

# Profs au **CANiL**





Profs au **GANIL**

# Les accélérateurs de particules

Bertrand Jacquot

14H00-15H30



# Les accélérateurs de particules

## Sommaire

### - Les différents types d'accélérateurs de particules

Accélérateurs Electrostatiques (Source, Van De Graaf)

Accélérateurs Radiofréquence (Linac, Cyclotron, Synchrotron,...)

### - Les concepts

Rigidité magnétique, Energie, relativité restreinte \*

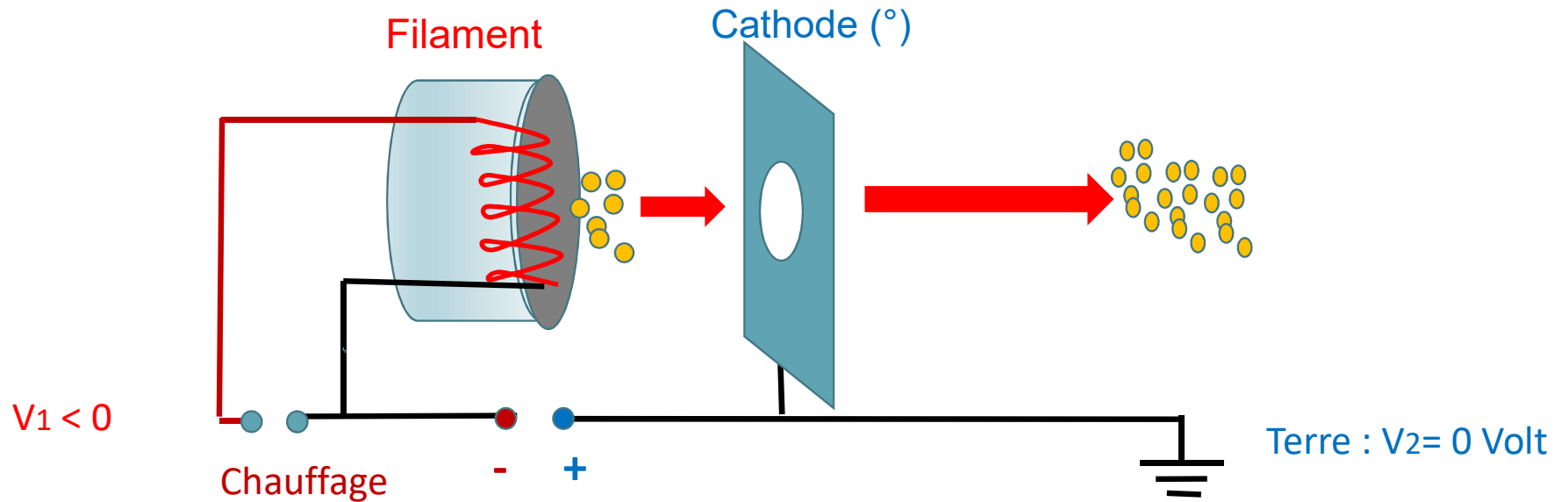
### - Les composants d'un accélérateur de particules

Les quadripôles magnétiques et les dipôles magnétiques

Le spectromètre magnétique

# L'accélérateur le plus simple:

Un accélérateur d'électrons à 10-50keV



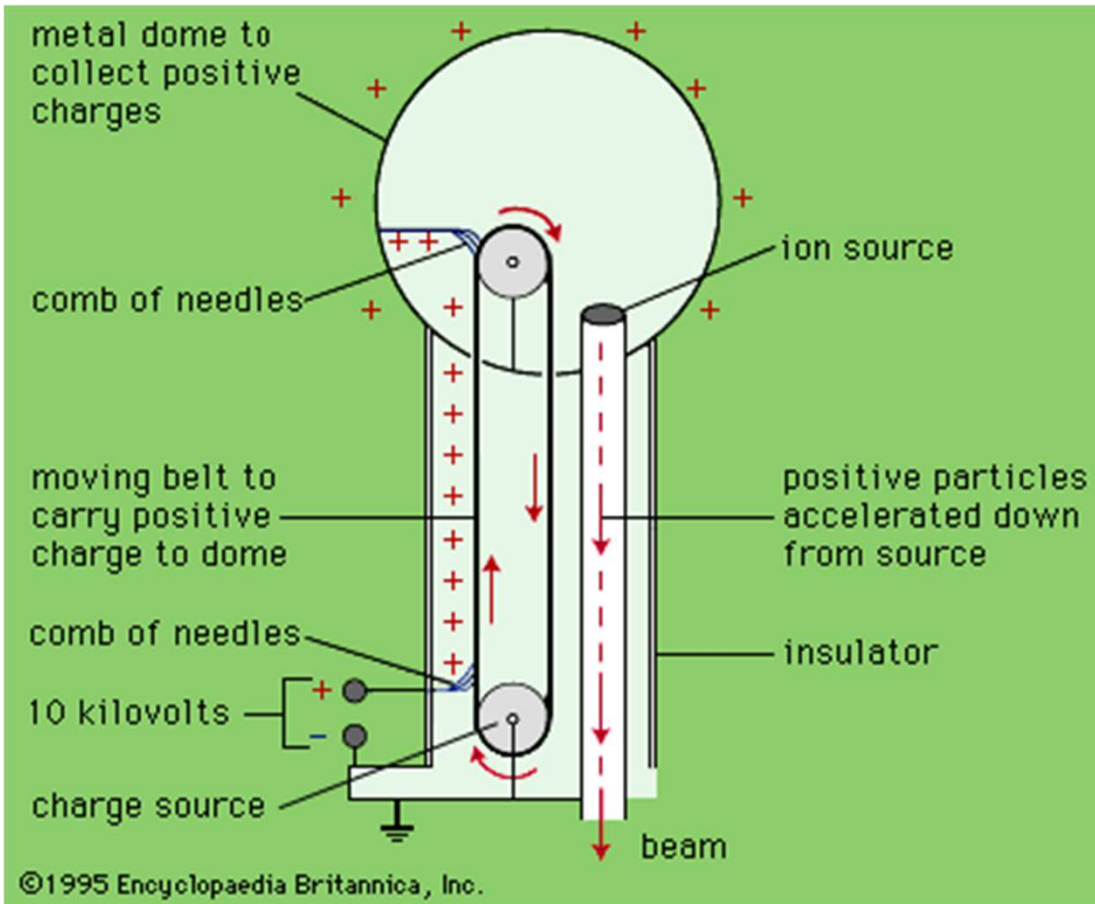
Différence de potentiel (statique) : définit l'énergie des électrons  $E_k = q V = e_0 (V_2 - V_1)$

**ACCELERATEUR ELECTROSTATIQUE : faisceau continu**

**Energie limitée par la tension max V**

# Un accélérateur électrostatique puissant : Le « Van de Graaf »

faisceau continu d'ions (proton, ion lourds) ,  $E_k < 20 \text{ MeV}$



Le Van de Graaf avec un **Champ Electrique Statique**

**DDP** obtenue par frottements d'une courroie avec un peigne polarisé

**V ~ 10 MVolt** peuvent être obtenus

**Isolation** réalisé avec du gaz SF6 (moins de claquage)



# Le Tandem Van de Graf d'ORSAY (Essonne)

15 MégaVolt

Permet d'accélérer des faisceaux d'ions pour la physique nucléaire

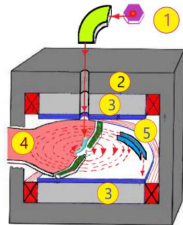


# Les accélérateurs Radio Fréquence

- Principe accélération RF



- Cyclotron



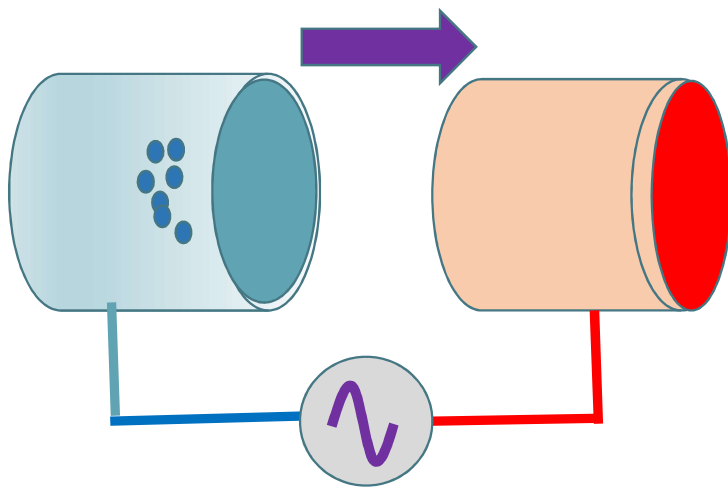
- Synchrotron

- Linac (Spiral2)

# Comment dépasser les limites en énergie des acc. électrostatiques

L'accélération Radio Fréquence :  $V_{RF} = \sin(\omega t)$

2 Tubes creux en cuivre



$V_{RF} = V_0 \sin(\omega t)$   
Tension alternative

- Pas de champ électrique dans les tubes  $E = \text{Grad } V = e_z dV/ds$
- Champ électrique sinusoïdal entre les 2 tubes

Champ électrique  $E = (V_2 - V_1) / d$

Positif  
ou  
Négatif

Accélération  
ou  
Déccélération

- Synchroniser les particules pour obtenir une accélération  
(envoyer les particules chargées au bon moment)



# L'accélération Radio Fréquence: $V_{RF} = V \sin(\omega t)$

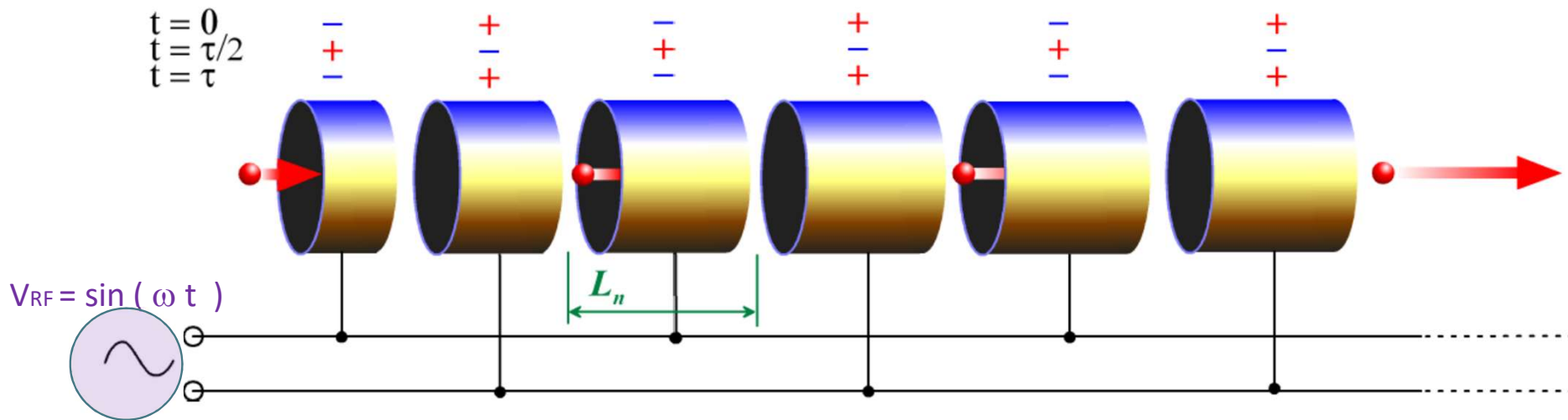
Exemple: accélérateur avec des tubes de polarité opposé :

- Envoyer des particules positives quand le 1<sup>er</sup> tube est négatif (en phase avec la fréquence RF)
- SYNCHRONISATION : les particules mettent toujours le même temps pour traverser un tube

-Construire des tubes de longueurs croissantes:

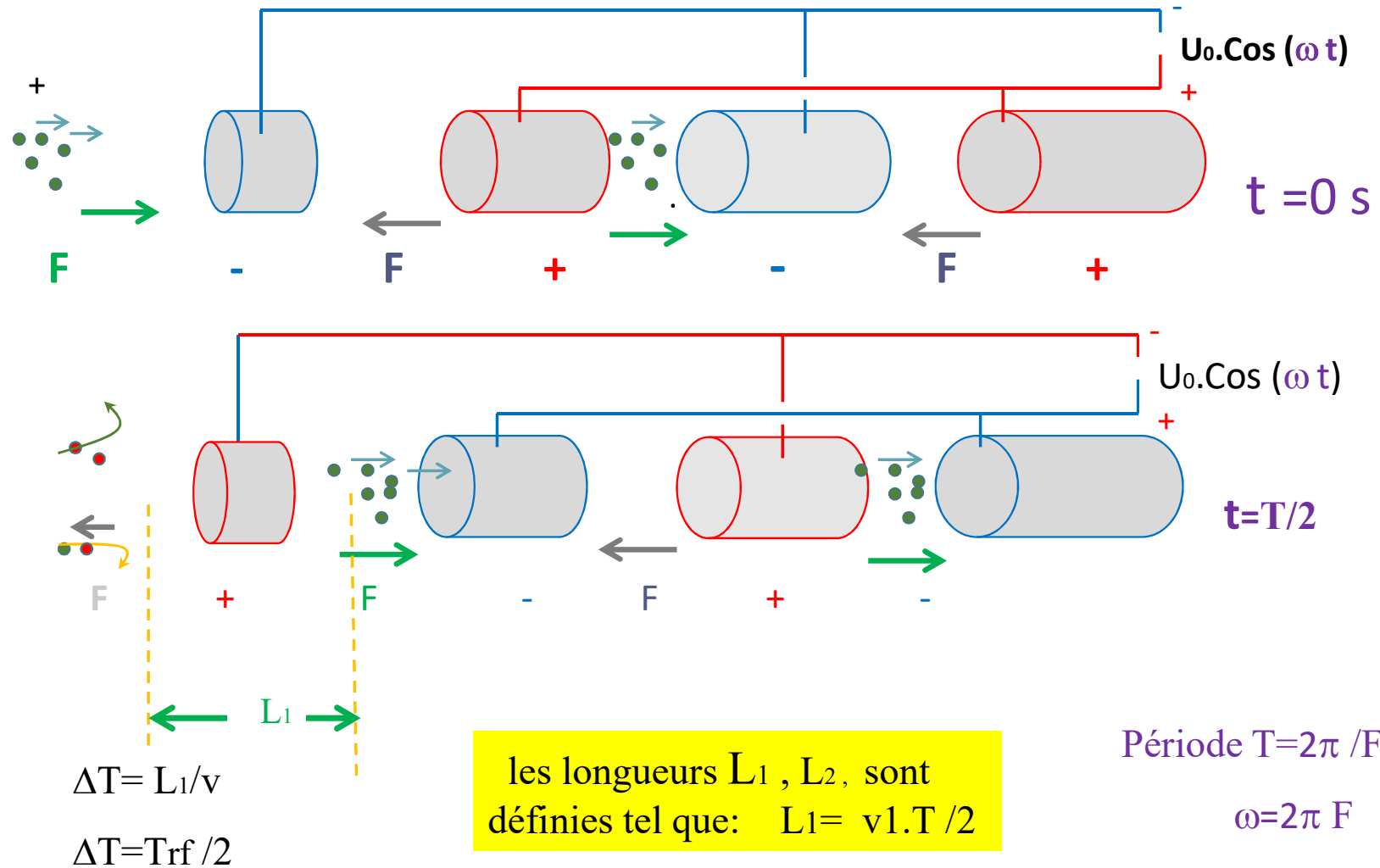
le temps de parcours entre chaque tube correspond à 1 Demi Période :  $T/2$

$$T_2 - T_1 = L / \langle v \rangle = T/2 = 1/2F = \pi / \omega$$



# Accélération de protons avec champs électriques sinusoidaux

## Accélérateur Radio-Fréquence



Un exemple d'accélérateur pour protons avec des tubes  
(recherche en physique)

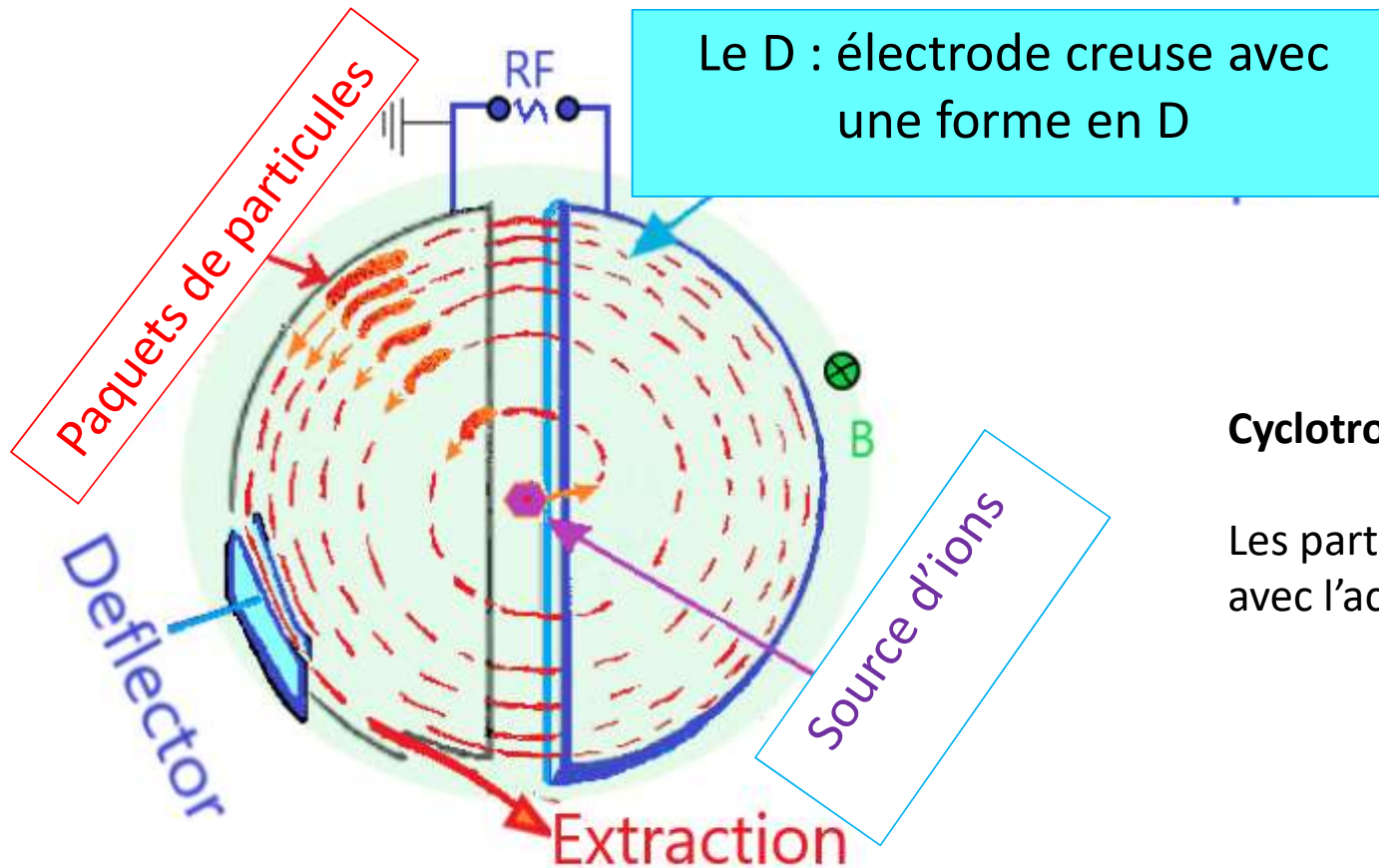
## le Drift Tube Linac



CERN



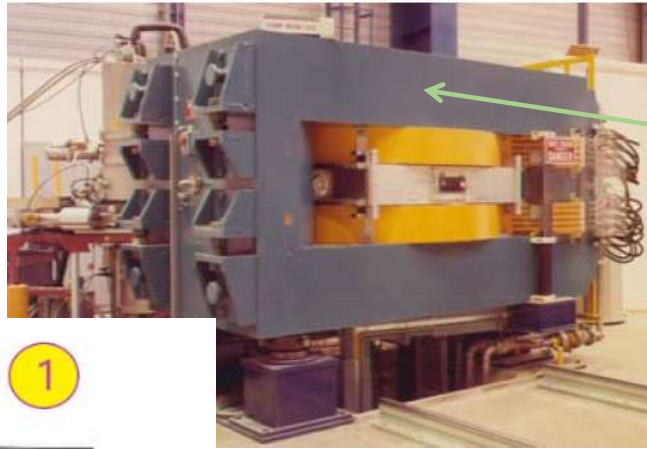
## Le cyclotron : faisceau d'ions, $E_k \ll \text{GeV}$



**Cyclotron = Accélérateur radiofréquence**

Les particules doivent être synchronisées avec l'accélération RF ( le D)

# Le cyclotron : les composants



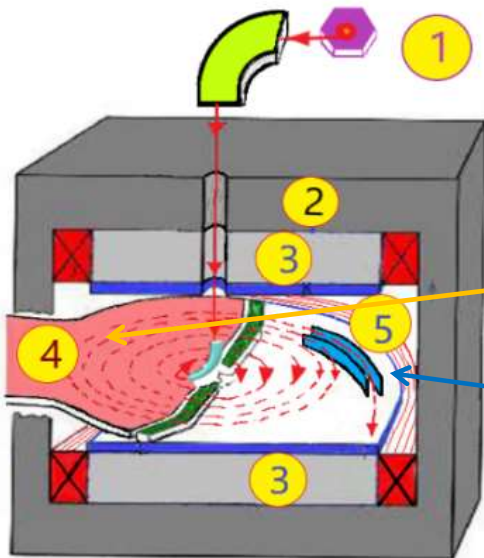
1) source d'ions

Electro-Aimant ( $B_z$ ):

2) Culasse

2) Poles

3) Bobines



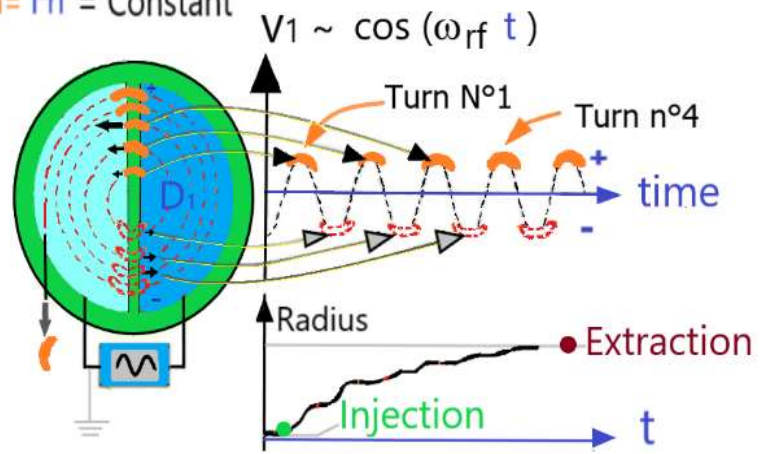
4) Cavité résonnante  
radio fréquence

Le D

5) Déflecteur Electrostatique

# Le cyclotron : comment synchroniser l'accélération RF

$F_{revolution} = F_{rf} = \text{Constant}$



Equation dans le champ magnétique  $B_z$  (non relativiste)

Coordonnées cylindriques  $(e_r, e_z, e_\theta)$

$$F = q (v \times B) = q (v_\theta \cdot B_z) \cdot e_r$$

$$\frac{dp}{dt} = m \frac{dv}{dt} = q (v_\theta \cdot B_z) \cdot e_r$$

$$\frac{dv}{dt} = \left( \frac{\|v\|^2}{R} \right) \cdot e_r$$

$$R = m v_\theta / q B_z$$

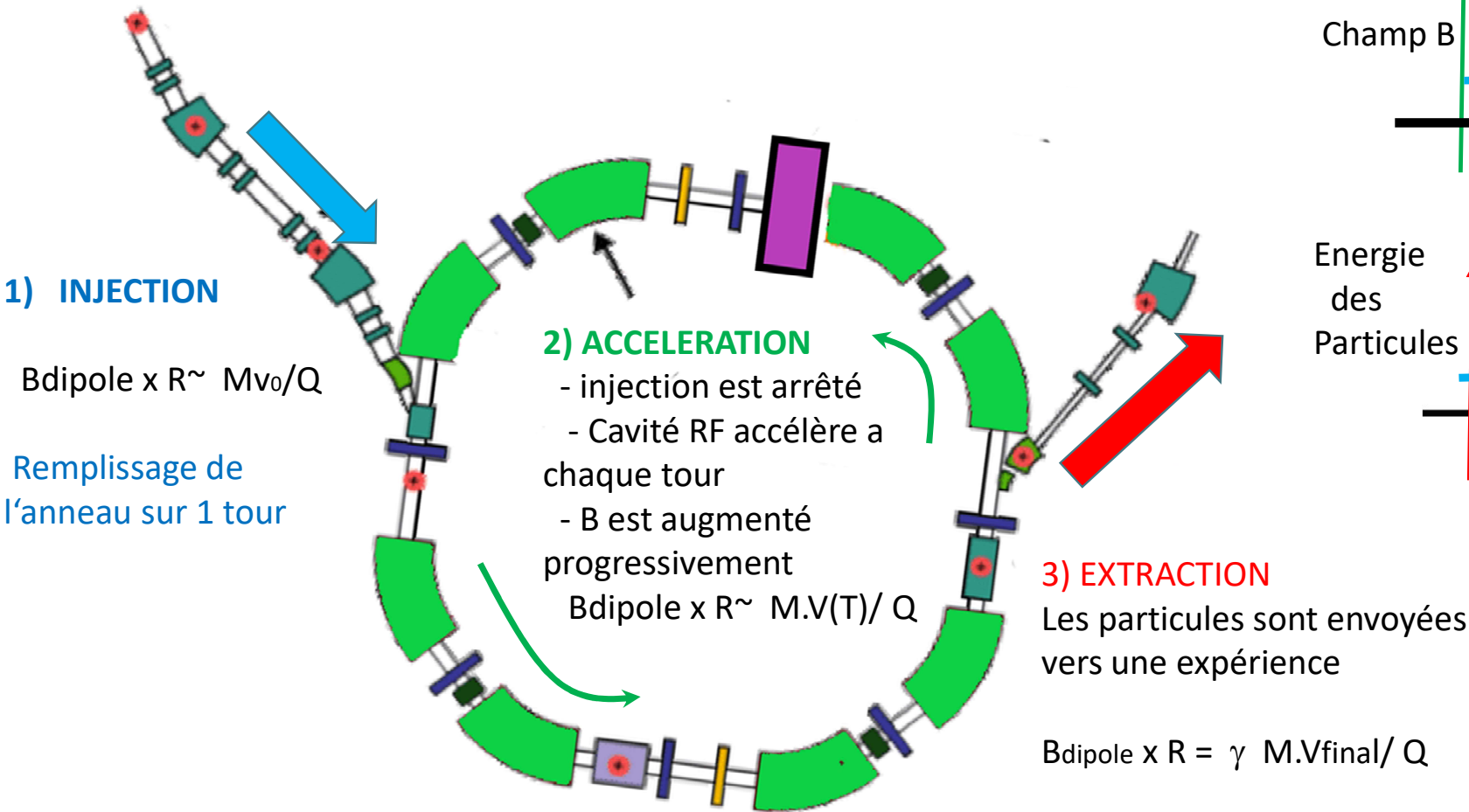
$$F_{revolution} = \frac{v}{2\pi R} = \frac{q B_z}{2\pi m}$$

Comment synchroniser avec l'accélération RF ?

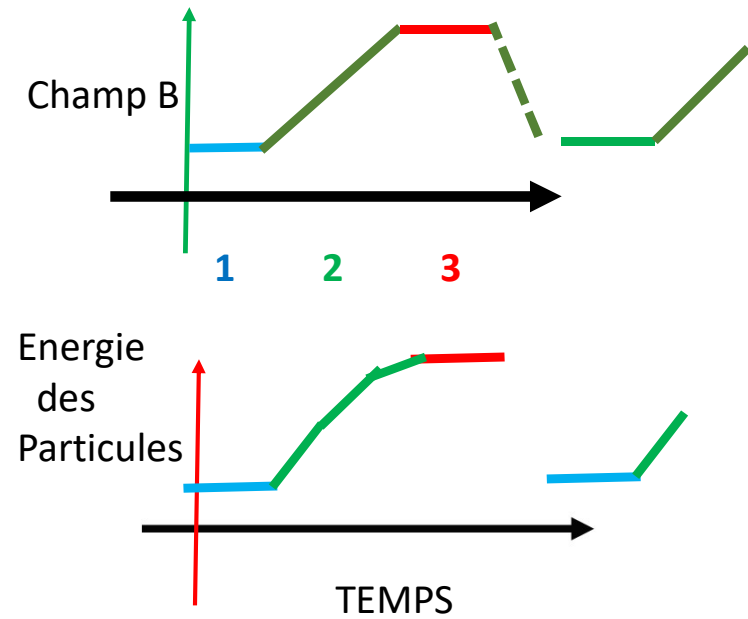
$F_{RF}$  = multiple de la fréquence de révolution

$$F_{RF} = H \cdot F_{revolution}$$

# Le synchrotron : faisceau « pulsé », à très haute énergie



Cycles du synchrotron



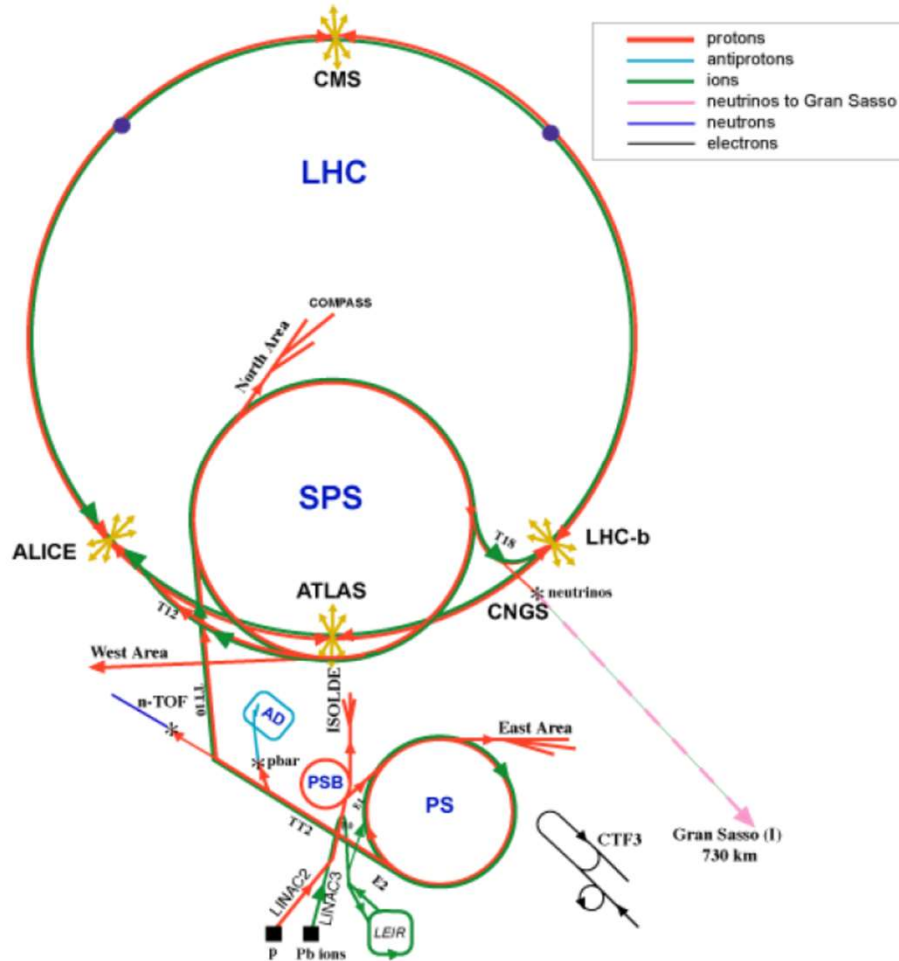
# Le CERN:

## Une cascade de 4 synchrotrons pour atteindre une énergie de $E_k=7 \text{ TeV}^*$

- Source de Protons
- RFQ : Quadripôle Radio Fréquence
- Linac
- Synchrotron N°1 PSBooster
- Synchrotron N°2 PS C=628m
- Synchrotron N°3 SPS C=7km
- Synchrotron N°4 LHC C=27km

$\text{TeV}^* = \text{Tera electronVolt} = 10^{12}$   
 $\text{GeV} = \text{Giga electronVolt} = 10^9$

Dans le LHC Vitesse d'injection = 99,9997% de c  $E_k=400 \text{ GeV}$   
 Vitesse finale = 99,999999% de c  $E_k=7000 \text{ GeV}=7\text{TeV}$

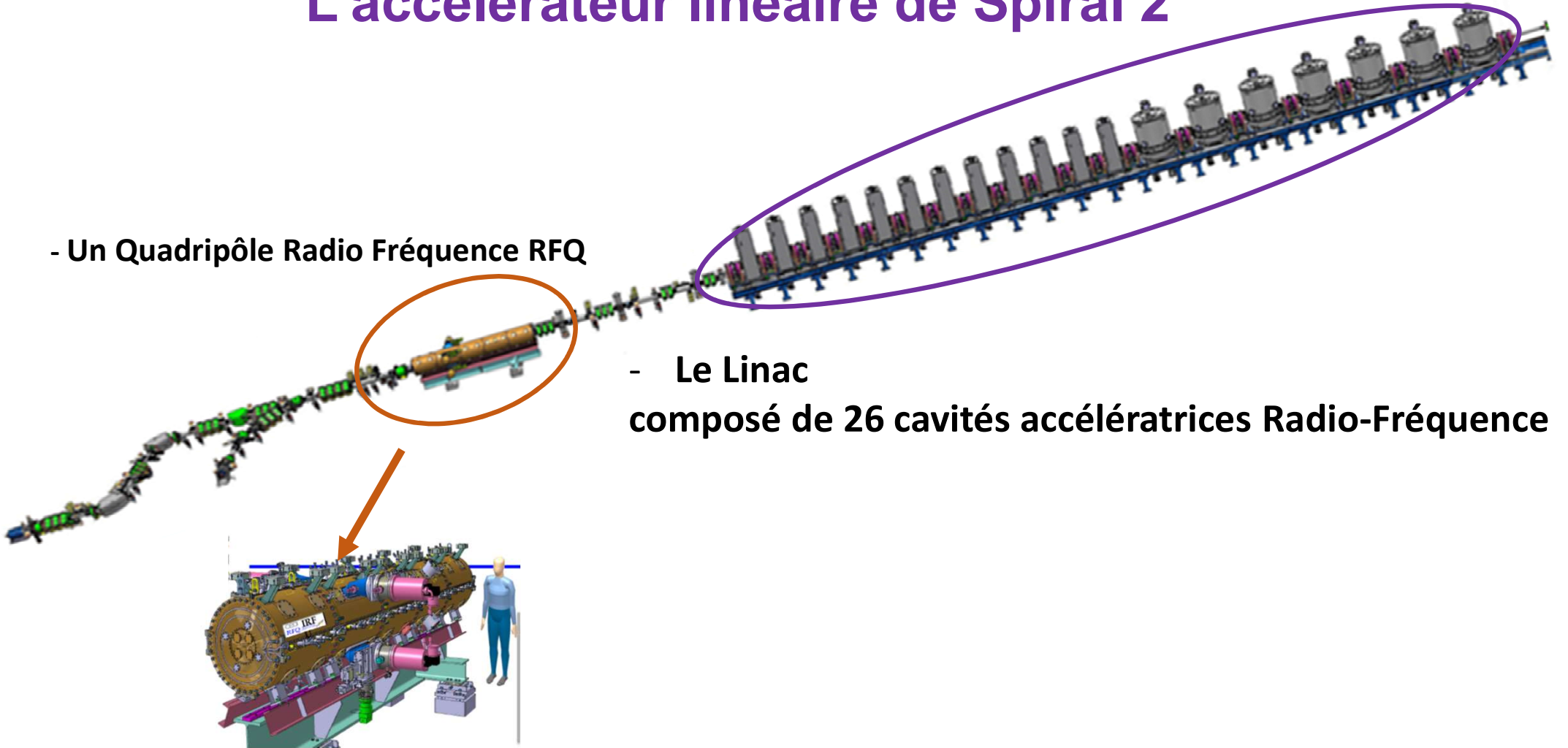


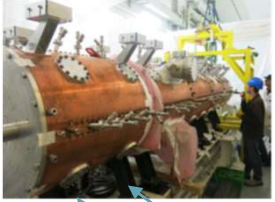


# L'accélérateur linéaire de Spiral 2

- Un Quadripôle Radio Fréquence RFQ

- Le Linac  
composé de 26 cavités accélératrices Radio-Fréquence

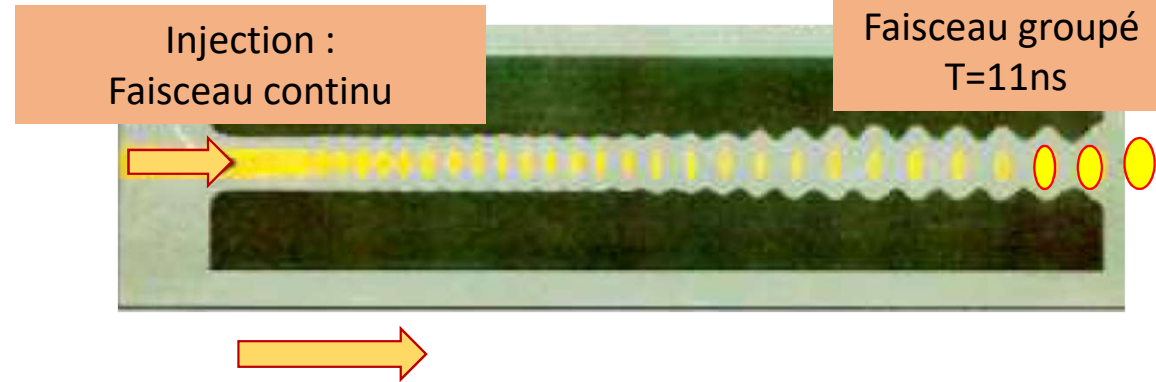
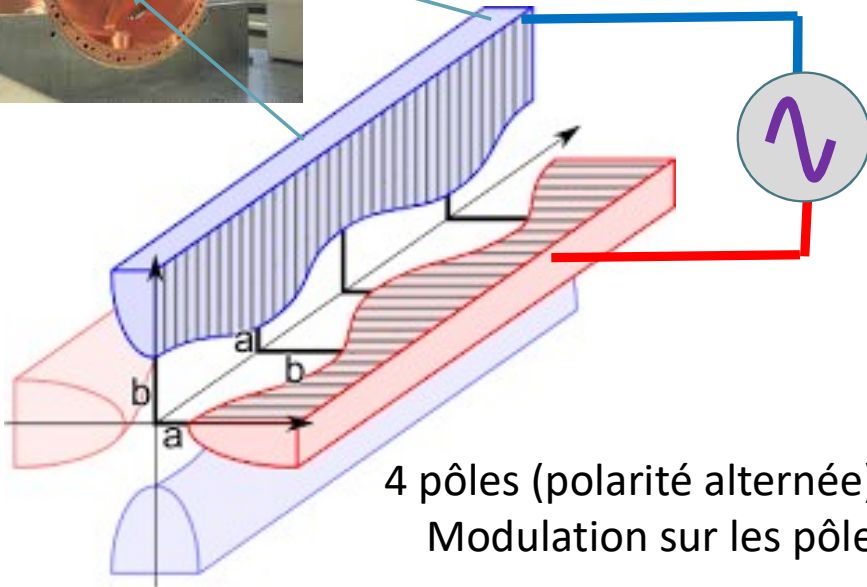
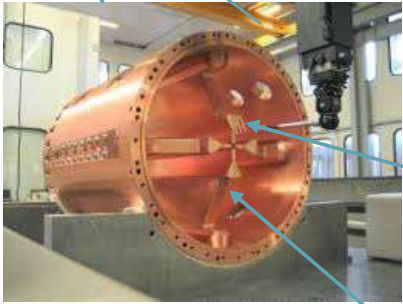




# Le RFQ du linac de Spiral 2

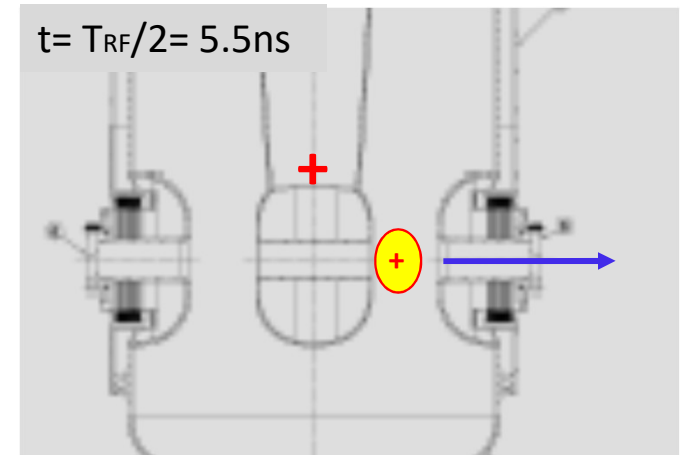
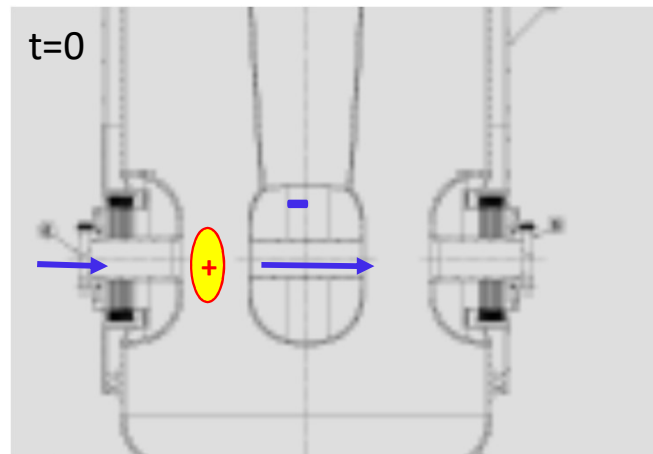
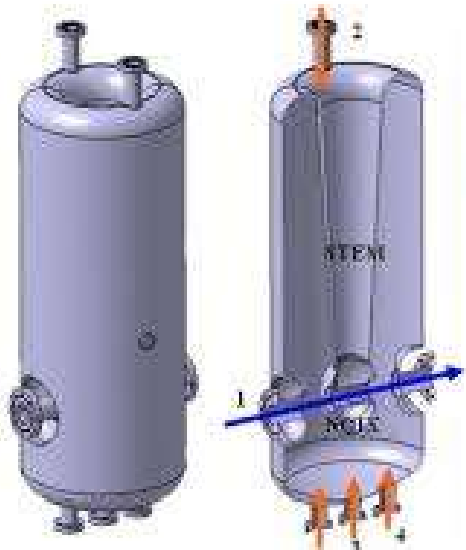
Profs au **GANIL**

- Un Quadripôle Radio Fréquence RFQ ( $F=88\text{MHz}$ )  
Accélère les particules  
Focalise les particules  
Groupe (idéal pour la synchronisation// accélération dans le linac)



## Les cavités du Linac de Spiral 2

- Des cavités supraconductrices résonnantes ( $F=88\text{MHz}$ )  
Accélèrent les particules groupées par le RFQ



-2 zones d'accélération avec un champ électrique

Une électrode creuse sans champ électrique ou circulent les particules

- Les Parois de la cavité **en supraconducteur** (nobium refroidi à  $T=4$  Kelvins)

diminue les pertes de puissance (effet Joule) :  $P_{\text{pertes}} = R I^2$  avec  $R \sim 0$

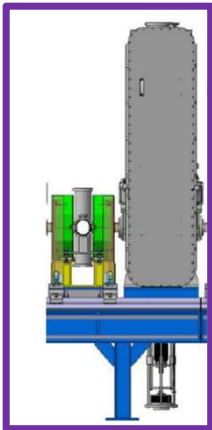
- Le volume de la cavité conçu pour résonner à la fréquence RF:  $F_{\text{excitation}} = F_{\text{propre}}$   
réduit la puissance requise



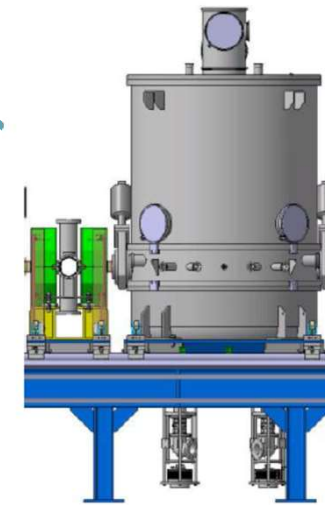
# Linac Spiral2

2 modèles de cavités accélératrices  
basse vitesse et haute vitesse

Profs au **GANIL**



Géométrie optimale pour  $\beta=v/c=0.07$   
7% de vitesse de la lumière



Optimale pour  $\beta=v/c=0.12$

# Accélérateur Radio fréquence **versus** Electrostatique

## Accélérateur Radio fréquence

$$E \sim \sin(\omega t)$$

Faisceau en paquet: synchronisation requise

Addition d'une multitude d'accélération

Avec des cavités accélératrices résonantes

Presque pas de limite en énergie

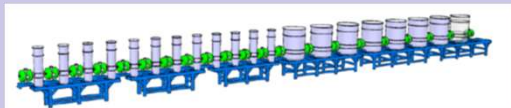
## Utilisation

CYCLOTRONS

LINAC

SYNCRHOTRONS

...



## Accélérateur Electrostatique

Champ électrique statique

Faisceau continu

Très haute tension requise (limite )

limite en énergie (claquage)

## Utilisation

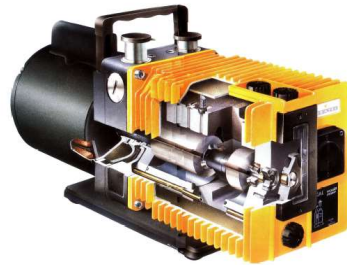
Pré-accélération (source)

Van de Graaf

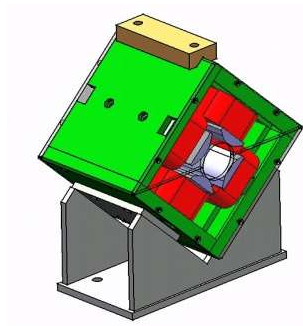
Tandem Van de Graaf

# Les composants d'un accélérateur de particules

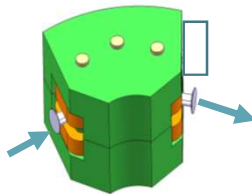
Les pompes à vide



Les quadripôles magnétiques



Les dipôles magnétiques



...Cavités accélératrices RF, ...sources de particules chargées, cryogénie (supra...)

# Le vide dans un accélérateur de particule

Objectif : réduire les interactions des particules accélérée avec les atomes de l'air

Pression résiduelle requise dans un accélérateur : de  $10^{-9}$  à  $10^{-13}$  bar suivant le type d'accélérateur  
Technologies : Pompes, Analyseurs de gaz, vanne d'isolement, Jauges de pression

## TECHNOLOGIES DU VIDE

**Pompes primaires (200)**

A Huile	Sèches	
 Pascal 2015 (Alcatel)	 XDS35 (Edwards)	 BA100 (Busch)
 Duo M10 (Pfeiffer)	 ACP120 (Pfeiffer)	

**Pompes secondaires (200)**

Cryogénique	Turbomoléculaire
 CT8 (brooks)	 V750 (Agilent)
 Coolvac (Leybold)	 STP603 Edwards (Agilent)

**Analyseurs (20)**

 Microvision (MKS)	 Prisma (MKS)
-----------------------	------------------

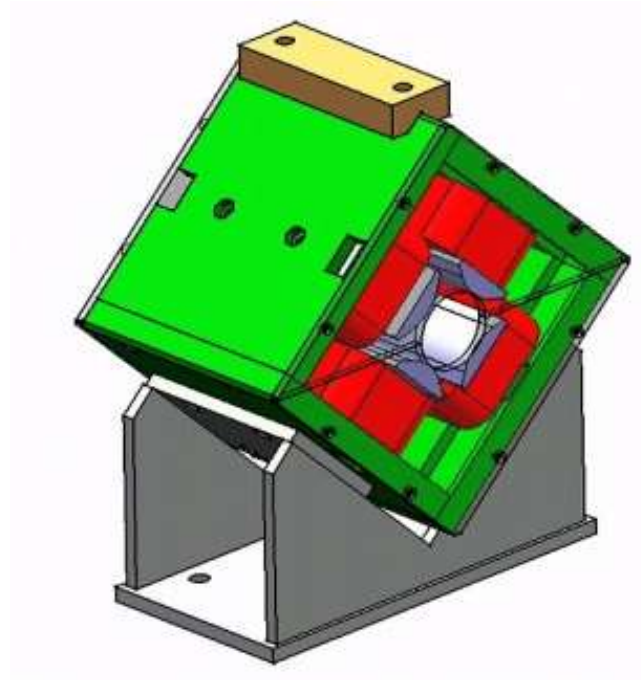
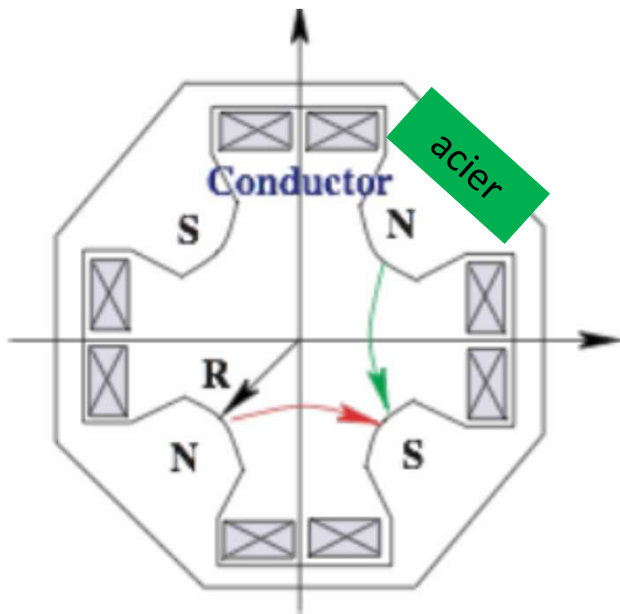
**Vannes (600)**

 tiroir série 10 (VAT)	 Équerre, série 26 (VAT)
 Vannes rapides, série 75 (VAT)	

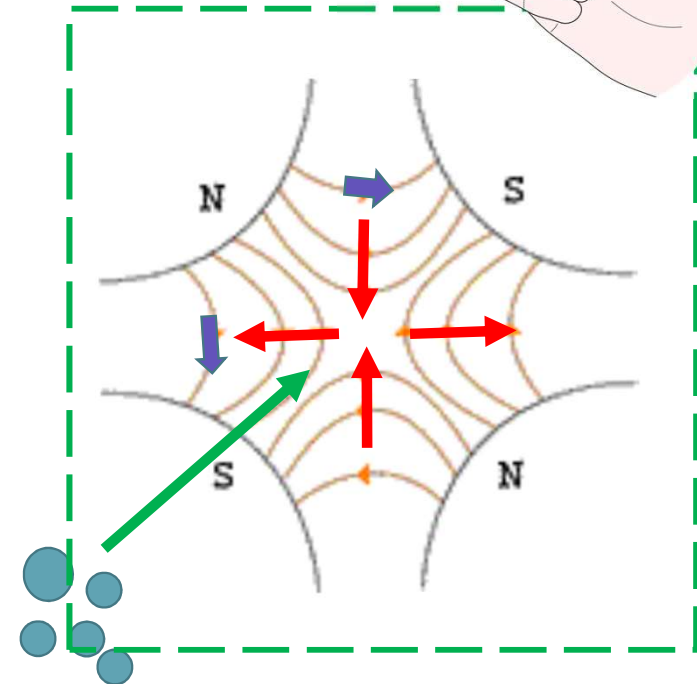
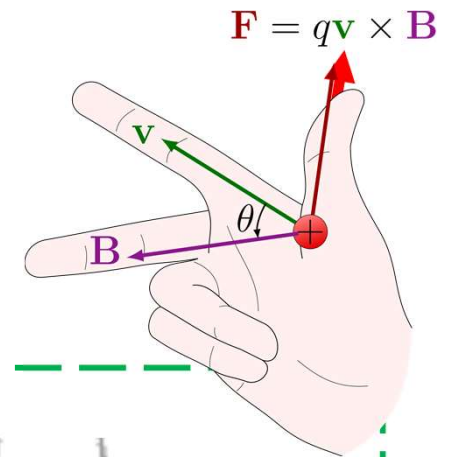
**Jauges (600)**

Primaires		
 TPR10 (pfeiffer)	 PI2 (Alcatel)	
Secondaires		
 422 (MKS)	 Bayard Alpert (SVT)	 PBR260 (pfeiffer)
Controlleurs		
 TPG 300 (Pfeiffer)	 937 (MKS)	

# Les quadripôles magnétiques focalisation et défocalisation



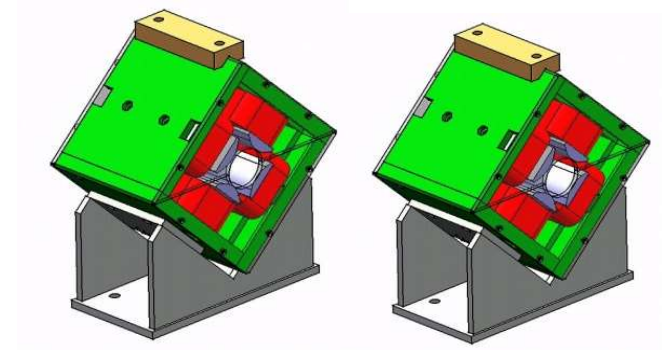
$B_x = G \cdot Y$  champ horizontal  
 $B_y = -G \cdot X$  champ vertical  
 $B_z = 0$



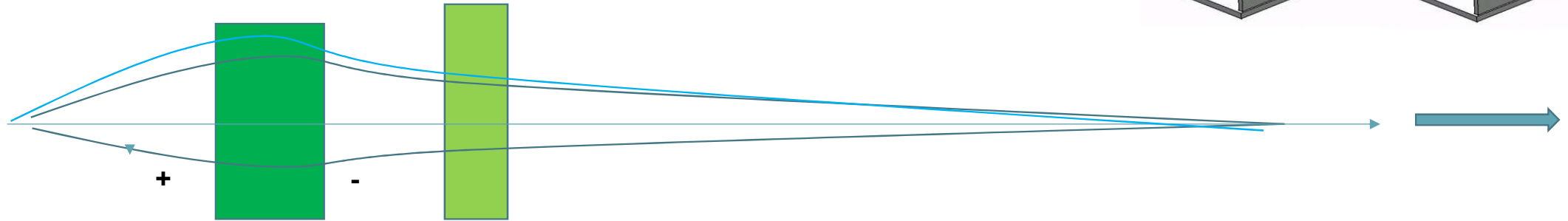
Forces dans un quadripôle



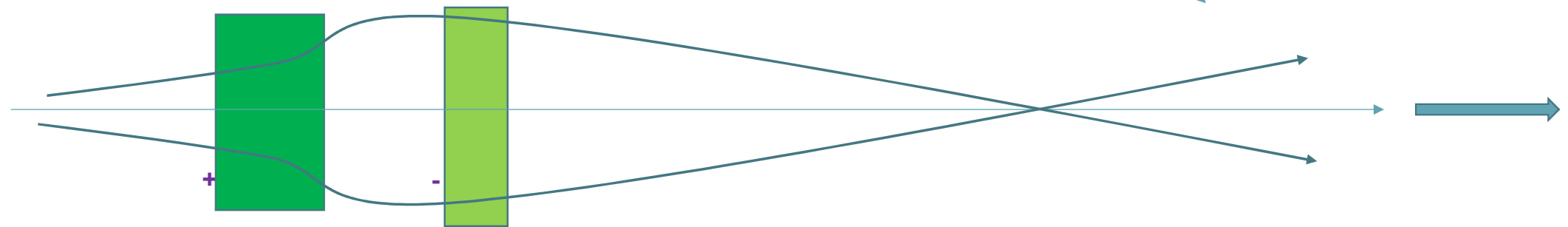
# Focalisation avec 2 quadripôles magnétiques de polarité alternée



Plan horizontal (vue du dessous) : trajectoires de 4 particules

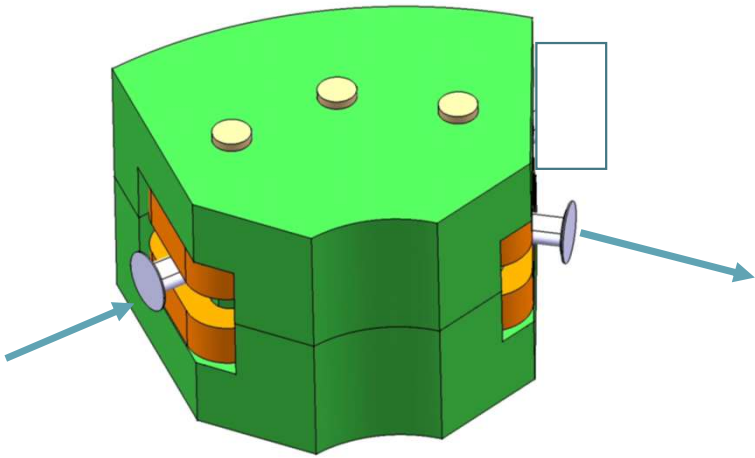


Plan vertical (vue du dessous) : trajectoire de 3 particules

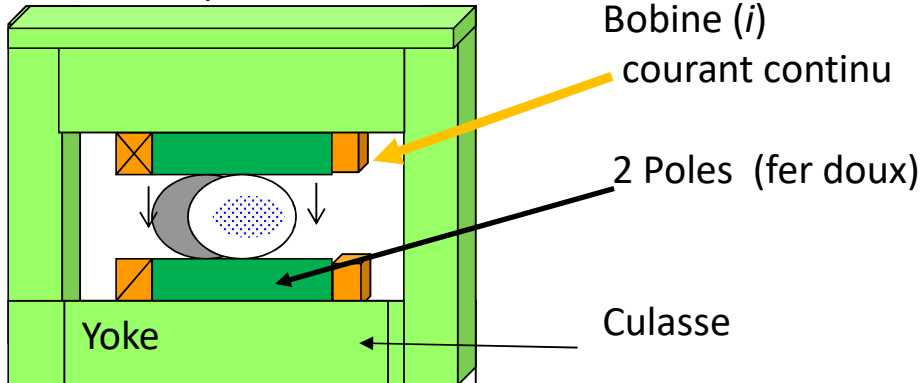


$B_x = G.Y$	champ horizontal	$F_x \sim q V_z . B_y \sim x$
$B_y = -G.X$	champ vertical	$F_y \sim q V_z . B_x \sim y$
$B_z = 0$		

# Les dipôles magnétiques



Vue en coupe



## Intérêts :

- 1) **Dévier les particules d'un angle donnée**
  - (guidage vers une expérience)
- 2) **Faire tourner les particules** dans un accélérateur circulaire (cyclotron, synchrotron)

## 3) Analyser la nature des particules ( $m, v, q$ )

Rayon de courbure  $R = Mv / q B$

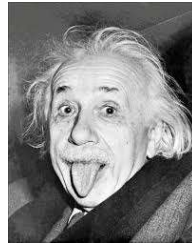
Mesure de la trajectoire circulaire  $R$  dans  $B$  connu

Mesure de  $B$  et  $R =$  Mesure de  $Mv/Q$

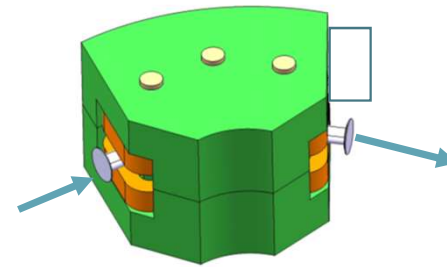
$$Mv / Q = B \times R$$

# Les concepts dans les accélérateurs de particules

-La relativité restreinte



-Force magnétique versus force électrique



-La rigidité magnétique (le  $B\rho$ )

-Les spectromètres pour mesurer ( $m$ ,  $v$  ou  $q$ ) (le  $B\rho$ )

## La relativité dans les accélérateurs de particules : vitesse proche de celle de la lumière

-Le temps est relatif: dépend du référentiel ???

Il faudrait utiliser le temps propre  $\tau$  pour chaque particule pour exprimer les équations du mouvement

$$\tau = t_{\text{labo}} / \gamma$$

$$\frac{d}{d\tau} = m\gamma \frac{d}{dt}$$

-La quantité de mouvement

$$p = \gamma m v$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}$$

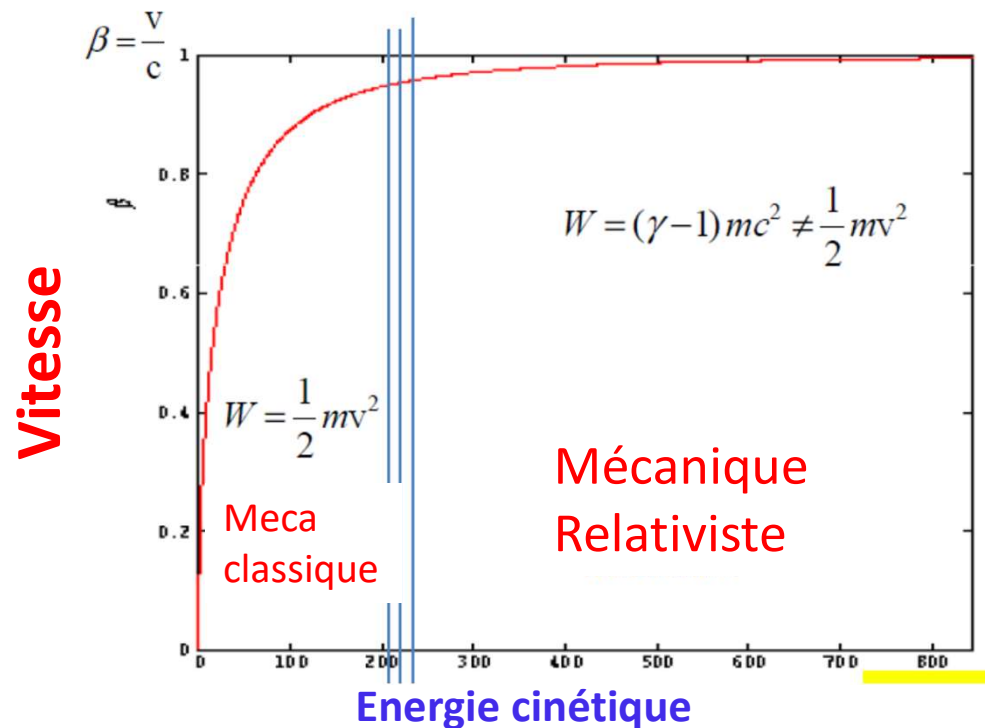
$$\frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt} m\gamma v = F$$

## La relativité dans les accélérateurs

-L'énergie totale  $E_{\text{totale}} = \gamma m c^2$

-L'énergie au repos ( $v=0, \gamma=1$ )  $E_0 = m c^2$

-L'énergie Cinétique  $E_{\text{cinétique}} = E_{\text{totale}} - E_{\text{repos}} = (\gamma - 1) m c^2$



Augmenter l'énergie :

permet d'approcher asymptotiquement la vitesse  $c$ .

A haute énergie  
La vitesse n'évolue presque pas.

## Concept : Forces magnétiques versus forces électriques

Forces générées par les champs :  $\vec{F} = q \left[ \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right]$   $\frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$

Travail des Forces  $W$  (changement d'énergie) sur la trajectoire d'une particule

$$\Delta W = \int_{r_1}^{r_2} \vec{F} \cdot d\vec{r}$$

$$\Delta W = \int q \left[ \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right] \cdot d\vec{r} = \int q \vec{E} \cdot d\vec{r} + \int \left[ \frac{d\vec{r}}{dt} \times \vec{B} \right] \cdot d\vec{r} = \int q \vec{E} \cdot d\vec{r}$$

~~$= 0 \quad (\vec{v} \times \vec{B}) \perp d\vec{r}$~~

Seul le champ électrique  $\vec{E}$  change l'énergie

Le champ magnétique  $\vec{B}$  n'induit pas de changement d'énergie  $\Delta W$  ( $F_{\text{Lorentz}}$  et le produit vectoriel)

**Définition : La rigidité magnétique**  $B\rho = \gamma m v / q$

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = m\gamma \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q (v_\theta \cdot B_z) \cdot \mathbf{e}_r \quad m\gamma \frac{v^2}{R} = q \cdot v B_z \quad B_z R = \gamma m \frac{v}{q}$$

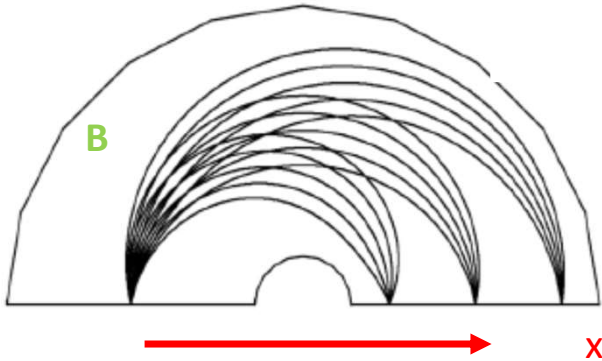
Objectif : Calculer facilement la trajectoire dans un champ B uniforme  $R = B\rho / B$   
Régler les champs magnétiques B des dipôles

Pour les particules d'intérêt (m,v ,q) , on calcule le « BéRO » :  $B\rho = \gamma m v / q$   
unité du BéRO : le Tesla.metre

Comment faire tourner une particule de  $B\rho = 2.00$  Tesla.metre sur un rayon  $R=1\text{m}$

$$B_z = B\rho / R = 2 \text{ Teslas}$$

# Le spectromètre avec 1 dipôle de 180° et un champ $B_z$ uniforme



Position d'une particule à la fin du dipôle de 180°

$$x_1 = 2 R_1 = B_{\rho 1} / B_z = 2 m \frac{v_1}{q B_z}$$

Position d'une particule N°2 à la fin du dipôle de 180°

$$x_2 = 2 R_2 = 2 m \frac{v_2}{q B_z}$$

$$x_2 - x_1 = 2 \left( m \frac{v_2}{q B_z} - m \frac{v_1}{q B_z} \right) \sim k. (B_{\rho 2} - B_{\rho 1})$$

on peut expliciter pour tout spectromètre  $x_2 - x_1 = D. (B_{\rho 2} - B_{\rho 1}) / B_{\rho 1}$

$D$  est la dispersion du spectromètre ( $D$  s'exprime en mètre)  
 Mesurer  $x$  et  $B$  : donne des informations sur  $B_{\rho}$





Profs au **GANIL**

# Les accélérateurs de particules

Bertrand Jacquot

14H00-15H30



# Une application des accélérateurs de particules: Radiothérapie

## Un accélérateur linéaire RF électrons pour la médecine

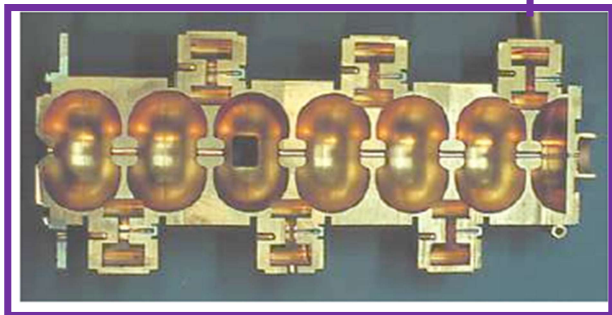
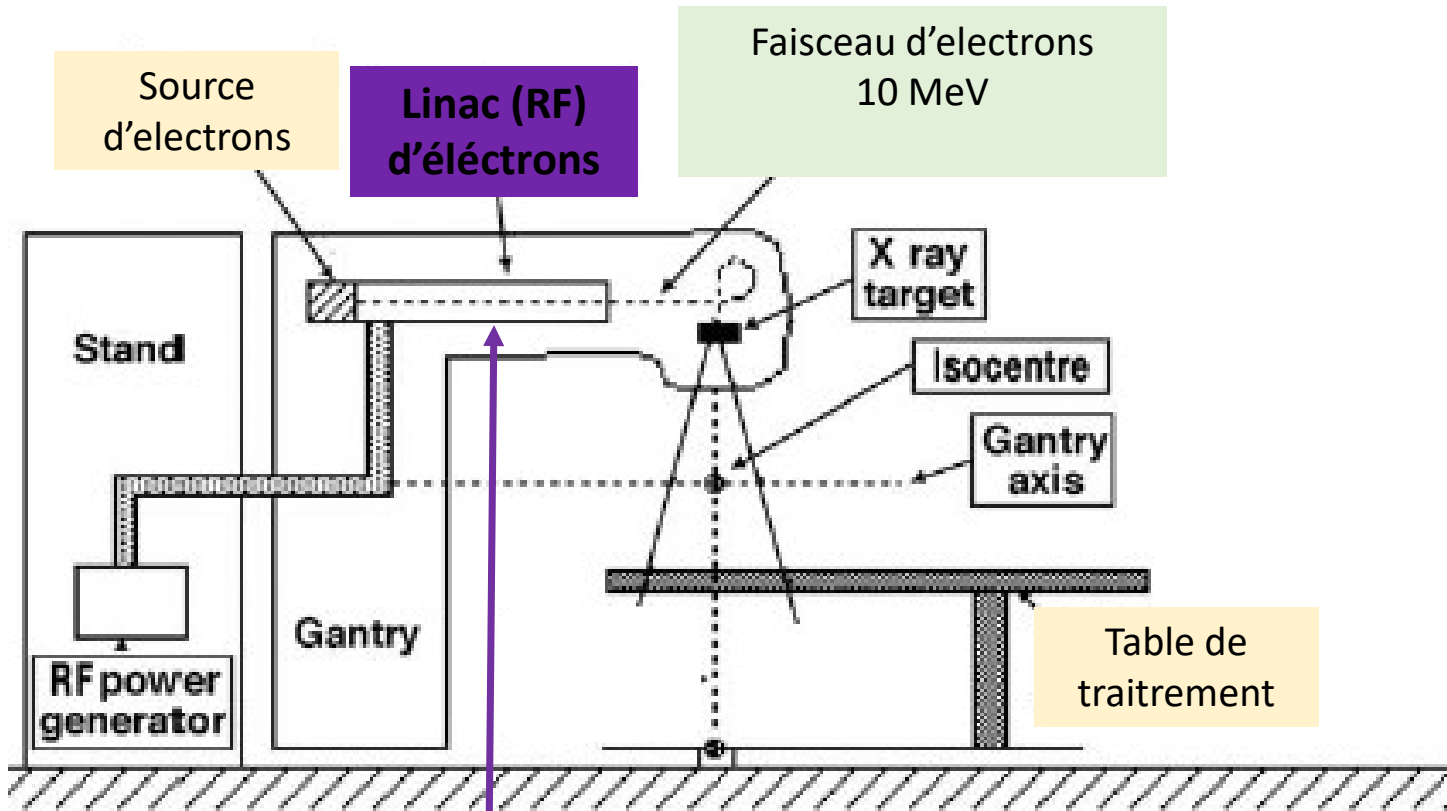
1 accélérateur linéaire ~40cm  
~10 MeV

Dans un bras rotatif

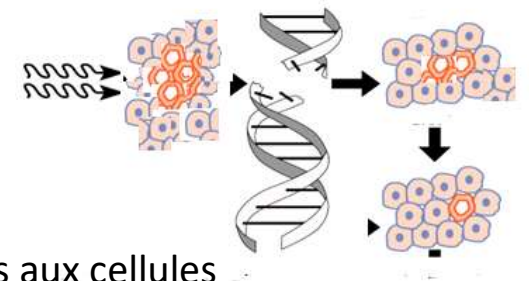


Le faisceau d'électron est arrêté  
sur une cible en tungsten  
génère des photons  
Permettant de irradier et tuer  
les cellules cancéreuses





Irradiation avec des photons de haute énergie



Génère des dommages aux cellules  
 les cellules cancéreuses sont plus affectées que les cellules normales

# Les différents types d'accélérateurs : la course à l'énergie maximale

La course à l'énergie maximale :

découverte de nouvelles particules à chaque nouveau record en énergie...

Max Van der Graf : 40 MeV (Tandem)

Max cyclotron : 600 MeV protons

Max Synchro-cyclotron ~1GeV

Max Synchrotron LHC 7 TeV

