de 10^{14} fissions par seconde. Le courant correspondant de deutons est de 5 mA.

- Le projet FAIR est un projet international de recherche axé sur l'utilisation des faisceaux d'ions à haute intensité et d'antiprotons qui nécessite tout d'abord une amélioration des installations existantes à GSI. Le cœur du projet est constitué par un deux synchrotrons « SIS 100 » (10^{12} U28+ à 1 GeV/u) et « SIS 300 » (anneau de lissage à extraction lente 34 GeV/u U92+) de 1100 m de circonférence. SIS 100 et SIS 300 sont deux anneaux à aimants supraconducteurs à 2T et 6T. Les ions exotiques seront produits par fission et fragmentation. Un système d'anneaux de stockage pour protons, électrons et ions lourds complètera l'ensemble. FAIR offrira un site d'expériences très complet en physique nucléaire et des particules.

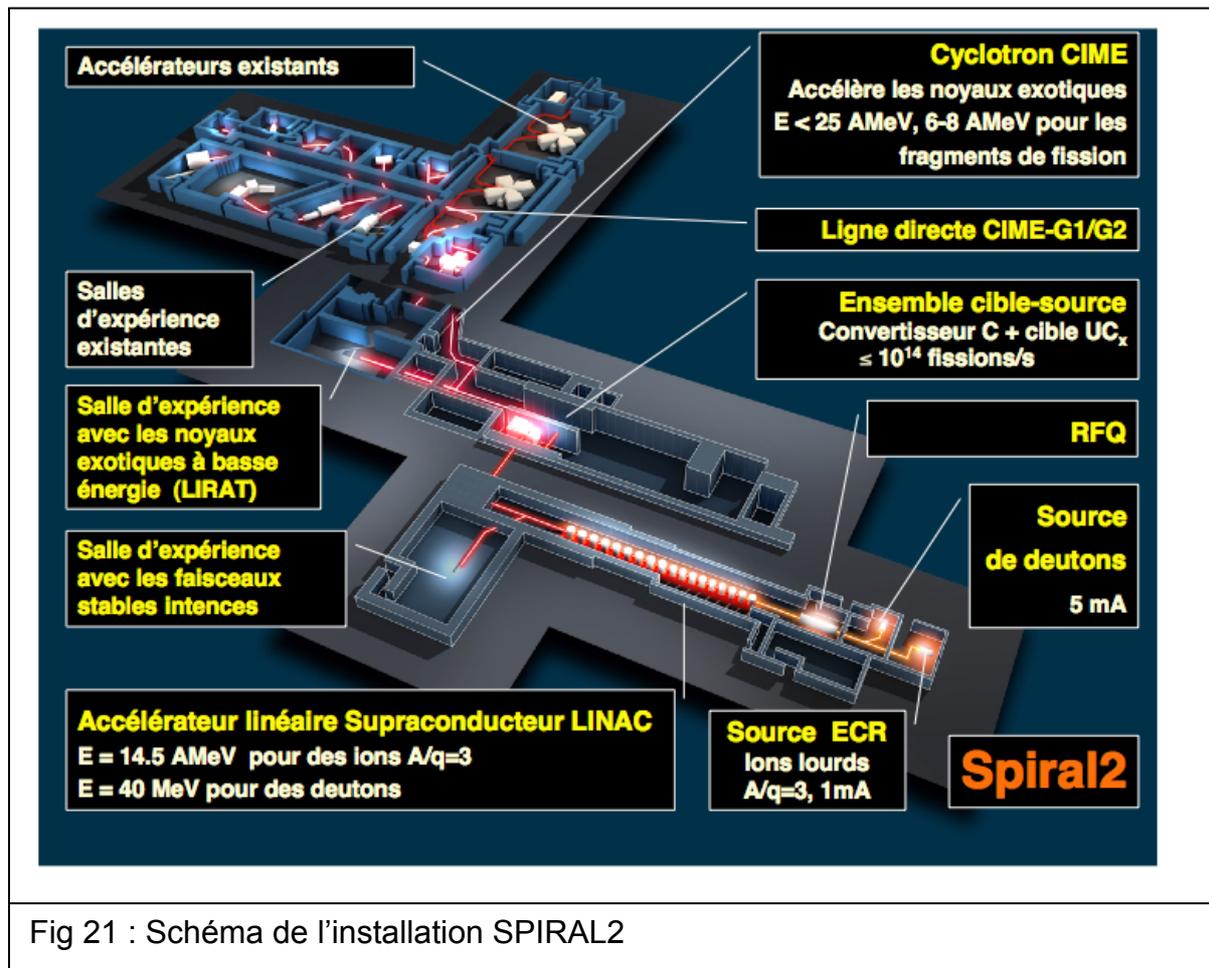


Fig 21 : Schéma de l'installation SPIRAL2

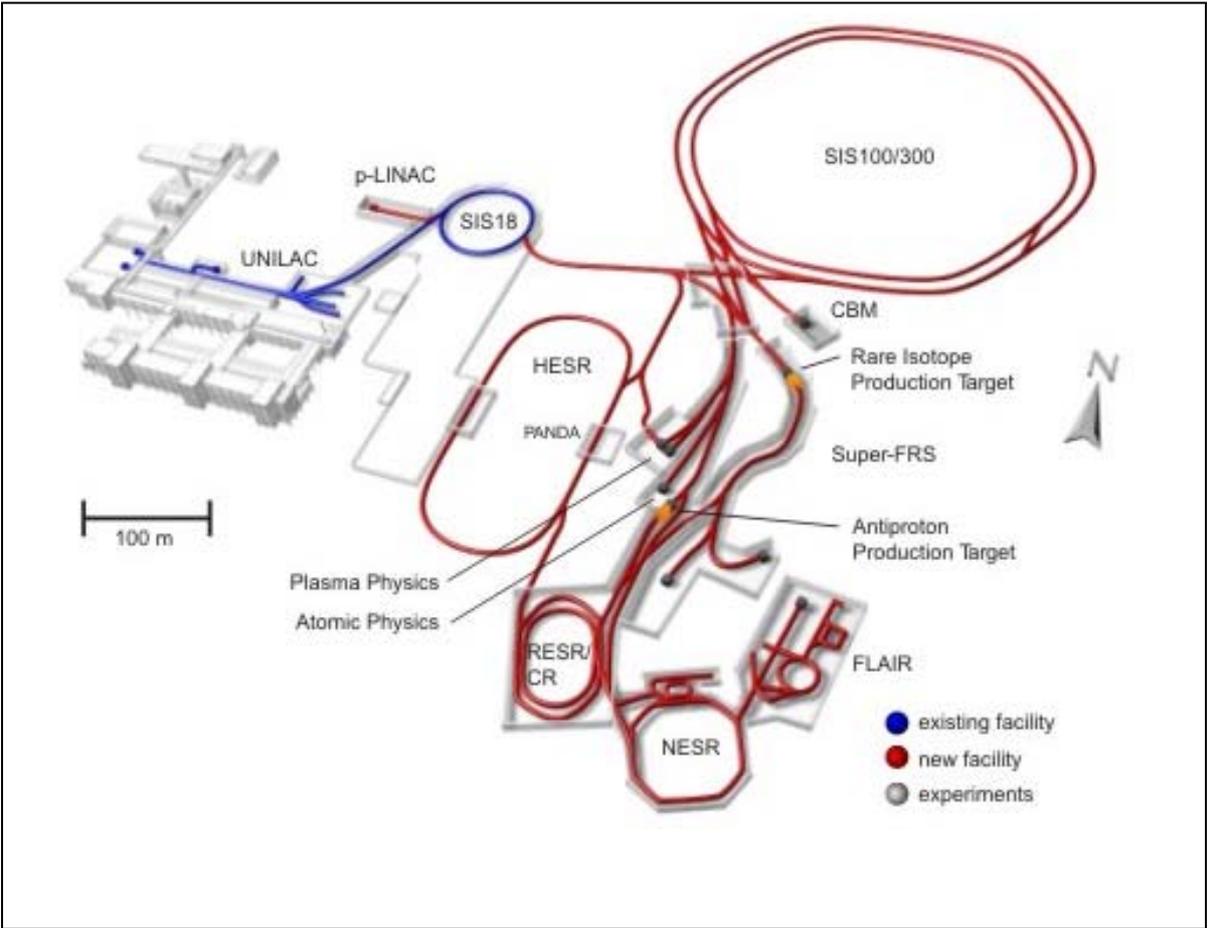


Fig 22 : Schéma proposé pour le projet FAIR

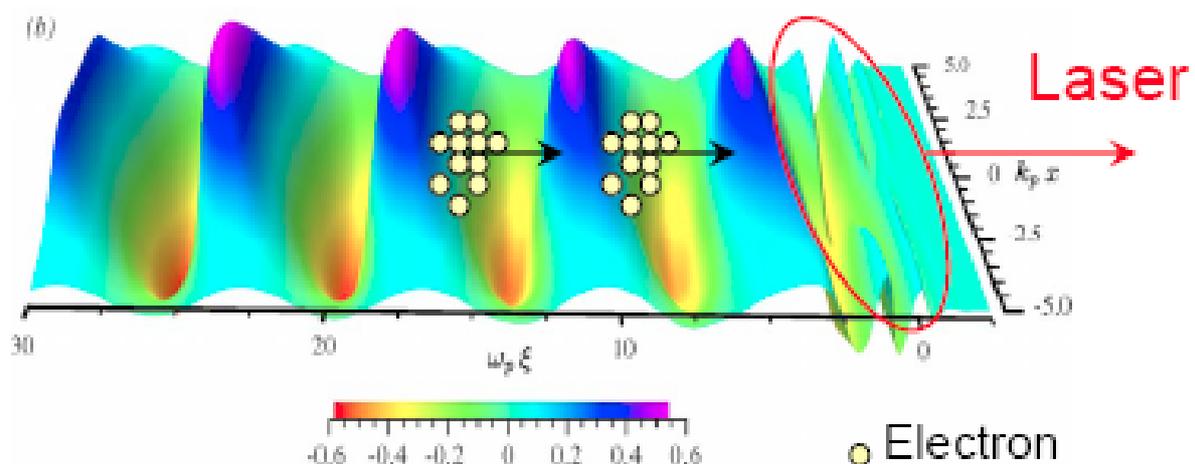
10. CONCLUSION

Les progrès accomplis durant les cent dernières années en accélération de particules ont permis de proposer un éventail très complet de machines fonctionnant depuis les très basses intensités jusqu'aux hautes intensités tant pour les électrons et positons que pour les hadrons. De plus les modes de fonctionnement peuvent être très variés et adaptés aux applications envisagées. Ces machines sont toutes basées sur l'utilisation de champs électriques dérivant d'un potentiel vecteur produits par des cavités radio fréquences pour l'accélération des particules.

La supraconductivité a permis d'augmenter considérablement les performances tant pour les champs d'induction magnétiques disponibles que pour l'obtention de gradients accélérateurs élevés. Les projets actuellement en construction ou à venir utilisent ou utiliseront tous cette technologie arrivée maintenant à maturité. Il est par exemple déjà prévu d'augmenter le champ magnétique des dipôles du LHC après sa mise en exploitation. En effet l'augmentation du rayon de la machine paraît difficile à réaliser. Le principal défi consiste à produire de manière industrielle les composants des accélérateurs actuellement à l'étude à un prix acceptable.

Une nouvelle voie semble s'ouvrir avec l'accélération des particules par l'interaction laser plasma. Les premiers travaux sont dus à **T. Tajima** et **J. M. Dawson** [10] remontent à 1979. Des taux d'accélération supérieurs à 1GV/m sont possibles à comparer avec les quelques dizaines de MV/m actuellement disponibles suivant les l'énergie des particules et le mode de fonctionnement des accélérateurs. .

Laser in plasma displaces electrons Wake velocity = Group velocity of light



Bibliographie

[1] J. D. Cockcroft, E. T. S. Walton Experiments with High Velocity Positive Ions. II. The Disintegration of Elements by High Velocity Protons Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Volume 137, Number 831 / July 01, 1932 Pages 229-242

[2] Gustaf Ising, "Prinzip einer Methode zur Herstellung von Kanalstrahlen Hoher Voltzahl", Arkiv för Matematik, Astronomi och Fysik, Band 18 (1924)1

[3] D.W. Kerst. The acceleration of electron by magnetic induction. Phys. Rev. 60, 47-53, (1941).

[4] E. O. Lawrence and M. S. Livingston, "The Production of High Speed Protons Without the Use of High Voltages," Phys. Rev. 38, 834 (1931) is a half-page letter reporting a smaller cyclotron.

[5] Ernest D. Courant, M. Stanley Livingston, Hartland S. Snyder, The strong-Focusing Synchrotron - A new high energy accelerator. Phys. Rev. 88, 1190, (1952)

[6] Elder, F. R.; Gurewitsch, A. M.; Langmuir, R. V.; Pollock, H. C., "Radiation from Electrons in a Synchrotron" Physical Review, vol. 71 (1947), Issue 11, pp. 829-830

[7] CERN Accelerator school, 50 years of synchrotrons CERN 97 04. 2 July 1997

[8] Sergey Belomestnykh, Valery Shemelin; High β cavity design. 12th International Workshop on RF superconductivity, Ithaca, NY, July 2005.

[9] T. Tajima, J.M. Dawson, Laser electron accelerator. Phys. Rev. Lett. 43, 267 (1979)

- On peut citer également pour approfondir la compréhension du fonctionnement des machines les comptes rendus des :

« Cern Accelerator School » cours général et avancé

« Joint University Accelerator School »

- On peut également consulter avec profit les cours des écoles IN2P3 sur les accélérateurs. En particulier la dernière qui est celle de 2007 à La Londe les Maures.