

DETMES 2025 - Roscoff

Des accélérateurs aux diagnostics faisceaux

F.Poirier

(Deuxième partie)

+

Les diagnostics faisceaux dans leur jus (non vue)

Cyclotrons ($\beta_{\text{ion}} < 0.9$)*

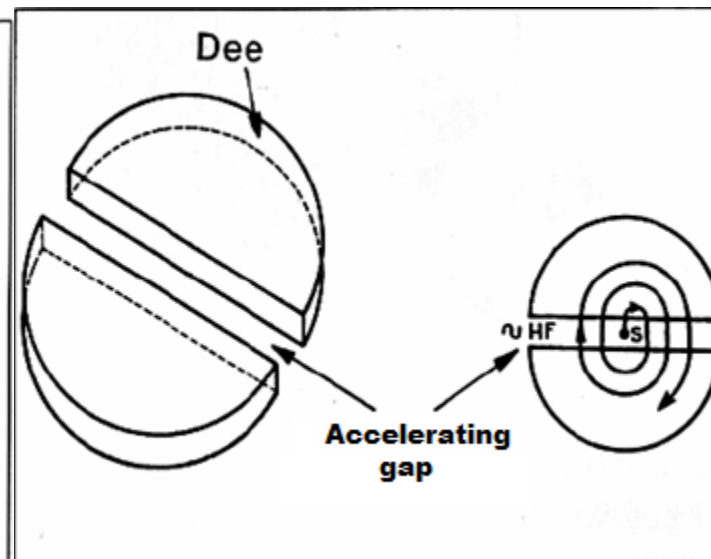
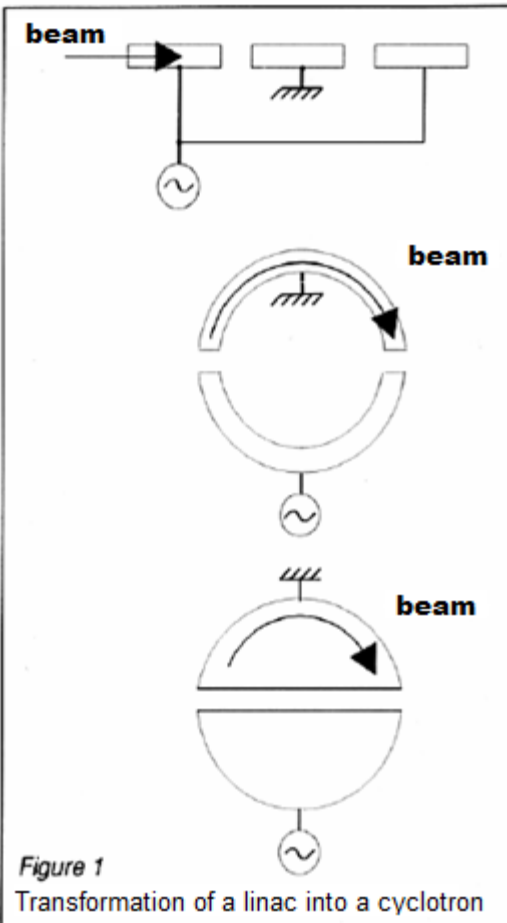
- **Cyclotron Classique ($\beta < 0.2$)**: Les ions sont accélérés entre deux demi-chambres (Dee) où un champ magnétique global \vec{B} courbe leur trajectoire.
 - Ces Dees, sont mis a des tensions différentiels et deviennent donc des électrodes qui permettent l'accélération.
 - Les ions prennent le même temps a tous les rayons pour effectuer leur tours (=fréquence d'accélération fixe).
- **Synchrocyclotron ($\beta > 0.6$)**: La fréquence d'accélération est modulée. C'est-à-dire que la fréquence de base décroît au fur et a mesure que les ions acquièrent de la masse (énergie). Le faisceau d'ions est pulsée.
- **Cyclotron moderne**
 - **Isochrone** pour garder une synchronisation entre le passage des ions et le changement de tension: le champ magnétique augmente avec le rayon
 - **A Champ Azimutal Variant** : Les ions sur un rayon voient le champ magnétique qui passe par des hautes et des basses valeurs. Ceci permet de prendre en compte les limitations des cyclotrons classique et même d'aller jusqu'à $\beta = 0.6-0.8$
- Machines pour Ions de 8-9 MeV jusqu'à ~590 MeV. Pas pour les électrons.
- Existence de projets pour des cyclotrons a 1 GeV.

* $\beta = v/c$ ($c = 2.998 \cdot 10^8$ m/s, célérité de la lumière)

From linear to Cyclotrons

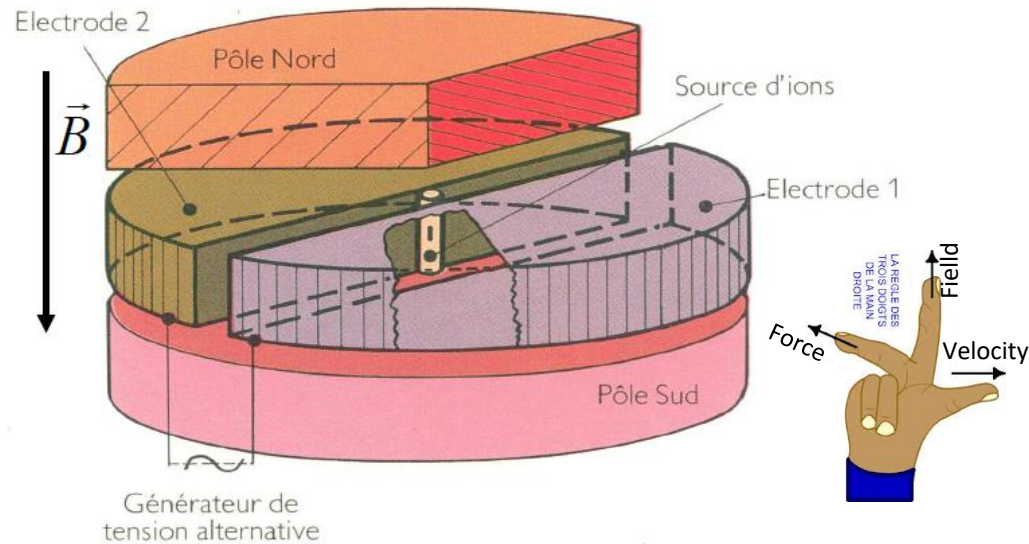
L'idée du **cyclotron** a été inspirée O E. Lawrence (1931) par les **séquences successives d'accélération** imaginées par R. Wideröe (1923) pour les linacs

Les cyclotrons dit **classiques** sont basés sur un **champ magnétique statique et uniforme B**. Il est appliqué perpendiculairement aux électrodes en forme de D (« dees»). Ces D voient une tension **RF** dont la fréquence correspond à une fréquence de révolution constantes des ions non (ou peu) -relativistes.



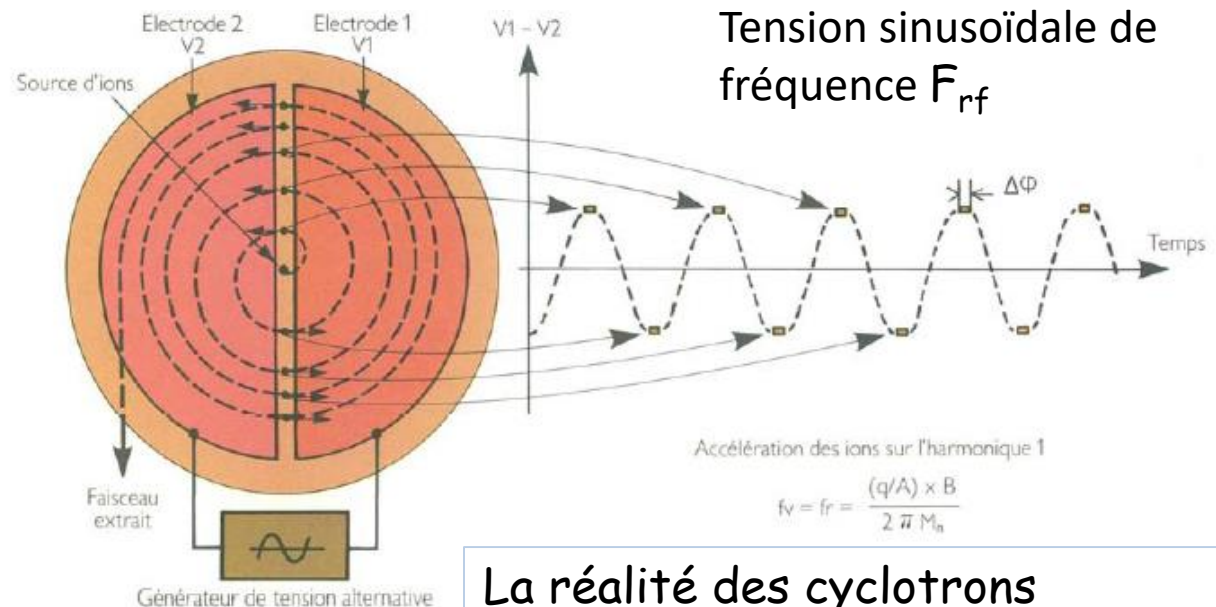
On peut parler ici de demi-camembert --- ;)

Cyclotron classique



- Champ uniforme perpendiculaire au mouvement et indépendant du temps
- Electrodes semi-circulaire, tension alternative à une fréquence F_{rf}

L'ion est créé dans une source ici localisée au centre et est accéléré répétitivement selon une trajectoire en spirale, ($m = \gamma m_0$ augmente) à cause de l'énergie cinétique qui augmente: Les particules avec le plus grand rayon sont les plus énergétiques



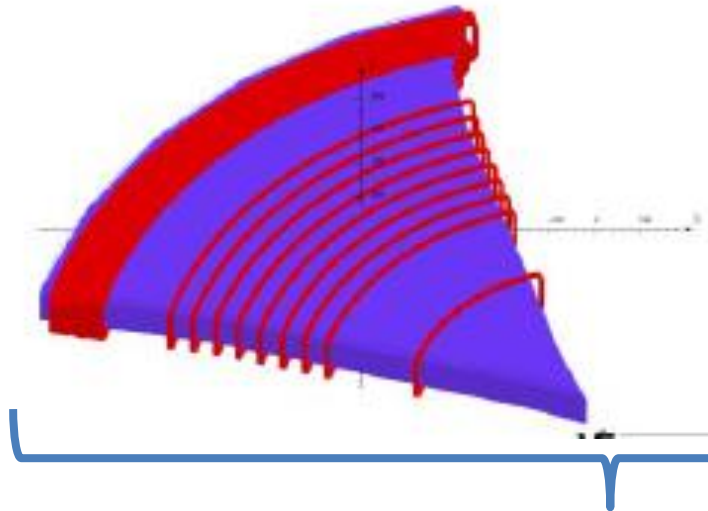
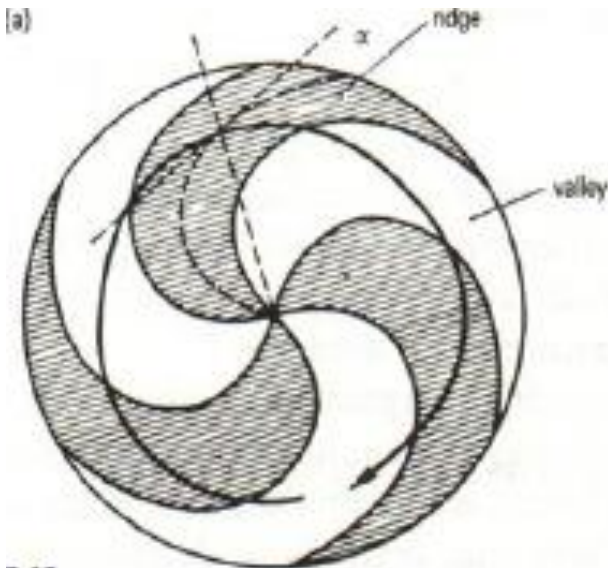
La réalité des cyclotrons d'aujourd'hui est plus complexe

Cyclotrons modernes

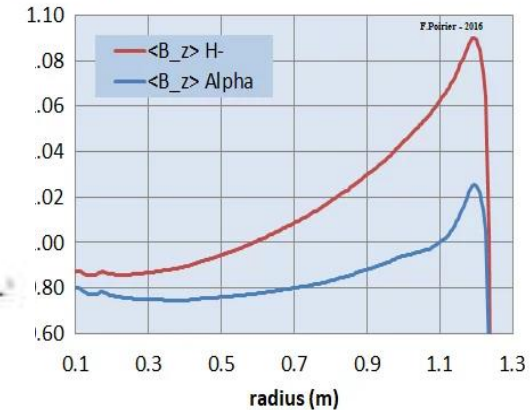
- Pour garder l'**isochronisme** (synchronisation entre la fréquence machine et le passage des ions) le **champ magnétique B doit être modifié** quand γ augmente
 - Deux manières de procéder (pas complètement identiques):
 - Adaptation de la forme du champ magnétique (forme de spirale)
 - Et/ou ajout de bobines pour augmenter localement le champ

$$m = \gamma \cdot m_0$$

Cyclotrons adaptés pour l'isochronisme



Average B-Field of the C70XP - Arronax

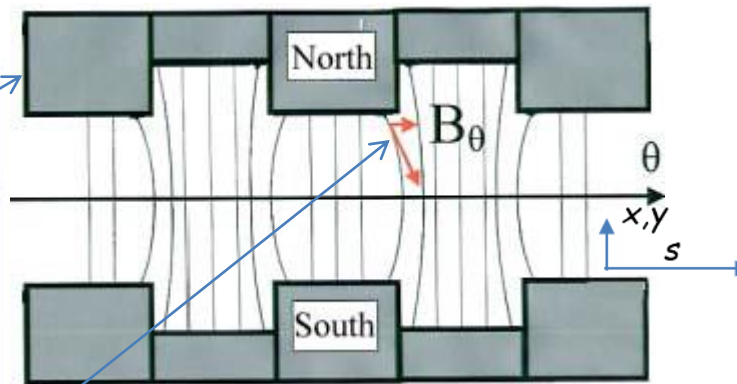
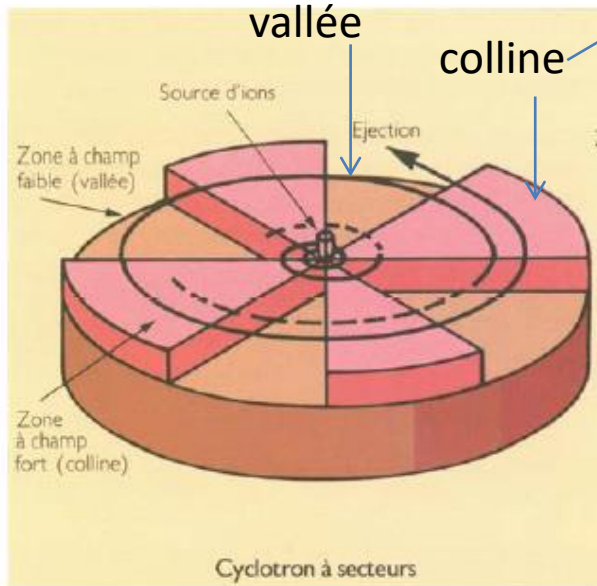


Par exemple: Le C70 d'ARRONAX (Nantes) est un cyclotron à 4 secteurs avec des bobines de compensation. Il atteint $E_k \sim 70 \text{ MeV}$.

AVF Cyclotrons (1)

- Pour obtenir de la **focalisation transverse**:
 - Et maintenir les ions à l'intérieur du cyclotron
 - Utilisation d'une **succession de champs faibles et forts** (vallées et collines). Ce sont des **cyclotrons à secteurs** avec un **champ azimuthal Variant (AVF)**

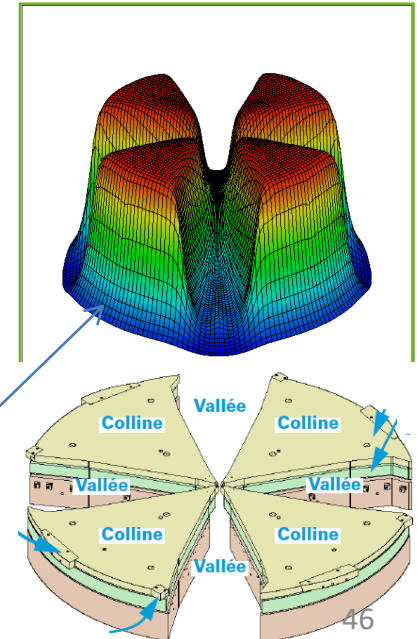
2) Cyclotrons à secteurs



Introduction d'une composante globale de focalisation dans le champ azimuthal

colline, champ fort

Champ simulé du C70 d'Arronax

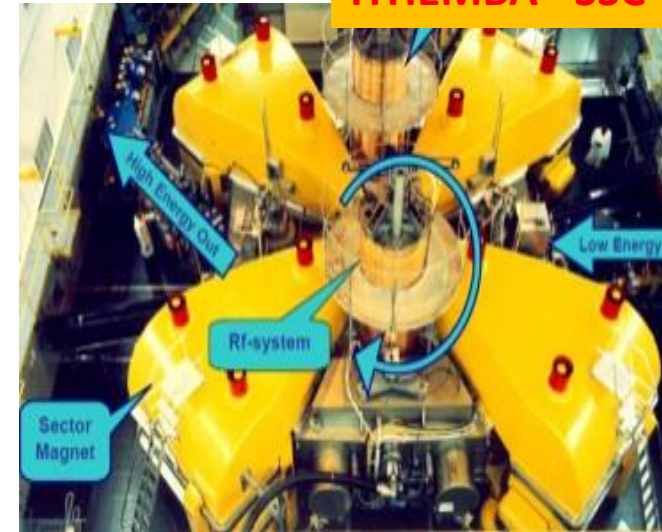


Quelques Cyclotrons

CYCLOTRONS pour protons:

- C70 ARRONAX - AVF, France - 70 MeV, 750 μ A
- iThemba - SSC, South Africa - 66 MeV, 300 μ A
- PSI - inj2, Switzerland - 72 MeV, 2.2 mA
- TRIUMF, Canada - 65 MeV, 100 μ A
- CNL, US - 68 MeV, 15 μ A
- K70 riken, Japan - 70 MeV, ? μ A

ITHEMBA - SSC



C70 ARRONAX

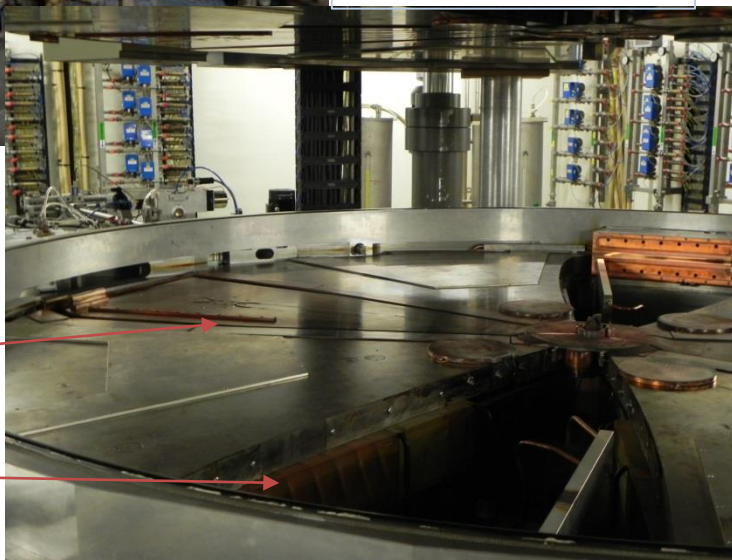


Cyclotron ouvert

Cyclotron à secteurs

Cavité pour l'accélération

Bobines pour le champ



PSI – inj2



Cyclotron à secteurs séparés

Plus haut: Application répétée de champs électriques variant

$$\beta_l < 0.2$$

$$\beta_l > 0.2$$

$$\beta_l = \sim 1$$

Proton et autres ions

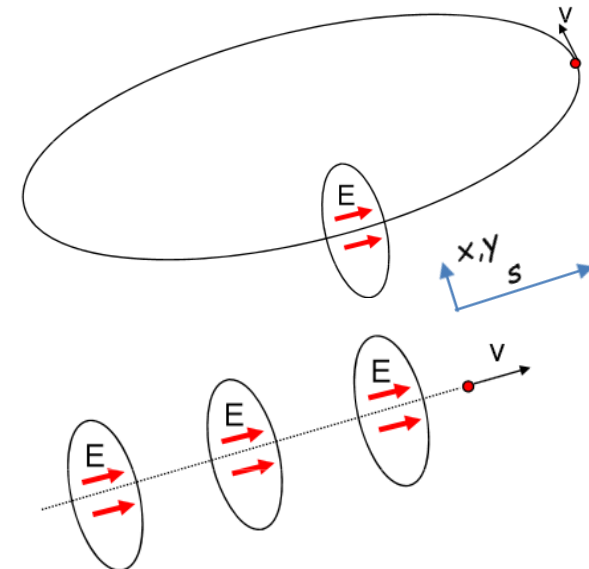
Electron (très rapidement relatif)

LHC cryostat de 4 cavités



Deux approches:

- **Synchrotron**: Les particules sont maintenues sur une trajectoire circulaire unique (contrairement au cyclotron). Il y a aussi quelques sections droites. La fréquence et la force des aimants sont ajustées en fonction de l'augmentation de l'énergie cinétique. → Largement utilisé pour les accélérateurs de haute énergie
- **Accélérateur Linéaire (linacs)**: machines dites "droites". Elles emploient l'idée de donner une impulsion aux particules chargées plusieurs fois. Ceci demande un potentiel alternatif. Les faisceaux sont systématiquement des paquets. Le champ électrique est généré par une Radio-Fréquence (RF).



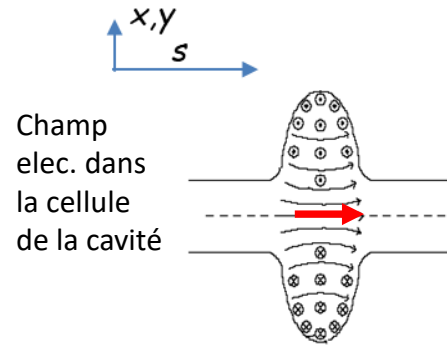
- **Gain en énergie**

$$\Delta W = \sim q V_{acc} \cos \phi$$

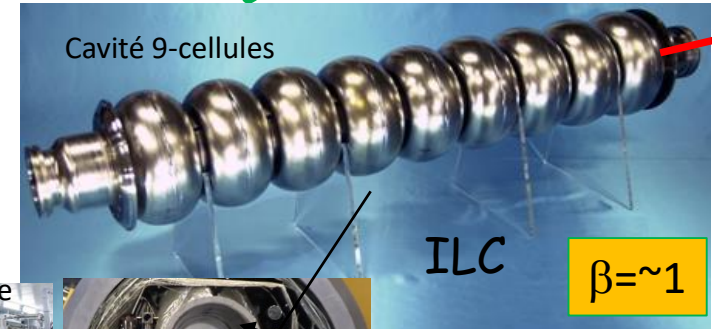
- Plusieurs paramètres sont aussi introduit dans le calcul du gain en énergie (toujours une simplification):
- ϕ est la phase synchrone, ici mesuré par rapport au maximum de la sinusoïde
- L'amplitude de la tension V est la composante importante de l'apport en énergie mais nous n'avons accès qu'à une partie de celle-ci (il y a un ratio en plus).



Cavités Cool-ed (Supraconductrice)



Cavité refroidie=moins de perte de puissance et donc moins besoin d'apporter de la puissance électrique au faisceau. Pour 3MV, $P_{\text{chaud}}=225\text{kW}$, $P_{\text{supra}}=0.75\text{W}$



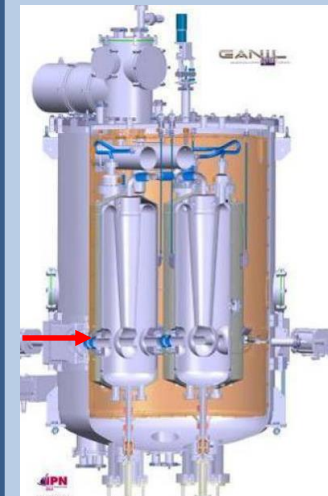
Tuyau de retour helium 1.9K



faisceau

- Cavité dite « SRF », placée dans un **cryomodule supraconducteur (SC)** soit à $\sim 2\text{-}4\text{K}$
 - 9-cellules Nobium - haut β , Plusieurs accélérateurs:
 - XFELs
 - le collisionneur linéaire international (projet futur: ILC). L'ILC disposera de ~ 16000 cavités d'1m de long (1.3 GHz)
 - SRF du GANIL - bas β : 1 et 2 cavités
- Avantages du SC:
 - **Moins de dissipation de puissance** que l'équivalent « chaud » soit des opérations moins chère
 - ILC:
 - Possibilité d'accélérer à haut cycle ($>1\%$) et **haut champ électrique** ($>31\text{ MV/m}$)
 - **Ouverture des iris large** i.e. moins d'activation s'il y a perte de particules et moins de « wakefields » (vague de traîne) induites
- Technologie de plus en plus utilisée mais:
 - Fabrication compliquée, technologie très sensible aux pertes de particules, système cryogénique

SRF du GANIL



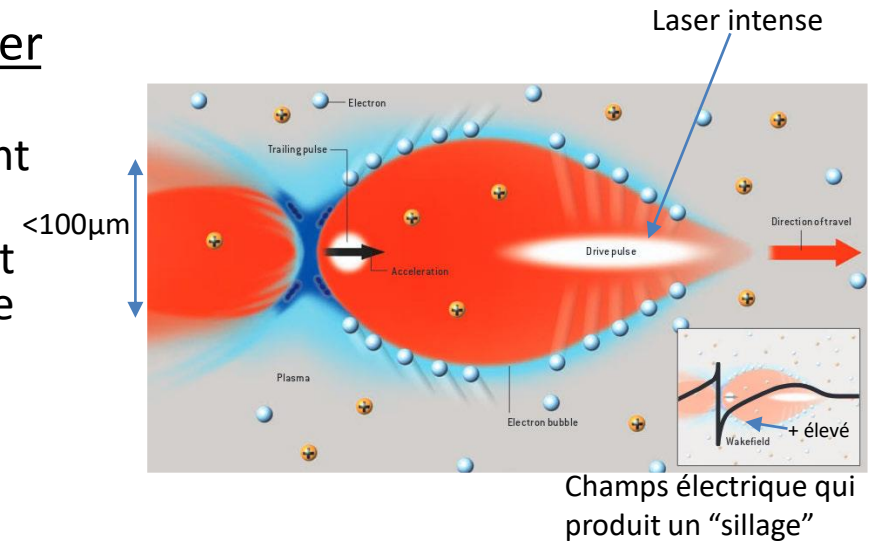
Cryomodule de 2 cavités,

$\beta=0.12$, 8MV/m

Autres Accéléérations

Laser-plasma: utilisation d'un laser pour créer un champ accélérant dans un gaz ionisé

- Le Gaz est généralement léger et globalement neutre
- Le laser modifie la densité électrons, qui sont alors réorganisés → création plasma et d'une onde plasma
 - Un **champs électrique** longitudinal est créé
 - Jusqu'à plusieurs 100 GeV/m
- Injection d'e- qui sont accéléré

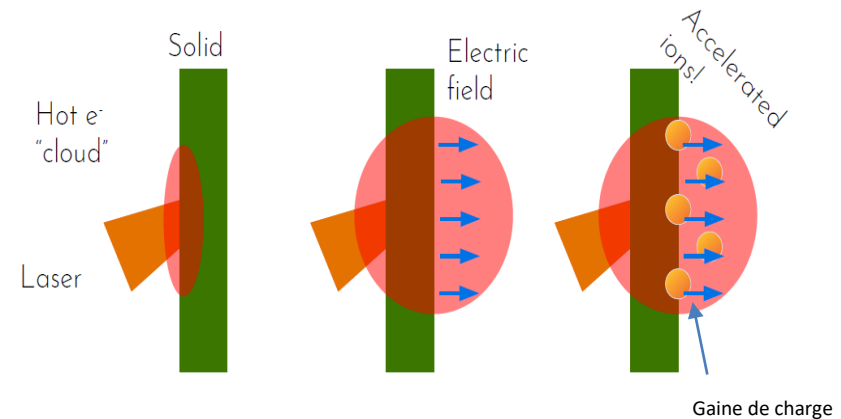


Champs électrique qui produit un "sillage"

TNSA (Target Normal Sheath Acceleration):

Acceleration a gaine normal a la cible

- Laser tape sur une cible
- Des e- chaud sont créés dans un plasma devant la cible, sont envoyés vers l'arrière de la cible et en sortent
- Induit un champ électrique de l'ordre de plusieurs teravolts par mètre
- Ionisent les atomes a l'arrière de la cible et les accélèrent (z-normal a la surface)



Laser-plasma:

S.P.D. Mangles & al. Nature 431 (2004)

C.G.R. Geddes & al. Nature 431 (2004)

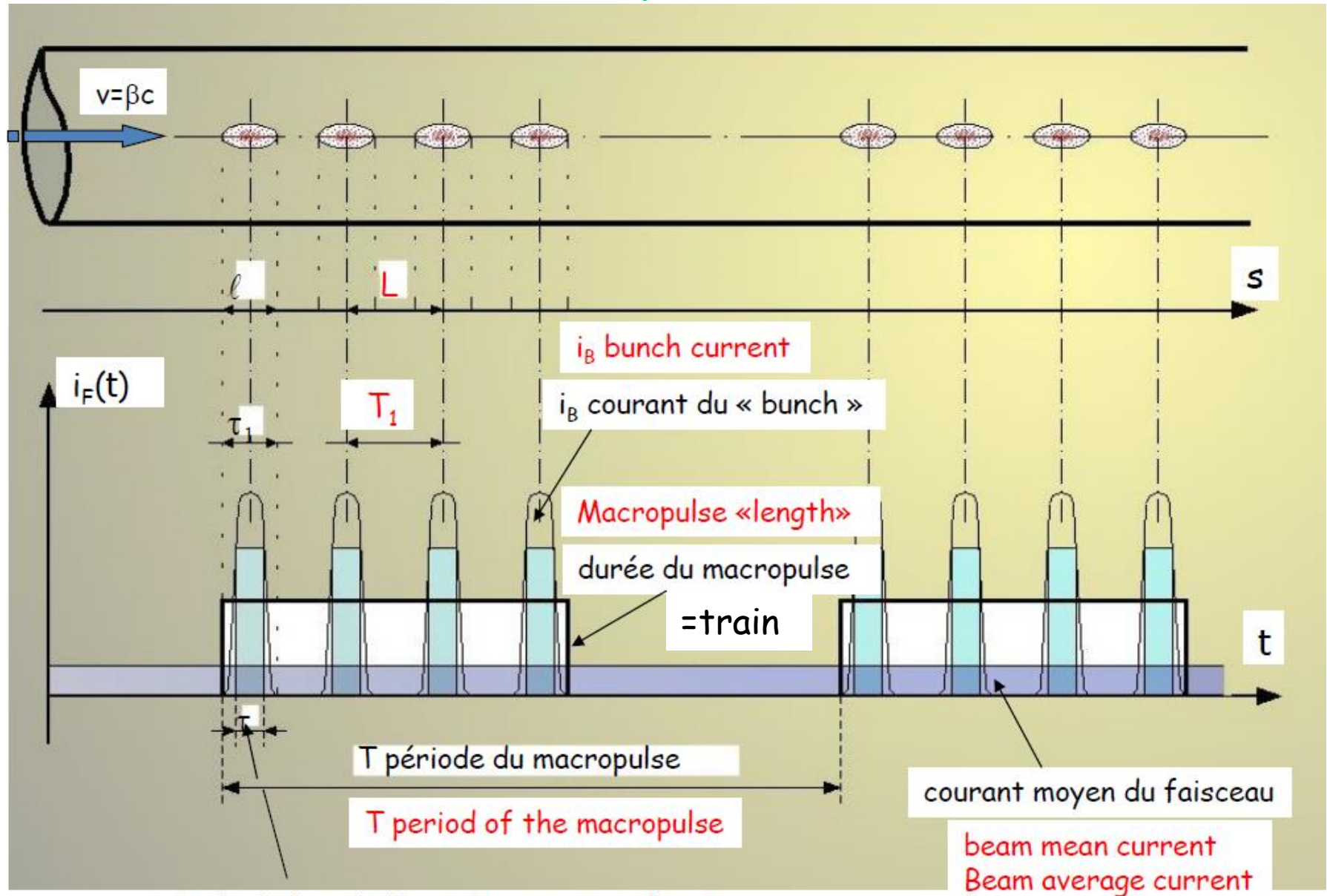
J. Faure & al. Nature 431 (2004)

TNSA:

S. C. Wilks et al., Energetic proton generation in ultra-intense laser-solid interactions

- Les attributs des accélérateurs que l'on a vu vont poser des contraintes quand à la capacité de mesurer les caractéristiques du faisceau:
 - Opération (gamme de nA à mA)
 - Puissance (gamme de W à MW)
 - Energie $\rightarrow \beta, \gamma$ (gamme)
 - Fréquence, répétition, rapidité de collection

La structure temporelle du faisceau

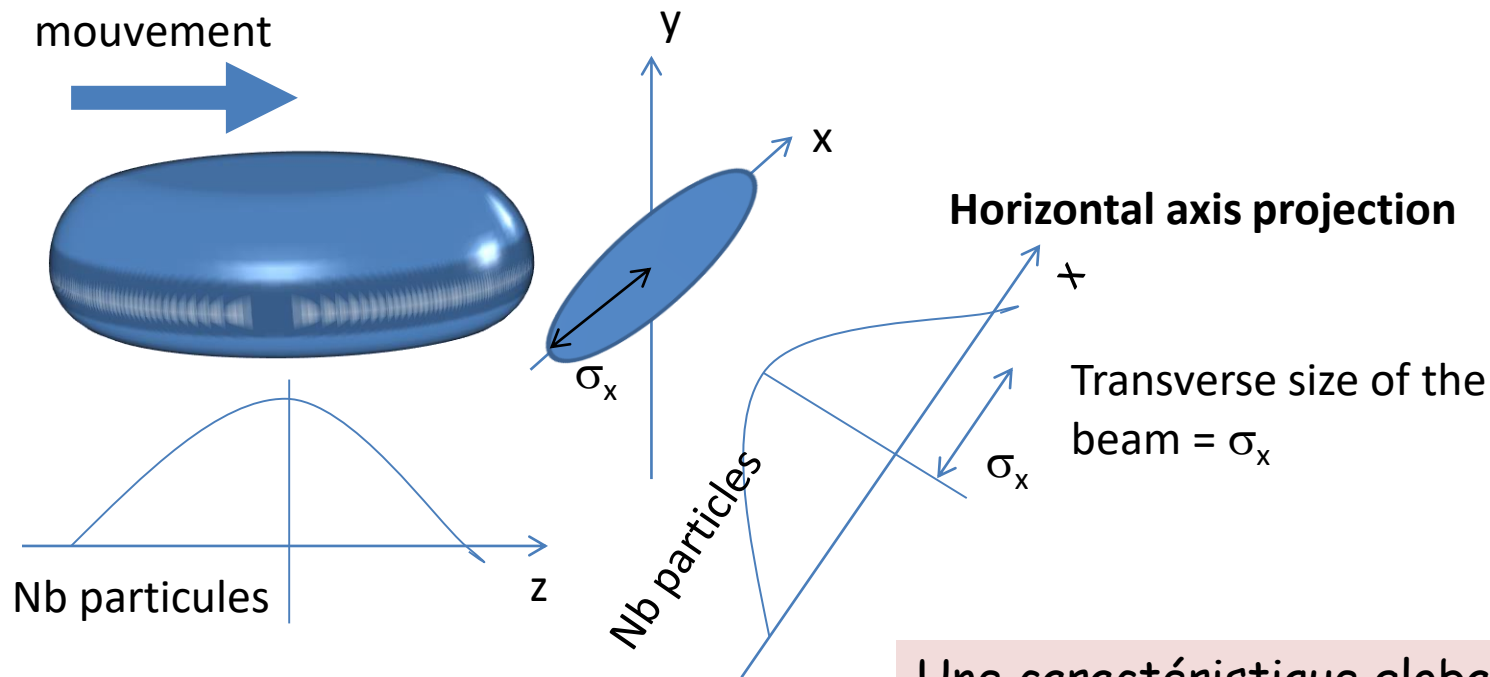


τ durée du bunch (équivalent rectangulaire)

Caractéristique d'un paquet

- Un paquet de particules a des dimensions (statistique) $\rightarrow \sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$. En plus, le paquet a une divergence angulaire, une énergie cin. (moyenne), un nombre de particules. Ceci définit un paquet à une position donnée dans l'accélérateur

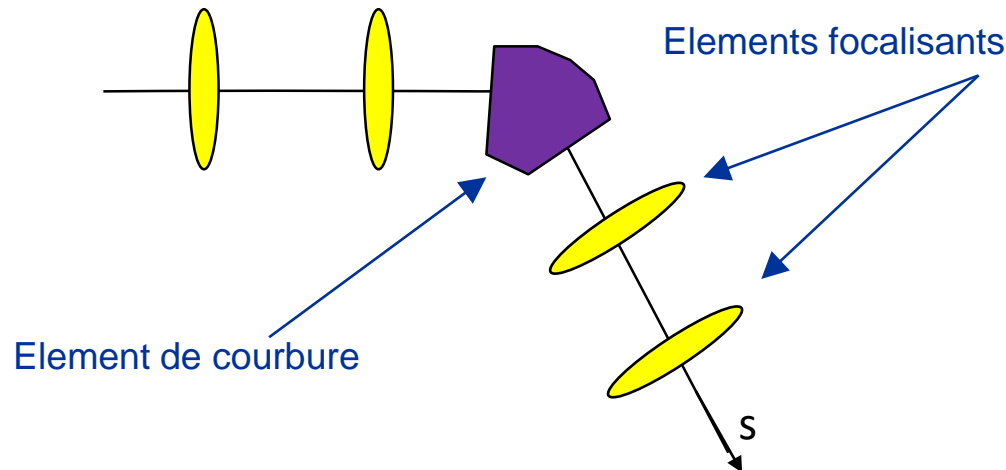
horizontal and vertical axis projection



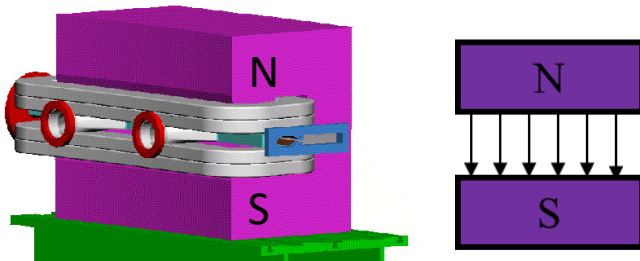
Une caractéristique globale prends en compte ces paramètres $\langle x \rangle, \langle x' \rangle \rightarrow$ **émittance**. (voir plus tard)

Elements magnétiques

- Non seulement un accélérateur est constitué d'éléments accélérant (!!!) mais aussi d'éléments magnétiques

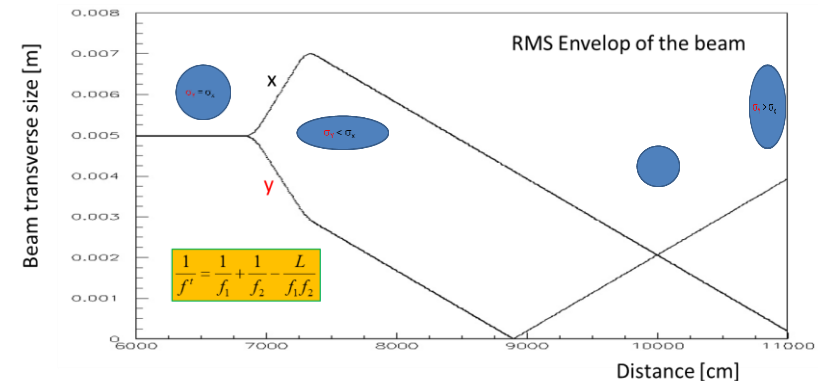
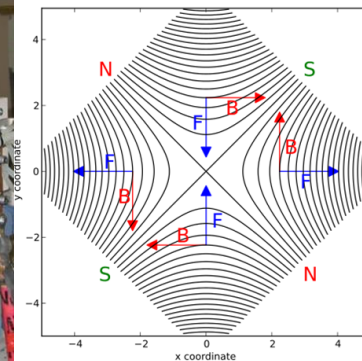
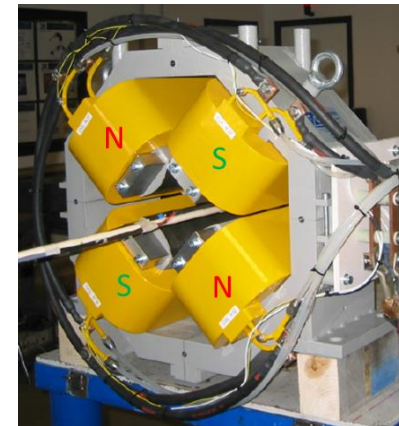


Dipole: courber la trajectoire



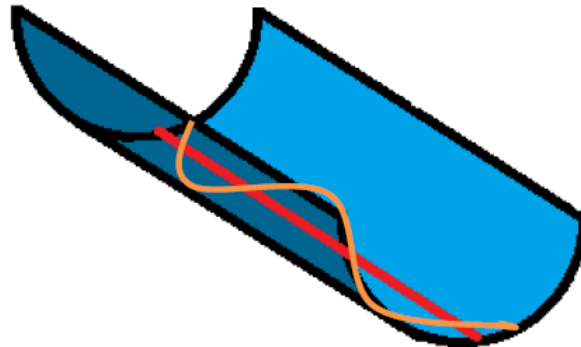
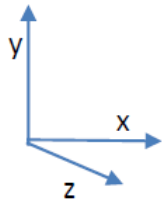
Ce ne sont pas les seuls éléments: sextupoles, Octupoles.

Quadripôle: modifier la taille transverse



Mouvement (1)

- Imaginez que vous laissez tomber une bille dans une gouttière (halfpipe) avec une pente gravitationnelle (ici équivalente à un aimant):
 - La bille oscillera autour de la trajectoire idéale



- Bille:
 - Vous pouvez facilement imaginer que la trajectoire de la bille va dépendre de ses propres caractéristiques (vitesse, forme, ...)
 - Mais aussi des caractéristiques de la gouttière (courbure, longueur, ...)
- Pour une particule dans une distribution d'aimants (« lattice »), cela sera presque la même chose:
 - Particules vont osciller autour de la trajectoire idéale
 - Les éléments périodiques de la lattice vont créer ce mouvement

L'équation du mouvement (eq. de Hill) peut être écrite:

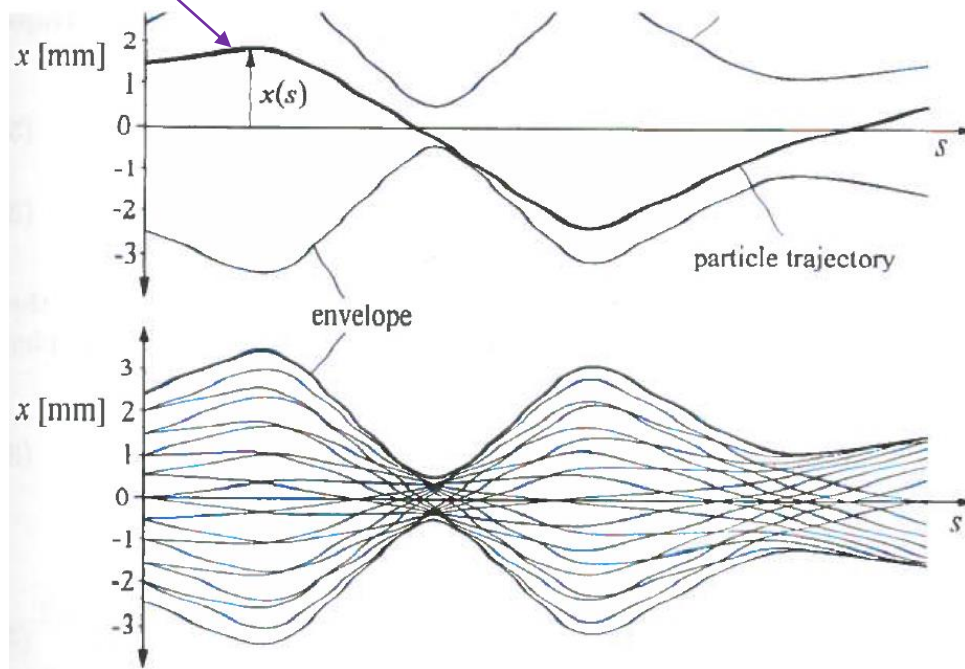
$$x'' + K(s)x = 0$$

ou $K(S)$ est la force du quadripôle et est périodique i.e. $K(S)=K(S+2d)$

La solution de cette équation traduit le mouvement des particules dans nos champs magnétiques

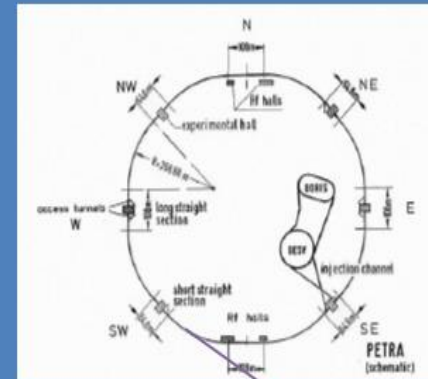
Mouvement (2):

$$x(s) = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x(s)} \cos(\phi(s) + \phi_0) *$$

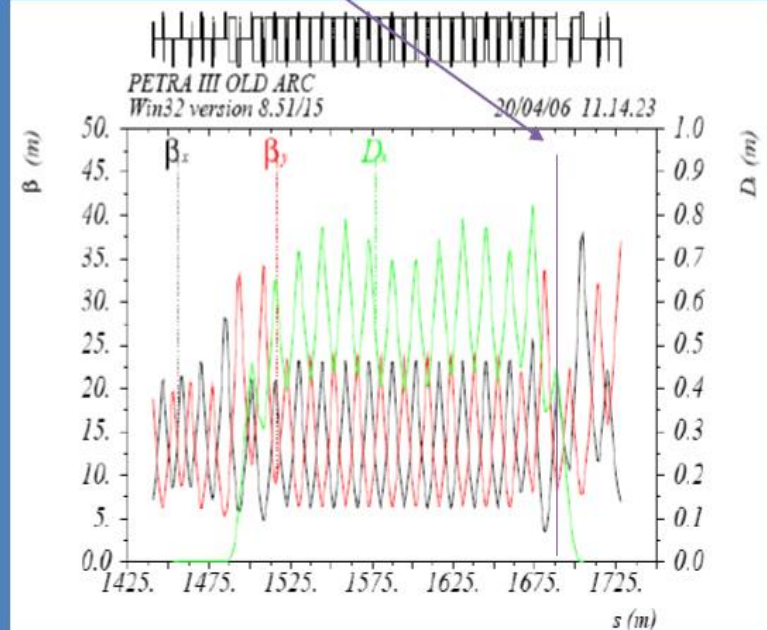


- La trajectoire d'une Particule est confinée dans une enveloppe c.à.d. que le faisceau est fait d'une **combinaison de l'ensemble des trajectoires des particules**.
- Ceci dépend de la **succession de focalisation/défocalisation** eg. des quadripôles dans la ligne

Exemple de fonction de focalisation (PETRA III)



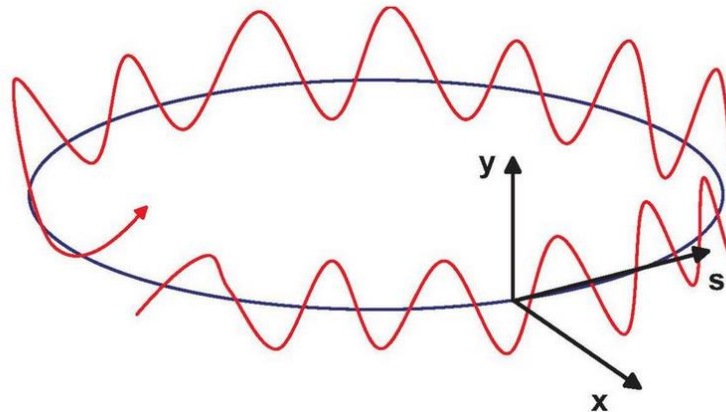
2304 m of
circonference



*solution de l'équation de Hills précédente avec ε l'émittance et $\beta(s)$ la fonction d'amplitude (beta function) qui dépend de la focalisation. A ne pas confondre avec le β_l de Lorentz.

Mouvement (3)

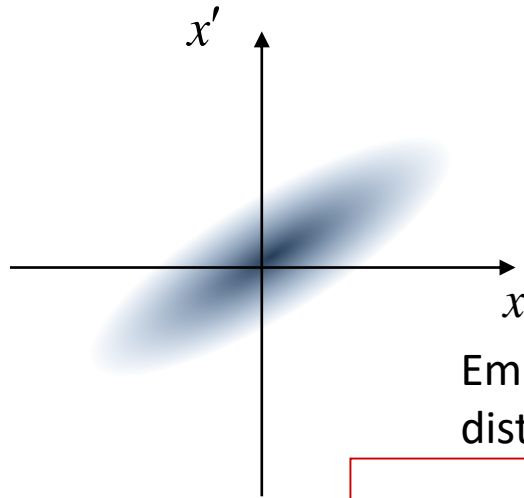
- Oscillation pseudo-sinusoidal dans un anneau
- Le nombre d'oscillations par tour = “tune Q ”: marqueur de l'ensemble des éléments magnétiques



$$Q = \frac{1}{2\pi} \oint_C \frac{ds}{\beta(s)}$$

→ Oscillation Bétatron

Emittance Transverse



Emittance RMS selon
distribution en x et x'

$$\mathcal{E}_{rms} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2}$$

- Emittance=
 - Est une caractéristique fondamentale du faisceau (dimensionnement . divergence)
 - Souvent (pas toujours) = **qualité** du faisceau
 - C'est l'espace de phase (aire) occupé par l'ensemble des particules, divisé par π

Emittance géométrique = aire

$$\mathcal{E}_w = \frac{A_{ww'}}{\pi} \quad w = x, y$$

Dans les collisionneurs, nous cherchons à avoir l'émittance la **plus petite possible** et si possible dès la source car elle est transportée dans tout l'accélérateur (~invariant*)

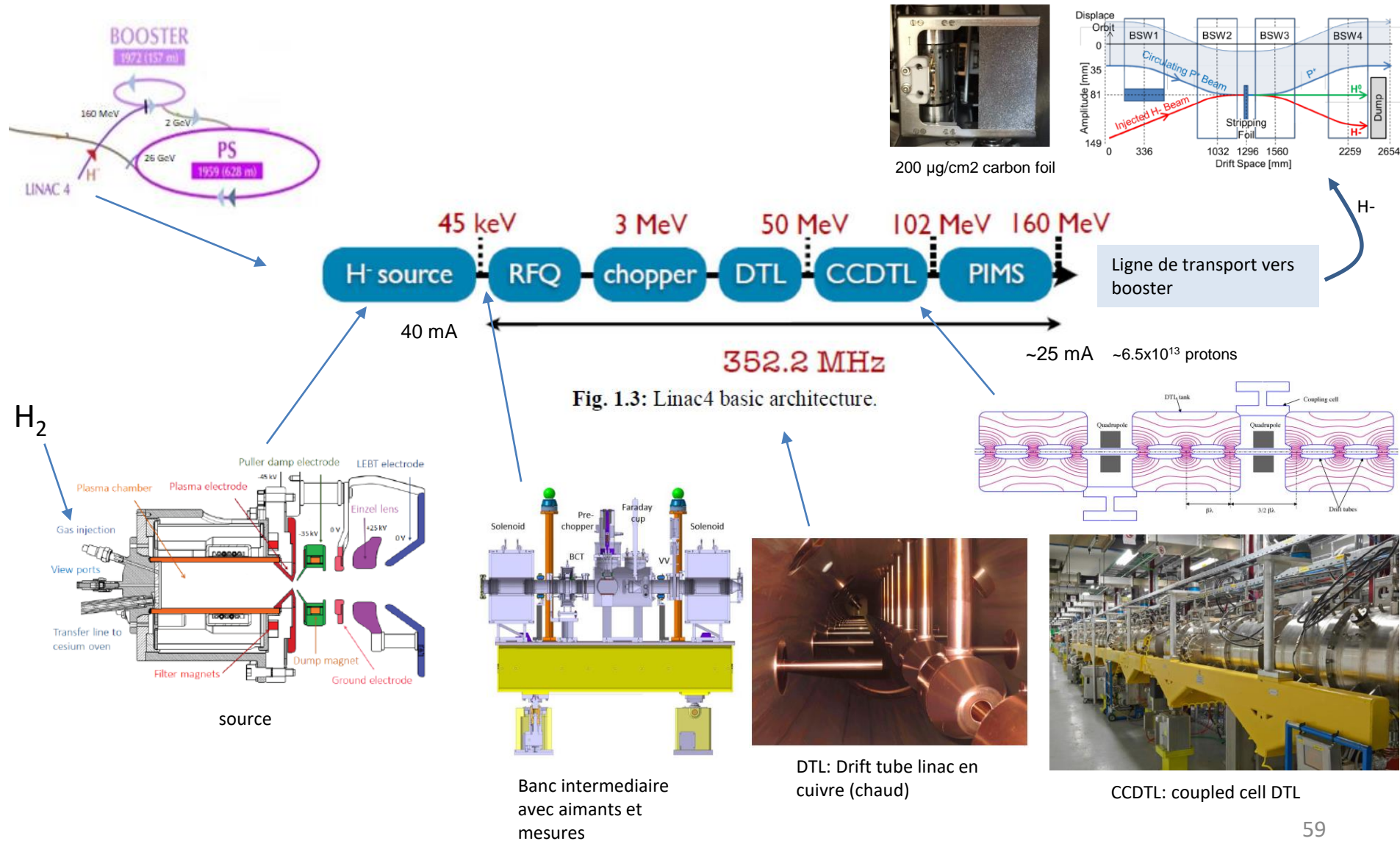
Elle va définir la taille du faisceau dans tout l'accélérateur et aussi et surtout au point d'interaction

Ex. d'unité employée: $1 \text{ mm} \cdot \text{mrad} = 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{rad} = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} = 10^3 \text{ nm}$

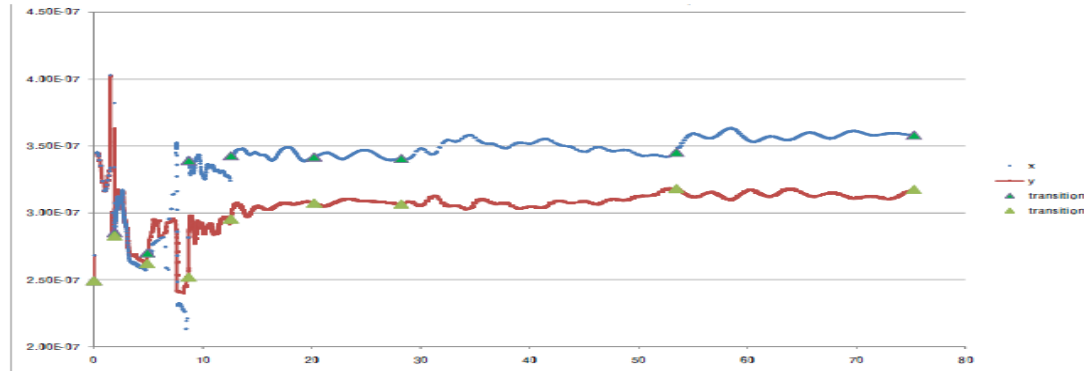
Emittance normalisée, $\varepsilon_n = \beta_L \gamma_L \varepsilon$, ne varie pas avec l'énergie

* Pas complètement vrai eg s'il y a des pertes

Un injecteur: linac 4



L'émittance dans le linac4



Emittance
transverse
nominale le long
du linac4

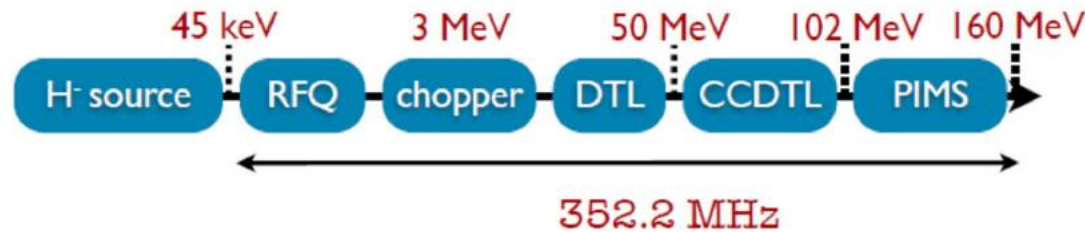
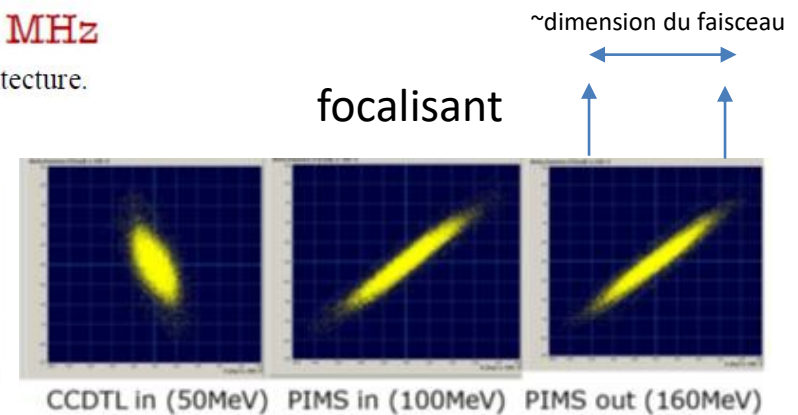
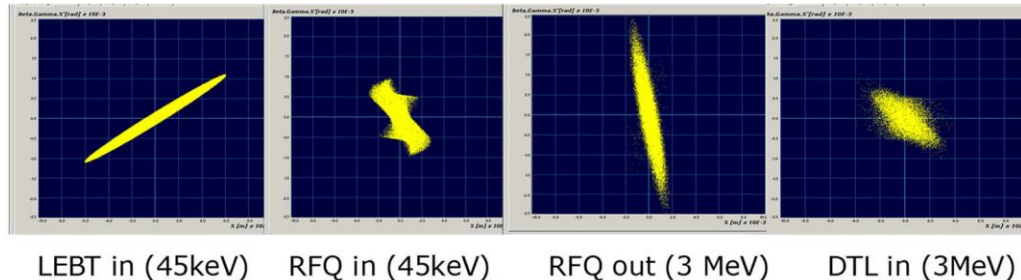


Fig. 1.3: Linac4 basic architecture.

Espace de phase (emittance) le long du linac4



defocalisant

focalisant

Luminosité (collisionneur 2 f)

- Afin d'obtenir une luminosité instantanée L élevée (et donc un grand nombre d'interaction), il faut des faisceaux très petits aux points de collisions (IC)

Où:

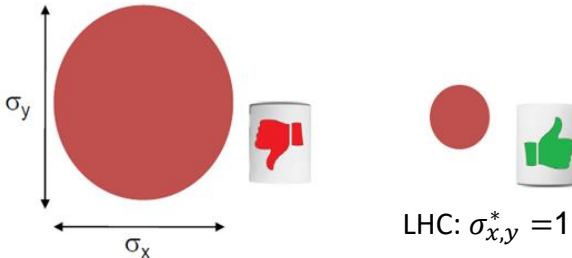
n_b = nombre de paquet

N = particules par paquet

f_{rep} = fréquence de répétition

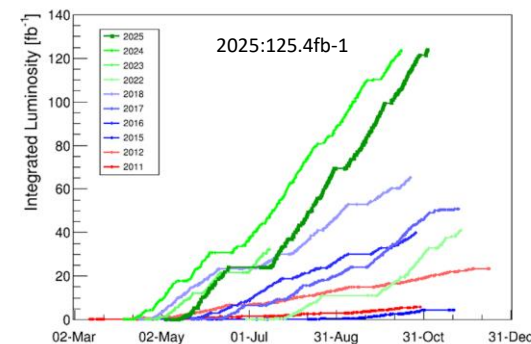
$\sigma_{x,y}$ = taille transverse (gaussien)

R_D = facteur d'ajustement géométrique
(ex: Xing, sablier)

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


LHC: $\sigma_{x,y}^* = 16.6 \mu\text{m}$

$$L_{\text{peak (design)}} = 1.18 \cdot 10^{34} \text{cm}^{-2}/\text{s}$$



Donc on va chercher à rétrécir (densifier) les faisceaux.

Ceci dépend fortement de l'emittance initiale et de ce qu'il s'est passé dans l'accélérateur car

$$\sigma_x^* = \sqrt{\varepsilon_x^* \beta_x^*}$$

Emittance a l'IC

Focalisation
a l'IC

Où:

$\beta_{x,y}^*$ = vient des aimants de focalisation (fonction Beta) a l'IC

$\varepsilon_{x,y}^*$ = émittance du faisceau a l'IC

En vrai il y a un autre terme supplémentaire par exemple $\sigma_x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x + \rho \delta}$ mais on le fait tendre vers 0 a l'IC avec $\rho \delta_{x,y}$ = fonction de dispersion (ρ) et l'étendu (spread) du moment = 0

Que veut-on mesurer?

- **L'intensité du faisceau:** la quantité de particules par unité de temps et par extension le nombre de charge / seconde ($[C/s] = [A]$ intensité)
- **Les pertes faisceau** le long de l'accélérateur
- **Le profil du faisceau:**
 - Transverse soit la taille (largeur/hauteur) à un endroit dans l'accélérateur
 - Longitudinale (le long de l'axe de l'accélérateur) \sim la longueur d'un paquet
- **La position transverse du faisceau (centroïde):**
 - Est-il sur la trajectoire voulu? Se trouve t-il déplacé?
- **L'émittance:**
 - Est-elle conforme à l'attendu?
- **L'énergie du faisceau (distribution de l'énergie)**
- **Nombre de masse & état de charge**
- **Valeur tune Q** (machine circulaire) soit le nombre d'oscillations bétatrons: le but ici est de mesurer s'il y a des erreurs d'optiques
- D'autre paramètres peuvent être mesurés: ex chromaticité (soit est-ce que l'optique change en changeant un peu l'énergie?)

Comment mesurer les paramètres principaux des faisceaux

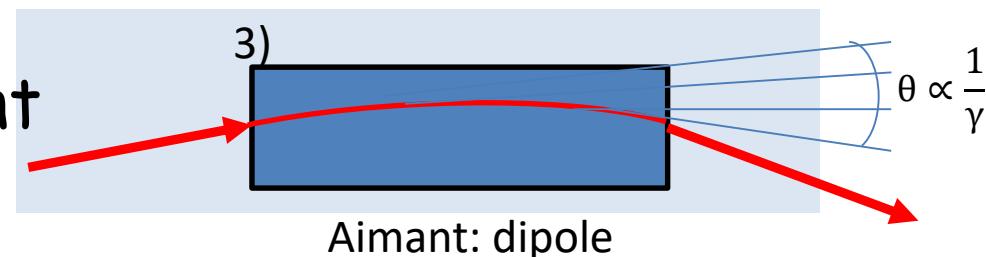
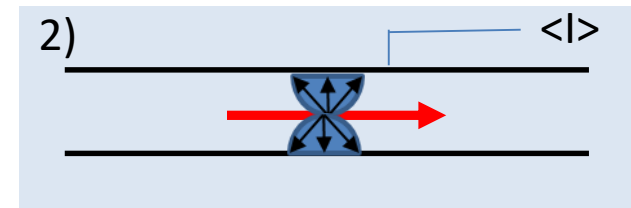
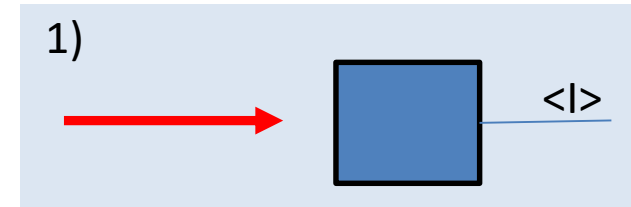
- On va employer un détecteur associés possiblement à d'autres éléments (ex: fente, aimants,...):
 - Dans le jargon, on parle plus souvent de "Diagnostics Faisceau"
 - Ou même de l' "Instrumentation Faisceau" - rassemble le détecteur et ses composantes jusqu'à la chaine de mesure dédiée.
- Le diagnostic peut être
 - interceptif : il va arrêter le faisceau
 - perturbatif : il va modifier légèrement le faisceau
 - Sans impact: Le faisceau n'est aucunement modifié
- Pour la mesure, on va donc employer les propriétés physiques du faisceau:
 - Rayonnement émis par les particules
 - Interaction des particules avec la matière
- Les types des diagnostics que l'on emploie sont très dépendant de l'accélérateur:
 - Panel large ici, pas employé sur les mêmes machines

Dans la suite

- Diagnostics:
 - Mesure de charge et mesure intensité du faisceau:
 - Coupelle de faraday
 - Transformateur de courant →
 - ACCT (Alternating Current Current Transformer)
 - DCCT (Direct Current Current Transformer)
 - Longueur du paquet
 - Mesure de courant de paroi
 - Temps de vol
 - Mesure de position (BPM)
 - Mesure de profil
 - Ecran/caméra
 - Fil
 - Rayonnement synchrotron
 - Laser
 - Amplification et Mesure d'intensité: microchannel
 - Mesure d'émittance
 - Mesure de perte faisceau
 - Mesure de luminosité
 - Quelques autres diagnostics du moment
- Généralité sur l'intégration, la protection machine

Principes généraux de ces diagnostics

- 1) Interaction matériaux:
Dépôt dans un bloc de matière (solide/gazeux):
les coupelles de faraday
- 2) Rayonnement: Mesure du champs induit ou du courant circulant dans les parois d'un tube à vide
- 3) Mesure du rayonnement synchrotron



Mesure de charge

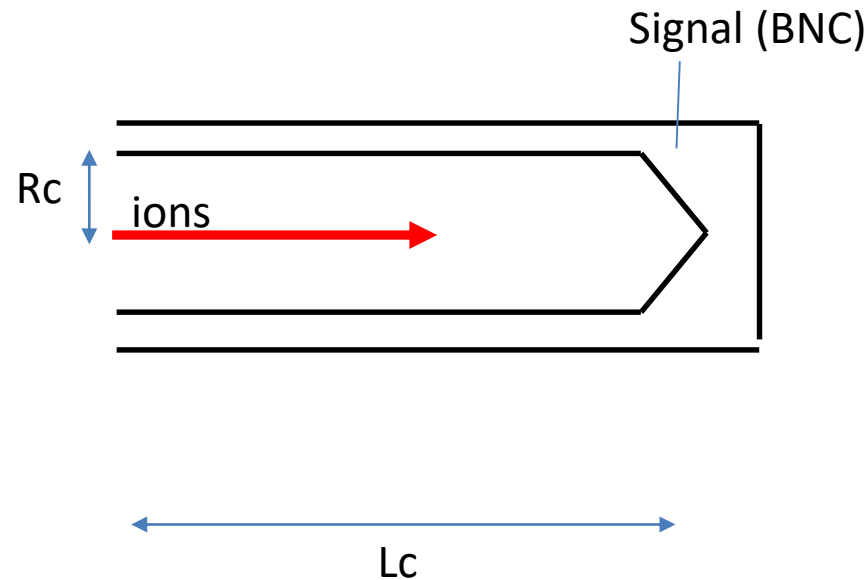
- La mesure continue et l'optimisation de l'intensité du faisceau est souvent une des activités les plus importantes pendant l'opération d'un accélérateur:
 - Cela fait partie des activités systématiques et journalières de vérification dans un accélérateur
 - On parle aussi du “taux de transmission” soit la quantité de courant que l'on a, à un point comparé à un point en amont dans l'accélérateur
- Il existe une grande diversité de ces systèmes de mesures
 - Un diagnostic peut-être adapté à une certaine gamme d'intensité, un deuxième complète la mesure
- Ces systèmes peuvent être classés selon leur propriété:
 - Non destructive
 - Résistant à la radiation
 - Mesure absolue
 - Compatibilité au vide
 - Type de signal

Coupelle de Faraday (1/3)

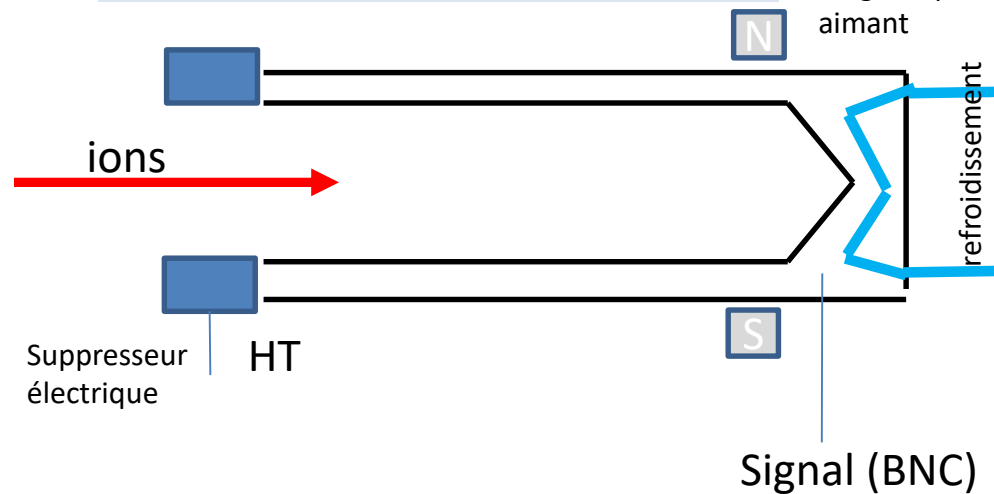
- C'est un "arrêt faisceau", dont le but est d'arrêter complètement le faisceau, isolé électriquement du tube faisceau et dans le vide
- Typiquement, c'est un puit (coupelle)
 - dans lequel on va piéger les charges.
 - Des électrons secondaires peuvent être créé ($\langle E \rangle < 10$ eV) par l'interaction des ions avec les surfaces
 - Pour les limiter,
 - ce puit est plus long " L_c " que large " R_c " afin d'éviter que les charges ne fuitent
 - On peut rajouter des supprimeurs

Simple coupelle: basse énergie

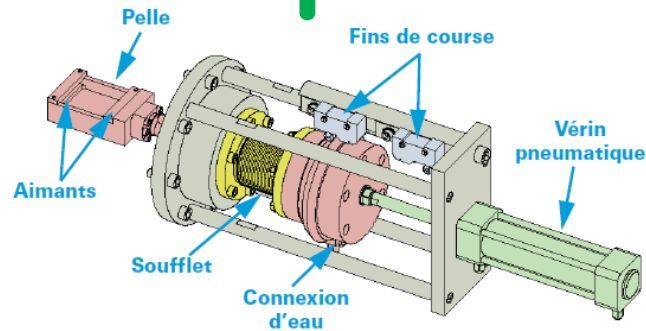
Signal (BNC)



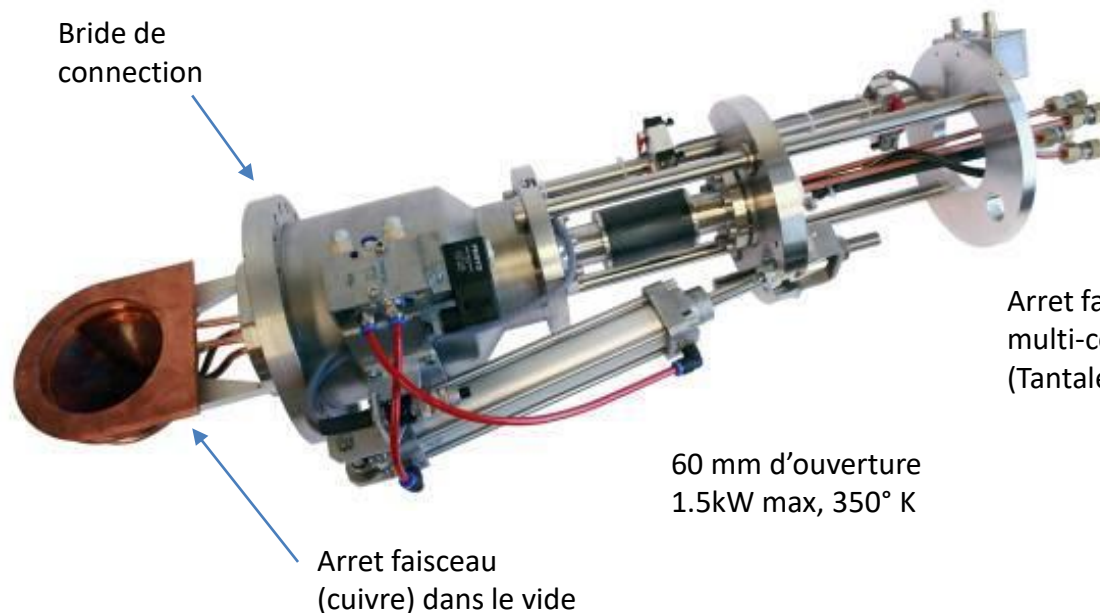
Plus précise et refroidi → haute puissance



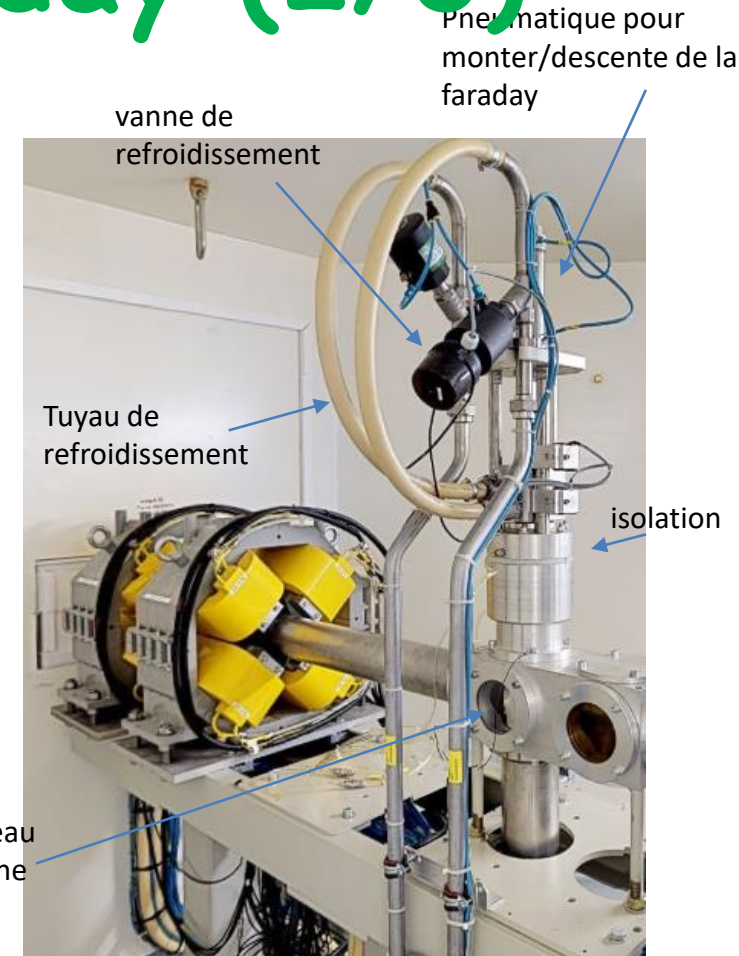
Coupelle de Faraday (2/3)



Coupelle de Faraday de ligne d'injection ion < 50 KeV (Arronax)



Coupelle de Faraday (spiral 2 – MEBT): tuning de l'injection

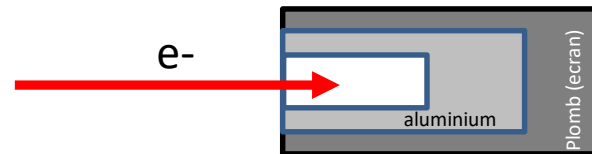


Coupelle de Faraday sur une ligne de faisceau (Arronax)

<15kW

Coupelle de Faraday (3/3)

- Des courants relativement bas peuvent être mesurés:
 - 10 pA (5 ordre de grandeurs plus bas que les transformateurs DC - voir ci-après)
- Les faraday sont fabriqué normalement en cuivre parce qu'il est relativement de bas cout, facile a fabriquer et un bon conducteur thermique.
 - Le tantale peut être employé aussi
 - Attention à l'activation des matériaux
- Les coupelles de Faraday pour électrons sont généralement plus grande (due a l'extension de la gerbe dans les matériaux):
 - On rajoute des matériaux à bas Z d'abord, et un écran (haut Z) et limiter le rayonnement X.

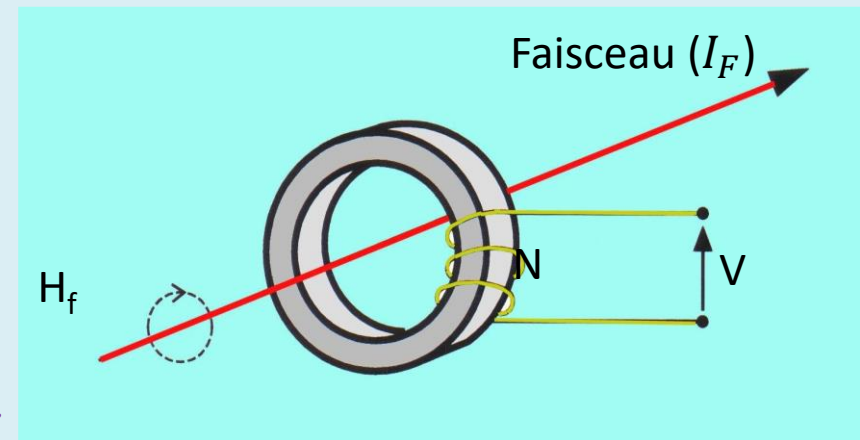


- Pendant les opérations,
 - la coupelle sert d'élément de protection pour les composants aval de l'accélérateur.
 - C'est aussi un élément pour arrêter le faisceau en cas d'urgence
 - Est plutôt employé pour mesurer un courant moyen (ok pour faisceau continu)

- Imaginons que l'on ne veuille pas arrêter le faisceau pour faire la mesure

Transformateur de courant(1/6)

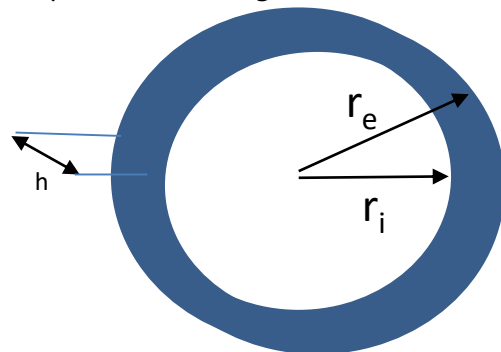
- Utilisation du champ d'induction magnétique H_f associé au faisceau
 - Non interceptif (n'arrête pas le faisceau)
- Principe de fonctionnement:
 - Le faisceau passe à travers un tore à haute perméabilité magnétique (primaire)
 - N spires sont enroulées autour du tore (secondaire)
 - Mesure de la tension du circuit secondaire donne l'intensité du faisceau
- Le signal est relativement indépendant de la position du faisceau et de sa dimension transverse



$$V = L \cdot \frac{dI_F}{dt}$$

Dépendance face au changement de courant

L : inductance dépendante de la géométrie du tore

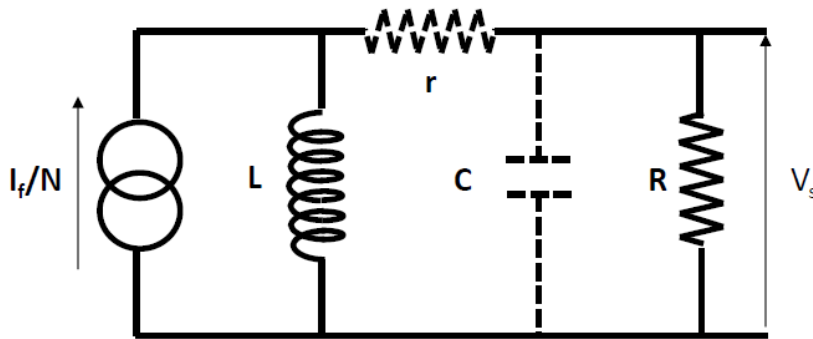


Un ACCT moderne (bergoz)

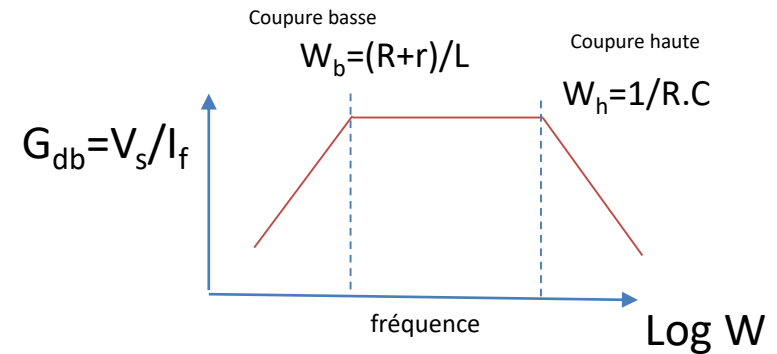
- La loi d'induction donne pour la tension V aux bornes du secondaire (cas idéal) $V = L \cdot \frac{dI_F}{dt}$
 - L : inductance du transformateur.
 - $L = N^2 \mu_0 \mu_r \cdot R_{\text{geom}} / (2\pi)$, et $R_{\text{geom}} = h \ln r_e / r_i$
 - μ_0 = perméabilité du vide, μ_r = perméabilité relative du matériel
 - I_F : Intensité du faisceau

Transformateur de courant(2/6)

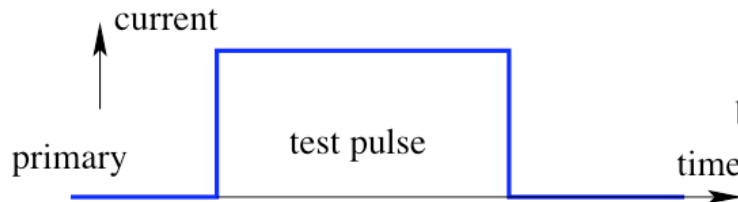
- Circuit équivalent - système passif (ou FCT)*:
 - Le transformateur est assimilable à un circuit comportant une inductance, résistance direct et parasite
 - Nous avons alors un système avec une bande passante:



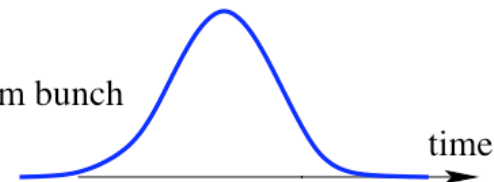
R: résistance de l'ensemble, r = résistance du câble, L inductance du transformateur, C=capacitance du circuit



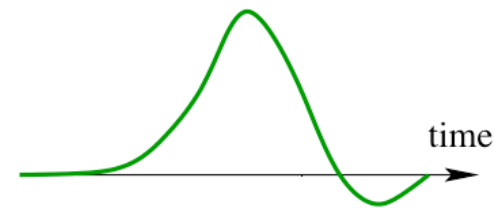
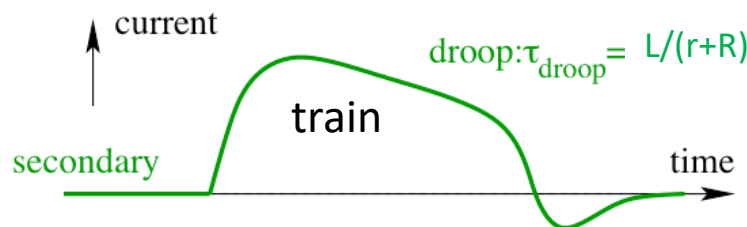
Réponse créneau de courant



beam bunch



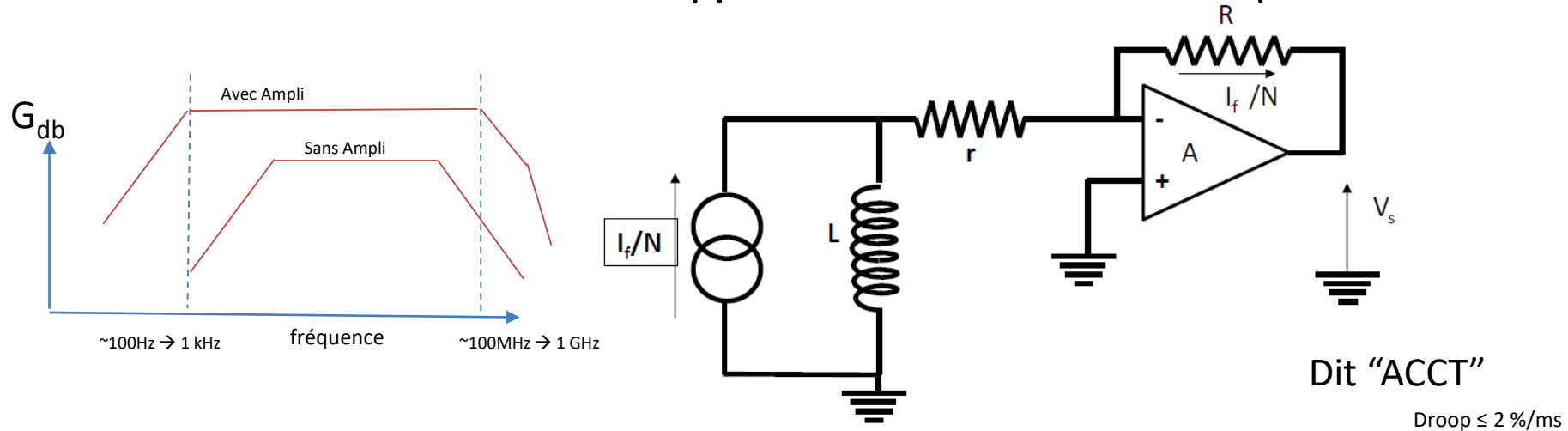
« Droop » dû a l'absence de composante DC



Ok pour du bunch mais pour un train → Réduire le droop

Transformateur de courant(3/6)

- On utilise les Transformateurs actif avec un ampli-op (dans la boucle de feedback). Ceci va permettre de diminuer la fréquence de coupure basse par un circuit actif à contre réaction négative
 - Induit aussi des bruits supplémentaires à basse fréquence !!!!



- La nouvelle constante de temps est augmentée et vaut : $\sim L/r$ et non plus $L/(R+r)$
- La sensibilité en R/N du transformateur idéal est conservée dans la bande passante.

Mais le fait d'avoir une fréquence de coupure à basse fréquence, implique le signal de sortie n'a toujours pas de composante continue (DC)

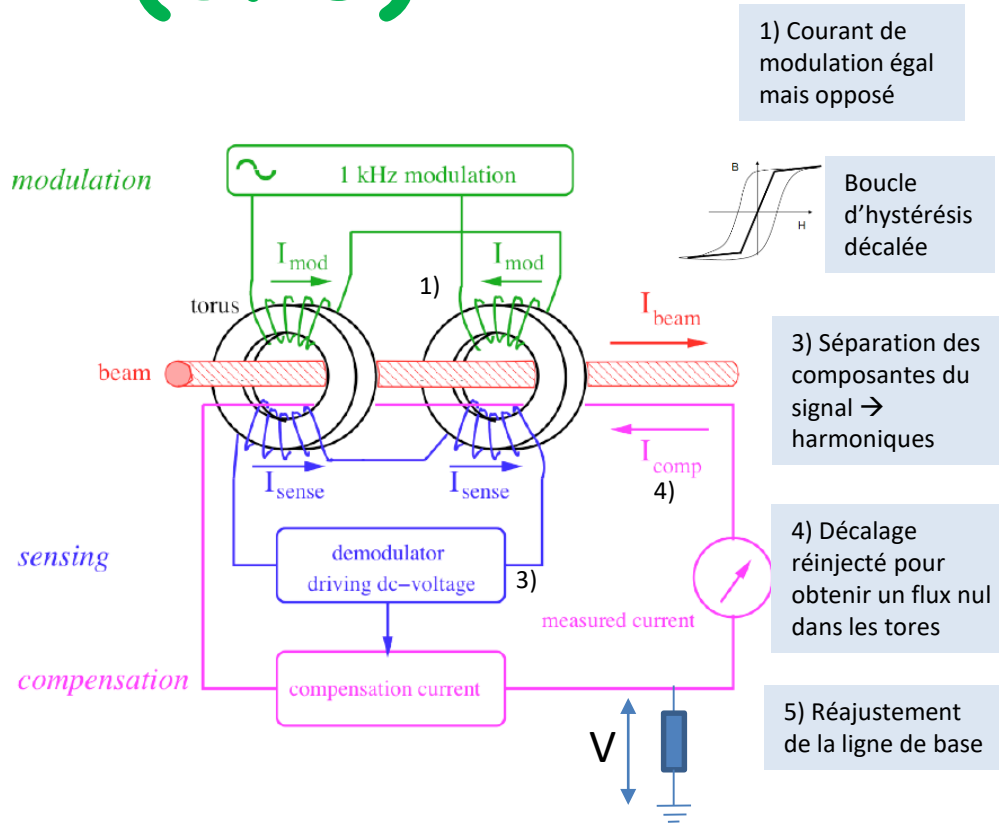
Impact du "droop" (4/6)



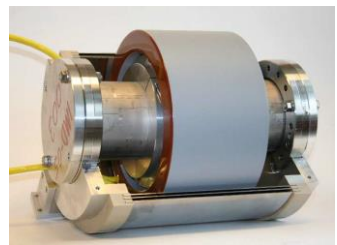
- Sur des temps longs de pulse:
 - La durée d'une impulsion est inférieure à la constante de temps de descente du transformateur
 - La composante continue n'est pas transmise. (dI/dt)
 - La mesure donnera une base qui n'est pas constante, diminue et modifie votre mesure
- Plusieurs techniques sont mise en place afin de restaurer la ligne de base:
 - Electroniquement (passé) ou avec du digital (aujourd'hui)

DCCT* (5/6)

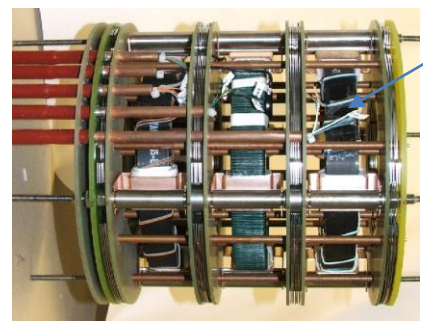
- Si le faisceau n'est pas modulé (faisceau continu) alors la mesure est plus compliquée.
- Difficultés:
 - Le tore n'étant sensible qu'à un courant alternatif il faut un montage ingénieux pour mesurer le courant continu.
 - Il faut trouver la valeur d'un courant annulant le courant du faisceau.
- DCCT = Direct Current Transformer
 - Développé dans les années 80 (CERN-ISR)
 - Un DCCT détecte le flux magnétique dans un ensemble de tores magnétiques.
 - On utilise le décalage de l'hystérésis des tores: La démodulation du signal de tension
 - Il réinjecte un courant continu dans le sens opposé du courant du faisceau afin d'annuler le flux magnétique.
- Mesure de DC a ~MHz



DCCT avec sa protection ouverte (K. Knaack, DESY)

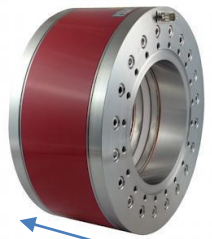


* See also: M. Gasior et al, « Introduction to Beam Instrumentation and Diagnostics », CAS 2014



U. Raich, CAS 2006

Compact, incluant l'ensemble



Combinaison de plusieurs Transformateurs (6/6)

Pour mesurer l'ensemble des courants lors des phases d'opération de l'accélérateur

Left: DCCT

300 μ A- 1 A;

D.C. - 20 kHz

Résolution: 2 μ A

Inner radius: 135 mm

Outer radius: 145 mm

Height of the tore: 10 mm

Matériau: Vitrovac 6025F $\mu = 10^5$

Middle Tore : ACCT

(bandwidth extension DC-200 kHz)

Right: Fast Transformer

$\tau \sim 0.5 \mu$ s

(Beam injection control)

Gap: alumina



Emplacement du système est à bien choisir car il est sensible aux vibrations

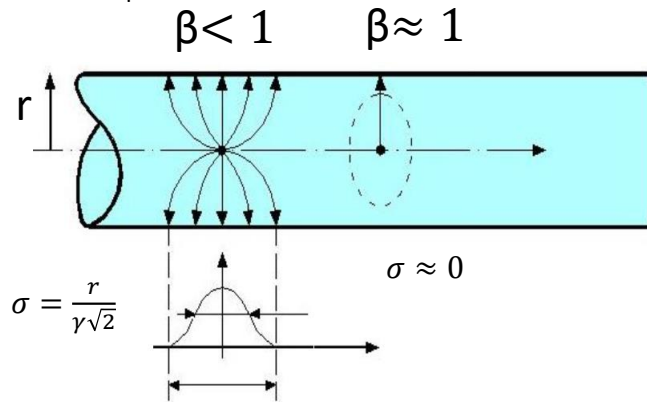
DC and AC Beam current transformer à GSI

Au LHC, le tore est fait en alliage nanocrystallin $\mu_r=100000$

Moniteur à courant de paroi (1/3)

- Une particule chargée
→ champ électrique

pour 1 seule particule



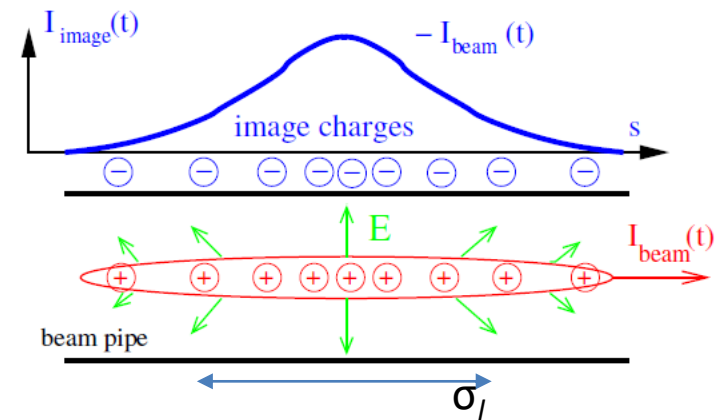
A bas β , champ électrique large pour 1 seule particule

A haut β , champ électrique unitaire pour 1 seule particule

Avec le β augmentant on crée un champ électromagnétique

- Le faisceau induit un courant de paroi de même amplitude mais de polarité inversée

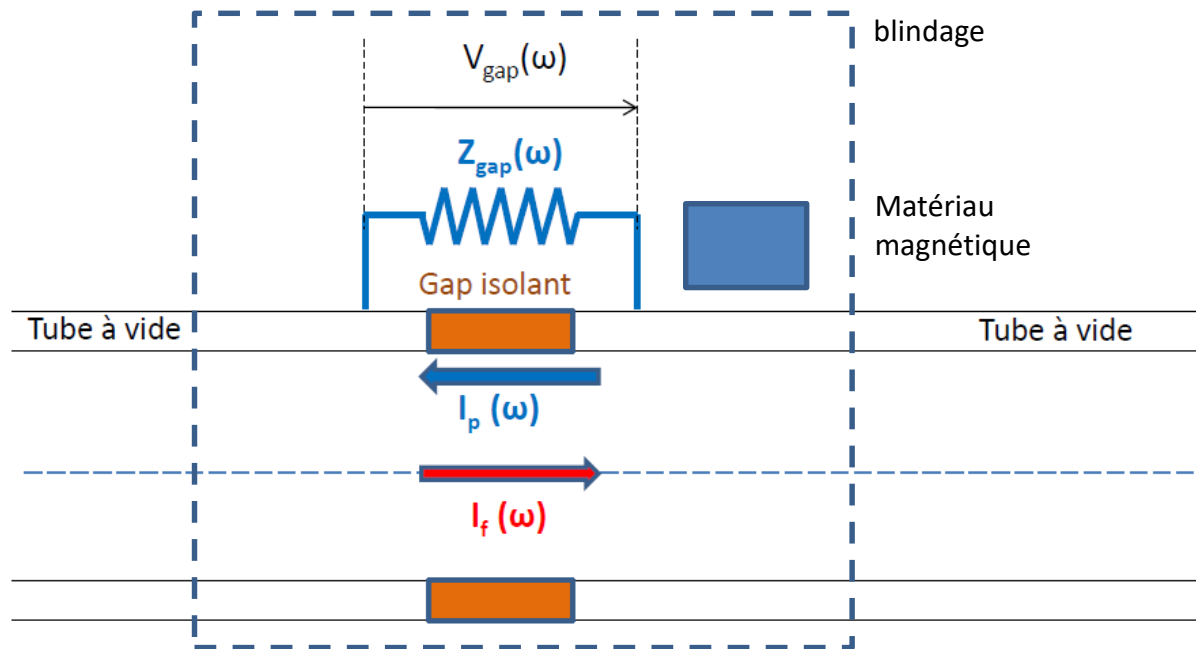
Le champ électrique associé a un faisceau de longueur rms σ_l se déplaçant a une vitesse relativiste dans un tube de rayon r va reproduire la distribution longitudinale de ce faisceau



Principe utilisé pour les Moniteurs à courant de paroi

Moniteur à courant de paroi (2/3)

Principe de fonctionnement: Le tube à vide est interrompu par un interstice (gap) isolant. Le courant de paroi doit circuler dans une résistance «shunt» connectée aux bornes de l'interstice, aux bornes duquel la tension est proportionnelle au courant de paroi donc au courant du faisceau.



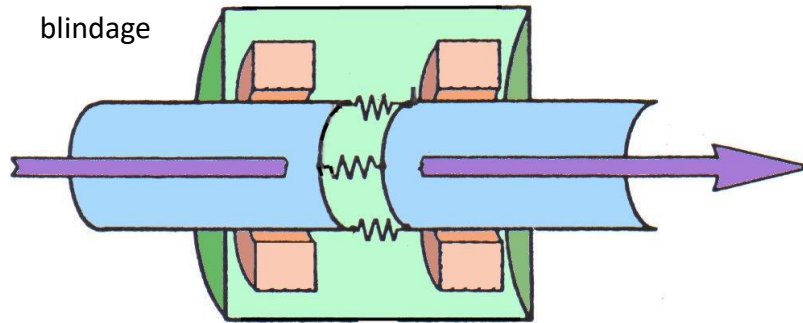
L'isolant est habituellement de la céramique (plus court que la longueur du faisceau)

En pratique:

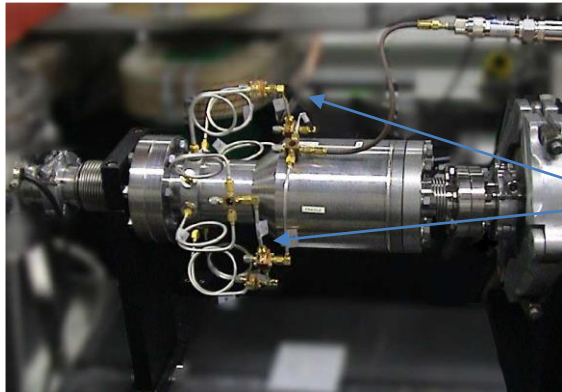
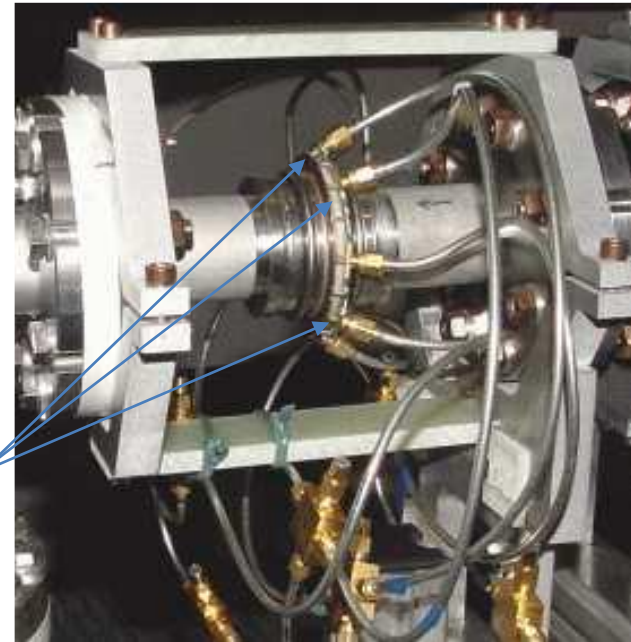
- 1) Plusieurs résistances (10 à ~100) de basse valeur (10 ohm) sont employée autour du tube faisceau → afin d'avoir une image indépendante de la position du faisceau
- 2) Met en place un blindage protégeant le gap et le shunt des perturbations électromagnétiques extérieures.
- 3) Matériaux magnétique à l'intérieur du blindage qui abaisse la fréquence de coupure basse résonance (le boîtier est devenu une cavité et avec le matériaux on force le signal à aller vers la résistance)

Moniteur à courant de paroi (3/3)

Utilisé dans les portions droites (eg linac où il n'y a pas de rayonnement synchrotron)



Moniteur sans son blindage



CTF

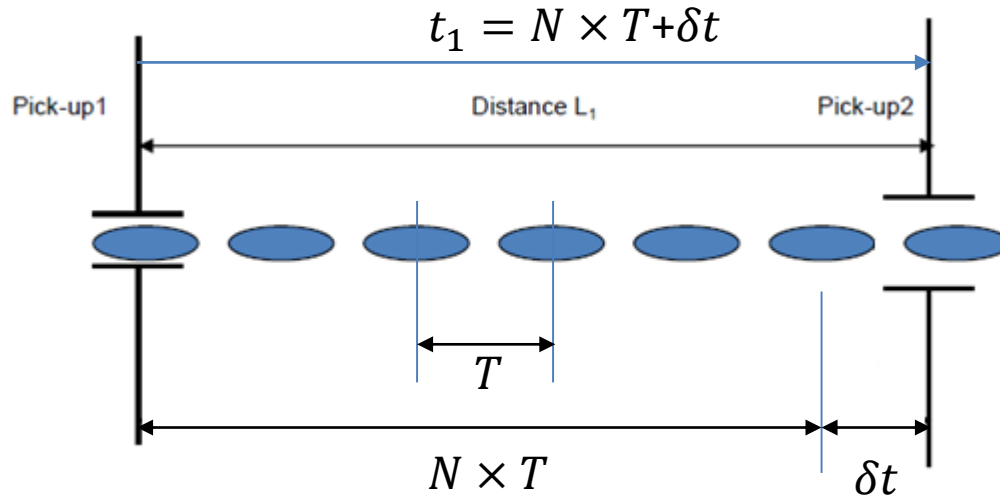
Mesures autour de la céramique

- Application: Mesure de durée de Bunch et émittance longitudinale (de qq 100 kHz à qq GHz)

Temps de vol (ToF) → énergie

Pour la mesure de l'énergie des faisceaux on peut employer le temps de vol (Time of flight) entre deux instruments (au minimum)

Instruments basés sur la mesure avec une électrode cylindrique (pick-up) λ



t_1 : temps de vol du paquet, N : nb de paquets

T : Separation entre 2 paquets [s-1],

$T = \beta \lambda_{acc}$, λ_{acc} longueur d'onde d'opération RF

$$t_1 = N \times T + \delta t$$

$$\beta_{c1} = \frac{1}{c} \frac{L_1}{t_1} = \frac{1}{c} \frac{L_1}{N \times T + \delta t}$$

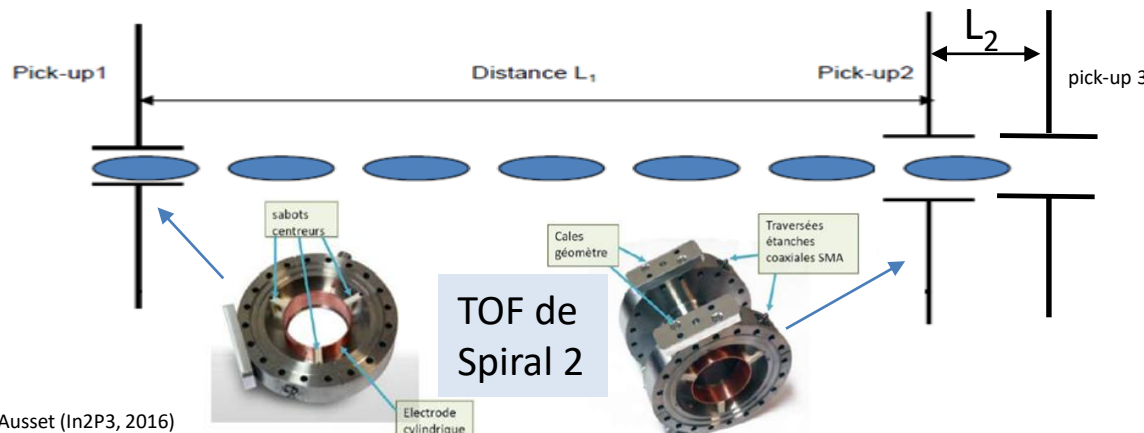
$$E_{c1} = m_0 c^2 [MeV/u] (\gamma - 1)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

La difficulté est qu'en général on ne connaît pas N (si avec faisceau en paquet et continue)

On peut alors rajouter un autre pick-up qui va permettre un marquage

Distance entre P2 et P3 doit $L_2 < \beta \lambda_{acc}$



Précision

$$\frac{\Delta \beta}{\beta} = 2 \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L} \right)^2 + \left(\frac{\Delta(\delta t)}{N \times T + \delta t} \right)^2}$$

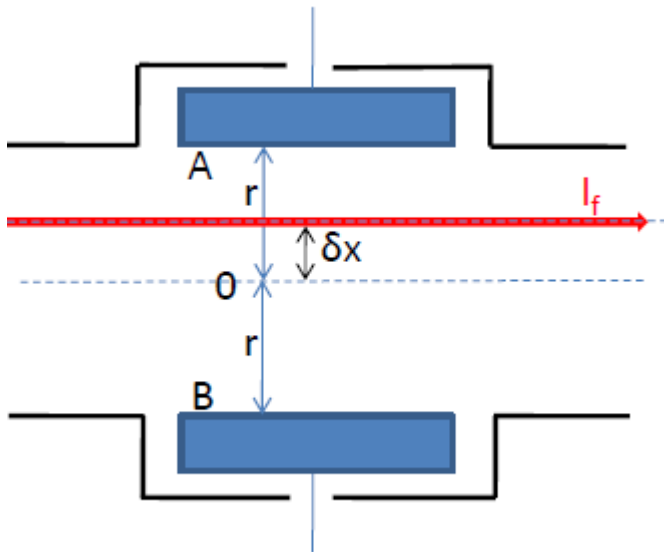
limité au basse énergie

Note: déterminer les temps est plus précis en utilisant les "zero-crossing" sur l'oscilloscope que les amplitudes des signaux a cause des erreurs de transmission de signaux

Mesures de position

- Au lieu de mesurer la charge totale il est possible de placer plusieurs électrodes autour du tube faisceau.
- La charge sur chaque électrode va alors dépendre de la distance du faisceau à cette électrode.
=> Moniteur de position du faisceau (Beam Position Monitor - BPM).

Ici deux électrodes face a face



La charge induite Q à une distance δx de l'axe central est de la forme:

$$\text{Electrode A: } Q_A \propto \frac{k}{(r - \delta x)^2}$$

$$\text{Electrode B: } Q_B \propto \frac{k}{(r + \delta x)^2}$$

k est un coefficient dépendant de la géométrie de l'électrode (Aire A et longueur l).

La charge image (induite) est proportionnel à $1/(\beta c)$

Positionnement en terme de charge:

$$\frac{Q_A - Q_B}{Q_A + Q_B} = 2 \frac{\delta x}{r}$$

L'écart de position du centre de gravité du faisceau est proportionnel au rapport de la somme et de la différence du nombre de charges recueillies sur les électrodes (tant que cet écart reste petit devant le rayon du tube à vide)

Mesures de position

- Dans un BPM:
 - Utilisation de plusieurs électrodes (4 plaques isolées)
 - La géométrie et l'emplacement exacte de ces plaques peut varier dans un BPM
 - Pour connaître la position du faisceau il faut comparer les électrodes deux à deux.
- De même qu'avant, la différence de signal entre deux électrodes opposées donne la position du faisceau sur cet axe.
 - La somme des signaux sur les 4 électrodes est proportionnelle à la charge.

Au premier ordre:

horizontal

$$x = \frac{1}{S_x} \cdot \frac{U_{droite} - U_{Gauche}}{U_{droite} + U_{Gauche}} + \delta_{ox}$$

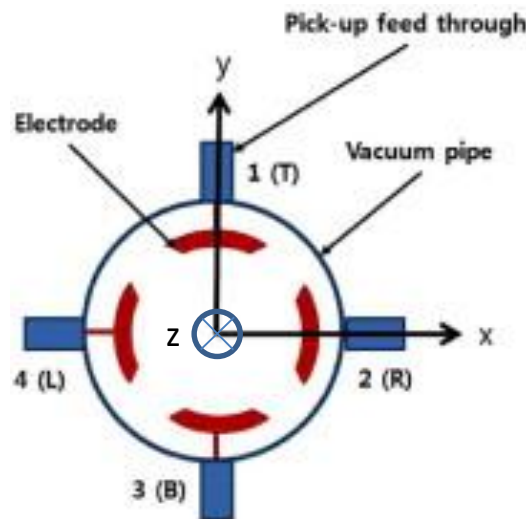
vertical

$$y = \frac{1}{S_y} \cdot \frac{U_{haut} - U_{bas}}{U_{haut} + U_{bas}} + \delta_{oy}$$

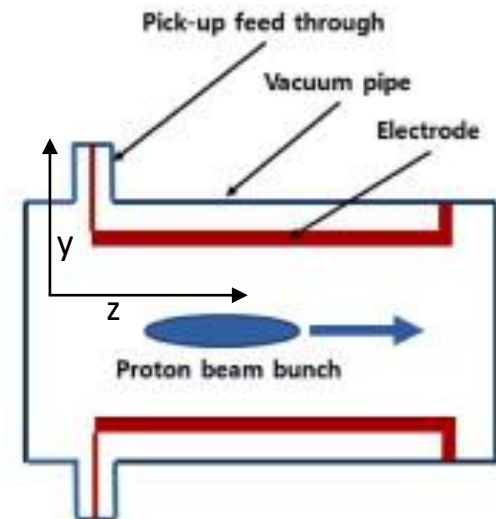
Ici, $S_{x,y}$ est une constante (comme k) appelée sensibilité de position [%/mm] et $\delta_{ox,y}$ [mm] est un offset de correction.

Peuvent indépendants en x et y

Arrangement circulaire possible:



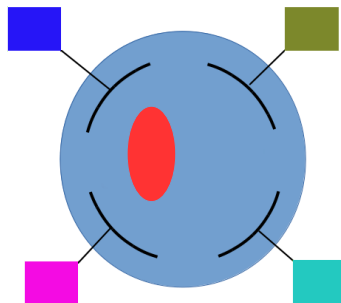
Cross-sectional View



Side View

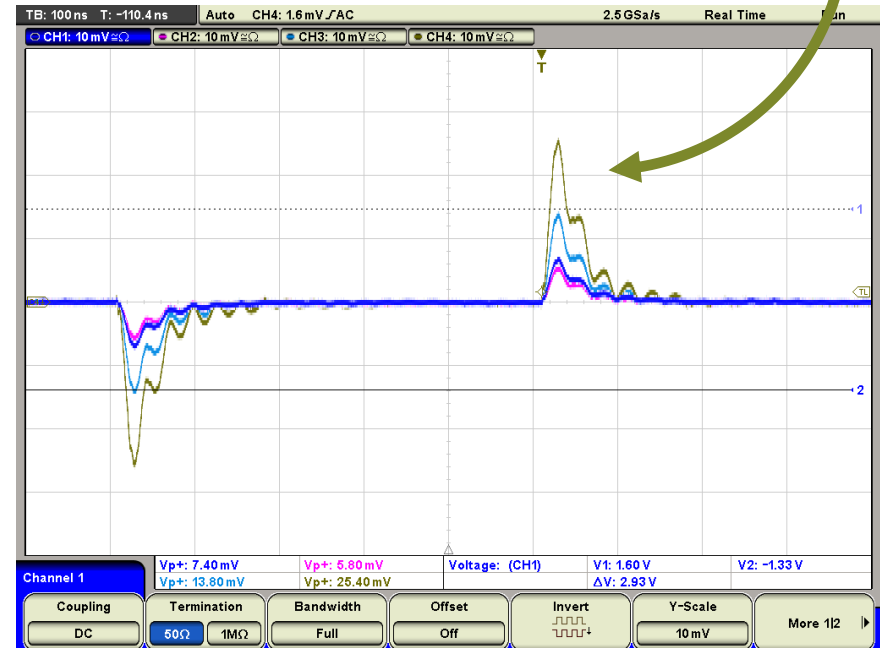
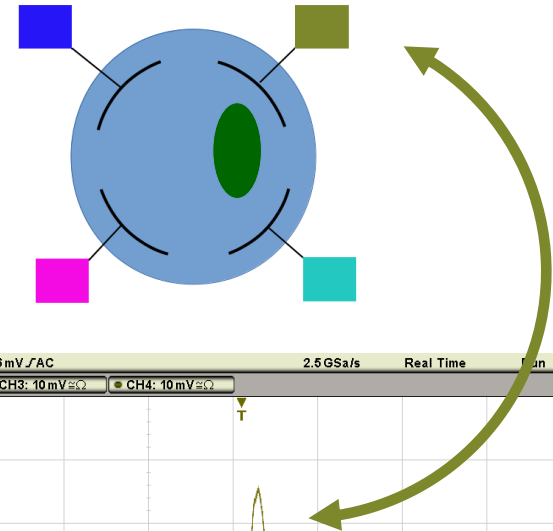
Mesures de position

Exemple 1: faisceau bas gauche



faisceau + proche

Exemple 2: faisceau haut droit



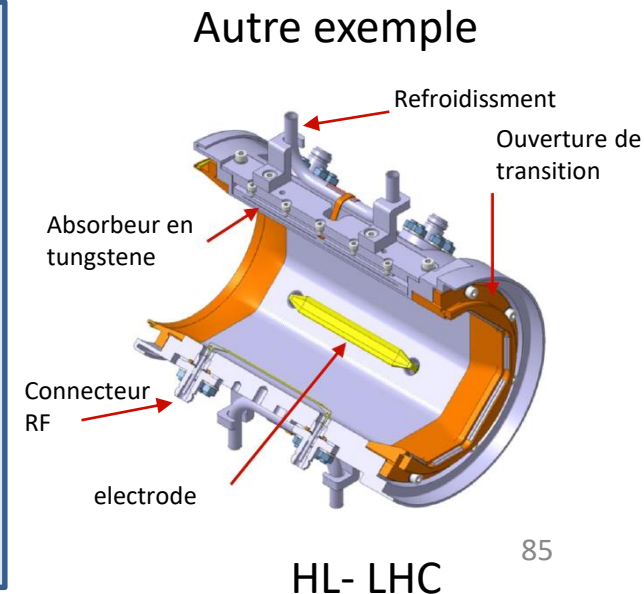
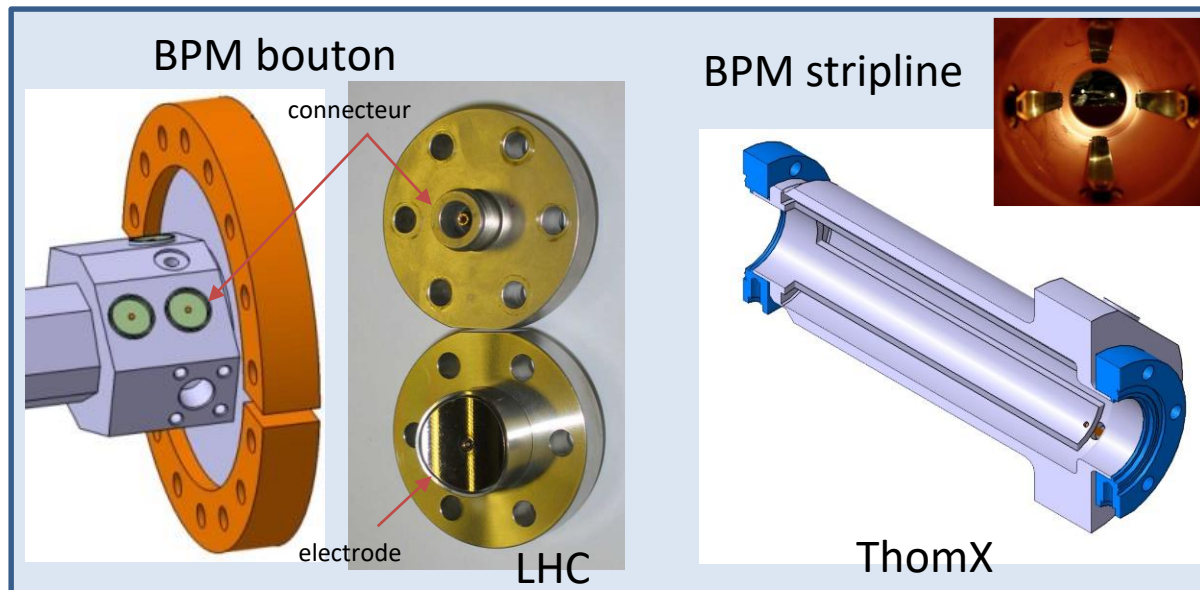
Mesures de position

La mesure des positions est très importante dans un accélérateur.

- Dans certains accélérateurs il peut y avoir un BPMs tous les 2-3 mètres.

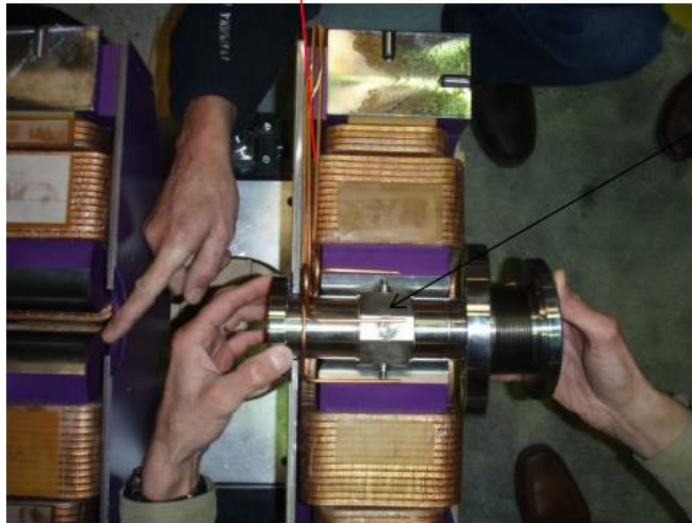
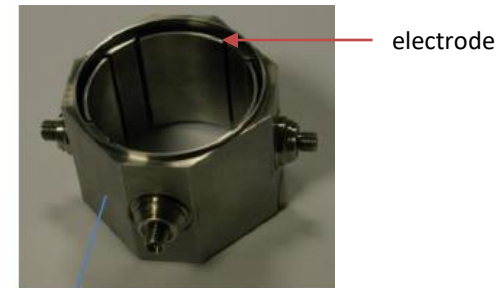
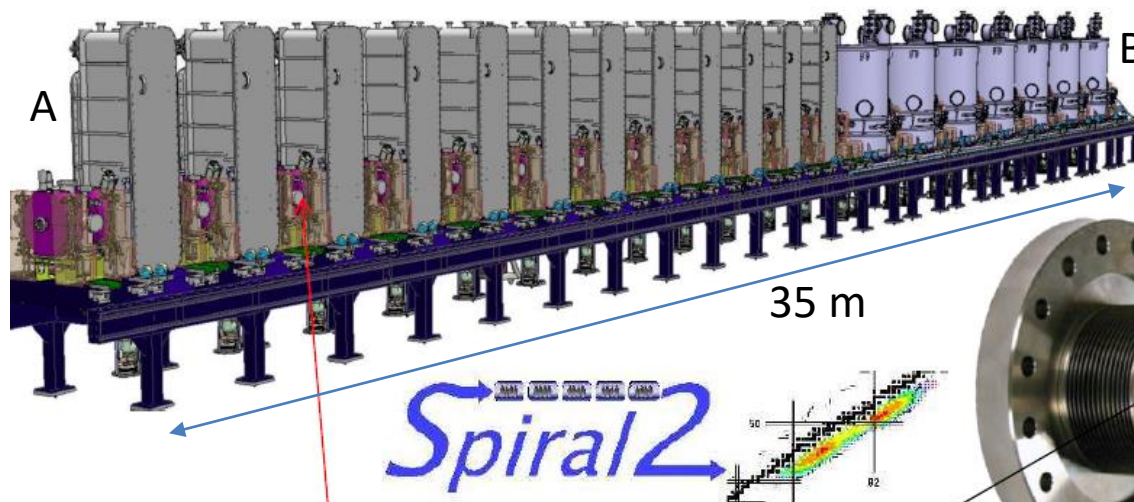
De nombreux développements ont eu lieu autour des BPMs et il y a de nombreux types différents.

- 2 extrêmes:
 - Bouton: plaque de petite dimension (diamètre de qqe mm au cm)
 - Pour linac proton, cyclotron et électron si $\sim 100 \text{ MHz} < f < 3 \text{ GHz}$ ou les paquets seront relativement court
 - Couverture azimutal limitée
 - Stripline:
 - Plaque de dimension beaucoup plus longue
 - Bande passante plus large
 - Couverture azimutal large d'où un signal plus fort que pour les boutons
 - Connaissance directionnelle



BPM a Spiral 2

20 BPM installés



Transverse Beam Position Monitor: *Capacitive probe*

- Inner \varnothing : 48 mm - Length : 39 mm
- Subtented lobe-angle: 60°

Electronics

- Signal processing :
- Position precision: 0,15 mm,
- Phase: 1° Energy measurement (TOF)

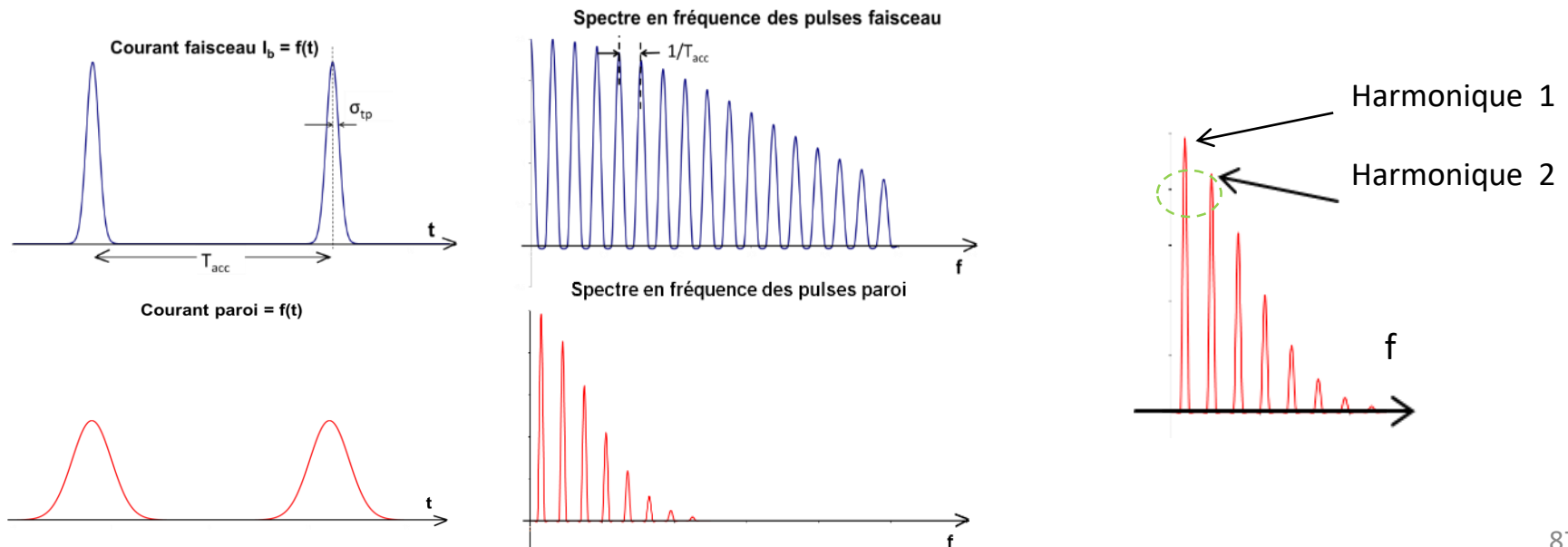
12 cryomodules de type A : Beta = 0,07
1 cavité par cryomodule

7 cryomodules de type B : Beta = 0,12
2 cavités par cryomodule

- BPM installés dans les quadripôles (chaud) entre les cavités

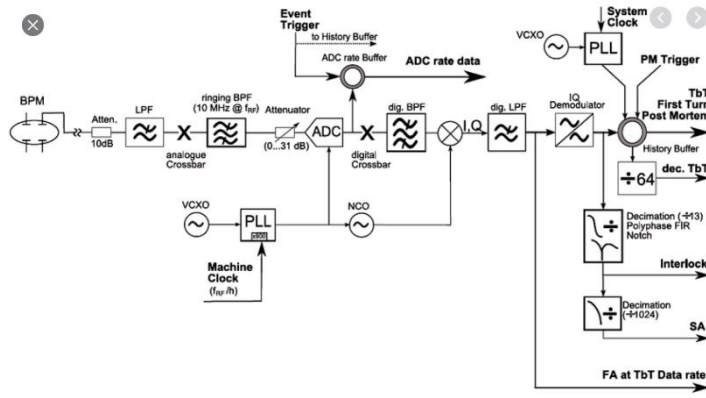
BPM: Utilisation et mesure

- Mesure positionnement transverse (voir avant)
- A spiral2, aussi:
 - Mesure des réglages de phases des cavités, grâce à la mesure des amplitudes des harmoniques des signaux des BPM
 - Ellipticités du faisceau



L'électronique des BPM

- La précision de la mesure de position dépend énormément de la qualité de l'électronique.
- Tout bruit peut affecter la mesure de position.
=> Electronique dédiée et très chère.



Systeme Libera de
Instrumentation Technologies

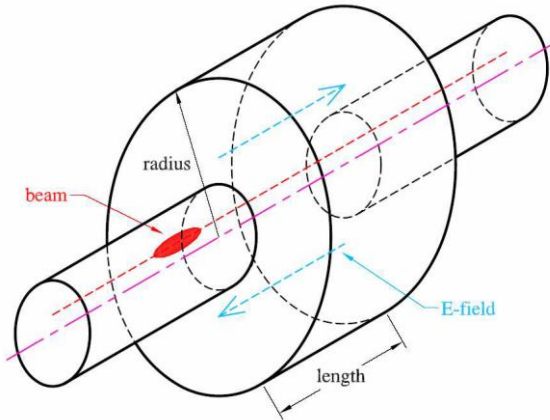


General product code	LSPE
BPM slots	1 - 4
Supported input frequency range	< 700 MHz
A/D conversion	160 MHz/16 bit
Cooling	Active (fans)
Power supply	110/220 V
Timing signals	Electrical (4)/Optical
Calibration	Manual/Static
Fast data link	RJ-45 & SFP
Maximum input signal*	< 7 V peak pulse voltage
Input gain/attenuation	Programmable, 31 dB
Temperature drift, typical	0.3 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$
Position RMS at turn-by-turn data rate	/
Position RMS at fast 10 kHz data rate	/
Position RMS at slow 10 Hz data rate	/
Position RMS at single bunch	1 μm^{**}
Position RMS at macro pulse/ continuous wave	< 1 μm

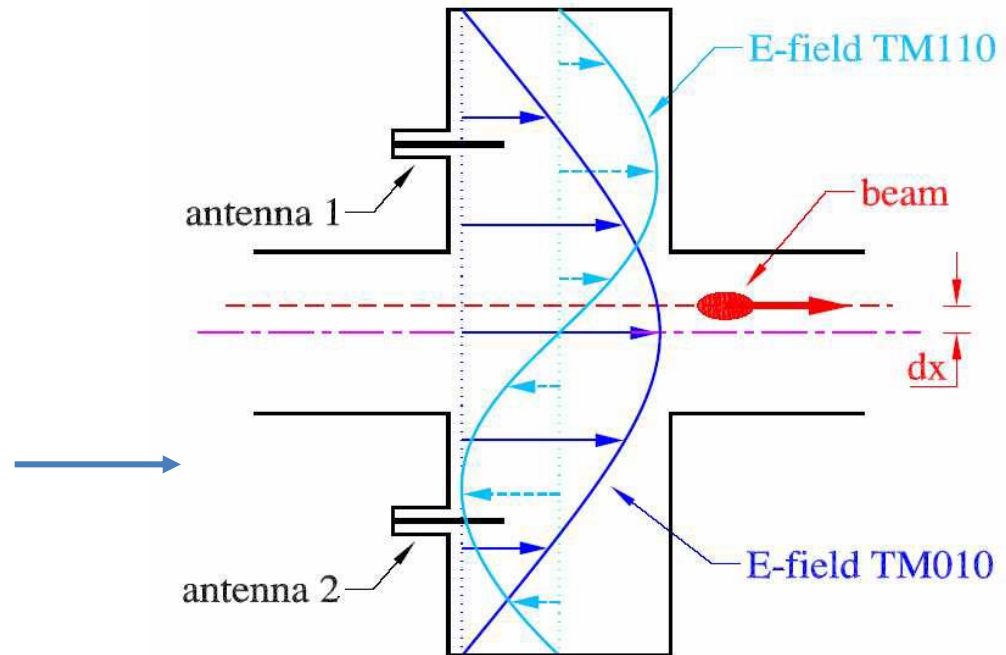
- Note sur les câbles:
 - Ceux des 4 électrodes doivent avoir la même longueur sinon le déphasage peut entraîner une erreur de mesure.
 - L'électronique peut-être dans certains cas très sensible à la température et nécessite des montages additionnels (multiplexages, pulse connue dans les câbles)

Autres BPM

- BPM à cavité:



Géométrie à pillule
(similaire à cavité
accéléérante)

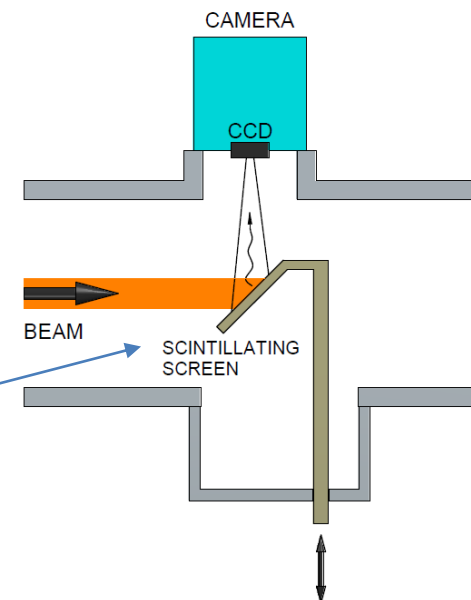
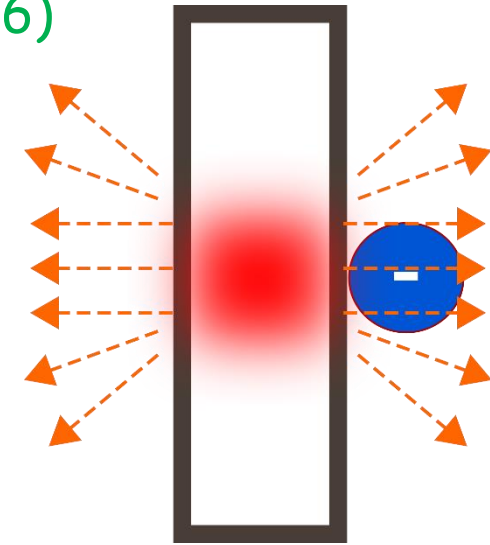


Le déplacement du faisceau va engendrer un décalage de l'amplitude du mode TM110 par rapport au mode TM010. Sa mesure (phase) se fait via les antennes

Résolution de 1 μ m pour un paquet seul
F110=1.428 GHz

Mesure de profil avec un écran luminescent (1/6)

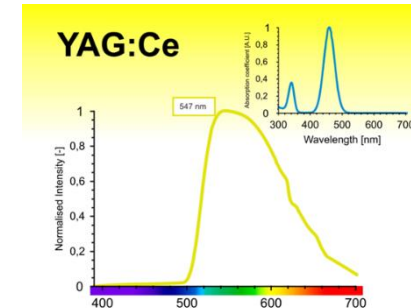
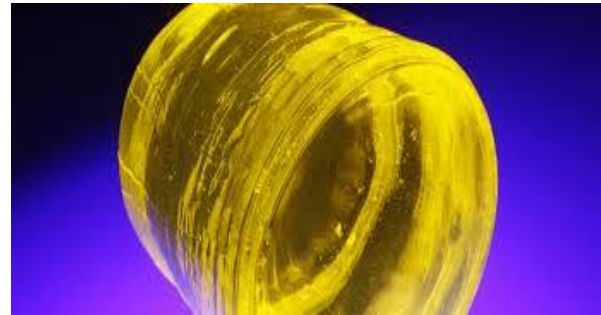
- Un paquet de particules traversant un écran va déposer une partie de son énergie.
- Si le matériel est choisi correctement cette énergie va exciter certains atomes qui vont émettre de la lumière.
- Cette émission lumineuse donne une indication du profile transverse du faisceau.
- Remarques:
 - Ne nécessite pas forcément de système de contrôle ou traitement sophistiqué.
 - Un système de visualisation doit être mis en place (écran + camera)



Mesure de profil: Ecran (2/6)

- Exemple de matériaux luminescent utilisés sur accélérateurs:
 - YAG:Ce (principalement utilisé avec des électrons)
 - Al_2O_3 (principalement utilisé avec des protons)
- Il existe de nombreux autres matériaux luminescents selon les besoins. C'est un domaine de recherche actif.
- (SiO_2 , CsI, Li Glass,...)

Bloc de scintillateurs: YAG:Ce



Longueur d'onde d'émission [nm]

Abbreviation	Material	Activator	max. emission	decay time
Quartz	SiO_2	none	optical	< 10 ns
	CsI	Tl	550 nm	1 μs
	ZnS	Ag	450 nm	0.2 μs
Chromolux	Al_2O_3	Cr	700 nm	100 ms
	Li glass	Ce	400 nm	0.1 μs
P43	$\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$	Tb	545 nm	1 ms
P46	$\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$	Ce	530 nm	0.3 μs
P47	$\text{Y}_2\text{Si}_5\text{O}_8$	Ce	400 nm	50 ns

plaque d' Al_2O_3 

Al_2O_3 (oxide d'aluminium, λ_{max} @700nm) est une céramique qui peut emmener à des écrans très fin (0.1 to ~6mm) d'épaisseur et différentes formes. De la poudre est aussi disponible à projeter sur des surfaces.

Mesure de profil: Caméra (3/6)

- La caméra pointe vers l'écran afin de rapatrier l'image obtenue
- Si la fluorescence est courte, il faut avoir une caméra qui peut être déclenchable:
 - temps décroissance:
 - YAG:Ce, < 1 μ s
 - Al₂O₃, ~100ms

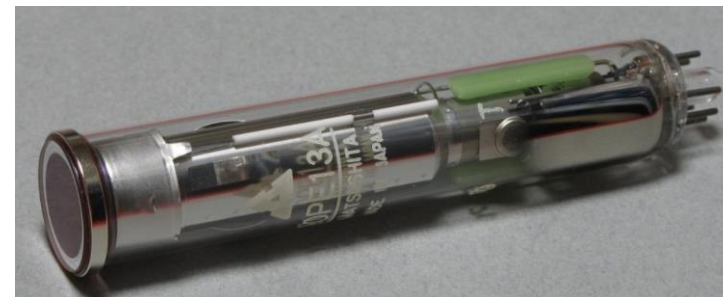
Caméra CCD: (EMVA data)
Sensibilité de la caméra
Efficacité quantique
Taille des pixels

EMVA Data



EMVA Quantum Efficiency (typical)	46.0 %
Dark Noise (typical)	11.2 e ⁻
Saturation Capacity (typical)	14.0 ke ⁻
Dynamic Range (typical)	62.1 dB
Signal-to-Noise Ratio (typical)	41.6 dB
Pixel Size (H x V)	7.4 μ m x 7.4 μ m

Caméra de type Vidicon (à tube cathodique) peuvent être employée: résistante au débit de dose, mais sensible au champ magnétique



Mesure de profil: Ecran et caméra (4/6)

- Dans la plupart des cas l'écran est incliné à 45° et la caméra le regarde depuis le côté (ou le bas) de l'accélérateur.
 - En vue direct, il peut cependant y avoir une déformation
 - Déconvolution de l'image si nécessaire est simplifiée
- Parfois l'écran est face au faisceau et il y a un miroir de renvoi qui renvoi l'image vers la caméra.

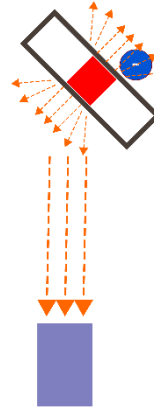
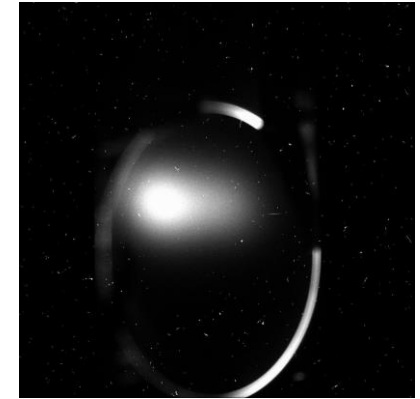
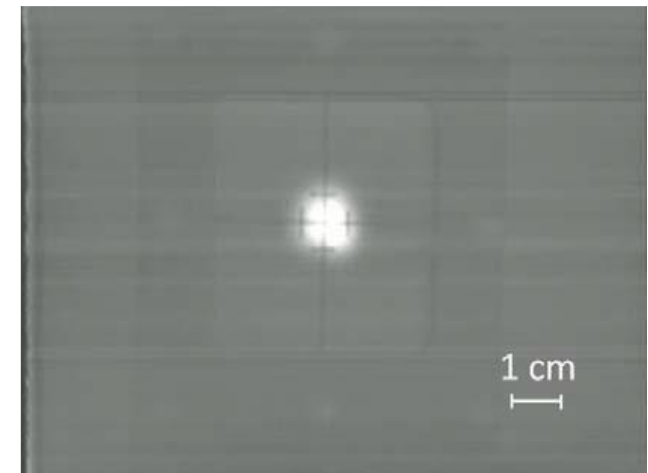


Image faisceau sur YAG:Ce

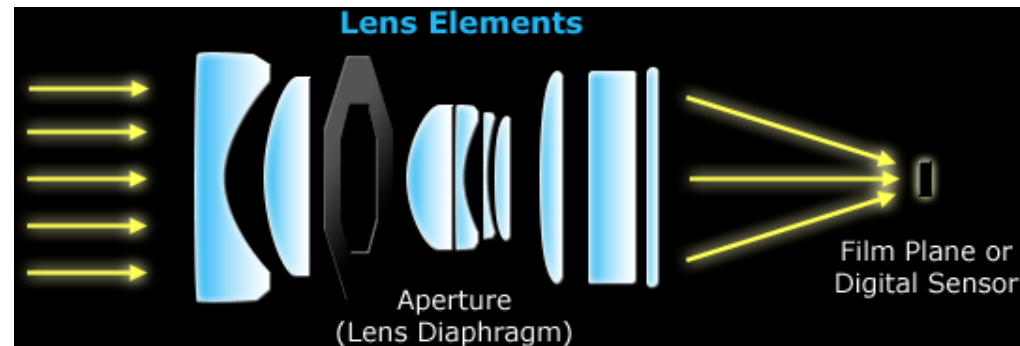


Al_2O_3

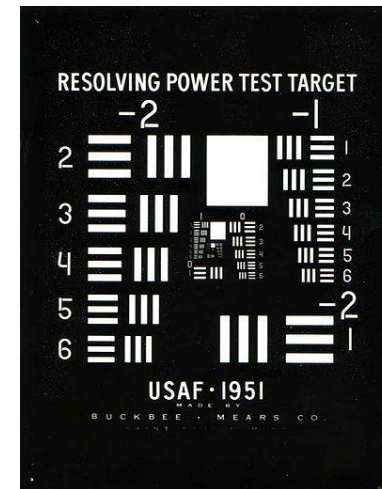


Mesure de profil: avec Ecran (5/6)

- Une optique est a rajouter pour former une image correcte sur la camera
 - Simple optique (même commercial) a des systèmes plus complexes multi-lentilles
- Des références sont alors nécessaires pour les réglages

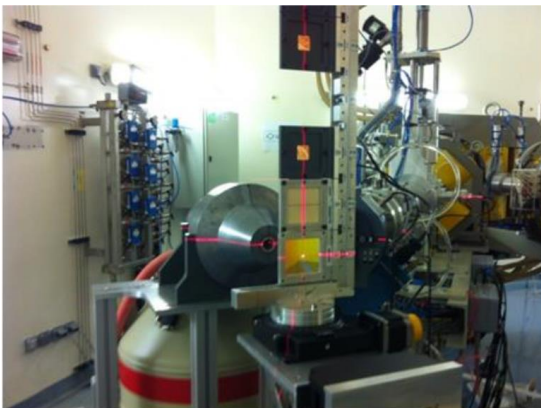


Mire standardisée de résolution

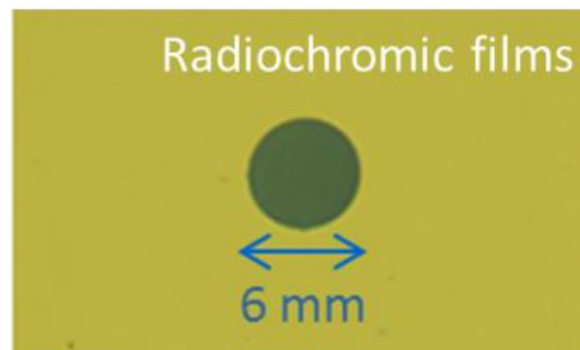


Mesure de profil: remarques (6/6)

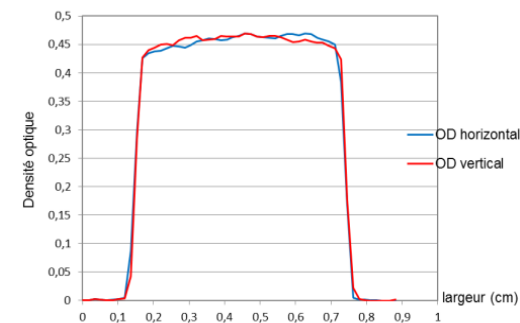
- Cette mesure est (partiellement) destructive:
 - En fonction de l'épaisseur de l'écran, les pertes faisceaux peuvent être élevées → arrêt complet du faisceau.
 - La réponse des matériaux de scintillations dépend de beaucoup de paramètres (énergie, espèces d'ions, structure temporelle du faisceau)
- Certains profils peuvent se faire avec un matériel/ écran “qualifié pour le médical” pour la dosimétrie:
 - Films radiochromiques (Gafchromic,) qui accumulent les interactions et réagissent.



Positionnement face à ligne de faisceau



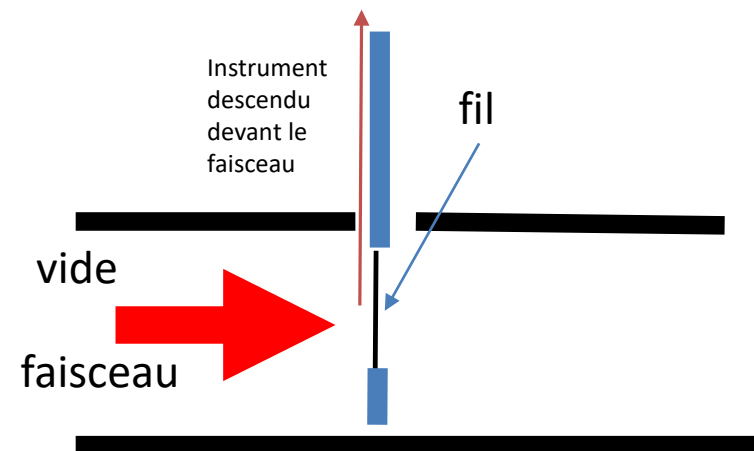
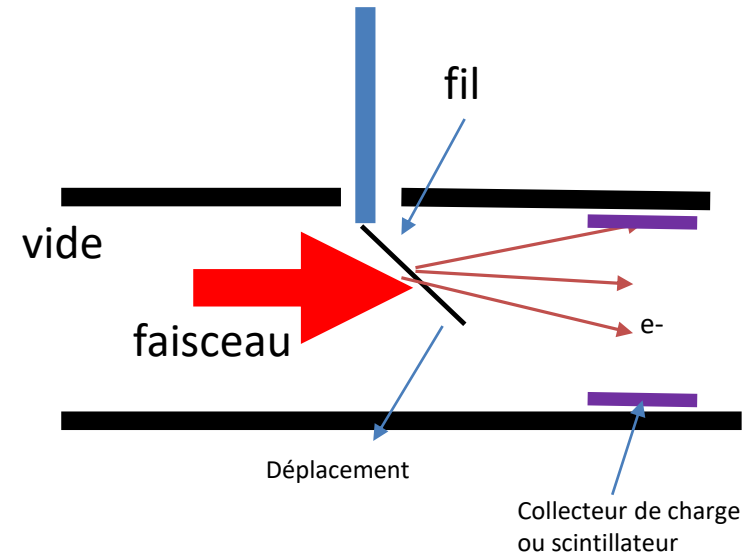
Le film après irradiations



Analyse du film, densité selon un axe x,y pour une longueur d'onde

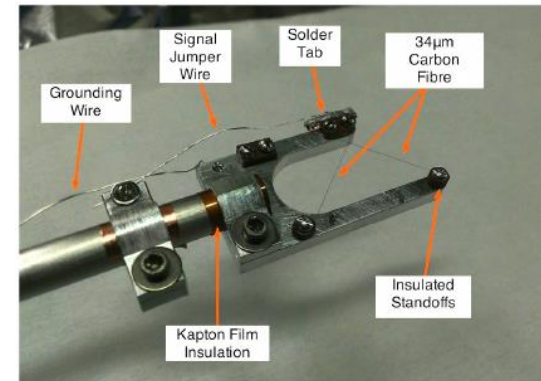
Mesure de profil à fil (1/4)

- Au lieu d'insérer un écran il est possible de déplacer un fil (de tungstène) à travers le faisceau.
- Principe de fonctionnement:
 - Mesure des particules secondaires en aval
 - Mesure du courant induit sur le fil



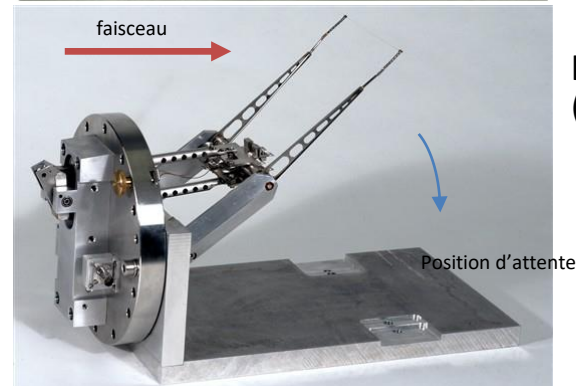
Mesure de profil à fil (2/4)

- Plusieurs type de mouvement de fils devant le faisceau peuvent être mis en place:
 - Translation, pendulaire, rotatif, circulaire
 - Lent (0.1m/s) a rapide ($\sim 10\text{m/s}$)
 - 2 fils ou 1 fils peuvent être employé pour 2D (x vs y)
 - Type: carbone, tungstène, SiC (leger, bas z)
- Mesure partiellement destructive mais peut être compatible avec un anneau ou le faisceau se répète (LHC).
- fil si trop d'énergie est déposée peut être endommagée et déformée:
 - Perte de précision ou centrage ou même destruction
- L'électronique peut-être très simple et peu cher: simple voie



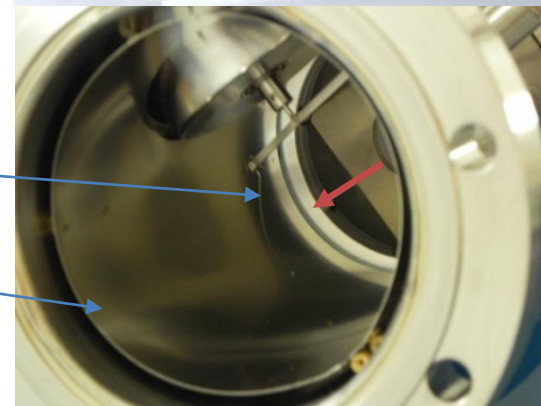
translati
on (2D)

0.1m/s



pendulaire
(1D)

Fil $\sim 10\mu\text{m}$

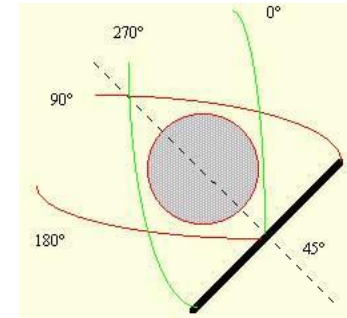


Rotatif
(2D)

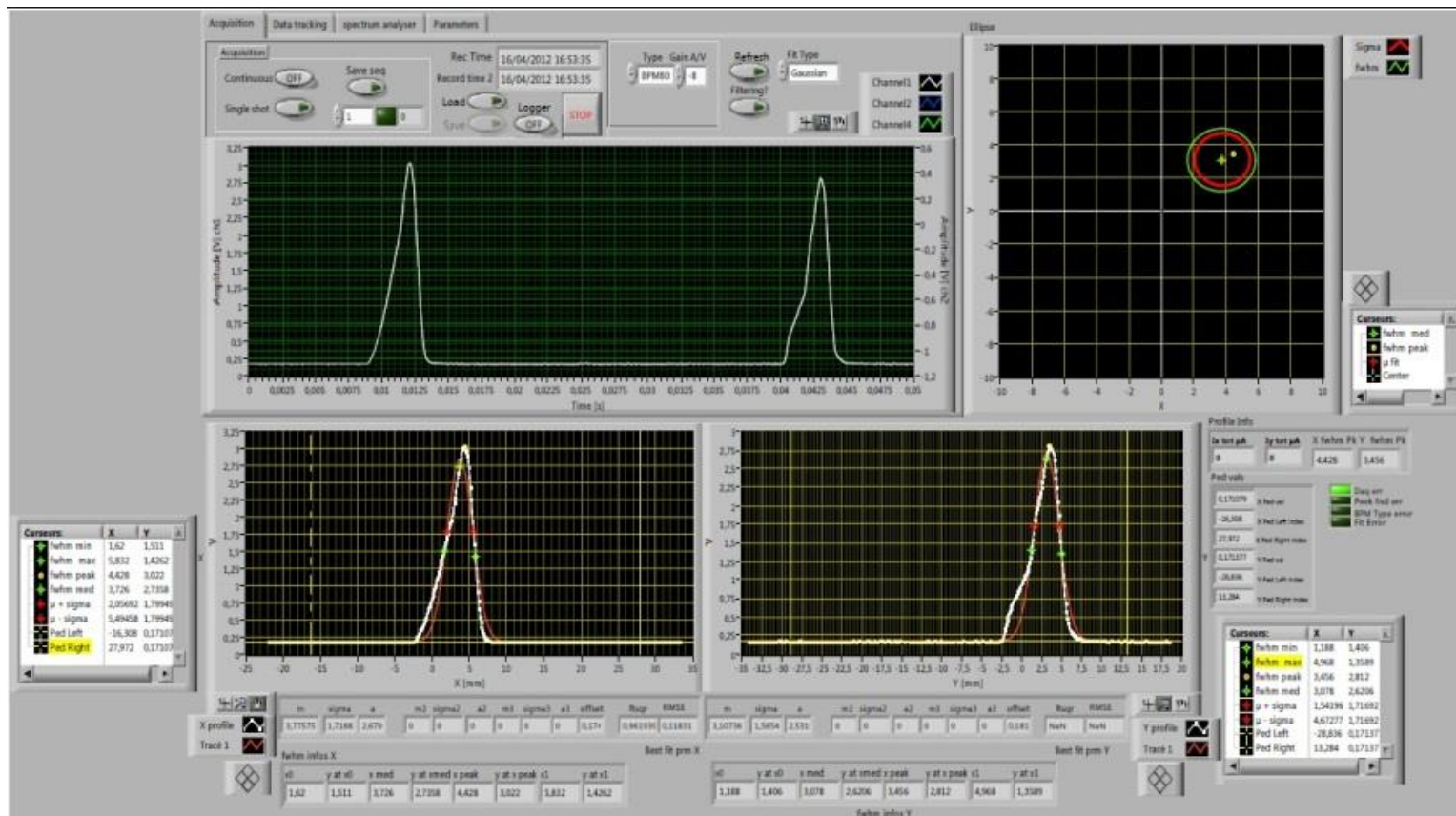
On peut être amené à déconvoluer la contribution du fil si la taille du faisceau est plus petite que la taille du fil:

Mesure de profil à fil (3/4)

- Exemple de mesures (sur fil rotatif) X et Y :
 - NEC 80, 18Hz
 - Rayon Hélicoidale = 2.7 cm
 - Limit (theo.)=150 μ A pour un faisceau de 10 μ m

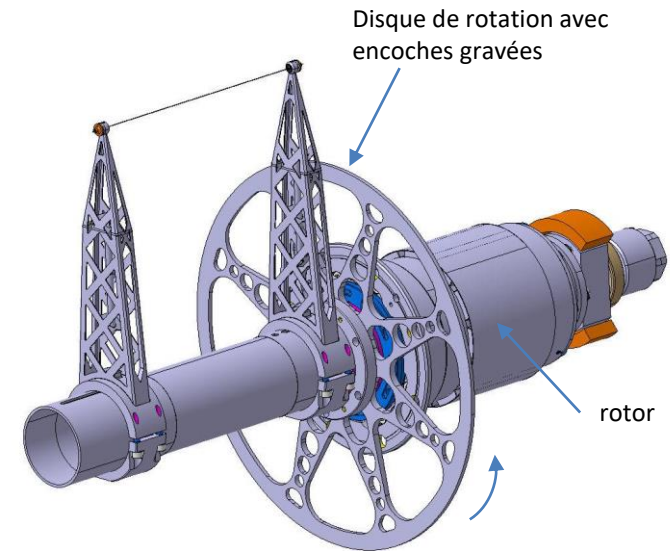


Reconstruction des signaux et positionnement: visualisation sur labview



Mesure de profil à fil (4/4)

- Un nouveau design de profileur à fil à l'étude (CERN):
 - Optimisation pour déplacement rapide (20m/s)
 - Encodeur optique de position avec gravure sur le disque de rotation:
 - 40um d'espacement des gravures
 - Utilisation des techniques d'impression 3D
- Et études du DAQ base sur un FPGA qui permettrait de reconstruire les signaux bunch-by-bunch
- Charges secondaires lues sur des PMT



Alliage aluminium

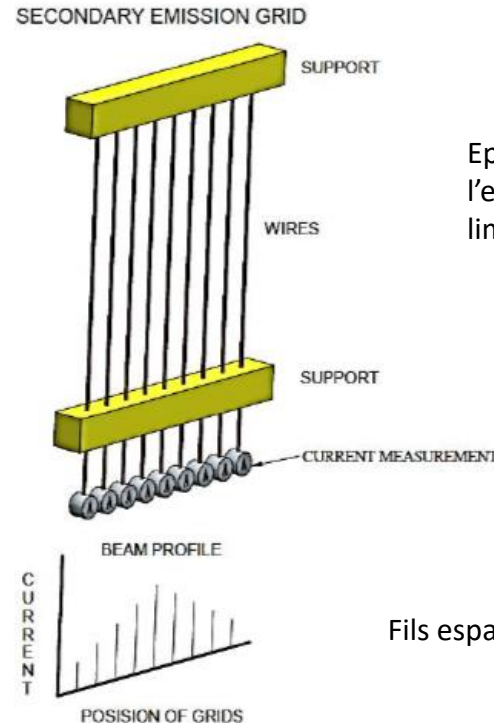
Mesure de profil à fils: Harpes

Lorsque la charge est lue sur les fils, il est possible d'en mettre plusieurs côte à côte.

- Cela donne une harpe (grille) qui va mesurer le profil en une seule fois.
- Généralement les harpes ont une dynamique de mesure plus large que les écrans: $\sim 10^6$ ordre (ex: $0.1\text{nA} \rightarrow 100\text{ uA}$)
- X et Y peuvent être mesuré en même temps (2eme grille)

Construction:

- La disposition des câbles peut être adapté a la géométrie/position du faisceau:
 - Espacé sur les bords
 - Rapproché au centre
- L'électronique et les cables peuvent être relativement cher compare au système précédent.
 - Diamètre des fils sont petit et des préamplificateurs sont nécessaires pour chaque fils
- Le système mécanique est relativement simple ici (=pneumatique)



Beam Profile Measuring System (Grid, Harp)

Type DG 070



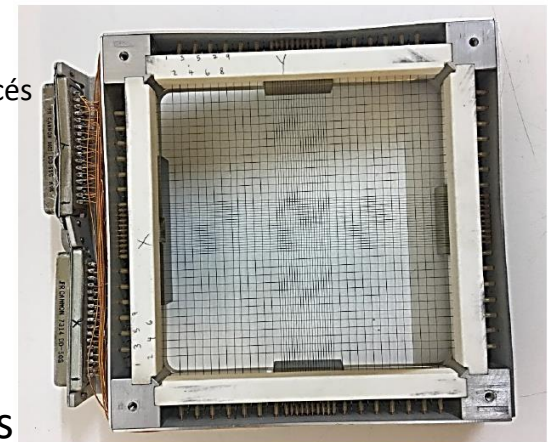
Epaisseur de l'ensemble limitée

Princeton scientific

Fils espacés

Fils serrés

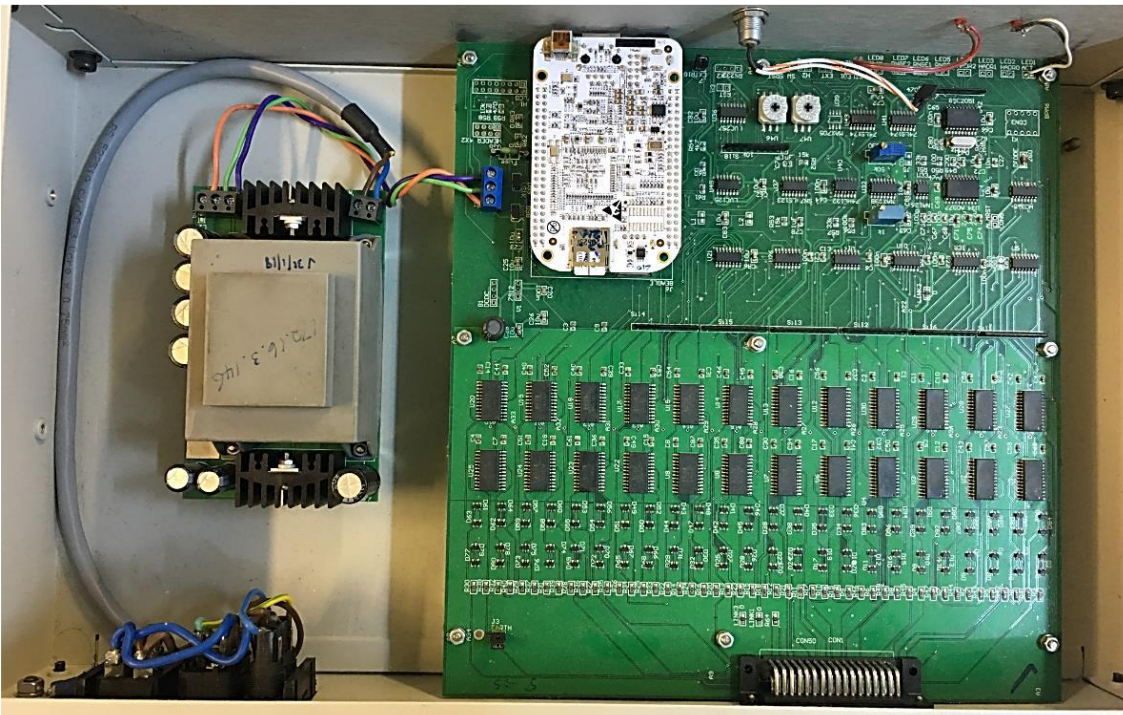
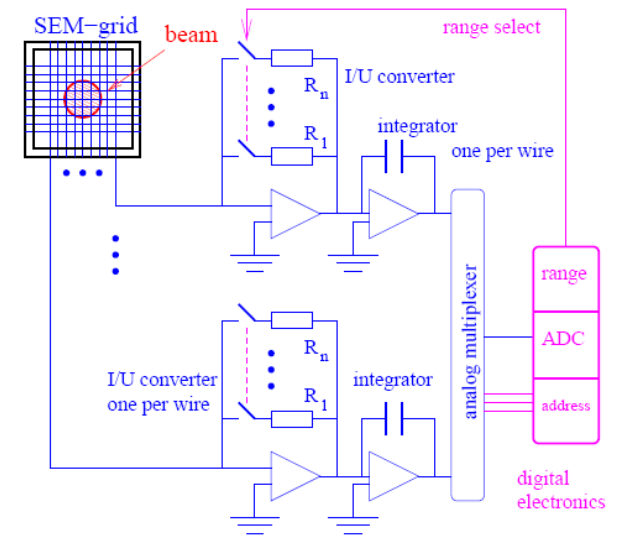
24 x 24 fils



iThemba

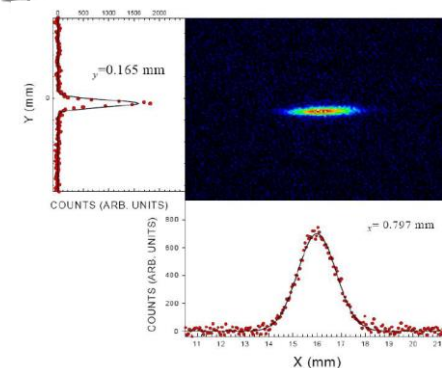
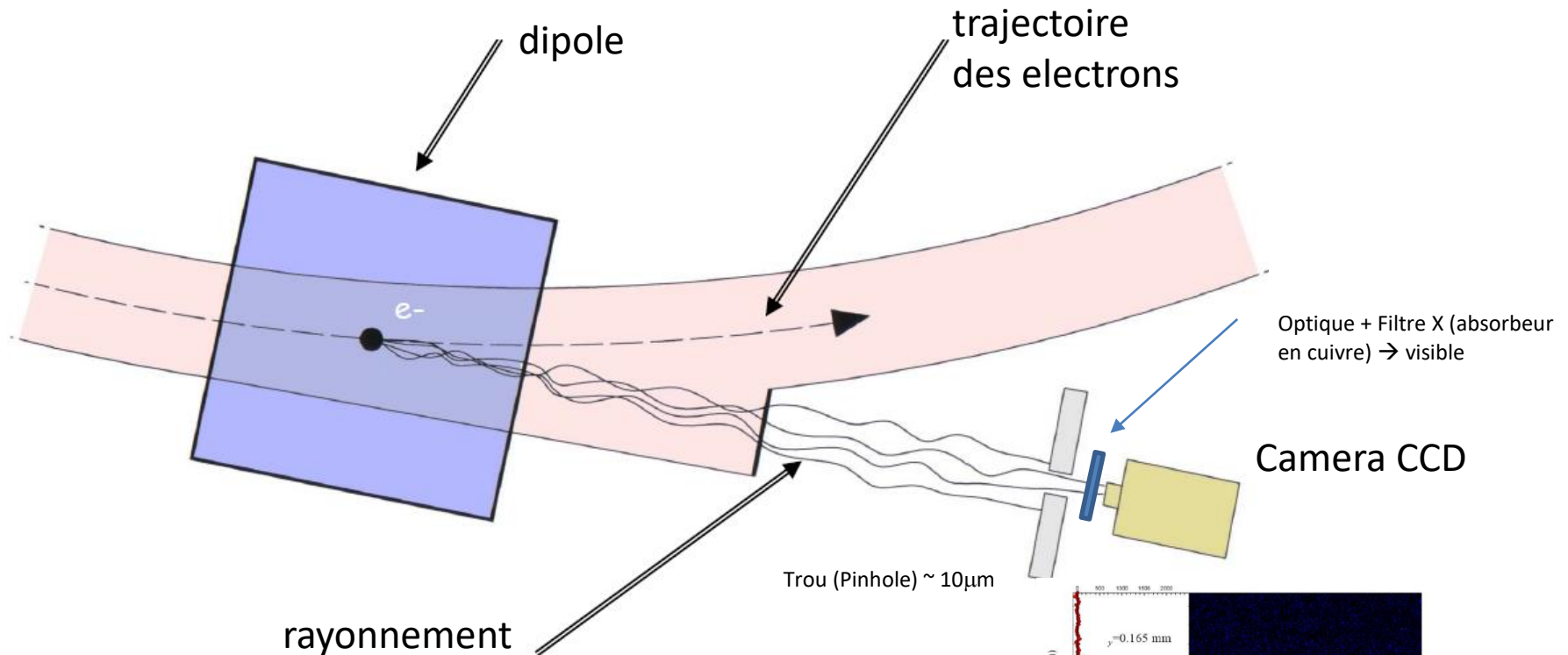
Mesure de profils à fils: Harpes

- L'électronique:
 - I/U: Convertisseur courant tension
 - Amplificateur / intégrateur
 - Multiplexeurs
 - ADC: Convertisseur analogique- numérique
- Exemple ci-dessous 48 voies (iThemba):
 - Beaglebone (single-board computer)



Profil: Rayonnement synchrotron

- Un profil transverse peut aussi se faire avec le rayonnement synchrotron:
 - Non destructif, online
 - Applicable aux hautes énergie et des émittance très petites: Très largement employé*
 - Mesure pour les électrons et surtout taille verticale (la plus petite généralement)



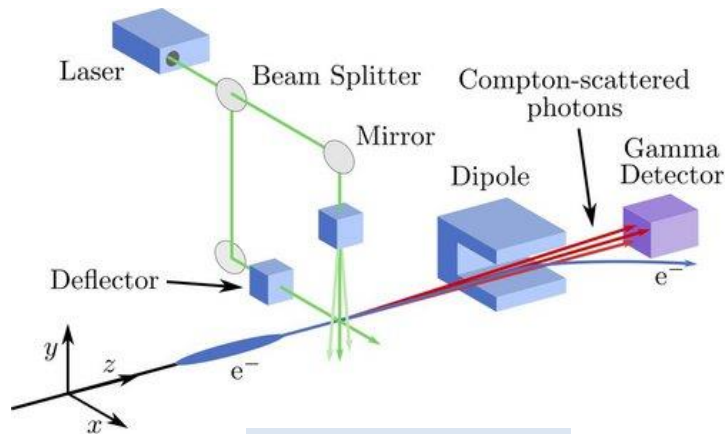
Spectre des photons caractérisé par l'énergie critique $\hbar\omega_c = \frac{3}{2} \hbar c \frac{\gamma^3}{\rho}$
avec γ le facteur de Lorentz et ρ le rayon de courbure du dipôle

*G. Kube, "Review of SR based diagnostics for transverse beam profile measurement"

Mesure de profil: laser

- Le fil peut être remplacé par un faisceau laser.
 - Avec des électrons, des particules secondaires sont produites par interaction Compton inverse.
 - Avec des ions, un électron peut-être arraché par le laser...

Le principe



La mesure finale

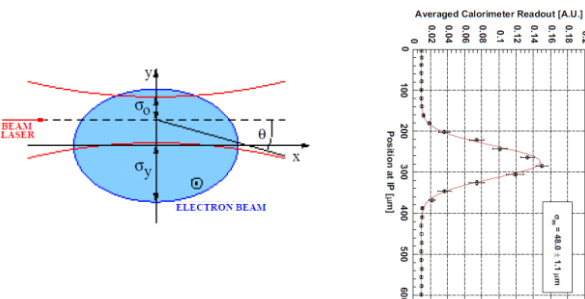
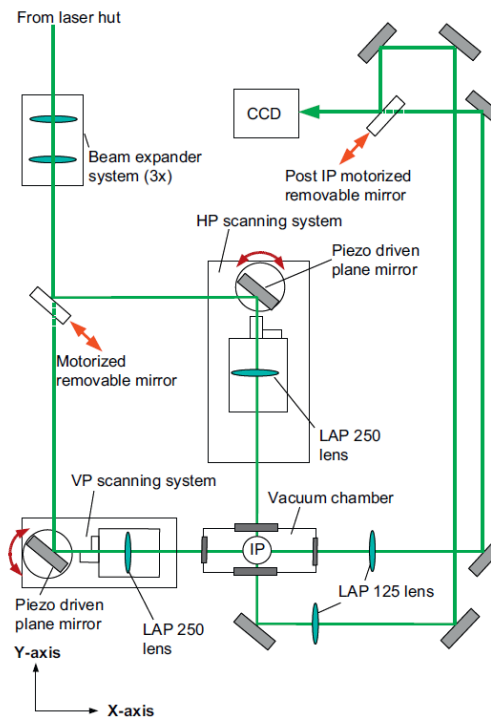
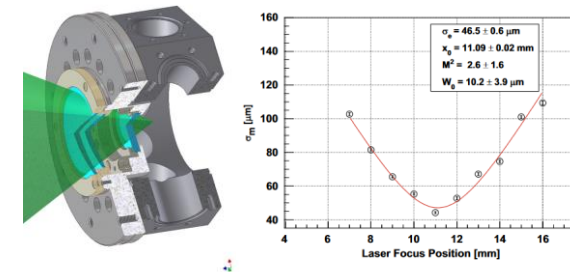


Schéma de la chaîne de contrôle



Focalisation du laser



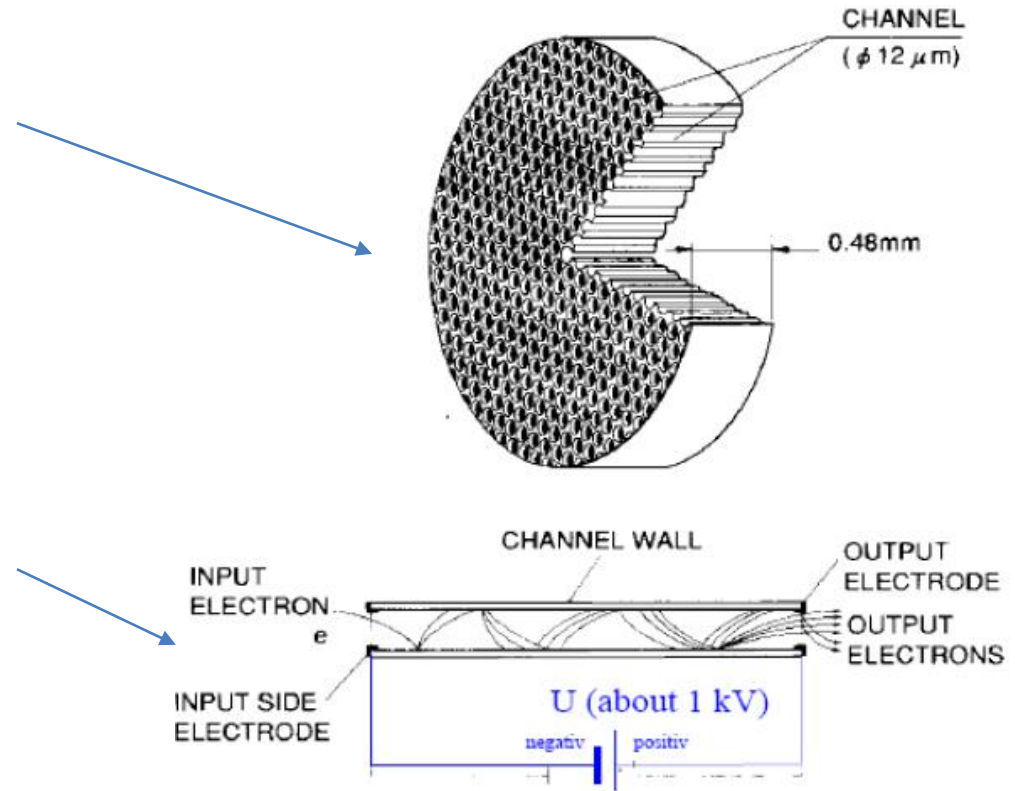
La réalité



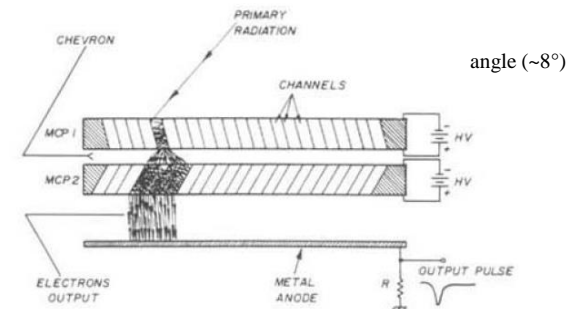
Mesure d'intensité: Microchannel plate (MCP)

Des MCP peuvent être employées pour amplifier un signal:

- Par exemple en vue d'une mesure de comptage, de courant
- MCP: 10^4 à 10^7 tube multiplicateurs
 - <1mm d'épaisseur, tubes (canaux) de quelques $10\text{s } \mu\text{m}$
 - résolution temporelle courte (< 100 ps)
 - Résolution spatiale limitée par dimension tube/espacement
- Quand un ion (ou électron) frappe la surface, des e^- secondaires sont libérés (conversion pour ions).
- Ces e^- sont multiplié typiquement par 10^3 .
- Pour une amplification plus élevée
→ 2 MCP, géométrie en chevron



Matériaux: ~verre de plomb avec un traitement de surface



Mesures de pertes faisceaux (BLM)

Les pertes du faisceau doivent être surveillées avec attention, Elle peuvent être:

- régulières et indiquer l'efficacité de transport:
 - lieux sensibles aux pertes (ex: joint en Vuitton entre deux tubes)
- le signe d'un dysfonctionnement de la machine

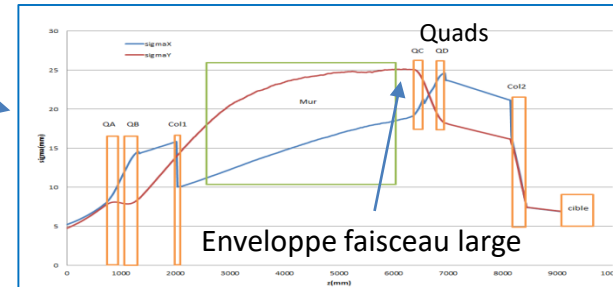
Les moniteurs de pertes faisceaux (BLM) sont installés à des lieux névralgiques le long des tubes faisceaux

Risque d'activation: Les pertes doivent être garder relativement basse pour permettre ensuite la maintenance après opération:

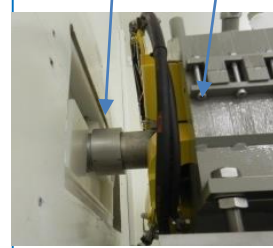
- Maintenance dite a la main: 15 $\mu\text{Sv/h}$ (à 30 cm)
- Consensus 1W/m. Pour un faisceau hadron de 1GeV, cela veut dire < 13 particules/m a 500MHz. Pour les électrons, cela peut être plus

Cela fait des BLM, l'un des outils primordiaux lors des réglages machines par exemple au moment du commissioning.

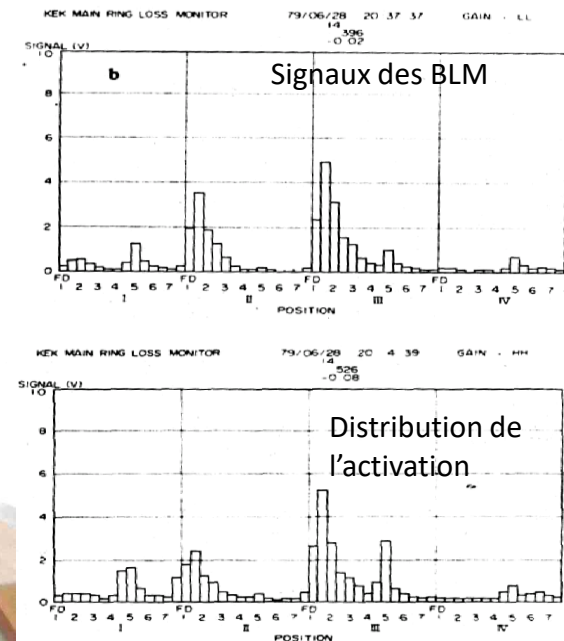
Lieu sensible (Arronax)



Joint de connexion de tube
Quads



Corrélation entre perte faisceau et activation (Anneau de KeK – Japon)



Endommagement a Tevatron



Mesures de pertes faisceaux (BLM)

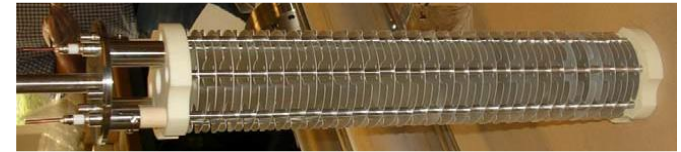
- Technologie:

- Chambres d'ionisation dans lesquelles les particules perdues ionisent un gaz qui produit un signal électronique.
 - Peuvent être courts, ou longs (~câbles)
- Détecteur à Scintillation
- Semi-conducteur
- Fibres optiques autour de l'accélérateur.
 - silice fondue synthétique
 - Les particules perdues vont émettre du rayonnement Cerenkov dans la fibre et ce signal lumineux est détecté par un tube photomultiplicateur.

CERN-LHC:
electrodes en
Aluminium,
isolateur en
ceramique
1.5 l, 1.1 b N₂,
 $t_{rep}=0.3\mu s$,
156pA/ (rad/h)



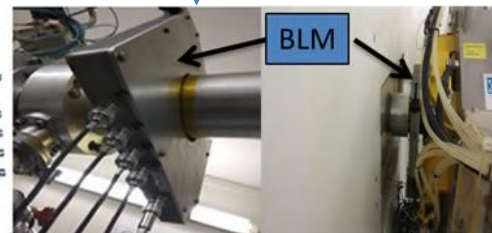
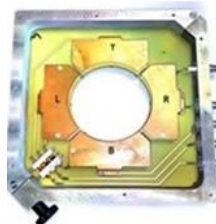
B. Dehning et al, "The LHC beam loss measurement system"



Scintillateur sur
machine Flash
(DESY)



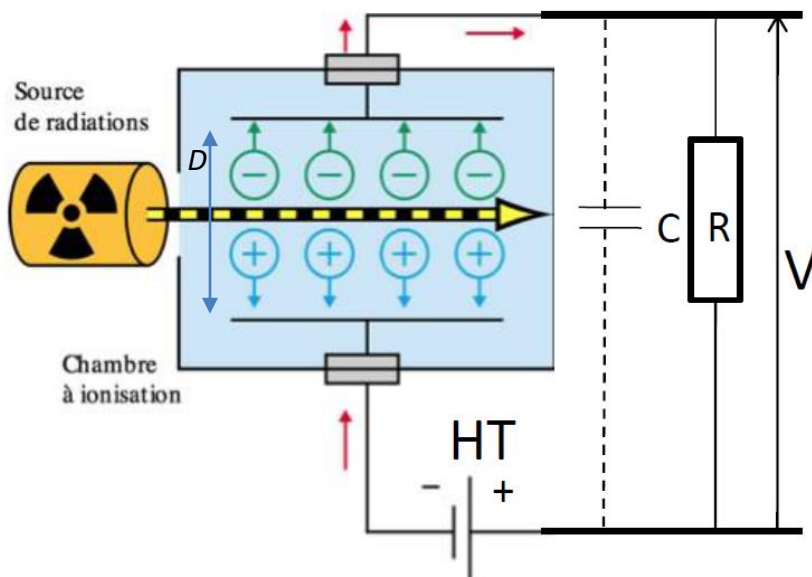
Chambre (air) sur ligne proton, casemate
12000 mSv/h (Arronax), 650V



BLM

BLM: Chambres d'ionisation

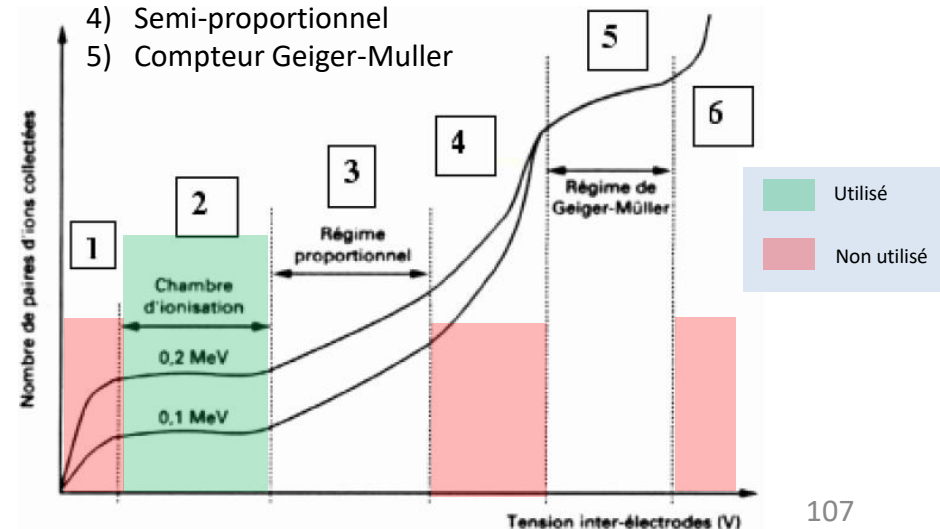
- Description:
 - La forme la plus simple de la Chambre d'ionisation est basée sur 2 électrodes métalliques parallèles séparées par un interstice (gap) d'épaisseur D .
 - Ce gap est rempli d'un gaz (air, argon, xenon,...) ou liquide de densité ρ . Ceci définit le volume sensible du détecteur.
- Principes:
 - Haute tension V est appliquée entre l'anode et la cathode
 - Les particules ionisantes traversant le volume sensible ionisent le gaz (liquide)
 - Sous l'effet du champ électrique créé par V , les électrons et ions vont migrés vers les électrodes.
 - Le nombre d'e- atteignant l'anode dépend de la haute tension (régime de fonctionnement)
- La chambre ici mesure les ions et électrons émis



Généralement, pour BLM, on préfère un gap petit et une tension plus élevée dans le régime 2

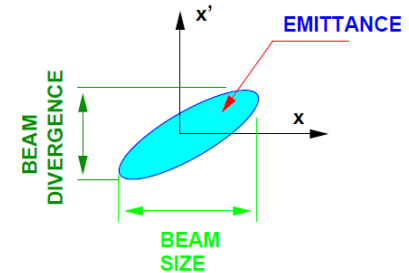
Régime:

- 1) Recombinaison partielle (totale) des ions
- 2) Ionisation primaire "Chambre d'ionisation"
- 3) Proportionnelle "compteur proportionnel"
- 4) Semi-proportionnel
- 5) Compteur Geiger-Muller



Mesures d'emittance transverse

(1/4)



- Emittance transverse: quantité très importante définissant la ~qualité du faisceau
 - Rappel:
 - Emittance provient de taille et divergence du faisceau (voir définition précédente)
 - La taille du faisceau peut être modifié par un élément magnétique
- Plusieurs techniques pour mesurer l'émittance:
 - Balayage du faisceau ou positionnement multiple
 - Poivrière
 - Mesure d'Allison

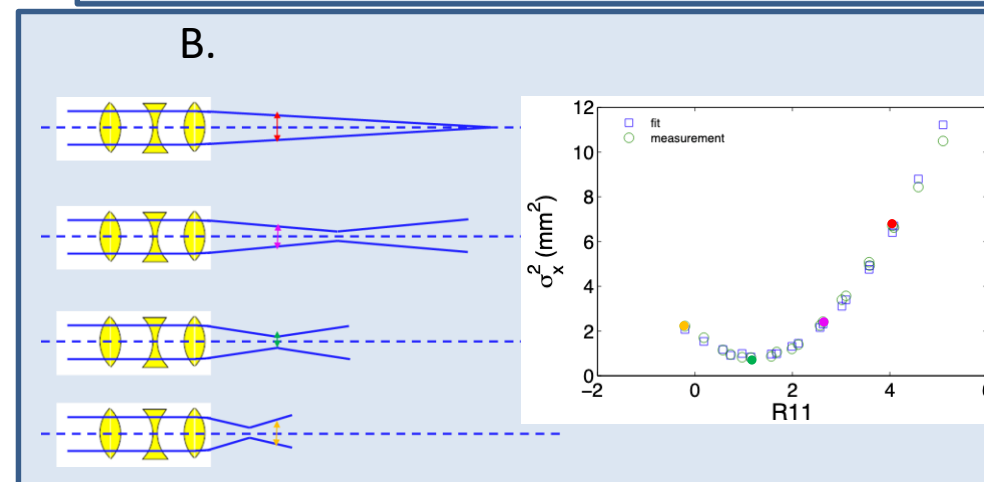
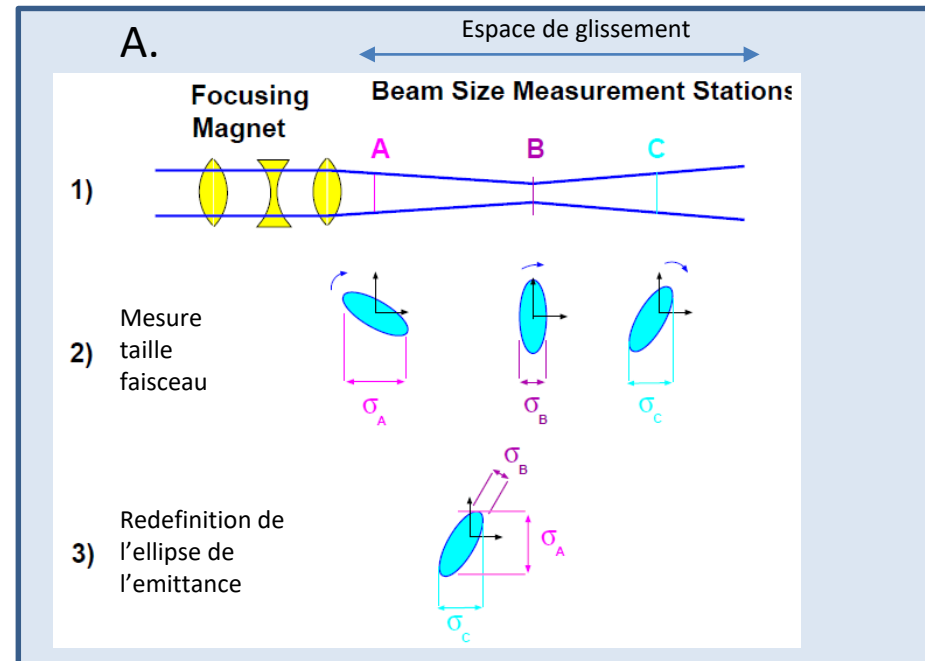
Emittance: Mesure avec optique faisceau

- A. Avec plusieurs diagnostics de mesure de taille (profil à fil ou laser wire) installés le long de l'accélérateur dans un espace de glissement (sans champs), on peut mesurer la taille faisceau et en déduire l'émittance.

$$- \sigma_x = \sqrt{\varepsilon_x \beta_x} *$$

- Minima 3 points de mesures

- B. Avec un seul point de mesure mais un quadripôle dont on modifie le champ



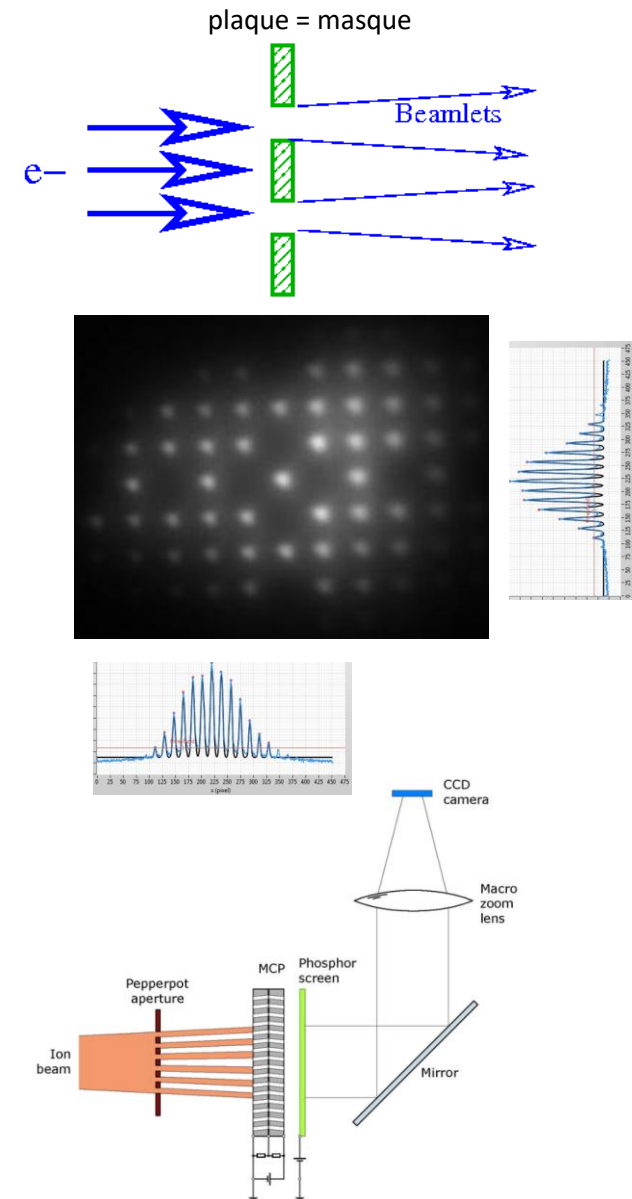
Emittance: Poivrière

la méthode de la poivrière

- consiste en un échantillonnage du faisceau par une plaque avec des trous (ressemblant à une poivrière).
- En passant à travers cette plaque le faisceau est divisé en de nombreux sous-faisceaux.
- Sur un écran en aval il est alors possible de mesurer la taille du faisceau à la poivrière (en comptant les sous-faisceaux et leur amplitude) et la divergence de chacun des sous-faisceaux.

Il est donc possible d'en déduire l'émittance.

Principalement utilisée avec des électrons/ions à basse énergie mais des expériences à plusieurs GeV ont eu lieu.



ici les petits faisceaux sont converti en e- dans la "micro-channel plate" (MCP)

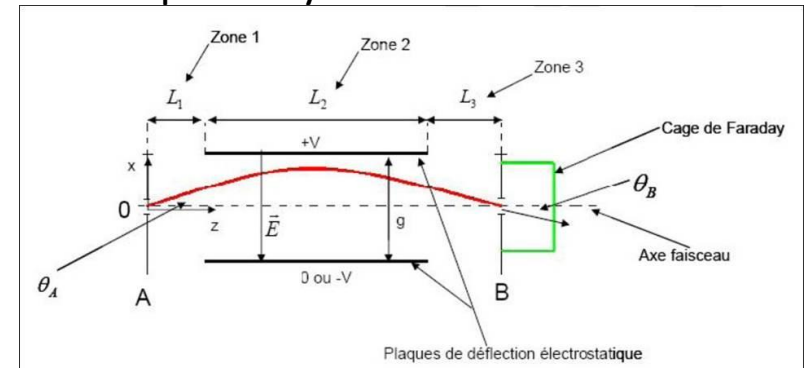
Emittance: Système type Allison

Le mesureur d'Allison est basé

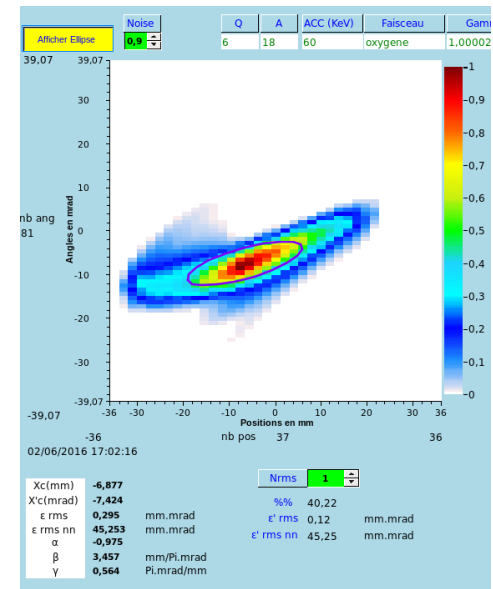
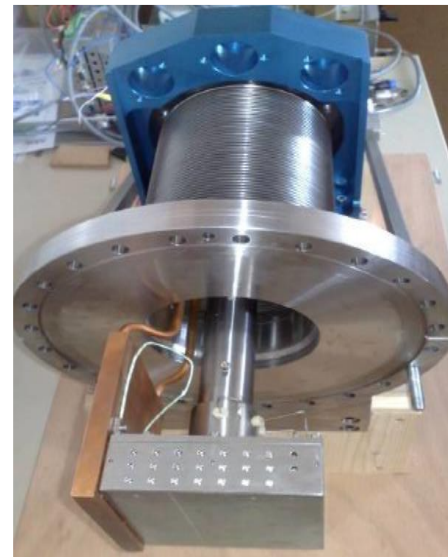
- sur une fente qui se déplace dans le faisceau. Celle-ci sélectionne une petite partie du faisceau.
- Un champ électrique appliqué après la fente permet de dévier plus ou moins ce faisceau.
- Une deuxième fente devant une cage de Faraday permet de ne conserver que la partie du faisceau qui a la bonne trajectoire en fonction de la tension appliquée (ce qui permet de calculer la divergence initiale de ce sous-faisceau).
- La mesure est répétée pour différentes positions de la fente et différentes tensions ce qui donne le profil du faisceau dans l'espace de phases.

Principalement utilisée avec des ions.

Principe du système Allison



$$\Theta_B \approx \Theta_A \approx \frac{\Delta V L_2 (L_2 + 2L_3)}{4 U |g| (L_1 + L_2 + L_3)}$$

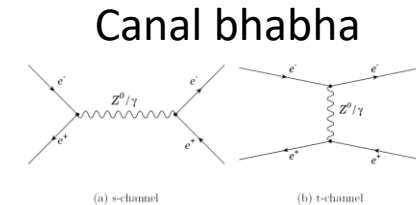
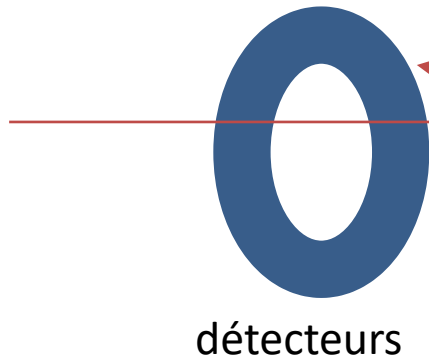


Lumi?

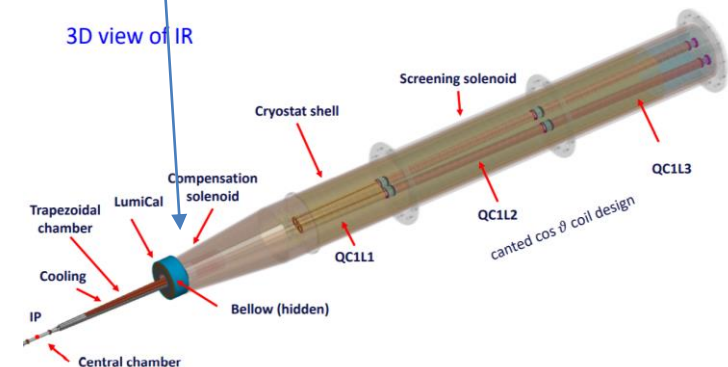
- Mesurer la luminosité dans les collisionneurs:
 - On va employer un canal de réaction de référence dont on connaît avec précision la section efficace (à une énergie et pour des angles donnés) et qui est adapté (suffisamment d'évènements)
 - On mesure le nombre de particule pour cette réaction
 - On revient alors à la mesure de la luminosité instantanée (et absolu)
- Cette méthode est aussi employée dans des collisionneurs fixes (par exemple ceux qui produisent des radio-isotopes) avec une feuille de référence

Pour machine e⁺ / e⁻:

$$L_{cherché} = \frac{N_{mesuré}}{\sigma_{connu}}$$



3D view of IR



D'autres méthodes s'établissent sur le scan à l'IP.
Il peut aussi y avoir des mesures de luminosité relative avec des détecteurs plus éloignés

- Les diagnostics dans leur jus:
(Quelques planches non vues pendant le cours)

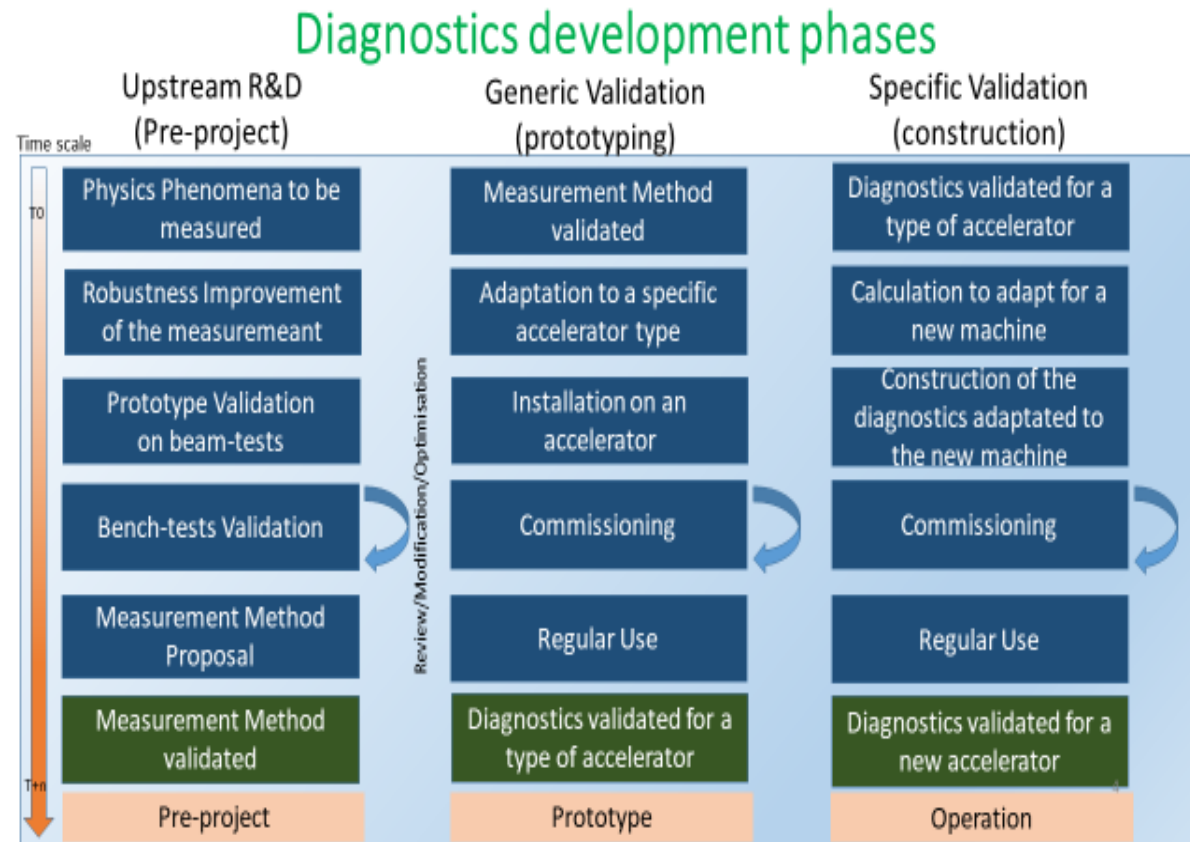
Phases de développements des Diagnostics

Dvt de diags prend du temps:

- R&D
- Validation générique: proto
- Validation spécifique: ope.

Diags participent aussi aux phases d'opération de l'accélérateur:

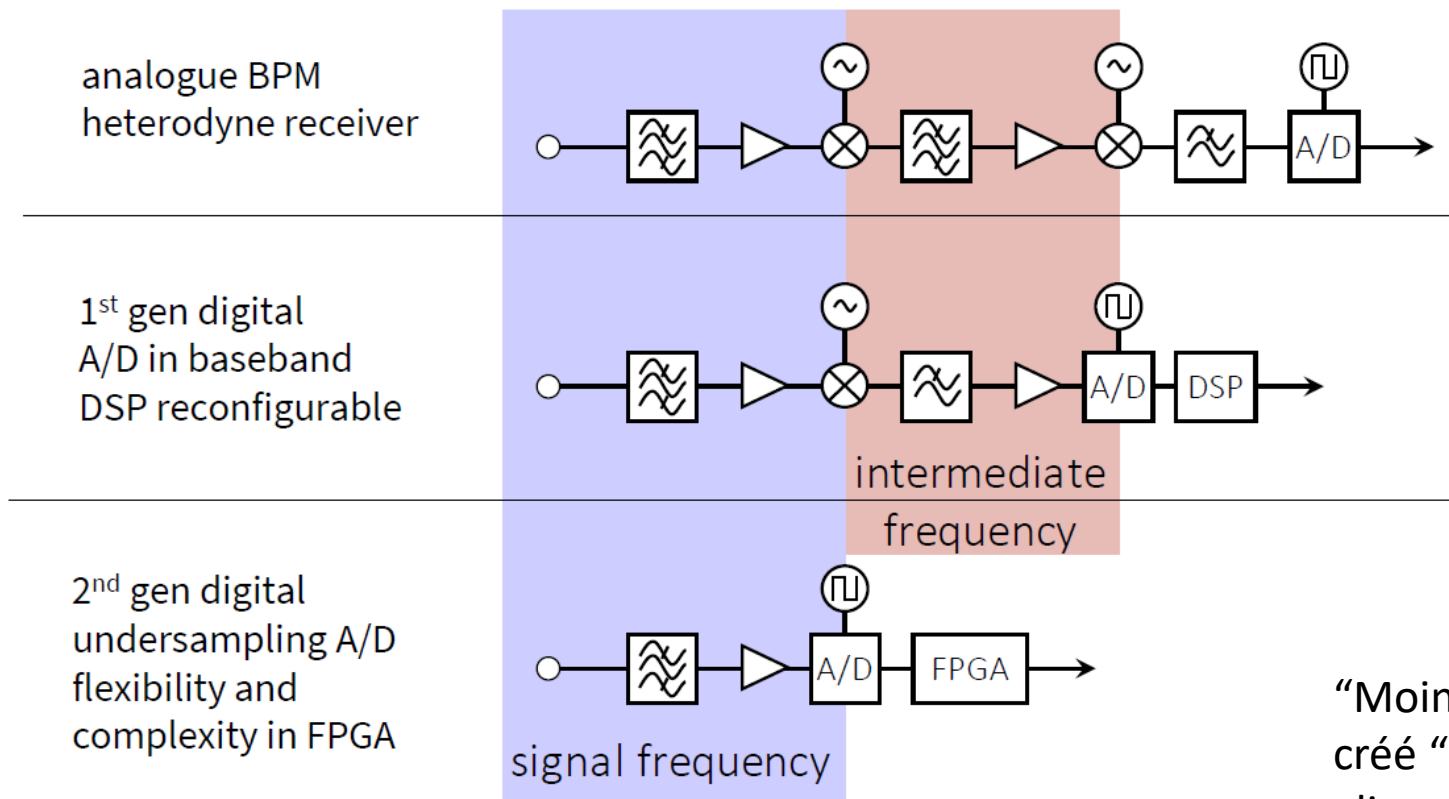
- Règle de sécurité pour l'autorisation de commissioning
- Phase de Commissioning (préparation des premiers réglages faisceaux, vérification que la machine est en capacité d'atteindre certains objectifs),
- Phase de prise en main (passage de relais vers les équipes d'opérations)
- Phase d'opération standard
 - Démarrage (le matin ;)
 - Operations régulières



Initial work: N.Delerue, IJCLab

Rapatrier les signaux

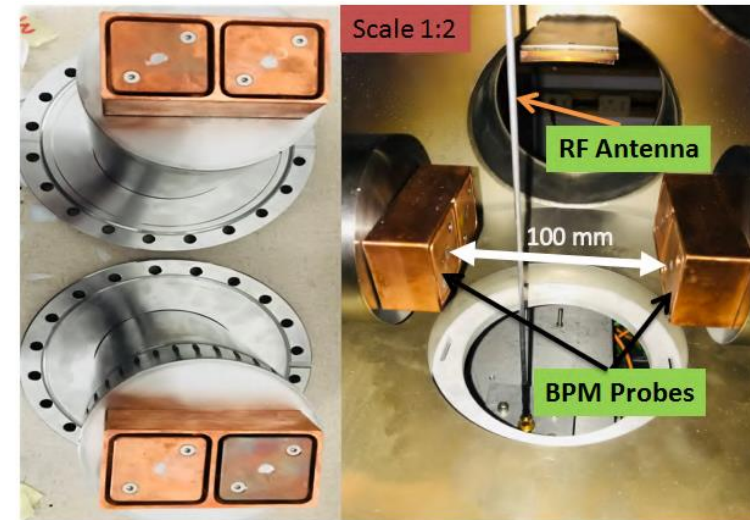
- Evolution des systèmes de lectures pour BPM*



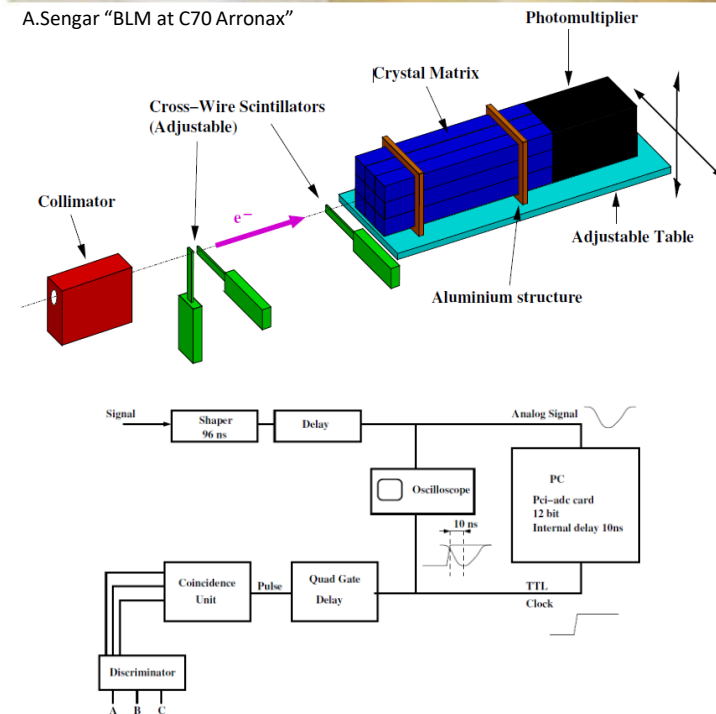
“Moins de composants”
créé “moins de
glissement” du signal

Tester le système de détection

- Utilisation d'un banc de manip comprenant l'élément à tester:
 - La chaine de mesure avec une électronique appropriée
 - Un modèle "copiant" le faisceau
- Utilisation d'un banc avec un faisceau intermédiaire ou très bien calibré
 - Moins de particules, moins énergétique,...
- Utilisation du faisceau de la machine sur lequel le diagnostics sera employé
- S'informer de ce qui existe → réseau



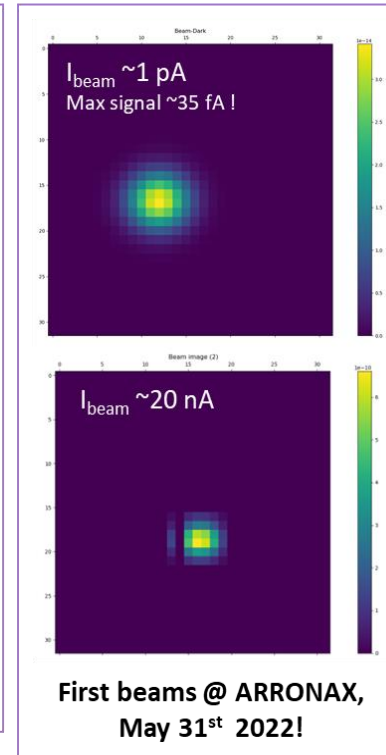
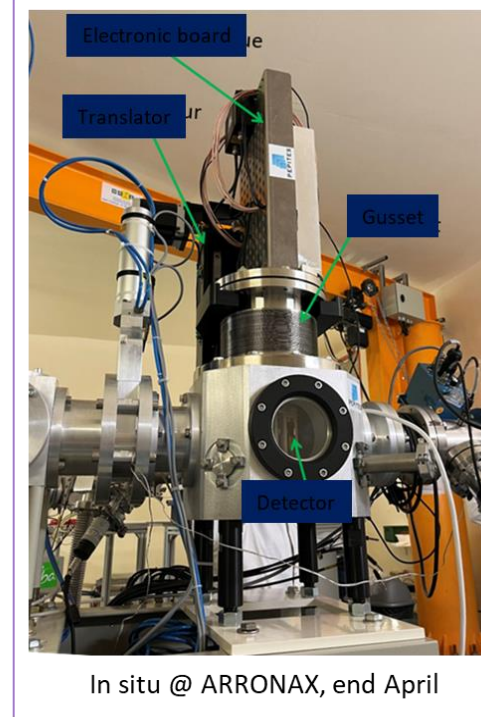
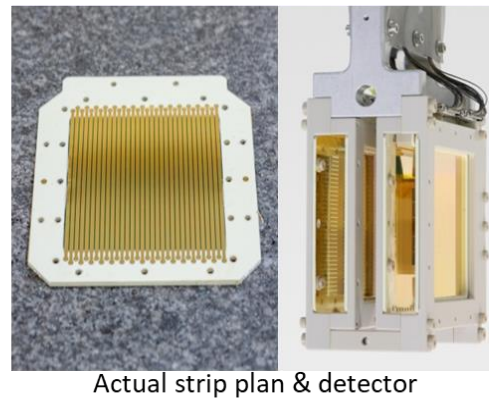
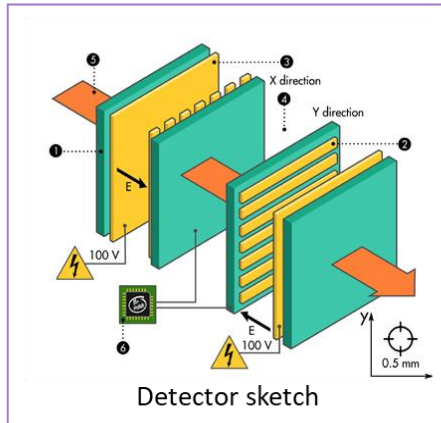
A.Sengar "BLM at C70 Arronax"



Autres exemples - Diag

PEPITES

A Secondary Electron Ultra-thin Charged Particles Beam Profiler



- Secondary Electron Emission based ultra-thin charged beam profiler
 - **10 μm Water Equivalent Thickness**
- Operated in vacuum of beam line
- Built with thin film techniques:
 - Segmented electrode signal : 32 gold strips, **50 nm thick**, ~2 mm wide, 7 cm long, deposited on 1.5 μm polyimide film
 - Fully metallized plan for electron collection : same materials and thicknesses, +100 V potential
- Radiation hardness tested
 - @ ARRONAX with 68 MeV protons, up to 10^8 Gy
 - @ LSI with 2 MeV electrons, up to 10^9 Gy
- Low noise and wide range dedicated electronic made by CEA



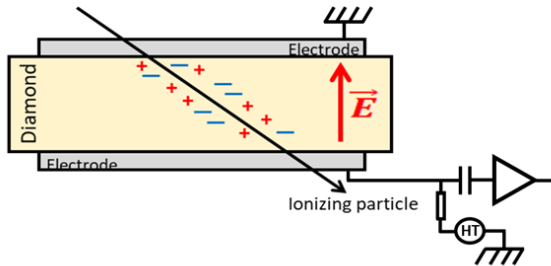
Contact person: M.Verderi, LLR

Autres exemples - Diag

Diamond as beam tagging monitors



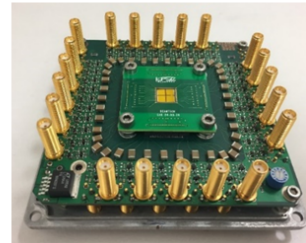
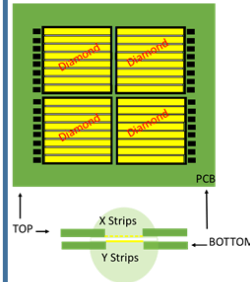
Solid-state ionizing chamber



Diamond properties useful for particle detection:

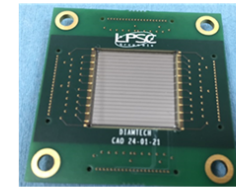
- Radiation hardness
- High mobilities of charge carriers
- High breakdown voltage
- Low leakage current
- Intrinsic efficiency ...

Diamond beam monitor for hadrontherapy

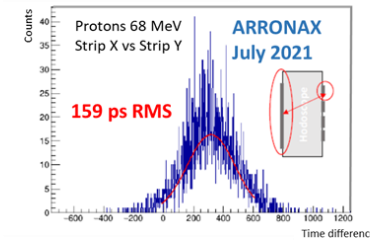


4 sCVD = 1cm²
32 channels

LPSC Hodoscope prototype 42 channels + Front End electronic (fast preamplifiers) developed at LPSC



1 pcVD = 4cm²
40 channels



Beams specifications

- **Proton therapy** (Cyclotron IBA/C230 Orsay, Dresden...):
 - ☐ Bunch: 1-2 ns
 - ☐ HF : 100 MHz
 - ☐ 200 protons/bunch
- **Proton therapy** (Synchro-cyclotron Nice S2C2):
 - ☐ Bunch: 7 ns (16 ns)
 - ☐ Train: 4 μs (1 ms)
 - ☐ 10⁴ protons/ micro-bunch
- **Carbone therapy** (HIT/CNAO):
 - ☐ Bunch: 20-40 ns
 - ☐ Bunch interval: 200 ns
 - ☐ 10 ions/bunch

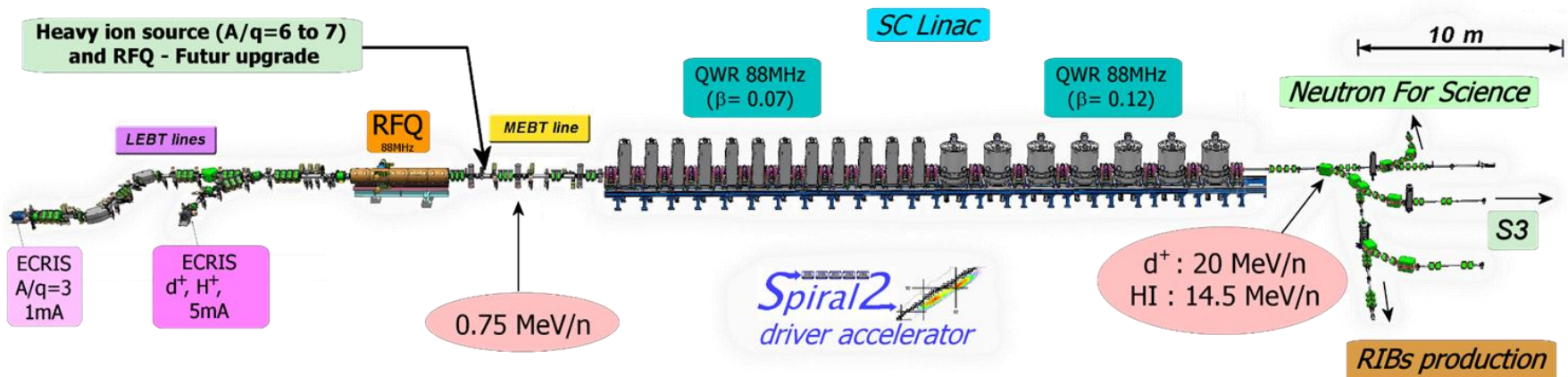
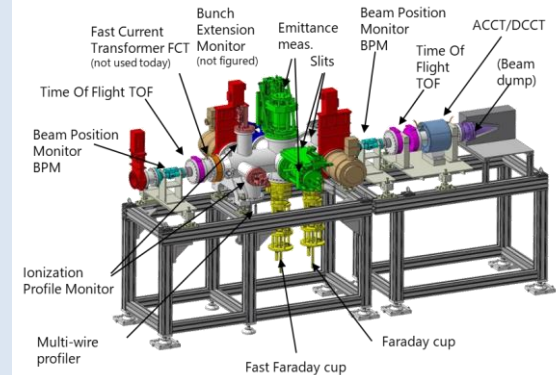
Beam tagging hodoscope specifications

- **Counting rate:**
 - ☐ 100 MHz for the whole detector
 - ☐ ~10 MHz per channel
- **Time resolution:**
 - ☒ At the level of 100 ps
- **Spatial resolution:**
 - ☒ 1mm (readout strip)
- **Radiation hardness:**
 - ☐ 10¹¹ protons/cm²/treatment, about 20 treatments a day =>10¹⁴ protons/cm²/year

Spiral 2 – Diag POV commissioning

- From December 2015 to November 2018, First commissioning phase.
 - RFQ beams and Diags were characterized with a Diagnostic Plate (removed since)
- In July 2019, the beam commissioning with a proton beam started in the MEBT. Then, from October to December, the commissioning continued in the linac and HEBT.
- In July 2021, with a helium beam at 40 MeV, beam energies were measured using ToF with BPMs

Diagnostics Plate



Spiral 2 - DESIR (1)



DESIR Désintégration, Excitation
et Stockage d'Ions Radioactifs



LP2i
Bordeaux

SPIRAL2 LINAC

DESIR: Dedicated to the study of nuclear structure, astrophysics, and weak interaction at low energy

Exotic ion beams (RIB)
=
SAMPLES to measure

High Resolution Separator
HRS

- ☐ Ion of Interest selection
- ☐ Beam purification

S^3 RIB
production

RFQ-Cooler Buncher
GPIB

- ☐ Beam preparation
- ☐ Accumulation and bunch delivery

Double Penning Traps

PIPERADE

- ☐ 2nd beam purification
- ☐ Mass Measurement

SPIRAL1
RIB
production

DESIR
Future Experimental Hall to
measure Exotic Ions properties

De spiral1: 20 pA CW single
charged ion beam
De spiral2: 10^6 ions in a $1\mu s$
bunch

- ☐ Low energy ions (< 60 keV)
- ☐ Low intensity beam ($< 10^8$ pps) CW & Bunched

- Laser Spectroscopy
- Mass Spectroscopy
- Decay Spectroscopy

Contact person: L.Daudin, LP2I

Spiral 2 - DESIR (2)

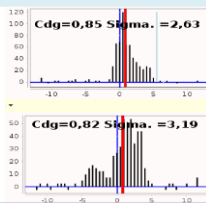


DIAGNOSTICS for

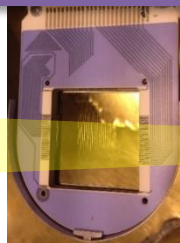


Exotic ion beams (RIBs)

- ☐ Low energy (< 60 keV)
- ☐ Low intensity (< 10^8 pps) CW & Bunched



BPM



✓ GANIL Profilers

Wire Harps

- 2 x 47 W/Au wires (H & V)
 - 70 μ m diam.
 - 0,5 mm step
- Semi-interceptive 90% transp.
- 1 ms < IT < 10 second
- Ceramic PCB



FCup



✓ GANIL SPIRAL2 FCup

CW beam :
GANIL-PicoLin I/V Amplifier



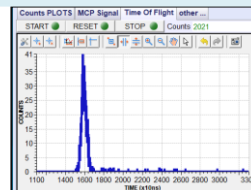
- High sensitivity / Low Bandwidth
- Wide range (50 fA ... 10 μ A)

microsecond bunches:
Femto DHPCA I/V converter



- High Bandwidth / Less sensible
- > 5 nA \rightarrow 3. 10^4 ions / 1 μ s bunch

EPICS
Control System



MCP



✓ LP2i Bordeaux

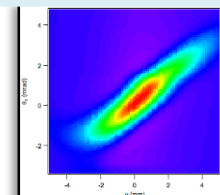
TOPAG
MicroChannelPlates

- Counting Mode
- Single ion to 10^7 pps
- Attenuation grids for higher intensity & Energy Meas.

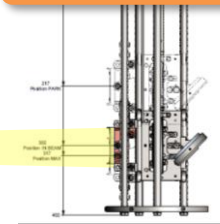
LP2iB RedpitTOF



- Redpitaya board FPGA dev.
- Counting (upto 5. 10^7 pps)
- Time Of Flight (10 ns resolution)



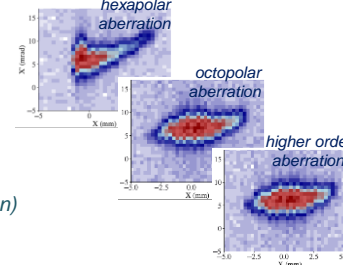
EMT



✓ Pantechnik

« PepperPot » type

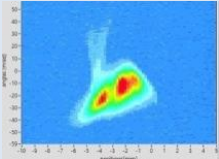
- Emit. Figure Shape measurement to estimate and correct HRS aberrations.
- \rightarrow resolving power improved



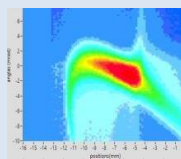
Emittance-mètre

- Emittance meter in operation on different facilities since 2021.
- Now shared in the framework of the French Beam instrumentation network
- Planned to be used/adapted on the above accelerators (Newgain, Myrrha,...)

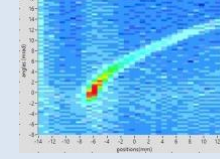
- Goal:
 - Share equipment
 - Discuss, analyse measurements
 - Improve collective knowledge
- Issues raised:
 - Versatility for various applications
 - Availability
 - Radioprotection & transport
 - Safety procedure



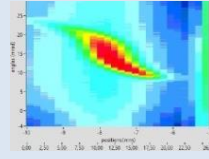
ARRONAX, Nantes:
cyclotron injection channel.
Multibody structure with
non-uniform charge density



IPHC, Strasbourg: EmitM
commissioning on ion source
test bench (HeatWave Labs,
Inc)

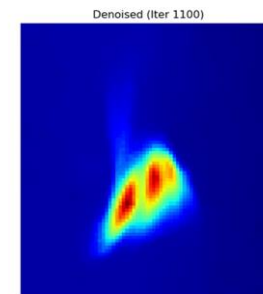
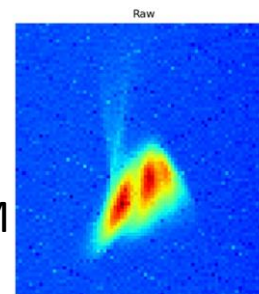


L2IB, Bordeaux: DESIR/SPIRAL 2
spectrometer
on line characterization



ARIBE: characterization of Ar⁸⁺ beam
at 30 keV
and commissioning of beam focusing
prototype

Exploration de
l'utilisation de l'IA
pour l'image
provenant d'un EM

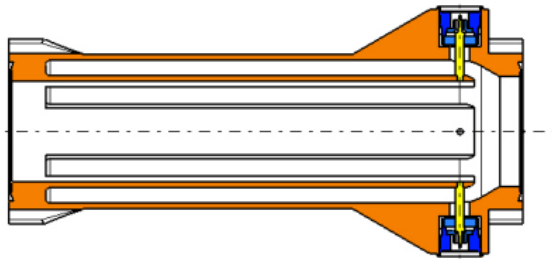


Performed by IPHC, Univ. Strasbourg (FO) 2025 release

Contact person: F.Osswald, IPHC

Additive manufacturing to design advanced diagnostics

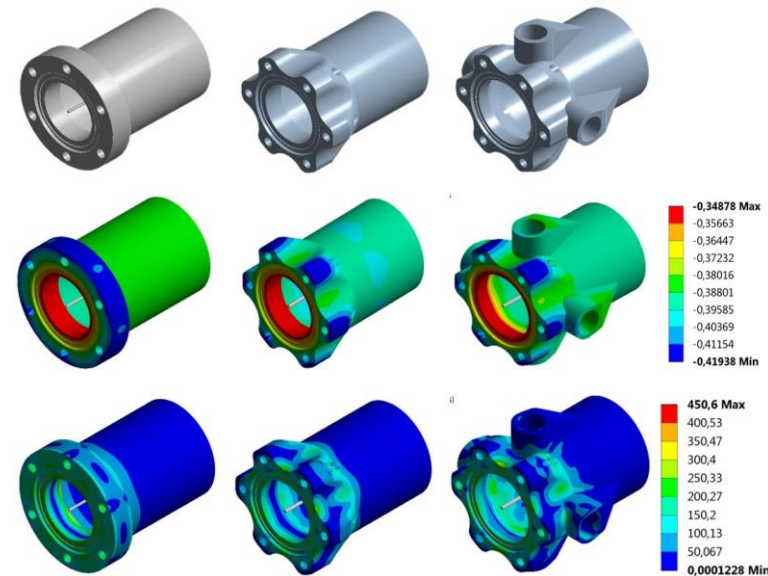
- We are investigating the use of additive manufacturing for diagnostics.
- It allows design closer to physical requirements.
- Eg: on a BPM, the electrodes can have a better impedance matching.
 - 60% of original weight
 - Shorter production time



316L stainless steel powder

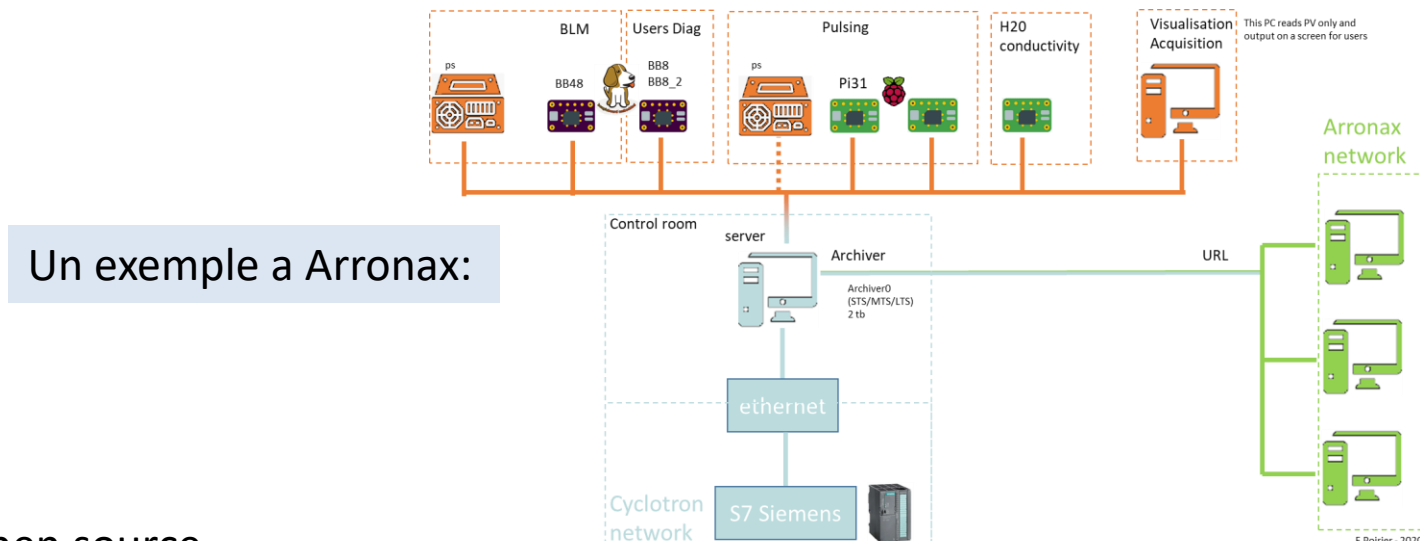


stress induced displacement



Intégration

- Les diagnostics et leur chaîne de mesure s'intègrent dans un système de distribution des valeurs qu'ils mesurent.
 - Ces valeurs peuvent être rapatrier dans des réseaux qui suivent un protocole d'échange d'information, avec un SCADA (Système de Contrôle et d'acquisition de Données).
 - Ces informations sont alors renvoyé en salle de commande.
- Deux SCADA ouvert* sont relativement bien distribués en France (ce ne sont pas les seuls!):
 - TANGO (TAcO Next Generation Objects): ESRF, Soleil, ThomX...
 - EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System): Spiral2, Arronax,...

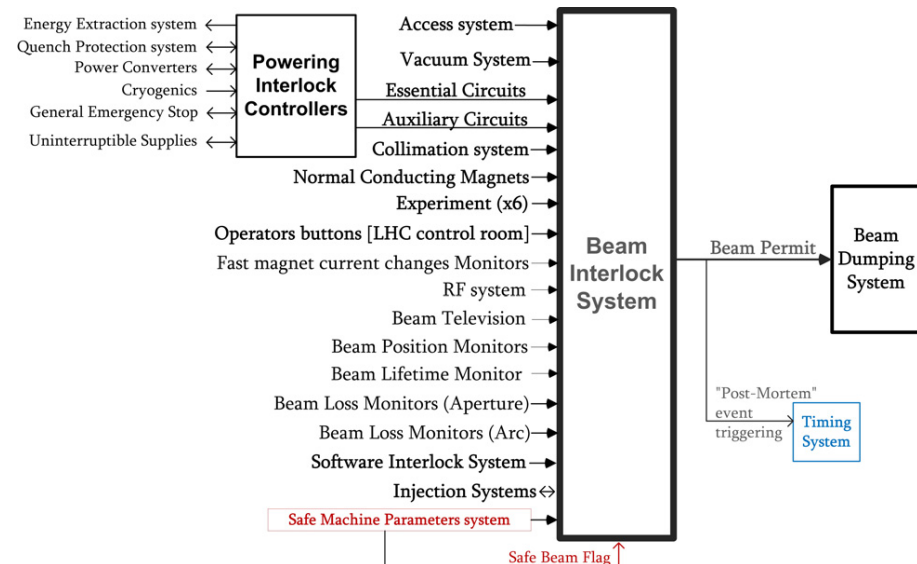


* open source

Protection machine

- Le système de protection machine (MPS) est ici pour protéger la machine dans les situations critiques, d'endommagements possibles ou accidentelles.
- La MPS se base sur un ensemble d'information :
 - Information
 - des diagnostics faisceaux: Perte de particules, Charge trop basse, trajectoire inadéquate,...
 - Autres diagnostics techniques: vide trop élevé, aimant magnétique hors consigne,...
- La MPS met en route des systèmes d'interlock afin par exemple d'empêcher le faisceau de continuer sa trajectoire dans l'accélérateur:
 - Cela peut être en bloquant le faisceau → ex une faraday descend dans le faisceau (à basse énergie)
 - Le faisceau est extrait dans un arrêt dédié (dump)
 - Des actions sont mise en route afin de diminuer l'intensité faisceau (sur la source par exemple)
- La MPS permet de mettre en route les "systèmes qui fournissent les évidences":
 - Indiquer à la chaîne des diagnostics et systèmes de contrôles ou "buffer" locaux de sauvegarder les informations pour l'analyse "post-mortem".
 - Localisation exacte du déclenchement

Exemple: système interlock du LHC*



Salle de commande

- Evolution :
 - Rapatriement des informations, des diagnostics faisceau et technique, des oscilloscopes vers plus d'écrans et de centralisation

AGS



LHC @ CERN

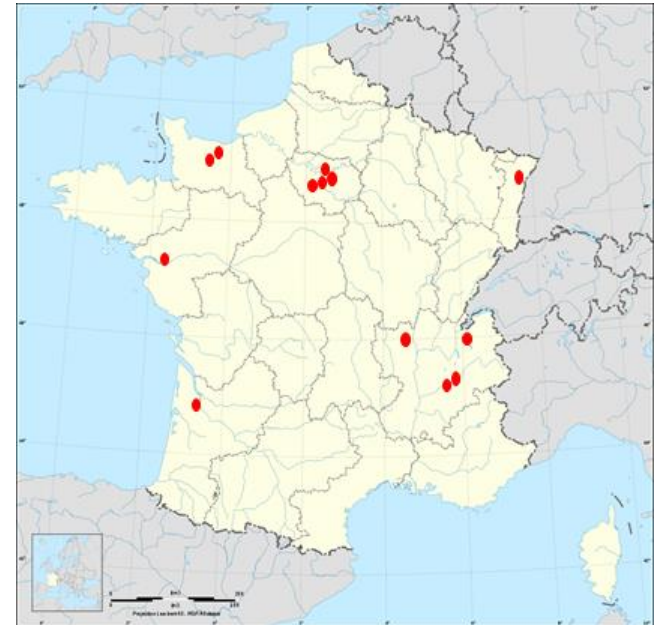


Derniers points

- Ici nous n'avons vu qu'un petit échantillon des diagnostics employés sur les accélérateurs
- Domaine très dynamique
- Des nouvelles idées qui germent:
 - des nouveaux diagnostics
 - des nouvelles perspectives:
 - Intelligence artificielle
 - Optimisation/construction avec Impression 3D
- Quelques activités du domaine:
 - IBIC - conférence diagnostics avec un prix à gagner!!!!
 - Réseau Instrumentation Faisceau

Le Réseau Instrumentation Faisceau (RIF)

- Rassemble les personnels de plusieurs laboratoires/instituts
- Mission première:
 - favoriser l'échange d'information
 - le partage de compétences au sein de la communauté des physiciens, ingénieurs et techniciens sur l'instrumentation.
- Comment:
 - Organiser les réunions régulières et journées liées aux problématiques du domaine
 - Recenser les compétences et expertises techniques
 - Mettre en relation les experts avec les problématiques rencontrés par la communauté
 - Identifier une/des thématiques de recherche relevant d'un verrou technologique dans le domaine afin d'en dynamiser la R&D
 - Faciliter la mise en place de projets inter-laboratoires



Le RIF

- Activités:
 - Passé: journées en présentiel sur les diagnostics
 - Présent:
 - Discussions/réunions en visioconférence sur les sujets techniques (ex: BLM, BPM, émittance-mètre,...)
 - Achat de systèmes pour support diagnostics (ex: carte électronique bas bruit)
 - Liste: email pour échange information
 - Prochaine réunion annuelle: Décembre 2025
- Contact:
 - Site web, tech-news de l'IN2P3: <https://tech-news.in2p3.fr/reseau-instrumentation-faisceau/>
 - (en travaux)
- Vous voulez en savoir plus ou vous joindre a la liste?
 - Vous êtes les bienvenu.e.s!!!
 - Contact email: RIF-COPIL-L@IN2P3.FR ou Freddy Poirier (Arronax)

