

Les accélérateurs de particules 1

Les accélérateurs linéaires

A. Chancé

CEA Saclay DSM/IRFU

18 juillet 2014

- 1 Quelques généralités
- 2 Les accélérateurs électrostatiques
- 3 L'accélération résonnante
- 4 Les accélérateurs linéaires
- 5 Grands projets

*Goal of Accelerator Science :
Answer Fundamental Questions*

*We humans have long been obsessed
with four great questions:*

*the nature of matter,
the origins of the Universe,
the nature of Life,
the workings of mind.*

Herbert A. Simon

*Nobel Laureate in Economics
from the Lecture in 1986*





Accelerators in Use

There are about 13,000 accelerators in use around the world

Nowadays the majority of accelerators are used in different types of applications. However, we will mainly go through their use as a tool for exploring the interior of matter.

General industrial use:

Sterilisation, imaging

Research accelerators:

Particles, synchrotron light used in biomedical, physics, chemistry, biology, material research

Radiotherapy:

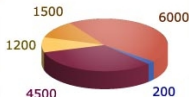
Cancer treatment with X-rays, protons and other particles

Ion implantation, surface modifications:

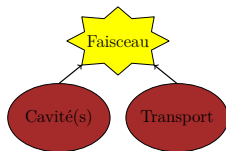
Controlled semiconductor doping; Changing properties of surfaces

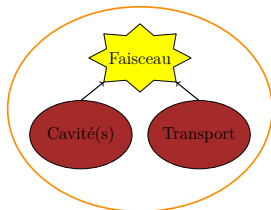
Radioisotope production:

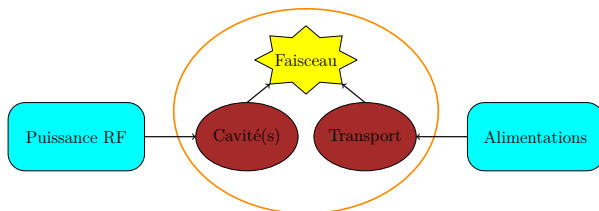
Cancer treatment; imaging organs for medical use

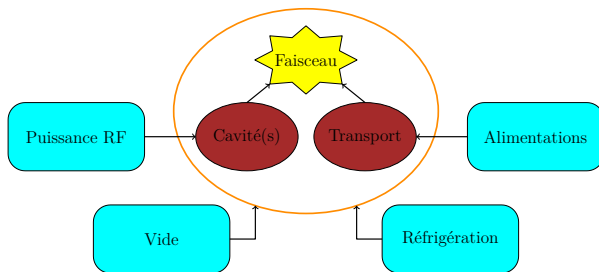


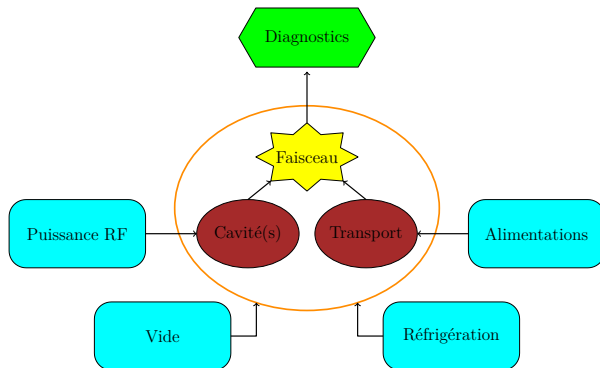


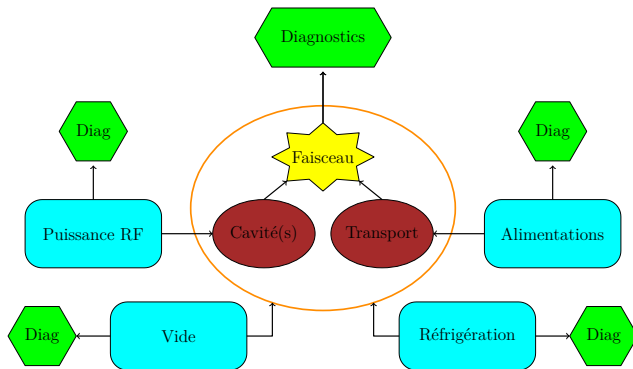


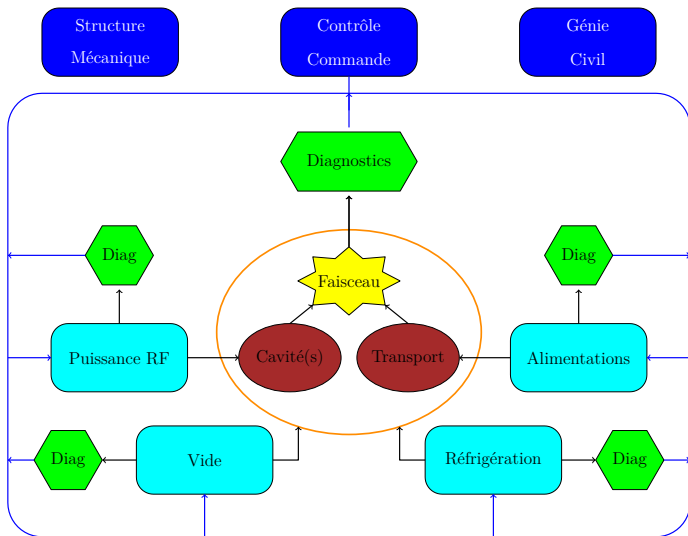












1927 E. Rutherford à la Royal Society :

... 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. ...

● Jusque là, les physiciens disposaient :

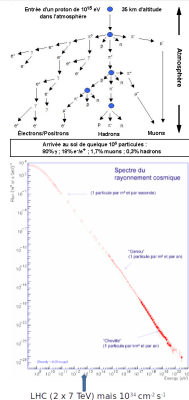
- De particules α (<10 MeV) et β issues de la radioactivité.

⇒ Faible énergie.

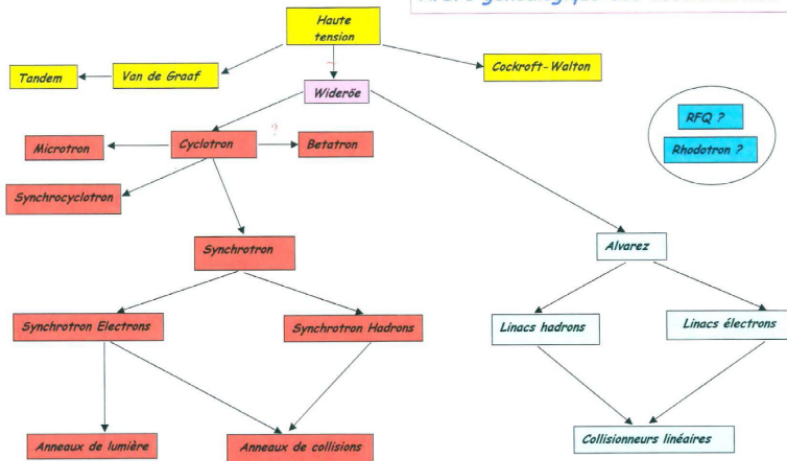
- De particules cosmiques.

⇒ Faible flux+cascade.

⇒ Besoin d'un flux **intense** de particules **énergétiques**.



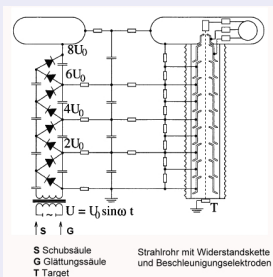
Arbre généalogique des accélérateurs



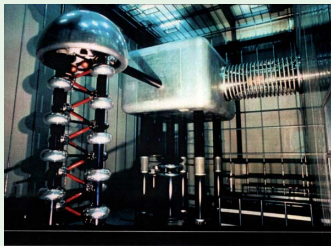
Eric Baron - GANIL

- 1930 : **Augmentation de la tension accélératrice** avec la cascade de Greinacher.
- 1932 : Cockroft et Walton : première désintégration de Li par des protons de 400 keV.
- Système encore utilisé comme **injecteur de hadrons** bien que remplacé le plus souvent par un RFQ.

Schéma de principe

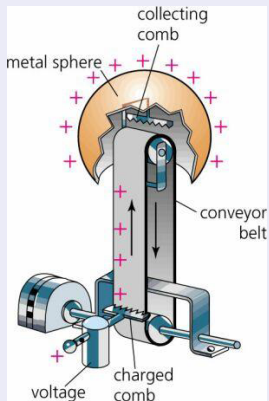


L'injecteur 810 kV du cyclotron Mega-Watt (PSI-Suisse)



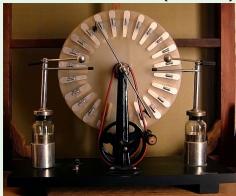
- 1929 : Robert Van de Graaf travaille à Princeton sur un principe de bande transportant des charges électriques.
- 1931 : 1.5 MV sont atteints au moyen de 2 machines.

Schéma de principe

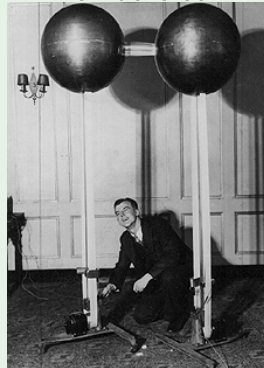


Exemples

Whimshurst (1880)

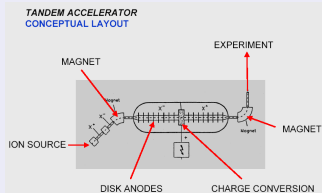


Van de Graaf

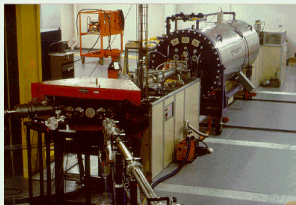


- **Principe** : Accélérer des ions négatifs, les “éplucher” pour les transformer en ions positifs et ainsi les accélérer une seconde fois.
- Avantages et inconvénients :
 - ☺ 2 accélérations successives.
 - ☺ La source d'ions ainsi que la cible restent a la masse.
 - ☹ Intensité réduite (ions négatifs).

Schéma de principe



AGLAE : le Tandem du Louvre

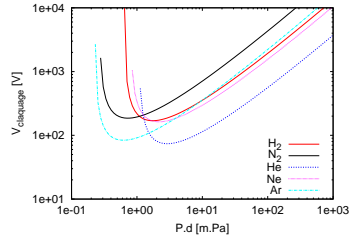


Limitations et avantages

- ☺ Tous types d'ions.
- ☺ Très faible dispersion en énergie.

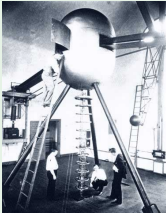
Potentiel limité (loi de Paschen)

- Pour éviter les claquages :
 - Augmenter les dimensions.
 - Augmenter l'isolation par des gaz de forte rigidité électrique sous pression.
 - Opérer sous vide.



Des installations de plus en plus grandes

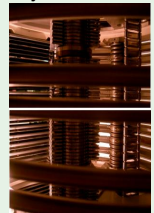
1933 : 1.2 MV



5 MV



Tandem Daresbury : 30 MV



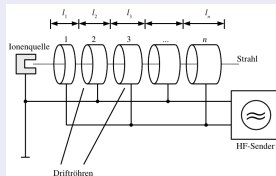
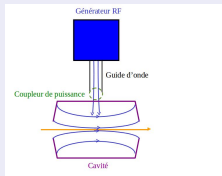
Motivation

Additionner un grand nombre d'accéléérations successives dans des cavités résonnantes plutôt que d'augmenter la tension.

- Proposé par Gustaf Ising en 1924.
- Réalisé par Wideroe en 1928.
- **Pratiquement tous les accélérateurs** d'aujourd'hui.

La cavité résonnante

Confiner de manière stable une onde RF dans un secteur de l'accélérateur et y faire transiter le faisceau.



Cavité résonnante : la pill-box

$$\Delta \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial z} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial t^2}$$

$$E_z(r, z, t) = R(r) e^{i\omega t}$$

$$E_z(r, t) = E_0 J_0(k_r r) \cos \omega t$$

$$B_\theta(r, t) = -\frac{E_0}{c} J_1(k_r r) \sin \omega t$$

$$k_r = 2\pi/\lambda$$

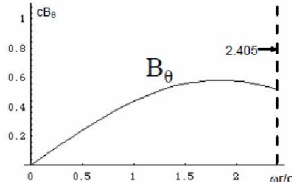
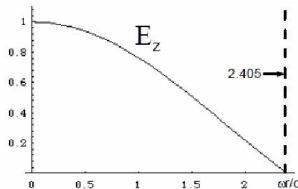
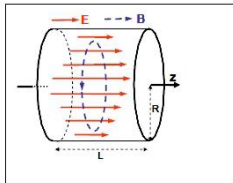
Dans le vide en utilisant $\nabla \times \nabla \times E$ (idem pour B).

Conditions aux limites dans le cas de conducteurs parfaits.

Pour E_z .

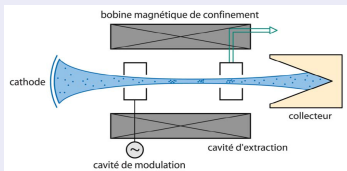
Solutions axisymétriques.

J_0, J_1 fonctions de Bessel.



- On utilise un accélérateur d'électrons !
- Modulation de vitesse du faisceau (non relativiste).

Principe du klystron



U 150-500 kV
 I 100-500 A
 f 0.2-20 GHz
 $P_{\text{ave}} < 1.5$ MW
 $P_{\text{peak}} < 150$ MW
rendement 40-70%

Exemples de klystron

1937 : 1^{er} klystron



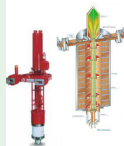
Fig. 7 - The Varian Free-Beam Klystron

1948 : 20 MW 1 μ s



Fig. 8 - The First Megawatt Klystron

45 MW pic 3 GHz

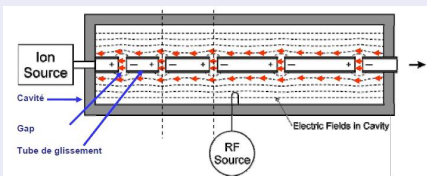


- Wideroe (1928 pendant sa thèse! K^+ à 50 keV) et Sloan (1931 Hg 1.26 MeV) : accélération résonnante.

Limitations à l'époque

- Absences de sources haute fréquence (> 10 MHz).
- Puissance électromagnétique perdue par rayonnement.
- 1947 : Luis Alvarez place les tubes de glissement (DTL) dans une cavité résonnante à 202.56 MHz (émetteur radio de l'US army). Devenu un standard dans les linacs.

Principe du DTL

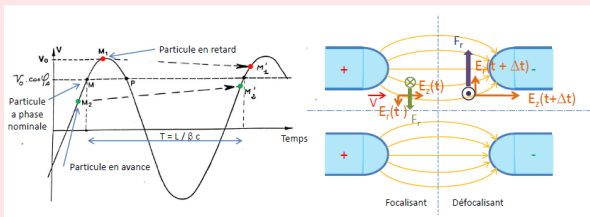


Linacs de Sloan et Alvarez

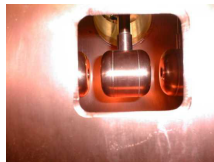
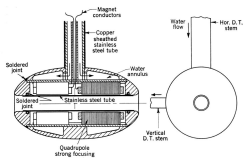


Incompatibilité focalisation transverse/longitudinale

- Les particules doivent être sur la phase ascendante de l'onde RF.
- Stabilité longitudinale → Défocalisation transverse.



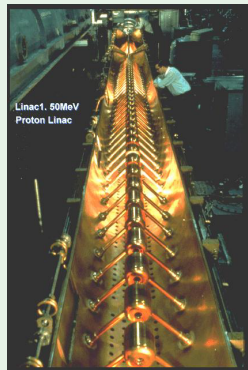
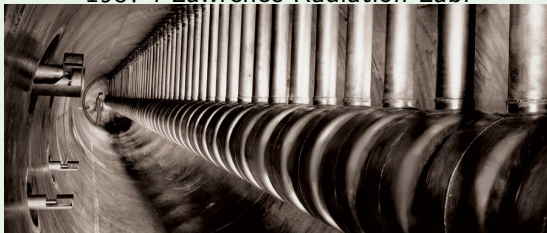
⇒ Quadripôles (lentilles magnétiques) dans chaque tube.



- Facilité d'injection et d'éjection.
- Protons de 10 à 100 MeV ($0.1 < \beta < 0.4$).
- Énergie fixe pour un type d'ion.

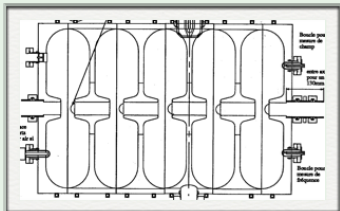
Exemples de DTL

1957 : Lawrence Radiation Lab.



- Utilisé pour accélérer les faisceaux de grande vitesse ($\beta > 0.4$).
- Cellules couplées entre elles par des fentes ou ds cavités externes.
- Déphasage de π entre 2 cavités (inversion du champ entre 2 cavités).
- Focalisation externe par des quadripôles placés à l'extérieur.

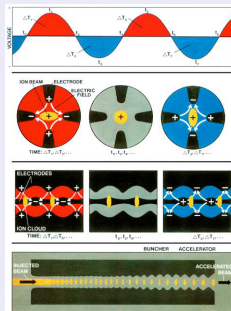
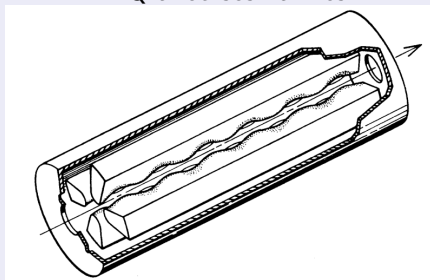
Exemples de CCL



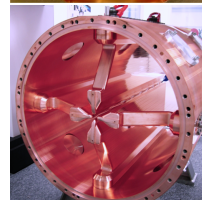
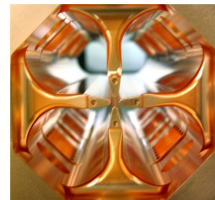
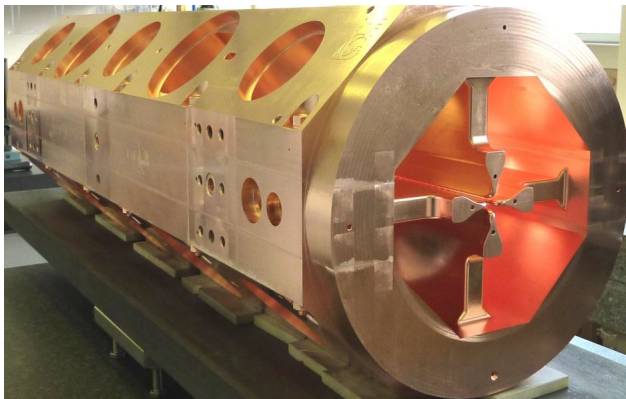
- RFQ : concept inventé en 1970 par Kapchiski et Teplyakov.
- Permet à la fois la **focalisation**, la **mise en paquets** avec un fort taux de capture et l'**accélération** jusque quelques MeV.
- Remplace les Cockroft-Walton comme injecteur.

Principe du RFQ

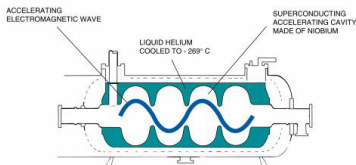
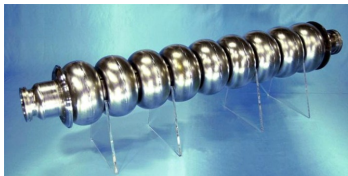
RFQ avec ses vannes



- Tolérances d'usines très strictes (dixièmes de mm).
- Échauffement délicat à maîtriser si fonctionnement en continu.

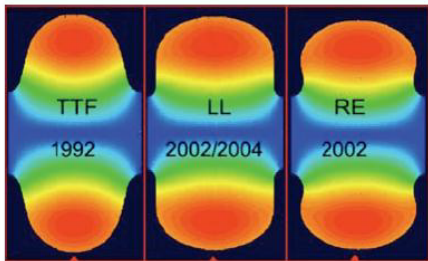


- ☺ **Très faibles pertes dues** à la résistance de surface (très grand facteur de qualité $> 10^9$).
 - Onde stationnaire avec un besoin réduit en puissance crête.
- ☺ **Bon rendement.**
- ☺ Fréquence de fonctionnement “classique” (1.3 GHz).
- ☺ Taille des iris importante.
 - Tolérances mécaniques aisées.
 - Faible champ de sillage.
- ☺ Possibilité de long train de pulses.
 - Correction dynamique possible pendant le train de pulse.

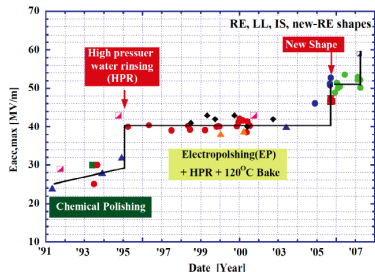


- ☹ Le champ E_{acc} est limité par le champ B_{crit} sinon la cavité transite (perte de la supraconductivité).
 - ⇒ Optimisation de la forme.
 - ⇒ État de surface le plus lisse possible.
- Maximum : ≈ 60 MV/m pour une cavité seule.
- Maximum : ≈ 35 MV/m pour une structure multi-cavités.

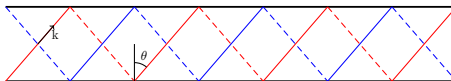
Optimisation de la forme



État de surface

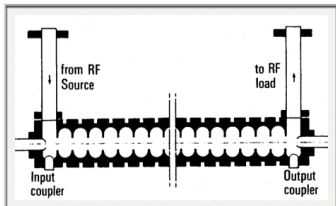


- Pour des faisceaux ultra-relativistes.
- Dans les guides d'onde, la vitesse de phase est supérieure à c , donc a fortiori à la vitesse des particules.



$$v_g = c \sin \theta < c$$
$$v_\varphi = \frac{\omega}{k_{\parallel}} = \frac{c}{\sin \theta} > c$$

- ⇒ On couple l'onde à des structures résonantes.
- ⇒ Vitesse des particules égale vitesse de phase.
- Les électrons voient donc tout le long de la structure une phase accélératrice.



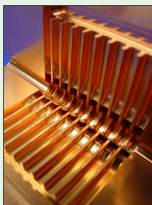
1947 : structure 3 GHz

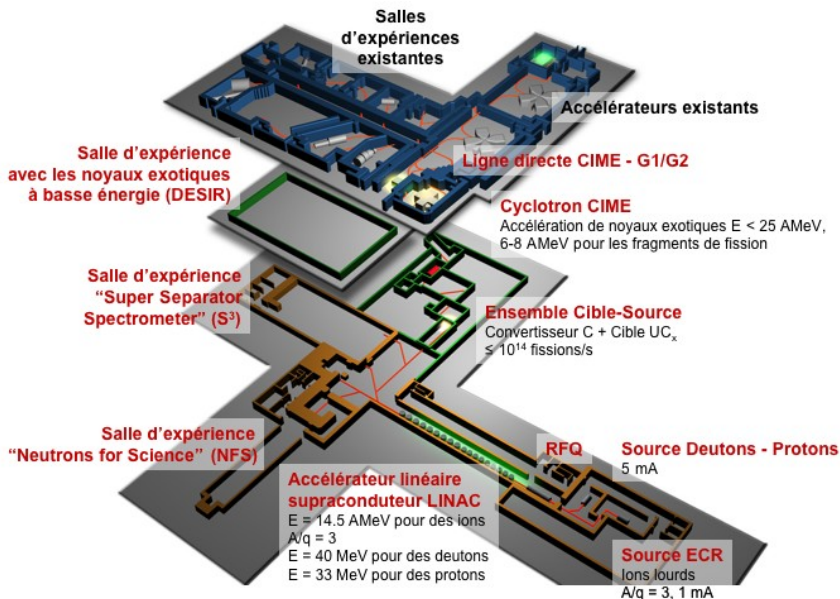


- ☺ Champ E_{acc} limité par les claquages > 100 MV/m.
- ☹ Il faut des fréquences élevées > 10 GHz et des impulsions très courtes $< 1\mu\text{s}$ pour avoir des gradients élevés.
 - ⇒ Fonctionnement en onde progressive ($t_{\text{remplissage}} = \int \frac{dz}{v_g}$).
- ☹ Pertes surfaciques importantes car parois résistives.
 - ⇒ Très forte puissance RF requise.
 - ⇒ Dimensions transverses réduites.
 - ⇒ Usinage plus difficile et Fort champ de sillage.
 - ⇒ Nécessité d'amortir les modes de fréquence plus élevées.

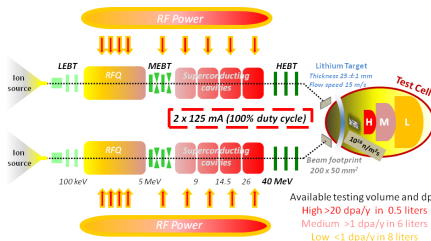
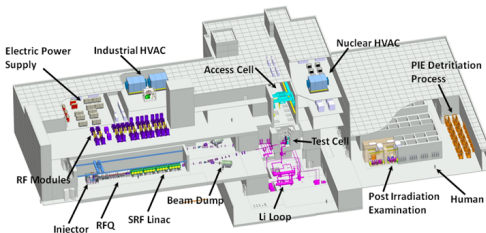
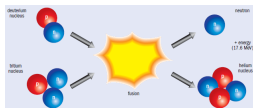
Structure CLIC

- $E_{\text{acc}} \approx 100$ MV/m
- 11.424 GHz
- 29 cm
- pulse de 230 ns
- $P_{\text{crête}} = 55.5$ MW



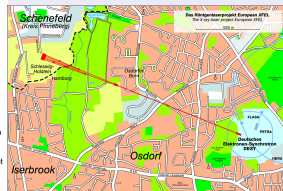
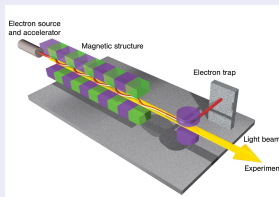


- IFMIF/ EVEDA : usine à neutrons de 14 MeV au Japon pour le test de matériaux pour les réacteurs à fusion.



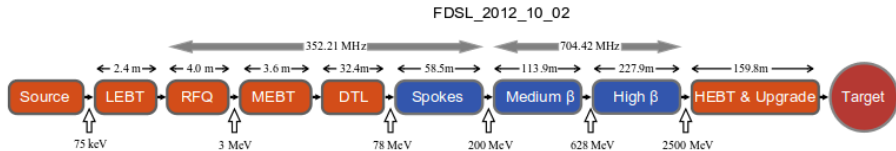
X-FeL en quelques chiffres

- Prévu pour 2017
- 2 km
- 17.5 GeV
- 101 modules
- $\lambda_{\nu} = 0.05 - 6 \text{ nm}$

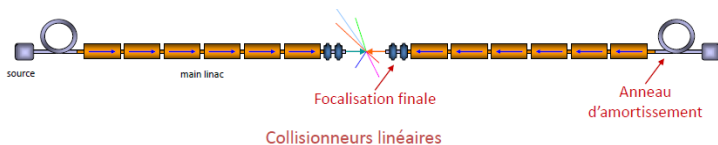


Le cryomodule : 12 mètres de long



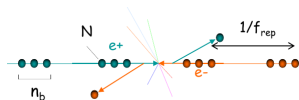


EUROPEAN SPALLATION SOURCE



- Moins de perte par rayonnement synchrotron (dû à la courbure de la trajectoire).
- Énergie acquise en un seul passage.
 - ⇒ Fort gradient d'accélération afin de limiter la taille de la machine.
- Collision unique.
 - ⇒ Faisceau très dense pour obtenir une bonne **luminosité**.

$$\mathcal{L} = \frac{f_{\text{rep}} n_b N^2}{4\pi \sigma_x^* \sigma_y^*}$$



- ⇒ Taille du faisceau très petite (nanomètre!), fréquence de répétition élevée, alignement et stabilité de la machine critiques.
- ⇒ Efficacité énergétique à optimiser.