

Production de faisceaux de particules

Production de faisceaux de particules

- Les sources radioactives

- Nature des particules :

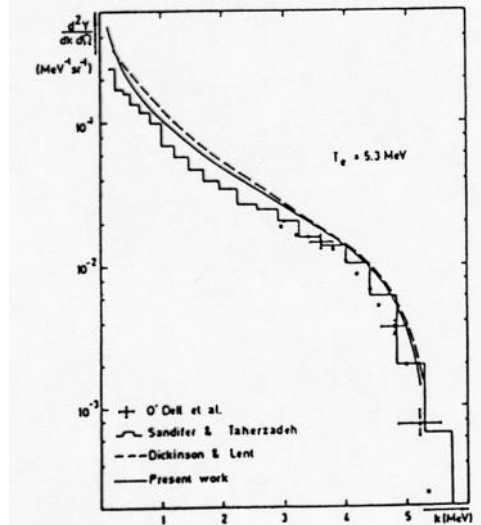
- Alphas
 - Bétas
 - Gammas
 - Neutrons
 - Fragments de fission

- Les faisceaux artificiels non chargés

- On ne sait les créer que par réaction ou interaction

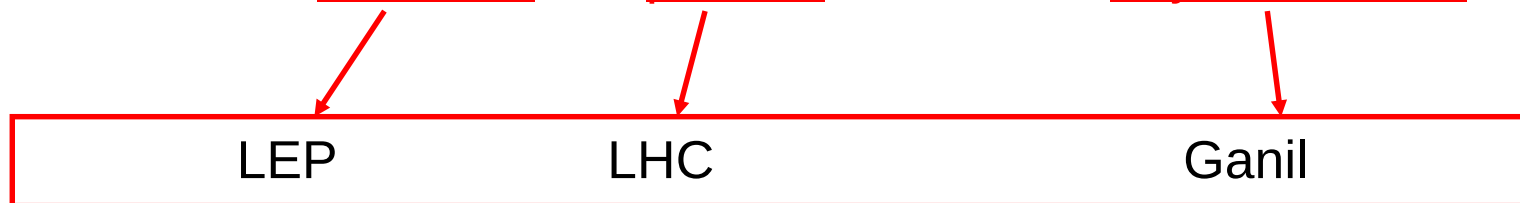
- Exemples:

- **Photons** : faisceaux intenses de haute énergie : rayonnement de freinage
 - **Photons** : faisceaux intenses d'énergie plus faible (domaine des X : keV) : rayonnement synchrotron : *ESRF, Soleil*
 - **Neutrons** : flux intenses de neutrons d'énergie limitée (< MeV) : réacteurs
 - **Neutrons** : faisceaux d'énergie définie produits par réaction (exemple : cassure du deuton : *Spiral 2*)
 - **Neutrinos** : produits par les réacteurs (basse énergie) ou à partir de réactions induites par faisceaux de protons (Cern : *expérience Opéra*)



Production de faisceaux de particules

- Les faisceaux chargés et « tordus »
 - On ne sait les produire qu'à partir de réactions de particules chargées plus simples et donc plus faciles à obtenir
 - Exemples :
 - $p + cible \rightarrow \pi + \dots$
 - $\text{noyau stable} + cible \rightarrow \text{noyau radioactif} + \dots$
- Les faisceaux chargés et non « tordus »
 - Ce sont les électrons, les protons ou tous les noyaux stables



2 éléments :

la source

l'accélérateur

Accélérateurs : Principe numéro 1

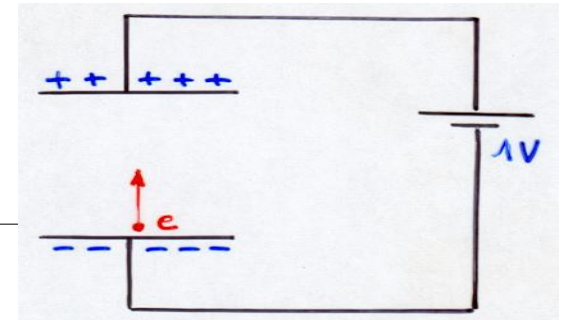
On ne sait accélérer que des particules chargées.

On soumet ces particules à des champs électriques

• Caractéristiques des faisceaux de particules

1) Leur énergie :

eV	keV	MeV	GeV	TeV
	10^3	10^6	10^9	10^{12}

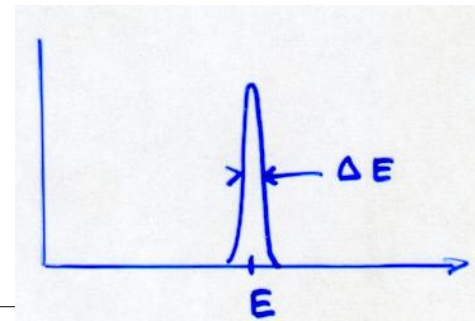


Les grandes énergies ne seront possibles que par une succession d'accélérations

2) La résolution en énergie :

- Ordres de grandeur
 - 10^{-2} (1%) : médiocre
 - 10^{-3} : bon
 - 10^{-4} : excellent

$$\frac{\Delta E}{E}$$



3) Leur intensité :

- Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

- 1 ampère (A) = 1 C/s = $6 \cdot 10^{18} \text{ e/s}$

Si on accélère des:

Électrons : $1 \text{ A} = 6 \cdot 10^{18} \text{ électrons/seconde}$

Protons : $1 \text{ A} = 6 \cdot 10^{18} \text{ protons/seconde}$

Argon 15+: $1 \text{ A} = 6 \cdot 10^{18} / 15 = 4 \cdot 10^{17} \text{ argons/seconde}$

Ces chiffres sont énormes: généralement les intensités des faisceaux s'expriment

en nA ou en μA. Le milliampère est une intensité énorme.

IPHI a pourtant l'ambition d'atteindre 100mA.

• Relation importante

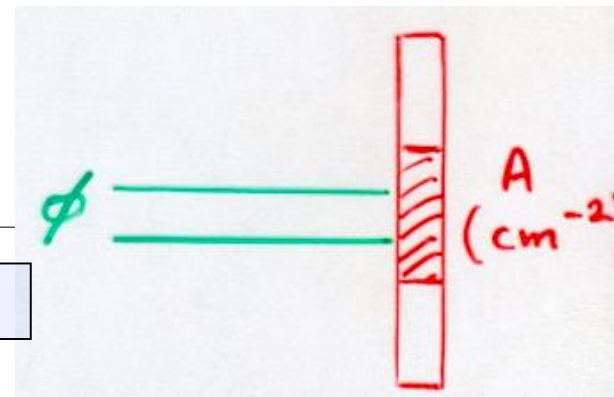
$$n = A \phi \sigma$$

Nb d'év./s

Nb. At. cible/cm²

Flux (part./s)

sect. effic.



Une variante de l'intensité : la luminosité

- notion utile dans les collisionneurs
- collisionneurs : au fait : pourquoi?

pour ne pas gaspiller

$$n = A \phi \sigma$$

$$L = \frac{N^2 f}{S}$$

N : nombre de particules par paquet

S : section

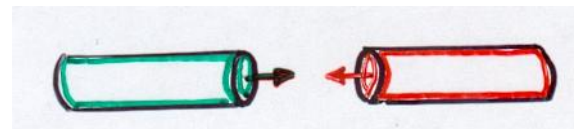
f : nombre de paquets par seconde

$$n = L \sigma$$

Nb d'év.

luminosité

sect. effic. (cm² ou barn = 10⁻²⁴ cm²)



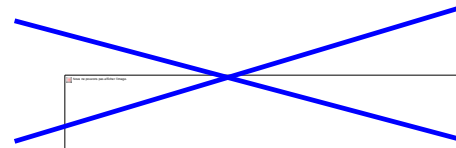
- **Caractéristiques des faisceaux de particules**

- 4) **Leur émittance** :

elle permet de mesurer les qualités géométriques d'un faisceau

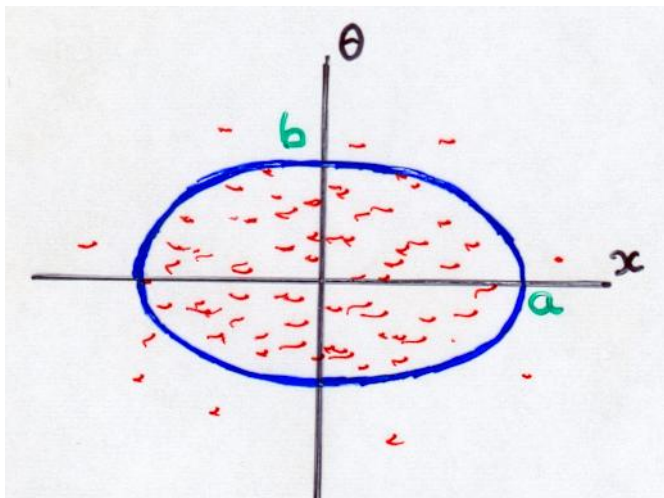
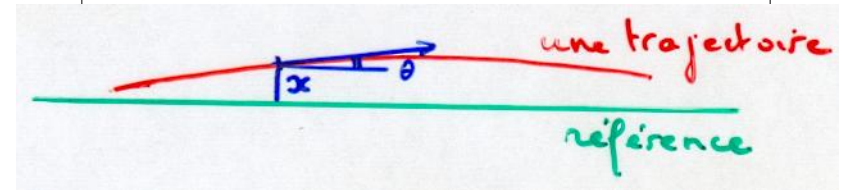


Taille



convergence

Etude plus détaillée à une dimension :



Émittance = $\pi a b$

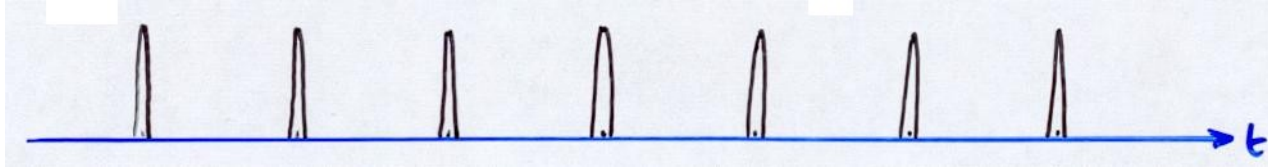
Unité : $\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$

Ordres de grandeur : $10 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$

- **Caractéristiques des faisceaux de particules**

- 5) **Leur structure en temps** :

La plupart des faisceaux sont pulsés



- 3 caractéristiques** :

- fréquence (taux de répétition)

- valeurs typiques : 10 MHz à 100 MHz

- périodes : 100 ns à 10 ns

- largeur des paquets

- valeur typique : 1 ns

- macrostructure (éventuellement)

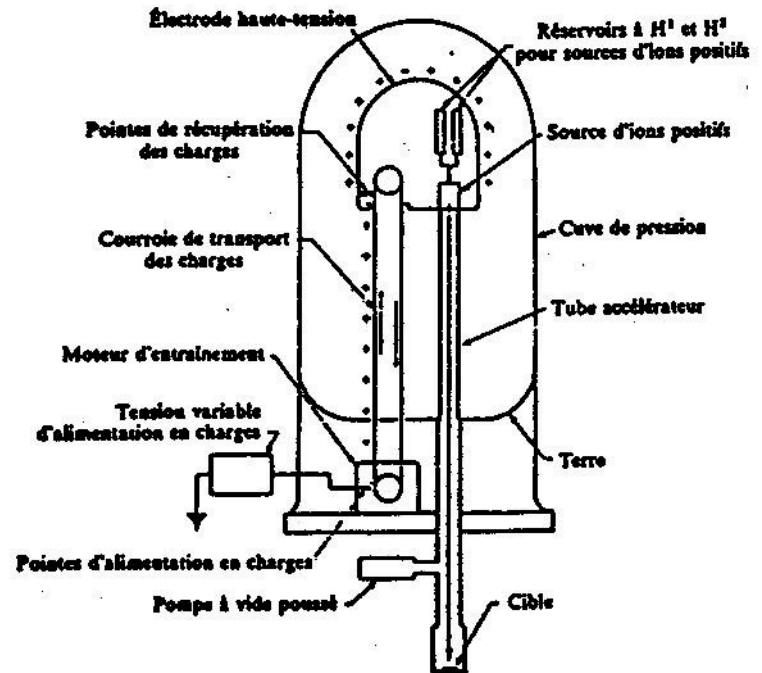
- le faisceau peut être déversé par paquets

- par exemple 1 seconde toutes les 5 secondes*

Tous ces temps dépendent des techniques d'accélération et du fait que les particules soient ou ne soient pas relativistes

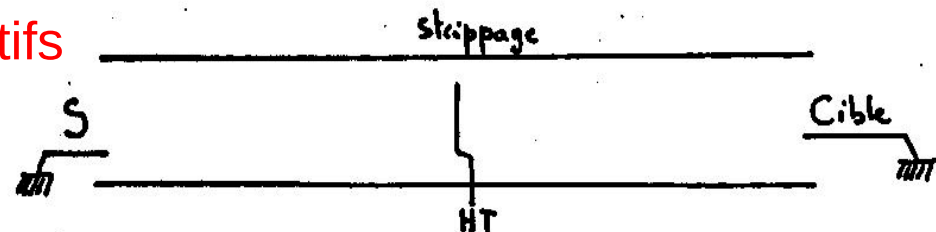
La façon la plus simple d'accélérer : le Van de Graaf

- Avantages
 - E précis ($\Delta E/E \approx 10^{-3}$)
- Inconvénient
 - E limité ($V_{max} = 20 \text{ MV}$)
- Utile pour les noyaux
 - Ex: Van de Graaf de Bordeaux



La variante : le tandem

- Avantages
 - On a gagné en énergie
- Inconvénient
 - Il faut produire des ions négatifs
- Utile pour les noyaux
 - Ex: le tandem d'Orsay



Le cyclotron

- Principe

$$q v B = \frac{m v^2}{\rho}$$

$$\omega = \frac{q B}{m} \text{ indépendant de } v$$

- Accéléérations successives

- utilisation d'une tension alternative

- Avantages

- possibilité d'énergies plus élevées

- Inconvénients

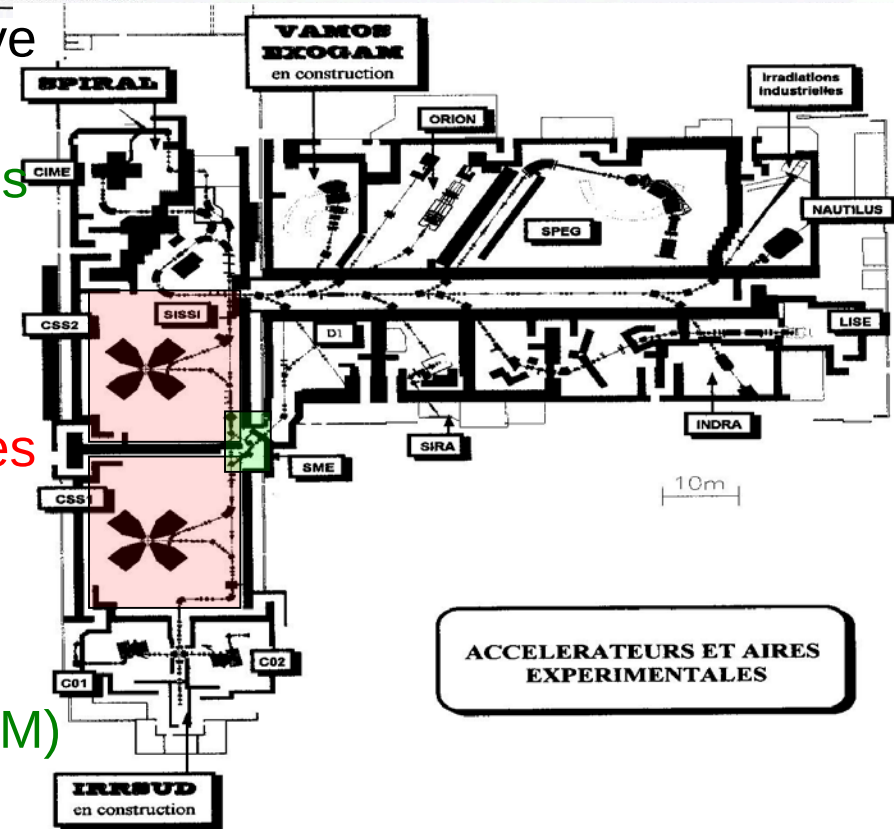
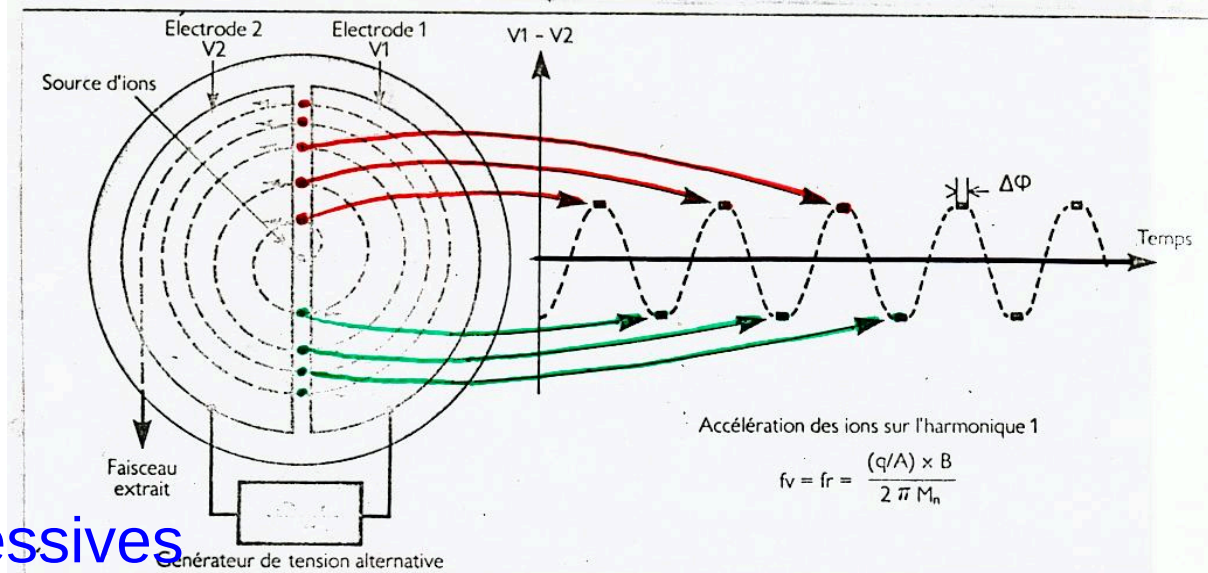
- résolution $\Delta E/E$ médiocre (1%)
- taille pour énergies élevées
- Limitation aux énergies relativistes

- Application principale

- faisceaux d'ions lourds (Ganil)

- Améliorations

- machines supra (taille : MSU, T&M)
- augmentation de l'état de charge



Un prolongement : le synchrocyclotron

- Principe

$$\omega = \frac{q B}{m} \text{ indépendant de } v$$

devient faux pour les énergies relativistes



Nécessité de faire varier ω

- Conséquence :

- Le faisceau a une macrostructure

- Avantage :

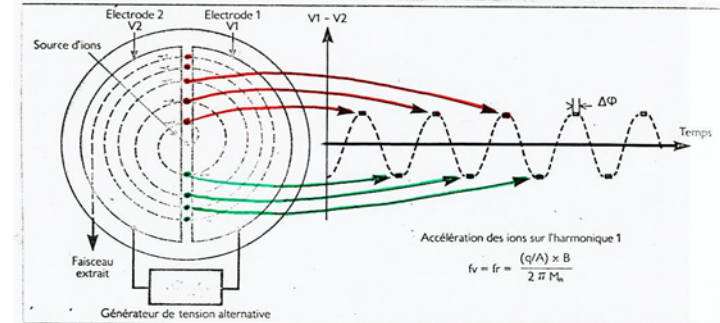
- On monte haut en énergie

- Inconvénient :

- La limitation pour les énergies très élevées
- Masse très grande d'acier

- Exemple :

- Le SC médical d'Orsay; les machines de hadronthérapie (Asclépios)



Le synchrotron

- Objectif :

- Atteindre des énergies très élevées
- ...donc, atteindre des rayons très élevés
- ...tout en limitant la quantité de fer...

- Les moyens pour y parvenir

- Synchroniser

- et la pulsation ω ,
- et le champ B

- Remarque :

- La fréquence peut ne pas être synchronisée pour les électrons pré-accélérés

- Limitations

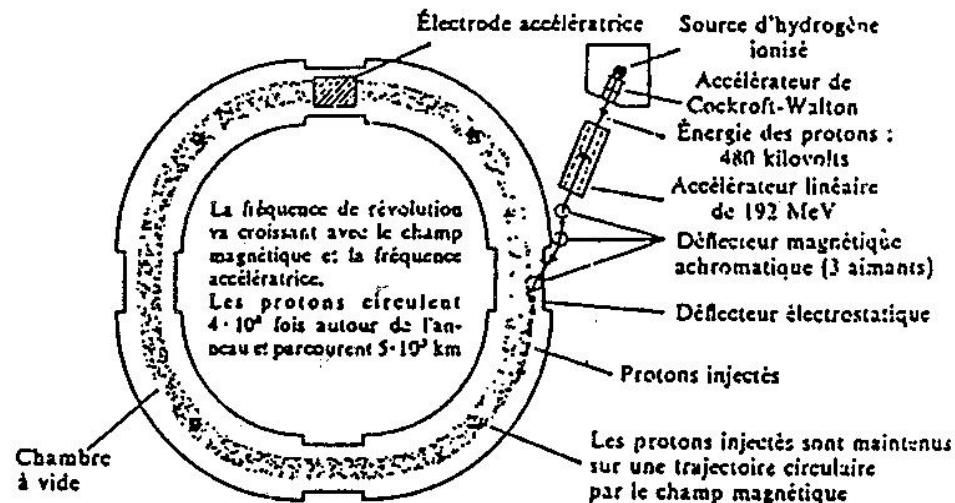
- La taille
- Les valeurs de B
- Le rayonnement synchrotron

- Exemples de machines

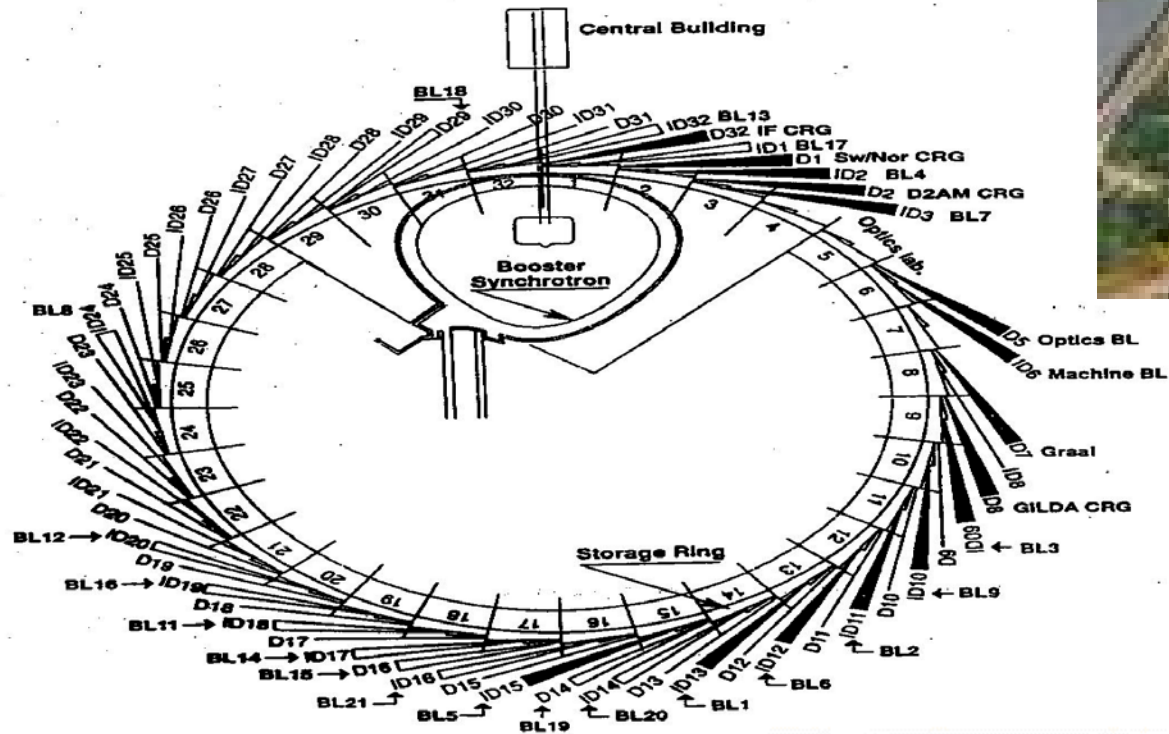
- Lep, LHC, RHIC, ESRF, Soleil

- *Le successeur du LEP se heurtera à la perte due au rayonnement synchrotron : on atteint les limites...*

LE SYNCHROTRON A PROTONS



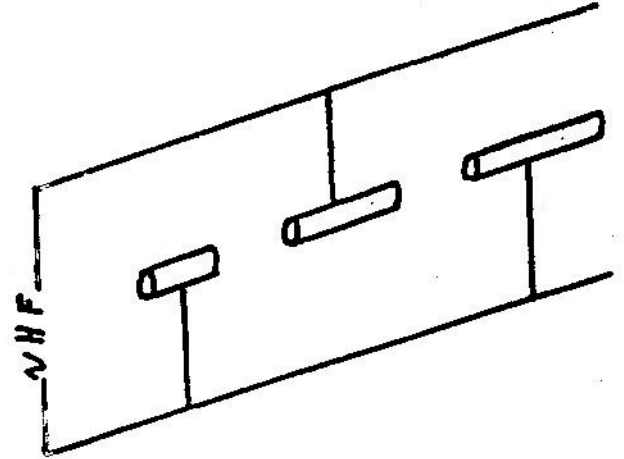
- Quelques exemples



Les accélérateurs linéaires

- Principe :

- Dérouler un cyclotron...
- ...avec des électrodes ou des cavités HF



- Avantages

- Pas de limitation due au rayonnement synchrotron
- Résolution en énergie très bonne
- Bonne qualité de faisceau (émittance)

- Inconvénients dans le cas des collisionneurs

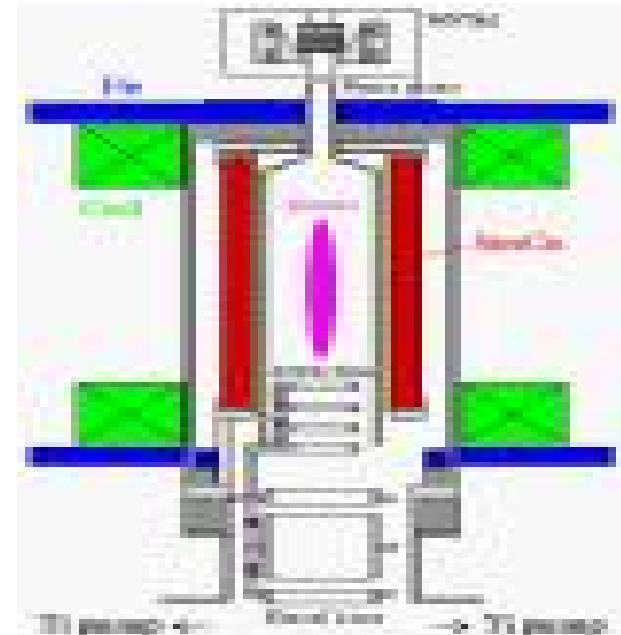
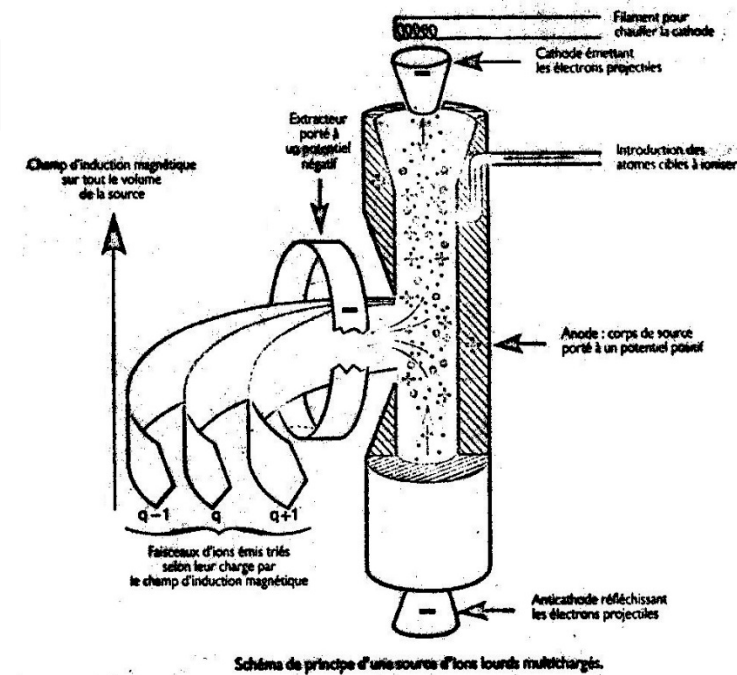
- Une seule collision :
➡ la luminosité doit être énorme (tailles de l'ordre du micron)

- Exemples

- ALTO, (LAL), SLAC, ILC, CLIC

Les sources des accélérateurs

- **Electrons :**
 - Filament chauffé (cf tube télé)
 - **Protons et noyaux :**
 - Nécessité de former un plasma
 - **Source PIG**
 - **Courant d'électrons entre cathode et anticathode**
 - **Inconvénient de la durée de vie**
 - **Source ECR**
 - Principe : celui du cyclotron
- $$\omega = \frac{q B}{m}$$
- **Avantage de la durée de vie**
 - **Avantage des états de charge élevés**



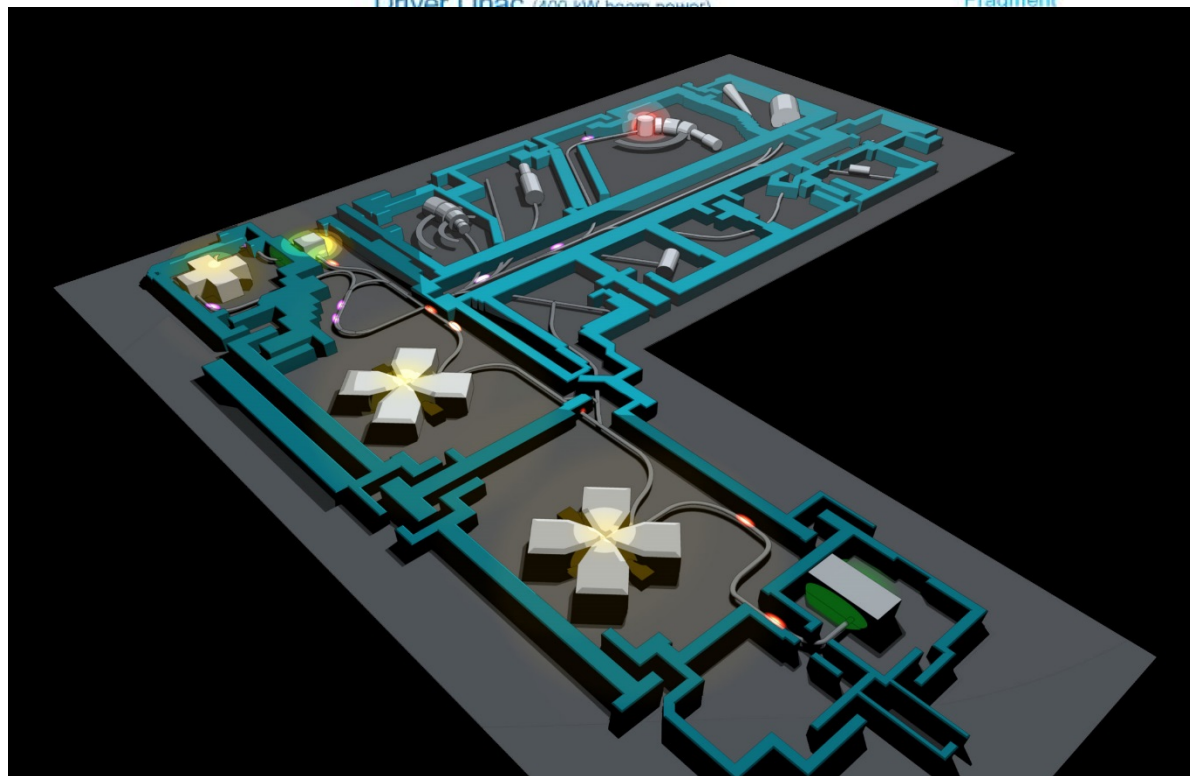
La production de faisceaux radioactifs

- Principe :
 - Accélération d'un faisceau stable
 - Réaction de production
 - Reprise des faisceaux
 - Sans accélération
 - Avec accélération
- Le passé ou existant en France :
 - Sissi
 - Spiral1
- L'avenir :
 - Monter les intensités
 - Produire des faisceaux de plus en plus lourds
 - Projets :
 - Spiral2
 - Eurisol : horizon 202x
 - Fair (Darmstadt) , RIA (Oak Ridge), Riken

Simplified Schematic Layout of the
Rare Isotope Accelerator (RIA) Facility

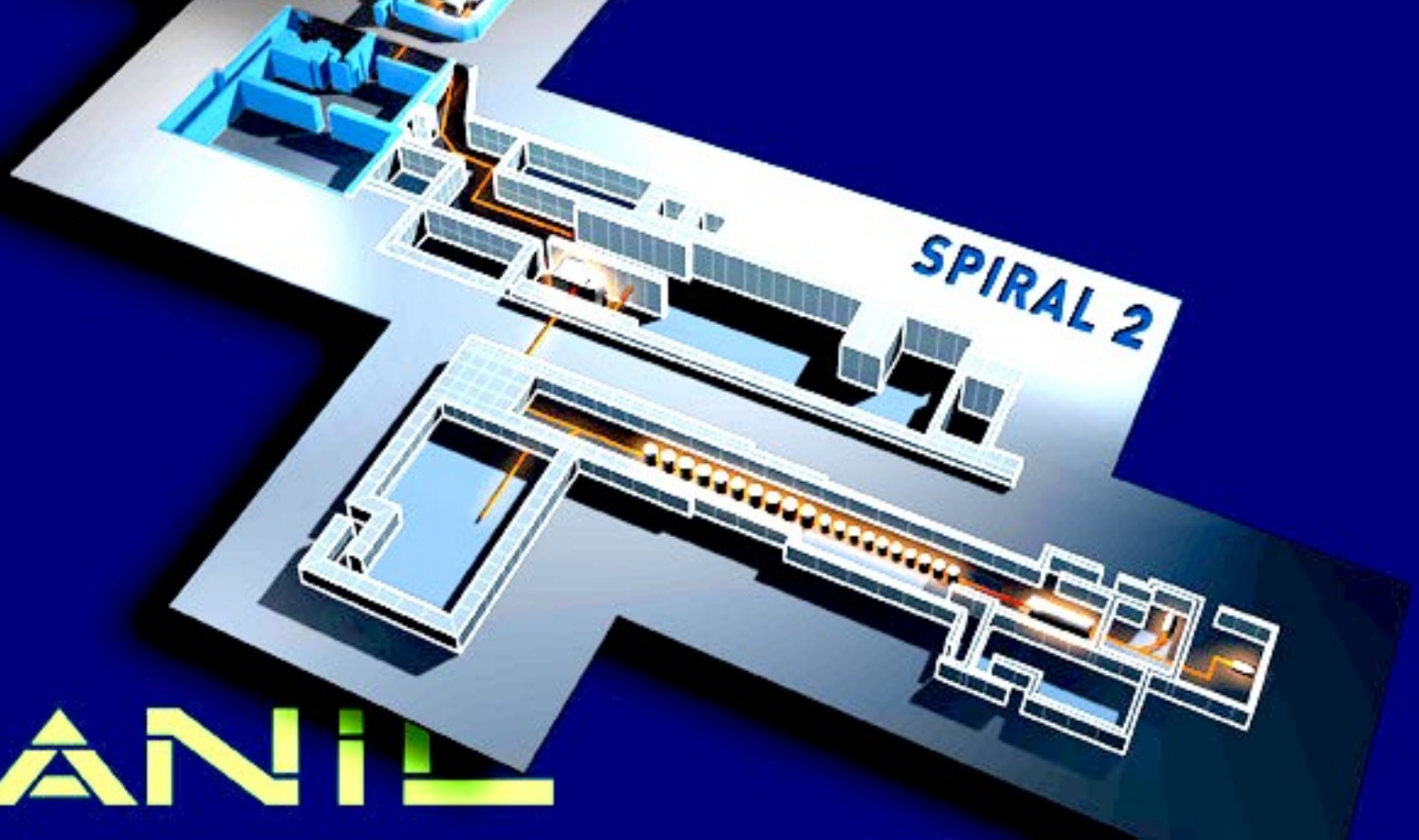
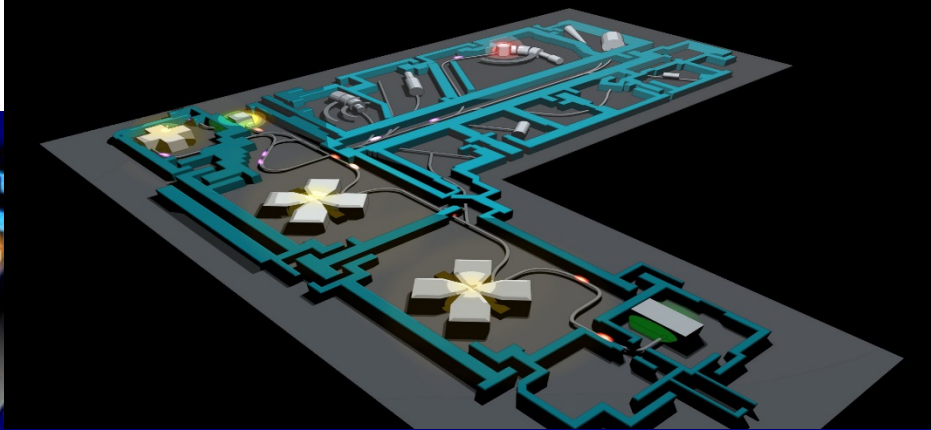
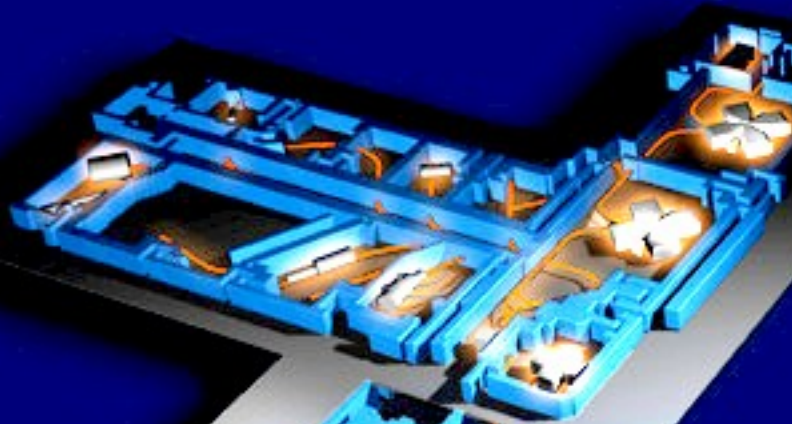
Driver Linac (400 kW beam power)

Fragment

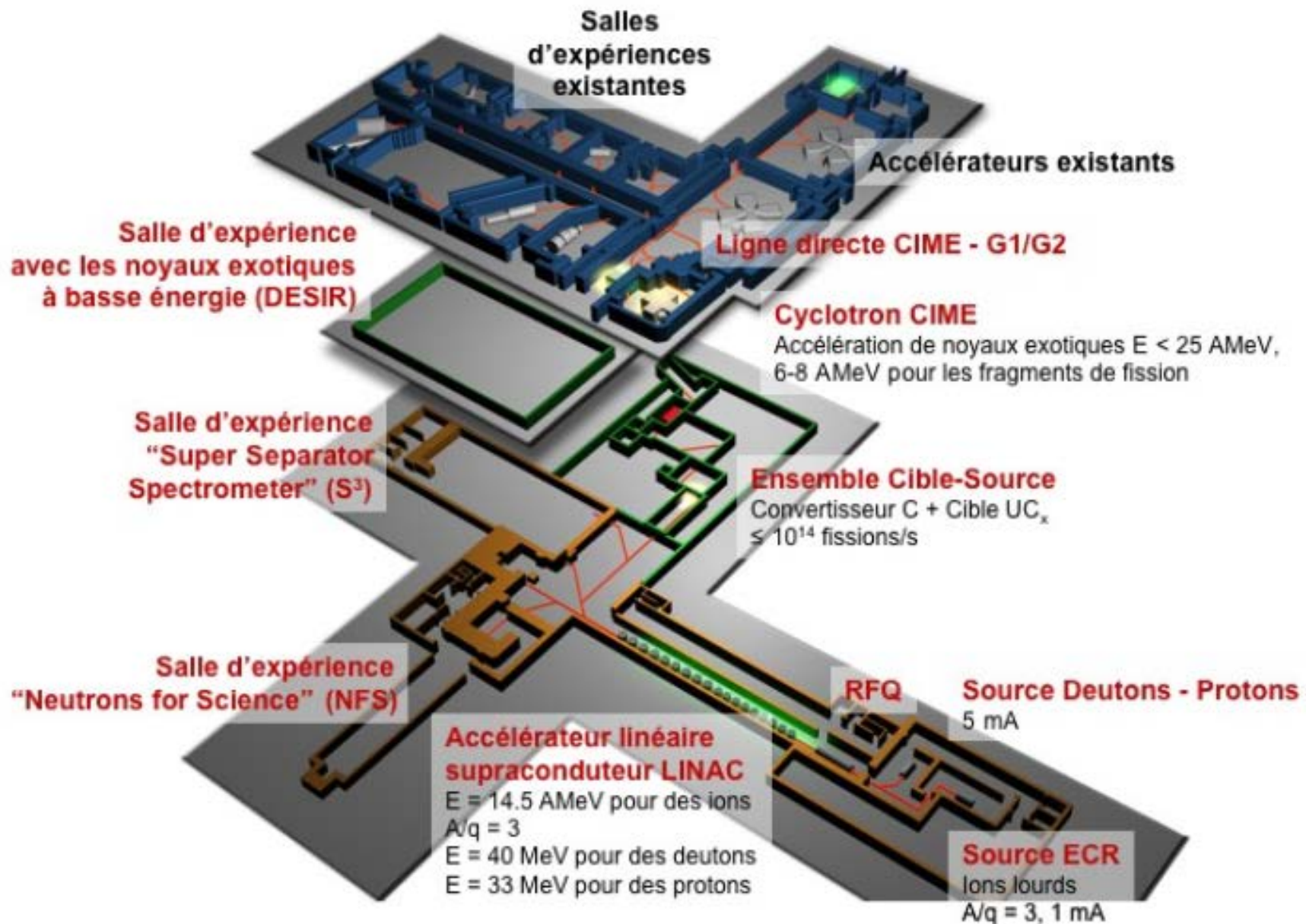


A Advanced National Facility for U nstable and R are I sotope B eams





GANIL



Conclusion

- Les accélérateurs du futur obéissent à 3 objectifs :
 - très hautes énergies d'électrons (TeV): linéaires ou circulaire
 - physique fine du boson de Higgs et des part. super symétriques
 - très hautes intensités (100mA protons 1 GeV)
 - sources de neutrons intenses
 - réacteurs assistés par accélérateurs (ADS)
 - faisceaux radioactifs intenses
 - Eurisol (après Spiral2), FAIR, RIA, Riken
 - les énergies ultimes viennent du cosmos....
 - expériences Auger, Lisa,...

Conclusion

- Le projet de collisionneur du CERN

