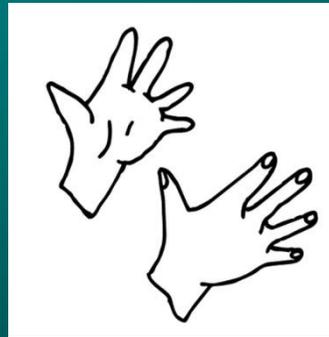


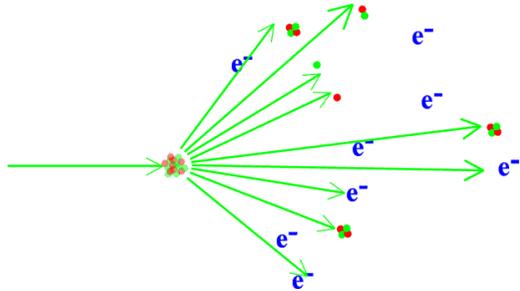
La Physique des Accélérateurs



... avec les mains

Un accélérateur pourquoi faire ?

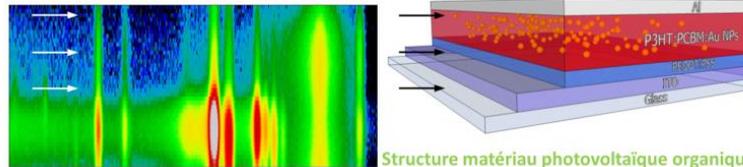
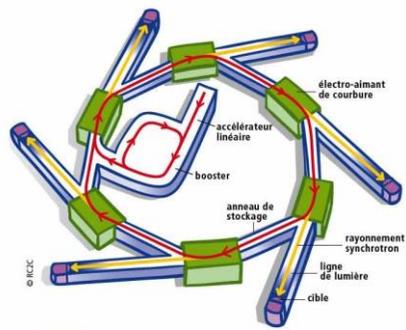
Etude de la matière → collisions



Communauté utilisateurs

- Physiciens des particules
- Physiciens nucléaires

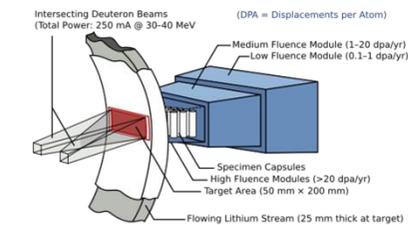
Production rayonnement synchrotron



Structure matériau photovoltaïque organique

- Physiciens
- Chimistes
- Biologistes
- Ingénieurs
- Industriels
- Historiens
- Artistes

Irradiation



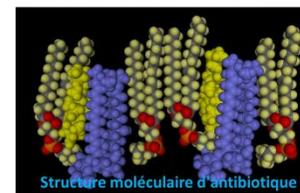
Etude nouveau matériau pour la fusion thermonucléaire



Destruction tumeurs



Stérilisation matériel médical



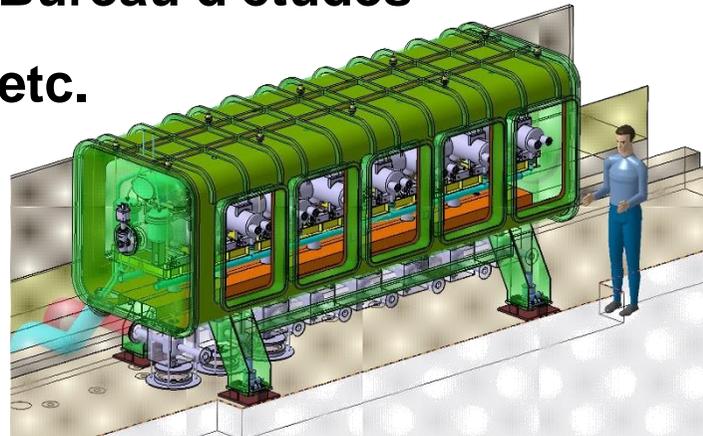
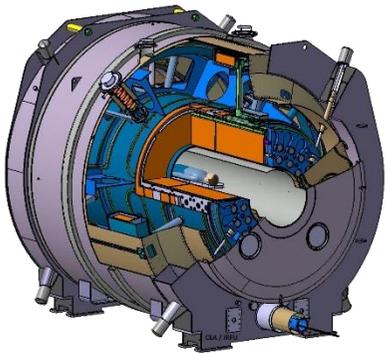
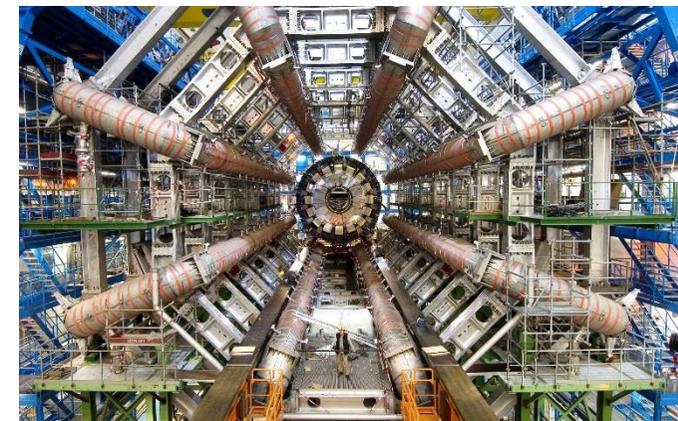
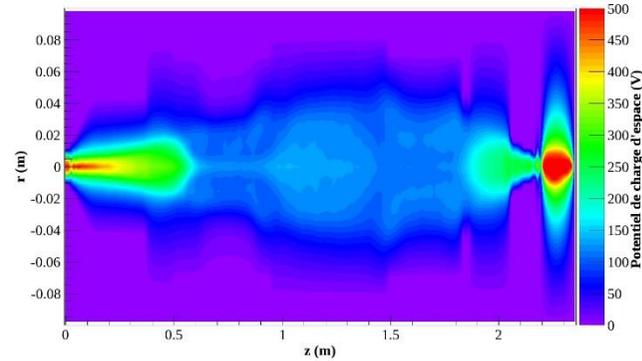
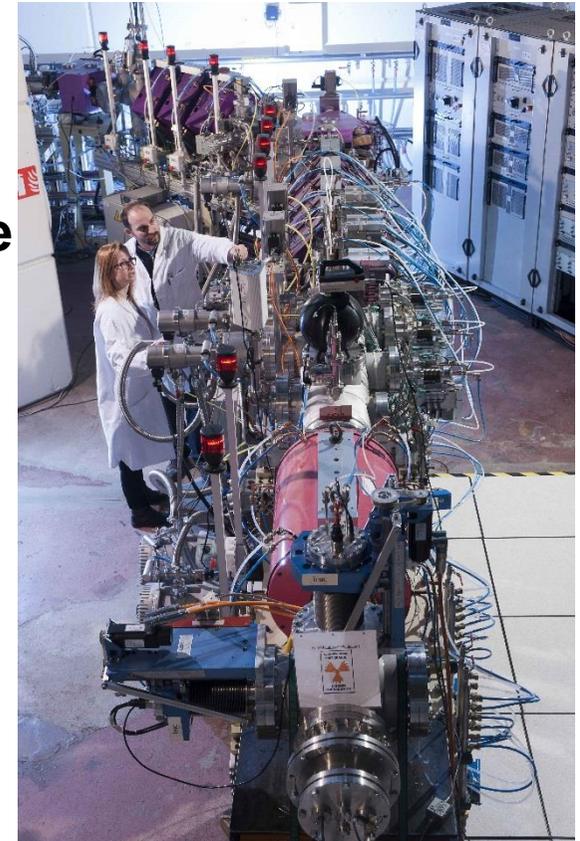
Structure moléculaire d'antibiotique

- Physiciens
- Biologistes
- Médecins
- Industriels

Les métiers impliqués dans les accélérateurs



- Physique du faisceau de particules
- Magnétisme
- Electromagnétisme, Radiofréquence
- Supraconductivité
- Cryogénie
- Chimie pour salle blanche
- Science des matériaux
- Techniques du vide
- Mécanique de précision
- Bureau d'études
- etc.



Où se trouvent les accélérateurs ?

Grands centres de recherche sur les accélérateurs ~100 personnes :
Europe, Amérique du Nord, Asie de l'Est, ...

Liste non exhaustive

- **France** : IRFU/SACM (Saclay), IPNO, LAL (Orsay), SOLEIL (Saint Aubin), GANIL (Caen), ESRF (Grenoble)
- **Suisse** : CERN (Genève), PSI (Villingen)
- **Allemagne** : DESY (Hamburg), GSI (Darmstadt), COSY (Julich), BESSY (Berlin), ANKA (Karlsruhe)
- **Royaume-Uni** : DIAMOND (Didcot), RAL (Oxford), STFC (Daresbury)
- **Suède** : MAX-Lab (Lund), ESS (Lund)
- **Italie** : ELETTRA (Trieste), INFN (Frascati, Legnaro, Catania)
- **Espagne** : ALBA (Barcelona), CIEMAT (Madrid)

- **Etats-Unis** : ALS (Berkeley), FNAL (Batavia), LANL (Los Alamos), SNS (Oak Ridge), ANL (Chicago), SLAC (Stanford), BNL (Upton), CHESS (Cornell)
- **Canada** : TRIUMF (Vancouver), CLS (Saskatoon)
- **Brésil** : LNLS (Campinas)

- **Japon** : SPring-8 (Sayo-cho), KEK (Tsukuba), J-PARC (Tokai-mura)
- **Chine** : SSRF (Shanghai), IHEP, BEPC (Beijing), HLS (Hefei), IMP (Langzhou)
- **Corée** : PAL (Pohang), PEFP (Yueong)
- **Thaïlande** : SLRI (Nakhon Ratchasima)

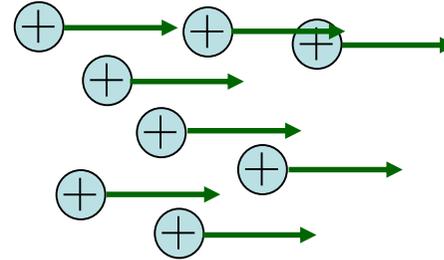
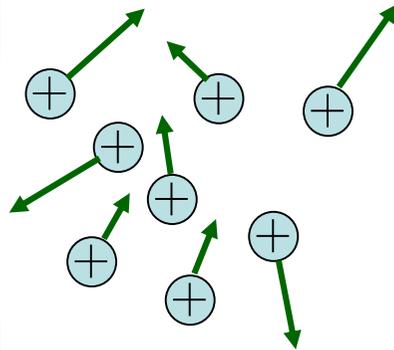
GANIL
GRAND ACCELERATEUR NATIONAL D'IONS LOURDS

GSi

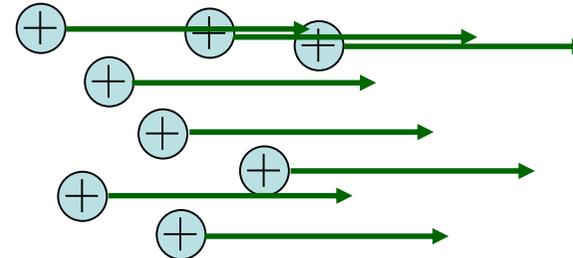


Faisceau accéléré

Faisceau : ensemble de particules **chargées** douées d'une **vitesse d'ensemble**

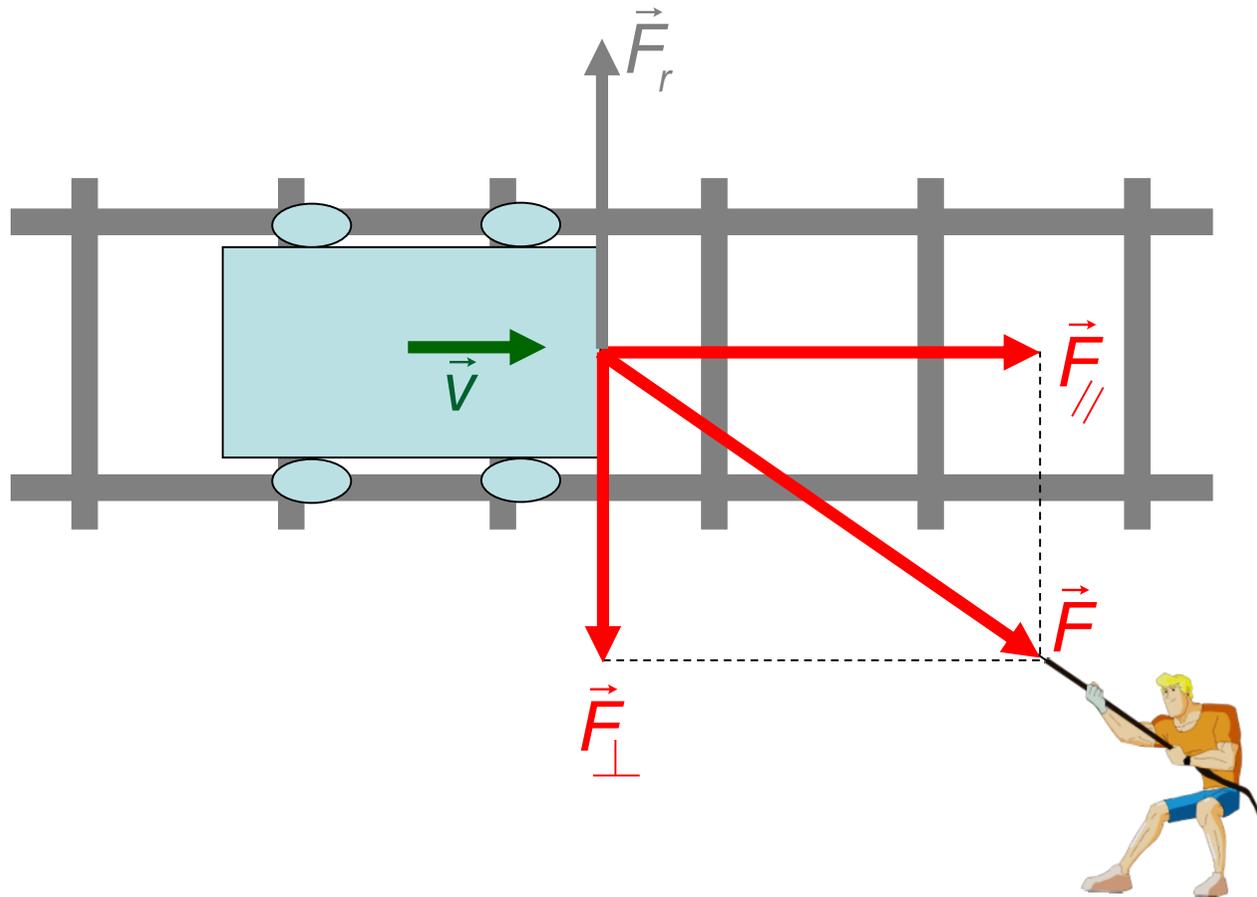


Accélérer : augmenter la vitesse d'ensemble



Jargon! : Energie \equiv Energie cinétique \equiv Energie liée à la vitesse

Accélération



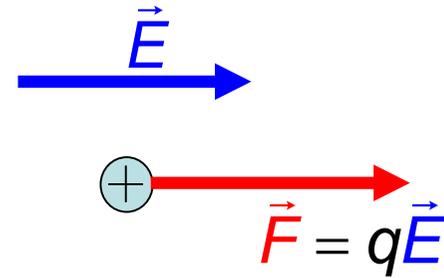
Force parallèle à vitesse : accélération → Energie augmente

Force perpendiculaire à vitesse : guidage, focalisation → Energie constante

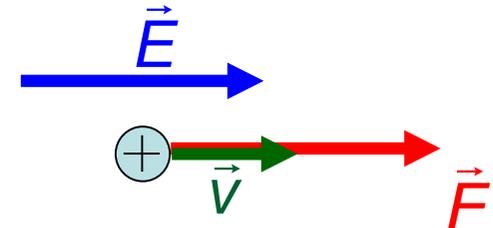
Jargon! : Un Accélérateur Ξ Un Créateur-Guideur-Focaliseur-Accélérateur

Champ Electrique

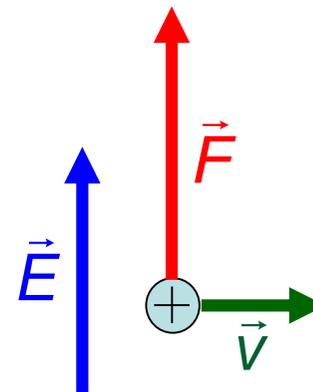
Charge dans un champs électrique \vec{E}



→ Champ électrique accélérateur



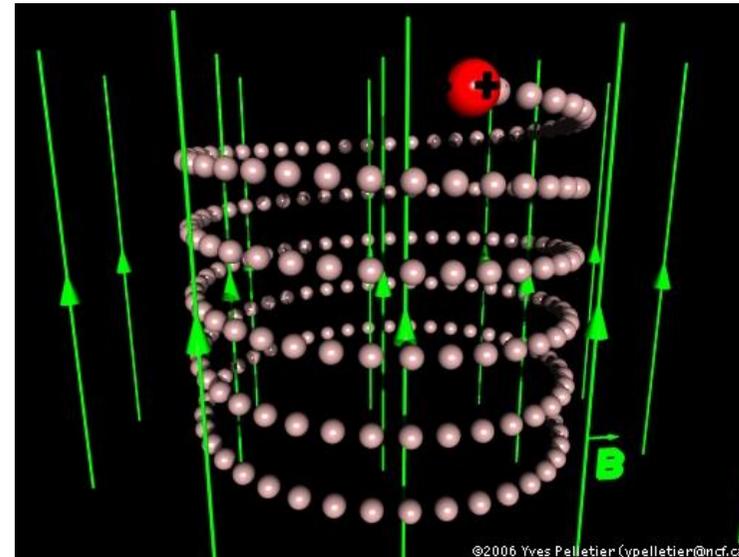
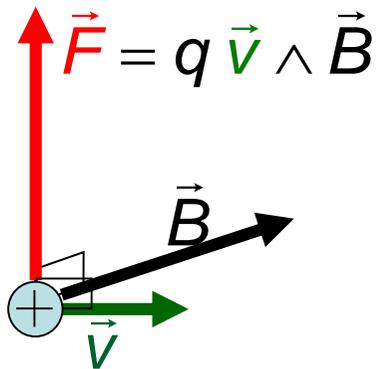
→ Champ électrique guideur ou focaliseur



Champ Magnétique

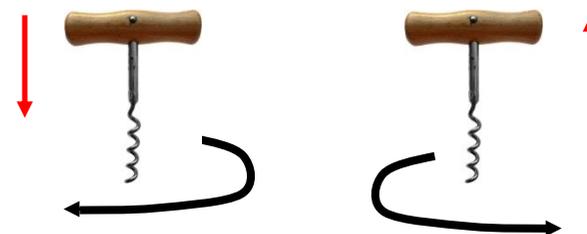
Charge dans un champs magnétique \vec{B}

Force **toujours** perpendiculaire à la vitesse



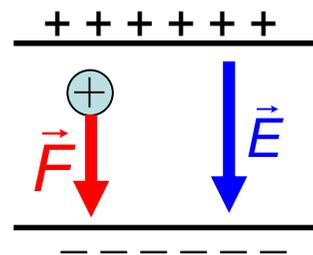
➔ Champ magnétique **uniquement** guideur ou focaliseur

Produit vectoriel : règle du tire-bouchon

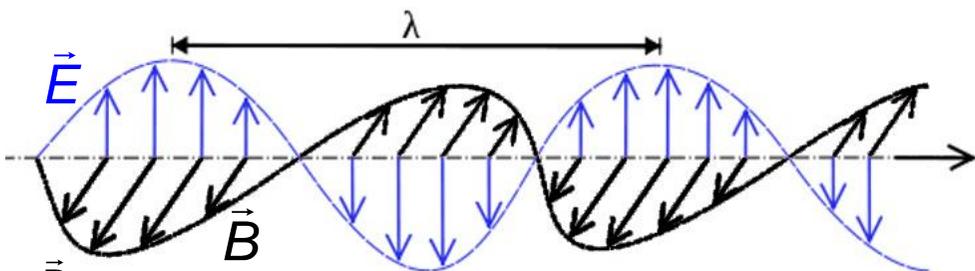


Pour produire un Champ Electrique

☀ 2 plaques électriques chargées + et -



☀ Onde électromagnétique RF

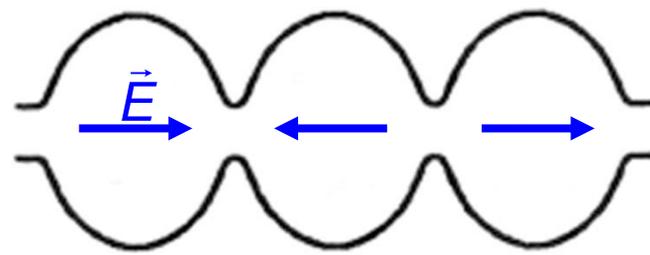


Loi de Maxwell avec les  : \vec{E} variable \leftrightarrow \vec{B} variable

Signal radio, télévision, téléphone, four micro-onde



☀ Onde électromagnétique RF piégée dans une cavité résonante



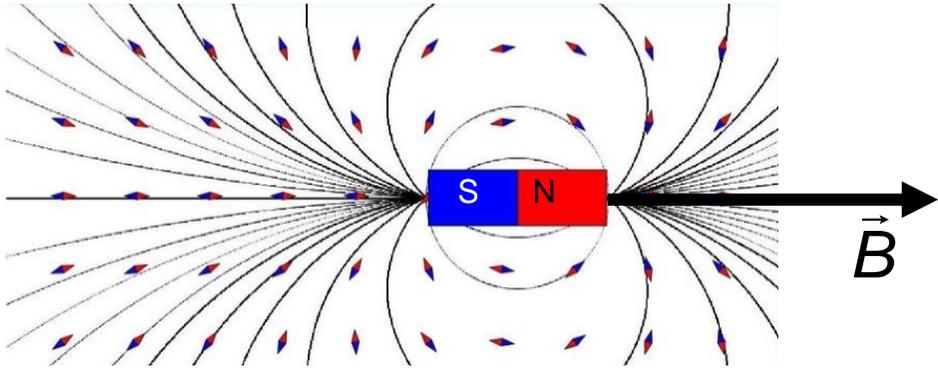
Ondes acoustiques piégées dans caisse de résonance d'instrument de musique



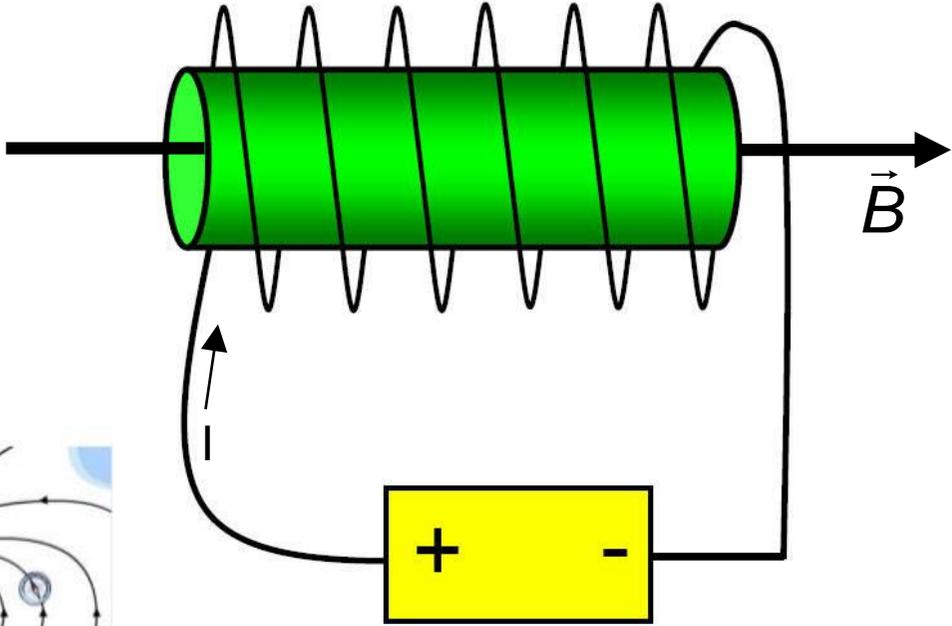
Pour produire un Champ Magnétique

Champ magnétique terrestre ~ 0.5 Gauss

Aimant permanent
1 - 10 000 Gauss



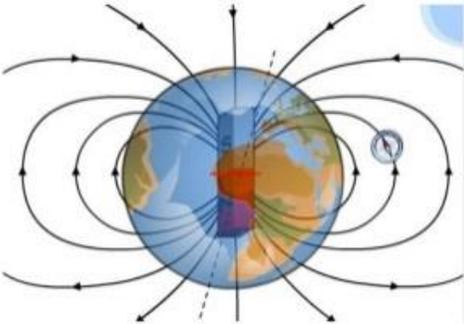
Bobine magnétique (Solenôïde)
Force variable

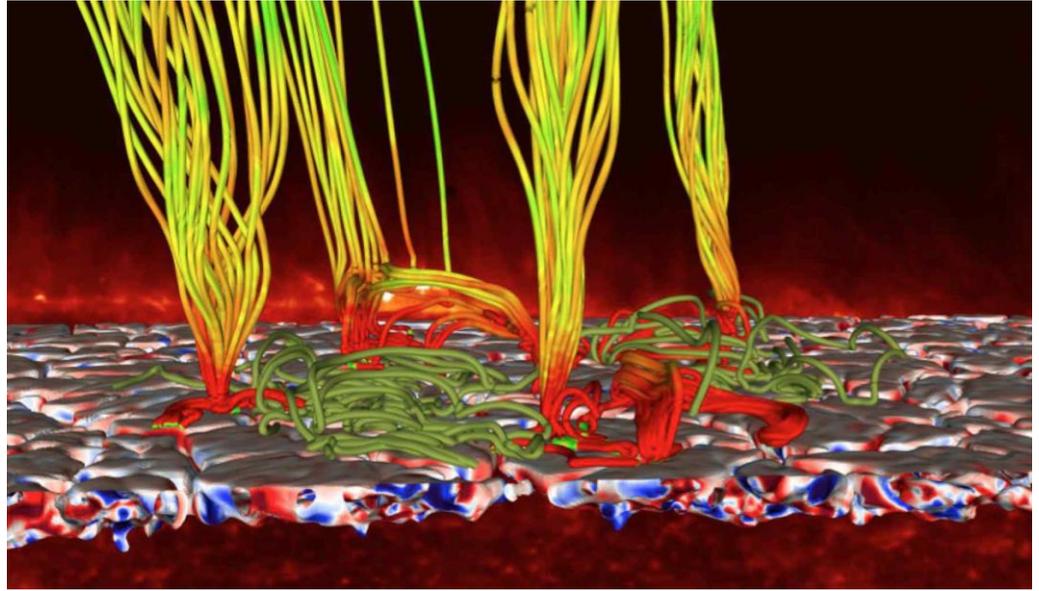
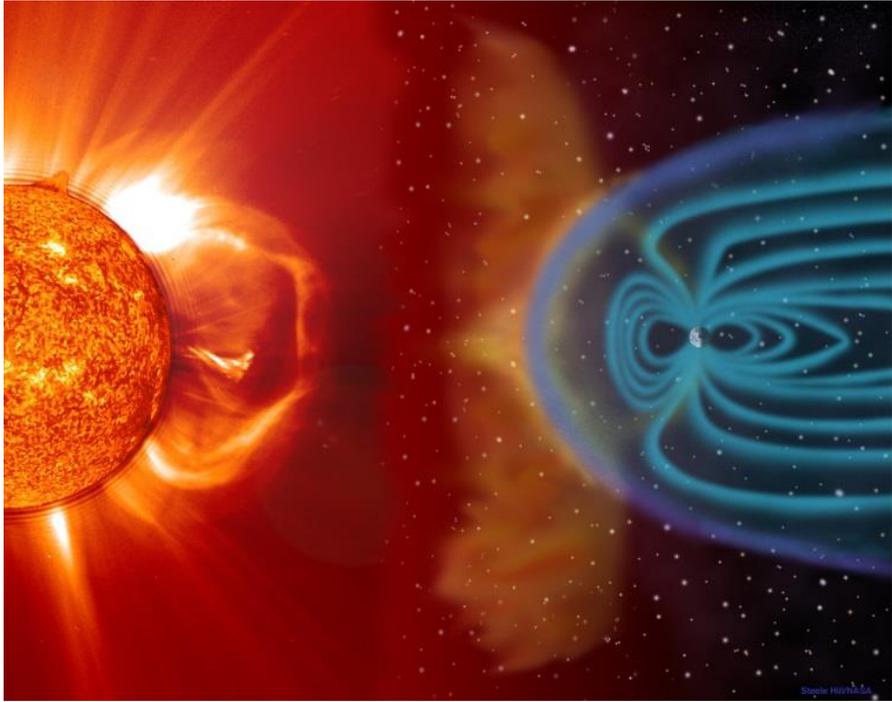


dynamo
vélo, EDF



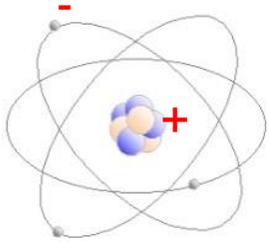
dynamo inverse
planètes, étoiles



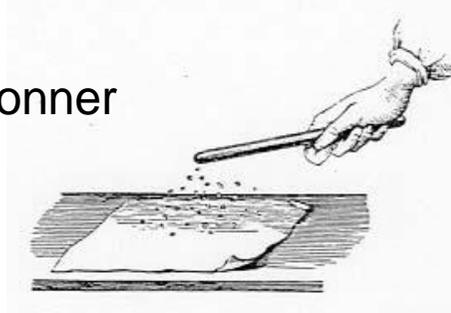


Création de particules chargée

atome neutre → enlever 1 électron ou plus → particules chargées

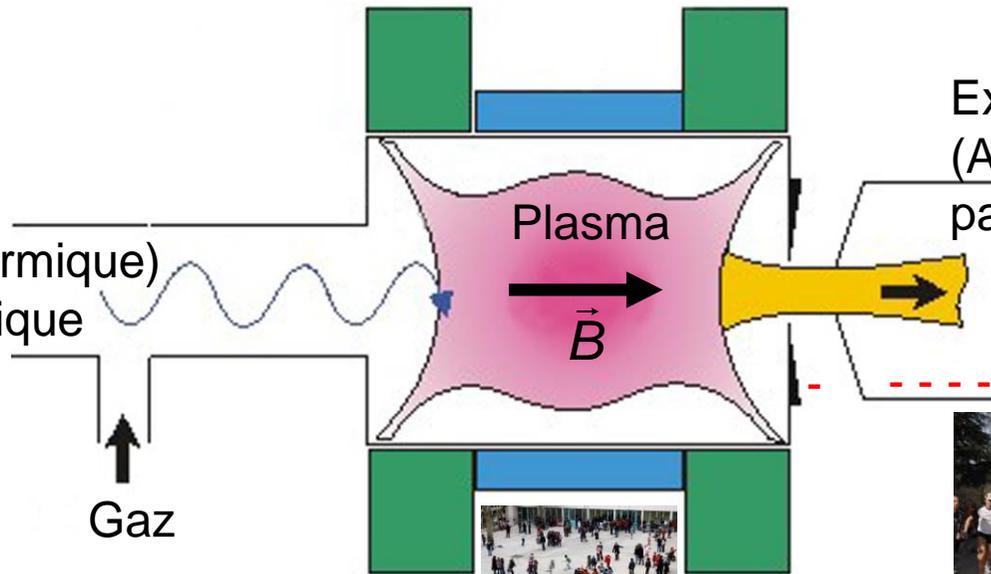


→ Frotter, Chauffer, Collisionner



Chauffage (agitation thermique)
par onde électromagnétique

Gaz

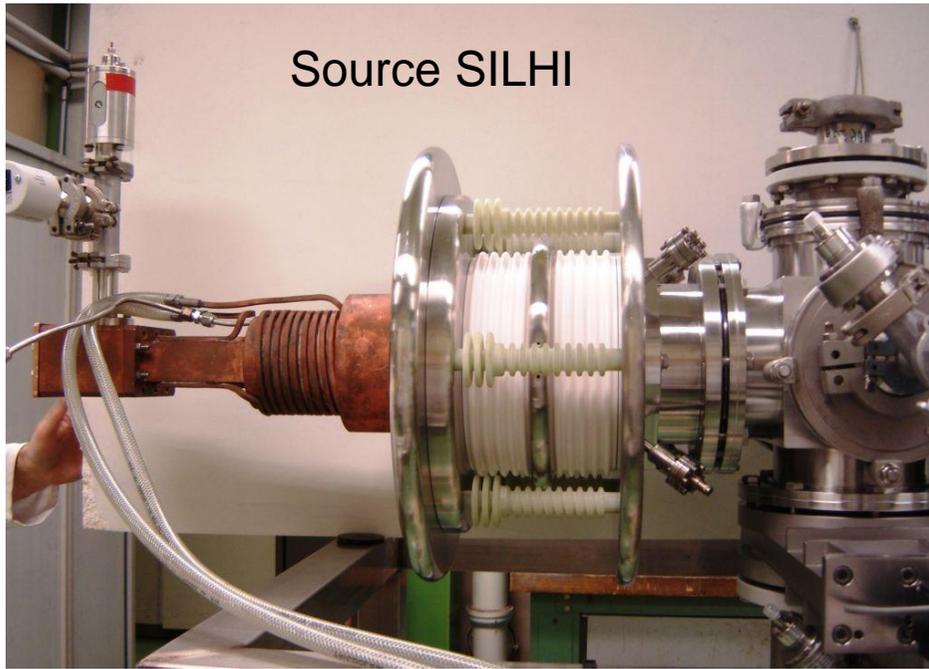


Extraction ions
(Accélération
par électrodes)

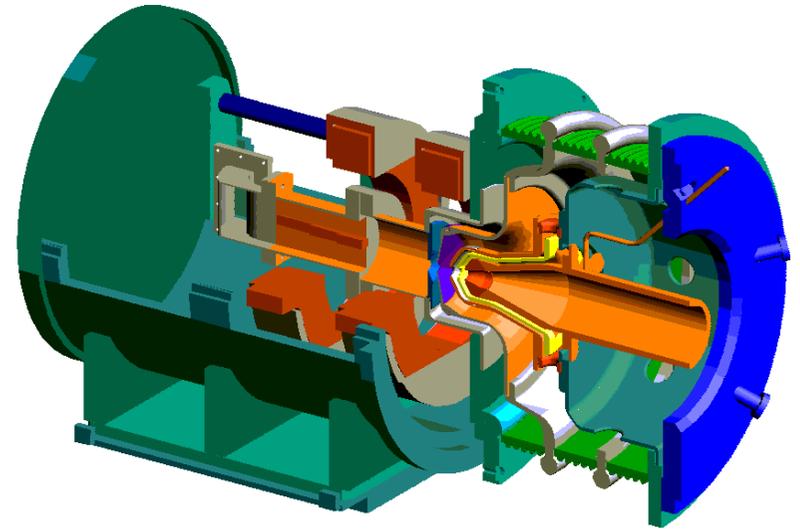


Bobines magnétiques
(ECR Resonance Cyclo Electronique)

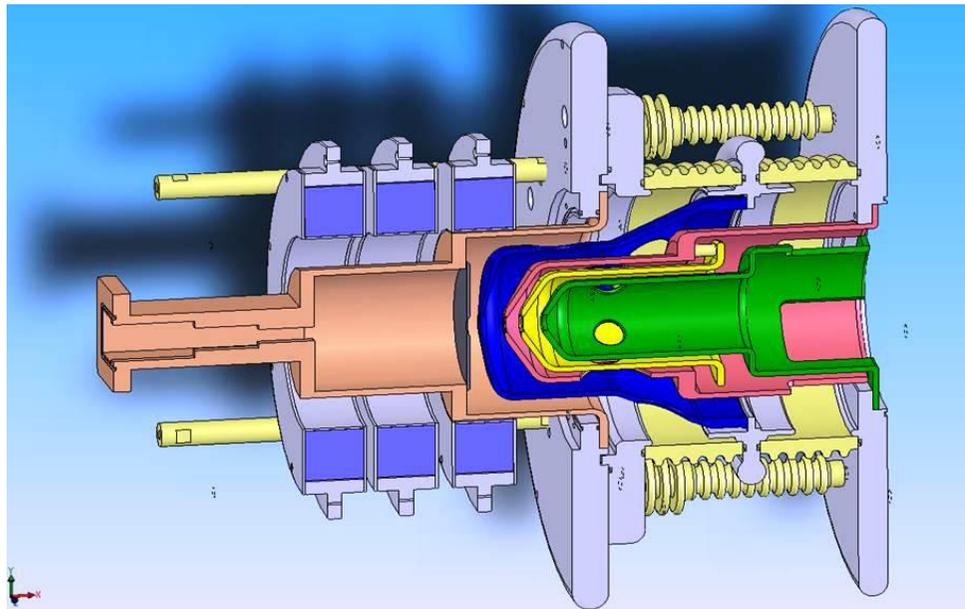
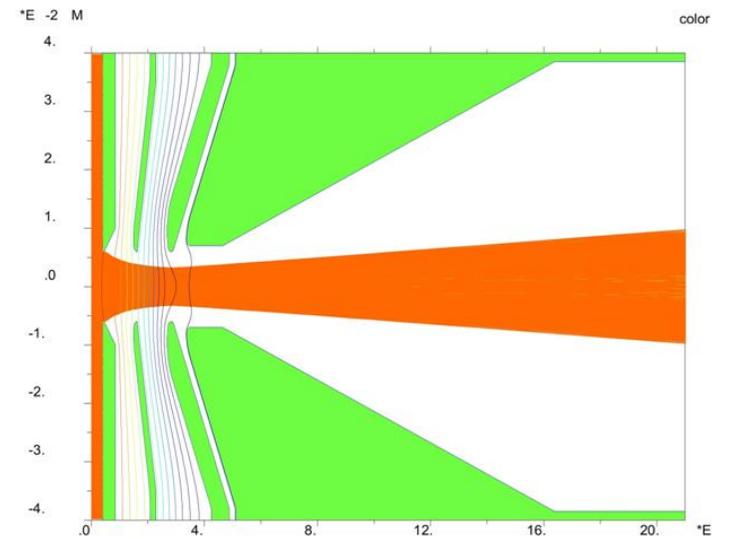
Source SILHI



Source IFMIF

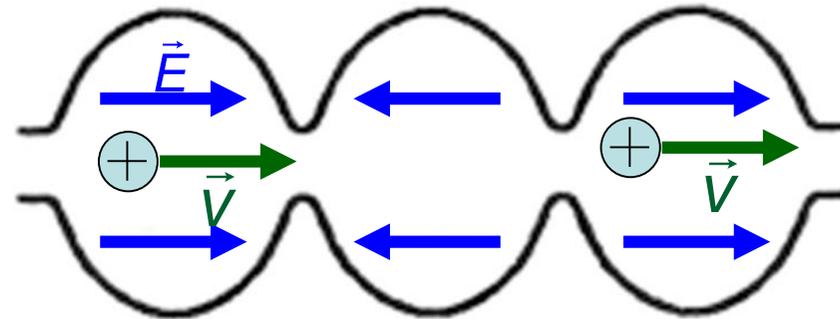


Extraction IFMIF

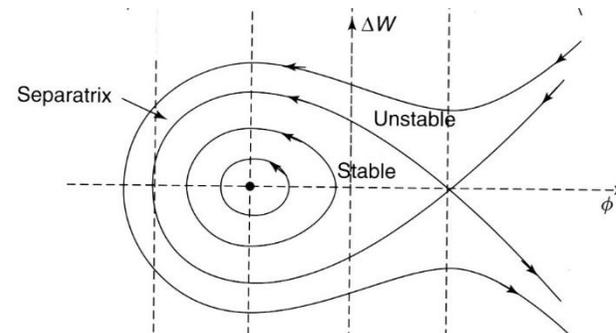
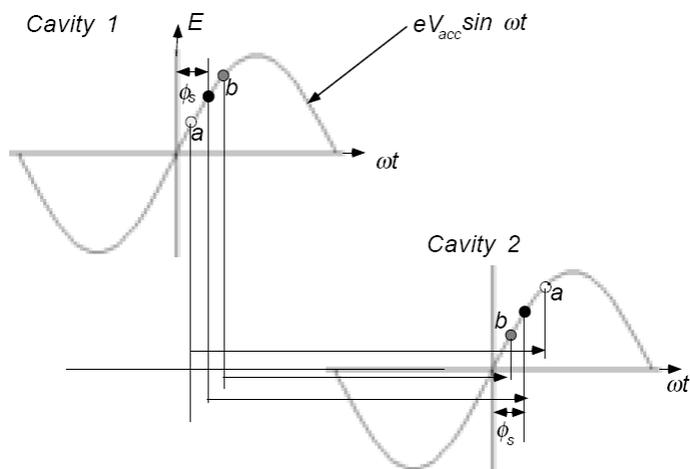


Accélération

Cavité RF



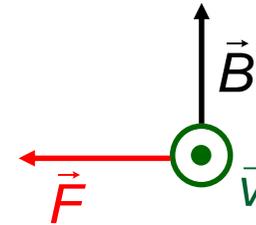
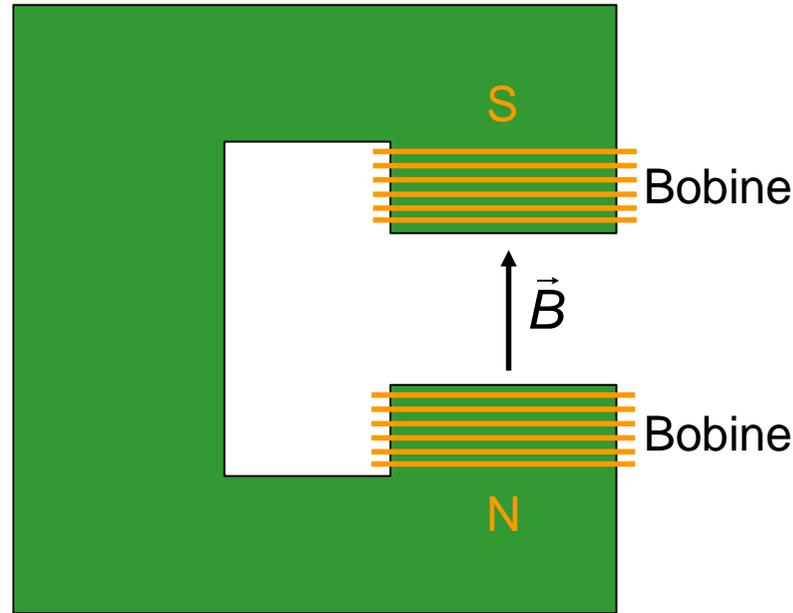
Accélération par \vec{E}_{RF} \Rightarrow Mise en paquets (focalisation longitudinale)



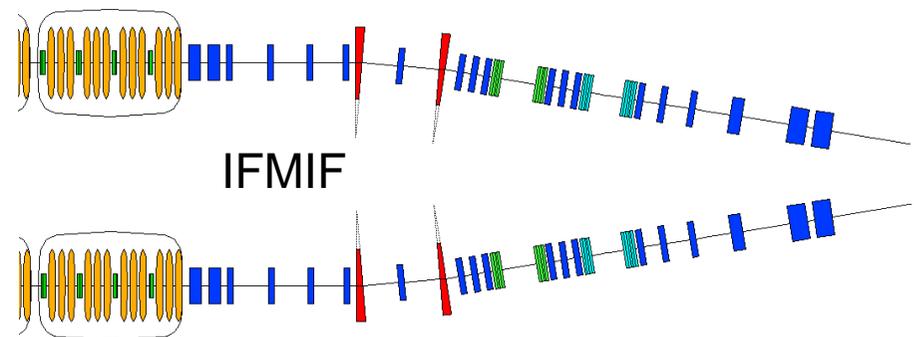
Oscillations longitudinales (synchrotron) avant-arrière

Guidage

Dipôle



SOLEIL

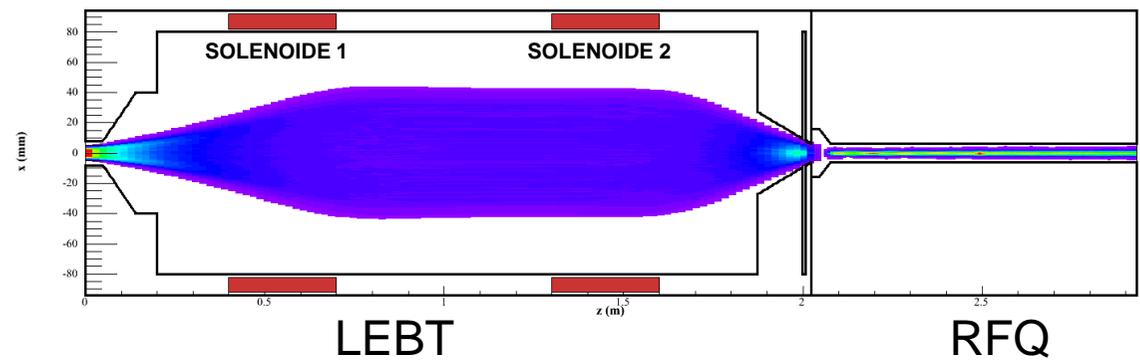
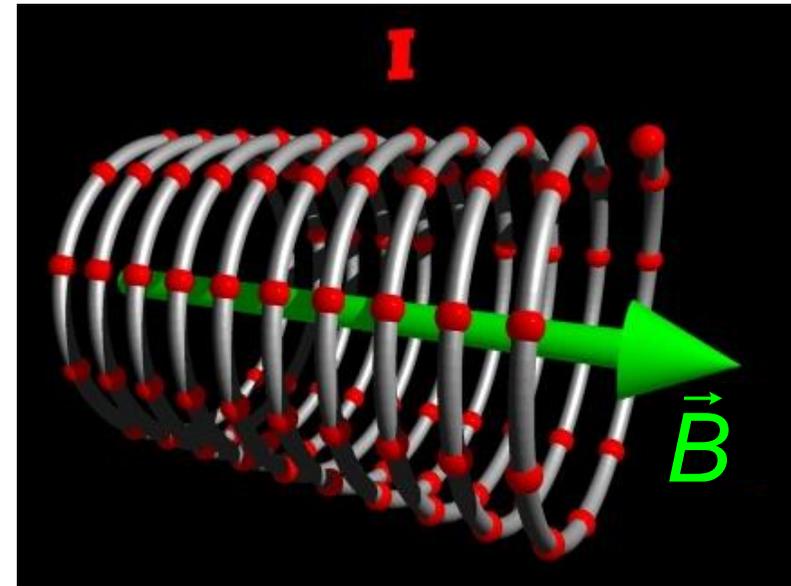
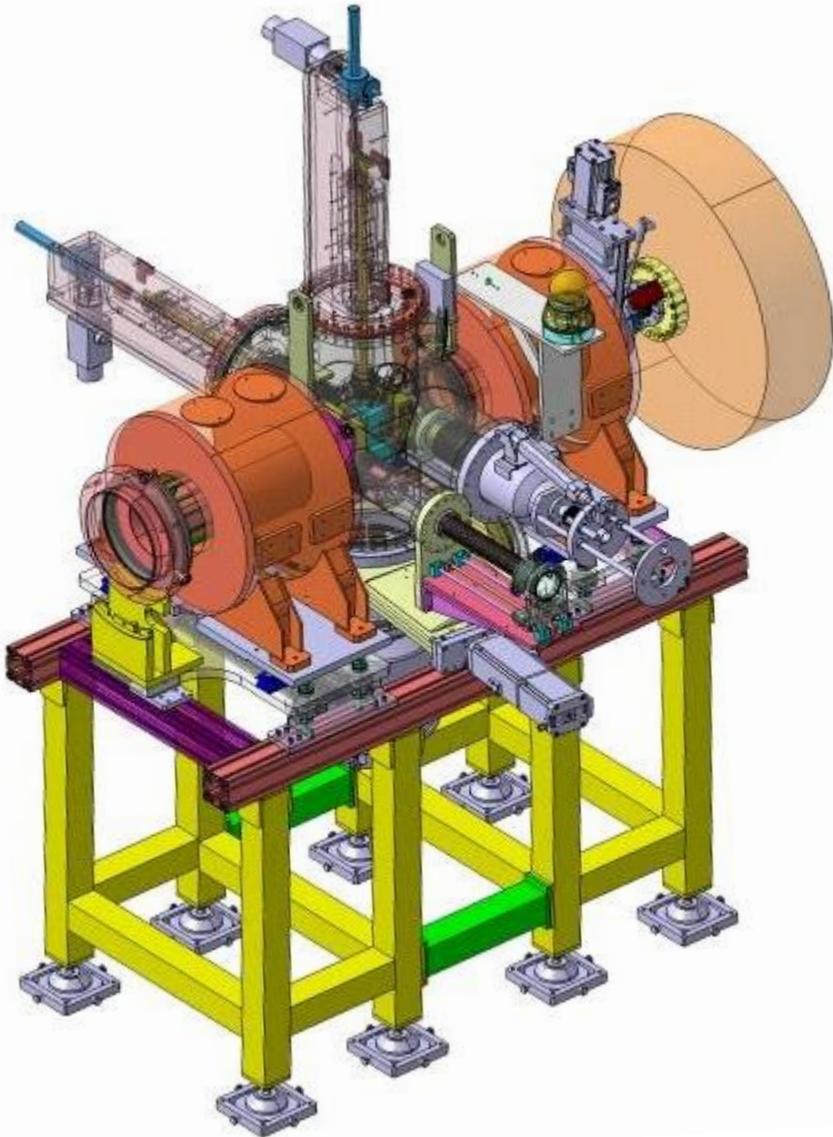


Guidage \Rightarrow Trajectoire de référence

Focalisation

Solenoides

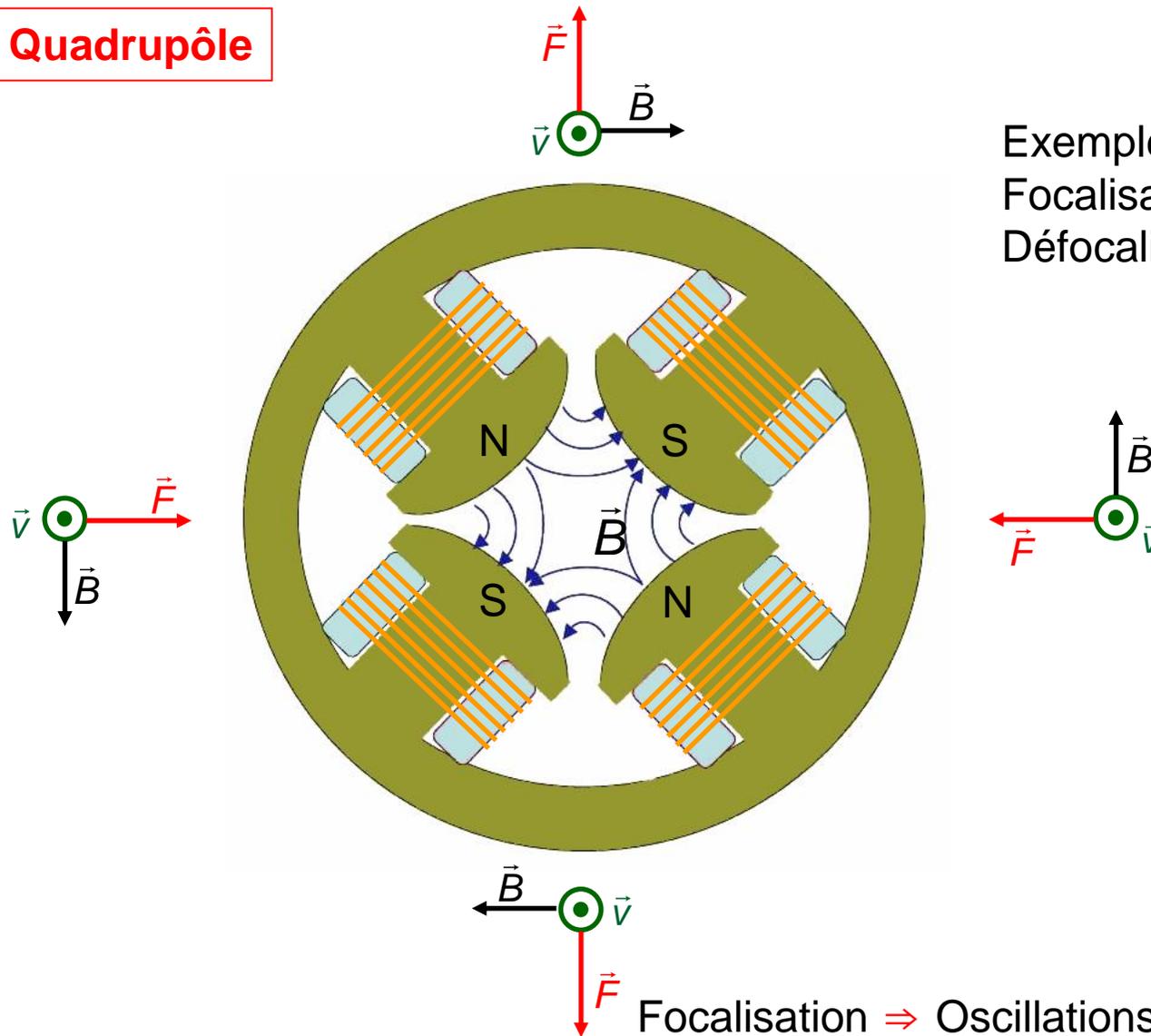
LEBT IFMIF



Focalisation \Rightarrow Oscillations transverses (betatron)

Focalisation

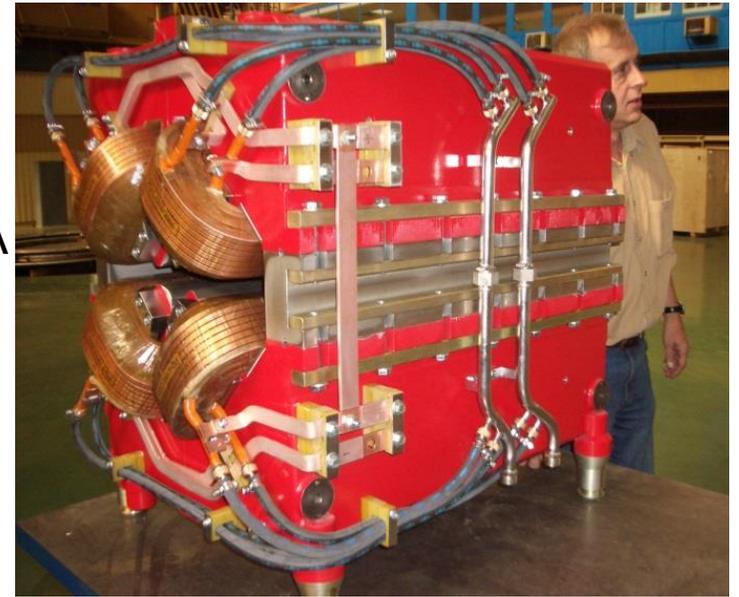
Quadrupôle



SOLEIL

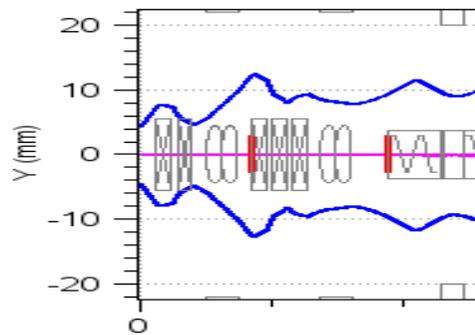
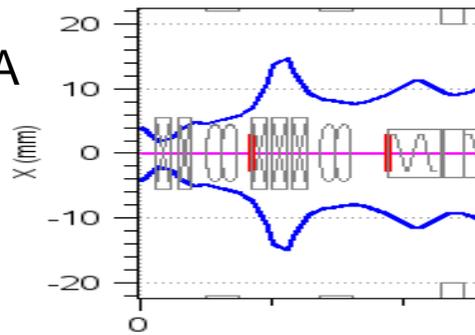


PETRA

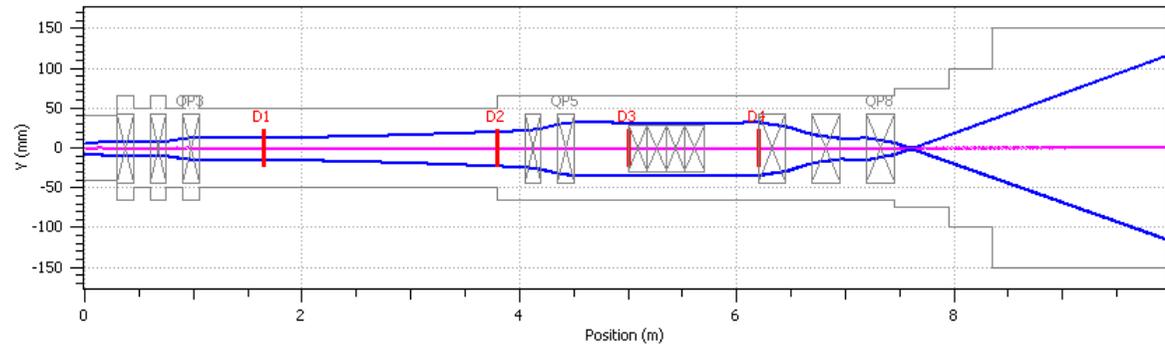
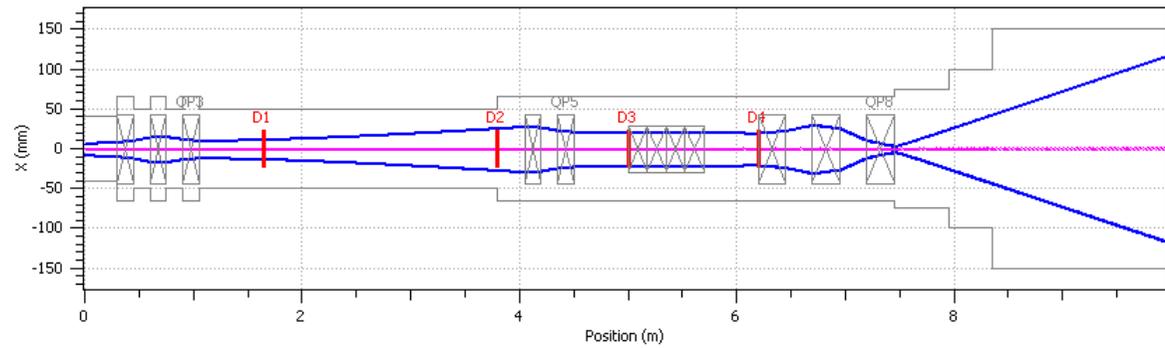


MEBT

IFMIF-EVEDA



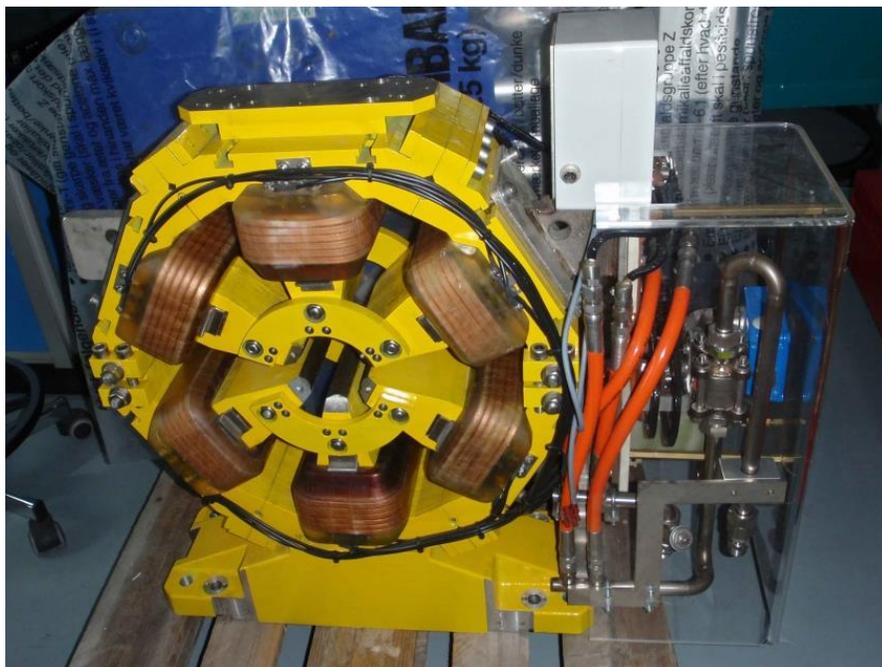
HEBT



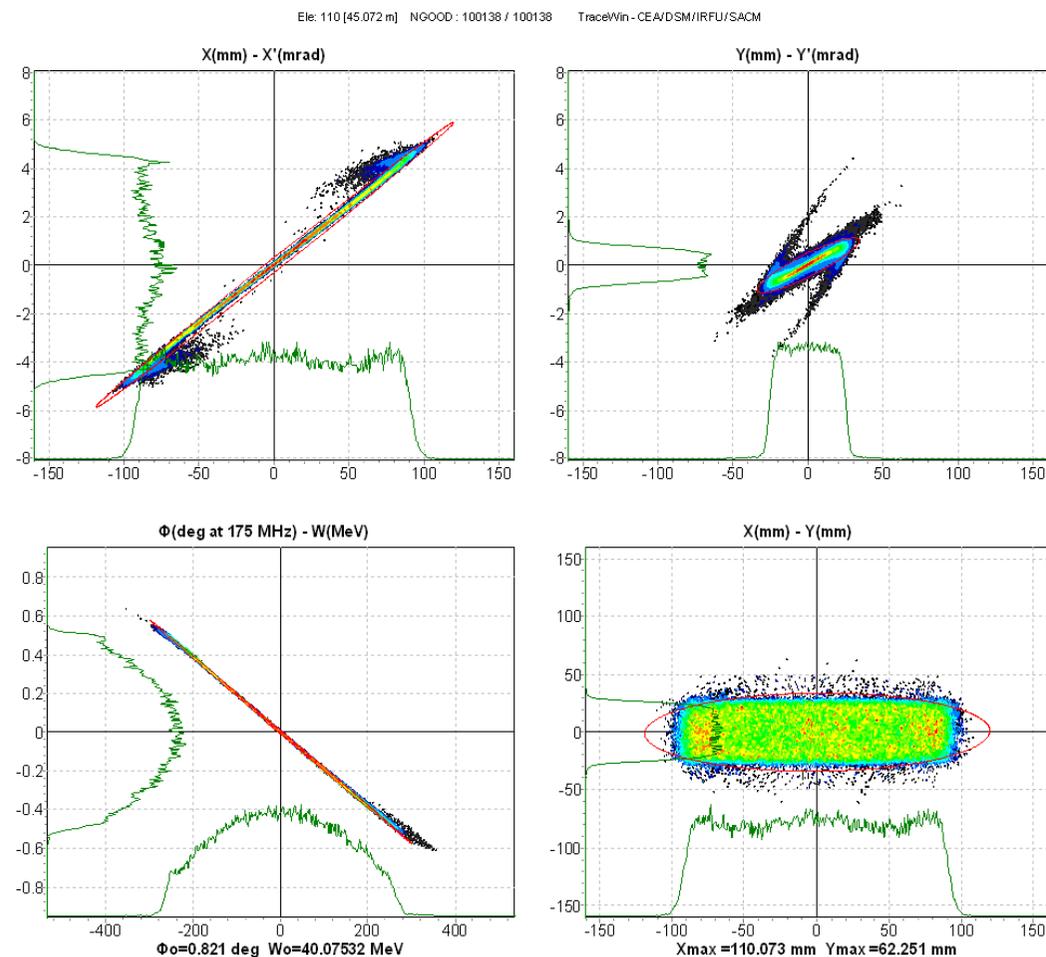
Sextupôle, Octupôle, Décapôle, Dodécapôle

Focalisation plus forte au bord qu'au centre

SOLEIL

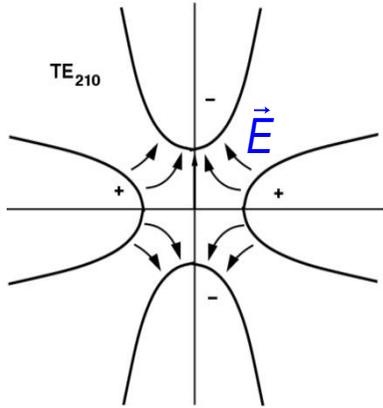


IFMIF
Tache Faisceau sur cible
avec 2 octupôles et 2 dodécapôles

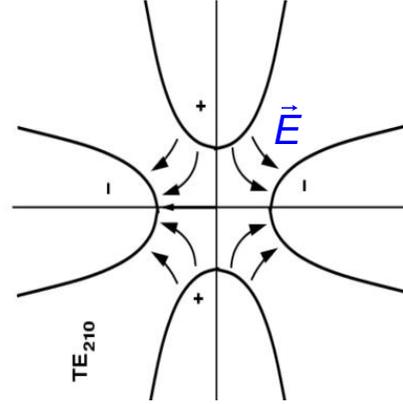


Accélération et Focalisation

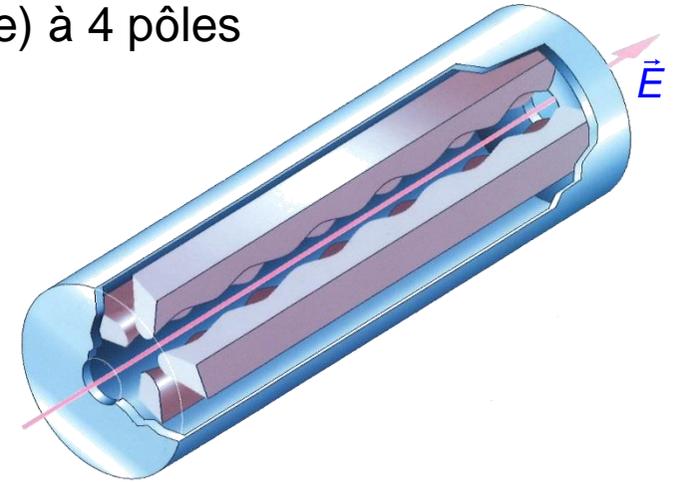
RFQ: Radio Frequency Quadrupole → Cavité RF (électrique) à 4 pôles



Focalisation en horizontal
Défocalisation en vertical



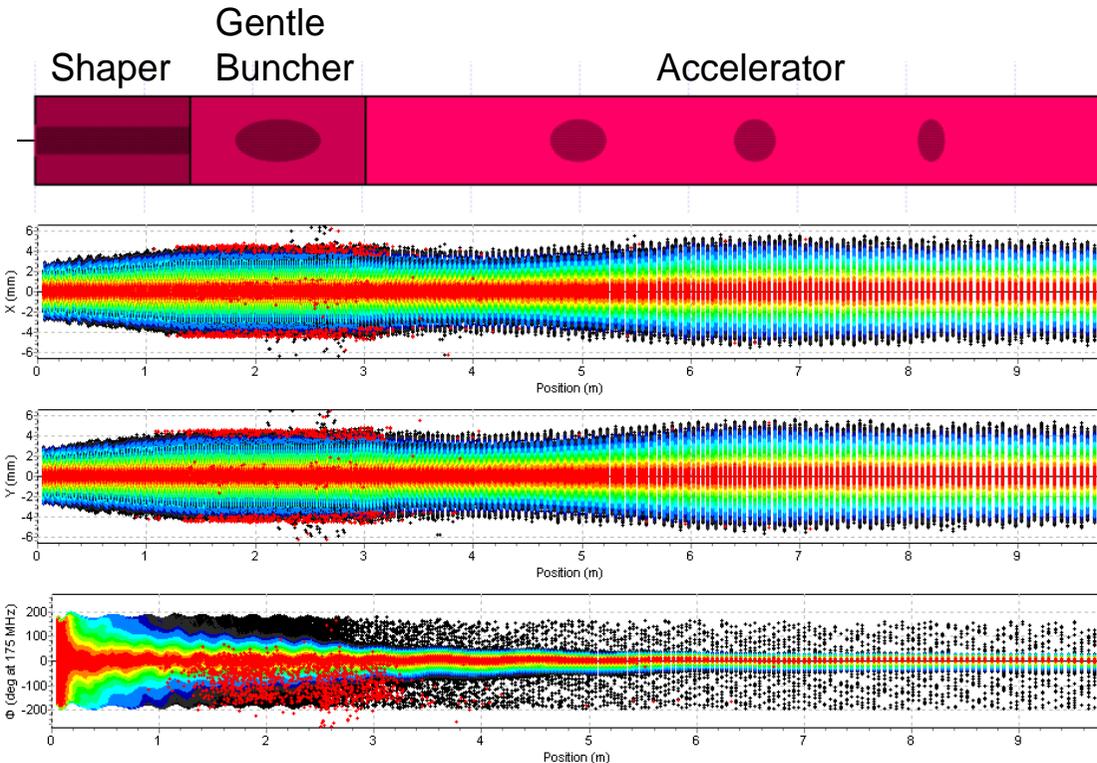
Défocalisation en horizontal
Focalisation en vertical



Modulation des pôles ⇒
Champ longitudinal accélérant

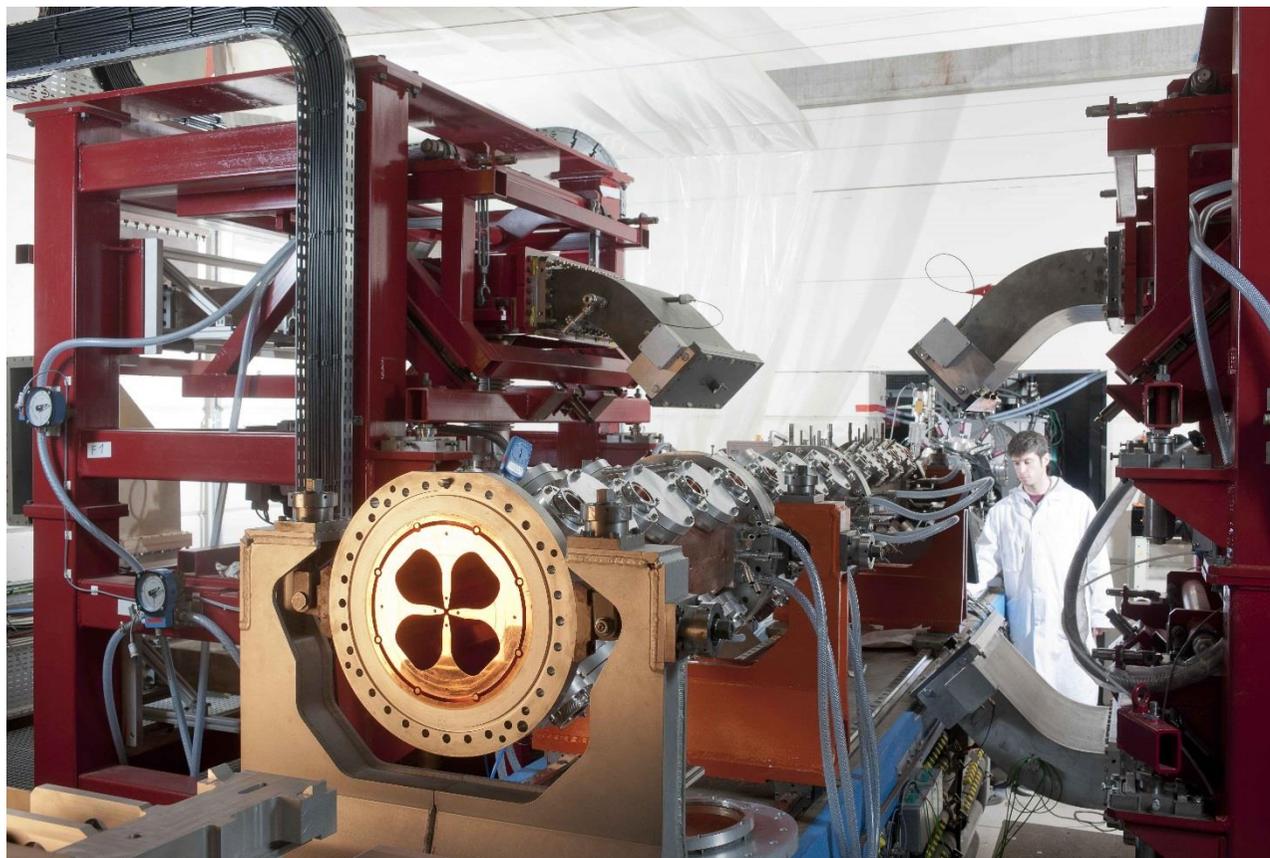
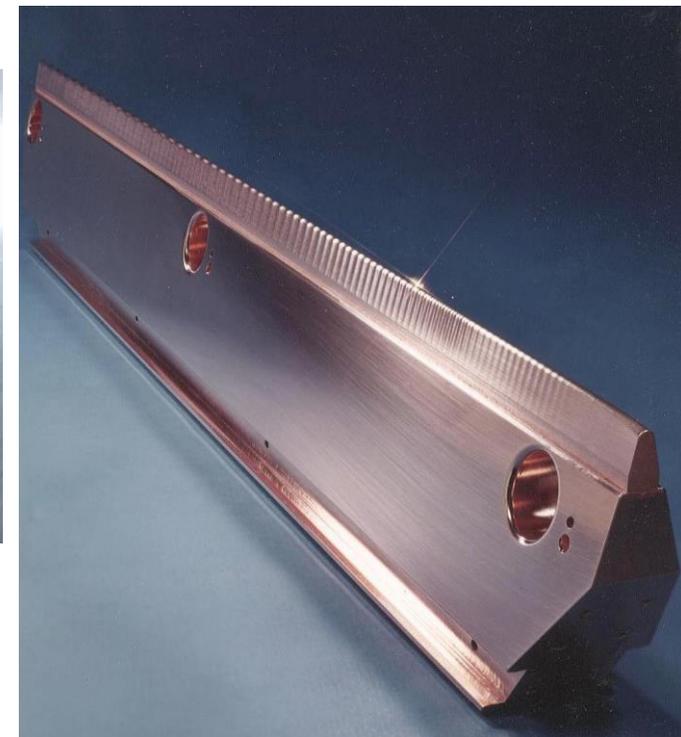
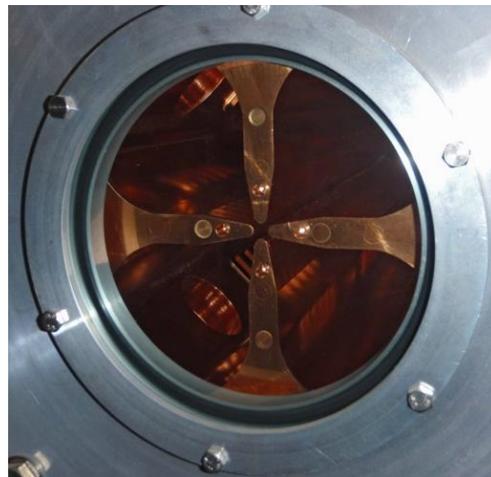
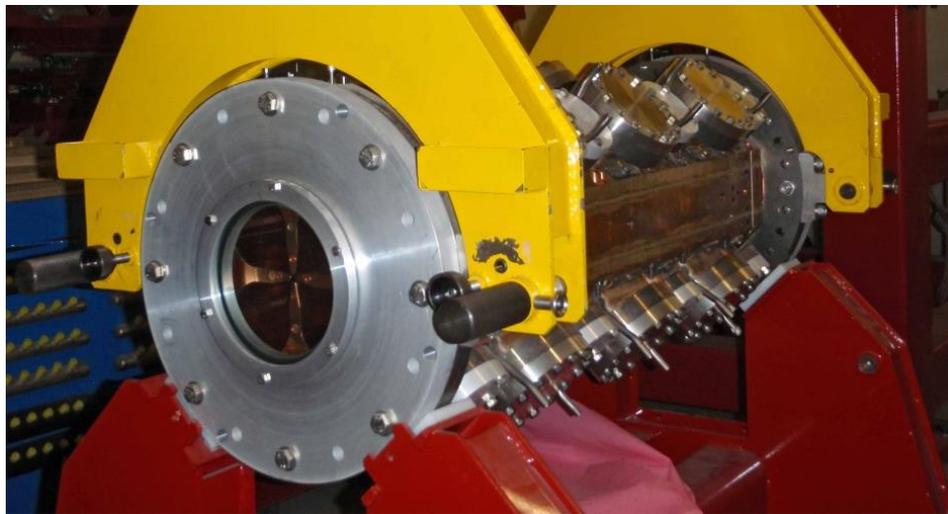


Accélère et focalise en même temps
Utile pour basse énergie
où la charge d'espace est la plus forte



RFQ IFMIF

RFQ IPHI

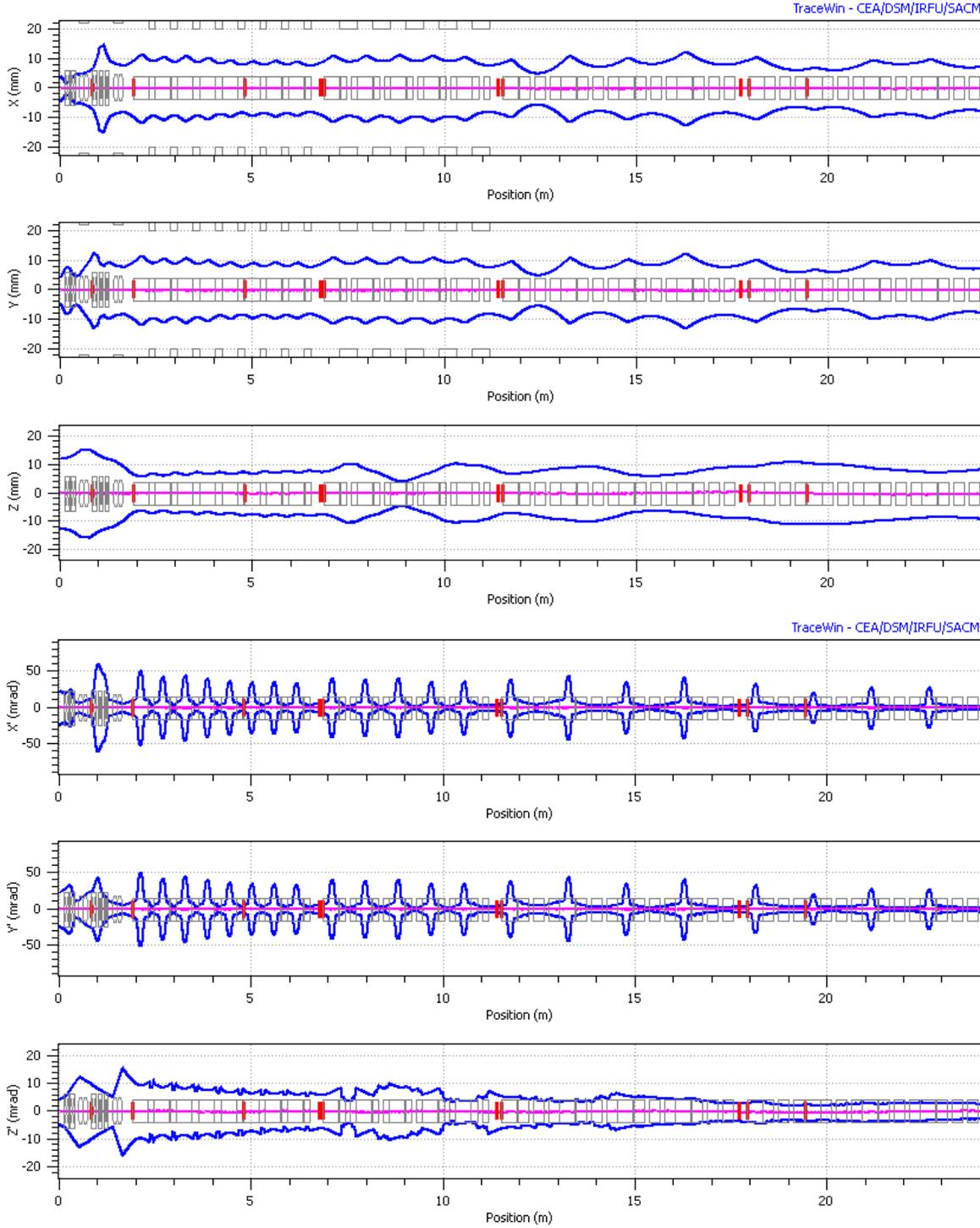


Faisceau à 6 dimensions

3 tailles + 3 angles



Variations des dimensions du faisceau, le long du MEBT + HWR-Linac

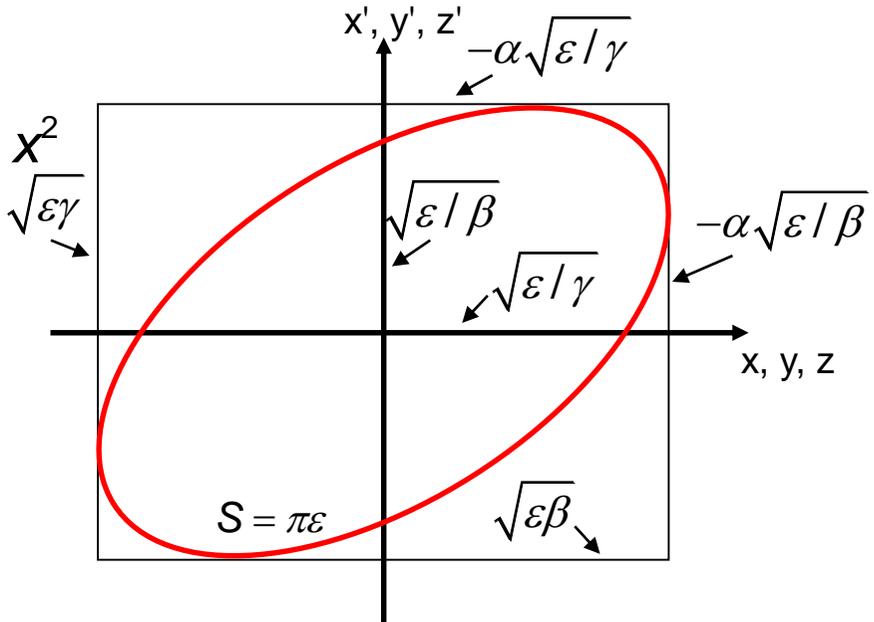


Espace de phase

Ellipse de phase → 3 paramètres : orientation, proportion, taille

Paramètres de Twiss : α, β, γ **et** Emittance ε

$$\alpha = -\frac{\beta'}{2} \quad \gamma = \frac{1 + \alpha^2}{\beta} \quad \varepsilon = \gamma y^2 + 2\alpha y y' + \beta y'^2$$



Ellipse de concentration

$$\langle x^2 \rangle = \varepsilon\beta$$

$$\langle x'^2 \rangle = \varepsilon\gamma$$

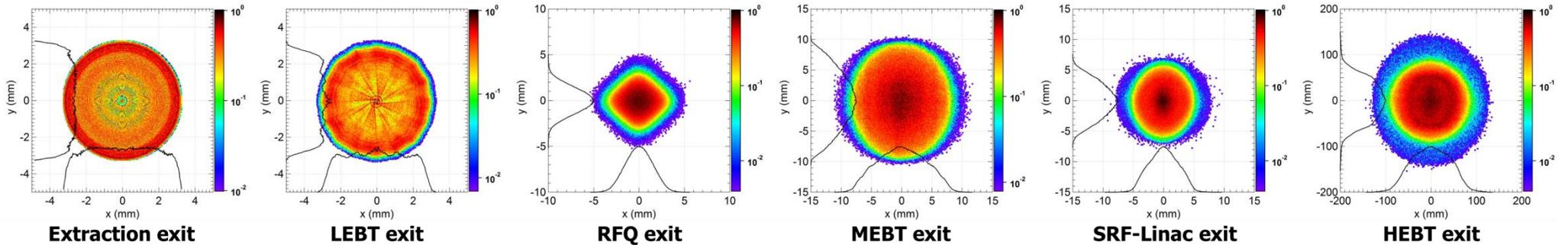
$$\langle xx' \rangle = \varepsilon\alpha$$

$$\varepsilon = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle xx' \rangle^2}$$

Oscillations dans l'espace de phase à 6 dimensions !!

Physique du faisceau

Faisceau dans l'espace transverse le long de l'accélérateur IFMIF



Quelques problématiques

Acc. linéaire : faisceau très intense et puissant,
 \sim MWatt dans \sim cm³, pertes $< 10^{-6}$

Acc. circulaire : résonances et simplecticité
extrême finesse et grande stabilité

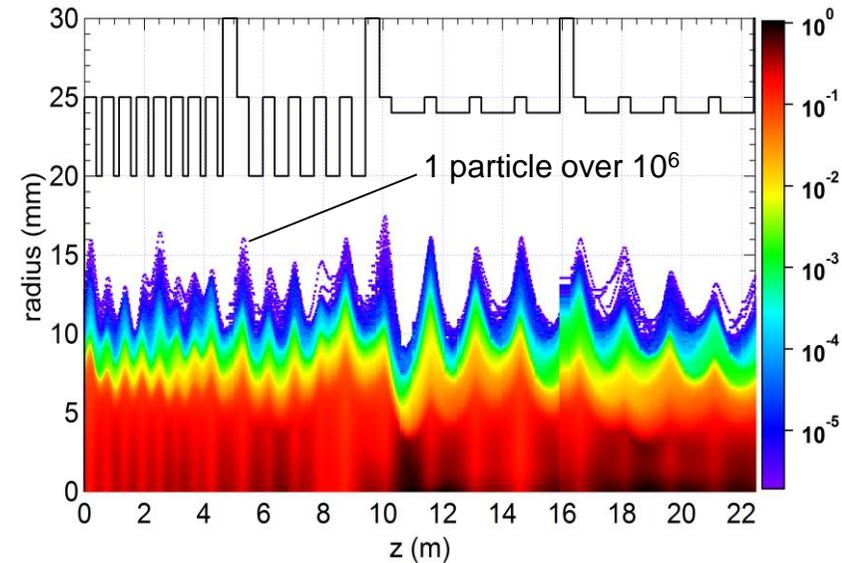
Quelques sujets de recherche

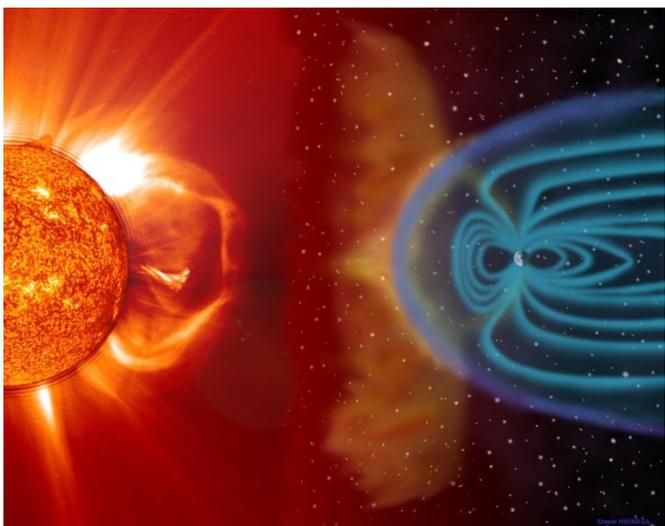
- Aspects fondamentaux du faisceau :

Charge d'espace et compensation, Formation de halo, Instabilités

- Design d'accélérateurs et élaboration de leurs Modèles Théoriques

Optimisation et réglage à 10^{-6} près, Simplecticité





Merci de votre attention

