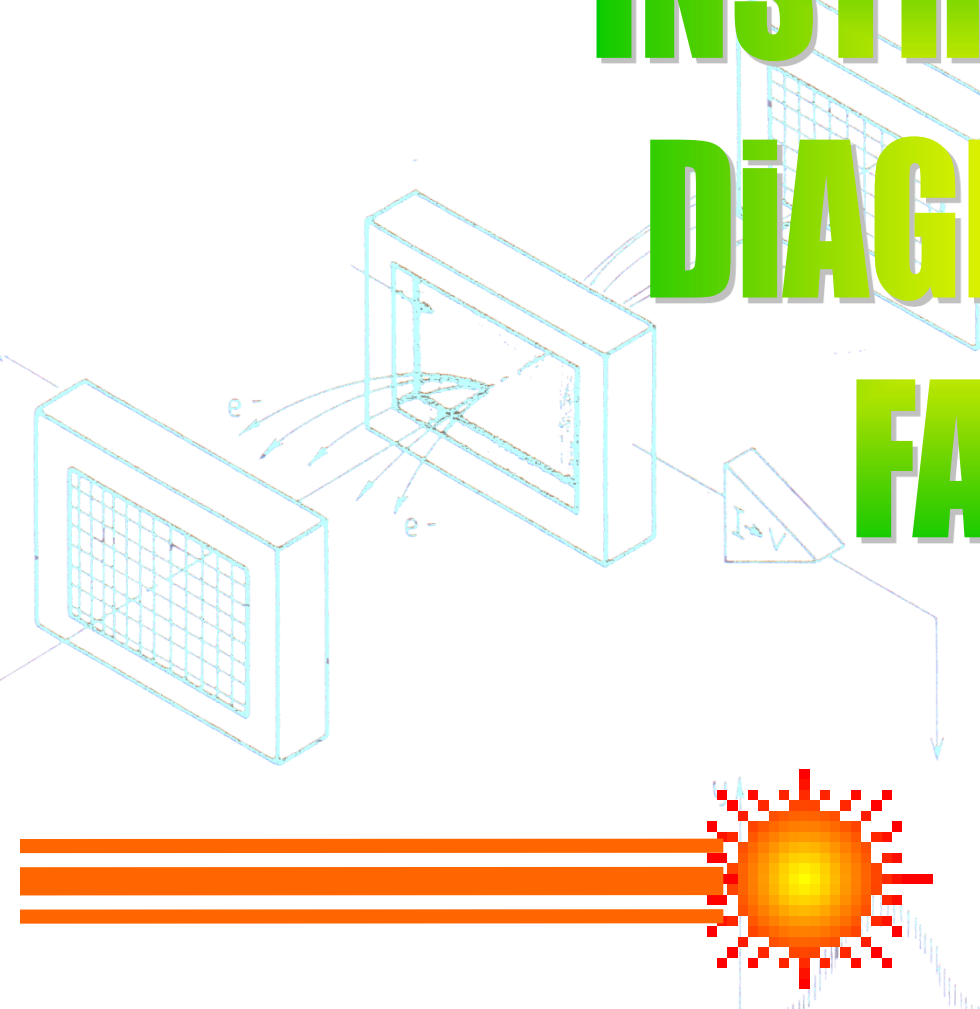


INSTRUMENTATION DIAGNOSTICS DE FAISCEAUX

Patrick AUSSET

ausset@ipno.in2p3.fr



Ecole des Accélérateurs
Benodet 6-11 mars 2016

SOMMAIRE

Introduction

- Propriétés d'un faisceau de particules chargées accélérées
- Mesures possibles . Exemples
- Utilisation des diagnostics de faisceau.

Mesure de l'intensité d'un faisceau de particules

- Diagnostics interceptifs: Interaction d'un faisceau de particules avec la matière
- Emission secondaire : détecteur à émission secondaire,
- Coupelle de Faraday
- Diagnostics non interceptifs: Champ électromagnétique associé au faisceau de particules
- Mesure de l'intensité d'un faisceau: Moniteur à courant de paroi , transformateurs de courant, électrode capacitive

Mesure de la position d'un faisceau

- P.U. électrostatique, moniteur à courant de paroi, P.U. magnétique. Exemples
- Electronique associée. Caractéristiques

Mesures des profils transverses des faisceaux

- Diagnostics interceptifs: Scintillateurs, chambre à ionisation, moniteur à ionisation du gaz résiduel , profileurs à émission secondaire, wire scanner.

- Multiplicateurs de lumière. Multiplicateurs de charges
- Diagnostics non interceptifs: luminescence, rayonnement X

Mesure de l'émittance d'un faisceau

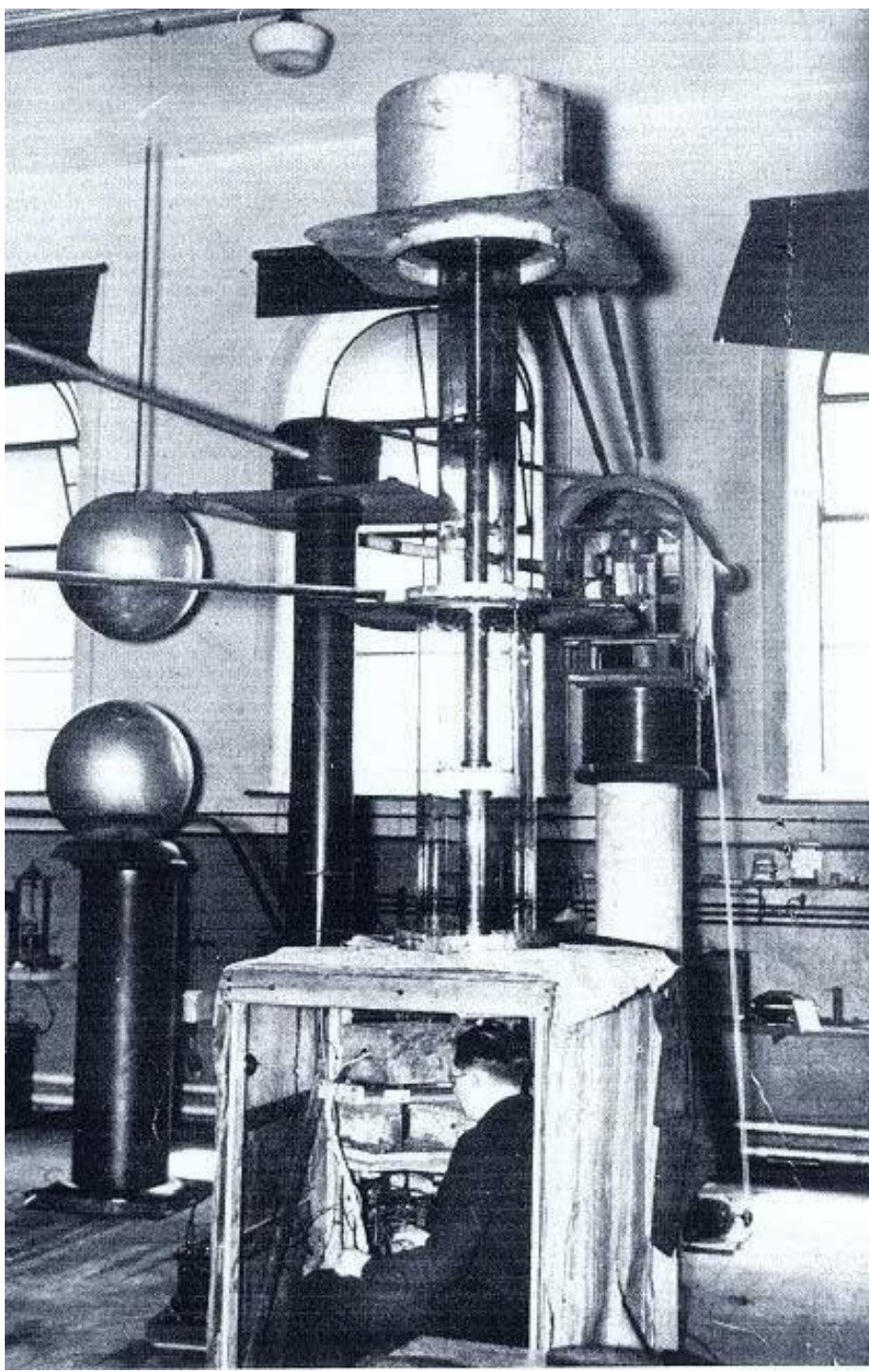
- Emittance transverse . Exemple de diagnostics
- Emittance longitudinale. Mesure de la durée d'un bunch: Exemples de diagnostics

Moniteurs de pertes de faisceau

- Motivation. Effets des radiations ionisantes
- Exemples de diagnostics.

Evolution des salles de commandes d'accélérateurs

Références

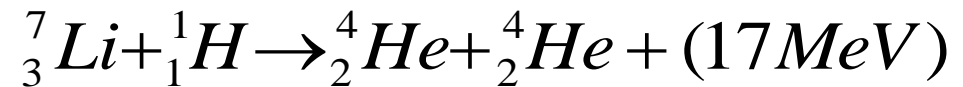


L' accélérateur de John Douglas Cockcroft et Ernest Thomas Sinton Walton.

Cavendish Laboratory, Cambridge.

- Protons accélérés à 800 keV par un système multiplicateur de tension à diodes et condensateurs appelé structure de Greinacher

- Bombardement d'une cible en lithium et désintégration du noyau de lithium en deux particules alpha (1932) :



- Obtention du prix Nobel en 1951:
« Transmutation d'un noyau d'atome par des particules accélérées artificiellement »

Diagnostic de faisceau utilisé:

Observation à l'aide d'un microscope des scintillations causées par les particules alpha sur un écran fluorescent en sulfure de zinc.

Contrôle du faisceau:

Accélérateur en fonctionnement normal

Mesure des paramètres du faisceau:

Mise en route des accélérateurs

Changement du mode de fonctionnement des machines

Aide à l'obtention rapide des caractéristiques nominales du

faisceau

Aide au diagnostic des dysfonctionnements et à la remise en fonctionnement

A la demande des expérimentateurs

Amélioration de la connaissance du fonctionnement des machines

En fonctionnement nominal et hors nominal

Développement machine

Une première classe importante de ces particules est constituée par les :

- Electrons : masse au repos $E_0 = m_{0\text{electron}}c^2 = 511 \text{ keV}$

Une deuxième classe de particules est représentée par les ions lourds allant du:

- Protons : masse au repos de $E_0 = m_{0\text{proton}}c^2 = 938,26 \text{ MeV}$

- Deutérium : isotope ^2H de l'hydrogène

- Tritium : isotope ^3H de l'hydrogène

à:

- Uranium dont la masse au repos est $E_0 \approx A \cdot u_{\text{ma}}$

A: nombre de masse (somme du nombre de protons et de neutrons d'un noyau)

$1u_{\text{ma}} \approx 931,5 \text{ MeV}$: L'unité de **masse atomique** est la masse d'un atome de ^{12}C divisée par 12

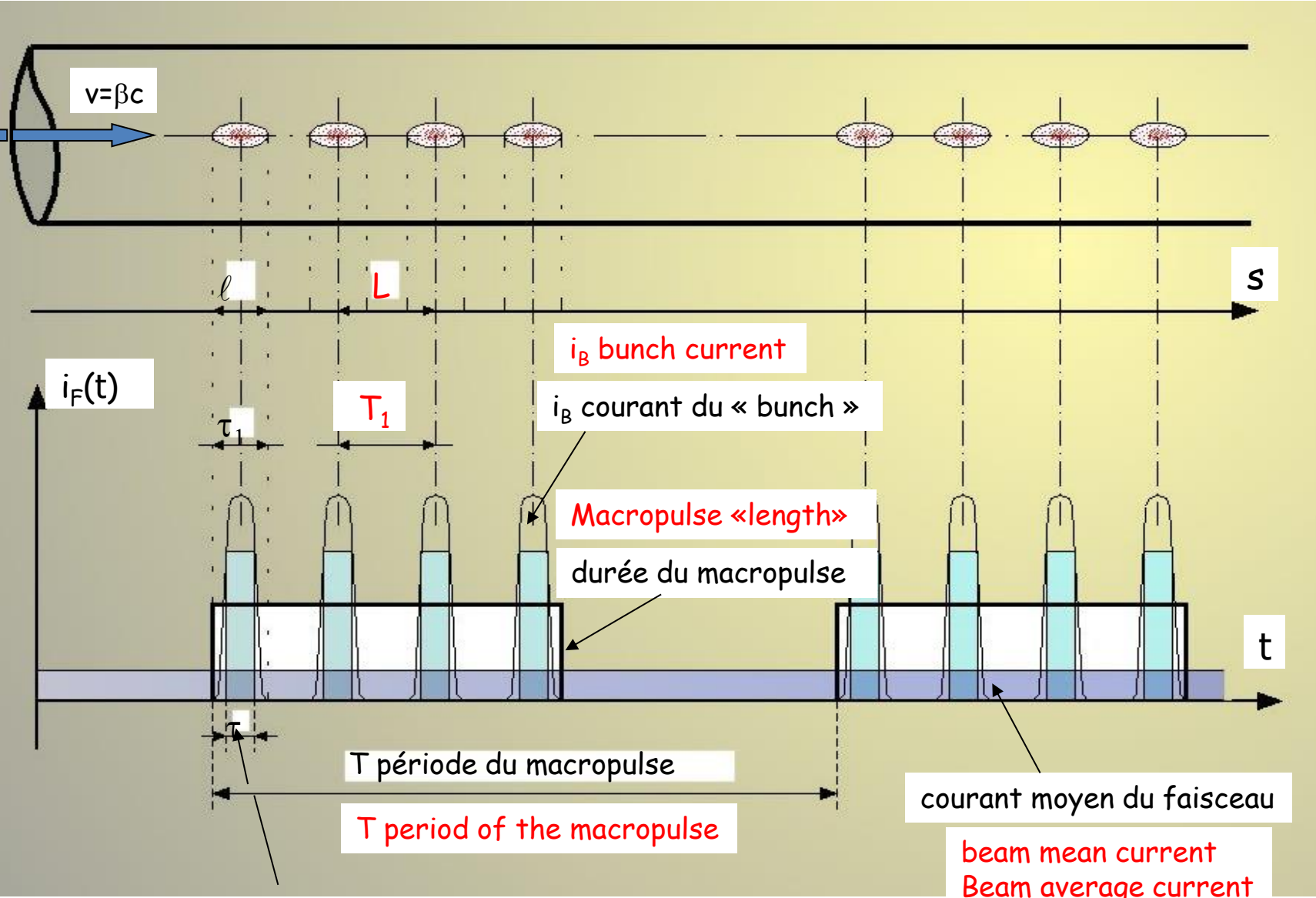
Ces ions peuvent être mono chargés ou plus fréquemment multi chargés. Les plus légers sont :

- Ion $^2\text{H}^+$: =2,014 ; masse au repos : 1875,585 MeV.

- Ion $^3\text{H}^+$ et $^3\text{H}^{2+}$: =3,016 ; masse au repos : 2808,86 MeV et 2808,35 MeV

- Ion $^4\text{H}^+$ et $^4\text{H}^{2+}$ (alpha : Noyau de l'hélium ^4H) : = 4,0026

masse au repos 3727,83MeV et 3727,32MeV



τ durée du bunch (équivalent rectangulaire)

Faisceau: ensemble de particules chargées se déplaçant à la vitesse $v = \beta.c$

- β : rapport de la vitesse de la particule/celle de la lumière (rappel: $0 < \beta < 1$)
- c : vitesse de la lumière = $299\,792\,458 \text{ m.s}^{-1} \sim 3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$
- Charge électrique élémentaire: $q = 1.602\,176\,462 \cdot 10^{-19} \text{ C} \sim 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Bunch: Le plus petit « paquet » de particules accélérées par la machine

- Généralement caractérisé par son nombre total N de charges : $Q = N.q$
- Le courant électrique est par définition: $I_b = \frac{dQ}{dt}$ et s'exprime en A, mA

Macro pulse: Ensemble des « bunches » accélérés par la machine constituant finalement le faisceau « utile » pour l'expérience.

- Généralement caractérisé par son courant moyen exprimé en A, mA

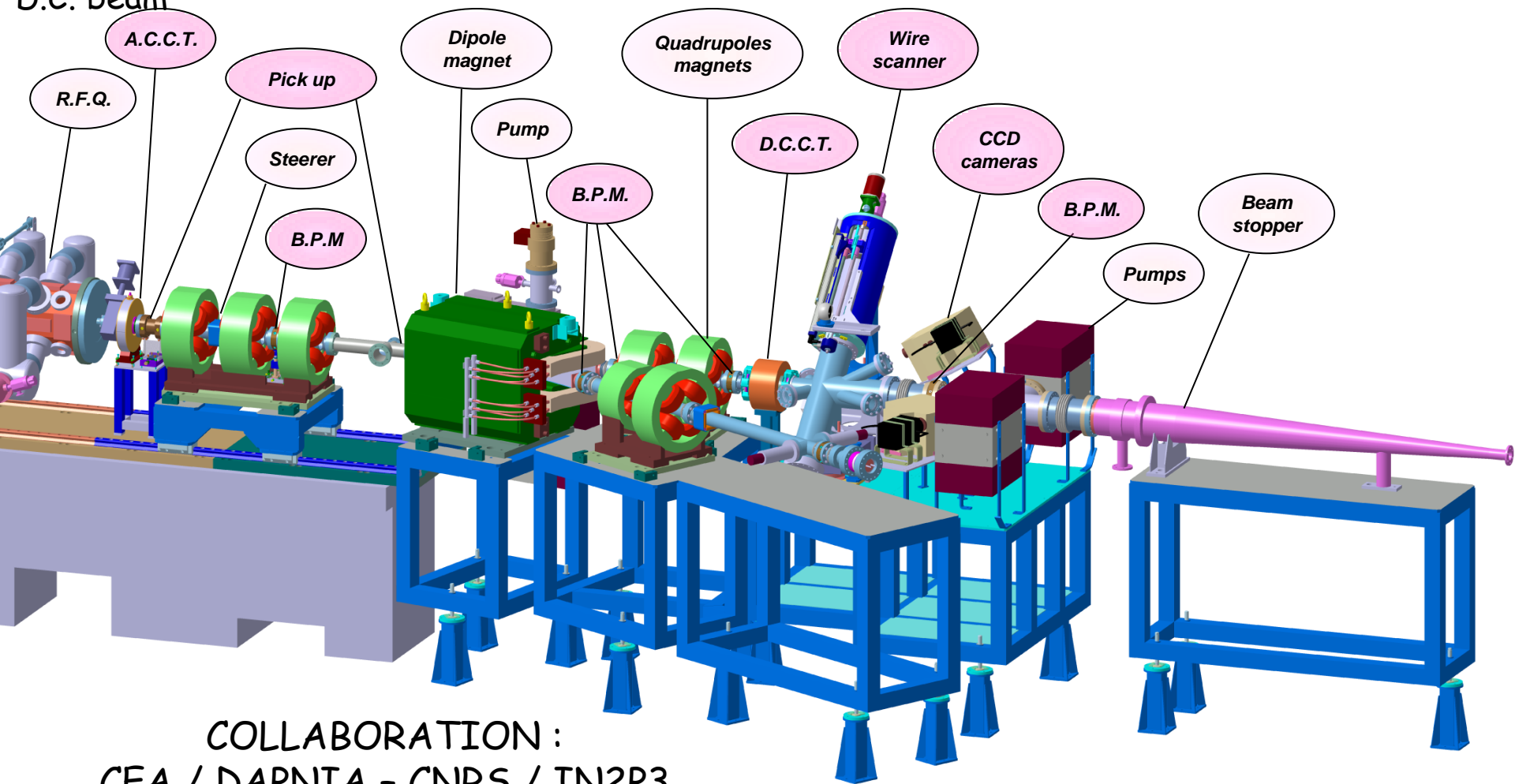
Courant moyen du faisceau: Correspond au courant du faisceau totalement intercepté par une cible placée sur le trajet du faisceau. Il s'exprime en A, mA

Commissioning of the 3 MeV IPHI / RFQ at Saclay

Source SILHI: Protons
E = 100 KeV;
I = 100 mA; C.W.
D.C. beam

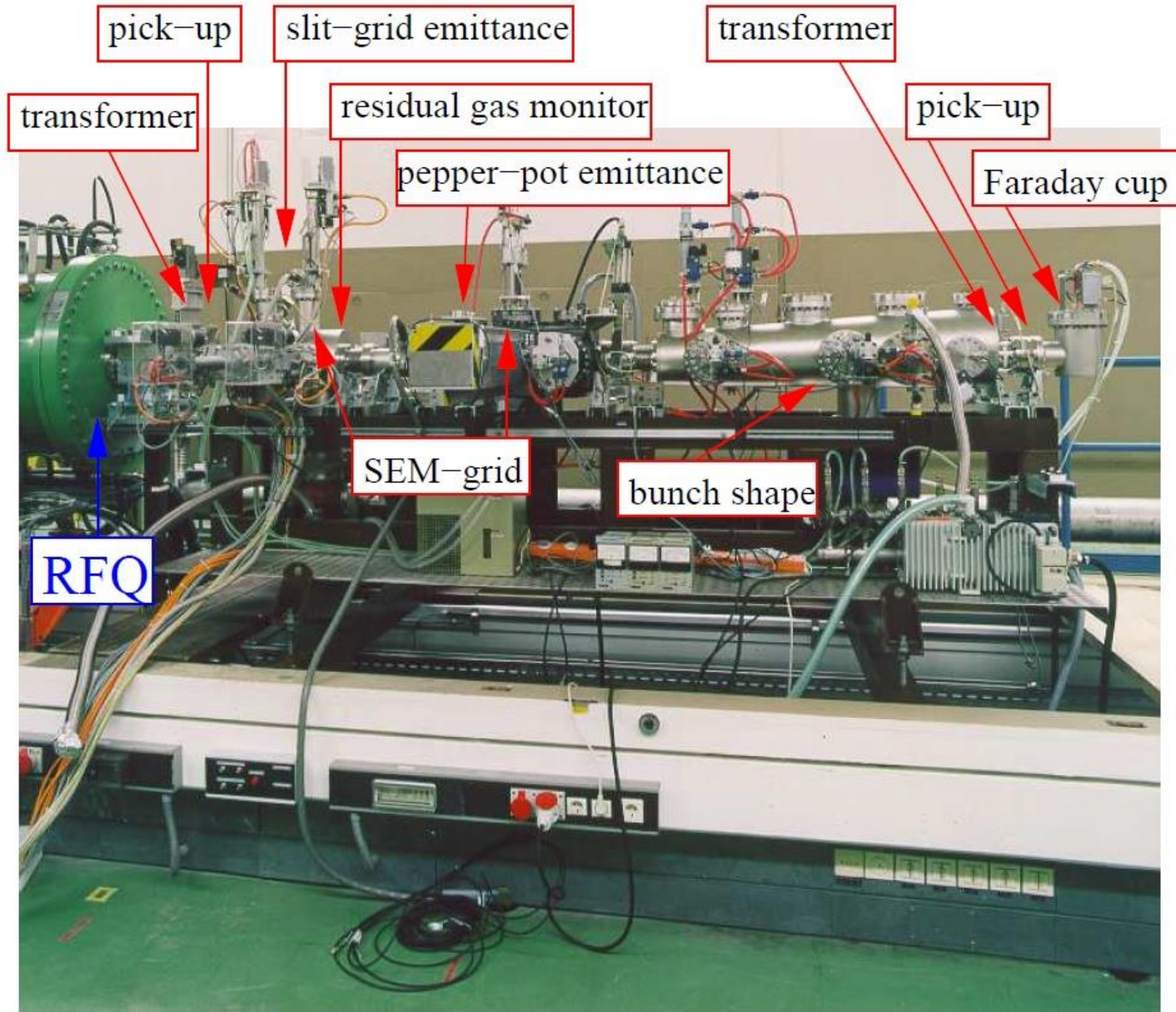
RFQ: 6 sections
E = 3 MeV;
I = 100 mA C.W.
F = 352.2 MHz

Beam Diagnostic Line
And
Beam Stopper 300 kW



COLLABORATION :
CEA / DAPNIA - CNRS / IN2P3

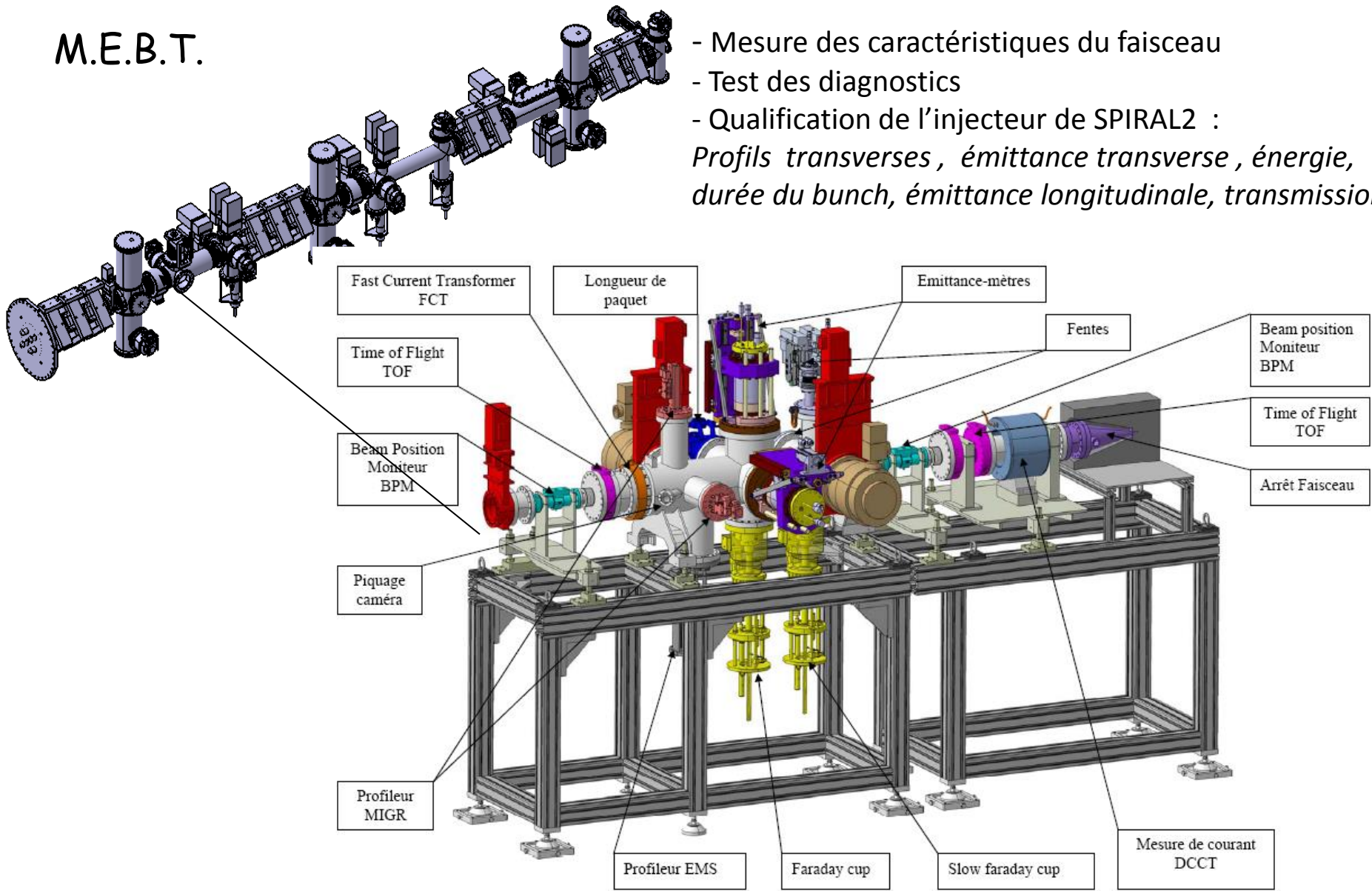
Commissioning of the new 120 keV/u RFQ at GSI - 1999



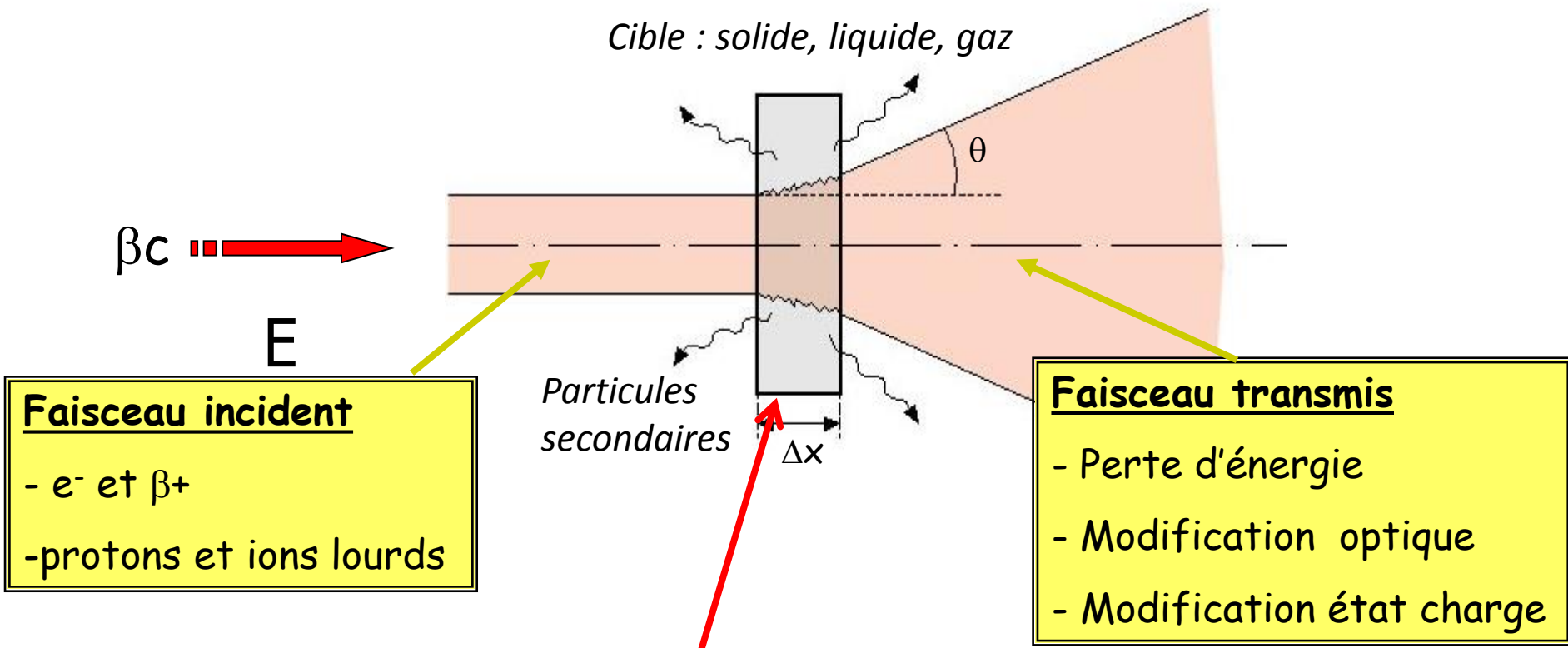
SPIRAL 2 - commissioning RFQ : Banc de tests Intermédiaires

M.E.B.T.

- Mesure des caractéristiques du faisceau
- Test des diagnostics
- Qualification de l'injecteur de SPIRAL2 :
Profils transverses, émittance transverse, énergie, durée du bunch, émittance longitudinale, transmission



Détecteurs interceptifs: Interaction avec la matière



- Excitation des atomes de la cible par le faisceau incident
- Emission de particules secondaires
- Emission de rayonnement EM
- Echauffement de la cible

➤ La perte d'énergie moyenne (par unité de longueur), (**average energy loss**) est aussi appelée le pouvoir d'arrêt (**stopping power**). Elle est donnée par la formule de Bethe Bloch:

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \cdot N \cdot r_e^2 \cdot (m_e \cdot c^2) \cdot \frac{Z}{A} \cdot \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \cdot \text{Ln} \left(\frac{2 \cdot m_e \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2 \cdot T_e^{\text{max}}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C_e}{Z} \right]$$

T_e^{max} : Energie cinétique maximum transférable à un électron lors d'une collision en MeV

$\beta = \frac{v}{c}$ où v est la vitesse de la particule incidente; c: célérité de la lumière = 299 792 458 m/s

N : Nombre d'Avogadro = 6.022 1415 . 10²³

A : masse atomique du milieu absorbeur en g.mol⁻¹

dx : densité surfacique du milieu en g.cm²

Z : nombre atomique de l'absorbeur

$$\frac{dE}{dx} ; \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}}$$

δ : facteur d'écrantage du champ électrique de la particule incidente dans le milieu. δ est généralement faible aux énergies moyennes mais augmente avec la vitesse et la densité du milieu

$\frac{C_e}{Z}$: terme de correction d'effet de couche atomique indiquant que les particules incidentes ont une probabilité très faible d'interagir avec les couches électroniques profondes à basse énergie

➤ Les particules chargées incidentes lourdes (autre que les électrons) d'énergie « moyenne » ($\beta \gg \sim 1/137$) perdent leur énergie dans le milieu de détection principalement par interaction coulombienne avec les atomes de la cible (détecteur) de deux manières:

- **Excitation des atomes:**

- Production de rayonnement lors de la redescende à l'état fondamental de l'électron excité

- **Ionisation des atomes:**

- Production de paires « ions-électrons » dans les gaz et « trous-électrons » dans les semi-conducteurs.

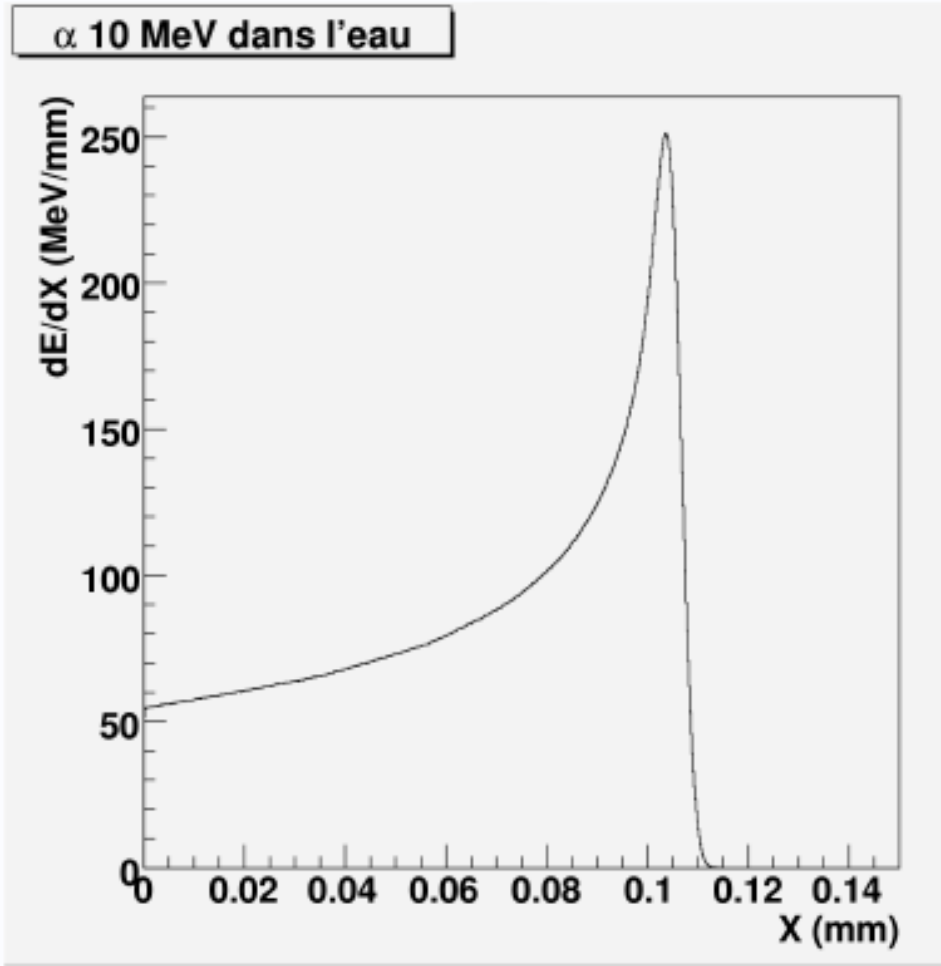
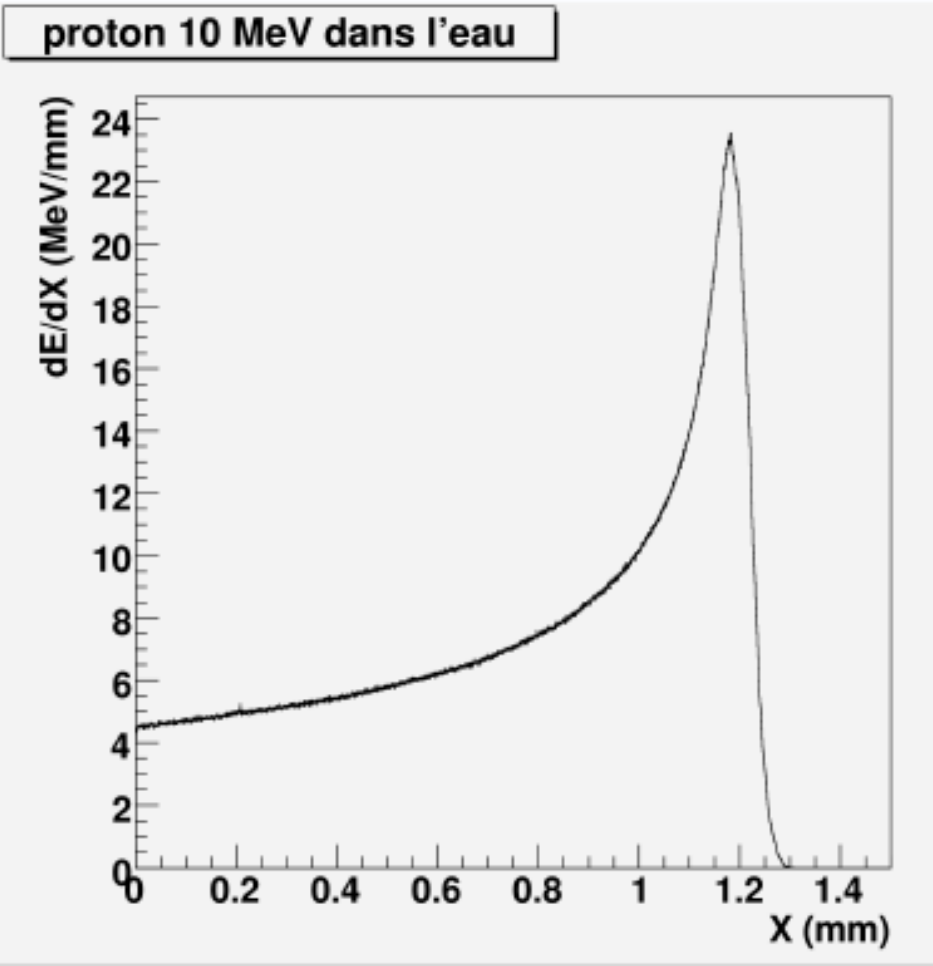
Il y a effectivement « arrachage » d'un électron à l'atome dans le cas de l'ionisation.

Les ions créés ont une tendance naturelle à se recombiner pour redevenir neutre. Dans certains détecteurs cet effet sera supprimé car la création de cette paire ion-électron est à la base de la formation du signal de « réponse » du détecteur au passage du faisceau incident.

- Production d'électrons secondaires par les atomes de la couche superficielle des solides.

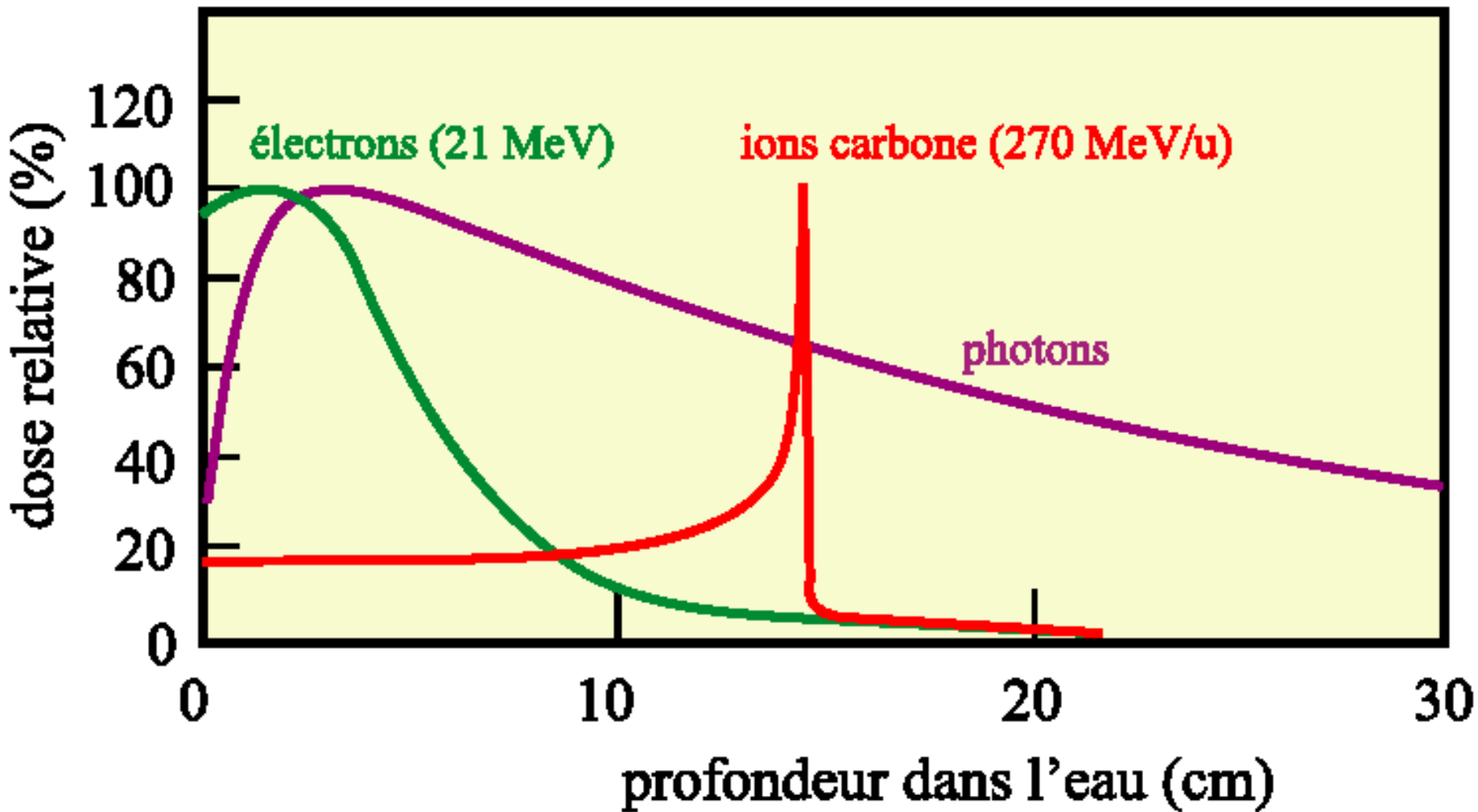
➤ Les particules chargées incidentes perdent progressivement leur vitesse au fur et à mesure qu'elles interagissent avec les atomes de la cible jusqu'à l'arrêt complet. Les particules incidentes sont caractérisées par la distance parcourue dans la cible. (**range**)

Destructive detectors : Stopping power and range of particles through matter



Comparaison des parcours des protons et alphas à 10 MeV dans l'eau (pic de Bragg)

Destructive detectors Stopping power and range of particles through matter



Comparaison de l'énergie déposée le long du parcours d'ions lourds, électrons, photons

Minimum d'ionisation pour $\beta, \gamma \sim 3$: Protons ~ 2 GeV, électrons ~ 21 MeV, Alphas ~ 7.5 GeV

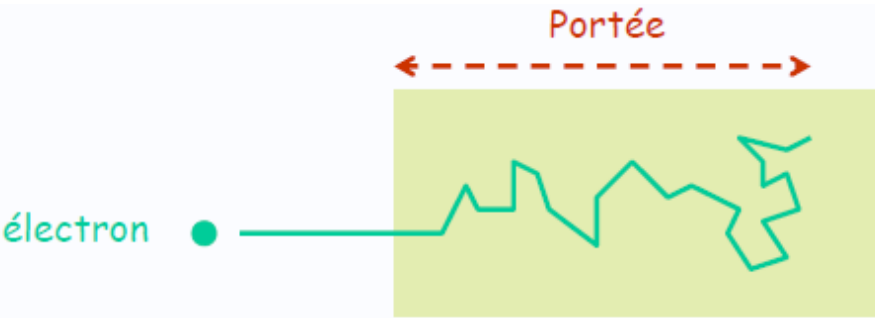
Perte d'énergie des électrons: $\left[\frac{dE}{dx} \right]_{total} = \left[\frac{dE}{dx} \right]_{ionisation} + \left[\frac{dE}{dx} \right]_{radiation}$

$$\left[\frac{dE}{dx} \right]_{ionisation} = \frac{2 \cdot \pi \cdot e^4}{m_e \cdot c^2 \cdot \beta^2} \cdot N_A \cdot Z \cdot \left[\left[\text{Ln} \frac{m_0 \cdot \beta^2 \cdot c^2 \cdot E}{2 \cdot I^2 \cdot (1 - \beta^2)} \right] - \text{Ln} 2 \left(2 \sqrt{1 - \beta^2} - 1 + \beta^2 \right) + (1 - \beta^2) + \frac{1}{8} \left(1 - \sqrt{1 - \beta^2} \right)^2 \right]$$

$$\left[\frac{dE}{dx} \right]_{radiation} = \frac{4 \cdot N_A \cdot E \cdot Z(Z + 1) \cdot e^4}{137 \cdot m_e^2 \cdot c^4} \left(\text{Ln} \frac{2 \cdot E}{m_e \cdot c^2} - \frac{4}{3} \right)$$

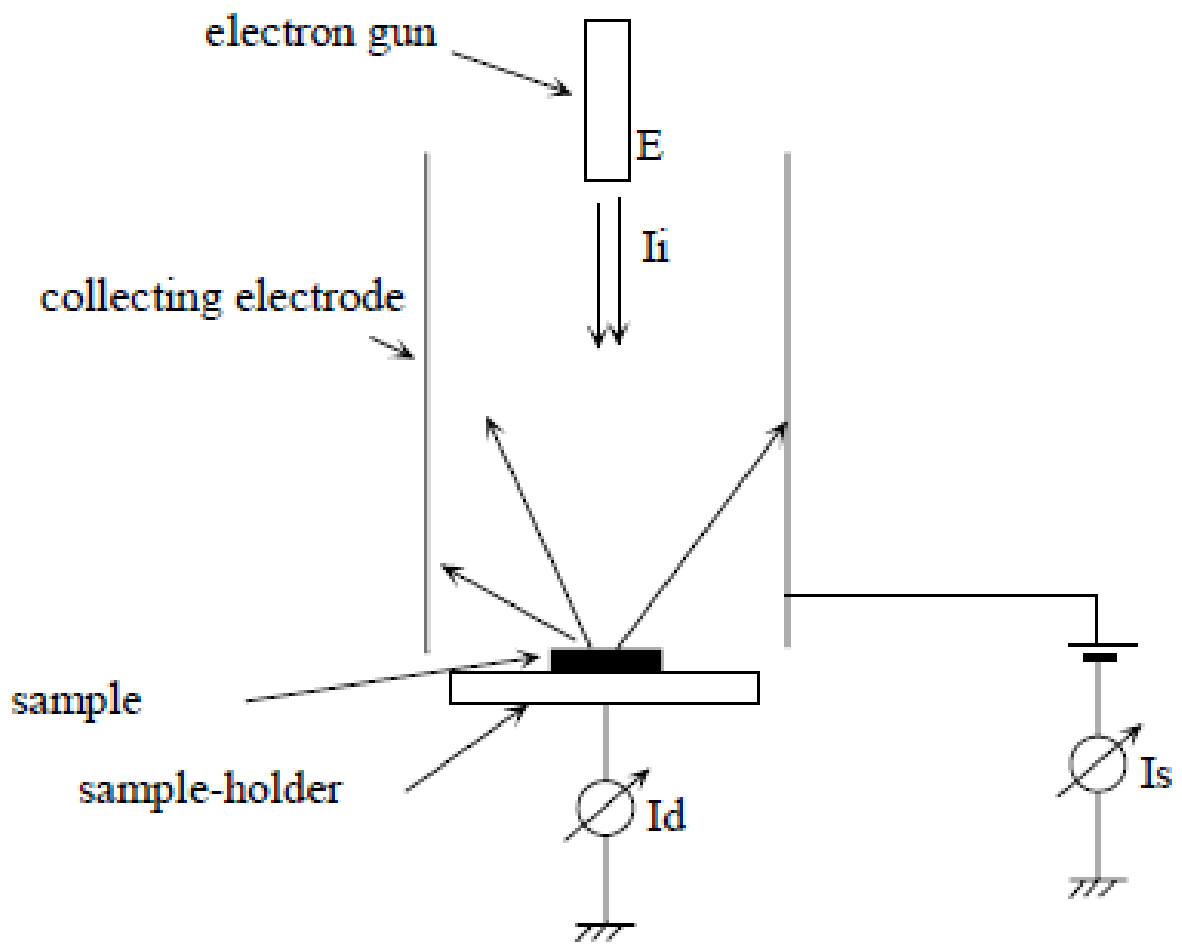
Le rapport des pertes spécifiques est donné par la formule: $\frac{\left[\frac{dE}{dx} \right]_{radiation}}{\left[\frac{dE}{dx} \right]_{ionisation}} \cong \frac{E \cdot Z}{700}$

Parcours et portée des électrons

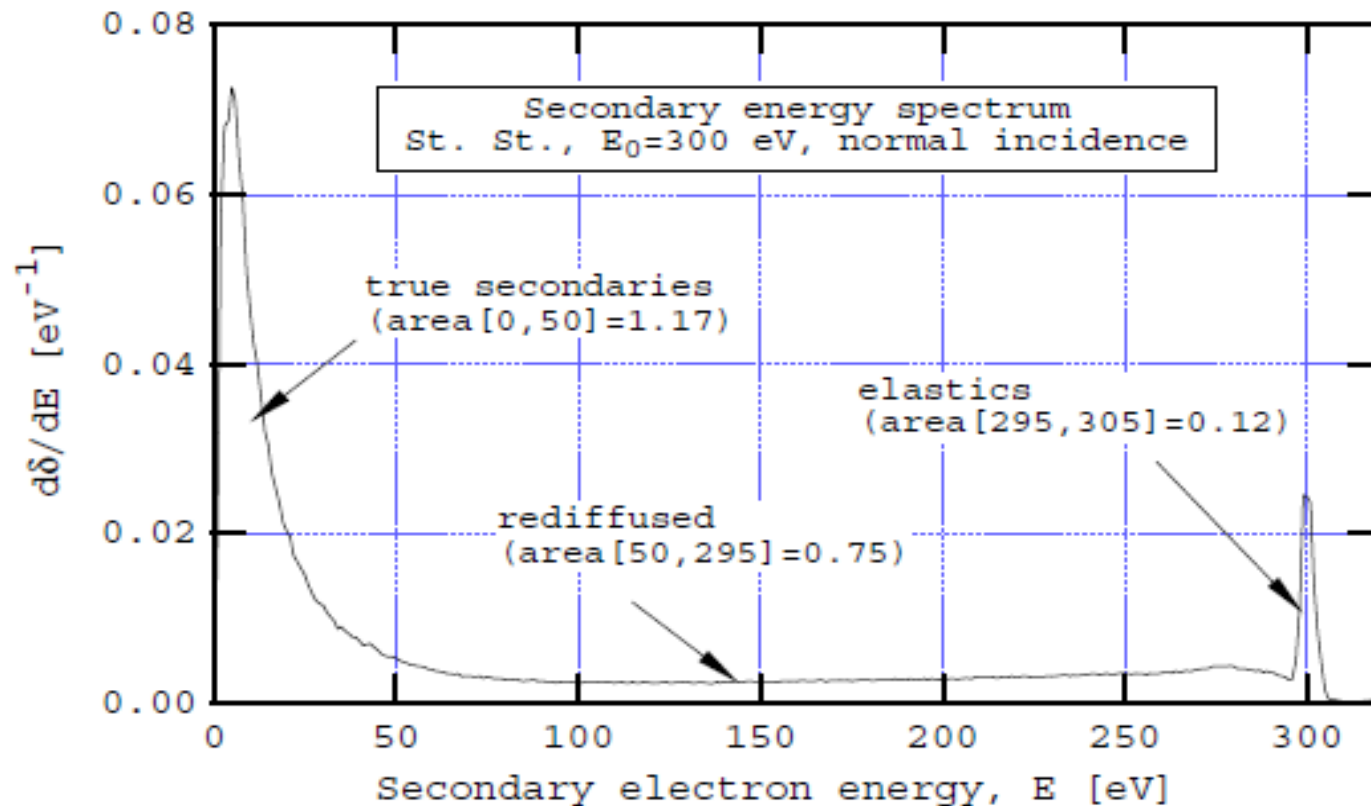


Parcours S = longueur de la trajectoire (non mesurable).
 Portée R = épaisseur traversée seule accessible à l'expérience.
 Ordre de grandeur: S = 1,2 à 1,4 fois R.

La portée (profondeur de pénétration) est plus faible que la longueur de la trajectoire



Dispositif expérimental pour l'étude du phénomène de l'émission secondaire



Secondary Emission

Courbe type du spectre en énergie des électrons secondaires émis par une feuille d'inox bombardée par un faisceau d'électrons de 300 eV d'énergie (incidence normale):

- Les électrons secondaires « vrais » d'énergie inférieure à 50 eV (frontière « arbitraire »)
- Les électrons rediffusés (correspondant à plusieurs chocs inélastiques dans le milieu)
- Les électrons rediffusés avec l'énergie du faisceau incident (chocs élastiques)

Variation du coefficient d'émission secondaire de l'aluminium

Ref 8

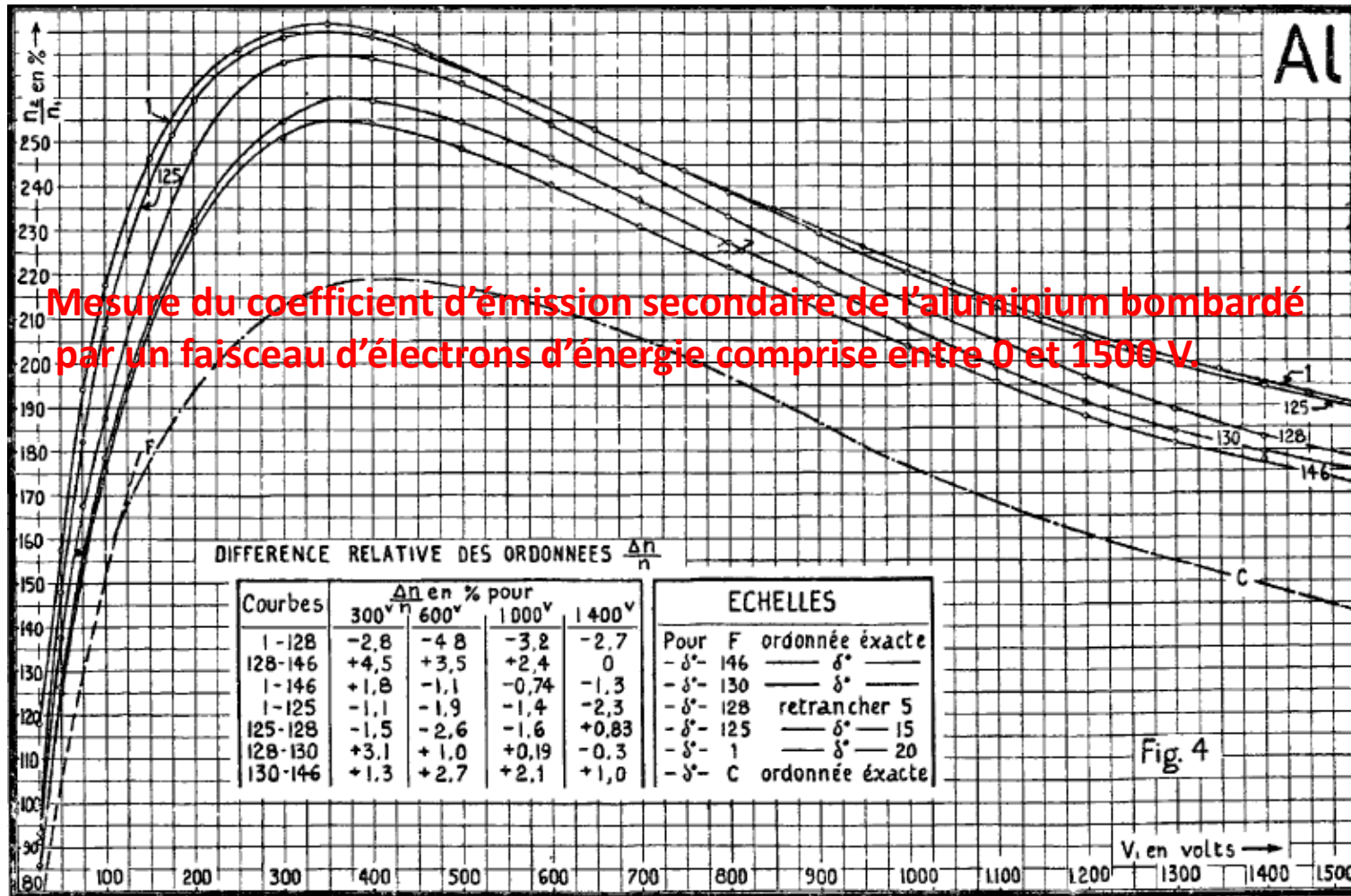


Fig. 4

Les courbes sont obtenues pour différentes températures de la cible.
 Particules incidentes : électrons d'énergie comprise entre 0 et 1500 eV.
 Coefficient d'émission secondaire maximum: 275% à 300 eV

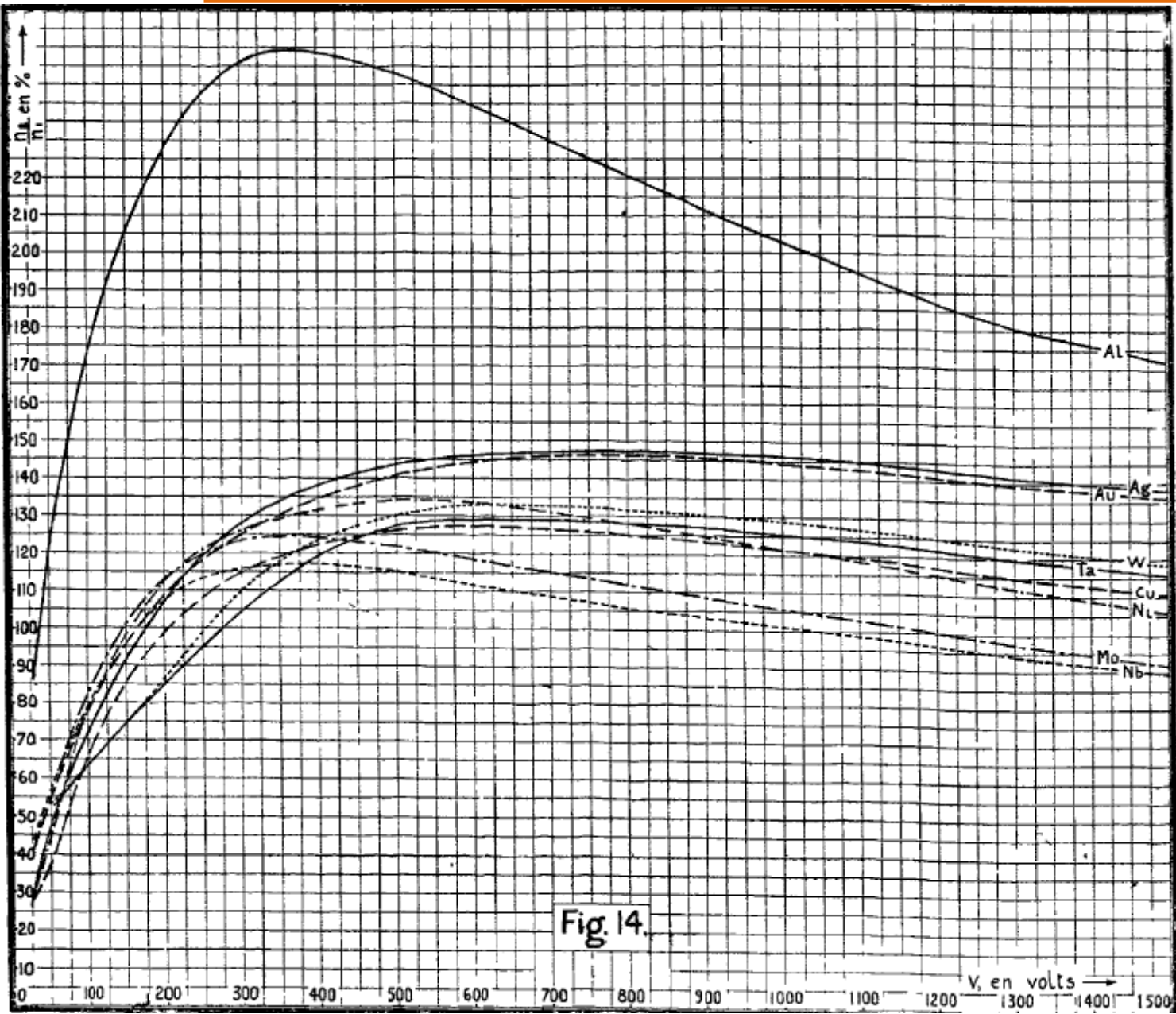


Fig. 14.

D'après Ref 8

BASSE ENERGIE INCIDENTE

- La courbe de rendement en émission secondaire est sensiblement identique pour tous les matériaux
- Les matériaux conducteurs ont un rendement maximum en émission secondaire compris environ entre 1,5 et 2,5
- Le rendement maximum du graphite (isolant électrique) est proche de 1
- Les électrons secondaires « vrais » ont une énergie inférieure à 50 eV
- Le maximum du spectre d'énergie des électrons secondaires est de qq eV
- Le rendement en émission secondaire ne dépend pas du travail de sortie de l'électron et de la conductivité du conducteur.

HAUTE ENERGIE INCIDENTE

- En l'absence de théorie complète décrivant l'émission secondaire on admet que son rendement varie comme la perte d'énergie du faisceau dans le matériau absorbeur.

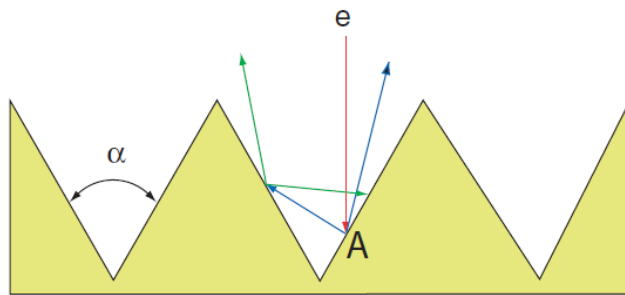
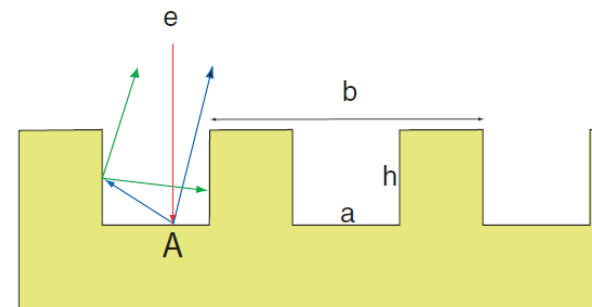
Sternglass a estimé ce rendement à :

$$Y = P \cdot \frac{d_s}{E_*} \cdot \frac{dE}{dx}$$

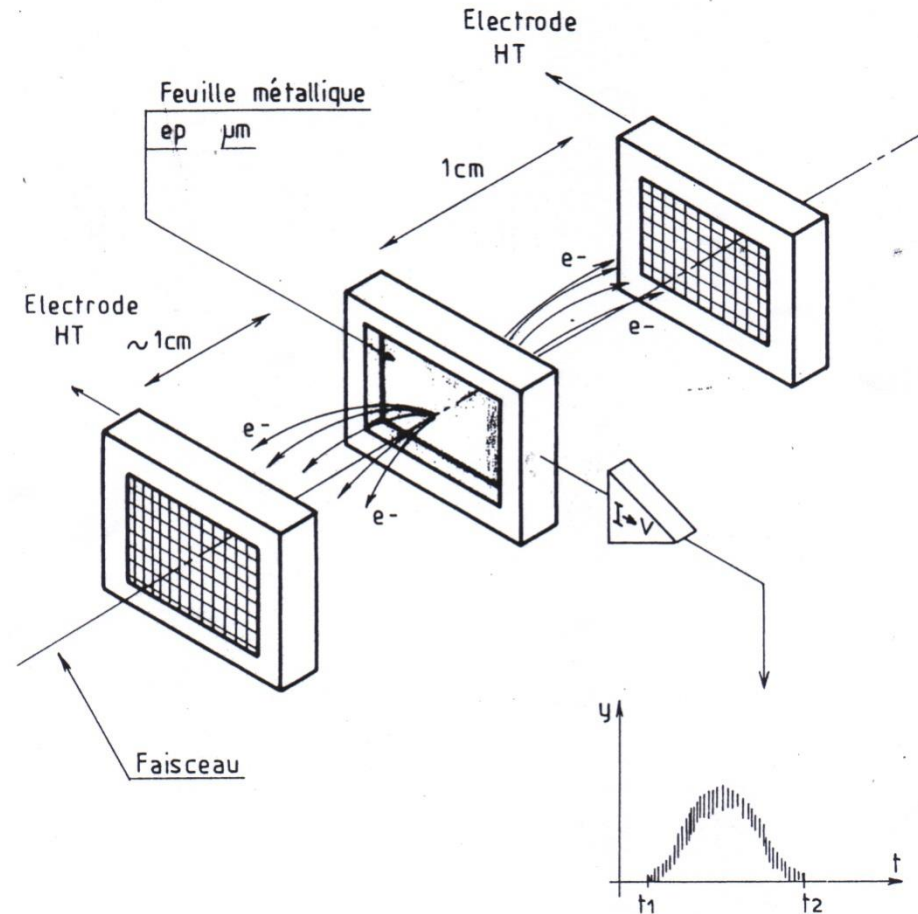
Y : Rendement d'émission secondaire
 d_s : profondeur moyenne d'extraction d'un électron: $\sim 1\text{nm}$
 E_* : Energie cinétique moyenne perdue par la particule incidente $\sim 25\text{ eV}$
 P : Probabilité de sortie d'un électron $\sim 0,5$

Solutions possibles:

- Recouvrir d'une couche à faible émissivité à base de carbone.
- Pour les chambres à vide des accélérateurs (Next Linear Collider): déposer une couche de TiN (titane nitrure) et TiZrV (titanium-zirconium-vanadium)
- Adopter une configuration géométrique de la surface empêchant les électrons secondaires de s'éloigner de la surface:

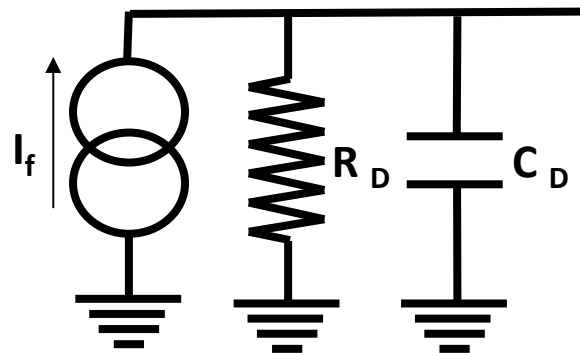
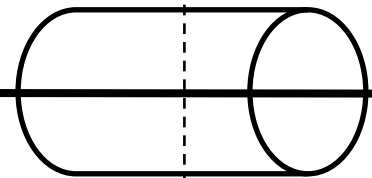
motif triangulaire (optimisation de l'angle α)motif rectangulaire (optimisation de la période b , de la profondeur h , et de la largeur a .)

Secondary Emission Detector

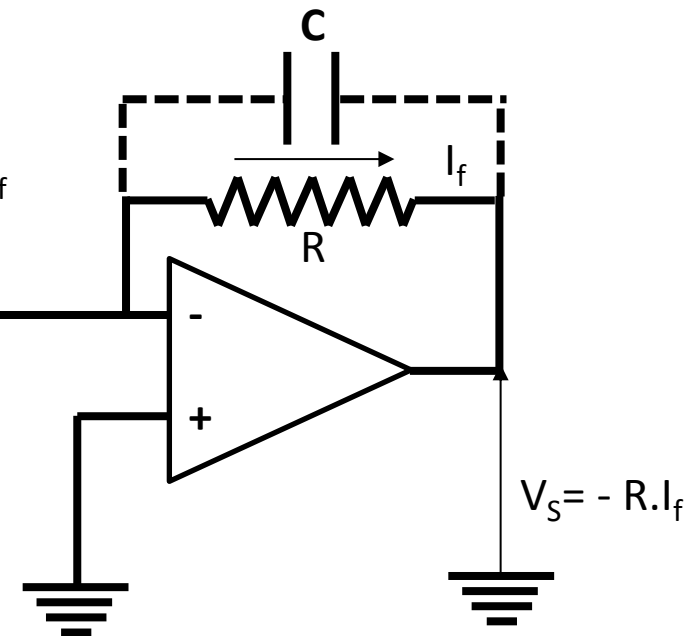


Principe de fonctionnement: Une feuille métallique isolée électriquement du tube à vide émet des électrons secondaires lors de sa traversée par le faisceau primaire (ou de son arrêt). Ces électrons secondaires, captés par une électrode polarisée positivement, créent un courant électronique secondaire dont l'intensité est proportionnelle à celle du faisceau primaire.

SCHEMA EQUIVALENT DETECTEUR

CABLE DE TRANSMISSION DE I_f 

CONVERTISSEUR COURANT TENSION



R_D : Resistance d'isolement du détecteur (supérieure à 1 G Ω)

C_D : Capacité des électrodes du détecteur par rapport à la masse (peut être inférieure à 10 pF)

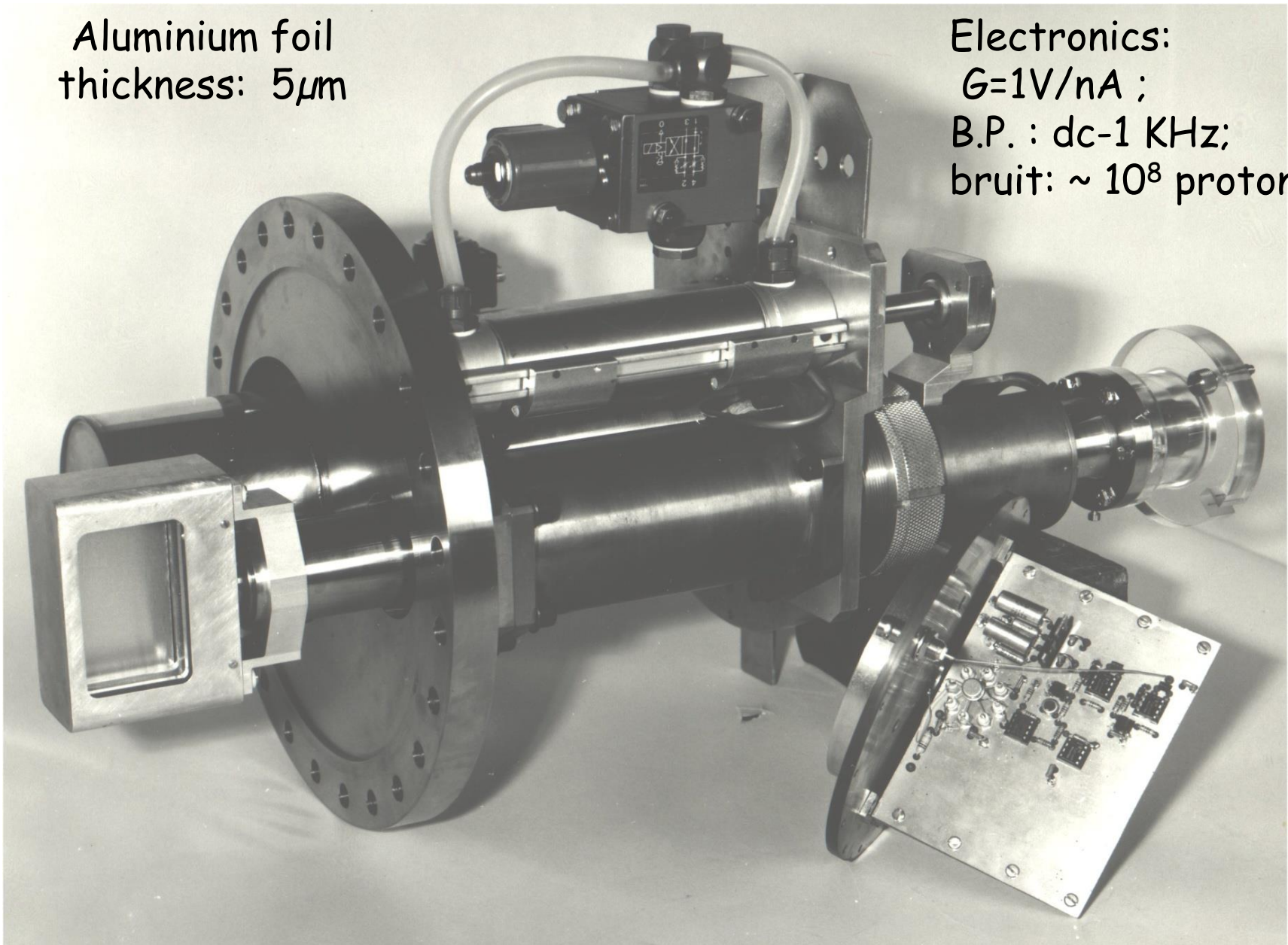
CABLE DE TRANSMISSION: Haute immunité au bruit requise (câble triaxial par exemple).

Performances du montage:

- Sensibilité: R , Impédance d'entrée $Z_e = 0 \Omega$ (ampli op parfait).
- Bande passante à -3dB: $f = 1/2\pi RC$ avec C cablée ou parasite (**stray capacitance**)
- Technique électrométrie requise

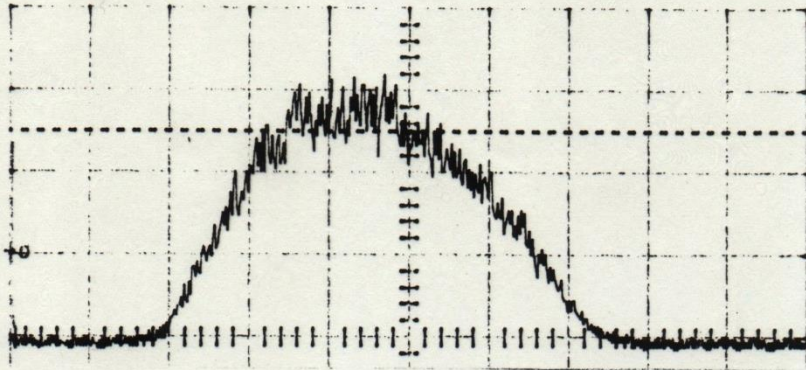
Aluminium foil
thickness: $5\mu\text{m}$

Electronics:
 $G=1\text{V/nA}$;
B.P. : dc-1 KHz;
bruit: $\sim 10^8$ protons /s

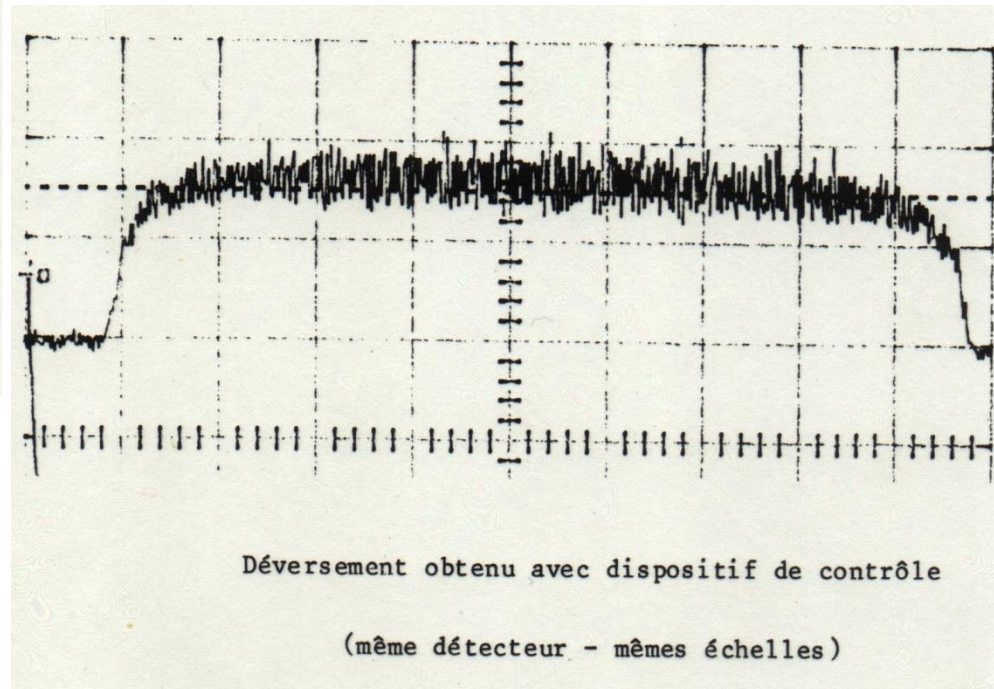


APPLICATION AU CONTRÔLE DU DEVERSEMENT D'UN SYNCHROTRON

Ejection de SATURNE II d'une faisceau de 5×10^{10} protons polarisés à une énergie de 2,82 GeV



Déversement obtenu sans dispositif de contrôle
(détecteur utilisé : chambre à émission secondaire)
1 V/div 50 ms/div



Déversement obtenu avec dispositif de contrôle
(même détecteur - mêmes échelles)

- Détecteur « robuste » par rapport à l'environnement : peu de matériel dans le faisceau
- Détecteur peu perturbatif du faisceau: quelques μm d'épaisseur de métal (Al, Au)
- Pratiquement insensible à la saturation (le nombre d'électrons secondaires « disponibles » est très élevé sur une cinquantaine de couches atomiques) . Très bonne Linéarité
- Très bonne stabilité du rendement dans le temps (si pas de remise à l'air)

- Rendement faible : ~ 2 à 3% au minimum d'ionisation des protons (1 GeV)

Limitation :

Limitation à basse intensité: provient de l'électronique associée (sensibilité) ;

Electronique basse impédance d'entrée requise à placer de préférence juste derrière le capteur

Limitation à haute intensité: tenue de la feuille métallique dans le faisceau.

➤ Détecteur relatif:

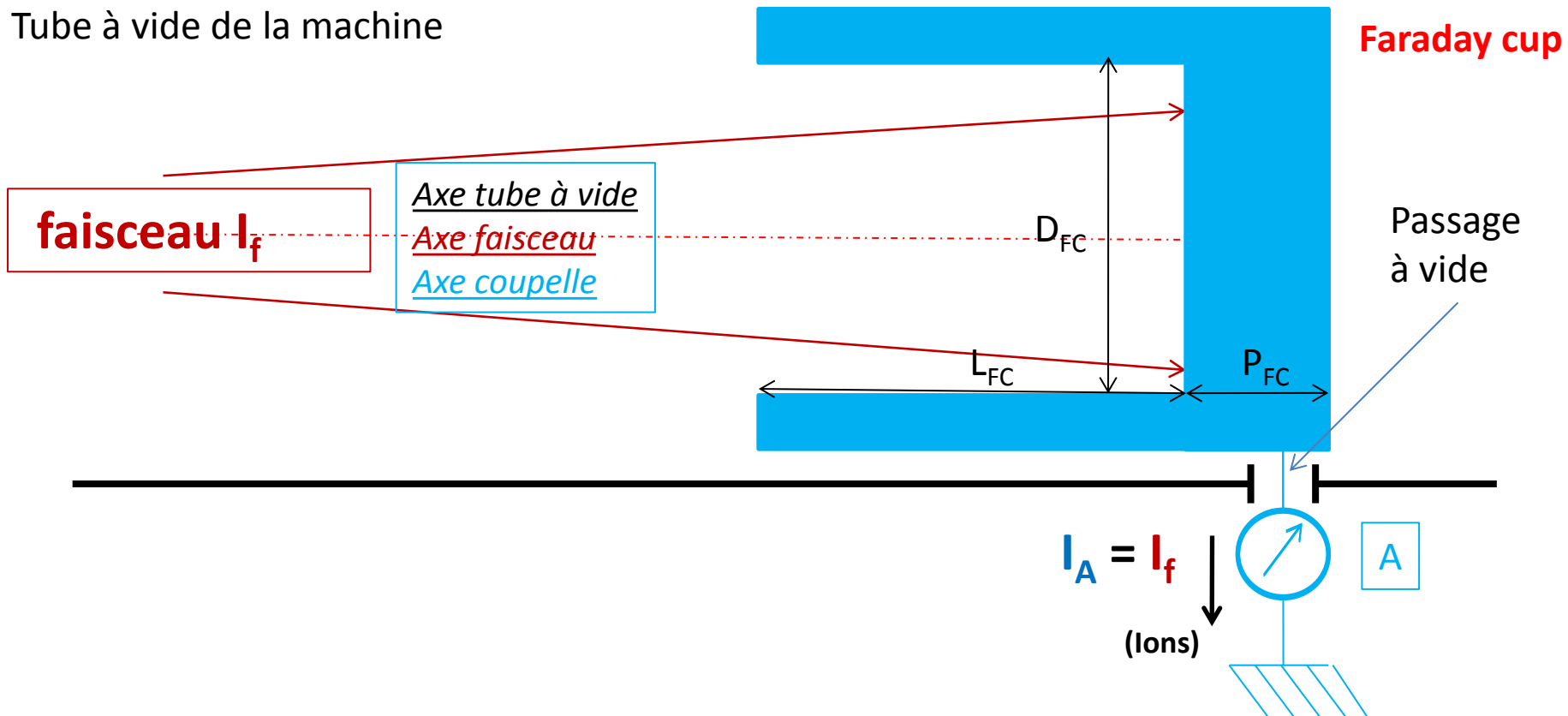
ne permet pas la mesure absolue du courant du faisceau quelque soit son énergie,

- Permet de descendre très bas en intensité du faisceau ($< \text{pA}$)
- Permet la mesure de la composante continue du courant du faisceau

➤ Amélioration de la sensibilité:

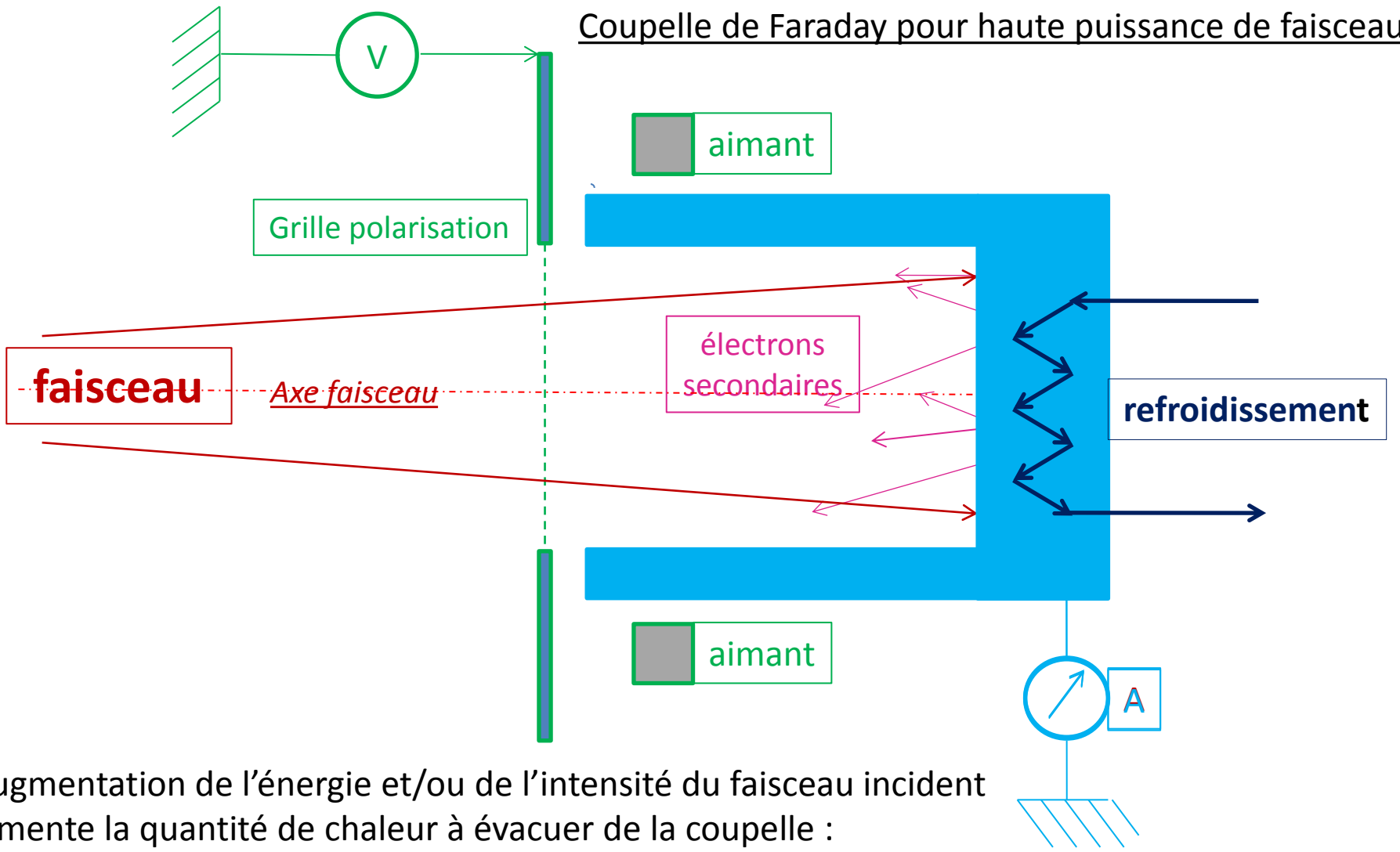
- multiplication des feuilles émissives
- recouvrir la feuille métallique d'une couche émissive : KCl par exemple

Tube à vide de la machine

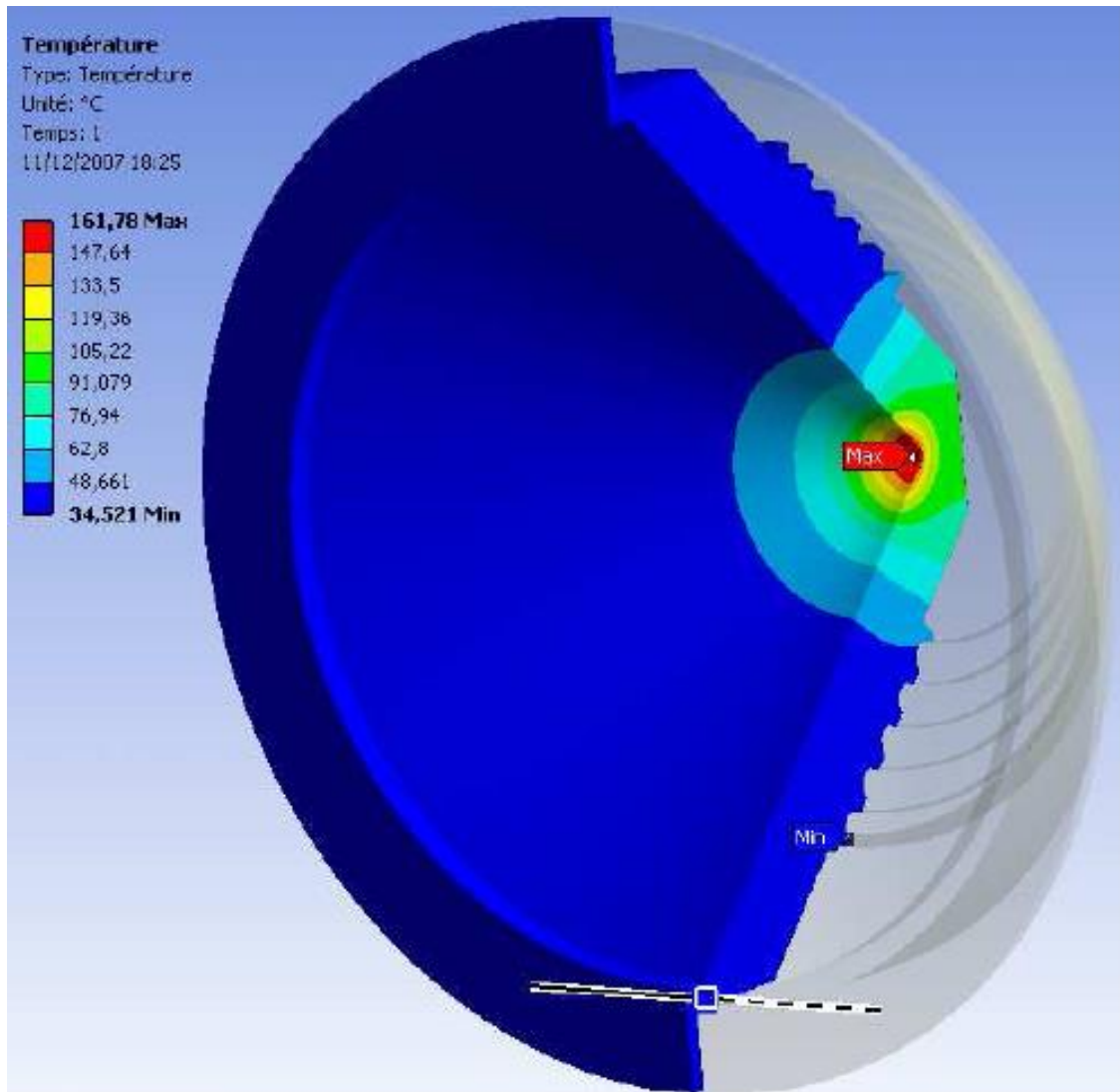


Principe de fonctionnement coupelle de Faraday: Enceinte métallique, isolée électriquement du tube à vide, interceptant toutes les particules du faisceau incident et connectée à un circuit de mesure d'intensité. Sous ces conditions la coupelle de Faraday est un moniteur absolu de l'intensité du faisceau incident.

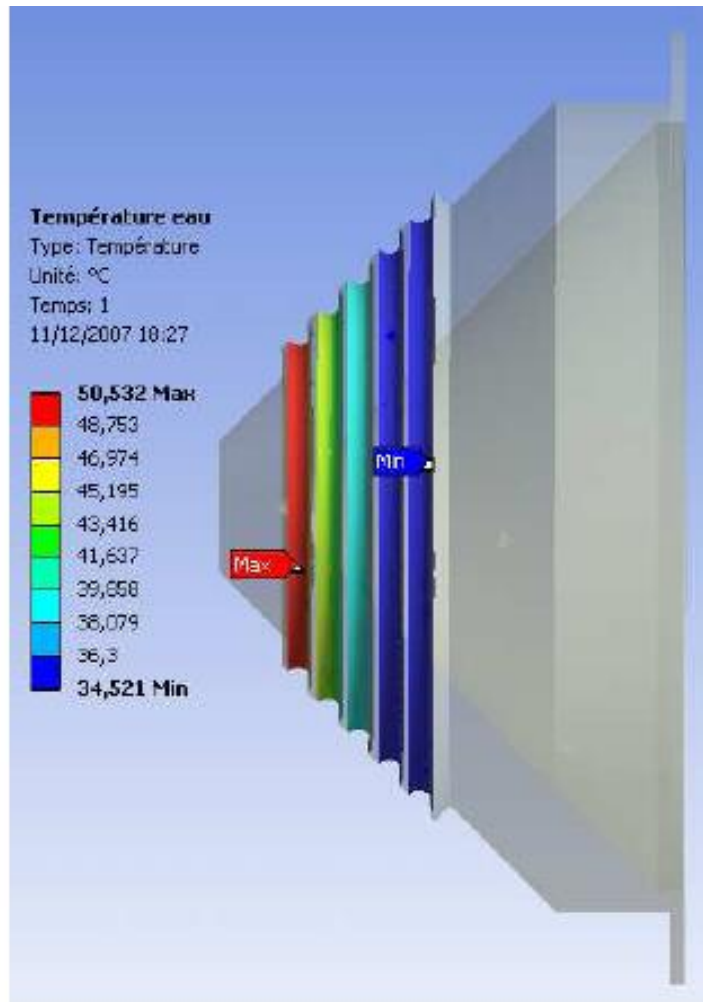
$P_{FC} \gg$ Range de la particule incidente $L_{FC} \gg D_{FC}$ (diminution de l'effet de l'émission secondaire)



L' augmentation de l'énergie et/ou de l'intensité du faisceau incident augmente la quantité de chaleur à évacuer de la coupelle :



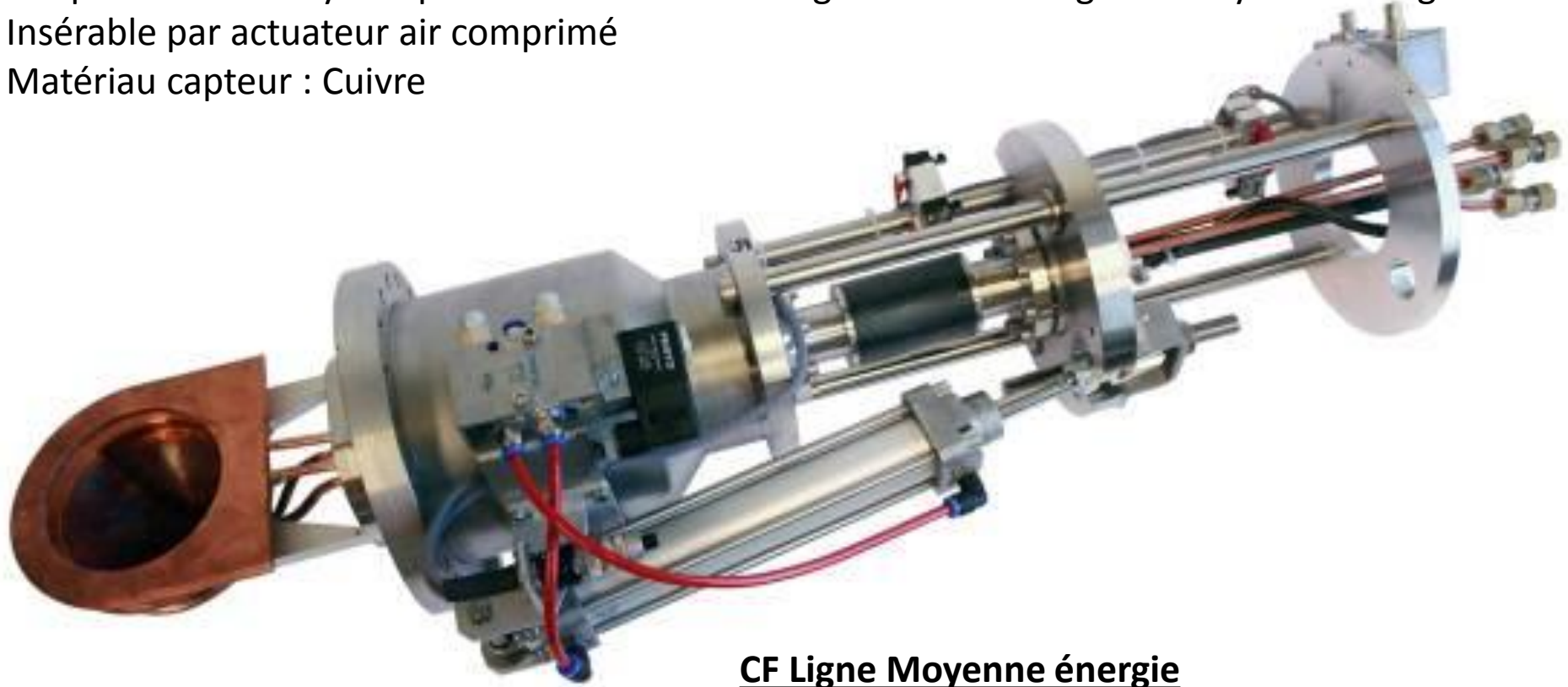
Température de la coupelle



Température face eau

Etude thermique des coupelles de Faraday de l'injecteur de SPIRAL2

Coupelle de Faraday de Spiral2: Utilisation dans lignes basse énergie et Moyenne énergie
Insérable par actuateur air comprimé
Matériau capteur : Cuivre



CF Ligne Basse énergie

Diamètre : 100mm

Puissance faisceau ($\sigma=3\text{mm}$, $T= 250^\circ\text{C}$): 1200W

Densité puissance faisceau ($\sigma=3\text{mm}$): 2120W/cm²

CF Ligne Moyenne énergie

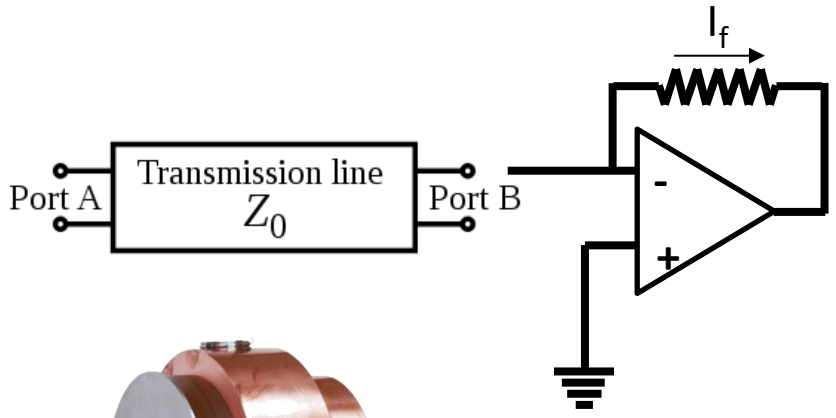
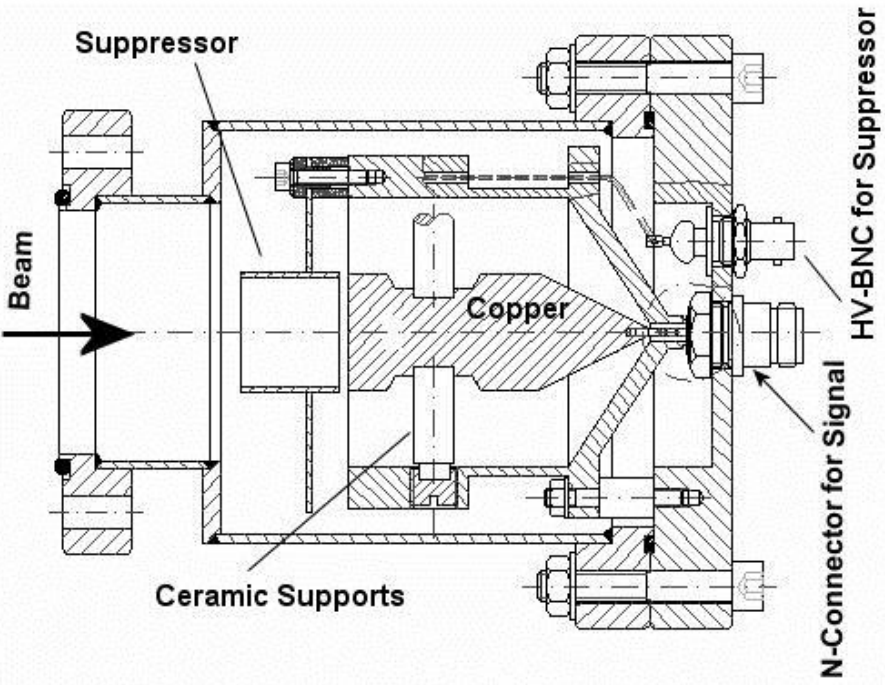
Diamètre : 60mm

Puissance faisceau ($\sigma=3\text{mm}$, $T= 250^\circ\text{C}$): 3000W

Densité puissance faisceau ($\sigma=3\text{mm}$): 5300W/cm²

Mesure de l'intensité du faisceau: **Coupe de Faraday haute fréquence** (détecteur interceptif)

Broadband coaxial Faraday cup for bunch shape observation.

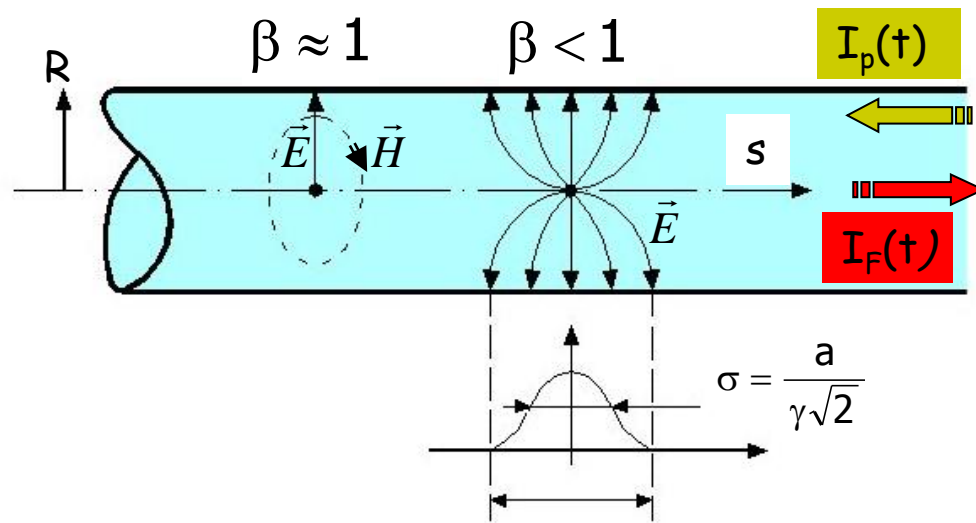


SPIRAL2 broad band Faraday Cup (pulsed mode operation)

Coupelle de Faraday pour faisceau d'électrons

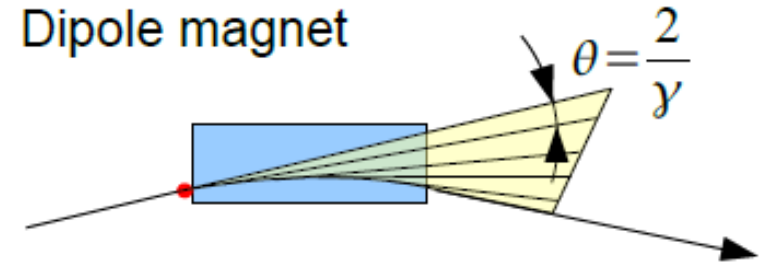
Les propriétés et les effets spécifiques des électrons doivent être pris en compte :

- La trajectoire des électrons dans le matériau est soumise à un straggling beaucoup plus important que pour les particules lourdes. Les dimensions transversales de la coupelle seront donc plus grandes que pour les ions lourds.
- Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) produit un rayonnement de photons X. Un blindage est nécessaire (généralement du plomb). L'encombrement de la coupelle augmente.
- Pour une énergie de rayonnement supérieure à deux fois l'énergie au repos des électrons (511 keV), la création de paires électrons-positrons commence. Il devient nécessaire d'empêcher ces nouvelles charges de sortir de la coupelle.



Champ E.M. non radiatif associé au faisceau

- Fréquence du champ EM (qq 100 MHz), incompatible avec une propagation. ($\lambda \gg R$)
- La répartition de $I_p(t)$ dépend de la position du faisceau
- $E \perp$ paroi du tube. H azimuthal (théorème d'Ampère)
- Création d'un courant de paroi $I_p(t) = -I_F(t)$
- Sauf la composante D.C.
- $E = 0$ à l'extérieur du tube à vide. $H = 0$ à l'extérieur du tube à vide (sauf composante DC)
- Le détecteur mesure localement les propriétés du faisceau



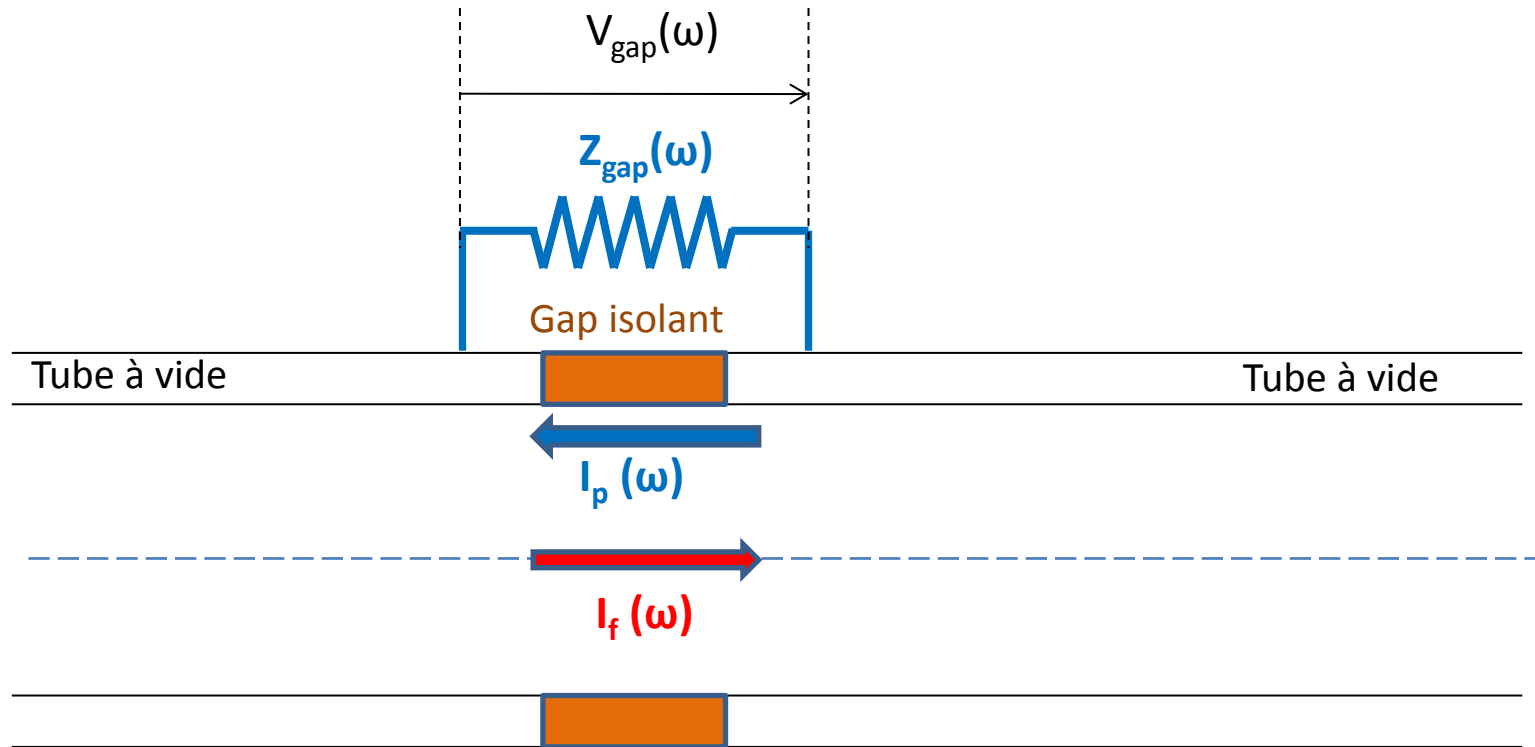
Champ E.M. radiatif associé au faisceau

(Rayonnement synchrotron)

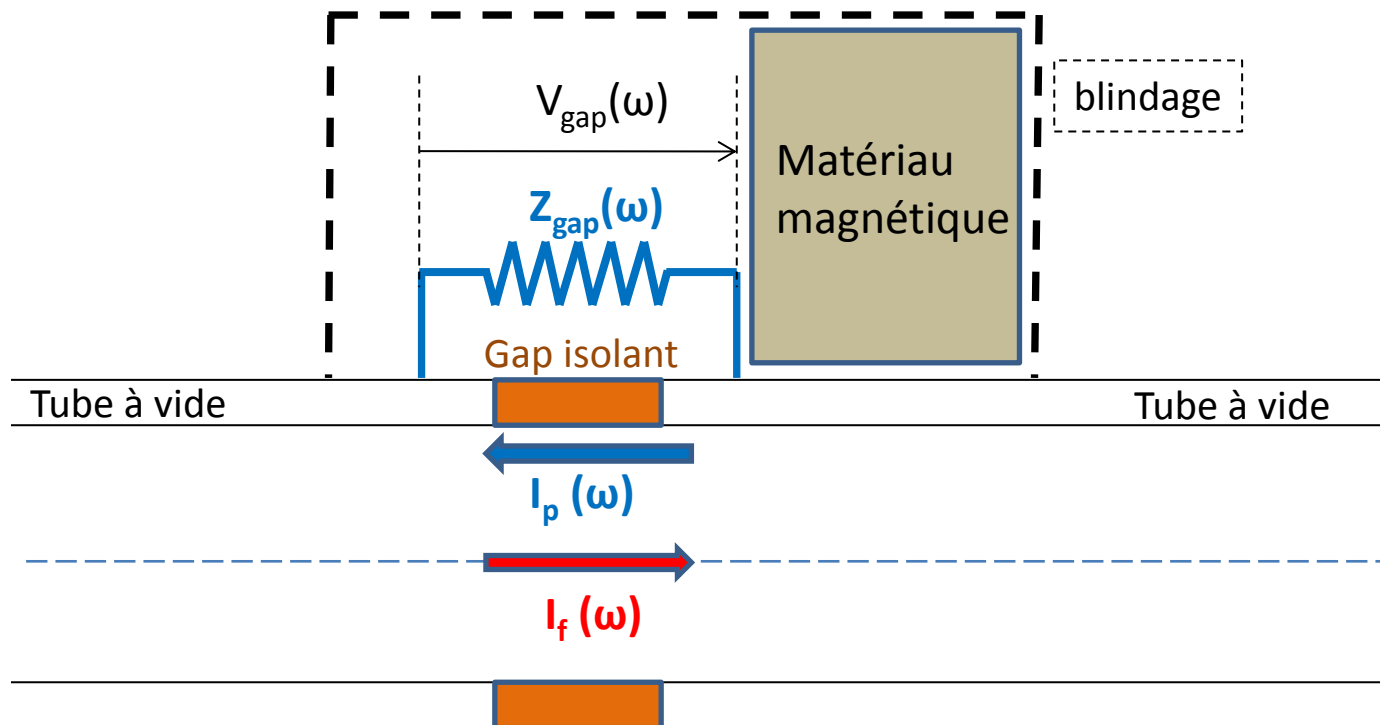
- Création du champ EM par modification du vecteur accélération de la particule
- Fréquence du champ EM (> 1 GHz) associé compatible avec les dimensions du tube à vide pour une propagation.
- Le détecteur mesure les propriétés du faisceau à l'endroit de l'émission du champ EM

Exemple: Protons : $E = 10$ GeV – $\gamma = 10,7$ – $a = 40$ mm – $\sigma = 2.6$ mm

Electrons : $E = 20$ GeV – $\gamma = 39000$ – $a = 40$ mm – $\sigma = 2$ μ m

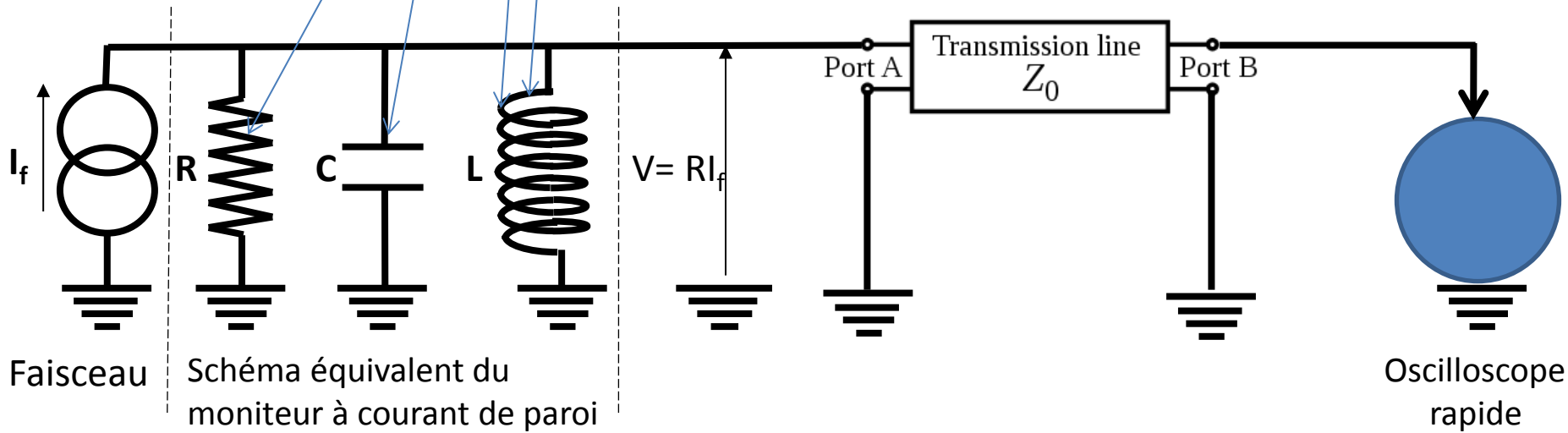
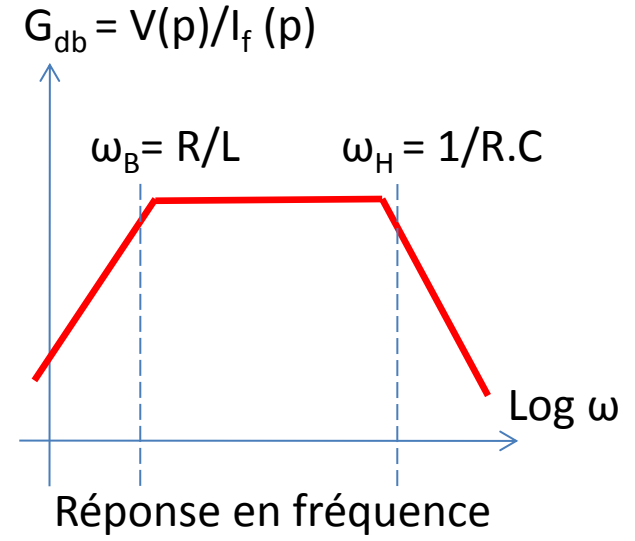
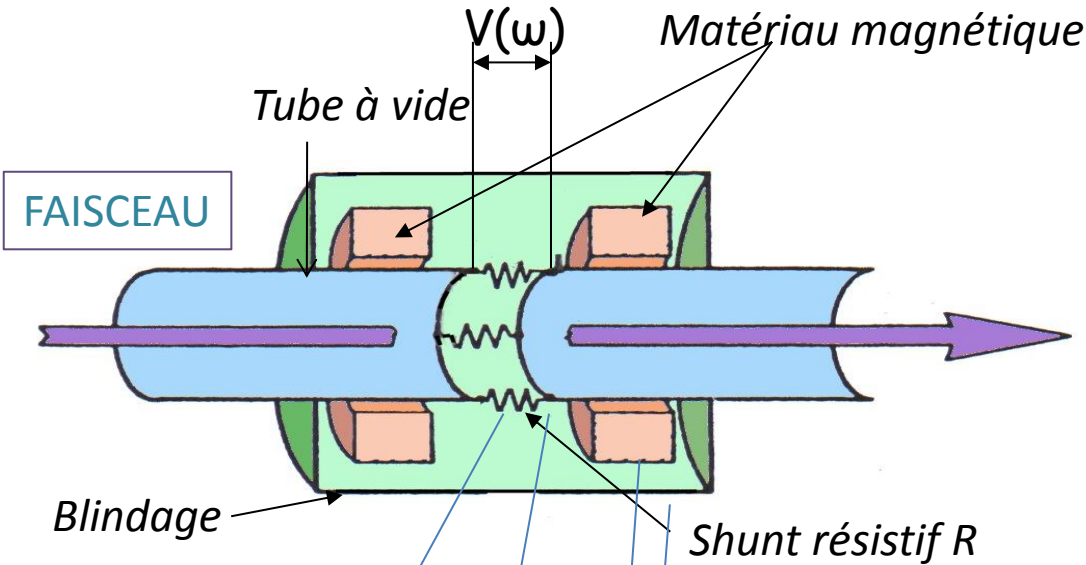
Utilisation du courant de paroi : Wall current monitor

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

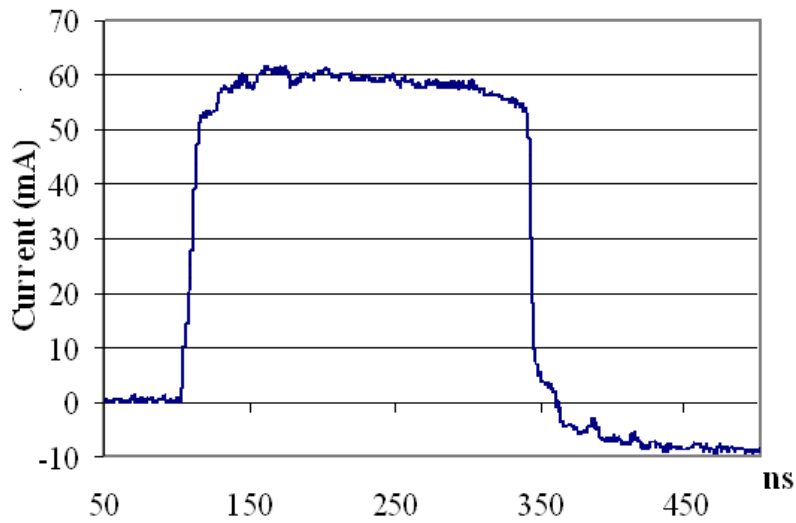
Utilisation du courant de paroi associé au faisceau**Wall Current Monitor**

Il est nécessaire en pratique de disposer un blindage protégeant le gap et le shunt des perturbations électromagnétiques extérieures.

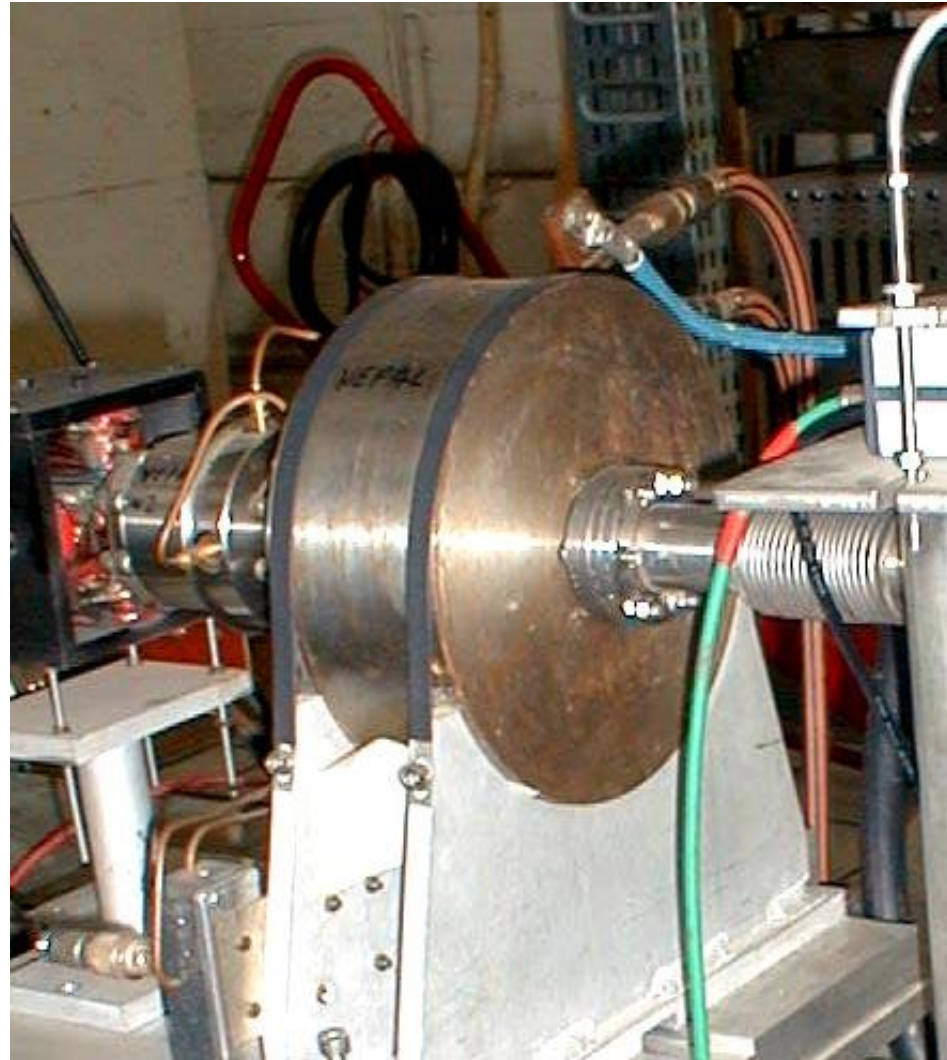
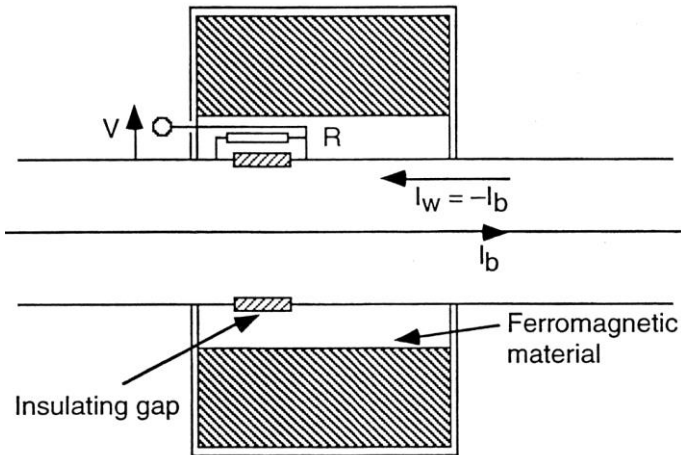
- Le gap doit être protégé de l'environnement EM extérieur pour ne pas fausser la mesure
- Les tensions induites dans le gap par l'environnement peuvent perturber le faisceau
- L'ensemble forme alors une cavité électromagnétique. Un matériau magnétique est disposé à l'intérieur pour abaisser sa fréquence de résonance (réponse vers les basses fréquences)

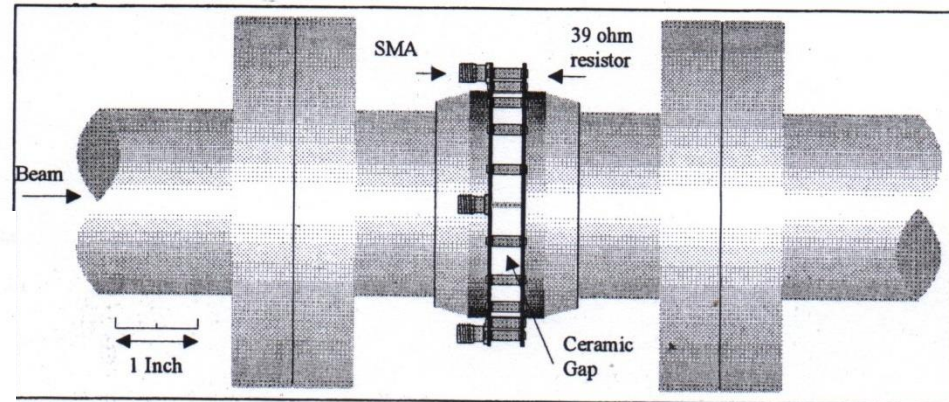
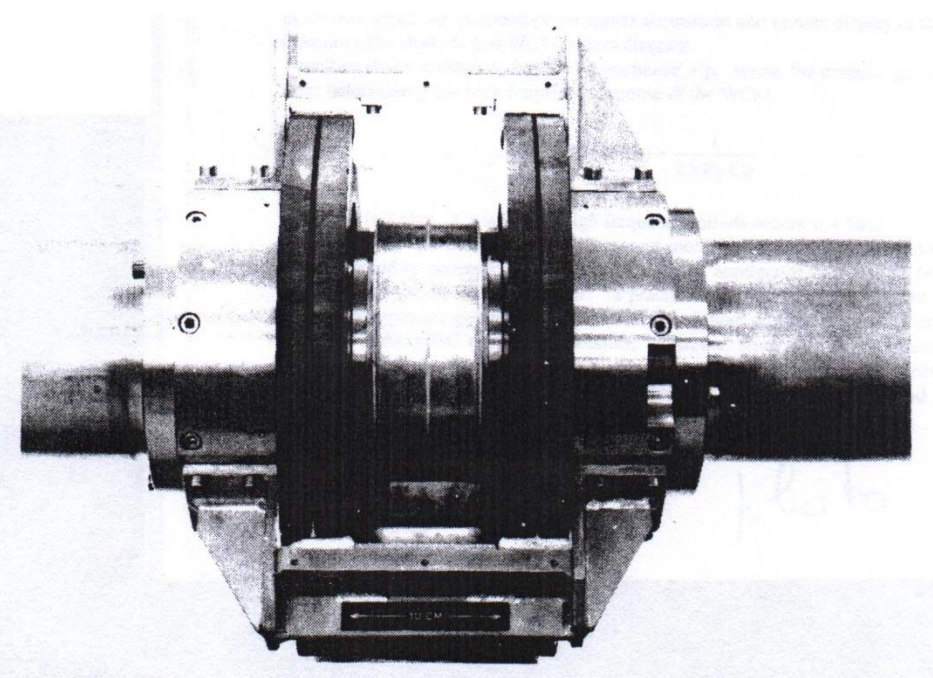


Application : Mesure de durée de Bunch et émittance longitudinale (de qq 100 kHz à qq GHz)



Sensibilité sous 50 Ω: 1V/A

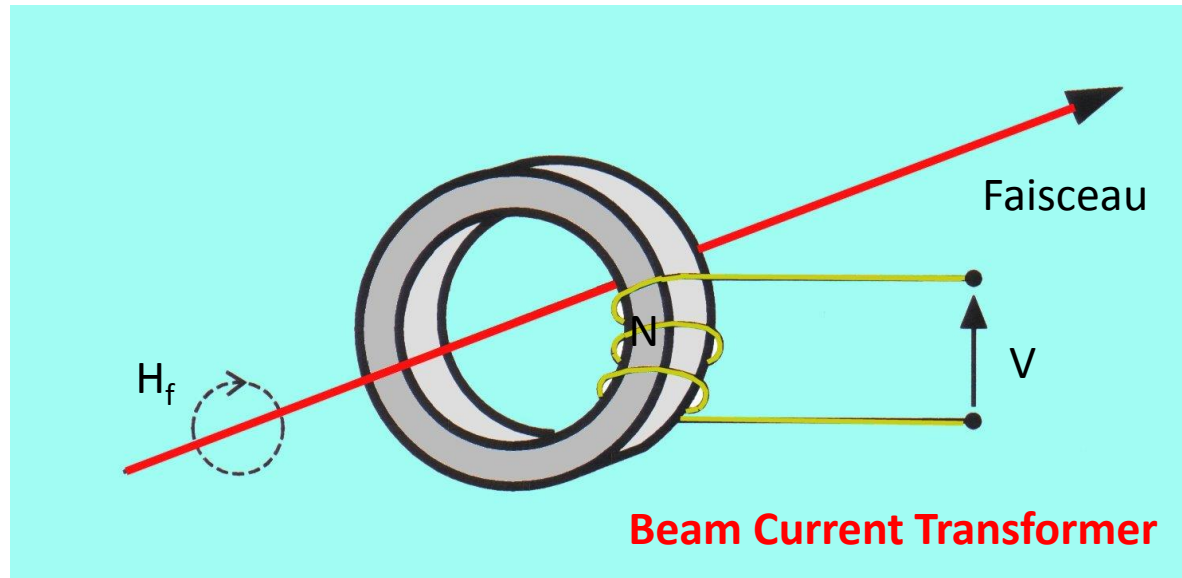




(A.L.S.) 2V/A; B.P.: 2.5 MHz- 4 GHz

Wall Current Monitor Gap I.S.R. (CERN)

Utilisation du champ d'induction magnétique H associé au faisceau



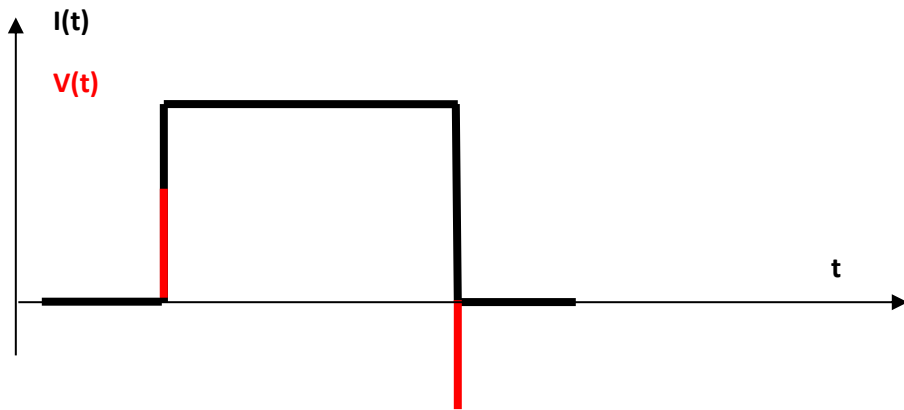
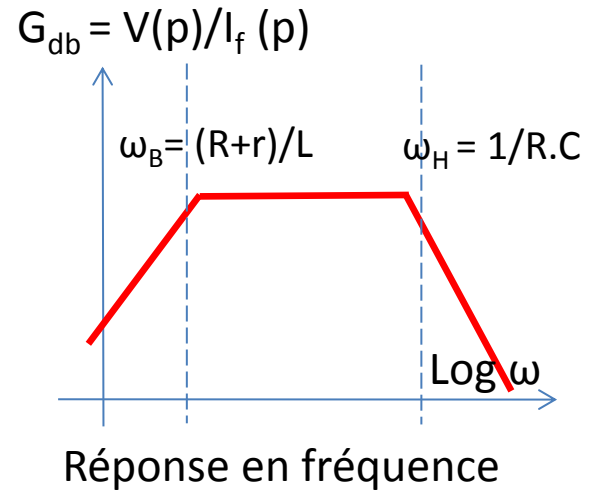
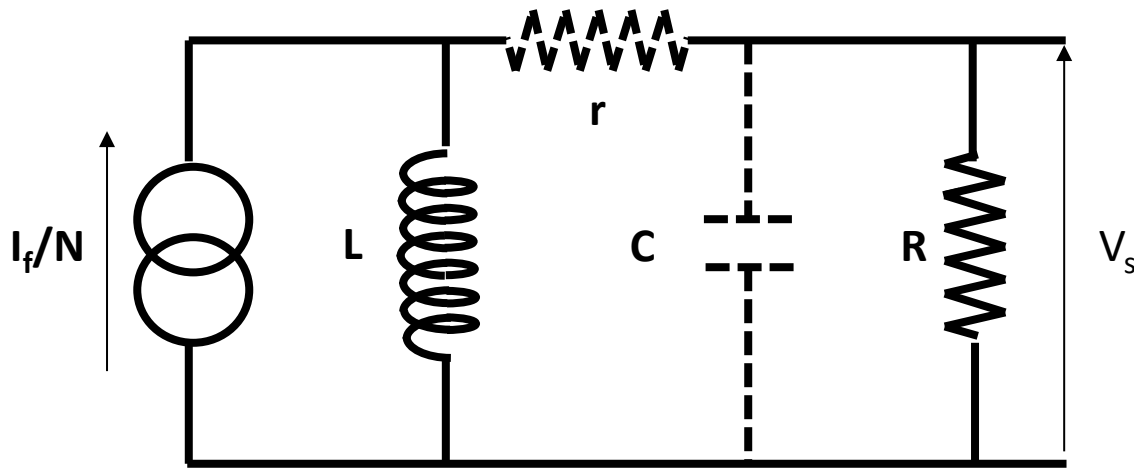
Principe de fonctionnement:

- Le faisceau passe à travers un tore à haute perméabilité magnétique (primaire).
- N spires sont enroulées autour du tore (secondaire).
- La loi de l'induction donne pour la tension V aux bornes du secondaire (cas idéal) :

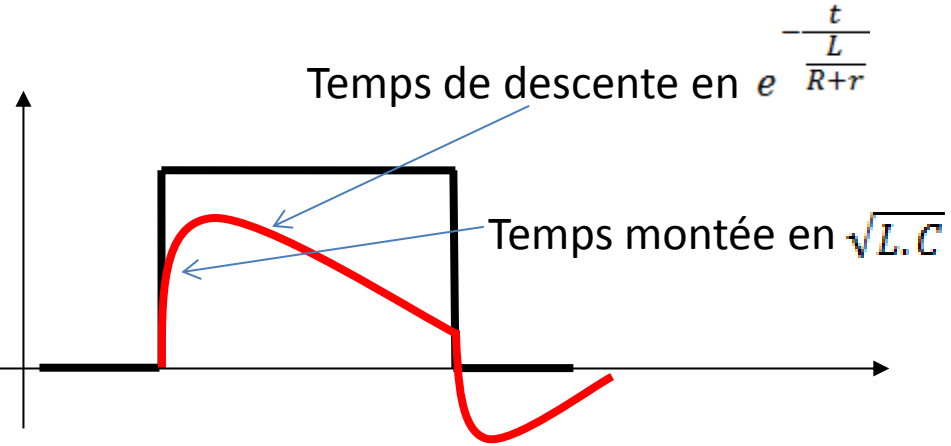
$$V = L \cdot \frac{dI_F}{dt}$$

$B = \mu_0 \cdot H_B \Rightarrow$ Un courant de $1 \mu\text{A}$ crée $B = 2 \text{ pT}$ à une distance de 10 cm
 (Champ magnétique terrestre : $\approx 50 \mu\text{T}$)

Bande passante du transformateur réel: réponse en basse fréquence C est négligé)

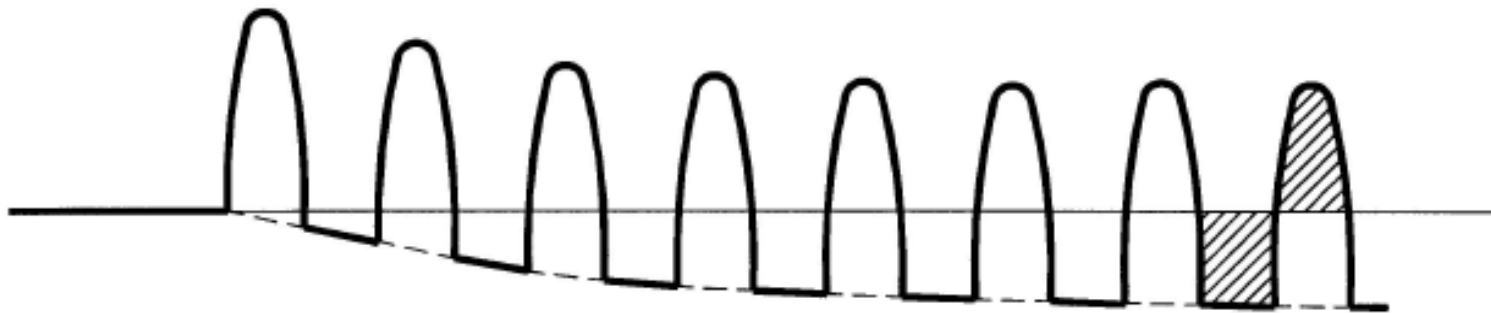


Réponse à un créneau de courant
Transformateur idéal: $r=0; C=0, R= \infty$



Réponse à un créneau de courant
Transformateur réel: $r; C, R$

Bande passante du transformateur réel: réponse à un train d'impulsion .



- La durée d'une impulsion est inférieure à la constante de temps de descente du transformateur
- La composante continue n'est pas transmise.

Utilisation du transformateur de courant :

➤ Dispositif complètement transparent au faisceau: utilisé si le faisceau passe plusieurs fois (synchrotrons)

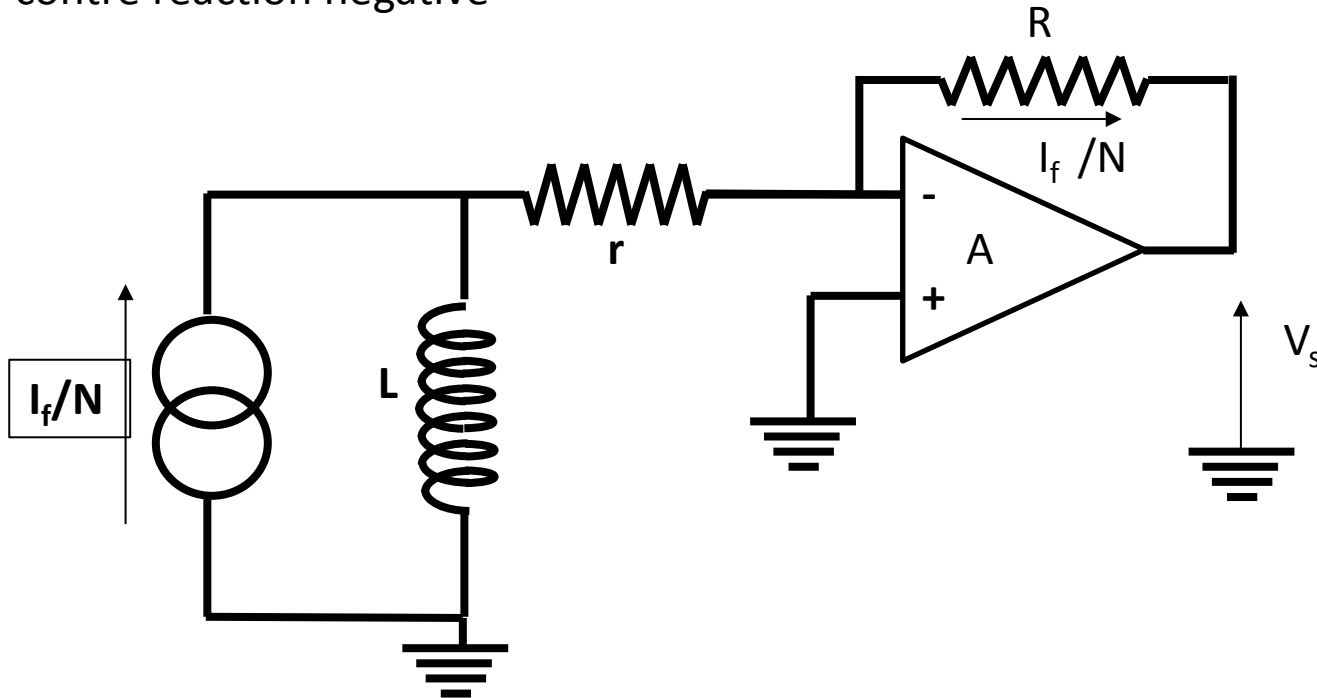
➤ Le «dilemme» du transformateur :

- Augmenter la sensibilité conduit à baisser le nombre de spires au secondaire
- Obtenir une fréquence basse de coupure (pour mesurer des pulses longs) conduit à augmenter le nombre de spires

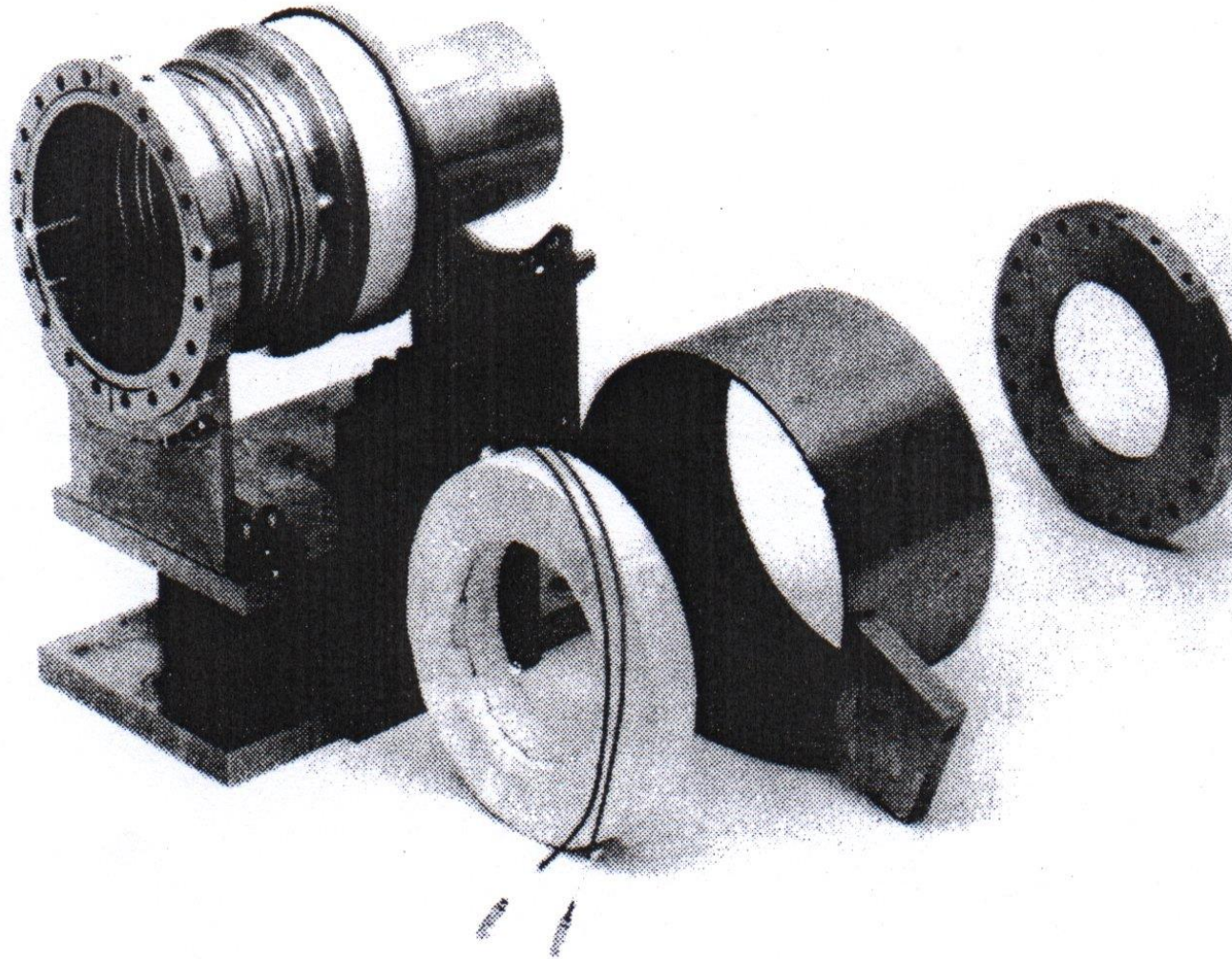
→Solution: augmenter la self en utilisant un matériau à forte perméabilité ($\mu_r \sim 10^5$)

On obtient au mieux τ de l'ordre de quelques ms (dépend de la charge)

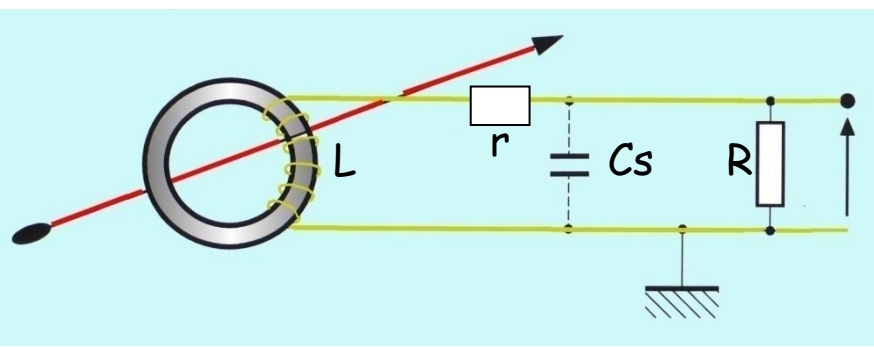
Transformateur actif: diminution de la fréquence de coupure basse par un circuit actif à contre réaction négative



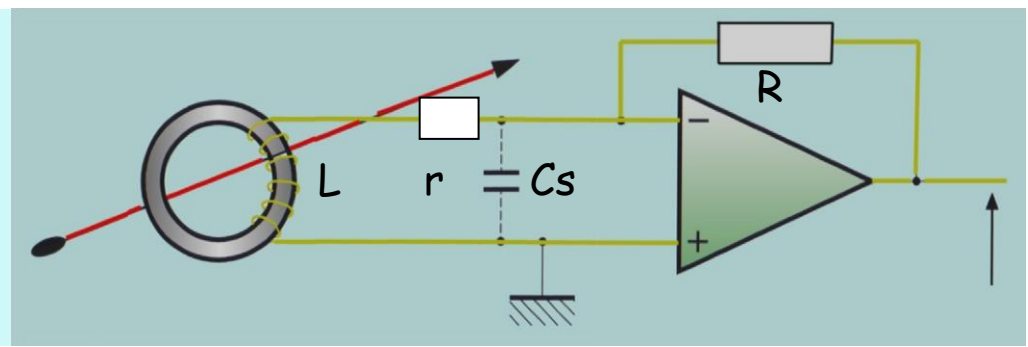
- La nouvelle constante de temps est augmentée et vaut : L/r et non plus $L/(R+r)$
- La nouvelle constante de temps ne dépend que des caractéristiques de la self
- La sensibilité en R/N du transformateur idéal est conservée dans la bande passante.



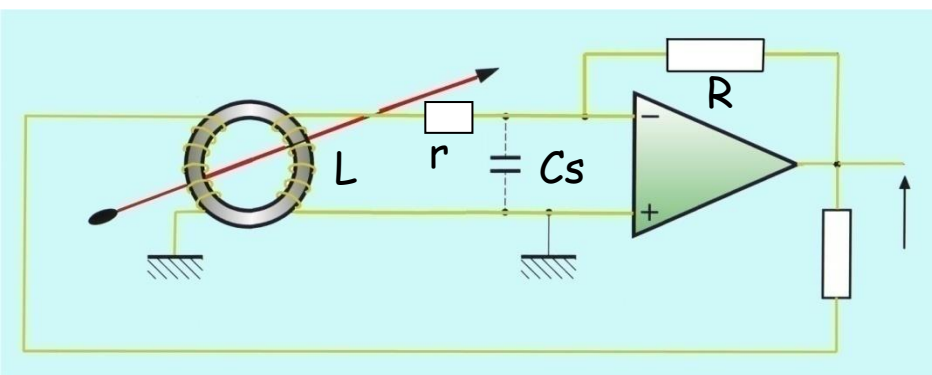
Éléments constitutifs d'un transformateur d'intensité (ISR-CERN)



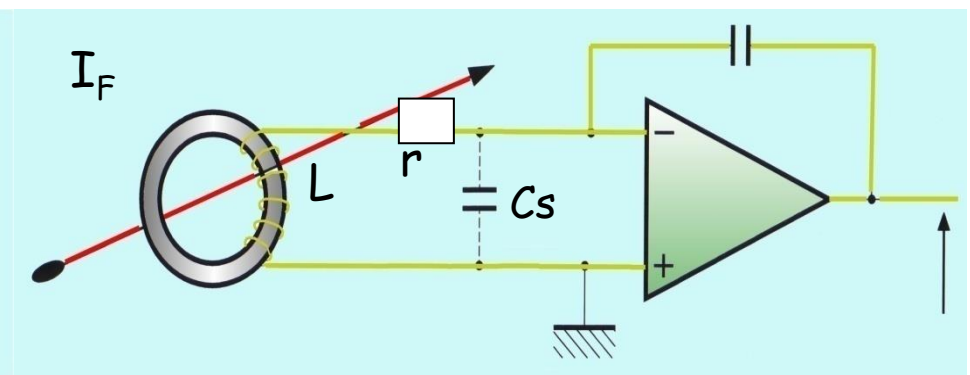
Transformateur passif



Transformateur « actif »



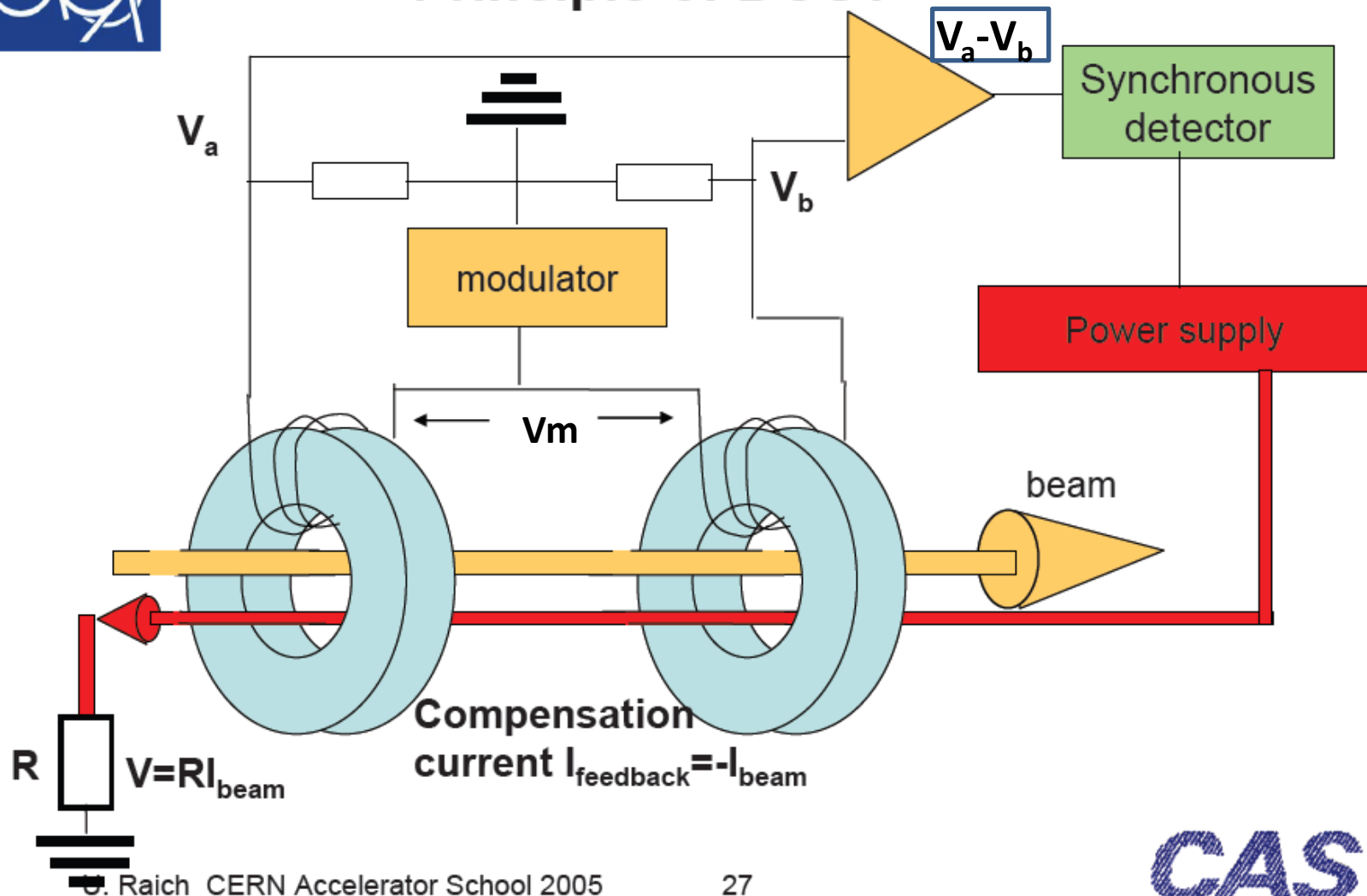
Transformateur actif avec contre réaction par enroulement supplémentaire (transformateur de Hereward)



transformateur à intégration



Principle of DCCT



Left: DCCT300 μA - 1 A;

D.C. - 20 kHz

Résolution: 2 μA

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 $\zeta \sim 0.5 \mu\text{s}$

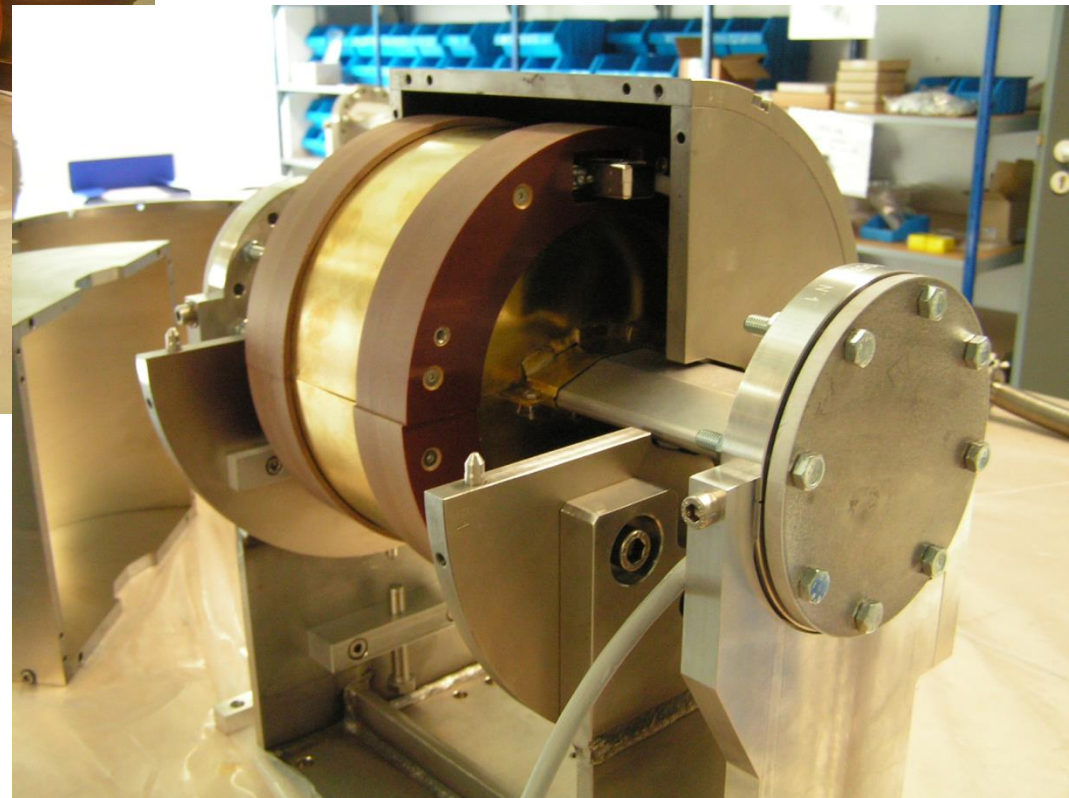
(Beam injection control)

Gap: alumina

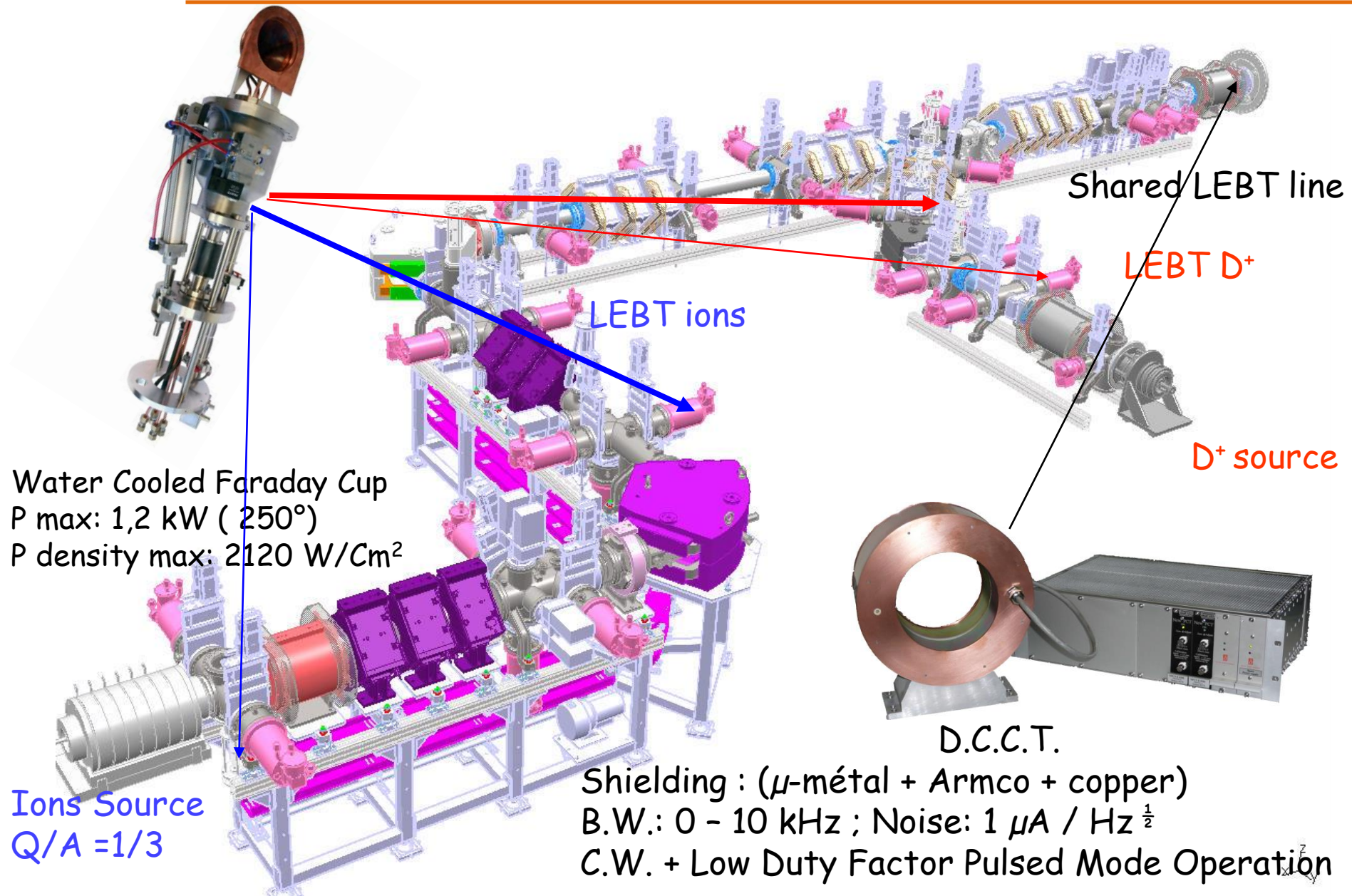


DC and AC Beam current transformer à GSI

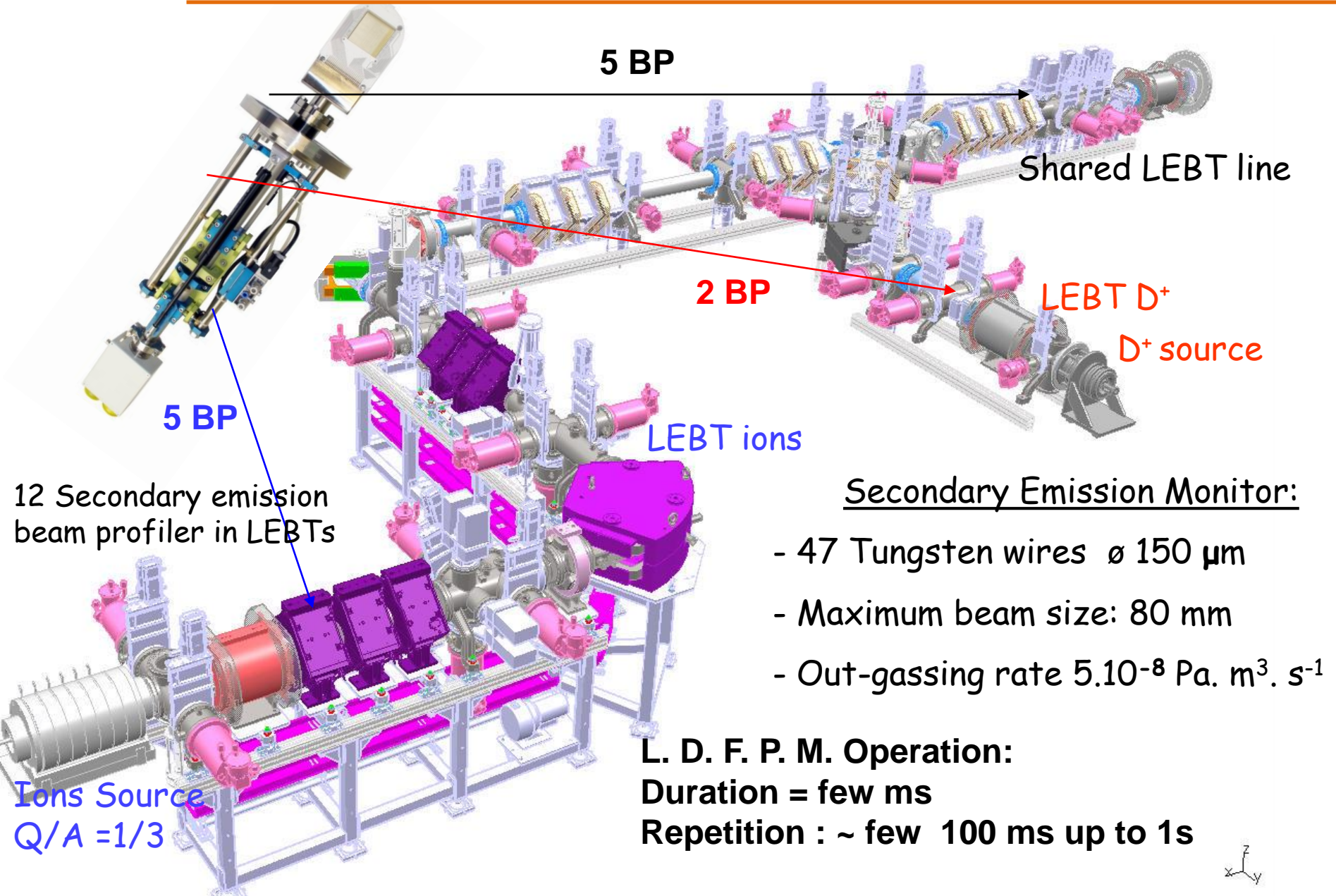
MONTAGE DCCT DE L'ANNEAU SOLEIL (résolution $1 \mu\text{A}/\text{Hz}^{1/2}$)



SPIRAL2: Beam Current Measurements in the L.E.B.T.



Beam transverse profiles measurements in the L.E.B.T.



BEAM

Buncher 1 Slits H Slits V Buncher 2 Slits V Scraper Buncher 3

- Harp S.E.M profilers
L. D.F. P. M. operation
D = few 100 μ s,
T: ~ 100 ms up to 1s
- F. C. T.
- (B.W. > 1.5 GHz)
- Slow Faraday cup
3kW CW- 5300 kW/cm²mc
- Bunch length measurement:
- Fast Faraday Cup (B.W. > 1.5 GHz)
400 W max. D= 45 mm

Emittancemeter
Scanner Allison

DCCT+ACCT
0- 300 kHz
Part of MPS

Utilisation du champ électrique E associé au faisceau

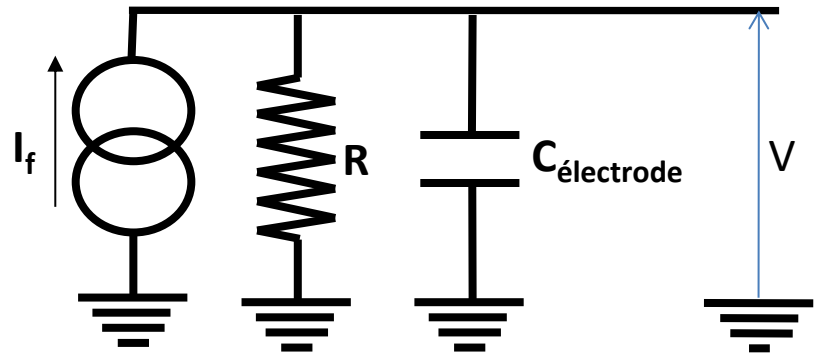
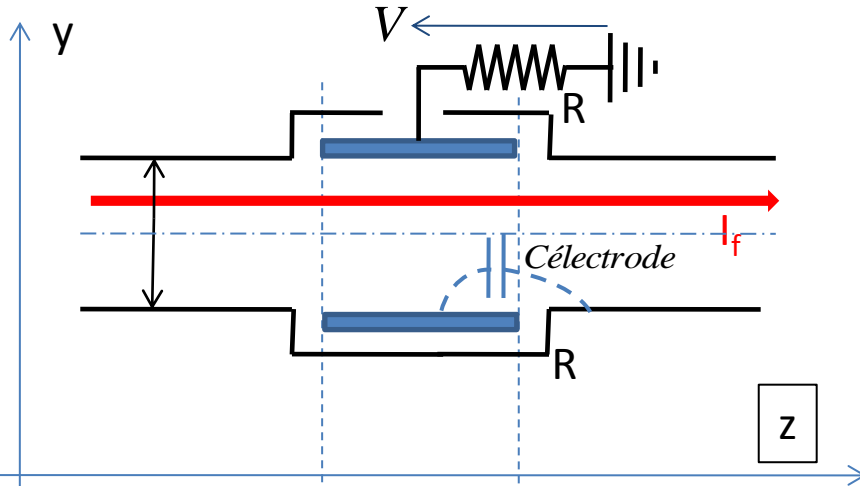
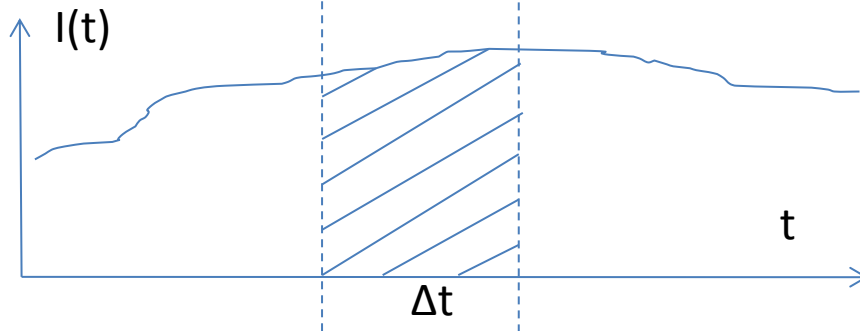
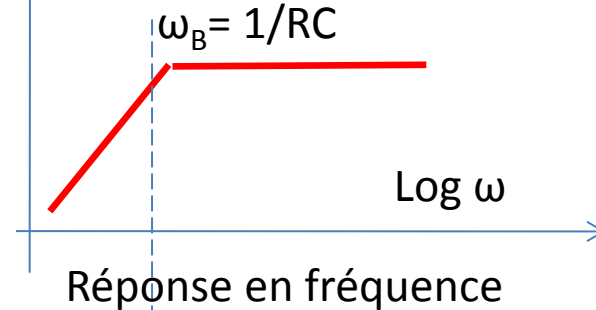


Schéma électrique équivalent d'une électrode P.U.



$$G_{db} = V(p)/I_f(p)$$



Réponse en fréquence

Dérivation du signal I_f *Reproduction du signal I_f*

Electrode PU pour «IPHI»
 (Mesure de la vitesse du faisceau
 par temps de vol)

- $\varnothing = 70 \text{ mm}$
- $L = 3 \text{ mm}$
- $C = 30 \text{ pF}$
- $f_{acc} = 352,2 \text{ MHz}$

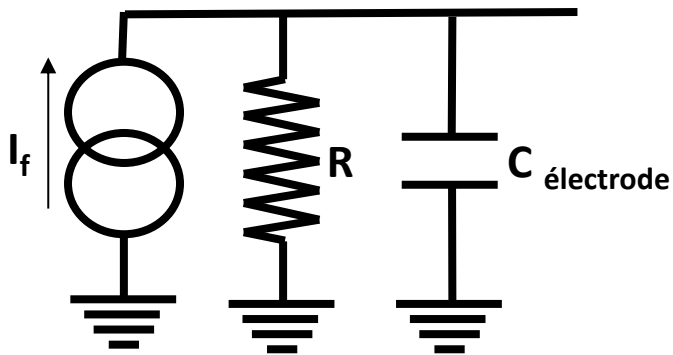
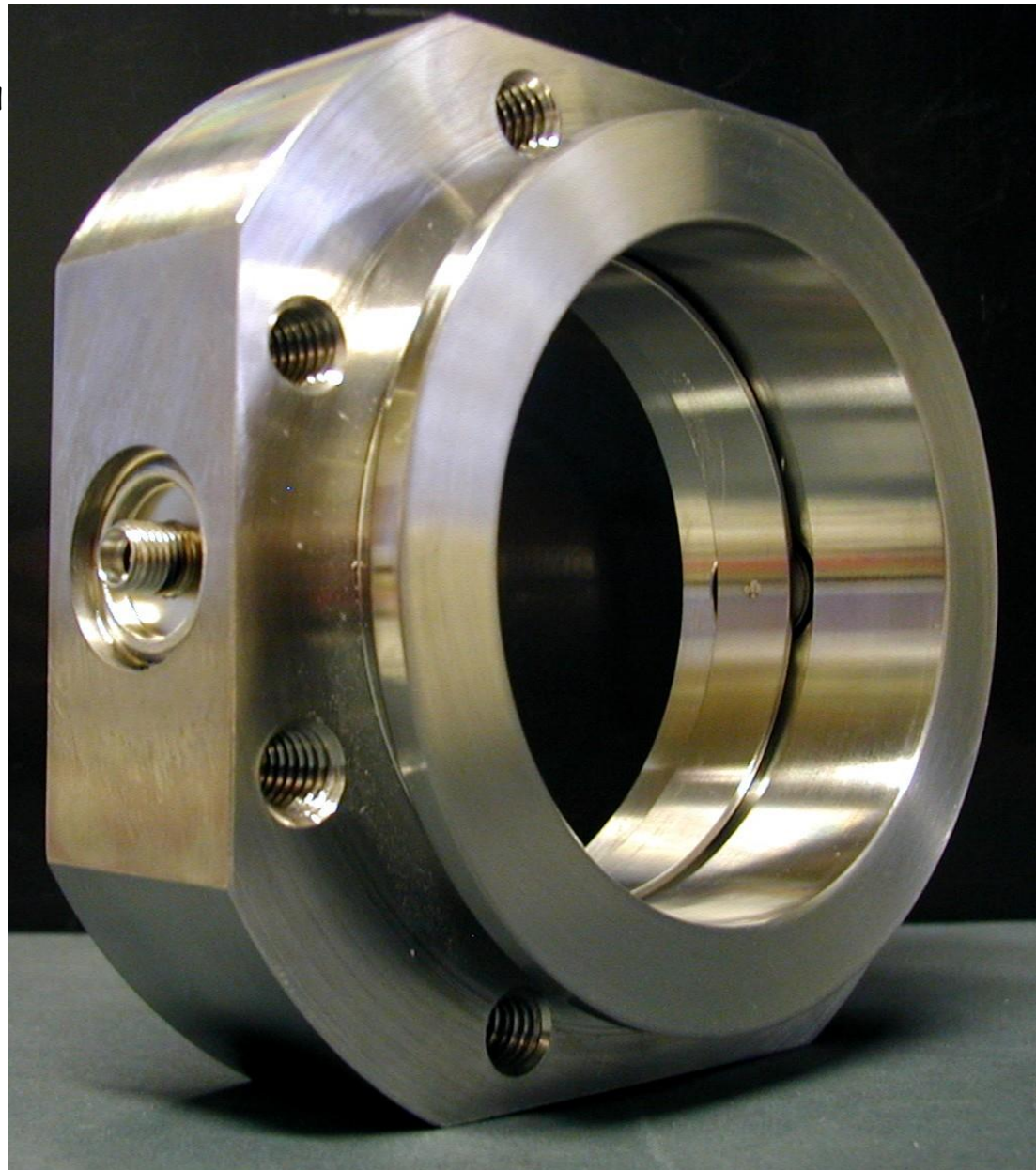


Schéma électrique équivalent d'une
 électrode P.U. électrostatique

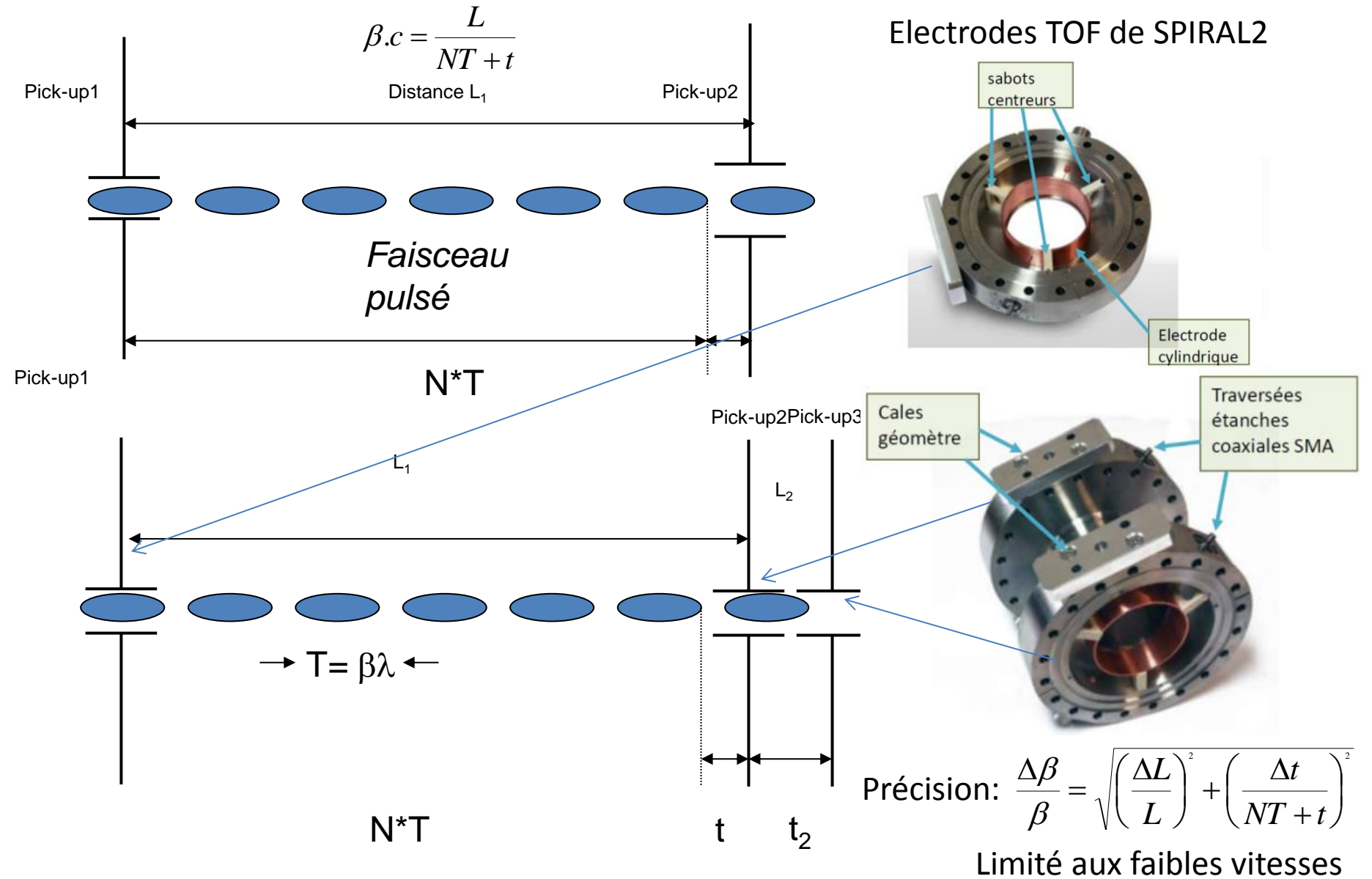


Réalisation d'une fréquence de coupure basse par une haute impédance de charge:

- L'impédance de charge est l'impédance d'entrée de l'amplificateur associé à l'électrode
- Dans les synchrotrons à protons ou à ions lourds la fréquence accélératrice est généralement comprise entre 1 à 20 MHz. La longueur des bunch est de plusieurs mètres et l'ouverture du tube à vide de l'ordre de 20 cm de diamètre:
 - La grande ouverture du tube à vide a pour effet de baisser la sensibilité.
 - On est conduit à augmenter la longueur de l'électrode pour accroître la sensibilité.
- Généralement on adopte des longueurs d'électrodes d'une dizaine à une vingtaine de cm, ce qui donne des capacités d'électrode dans le domaine de la centaine de pF.
- La longueur de l'électrode est bien plus courte que la longueur du bunch et la charge du faisceau au niveau de l'électrode varie très peu (cas électrostatique). Comme indiqué plus haut on observe bien la forme du bunch.
- Réalisation de la très haute impédance (une dizaine de $M\Omega$): amplificateurs à FET à l'entrée.
 - Les fréquences de coupure basses sont alors de l'ordre de la dizaine de KHz,
 - La bande passante peut atteindre une centaine de MHz. (selon le niveau du signal d'entrée)

Réalisation d'une fréquence de coupure haute par une faible impédance de charge:

- La fréquence accélératrice des machines à électrons est généralement de plusieurs centaines de MHz pour les synchrotrons et de 3 GHz pour les Linac à électrons. La technologie est celle des hyperfréquences: câbles = lignes de transmission.
- Ces câbles doivent être terminés sur leur impédance caractéristique qui est de 50Ω (suppression des réflexions). Dans ce cas l'impédance de charge, donc celle de l'entrée de l'amplificateur est également imposée par la technologie disponible et égale à 50Ω
- La fréquence de coupure basse est alors de plusieurs dizaines de MHz.



Utilisation du champ électrique E associé au faisceau

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

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

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

Si $\delta \ll r$ alors il vient en négligeant le terme d'ordre 2:

$$\text{Electrode A: } Q_A \cong \frac{k}{r^2} \frac{1}{1 - 2\frac{\delta}{r}} \cong \frac{k}{r^2} \left(1 + 2\frac{\delta}{r}\right)$$

$$\text{Électrode B: } Q_B \cong \frac{k}{r^2} \frac{1}{1 + 2\frac{\delta}{r}} \cong \frac{k}{r^2} \left(1 - 2\frac{\delta}{r}\right)$$

$$\frac{Q_A - Q_B}{Q_A + Q_B} = 2 \frac{\delta}{r} \quad \delta = \frac{r}{2} \frac{\Delta}{\Sigma}$$

➤ 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.

Mesure de la position du centre de gravité du faisceau avec des électrodes P.U.

position horizontale: $x = \frac{1}{S_x} \frac{\Delta}{\Sigma}$

position verticale: $y = \frac{1}{S_y} \frac{\Delta}{\Sigma}$

- Déplacement du faisceau bien inférieur au rayon du tube à vide:

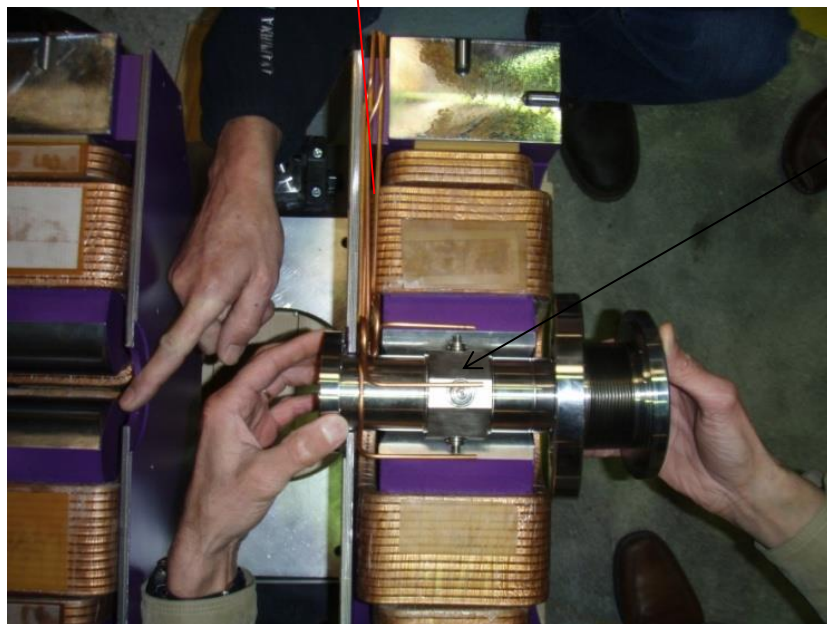
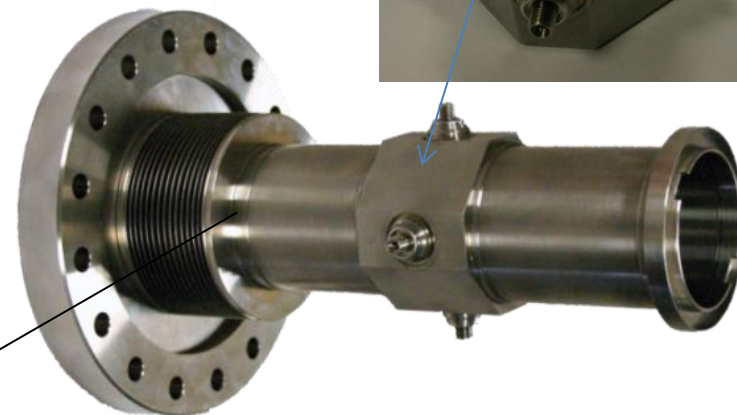
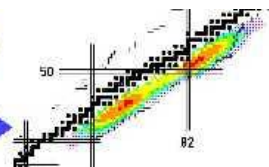
La sensibilité S_x ou S_y est une constante dans la région centrale des deux électrodes:
La réponse est linéaire.

- Pour la région située près du bord du tube à vide: la sensibilité dépend de la position du faisceau (réponse non linéaire)

Beam position measurement. Non destructive measurement: Electrostatic P.U.



Spiral2



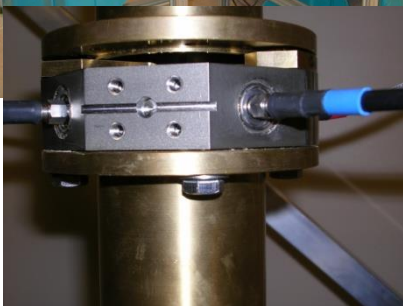
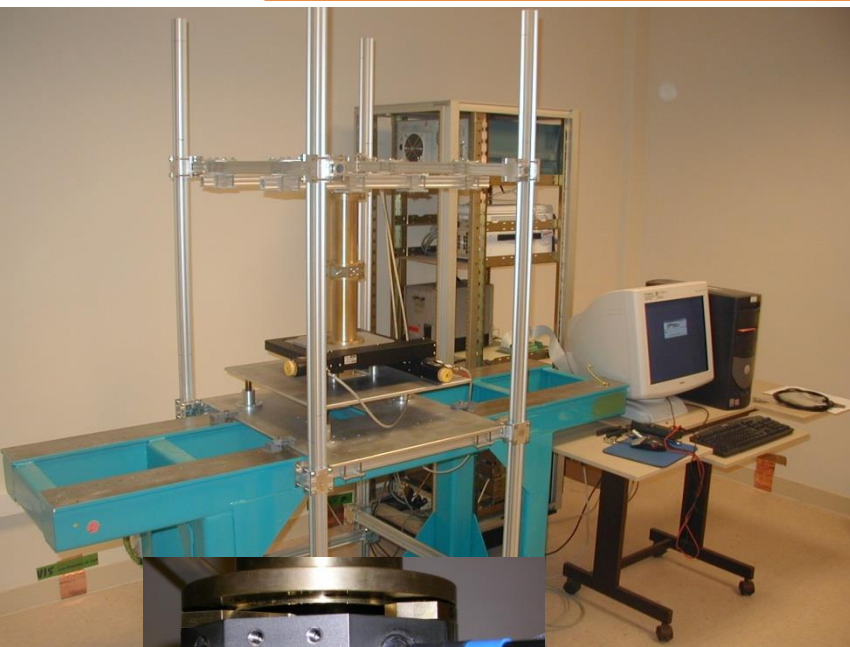
Transverse Beam Position Monitor: *Capacitive probe*

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

Electronics

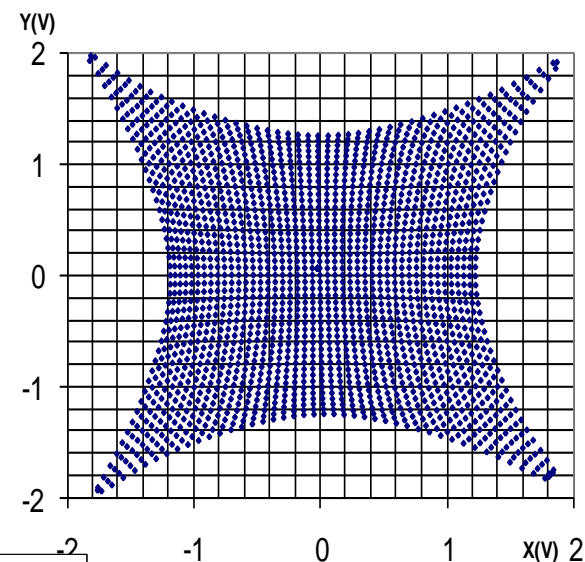
- Signal processing :
- Position precision: 0,15 mm,
- Phase: 1° Energy measurement (TOF)

Beam position measurement. Non destructive measurement: Electrostatic P.U.

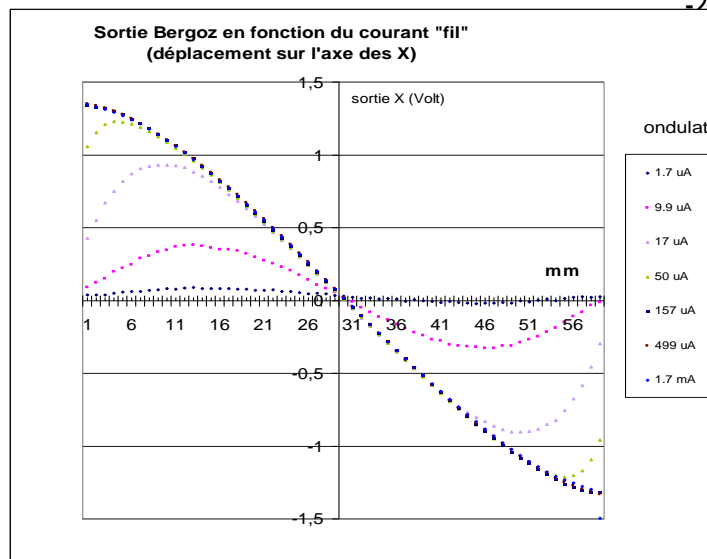


Mapping (cartésien)

1 point tous les mm

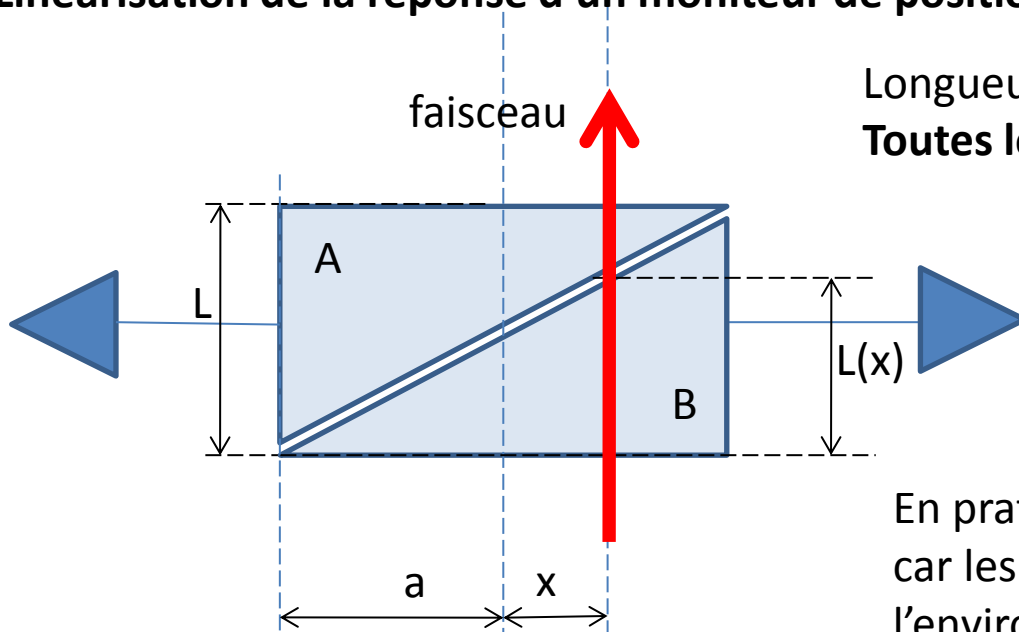


BPM for IPHI



Step displacement of the wire: 5 μm

Linéarisation de la réponse d'un moniteur de position électrostatique



Longueur électrode \gg diamètre électrode :
Toutes les lignes de champ influencent l'électrode

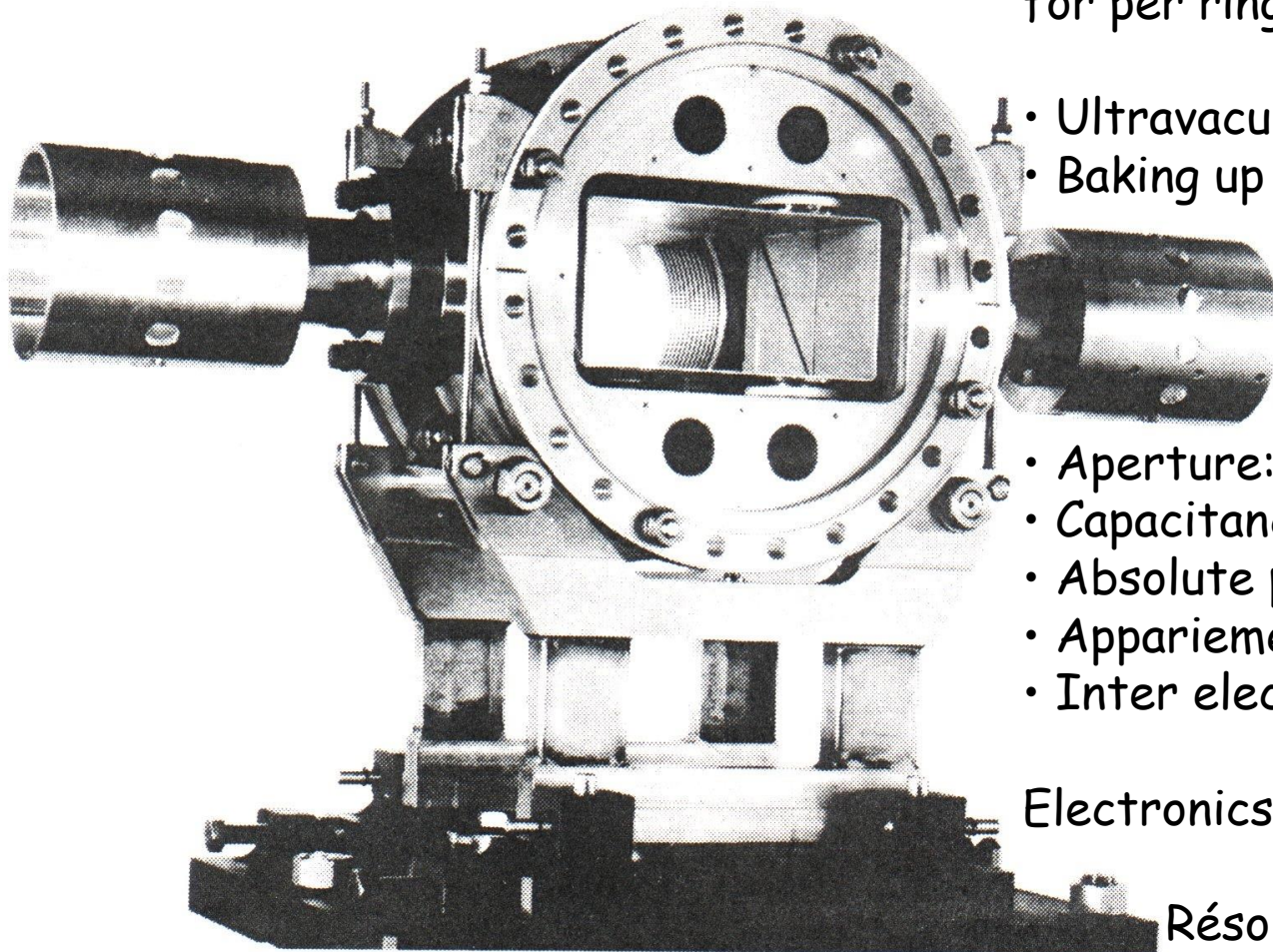
En pratique ce n'est que très rarement possible car les électrodes ont une dimension limitée par l'environnement. La linéarité est donc dégradée

Les électrodes entourent complètement le faisceau et coupe diagonale des électrodes

$$\frac{Q_B}{L} = \frac{a+x}{2a} \quad \text{et} \quad \frac{Q_A}{L} = \frac{a-x}{2a}$$

$$\text{donc} \quad x = a \cdot \frac{Q_B - Q_A}{Q_A + Q_B} \quad \text{et} \quad S = 1/a$$

Beam position measurement. Non destructive measurement: Electrostatic P.U.



- ISR Electrode P.U. «shoe box » (53 for per ring)

- Ultravacuum operation
- Baking up to 350°C

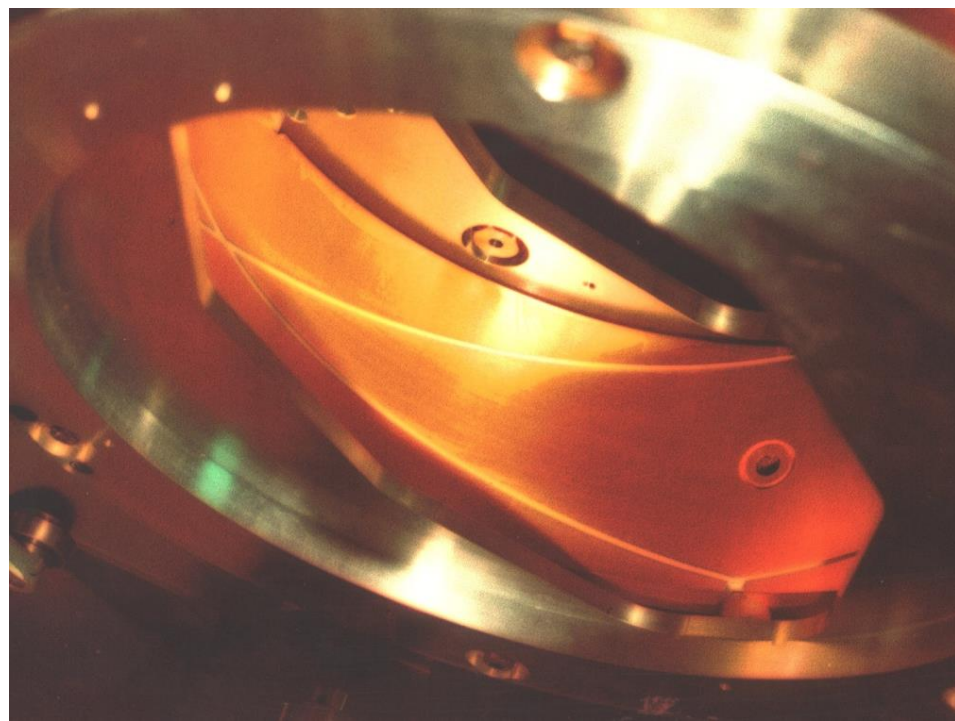
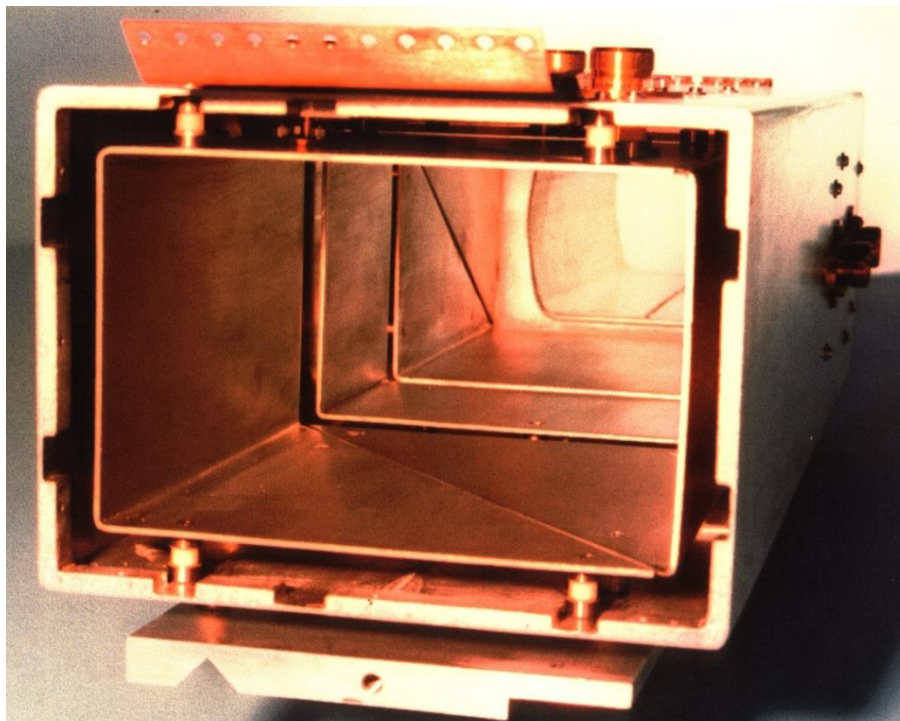
- Aperture: 50 x 150mm
- Capacitance: 76 pF.
- Absolute précision: $\pm 0.5 \times 10^{-3}$
- Appariement: $\pm 0.3 \times 10^{-3}$
- Inter electrode capacitance: ~ 5 pF

Electronics: Vacuum valve préampli

Résolution for 1 bunch
12. 10^{11} p/bunch : 0.5mm
Average over 10ms à 100 ms: 0.04
mm (DC operation)

Beam position measurement. Non destructive measurement: Electrostatic P.U.....

Electrode capacitive rectangulaire « shoe-box » and circular electrostatic P.U. synchrotron « SATURNE 2 »



Capacitance: ~ 120 pF

RF fréquence : 850 kHz - 8.8 MHz

• 10^8 à $\sim 10^{11}$ p/ bunch

• Precision: ± 2 mm

• Resolution: 0.5mm

R.F. frequency:

• 850 kHz - 8.8 MHz

P.U. + électronique:

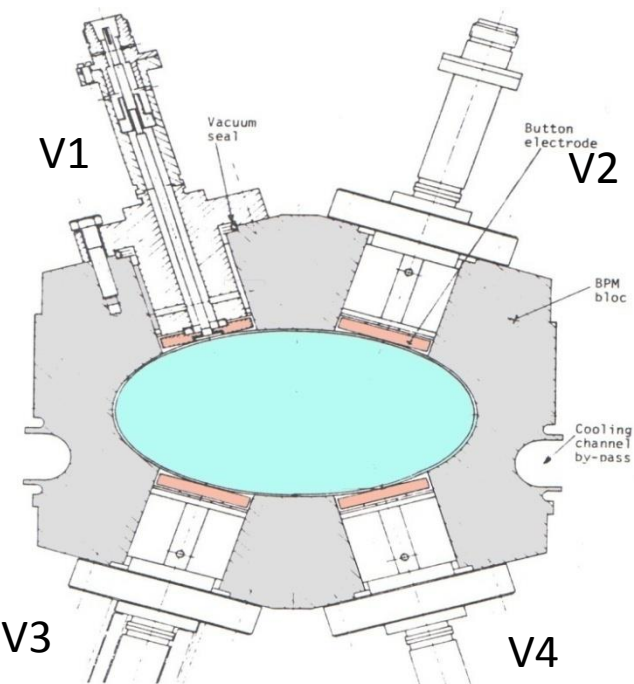
• Absolute précision absolue: 1mm

• Résolution: 0.1mm

Dynamic range: 10^9 à $2 \cdot 10^{12}$ p/bunch

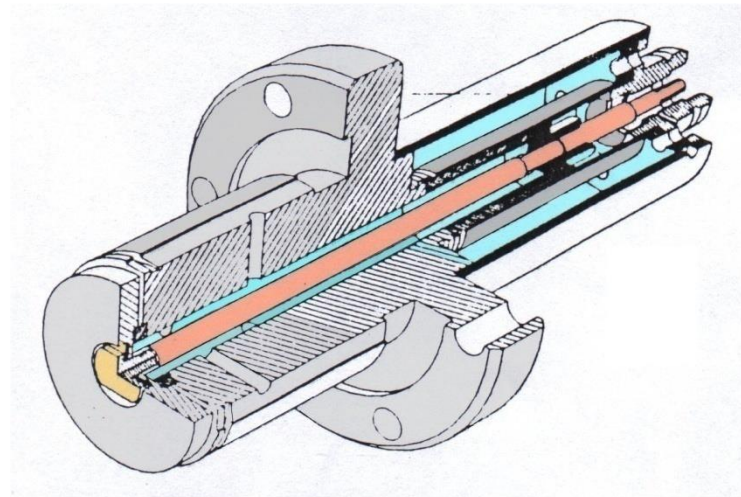
Beam position measurement. Non destructive measurement: Electrostatic P.U.

Machine à électrons: La position horizontale et verticale du faisceau s'obtiennent avec des électrodes de type « bouton »



Bloc BPM de LEP

« Button electrode »



Détail d'une électrode (C= 8,7 pF)

➤ Pas d'électrode dans le plan médian

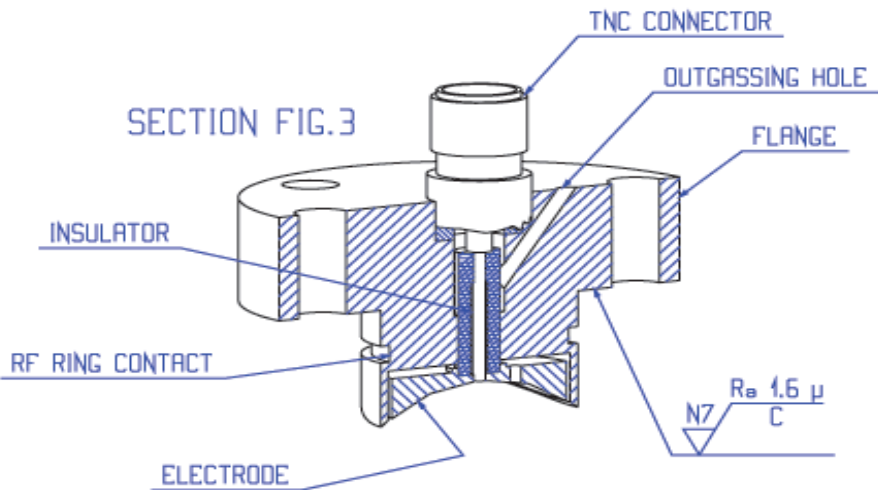
Position horizontale:

$$x = \frac{1}{S_x} \cdot \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{(V2 + V4) - (V1 + V3)}{V1 + V2 + V3 + V4}$$

Position verticale:

$$y = \frac{1}{S_y} \cdot \frac{\Delta}{\Sigma} = \frac{(V1 + V2) - (V3 + V4)}{V1 + V2 + V3 + V4}$$

Beam position measurement. Non destructive measurement: Electrostatic P.U.



$$Z_{T\infty} = \frac{A}{(2\pi r) \times c \times C_e} = \frac{\pi \times (12\text{mm})^2}{(2\pi \times 24.5\text{mm}) \times c \times (8\text{pF})} = 1.2\Omega$$

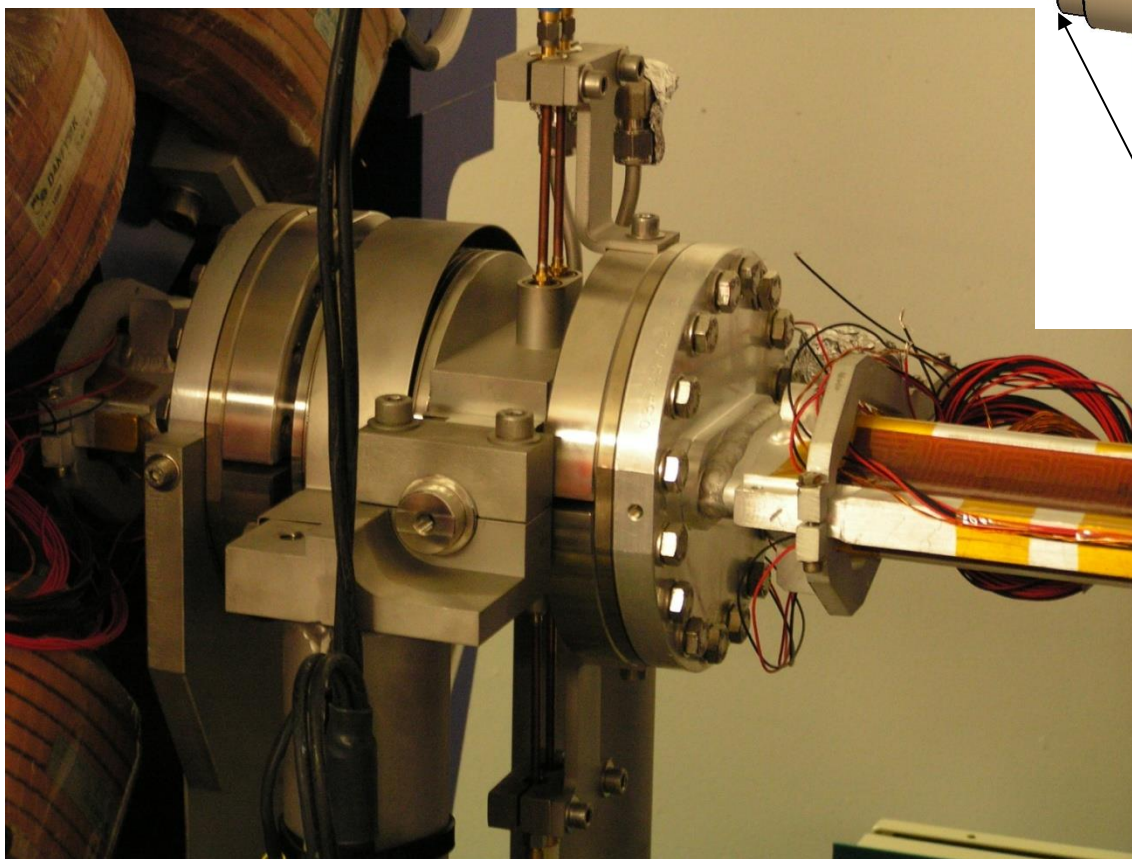
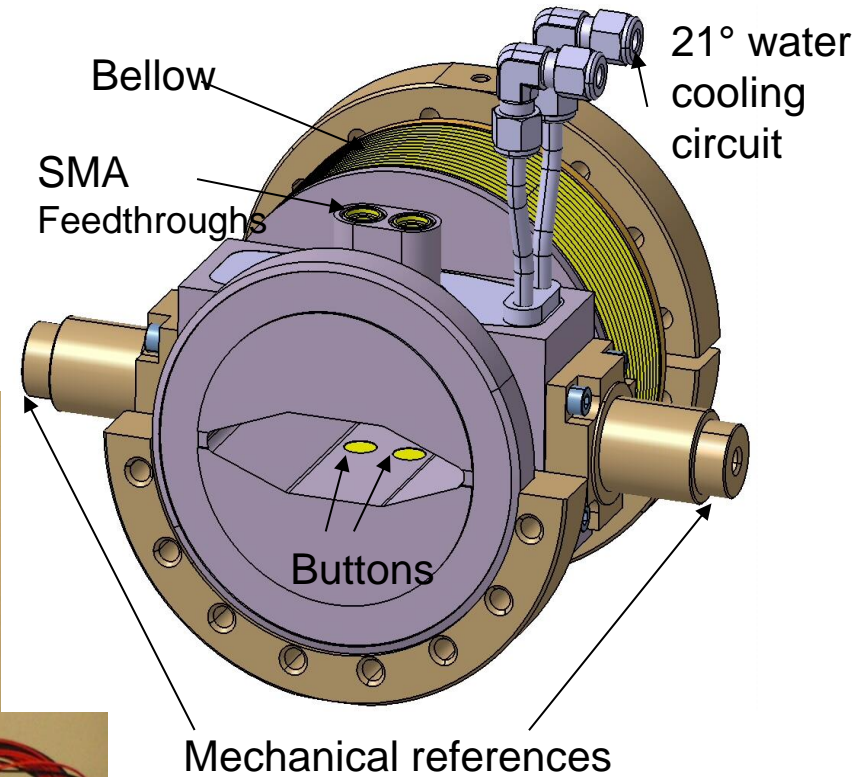
$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 50\Omega \times 8\text{pF}} = 400\text{MHz}$$

Electrode bouton pour L.H.C. Référence [15]

Beam position measurement. Non destructive measurement: Electrostatic P.U.

Electrode « button » : SOLEIL

- 120 BPM around the ring
- Electrode separation: 16 mm hor. 25 mm vert.
- Cooling: $21 \pm 0.1^\circ\text{C}$

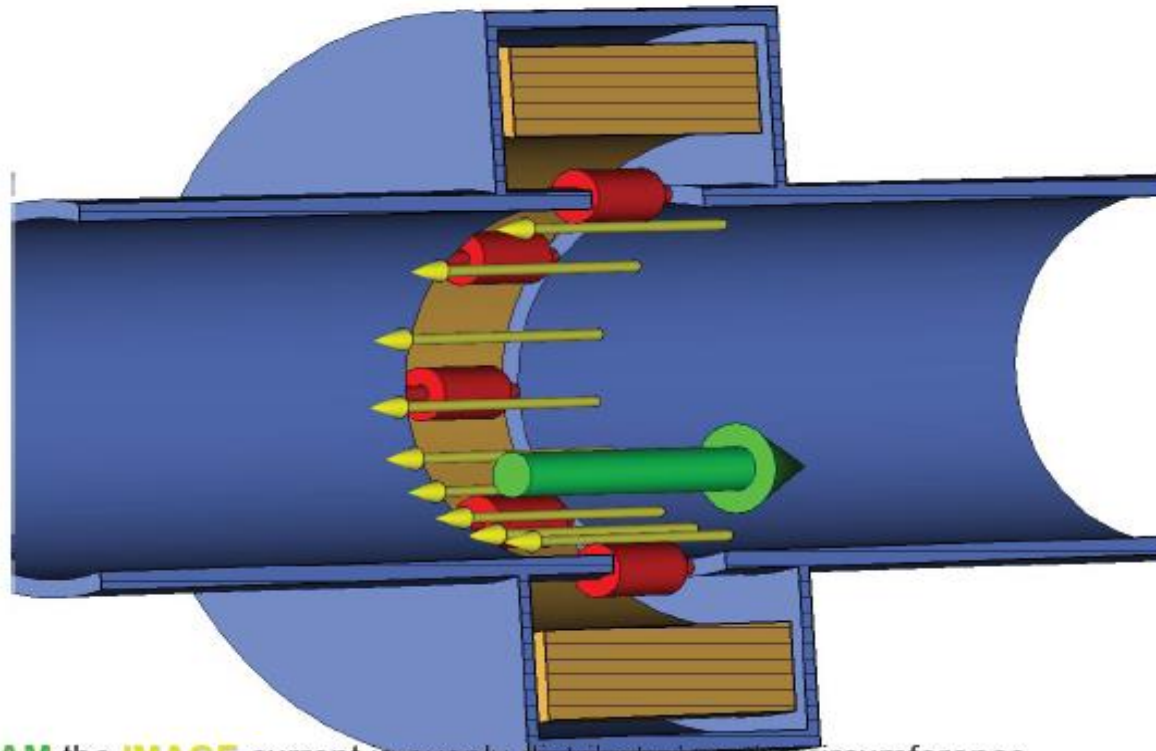




WCM as a Beam Position Monitor

$$f_{L\Sigma} = \frac{R}{2\pi L_\Sigma}$$

$$f_{L\Delta} = \frac{R}{2\pi L_\Delta}$$



- For a centered **BEAM** the **IMAGE** current is evenly distributed on the circumference
- The image current distribution on the circumference changes with the beam position
- Intensity signal (Σ) = resistor voltages summed
- Position dependent signal (Δ) = voltages from opposite resistors subtracted
- The Δ signal is also proportional to the intensity, so the position is calculated according to Δ/Σ
- Low cut-offs depend on the gap resistance and box wall (for Σ) and the pipe wall (for Δ) inductances

U. Raich CERN Accelerator School 2005

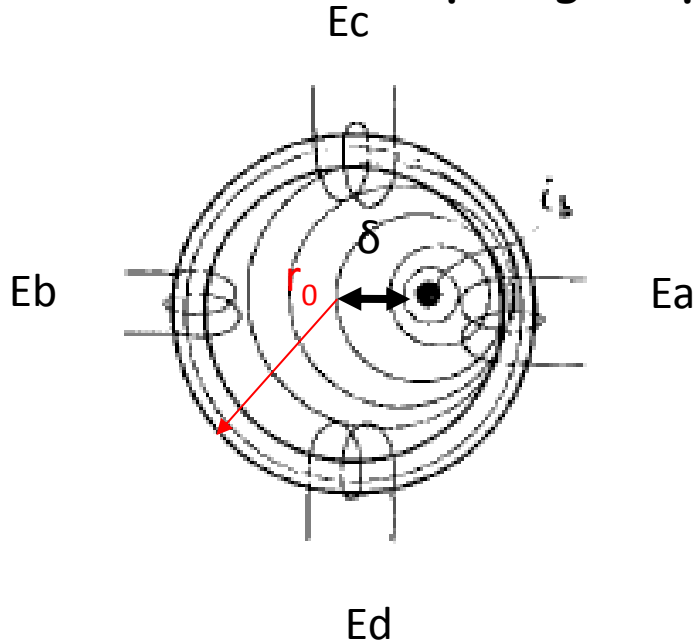
76

CAS

Slide by M. Gasior

THE CERN ACCELERATOR SCHOOL

Utilisation du champ magnétique associé au faisceau



Pour un faisceau excentré (δ):

$$E_A = k \cdot \frac{1}{r_a} = k \cdot \frac{1}{r_0 - \delta} = \frac{k}{r_0} \cdot \left(1 + \frac{\delta}{r_0}\right)$$

$$E_B = \frac{k}{r_0} \cdot \left(1 - \frac{\delta}{r_0}\right)$$

$$\frac{E_A - E_B}{E_A + E_B} = \frac{\delta}{r_0} = \frac{\Delta}{\Sigma}$$



Précision (accuracy): aptitude à déterminer la position du faisceau par rapport à un point fixe ou un axe fixe connu de la machine. Elle est déterminée par la tolérance avec laquelle le détecteur est construit, positionné et aligné dans la machine. Elle dépend également de la calibration de l'électronique, de l'atténuation et des réflexions dans les câbles.

Enfin le traitement des signaux peut également apporter des erreurs systématiques, notamment par la conversion analogique – numérique (least significant bit). Les stabilités à court et long terme contribuent également à la précision.

Résolution (resolution): Aptitude du détecteur à mesurer de petites variations de la grandeur à mesurer. La résolution est toujours meilleure que la précision absolue dans la plupart des cas. Par exemple, dans une machine à rayonnement synchrotron, il est plus important de mesurer les petites variations de position du faisceau que de connaître sa position absolue par rapport à l'axe théorique de la machine. Dans un collisionneur il est plus important de connaître la position relative des deux faisceaux que leur position absolue par rapport à un axe théorique. La résolution dépend du temps de mesure, du bruit de l'électronique et des dérives à court et long terme.

Bande passante analogique (analog bandwidth). Il faut toujours préciser à quoi se réfère cette bande passante : par exemple celle de l'électronique de tête. Elle est déterminée par la fréquence de coupure Basse et la fréquence de coupure haute. Cette bande passante doit être adaptée au spectre de fréquence du courant du faisceau à analyser.

Seuil de détection (detection threshold) : C'est l'amplitude minimum du courant du faisceau à partir de laquelle le détecteur fournit une information. Cette grandeur est parfois appelée sensibilité, ce qui peut prêter à confusion avec la sensibilité en position.

Dynamique de mesure (dynamic range) : C'est la gamme d'intensité ou de charges dans laquelle le détecteur doit fonctionner. Par exemple, la réponse en position d'un moniteur de position doit être indépendante de l'intensité du faisceau à l'intérieur de la gamme de mesure. Pour obtenir une large gamme de mesure l'amplificateur de tête est souvent à gain variable.

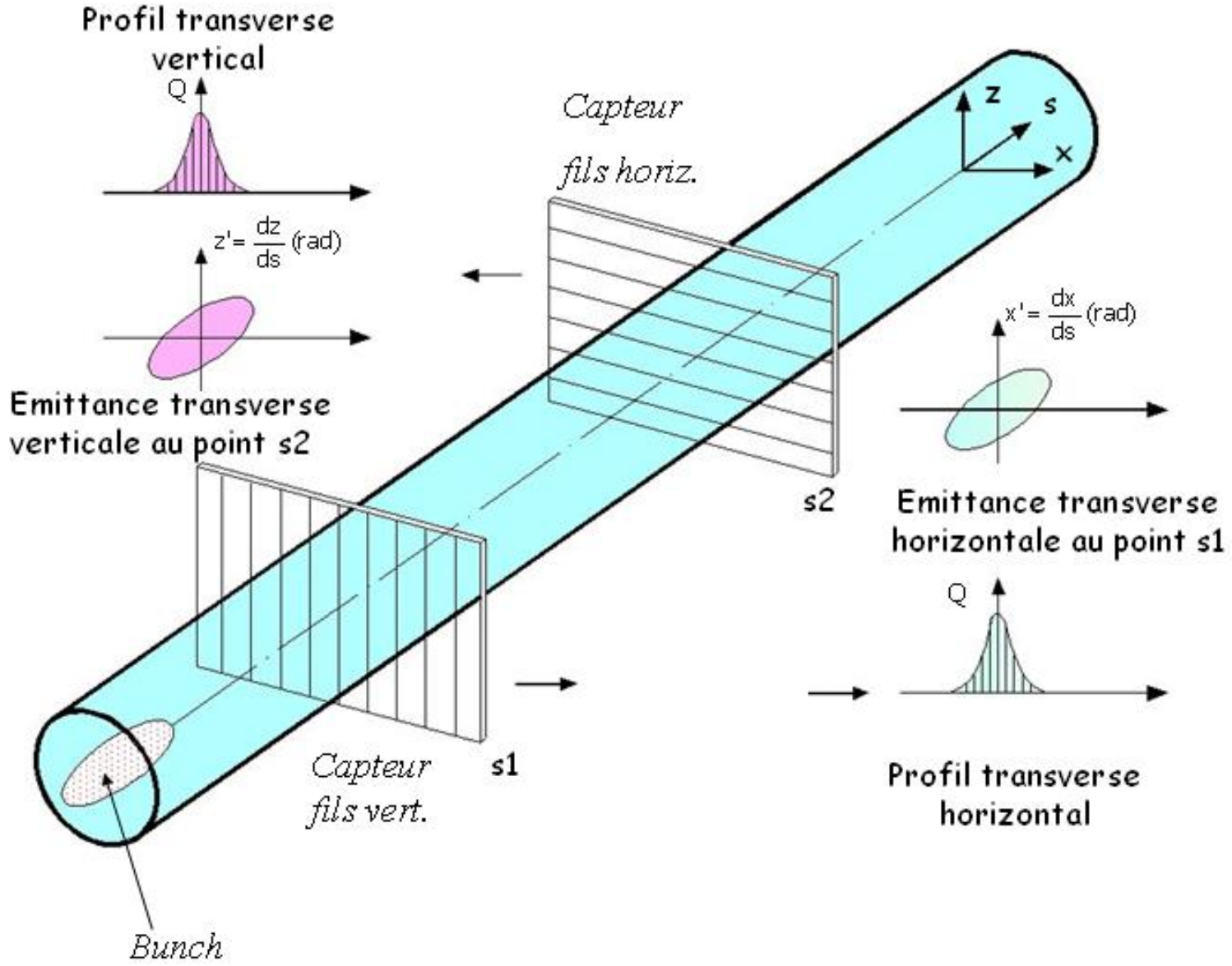
Bande passante d'acquisition (acquisition bandwidth): C'est la gamme de fréquence dans laquelle le détecteur doit fournir l'information. Par exemple un détecteur de position doit pouvoir mesurer dans certains cas des variations rapides de la position du faisceau. Une grande bande passante d'acquisition est alors requise et ceci conduit à une dégradation de la résolution. A l'inverse dans certains cas la préférence peut être apportée à la résolution et la bande passante d'acquisition est alors limitée. Dans tous les cas la bande passante d'acquisition doit être reliée à la durée du faisceau à mesurer.

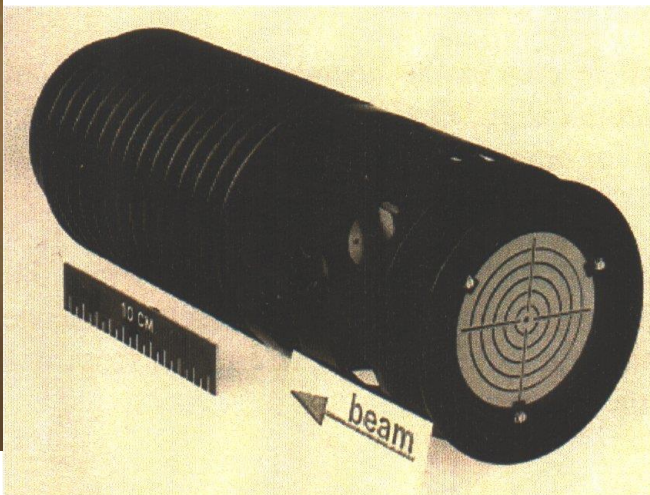
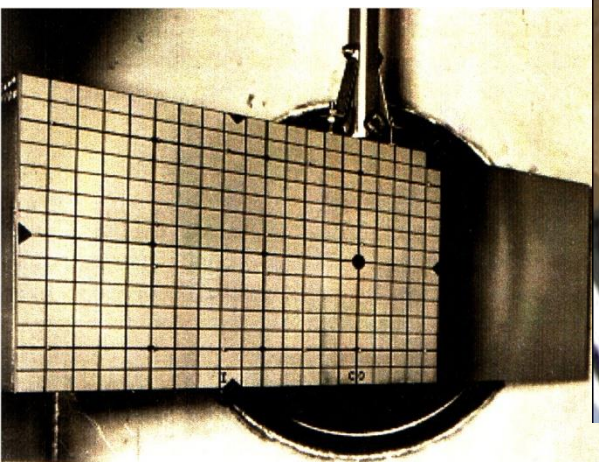
C'est une caractéristique directement reliée à la durée d'acquisition (acquisition time)

Bande passante en temps réel (Real time bandwidth) : Aptitude du détecteur à fournir dans un temps limité une information proportionnelle à la grandeur à mesurer. Cette caractéristique est essentielle si le signal du détecteur doit être utilisé dans un circuit de contre réaction : par exemple un asservissement de position du faisceau dans une machine à rayonnement synchrotron.

Rapport signal sur bruit (signal to noise ratio). La réalité conduirait plutôt à définir le rapport (signal + bruit)/bruit. En pratique il est défini par le rapport du signal que l'on veut mesurer à celui du signal que l'on ne veut pas mesurer (le bruit). Il peut être défini en amplitude (tension ou courant) ou en puissance. Le bruit thermique est par exemple incontournable mais le bruit indésirable peut également provenir du bruit des amplificateurs, des perturbations électromagnétiques dues à l'environnement du détecteur.

Mesure des profils transverses





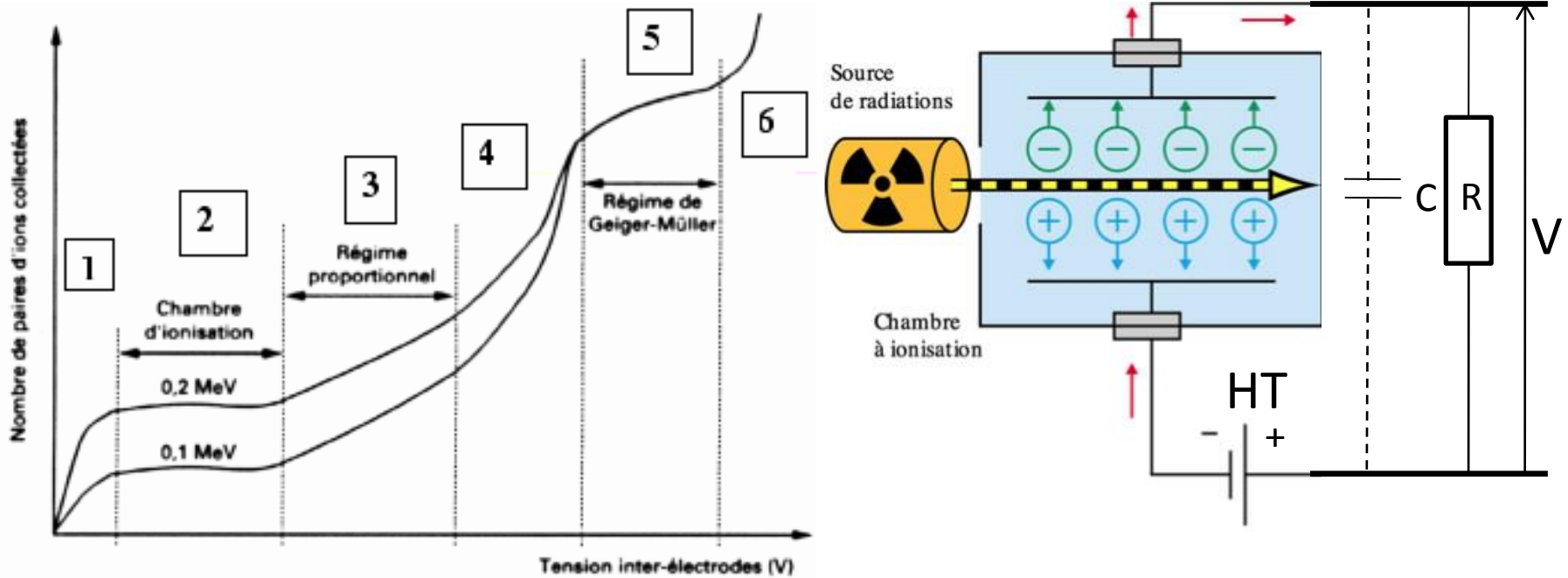
Sensitivities measured with protons with previous screen holder, normalised for $7 \text{ px}/\sigma$



Type	Material	Activator	Sensitivity
Luminesc.	CsI	Tl	$6 \cdot 10^5$
“	Al_2O_3	0.5%Cr	$3 \cdot 10^7$
“	Glass	Ce	$3 \cdot 10^9$
“	Quartz	none	$6 \cdot 10^9$
OTR [bwd]	Al		$2 \cdot 10^{10}$
“	Ti		$2 \cdot 10^{11}$
“	C		$2 \cdot 10^{12}$
Luminesc. GSI	P43: $\text{Gd}_2\text{O}_2 \text{ S}$	Tb	$2 \cdot 10^7$

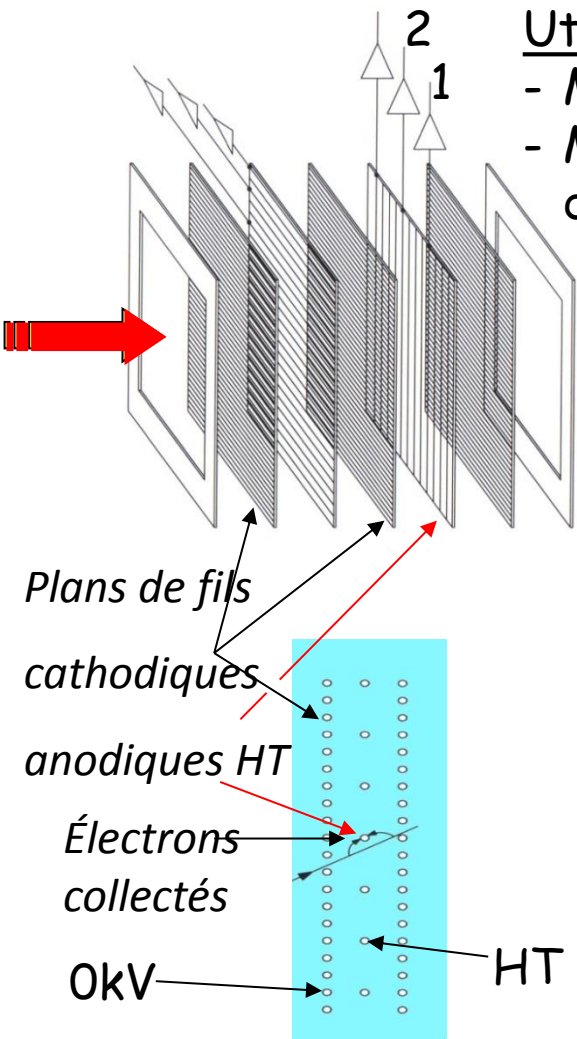


Modes de fonctionnement d'une chambre à ionisation



- 1 V < HT < 100V: régime de recombinaison partielle ou totale des ions : pas de fonctionnement
- 100 V < HT < 300V: régime d'ionisation primaire : fonctionnement en « Chambre d'ionisation »
- 300 V < HT < 1 kV: régime de proportionnalité : fonctionnement en « compteur proportionnel »
- 1 kV < HT < 1,1 kV: régime de « semi proportionnalité » : Pas d'utilisation possible
- 1,1 kV < HT < 1,5 kV : régime de « Muller » : Fonctionnement en compteur Geiger- Muller
- HT > 1,5 kV : fonctionnement instable

Principe de réalisation d'un profileur à ionisation



Utilisation :

- Mesure du profil transverse
- Mesure de la position du centre de gravité du faisceau



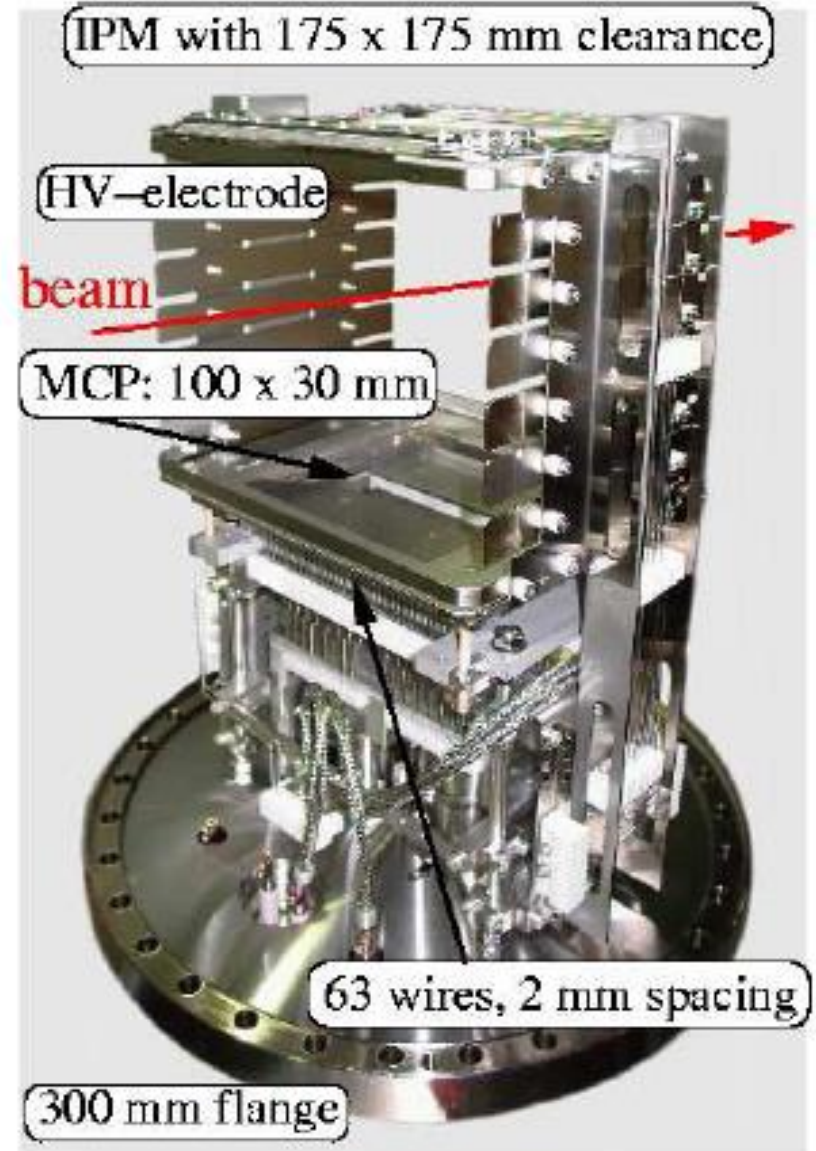
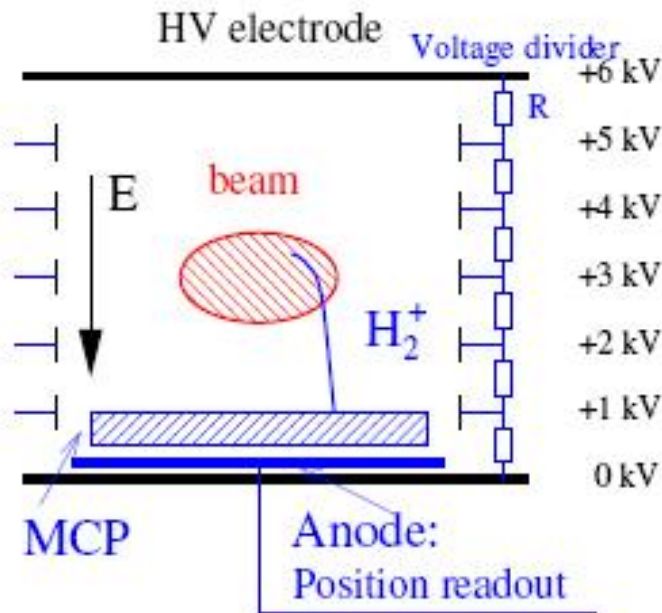
Performances :

- précision en position : 0,5mm
- résolution : 1 mm
- intensité maximale du faisceau : < 1 nAp
- intensité minimale : 10^3 ions/s

ht GANIL
- CNRS

Principe :

détection du courant électrique créé par la ionisation du gaz résiduel dans la chambre à vide et amplifié par une galette de microcanaux



Sonde à ionisation du gaz résiduel sur Synchrotron GSI

- Ouverture utile 175mm x 175mm
- Amplification du signal par GMC
- Système de lecture après GMC de 63 fils au pas de 2 mm

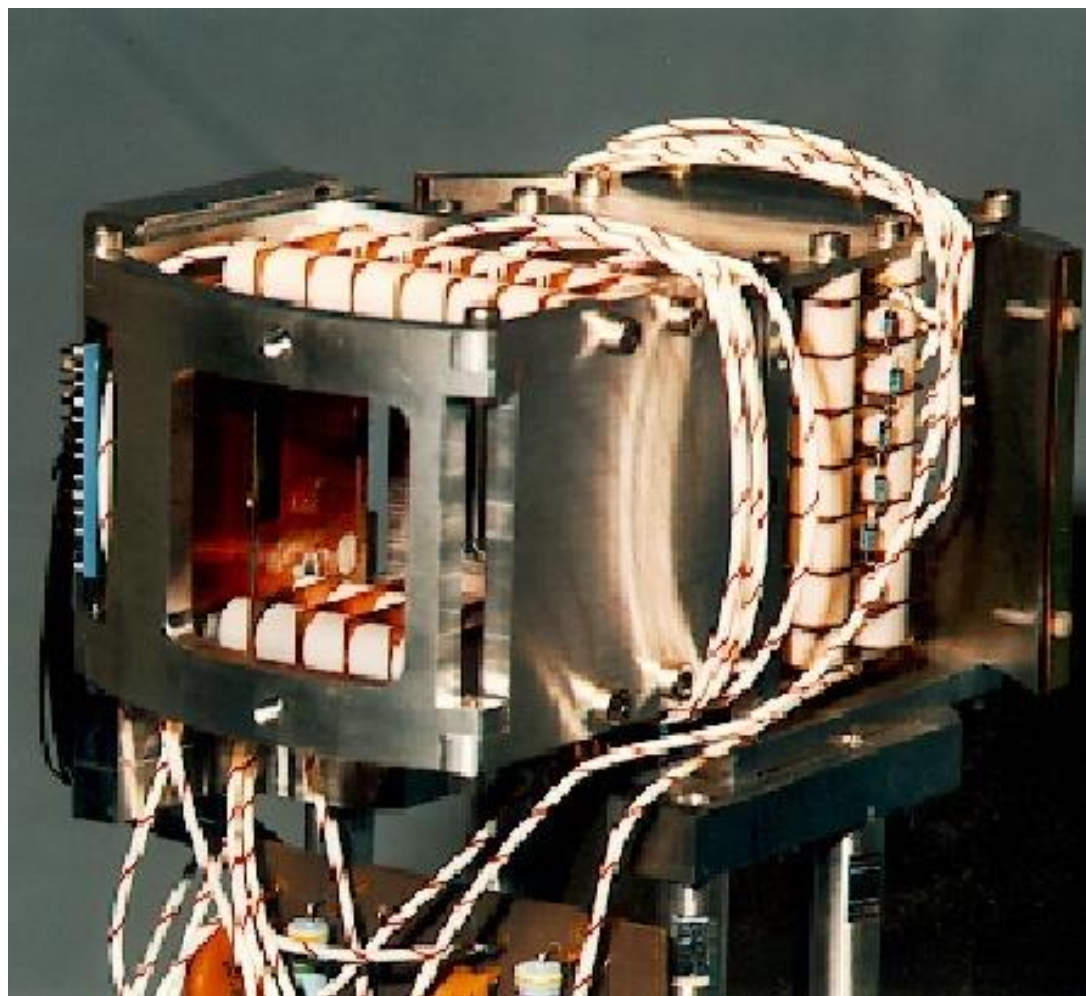
Profils transverses (mesures «non» destructives) Chambre à ionisation du gaz résiduel

Utilisation : mesure du profil transverse et de la position du centre de gravité du faisceau d'ions

Principe :
détection du courant électrique créé par la ionisation du gaz résiduel dans la chambre à vide et amplifié par une galette de microcanaux
(voir fiche suivante)

Performances :

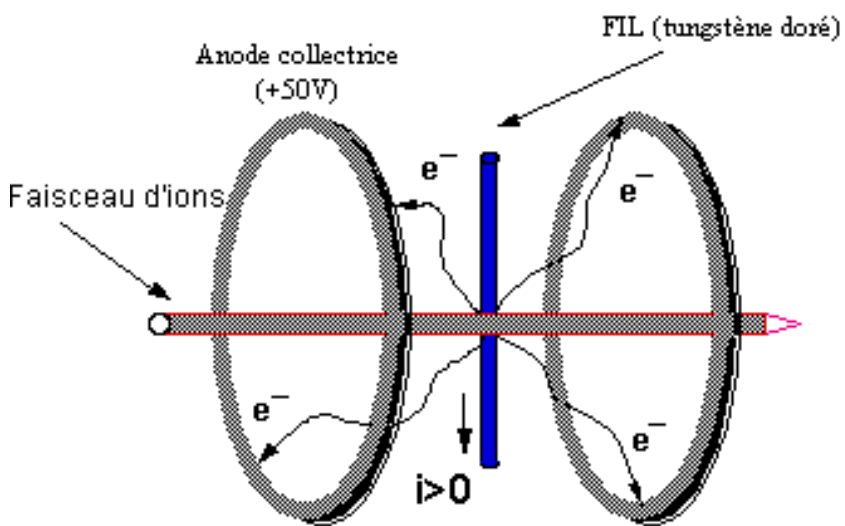
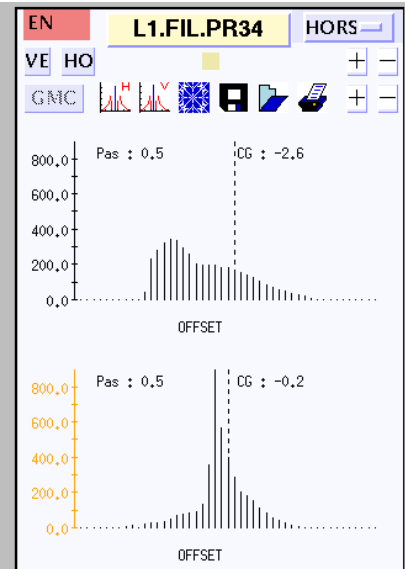
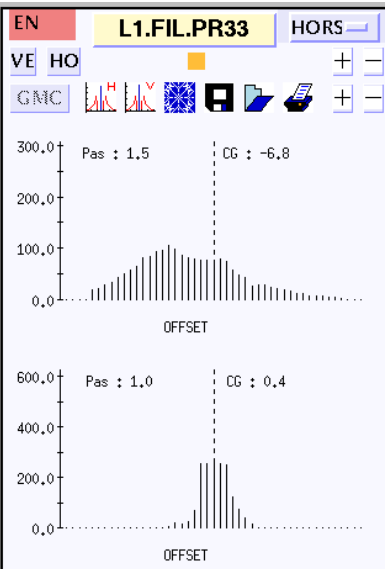
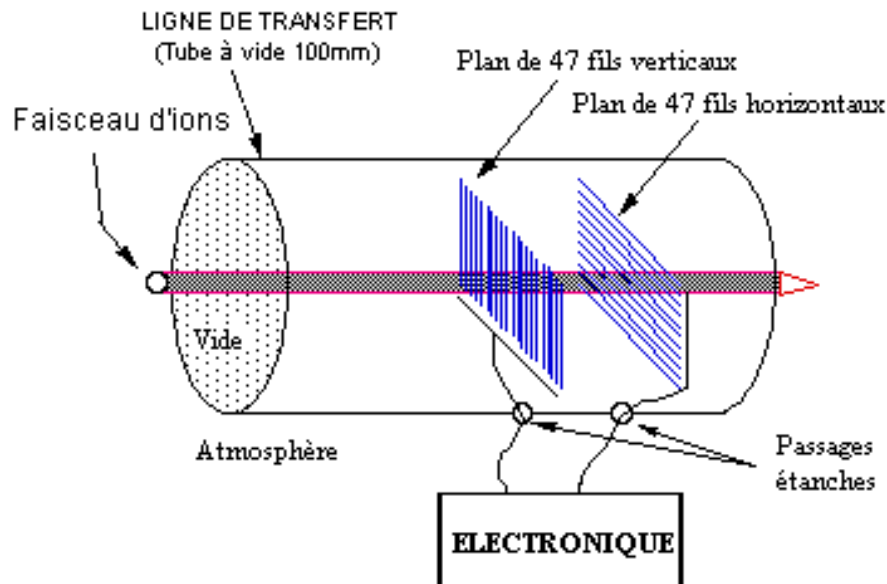
- précision en position : 0,5mm
- résolution : 1 mm
- intensité maximale du faisceau : $> 100 \mu\text{Ap}$
- intensité minimale : 1 nAp



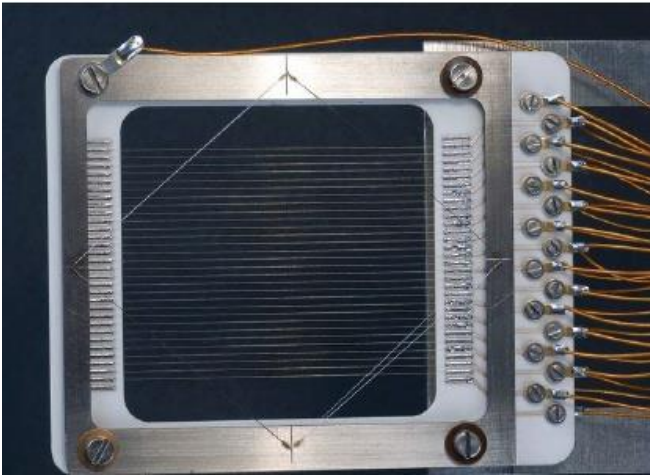
Mesure «semi» destructive des profils transverses: Profileur à émission secondaire

Principe :

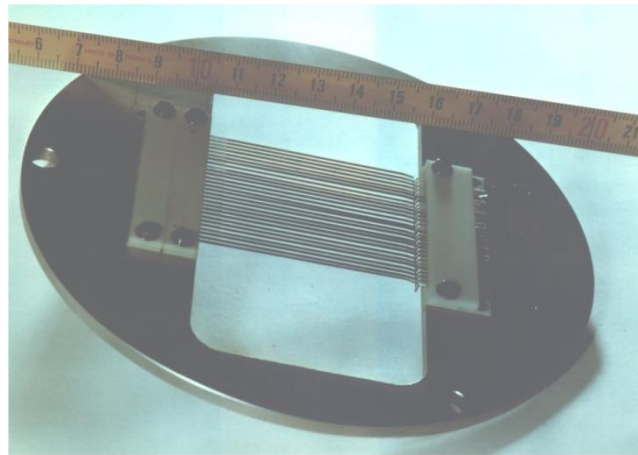
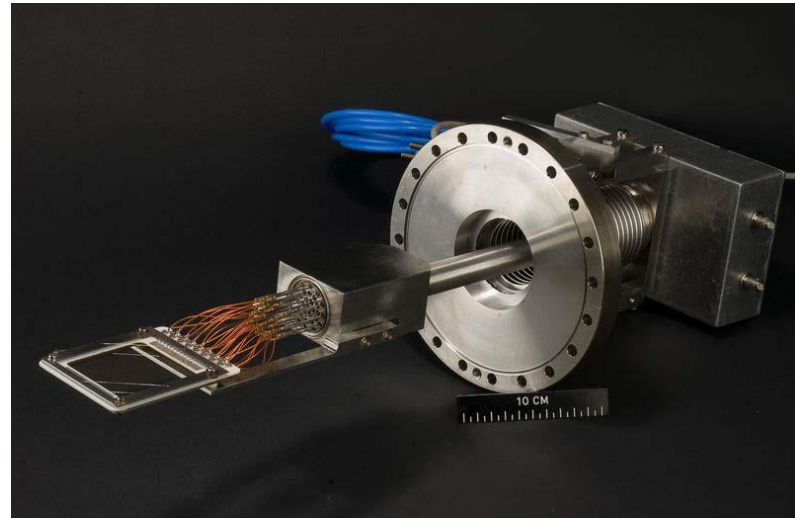
détection du courant électrique créé par les électrons secondaires émis par l'impact du faisceau sur des fils organisés en plans verticaux et horizontaux



Mesure «semi» destructive des profils transverses: Profileur à émission secondaire

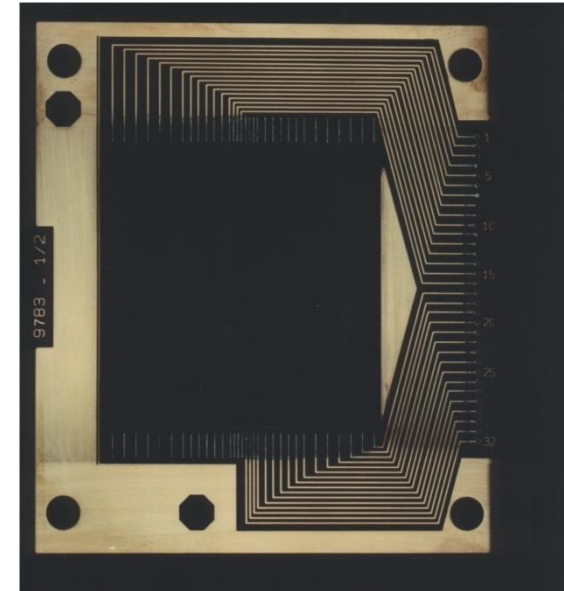


Profileur à émission secondaire CERN)



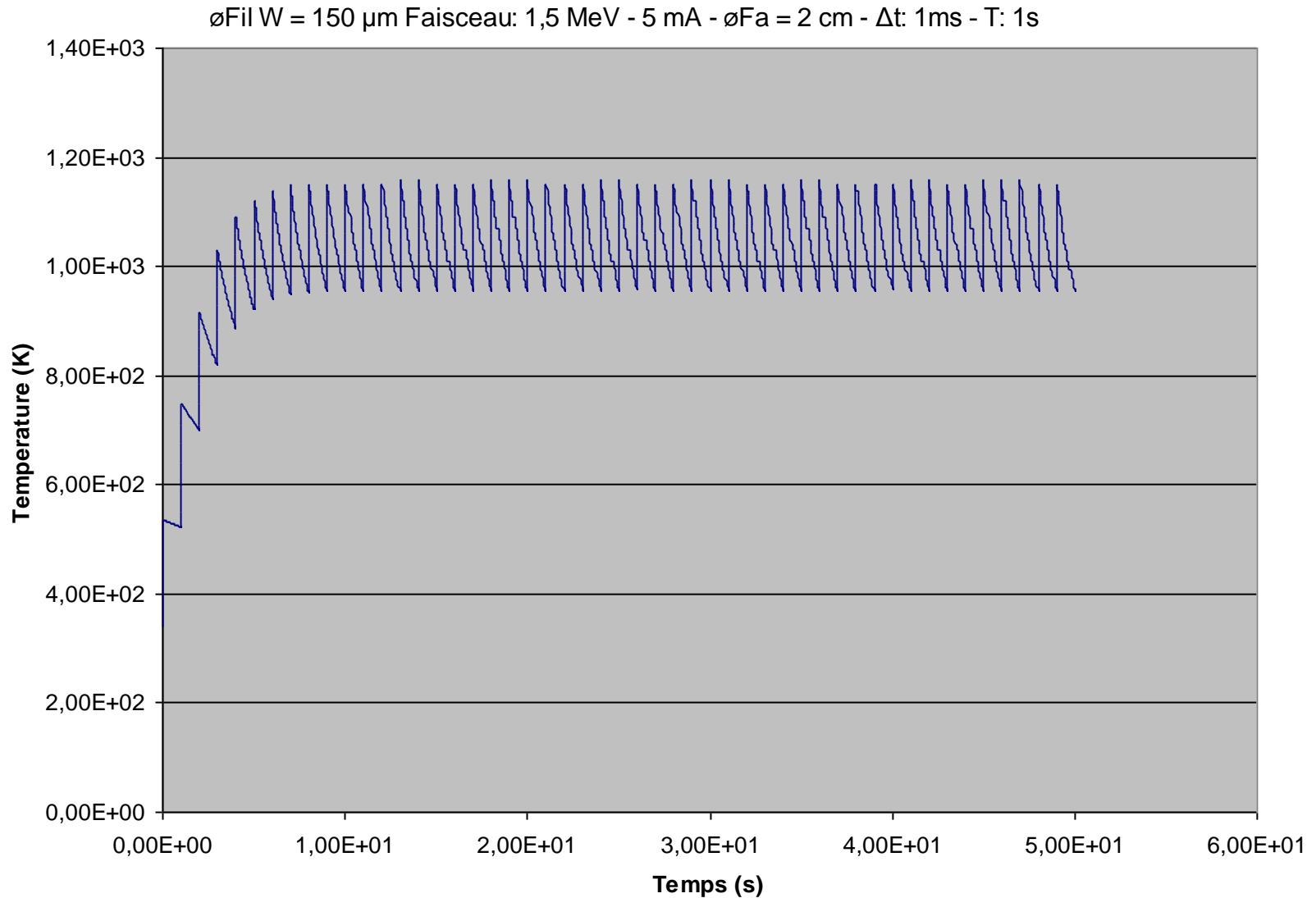
Capteur type « ruban »

Matériau nickel. Ep: 20 μm . L- ruban: 1mm
Support: alumine (bon isolement électrique)

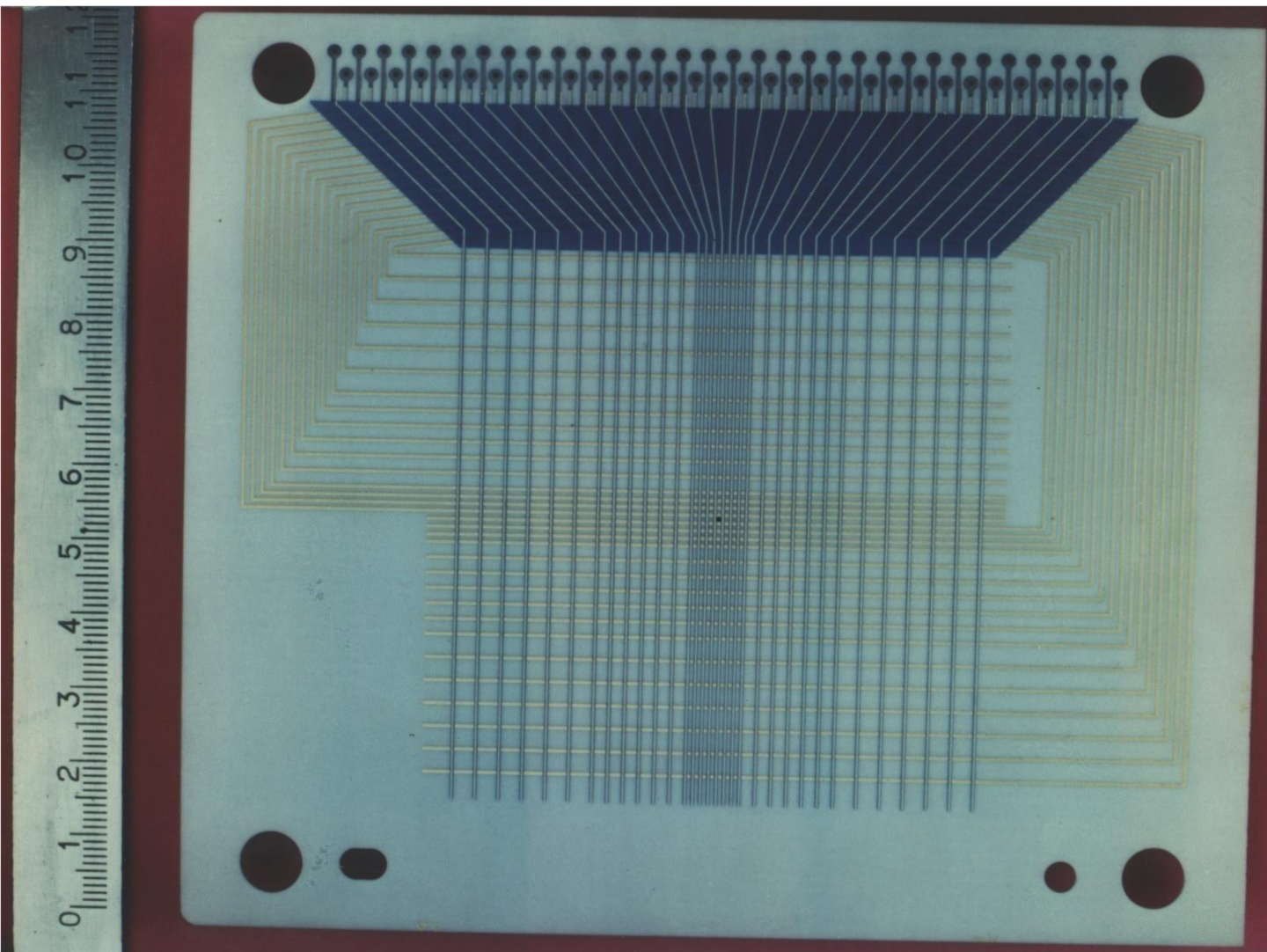


Capteurs à fils de tungstène:
Diamètre: 30 μm -Substrat: epoxy

Echauffement d'un fil de tungstène bombardé par un faisceau de protons



Mesure destructive des profils transverses



Capteur multicouches
Montage en ultravide

Grille H + grille V
Dépôt: or
Substrat: alumine
Épaisseur de 3mm
Pas: centre 0.5 mm
Milieu 1 mm
Bord 2 mm

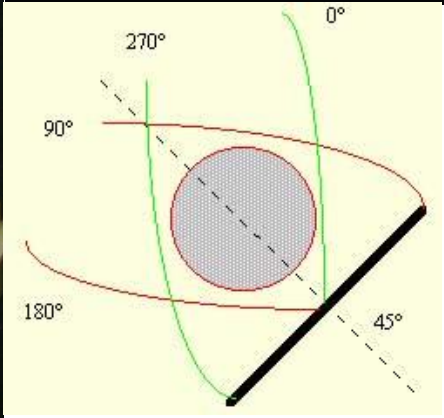
Mesure des profils transverses: Montage typique d'un profileur



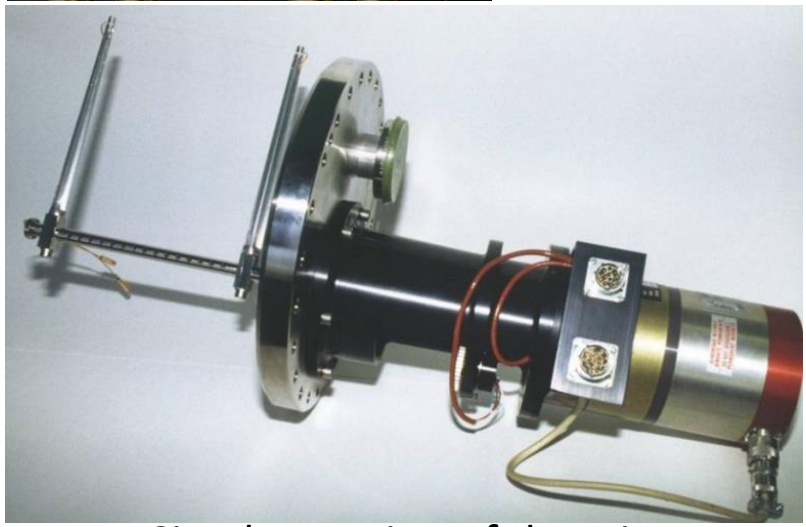
Profils transverses : Mesures «semi» interceptives : Wire scanners.....



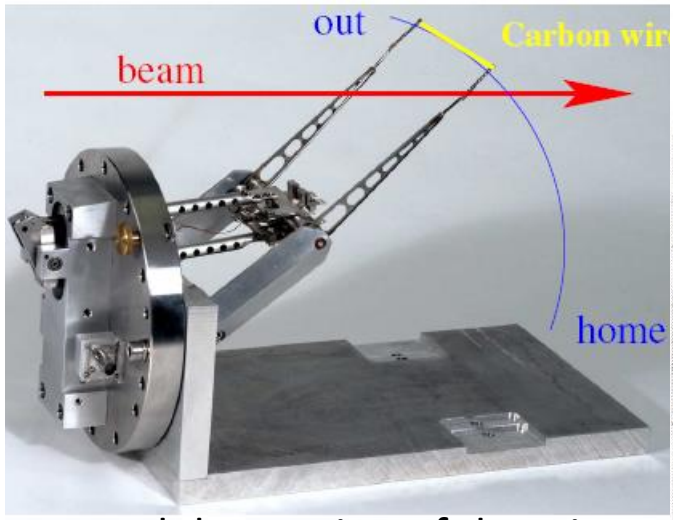
- ### Detection
- secondary particle shower detected outside the vacuum chamber using a scintillator/photo-multiplier assembly
 - Secondary emission current detected as for SEM grids
 - Correlating wire position with detected signal gives the beam profile



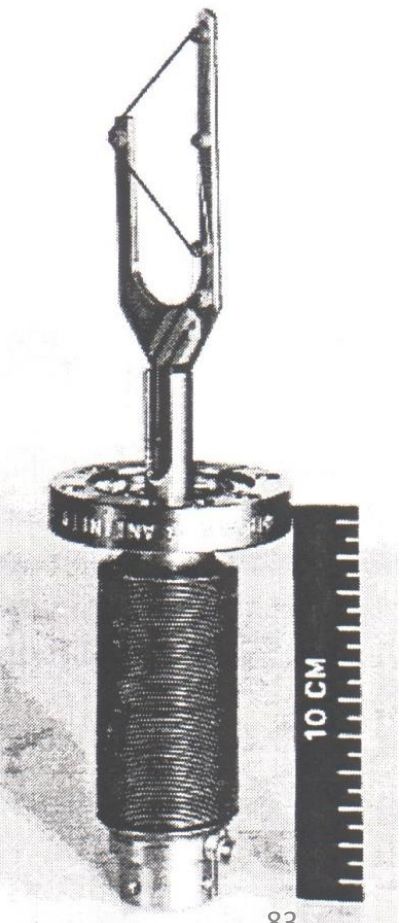
Linear translation of the wire



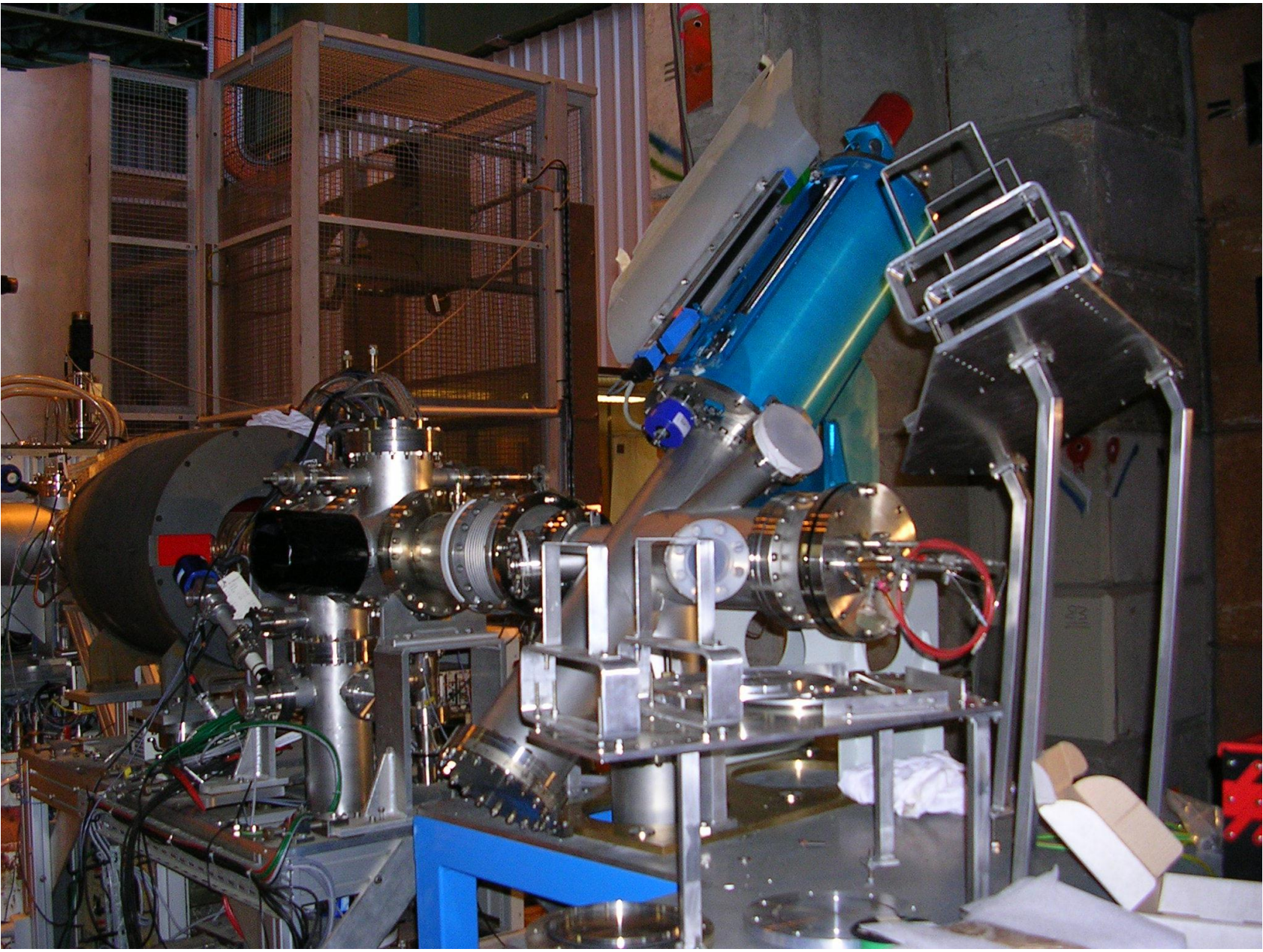
Circular motion of the wire



Pendular motion of the wire



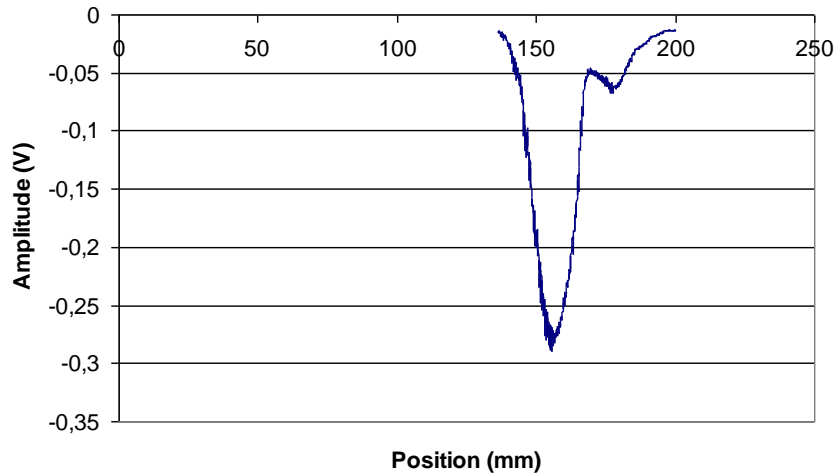
Profils transverses : Mesures «semi» interceptives : Wire scanners



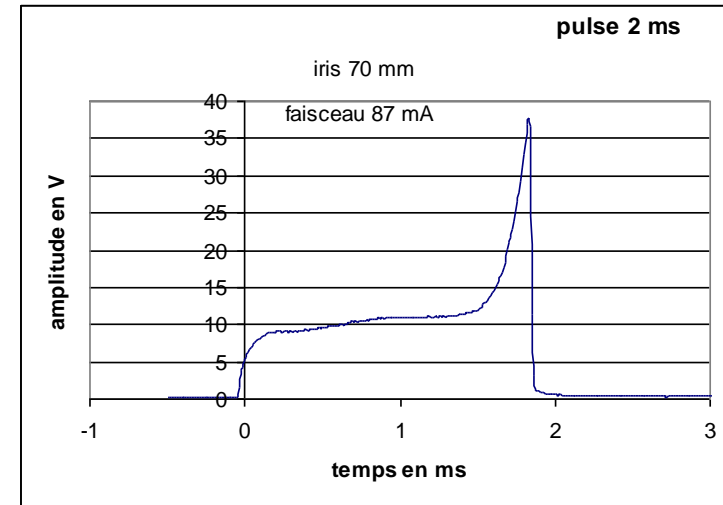
Mounting of SiC wire Diameter 33 microns



Profil vertical $I=36\text{mA}$ $I_{sol1}=I_{sol2}=110\text{A}$ $HT=+100\text{V}$
pas de $100\mu\text{m}$



- Durée du Pulse: 1 ms - Repetition : 1 s
- Courant faisceau protons: 36 mA
- Pas: $100\mu\text{m}$



Profil horizontal $I=36\text{ mA}$ $I_{sol1}=I_{sol2}=110\text{A}$ $HT=+100\text{V}$ pas
de $100\mu\text{m}$

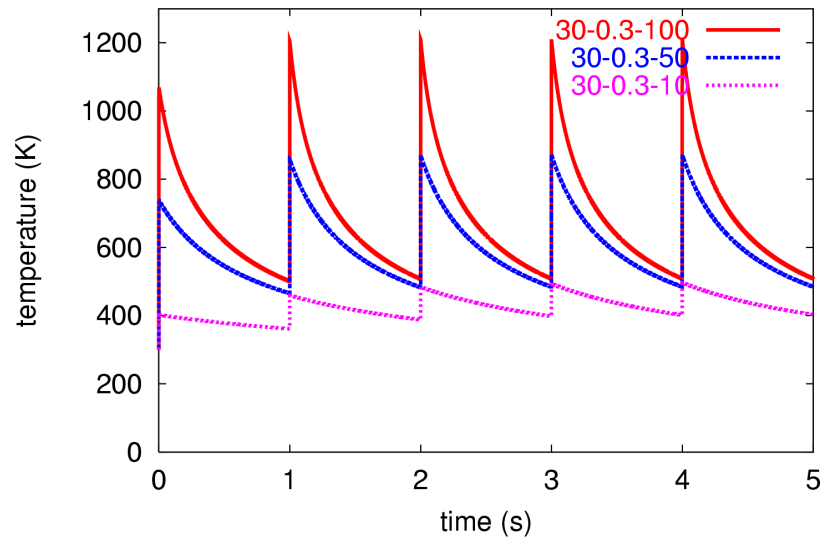
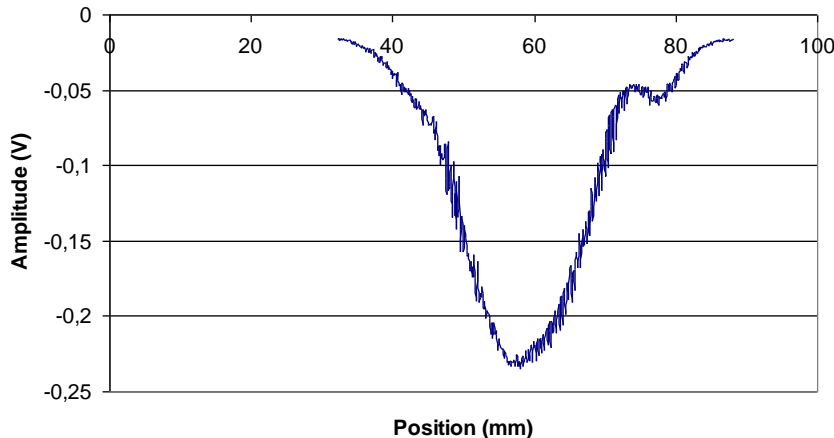
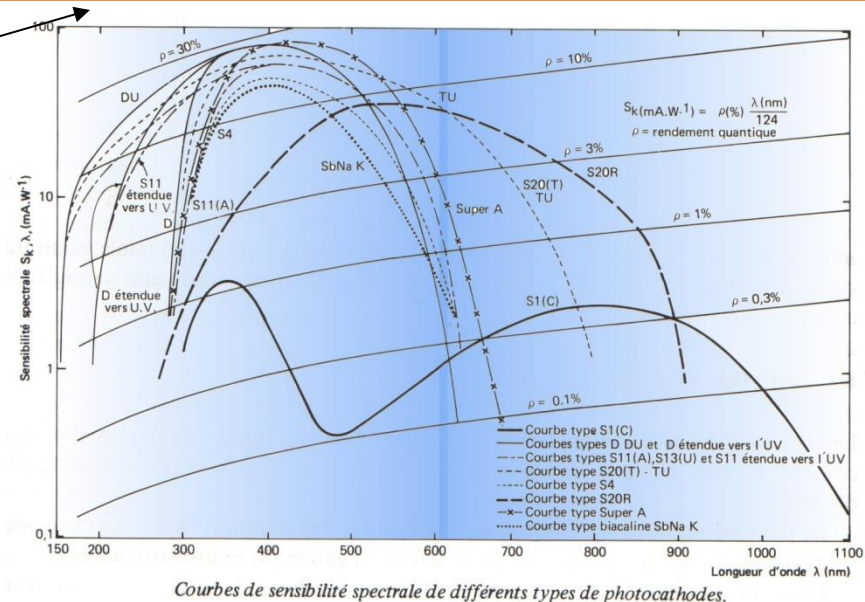
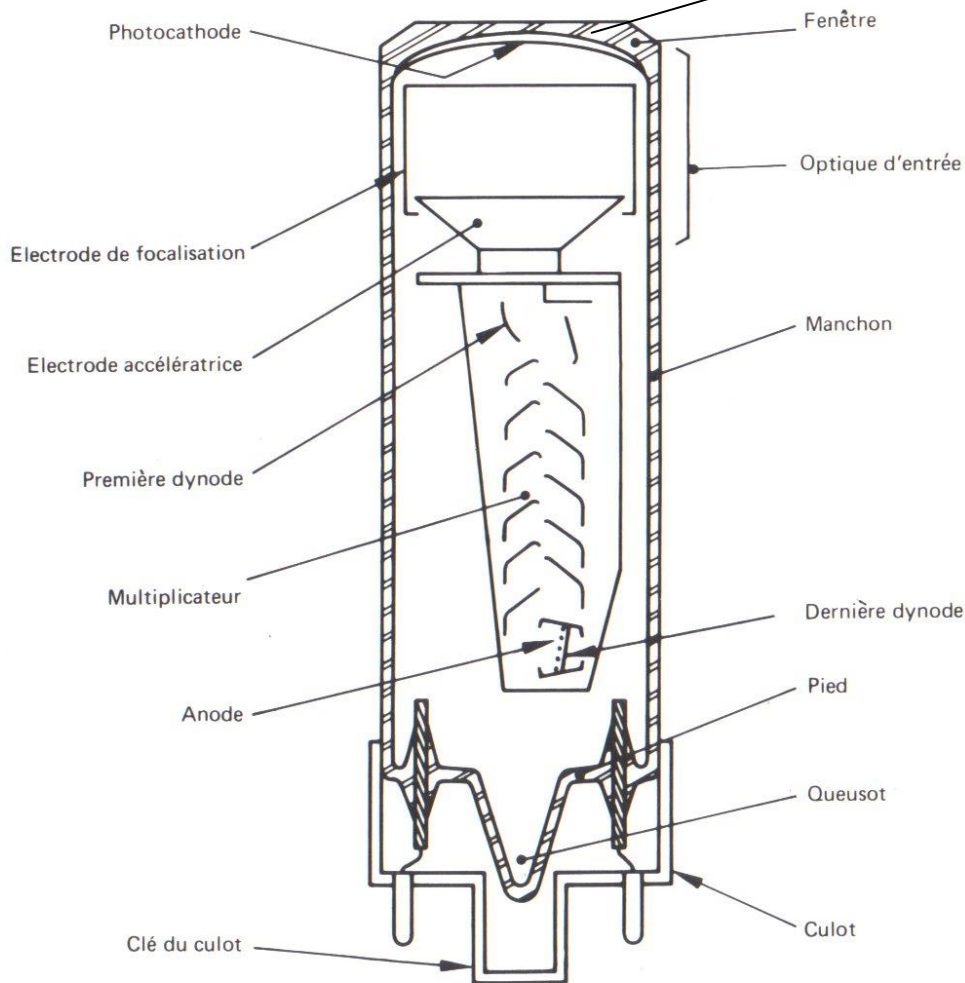
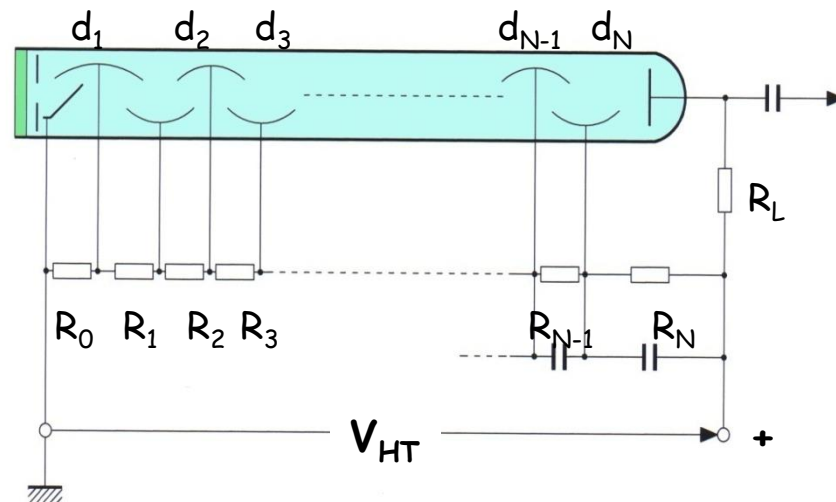


Schéma de principe d'un photo-multiplicateur

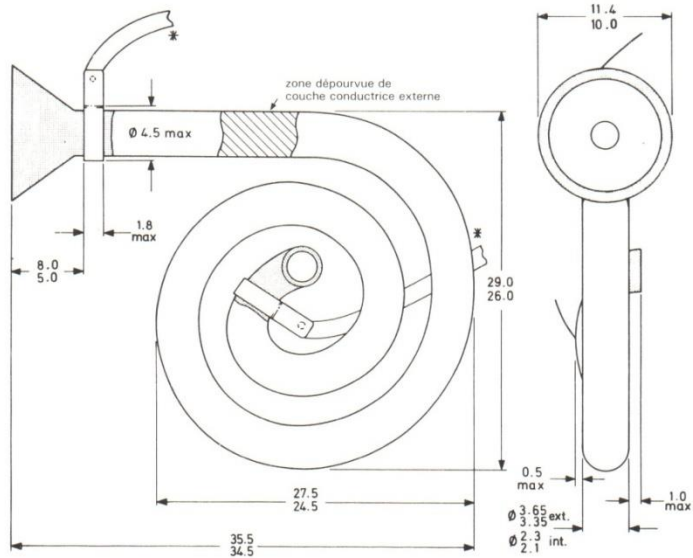


Photocathode: Conversion photon-électron



Amplification électronique: Alimentation H.T. des dynodes

AMPLIFICATEURS DE CHARGES ELECTRIQUES

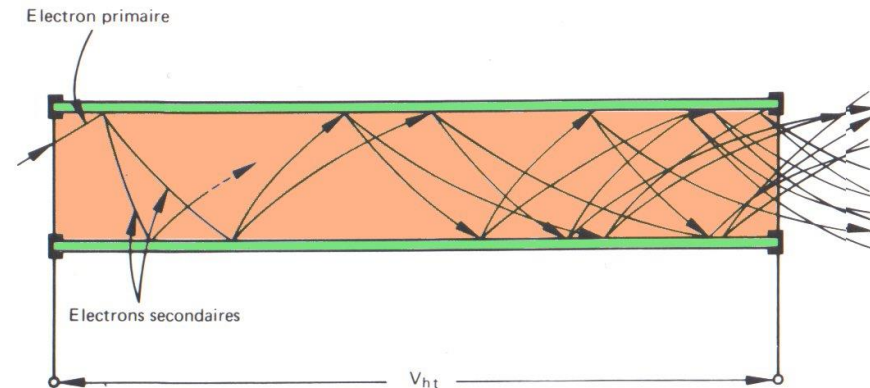


X719AL

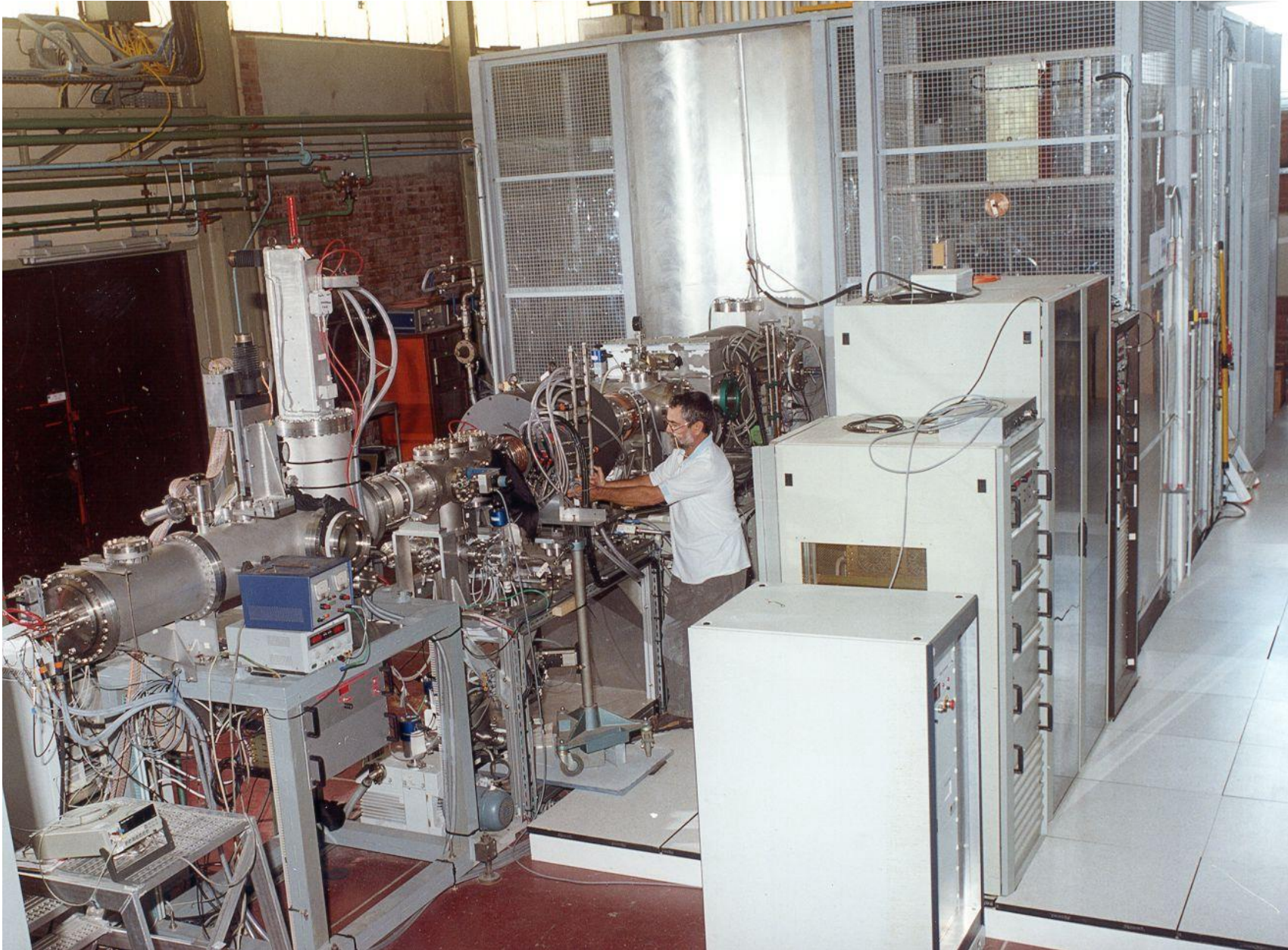
Principe physique de base: Emission secondaire

Galette de microcanaux canaux

- Epaisseur: 1 mm
- Gain $\sim 10^3$. Résolution 30 μm
- Montage en chevron: $10^6 - 100 \mu\text{m}$
- HT $\sim 1 \text{ kV}$



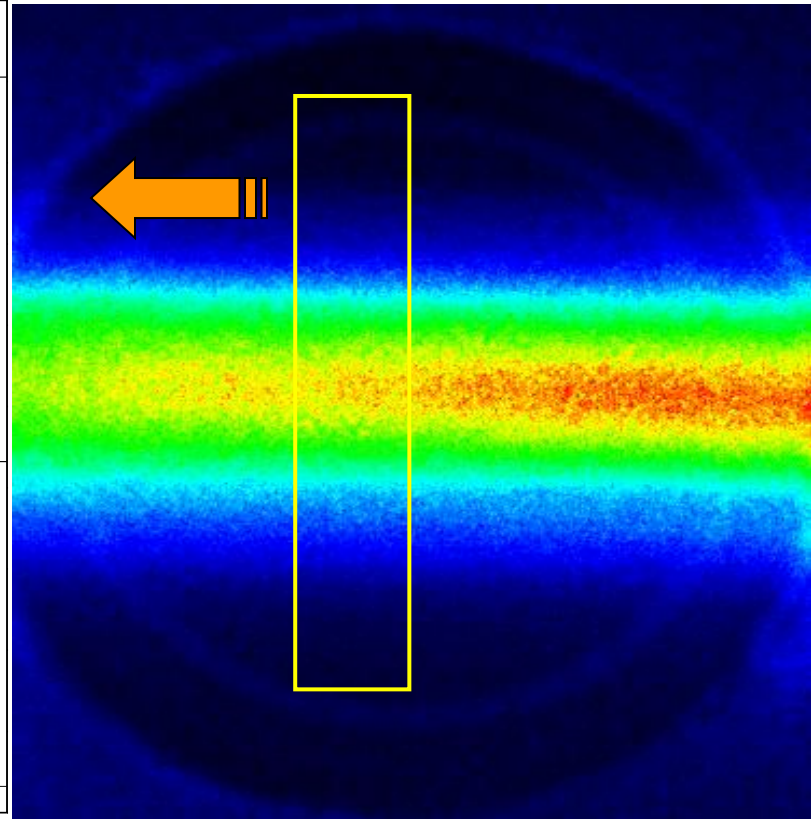
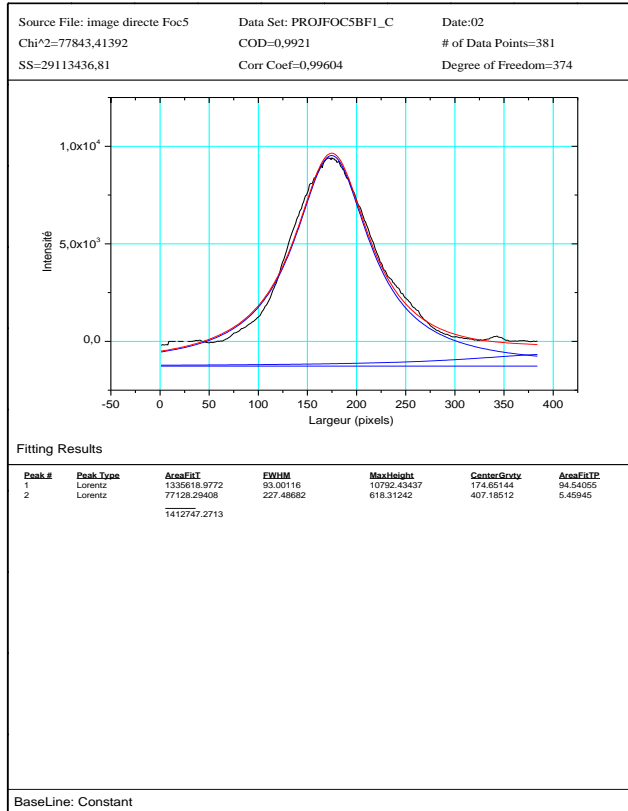
Mesure des profils transverses «non » interceptif: Luminescence



“Oeil”

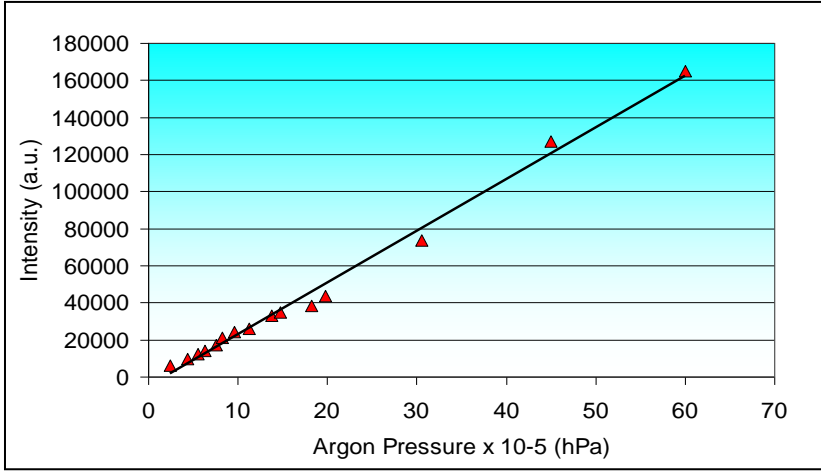
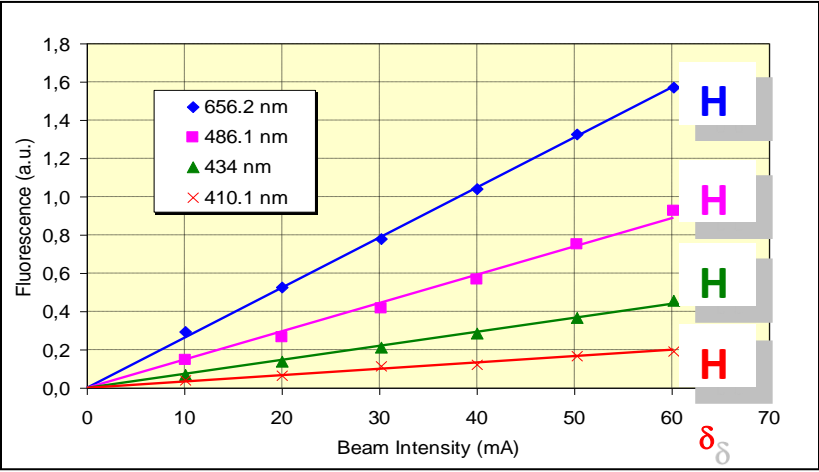
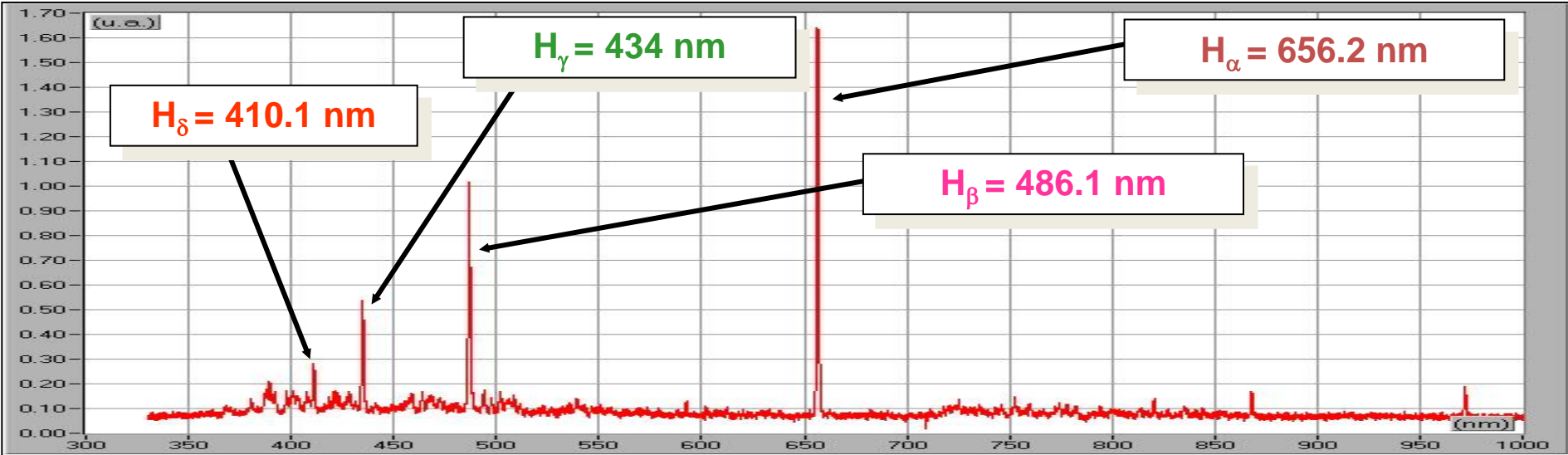
Interaction: faisceau proton / gaz résiduel (Hydrogène: $2 \cdot 10^{-3}$ Pa)

82 KeV 2×10^{-5} faisceau global



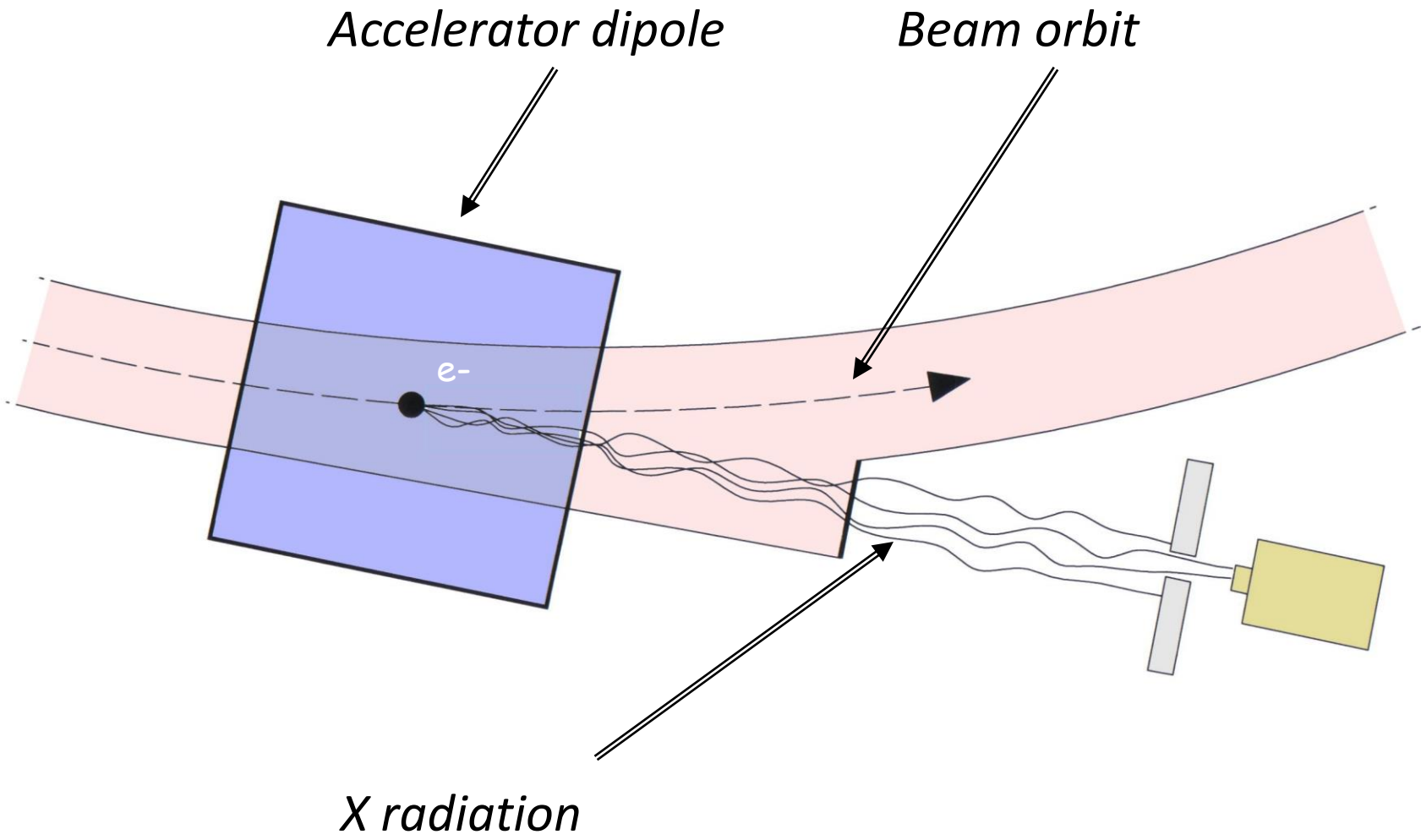
Beam transverse profile measurements: «Non » intercepting profiler: Luminescence

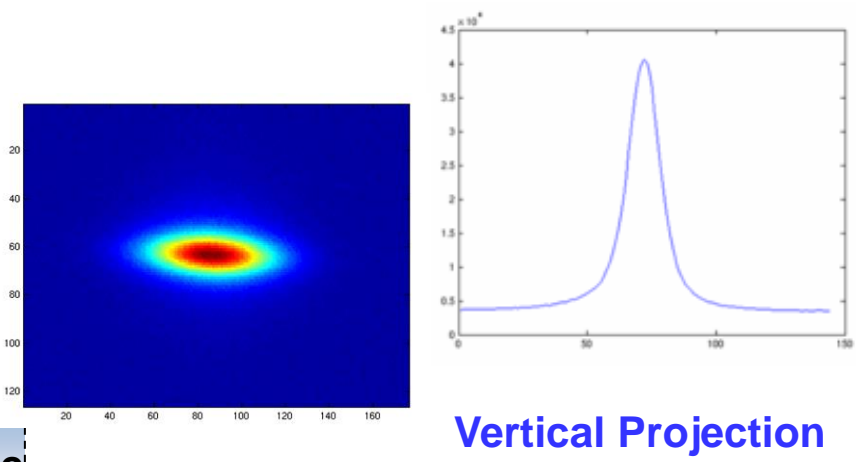
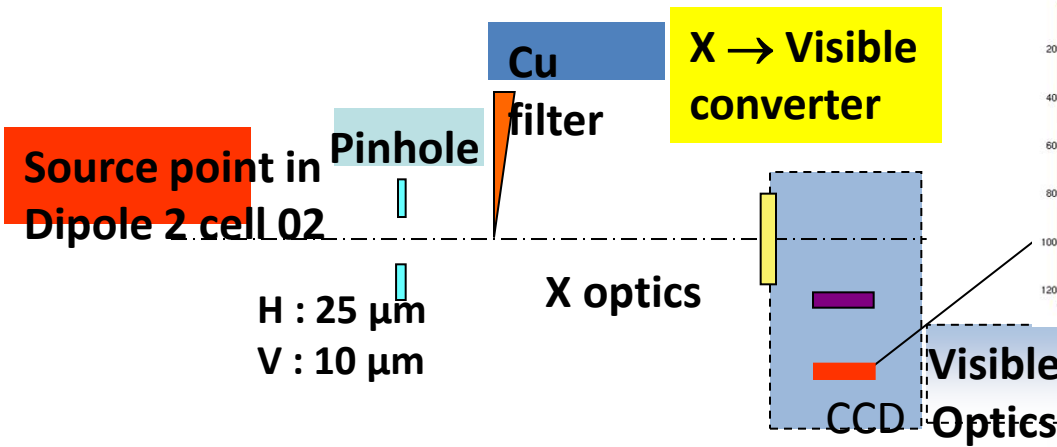
Spectroscopique analysis of the emitted light



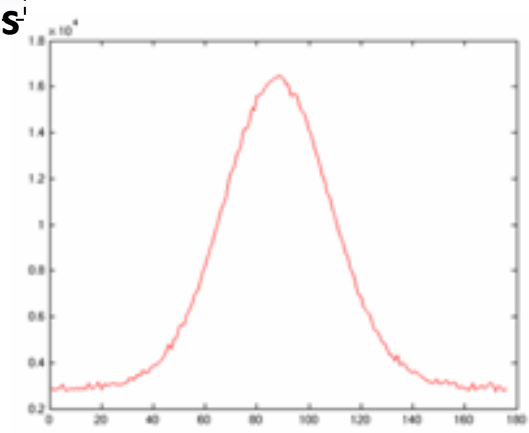
Mesure des profils transverses «non » interceptif: Rayonnement X

Synchrotron radiation





Vertical Projection



Resolution 5 μm rms :

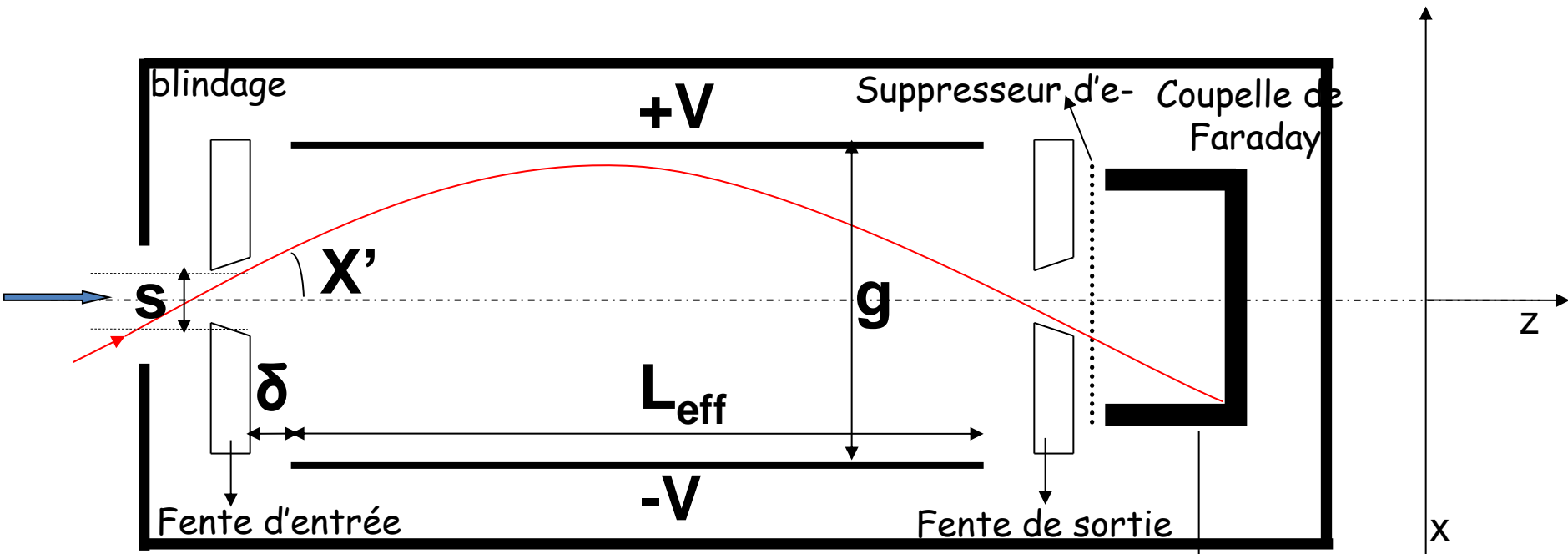
- trou de 10 μm
- 0.3 mm (Copper filter)
- includes 3.7 μm CCD resolution

9 μm rms V. beam size including 5 μm instrument resolution

$\epsilon_z < 5 \text{ pm.rad}$ ($\kappa < 0.13 \%$)

@200 mA with Fast Transverse Feedback turned on

Mesure de l'émittance transverse: Allison scanner

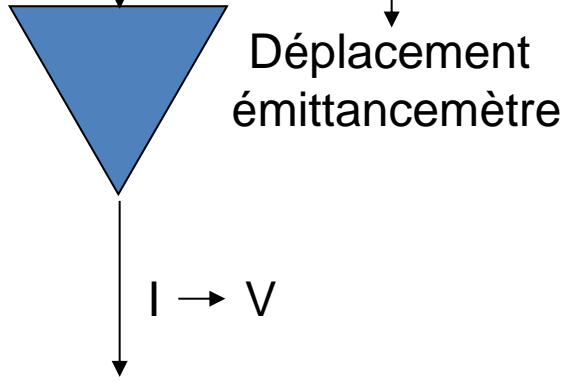


-Tension V nécessaire pour qu'un ion (charge q) d'énergie $q.U$ entrant avec un angle x' passe par la fente de sortie:

$$V = 2.U. x'.(g / L_{eff})$$

-Tension V_m nécessaire pour l'angle maximum x'_m analysable:

$$V_m = (8.g^2.U) / (D^2 - 4. \delta^2) \text{ pour } X'_m = (2.g) / (D + 2.\delta)$$



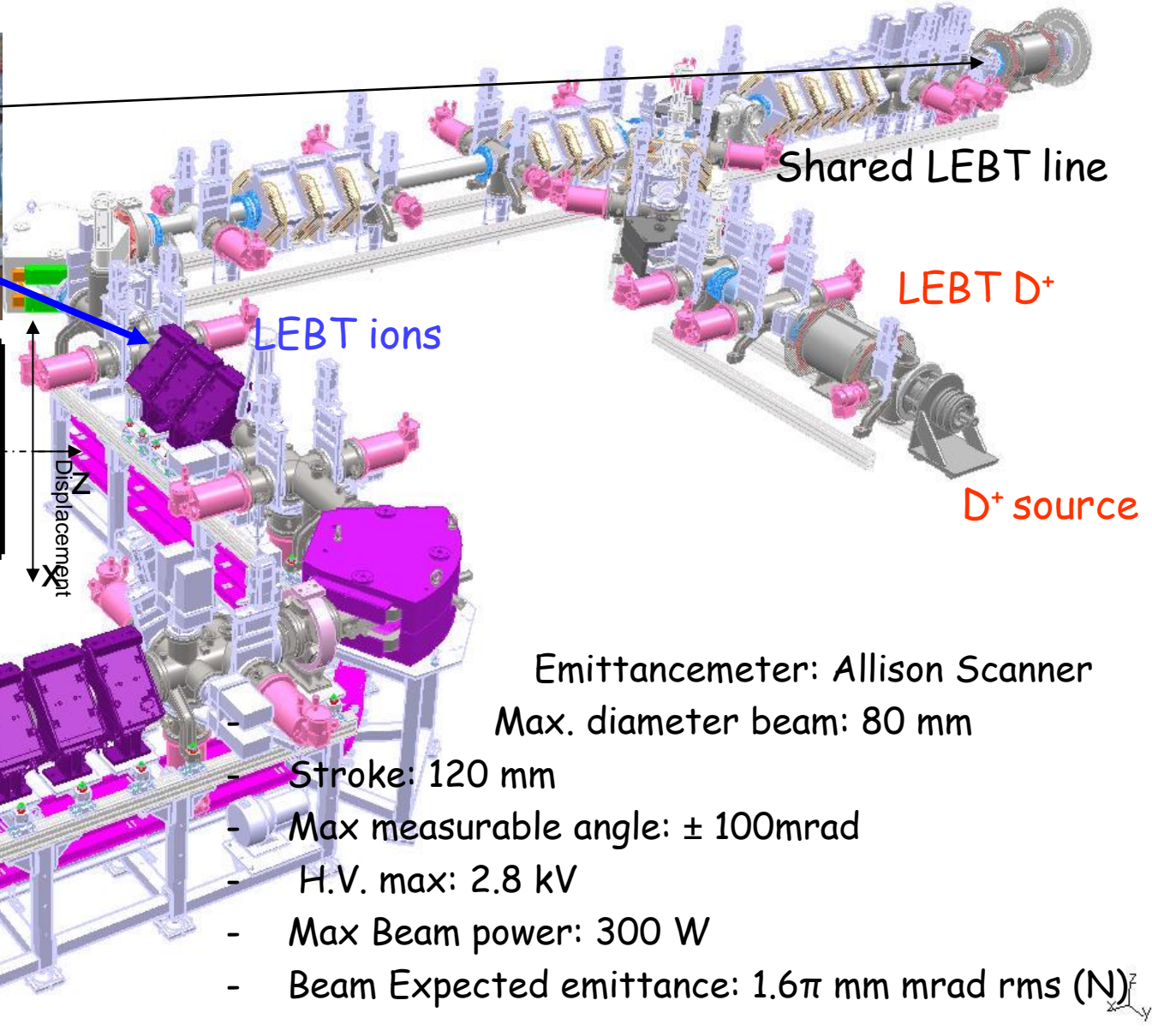
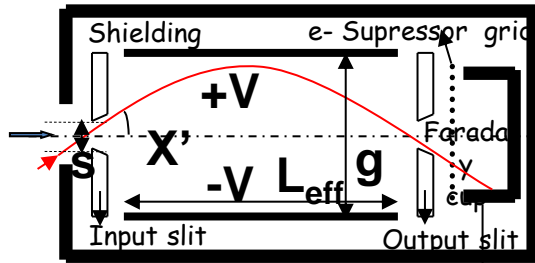
Emittancemètre type « ALLISON » développé pour SPIRAL2

Diamètre Maximum du faisceau : 80 mm
Course totale de la tête d'analyse : 120 mm
Angle maximum mesurable : ± 100 mm
HT max: 2800 V
Dynamique d'intensité :
- Ions $q/A = 1/3$, 60 keV: max:1 mA min: 1 μ A
- Deutons , 40 keV: max 5 mA min.: 100 μ A
Pression résiduelle de fonctionnement : 1×10^{-8} mbar.
Puissance thermique maximale dissipable (C.W): 300 W
Résolution spatiale: 0.1 mm.



Beam Transverse Emittance Measurements in the L.E.B.T.

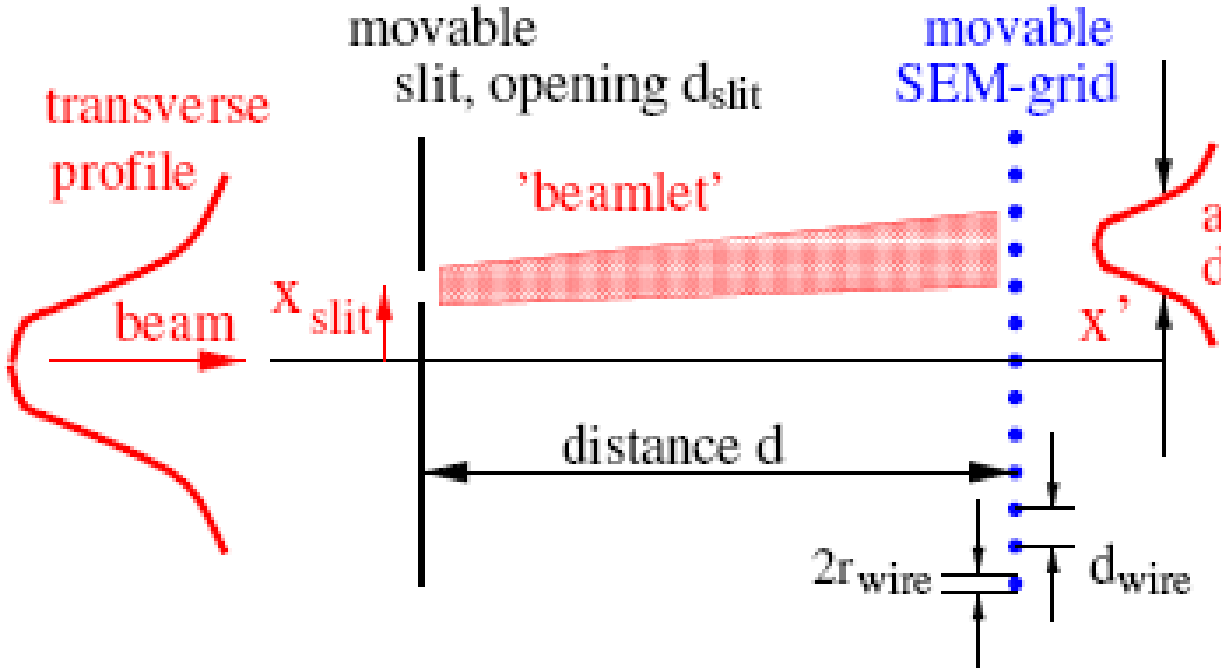
Emittancemeter H + V



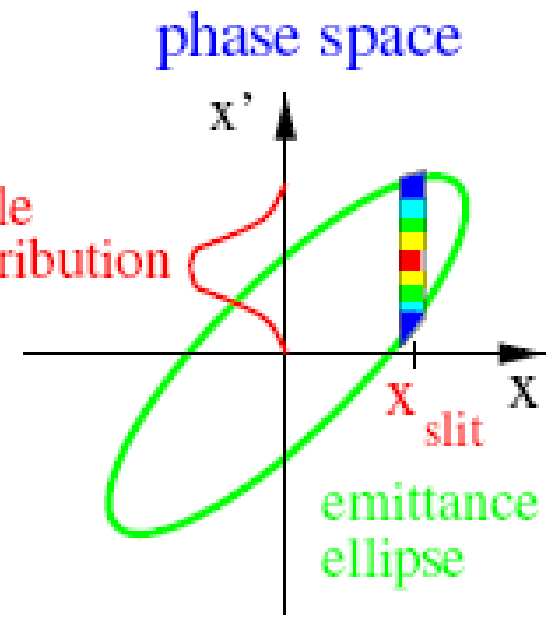
Ions Source
Q/A = 1/3

- Emittancemeter: Allison Scanner
- Max. diameter beam: 80 mm
- Stroke: 120 mm
- Max measurable angle: $\pm 100\text{mrad}$
- H.V. max: 2.8 kV
- Max Beam power: 300 W
- Beam Expected emittance: $1.6\pi \text{ mm mrad rms (N)}$

Hardware

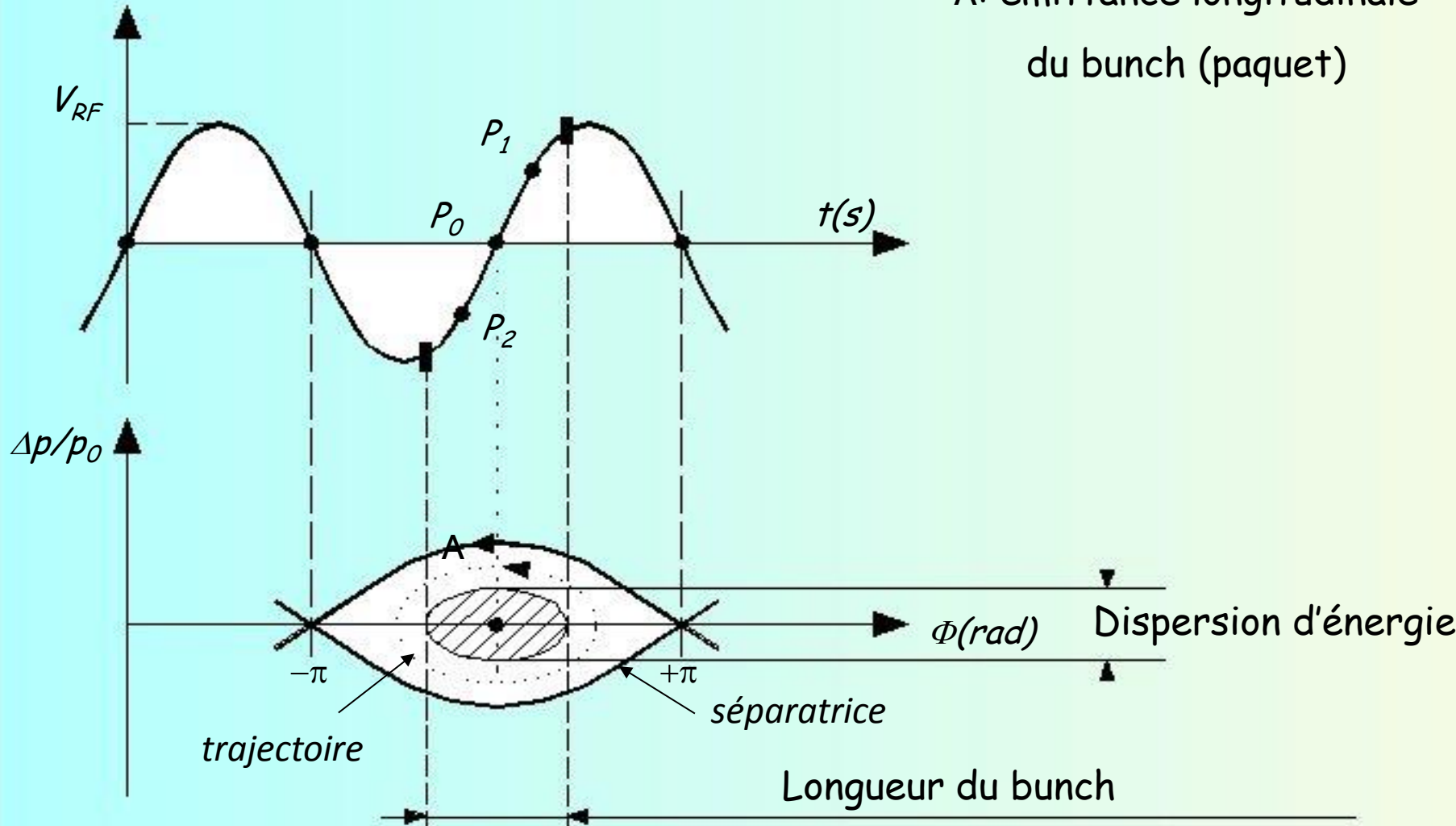


Analysis

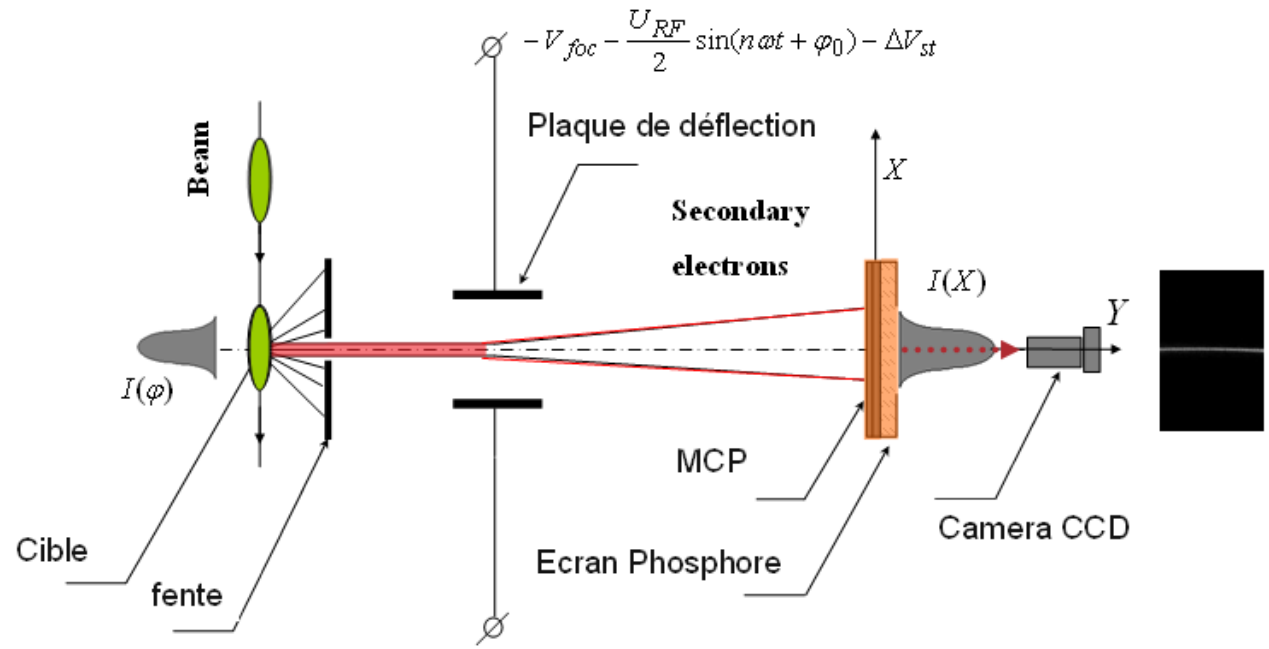


Mesures sur le faisceau - Emittance longitudinale

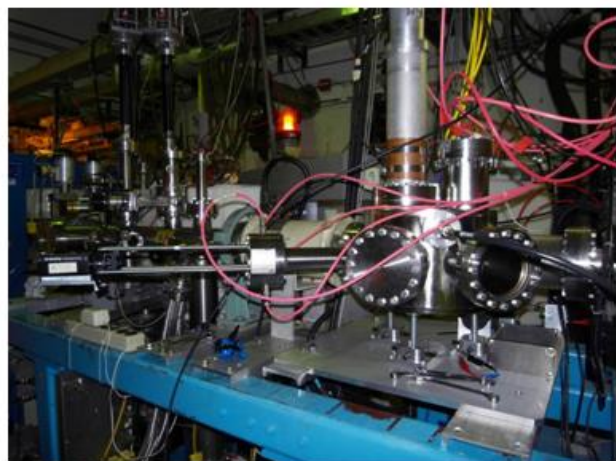
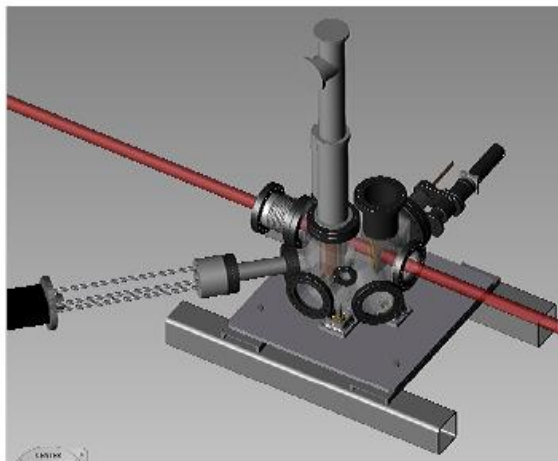
A: émittance longitudinale du bunch (paquet)



Longitudinal measurement : Bunch length (duration) measurement

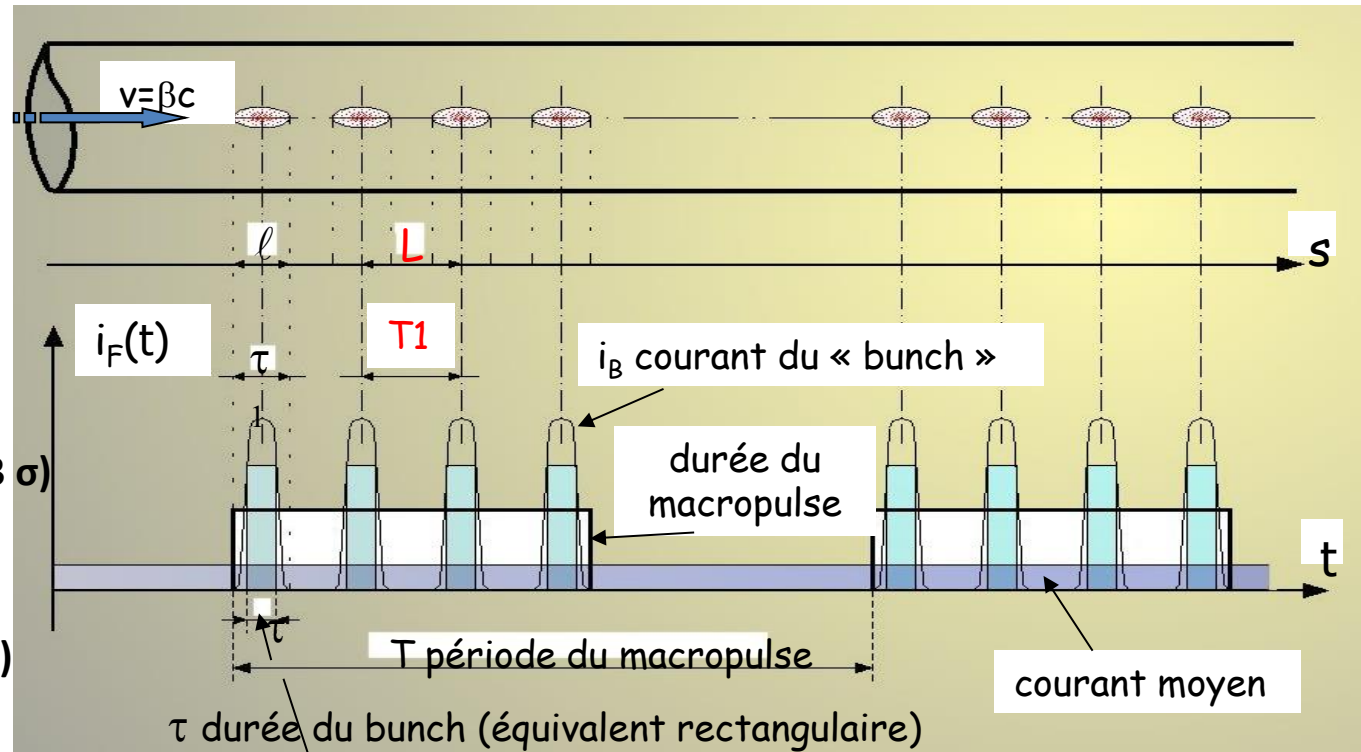


$$-V_{foc} + \frac{U_{RF}}{2} \sin(n\omega t + \varphi_0) + \Delta V_{st}$$



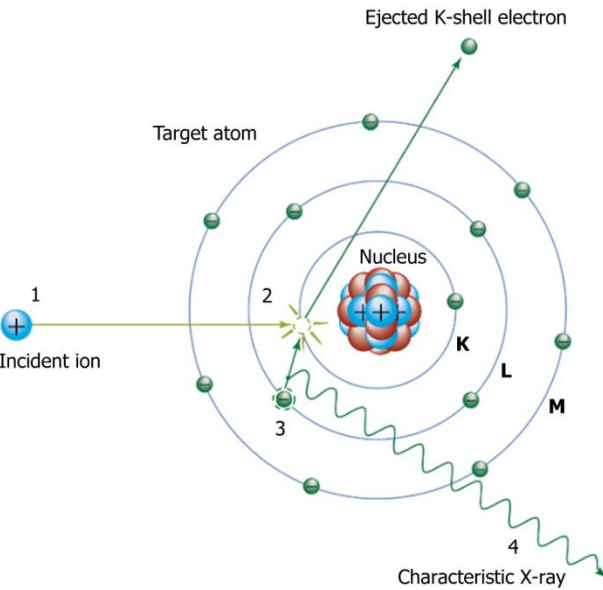
- **Caractéristiques temporelles du faisceau**

- $\beta \leq 0,04$
-
- $T1 = 11,36 \text{ ns}$
- $F1 = 88,0525 \text{ MHz}$
- Début Linac :
 - $\Delta\Phi \approx 60^\circ \Rightarrow \tau \approx 2 \text{ ns } (\pm 3 \sigma)$
- $\langle I \rangle \leq 5 \text{ mA } (p, d)$
- $\langle I \rangle \leq 1,5 \text{ mA } (Q/A = 1/3)$



- **Objectif: Mesure de l'extension en phase des bunch du faisceau en début de LINAC pour réaliser l'adaptation longitudinale du faisceau.**

Emission X d'un fil de tungstène par bombardement par les ions incidents

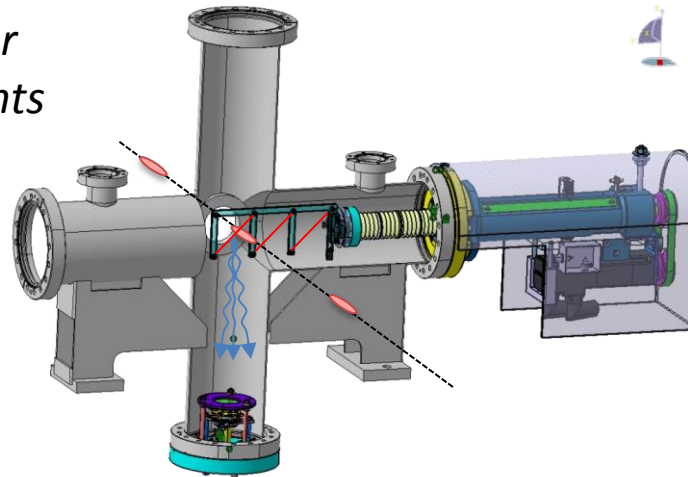


K Series

Lines	K α 1	K α 2	K β 1
Energy, keV	59,32	57,98	67,24

L Series

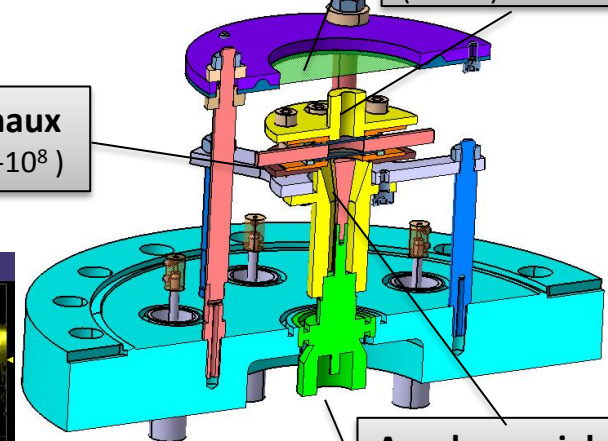
L α 1	L α 2	L β 1	L β 2	L γ 1
8,40	8,34	9,67	9,96	11,29



2 Galettes de μ canaux en chevron (gain: 10^7 - 10^8)

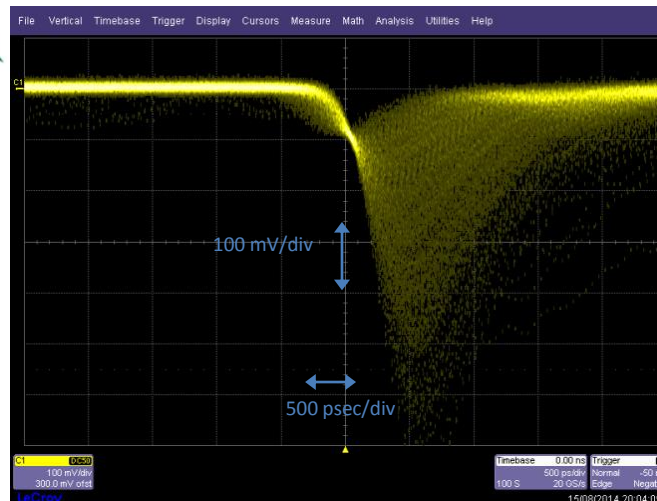
Feuille suppression d'ions

Collimateur X (cuivre)



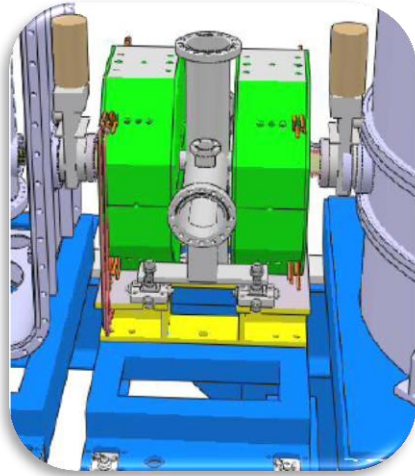
Anode coaxiale

Connecteur N Sortie (50 Ω)

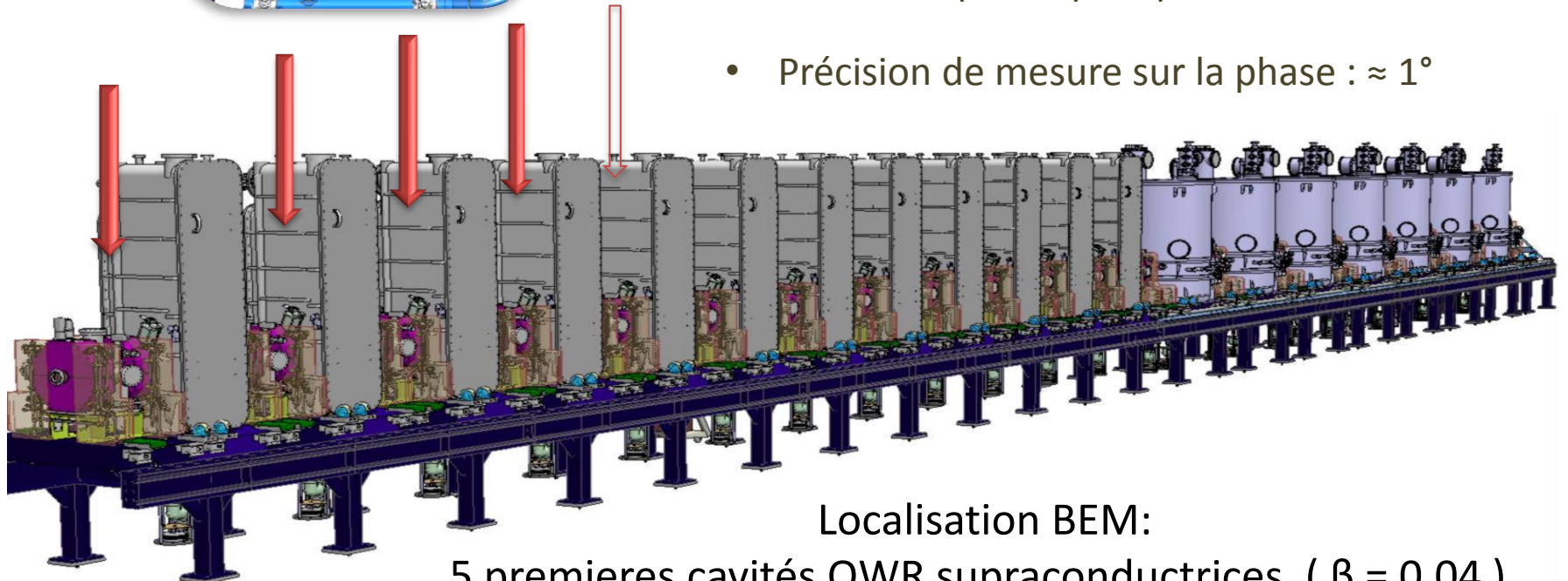


Signal de source:
55 Fe X à 5,9 keV

Mesure de longueur de bunch : Implantation dans SPIRAL2



- Détecteur “interceptif” peu perturbatif
- Encombrement compatible avec l’installation dans la boîte diagnostics
- Technologie compatible avec l’ultraviolet et la proximité des cavités supraconductrices
- Mesure la plus rapide possible
- Précision de mesure sur la phase : $\approx 1^\circ$

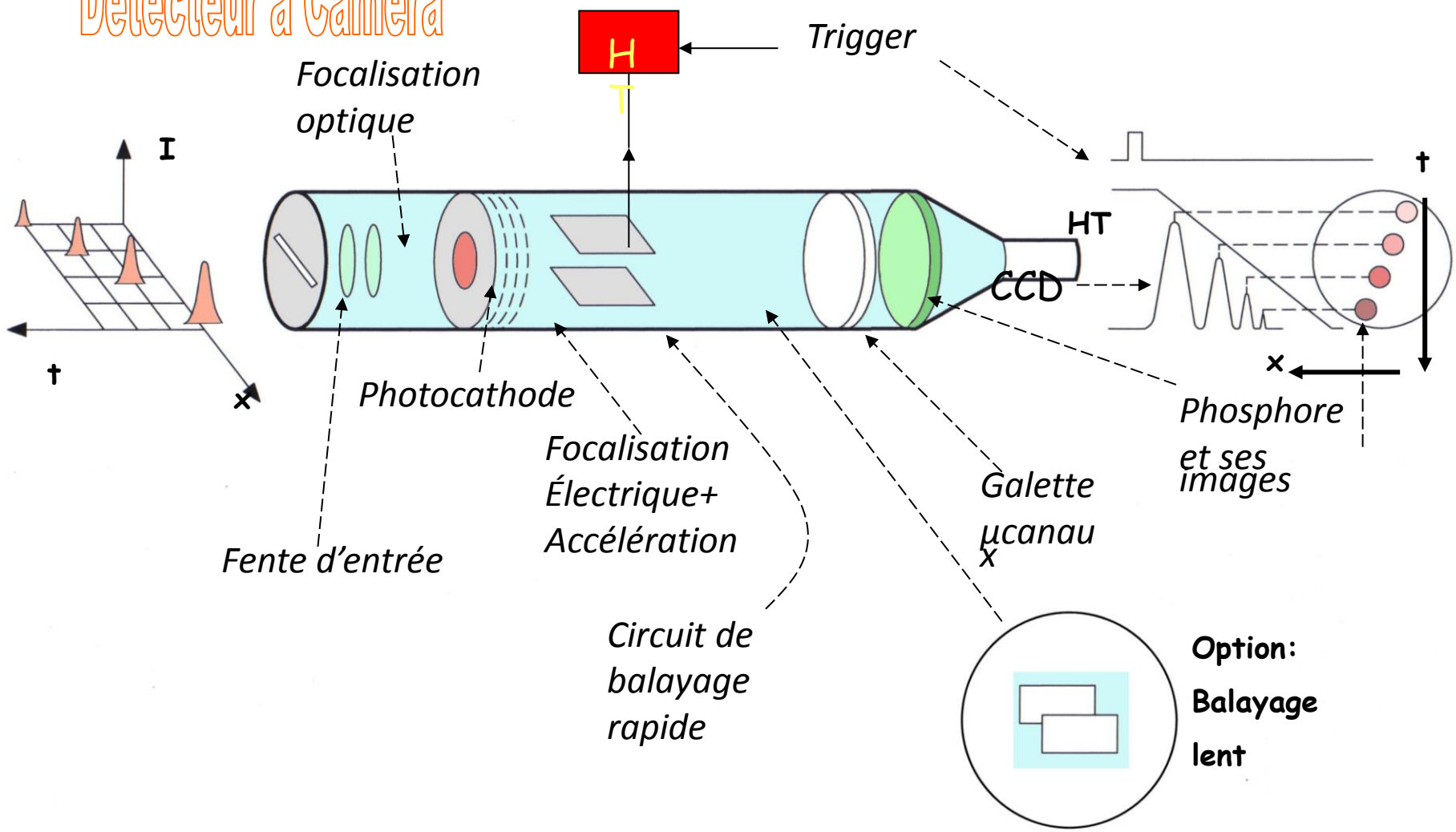


Localisation BEM:

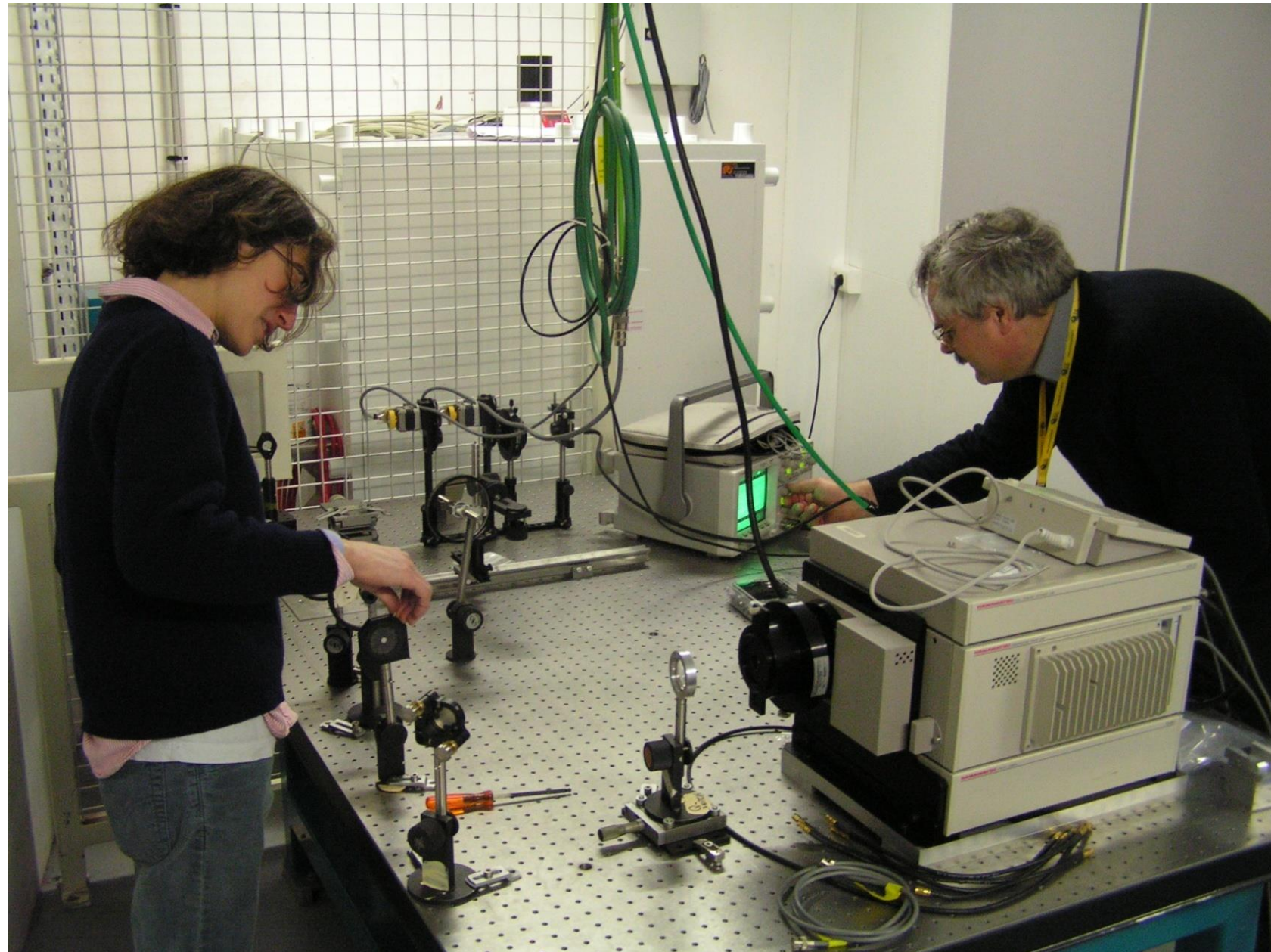
5 premières cavités QWR supraconductrices. ($\beta = 0,04$)

Principe d'une Caméra à Balayage de Fente

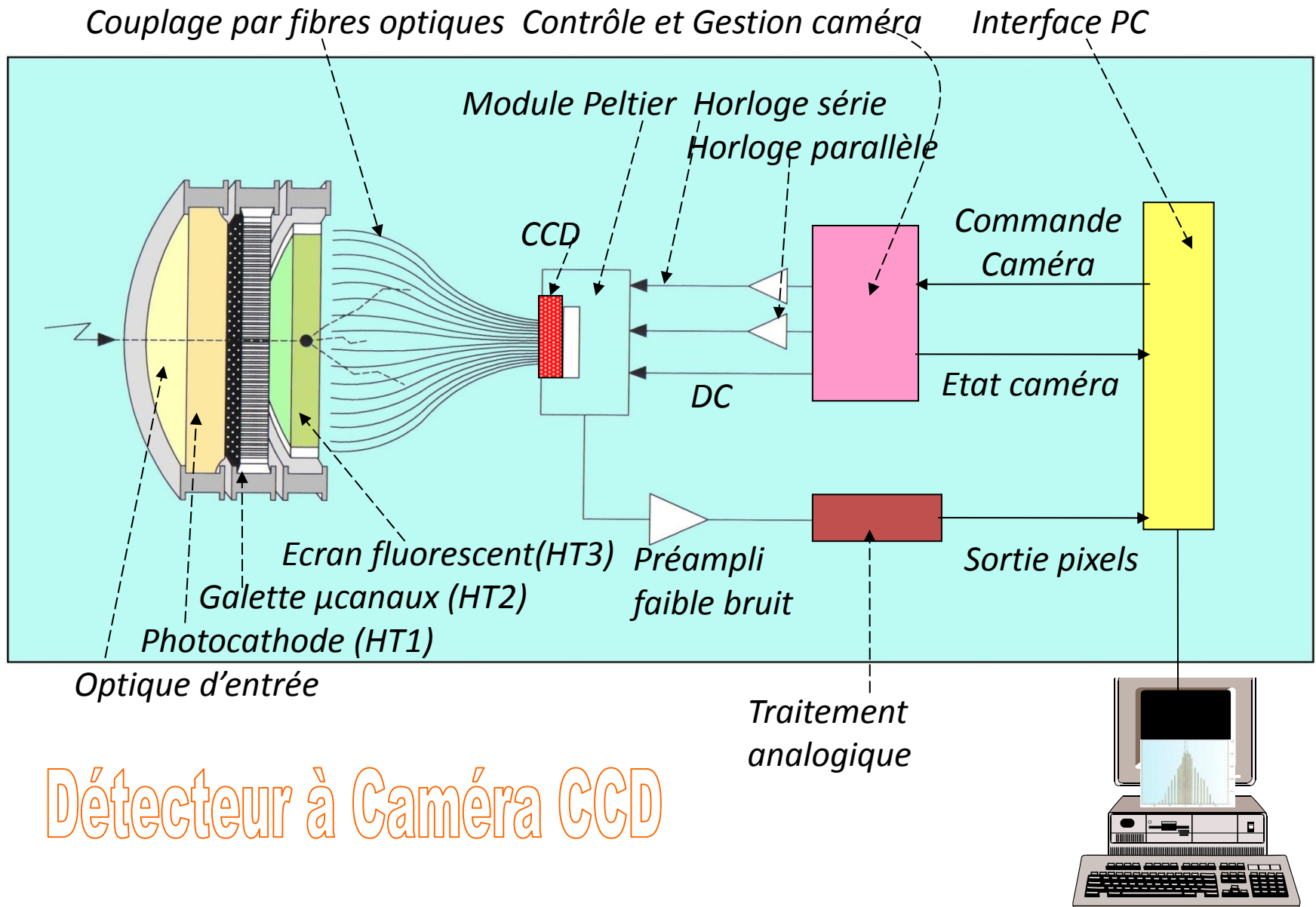
Détecteur à Caméra



Caméra à Balayage de Fente



Principe d'une Caméra CCD Intensifiée refroidie



ROLE DES DETECTEURS DE PERTES DE FAISCEAU

- Couplage au dispositif de sécurité de l'accélérateur (déclenchement des alarmes)
- Aide à la protection contre l'activation à long terme des structures de l'accélérateur
- Par conséquent: Aide au réglage de l'accélérateur; optimisation faisceau

EFFETS DES RADIATIONS IONISANTES

- Systèmes mécaniques: échauffement excessif, détérioration des propriétés physiques
- Systèmes cryogéniques: apport excessif de calories => Quench
- Systèmes optiques: détérioration de la transmission de la lumière (fibres optiques, verres..)
- Systèmes électroniques: dysfonctionnement; détérioration définitive
- Systèmes de mesure: augmentation notoire du bruit de fond de la mesure
- Sur le personnel: exposition lors des périodes de réparation ou de maintenance (neutrons)

SOURCE DE RADIATIONS IONISANTES

- Erreurs de focalisation ou d'alignement du faisceau. Création de «Halo» autour du faisceau
- Production de rayons X par les dispositifs d'accélération
- Diagnostics interceptifs, objets «étrangers» sur le trajet du faisceau, strippers de faisceau
- Radiation synchrotron
- Scattering sur le gaz résiduel

PRINCIPE DE LA DETECTION

Mesure sur un intervalle de temps déterminé. Localisation du nombre de particules perdues

TYPES DE PERTE DE FAISCEAU

- Pertes rapides de faisceau: Détection du niveau de perte nécessaire. En général localisation des pertes non nécessaires (cause: alimentation, pompe à vide , kicker..)
- Pertes lentes de faisceau:
Détecteur placé à l'extérieur du tube à vide: Utilisation des principes physiques déjà vus
Autre méthode: Mesure différentielle entre les diagnostics de faisceau de l'accélérateur.

Moniteurs de perte de faisceau

PLICs: PANOFSKY LONG IONISATION CHAMBERS

SLAC 1966:

- Câble coaxial RG-319 /U rempli avec Ar/CO₂, longueur: 3.5 km, monté à 2 m du tube à vide
- Mesure de position: Mesure de l'intervalle de temps entre le pulse direct à une extrémité et le pulse réfléchi à l'autre. Résolution initiale: 30 ns (~ 8m)
- Très nombreuses améliorations pour améliorer la résolution: SLC, AGS, CERN..

SHORT IONISATION CHAMBERS

- Chambre à ionisation (remplissage: air) réparties le long de la structure accélératrice: CERN PS, TEVATRON..

COMPTEUR A SCINTILLATION

- Scintillateur plastique couplé à un P.M. (Utilisation temporaire)
- LAMPF « Paint can » : Plastique remplacé par un liquide (huile) dans un réservoir de 500 cm³ (Temps de montée : 10ns, dynamique: 10⁵). Sensibilité meilleure que les chambres à ionisation mais technologie liée à l'utilisation des P.M.: alimentations stabilisées , intercalibration des moniteurs nécessaire.

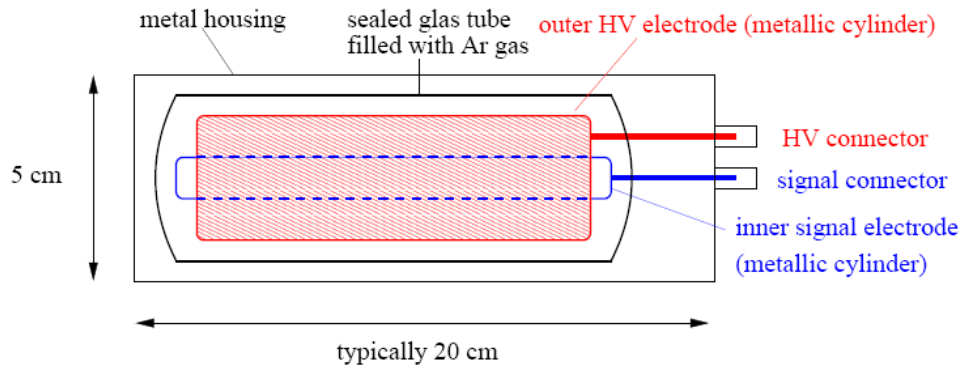
CRYOGENIC MICROCALORIMETERS

- LEP/ CERN 1992: Un thermomètre (résistance carbone) mesure l'élévation de température d'un « mini-cryostat » contenant de l'hélium liquide chauffé par les pertes de faisceau (pas de création de charges électriques par les particules perdues)

Exemples de moniteurs de perte de faisceau

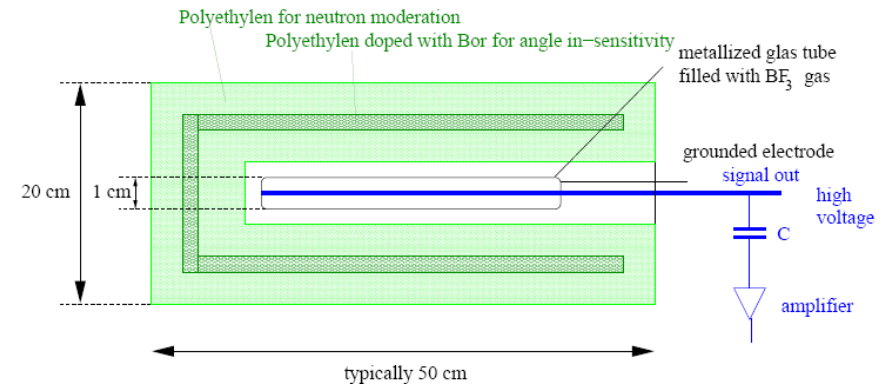
Ionization chamber

Measurement of charged particles *only*.

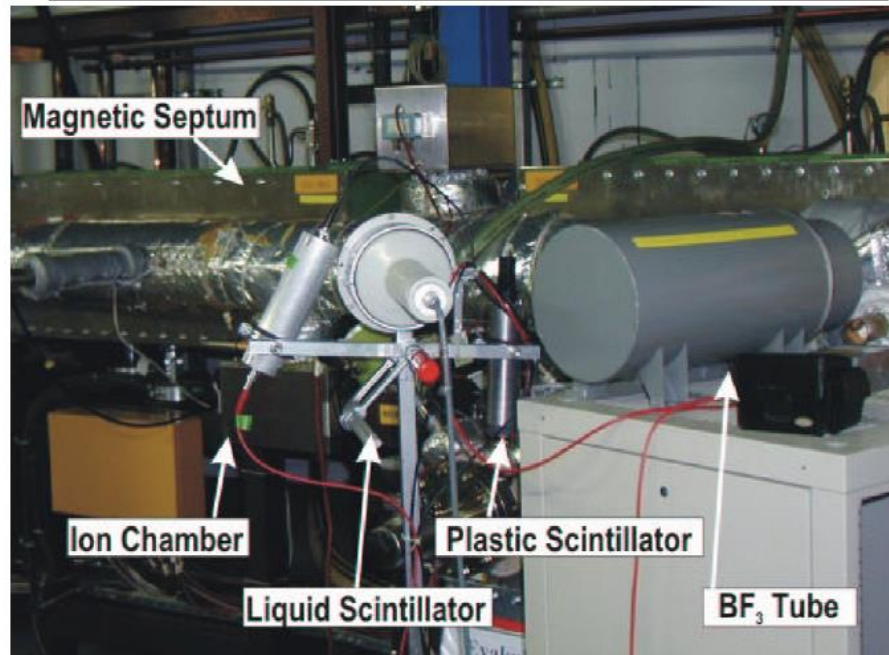


BF₃ proportional tube

Measurement of neutrons *only*.



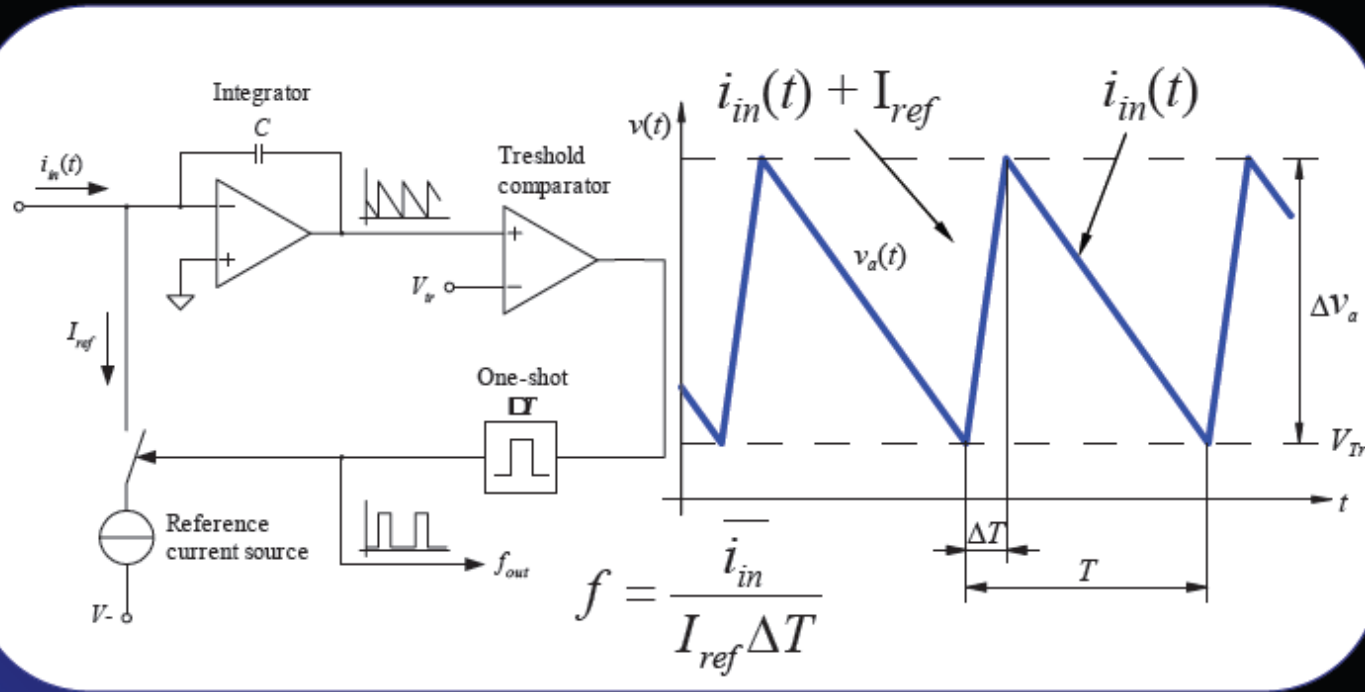
Different beam loss detectors at the GSI-synchrotron





Beam Loss Detectors

- Common types of monitor (cont)
 - Short ionisation chamber (charge detection)
 - Typically gas filled with many metallic electrodes and kV bias
 - Speed limited by ion collection time - tens of microseconds
 - Dynamic range of up to 10^8



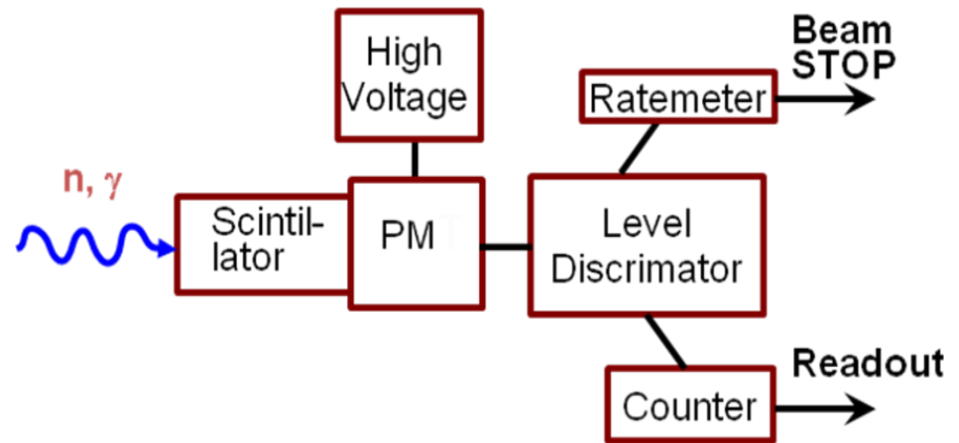
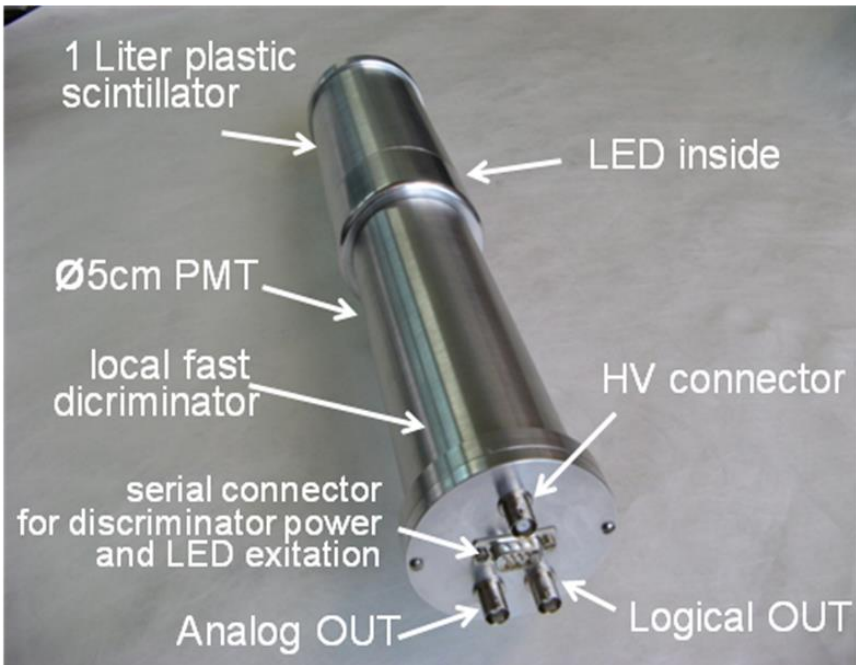
D=0.5 cm (Al)
 Ø=8.9 cm
 L=60 cm
 V=1.5 kV
 P=1.1 bar
 (N₂)

LHC

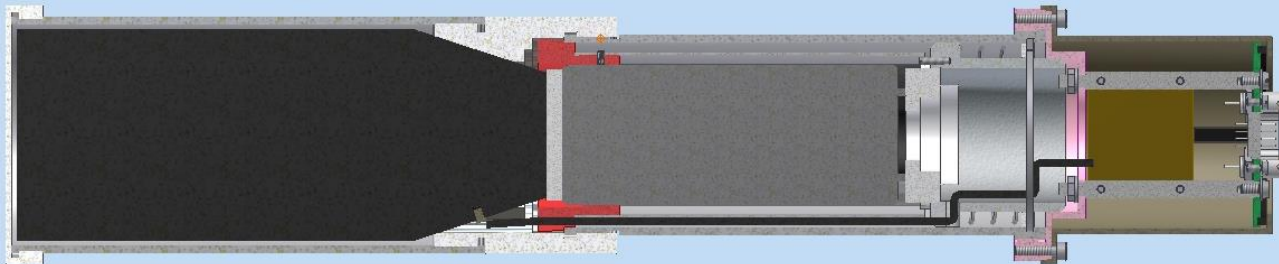
Exemples de moniteurs de perte de faisceau: Chambre à ionisation sur LHC (3600)



Exemples de moniteurs de perte de faisceau: SPIRAL2



- SCHEMA DE PRINCIPE MONITEUR DE PERTES DE FAISCEAU



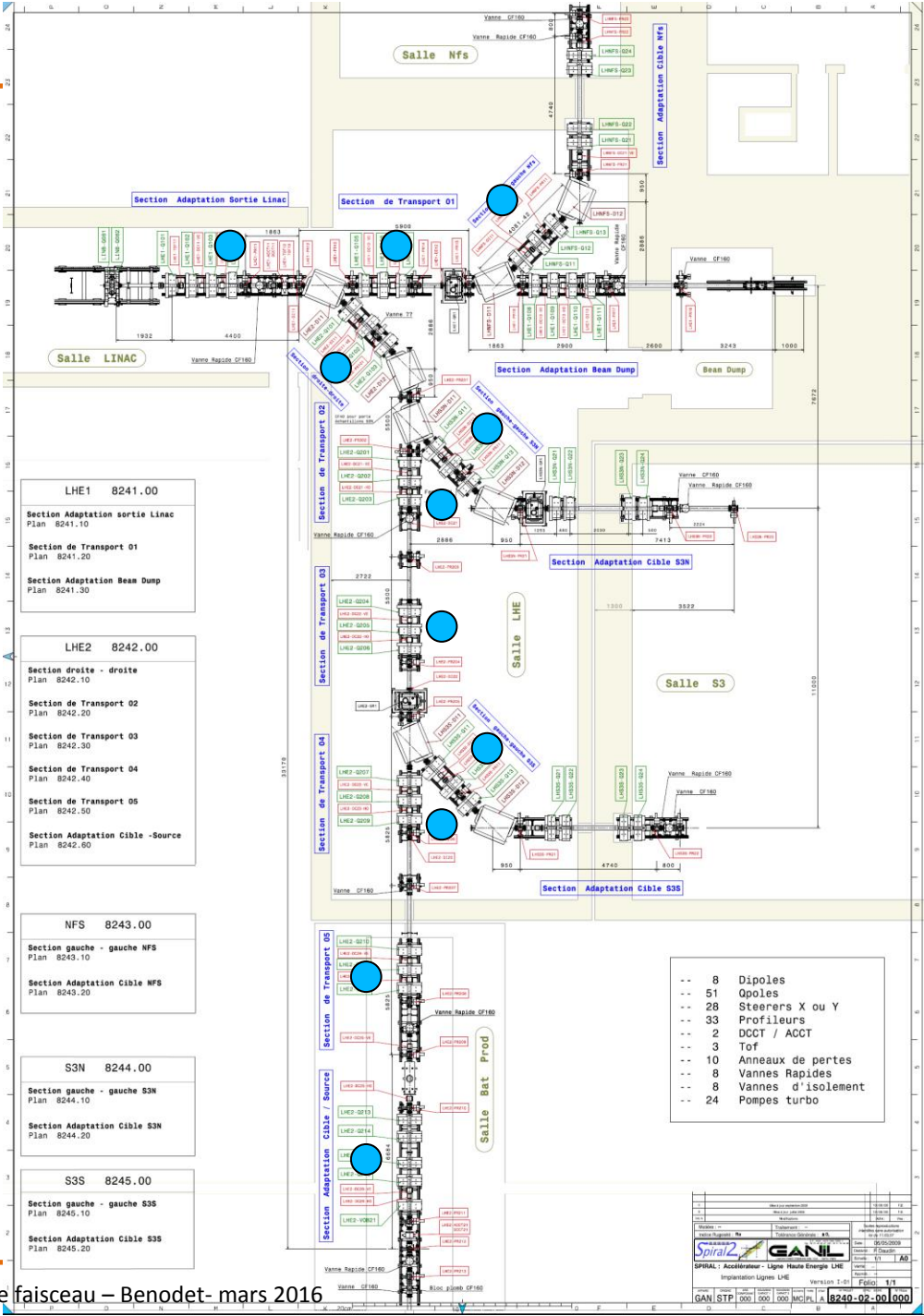
Exemples de moniteurs de perte de faisceau: Localisation lignes haute énergie de SPIRAL2

1 detector per cryomodule along linac
+ 11 detectors in HEBT lines

Expected output:
longitudinal profile of counting rates

Distortions factors:

- X-ray background
- activation build-up
- scattering/absorption on beam line elements
- complex profiles losses



Evolution of the main accelerator control room of an accelerator

A
G
S



1964



1989

A
G
S



1998



2011

A
G
S

A
G
S

R
I
H
C

Salle de contrôle du LHC le 10 septembre 2008



Salle de contrôle du LHC le 10 septembre 2008



C'était un plaisir!
Merci pour votre
attention!!

Références

- [1] “Particle Physics booklet” extrait de « Review of Particle Physics ». K. Nakamura et al (Particle Data Group), Journal of Physics G37, 075021 (2010)
- [2] « Stopping power and ranges for protons and alpha particles » ICRU Report N° 49 (1993)
- [3] “The density Effect for the Ionisation Loss of Charged Particle in Various Substances”. R.M. Sternheimer, S.M. Seltzer, M.J. Berger. Atomic Data and Nuclear Data Tables 30, 261 (1984)
- [4] S.M. Seltzer, M.J. Berger, Int. J. of Applied Rad. **35**, 665 (1984).
- [5] “The secondary emission detector” Th Aggson . Laboratoire de L’accélérateur Linéaire. Université de Paris ECOLE NORMALE SUPERIEURE 14 fevrier 1962.
- [6] “Simulation of secondary electron emission based on a phenomenological probabilistic model”. M.A. Furman. LBNL – 52807, SLAC-PUB-9912
- [7] <http://hadron.kek.jp/~accelerator/TDA/tdr2003/chap2/2.3.8.2.pdf>
- [8] « Emission secondaire de métaux purs». R. Warnecke. Journal de Physique juin 1936
- [9] « Theory of Secondary Electron Emission by High Speed Ions ». E. J Sternglass. The Physical Review – Second series, Vol. 108, N°1.
- [10] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/tables/photoelec.html#c1y>,
- [11] “Sharp reduction of the secondary electron emission yield from grooved surface”. M.T.F. Pivi, F.K. King, R.E. Kirby, T.O. Raubenheimer, G. Stupakov. SLAC – F. Le Pimpec. PSI. -SLAC-PUB- 13020 Nov 2007
- [12] “Recalibration of a wall-current monitor using a Faraday cup for the KEK B injector LINAC”. T. Suwada. PAC. 1999.
- [13] Frontiers of particle Beams; observation; diagnosis and correction. Lecture Notes in Physics Proceedings 343. Anacapri 1988. Editeurs : Month et Turner. Springer – Verlag
- [14] “Beam diagnostics”. Uli Raich . Cern Accelerator School 2005
- [15] “Introduction to beam instrumentation” Rhodri Jones CAS 2007
- [16] “Beam Position Monitors: Principle and realisation” P. Forck, P. Kowina, D. Liakin, CAS May 30 th, 2008
- [17] “Cavity beam position monitors” Ronald Lorenz. B.I.W. 1998. AIP conference proceedings n° 451
- [18] “Comparison among signals processig for BPM” G. Vismara BIW 00.
- [19] “Beam current monitors”. J.C. Denard . Cern Accelerator School on beam diagnostics 2008