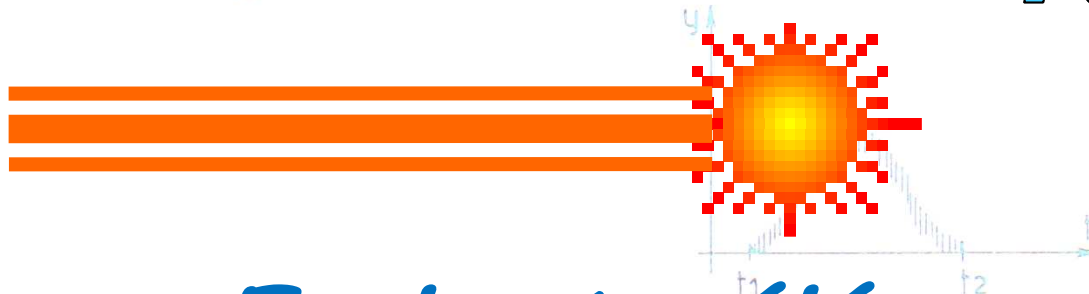


2^e Partie

INSTRUMENTATION DIAGNOSTICS DE FAISCEAUX



Patrick AUSSET



Ecole Accélérateur In2p3
*Benodet 4 - 10 décembre 2011*₁

SOMMAIRE

1 LE FAISCEAU DE PARTICULES ACCELEREES

Caractéristiques élémentaires du faisceau

Nécessité des diagnostics de faisceau

Les mesures à effectuer

Interaction du faisceau avec la matière

2 MESURE DE L'INTENSITE DU FAISCEAU

Capteurs destructifs: détecteur à émission secondaire, Coupelle de faraday

Capteurs non destructifs:

Champ électromagnétique associé au faisceau

Moniteur à courant de paroi, transformateurs de courant, Electrode capacitive.

3 MESURE DE LA POSITION DU FAISCEAU

Electrode électrostatique, électrode bouton

Electrode stripline

Détecteur inductif

Détecteur magnétique

5 MESURES TRANSVERSES

Profils transverses:

- a) Capteurs destructifs: scintillateurs, chambres à émission secondaire, wire scanner, chambres à ionisation de gaz
- b) Moniteurs à ionisation du gaz résiduel
- c) Mesure par fluorescence du gaz résiduel
- d) Utilisation du rayonnement synchrotron

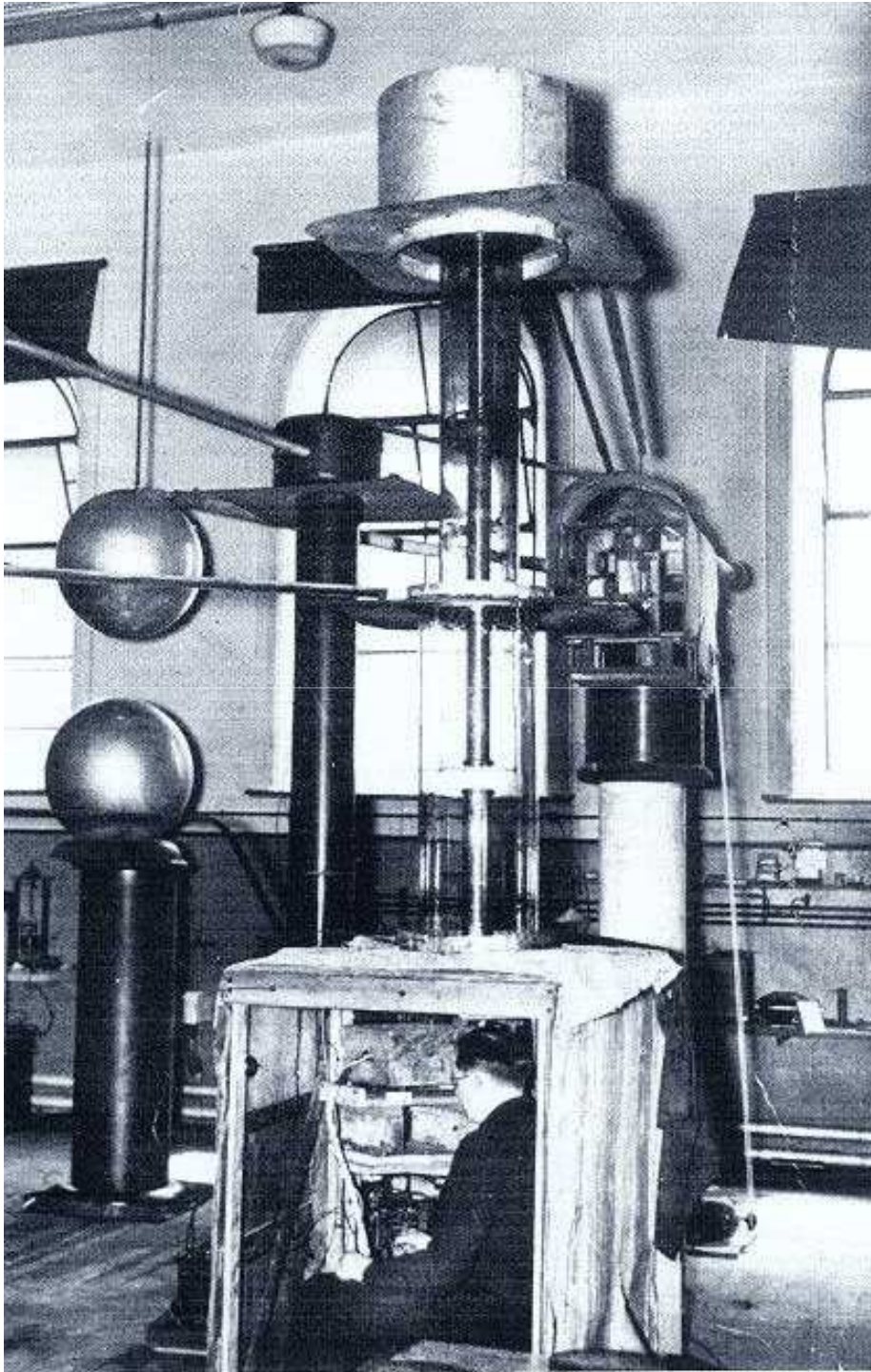
Mesure de l'émittance

6 MESURES SPECIFIQUES

Mesure de longueur de bunch : camera à balayage de fente

Mesure de la lumière : camera CCD, photomultiplicateur

7 MONITEURS DE PERTES DE FAISCEAU



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

Cavendish Laboratory, Cambridge, Massachusetts

- Protons accélérés à 800 keV par un système multiplicateur de tension (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

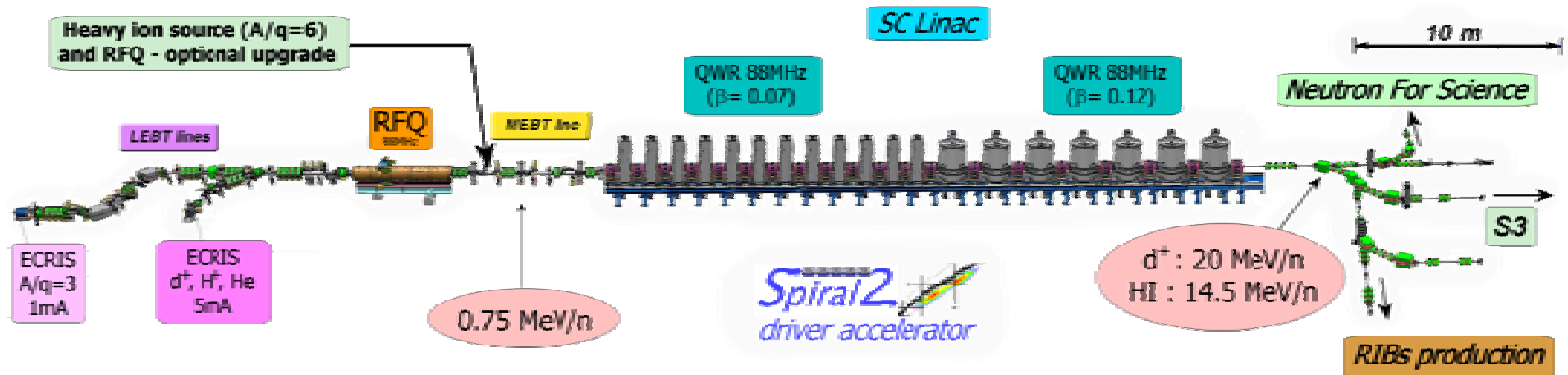
A la demande des expérimentateurs

Amélioration de la connaissance du fonctionnement des machines

En fonctionnement nominal et hors nominal

Développement machine

SPIRAL2 Driver and Beam Characteristics



	Q/A	I (mA)	Energy (Mev/u)	CW max beam Power (KW)
Protons	1/1	5	2 - 33	165
Deutons	1/2	5	2 - 20	200
Ions	1/3	1	2 - 14.5	45
Ions (option)	1/6	1	2 - 8	48

- « Fast chopper » dans la ligne MEFT: Selection de bunch: $1/50$ à $1/10^5$
- C.W. mode
- Low Duty Factor Pulsed Mode of Operation (slow chopper)

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

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

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

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

- Deutérium : isotope ^2H de l'hydrogène

- Tritium : isotope ^3H de l'hydrogène

à:

- Uranium dont la masse au repos est $E_0 \approx A \cdot uma$

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

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

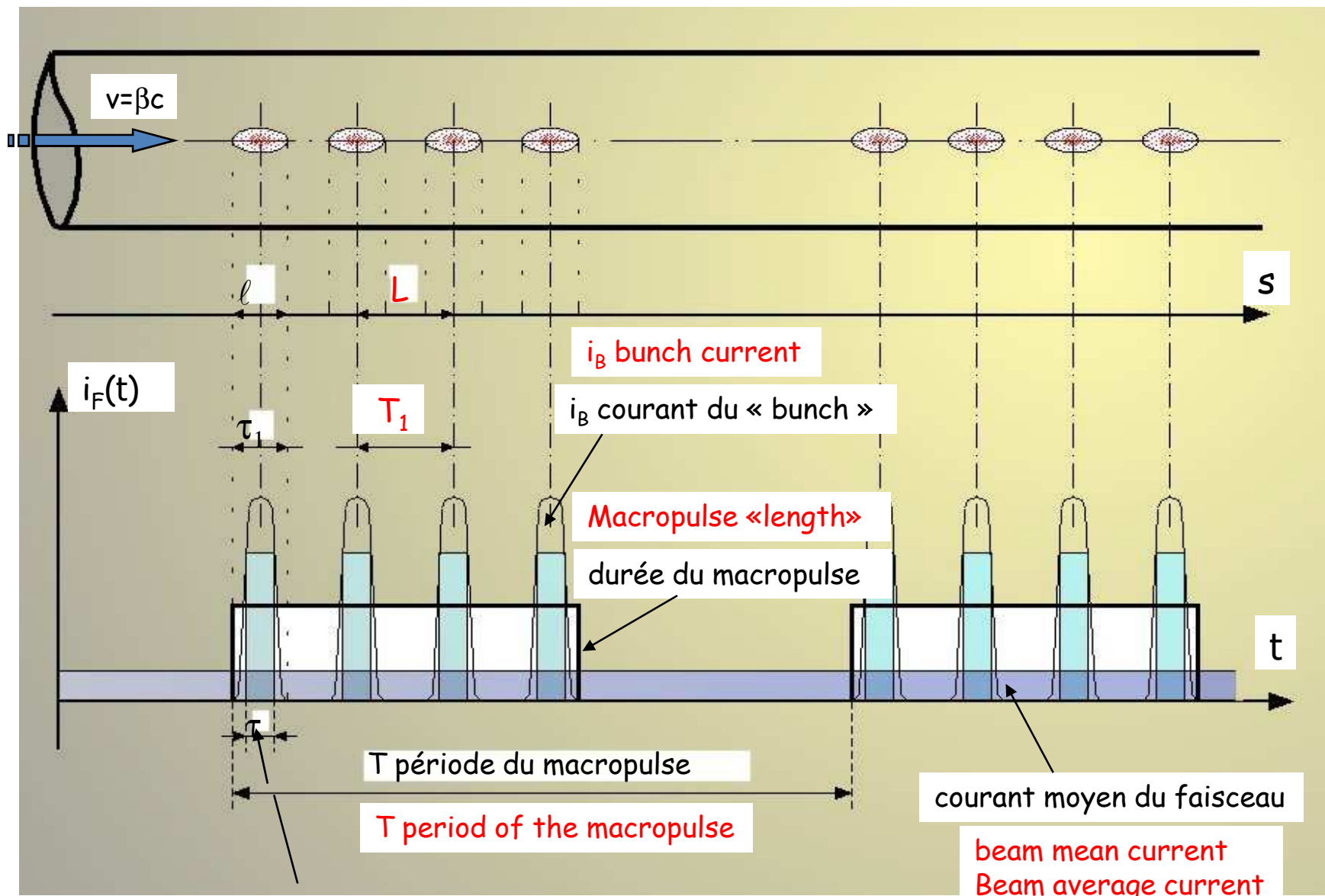
Ces ions peuvent être mono chargés ou plus fréquemment multi chargés. Les plus légers sont :

- 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

Mesures de base (fonctionnement journalier, contrôle du fonctionnement):

Intensité et nombre de charges du faisceau.

Phase du faisceau par rapport à la tension accélératrice.

Position transverse du centre de gravité du faisceau dans le tube à vide.

Mesure des profils transverses horizontal et vertical du faisceau.

Mesures complémentaires (mise en route, changement paramètres, études machine):

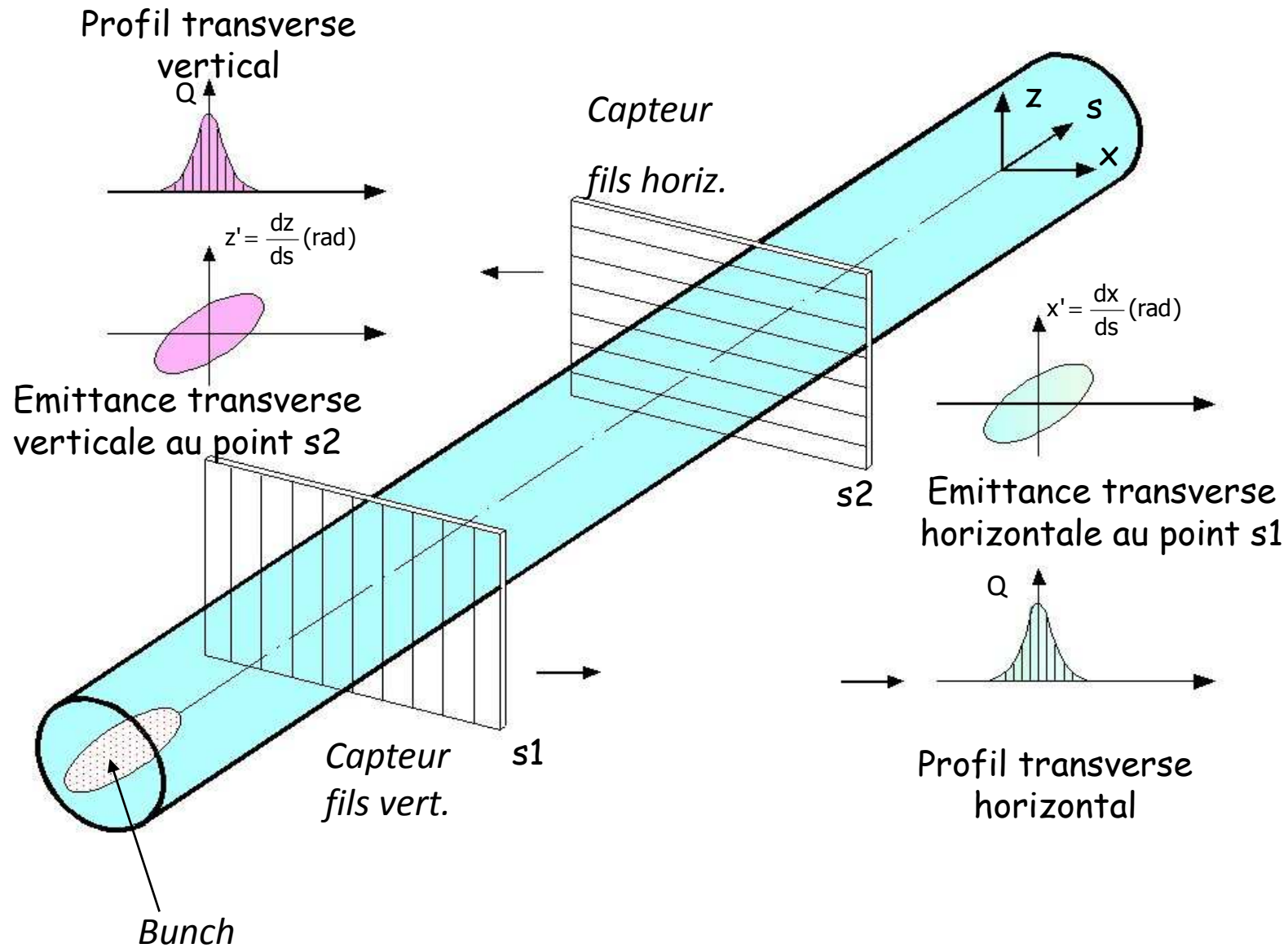
Intensité: Mesure des pertes de faisceau, rendement de transmission des sous ensembles (lignes de transport par exemple).

Mesures temporelles et de phase: Energie du faisceau.

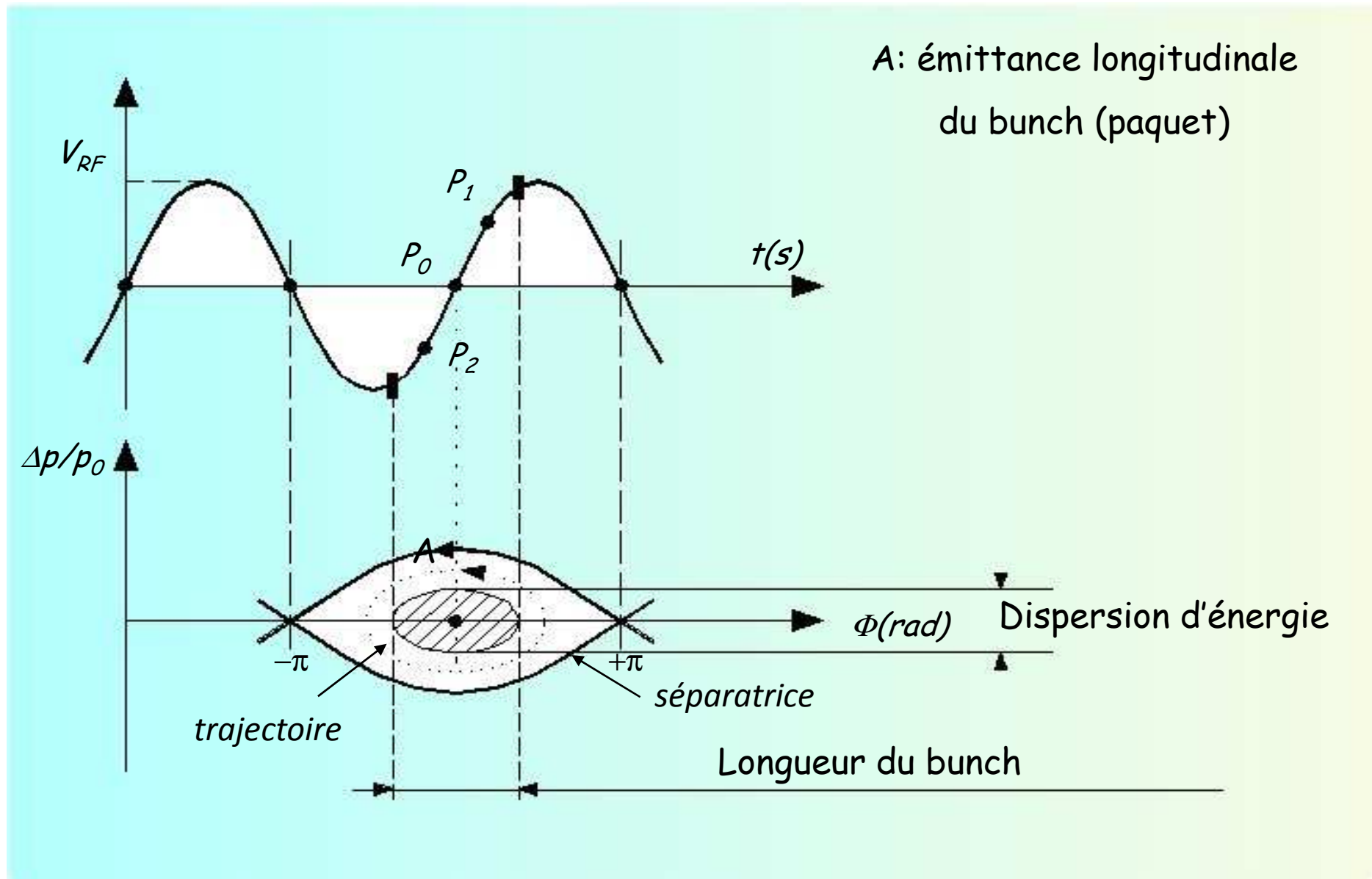
Position: alignement, procédure d'alignement automatique faisceau, feedback.

Profils transverses: émittance transverse du faisceau.

Mesures sur le faisceau – Emittance transverse



Mesures sur le faisceau – Emittance longitudinale



-Champs électromagnétiques et perturbations lumineuses parasites quand il s'agit d'acquérir, de transmettre et de traiter des signaux faibles.

-Rayonnements nucléaires.

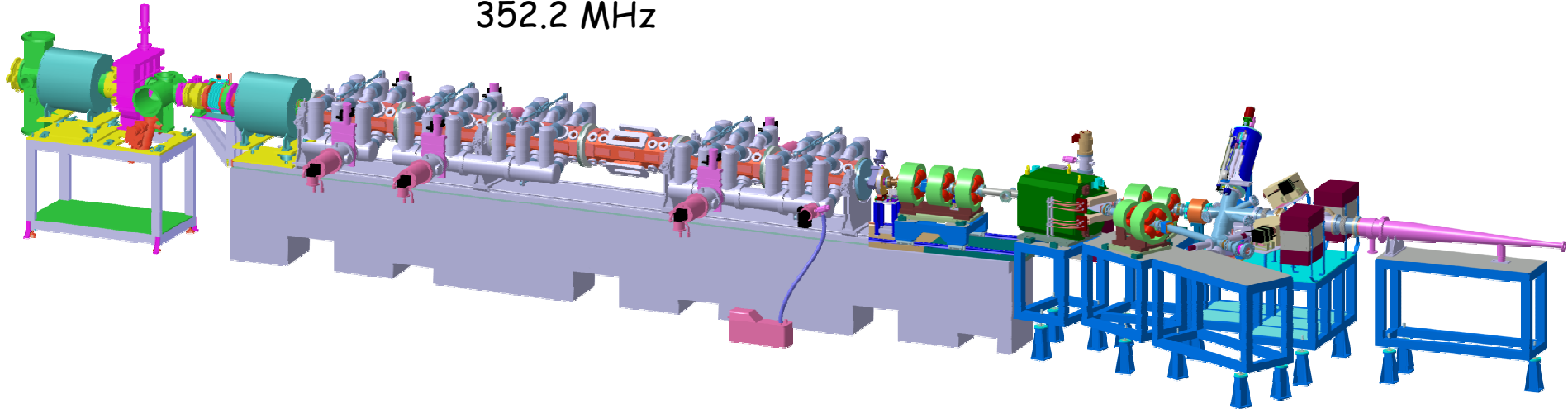
-Perturbations mécaniques: défauts et modifications d'alignement, vibrations mécaniques.

-Echauffement du capteur et de l'électronique.

Exemple de LINAC injecteur à très haute intensité: IPHI

RFQ: 6 tronçons
3 MeV; 100 mA C.W.
352.2 MHz

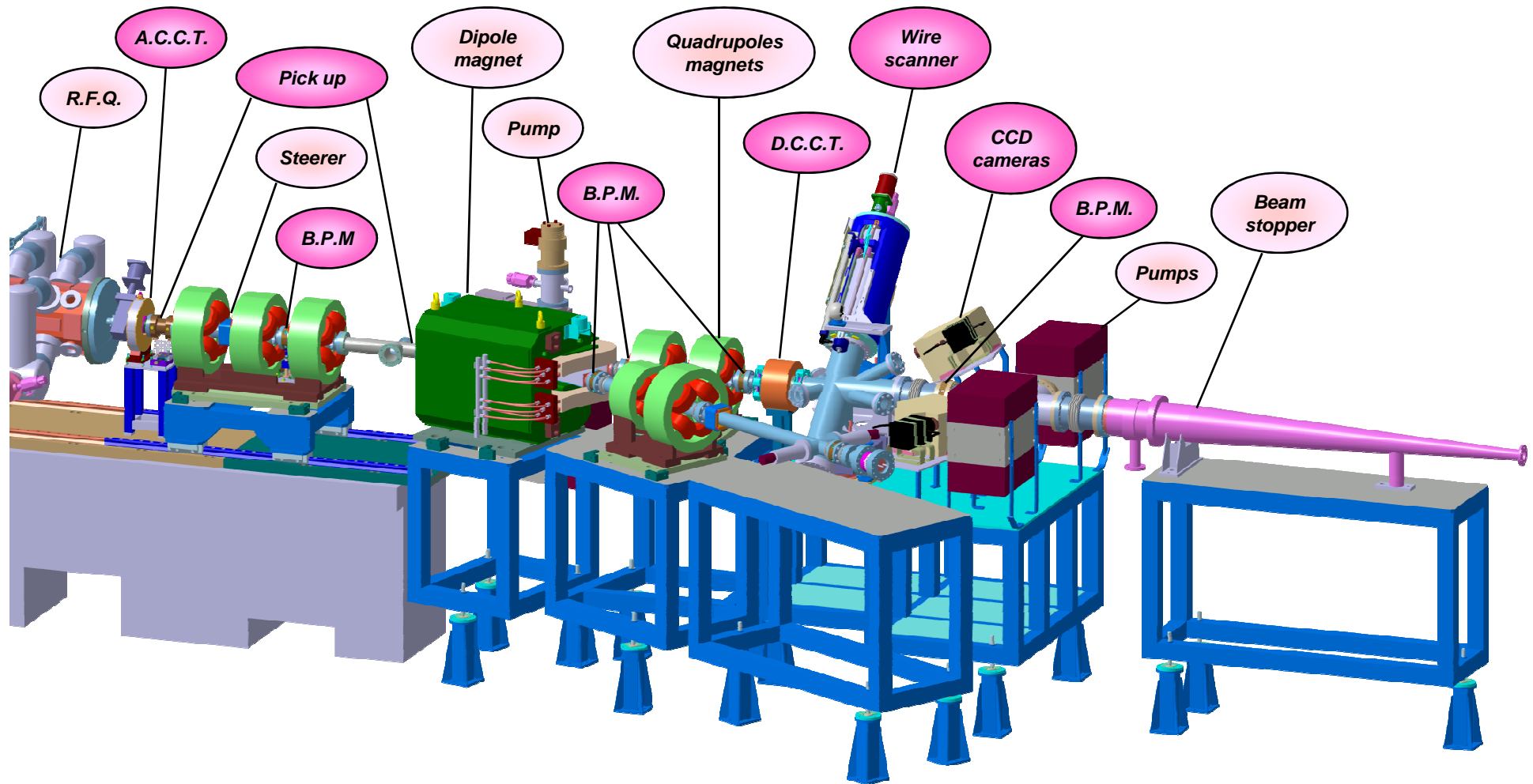
LIGNE DIAGNOSTICS
et BLOC D'ARRÊT 300 kW



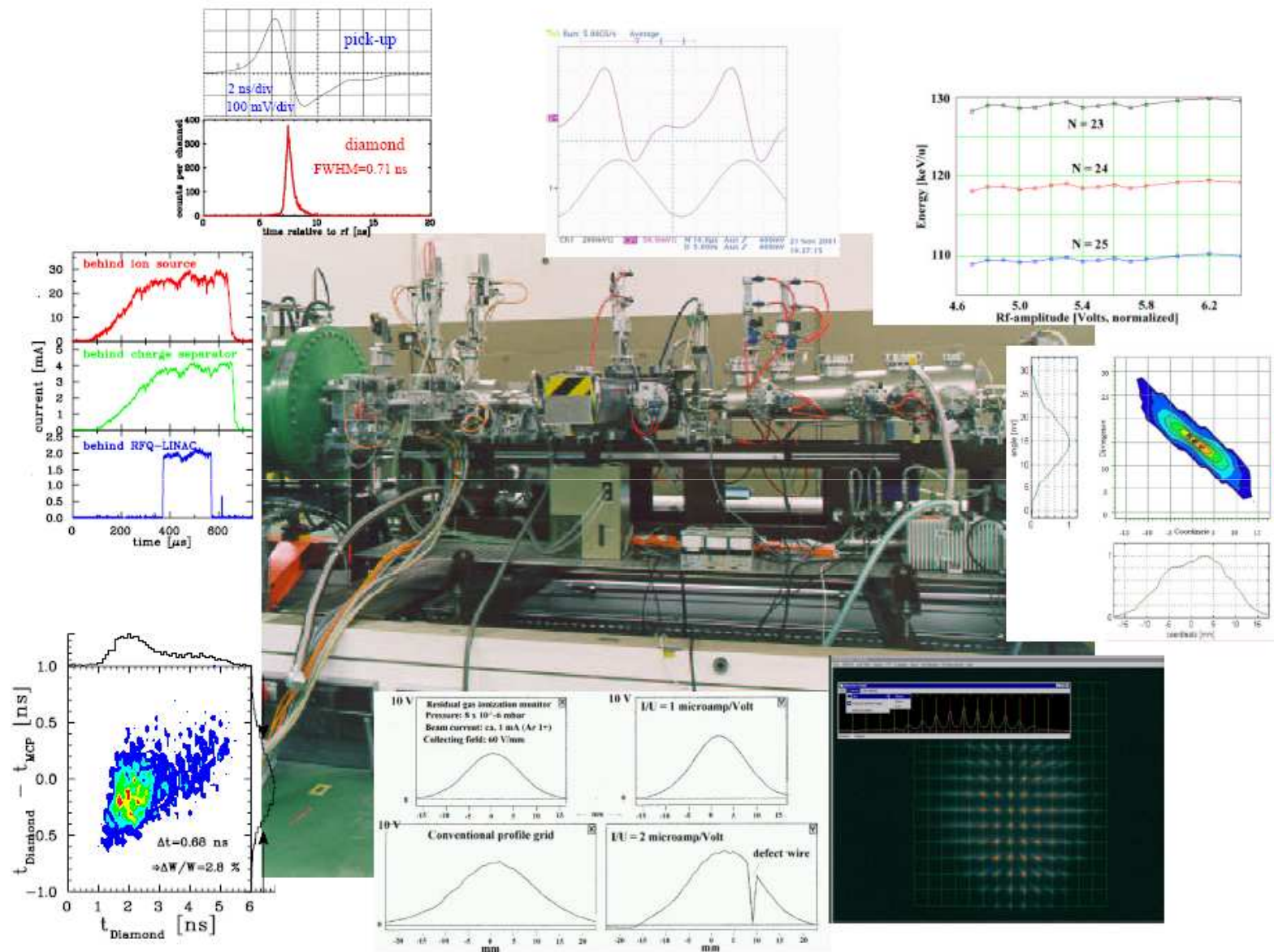
Source SILHI: Protons
100 KeV; 100 mA; C.W.

COLLABORATION CEA / DAPNIA - CNRS / IN2P3 - CERN

- IPHI: « front end » de démonstration pour les accélérateurs fort courant.
- Transmutation des déchets nucléaires (Essais fiabilité: cadre EUROTRANS)
- Production de faisceaux secondaires intenses



Commissioning de l'injecteur de GSI en 1999



RFQ commissioning: INTERMEDIATE TEST BENCH

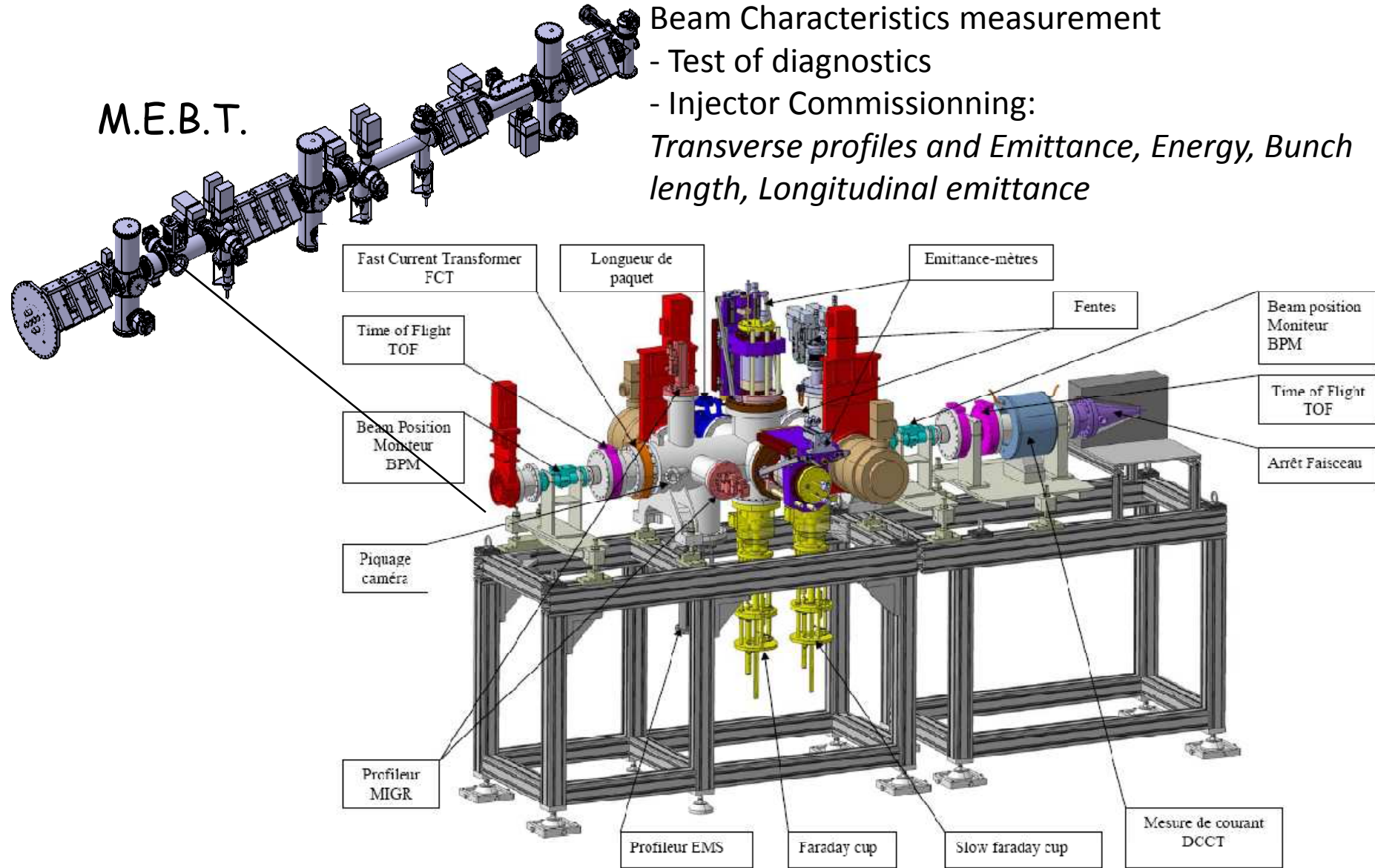
M.E.B.T.

Beam Characteristics measurement

- Test of diagnostics

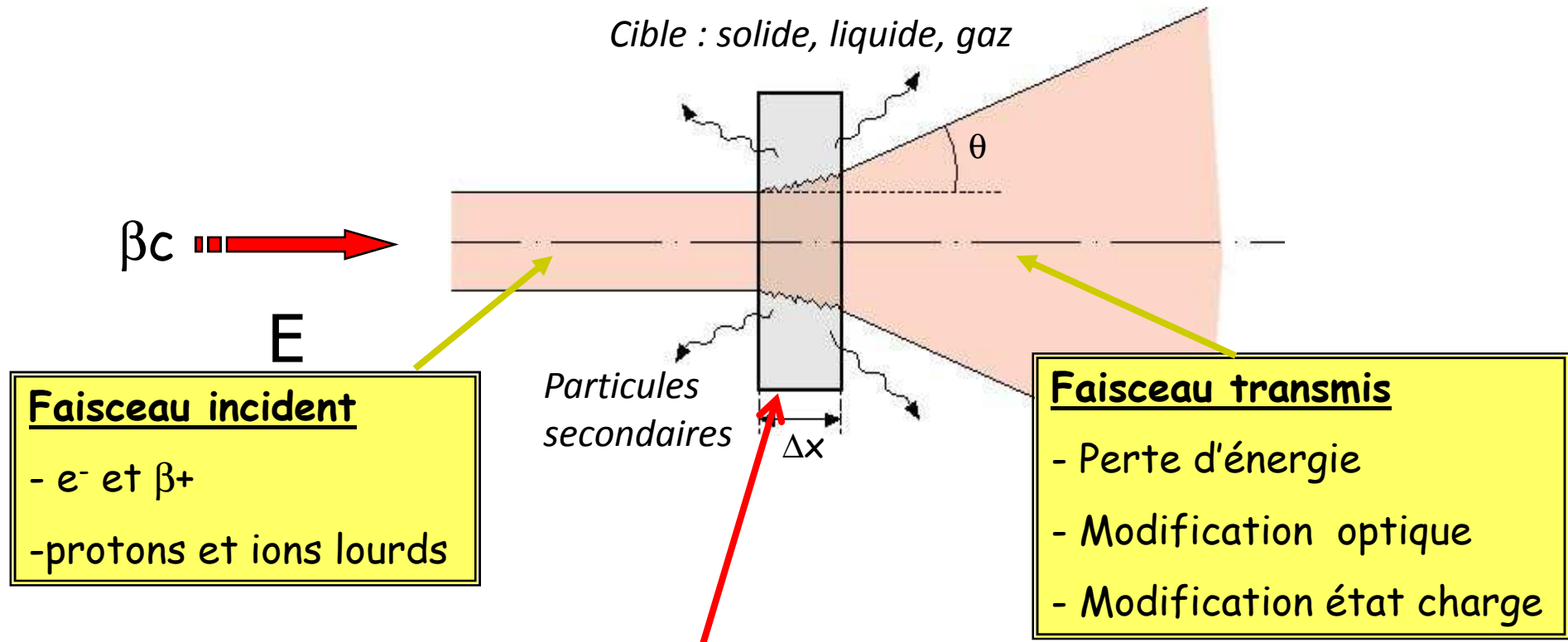
- Injector Commissioning:

Transverse profiles and Emittance, Energy, Bunch length, Longitudinal emittance



Exemple de diagnostics de faisceau

Beam quantity		LINAC, transfer line	Synchrotron
current I	<i>general</i>	transformer (dc, pulsed)	transformer (dc)
	<i>special</i>	Faraday cup particle detector (Scint. IC, SEM)	normalized pick-up signal
position x_{cms}	<i>general</i>	pick-up	pick-up
	<i>special</i>	using profile meas.	cavity excitation (e^-)
profile x_{width}	<i>general</i>	SEM-grid, wire scanner viewing screen, OTR-screen	residual gas monitor synch. radiation (e^-) wire scanner
	<i>special</i>	grid with ampl. (MWPC)	
trans. emittance ϵ_{trans}	<i>general</i>	slit grid	residual gas monitor
	<i>special</i>	quadrupole scan pepper-pot	wire scanner transverse Schottky pick-up wire scanner
momentum p and $\Delta p/p$	<i>general</i>	pick-up (TOF)	pick-up
	<i>special</i>	magn. spectrometer	Schottky noise pick-up
bunch width $\Delta\varphi$	<i>general</i>	pick-up	pick-up
	<i>special</i>	particle detector secondary electrons	wall current monitor streak camera (e^-)
long. emittance ϵ_{long}	<i>general</i>	magn. spectrometer	
	<i>special</i>	buncher scan TOF application	pick-up + tomography
tune, chromaticity Q, ξ	<i>general</i>	—	exciter + pick-up (BTF)
	<i>special</i>	—	transverse Schottky pick-up
beam loss r_{loss}	<i>general</i>		particle detector
polarization P	<i>general</i>		particle detector
	<i>special</i>		Compton scattering with laser
luminosity \mathcal{L}	<i>general</i>		particle detector



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

➤ Les particules chargées incidentes lourdes (autre que les électrons) d'énergie « moyenne » ($\beta < \sim 1/137$) 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:**

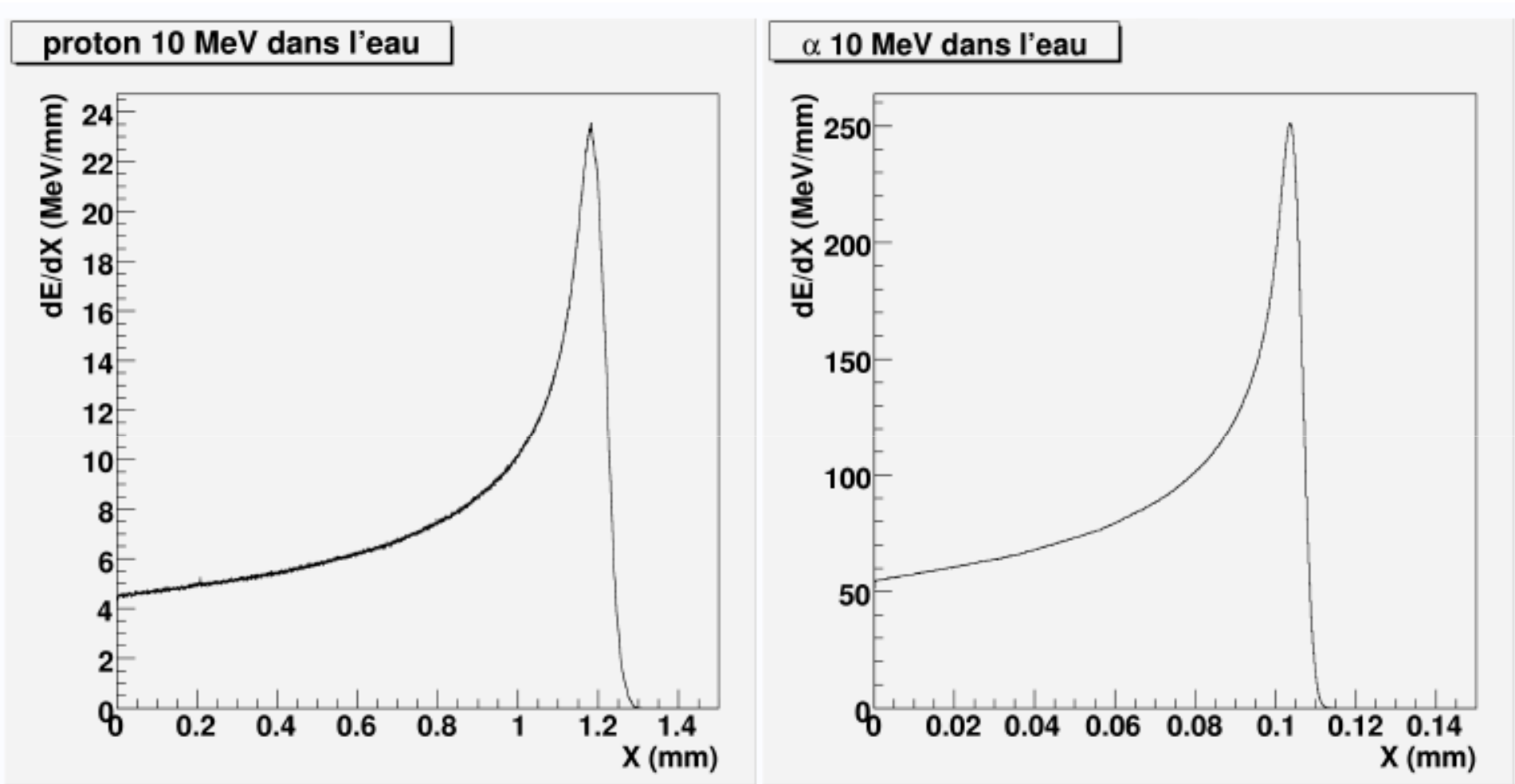
- Production de paires « ions-électrons » dans les gaz et « trous-électrons » dans les semi-conducteurs.

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**)



Courbe de Bragg pour un proton de 10MeV et un alpha de 10 MeV dans l'eau

Détecteurs interceptifs - Passage des particules lourdes à travers la matière: Energie déposée

$$\frac{dE}{dx}$$

Domaine de Bethe

Vitesse de l'ion grande

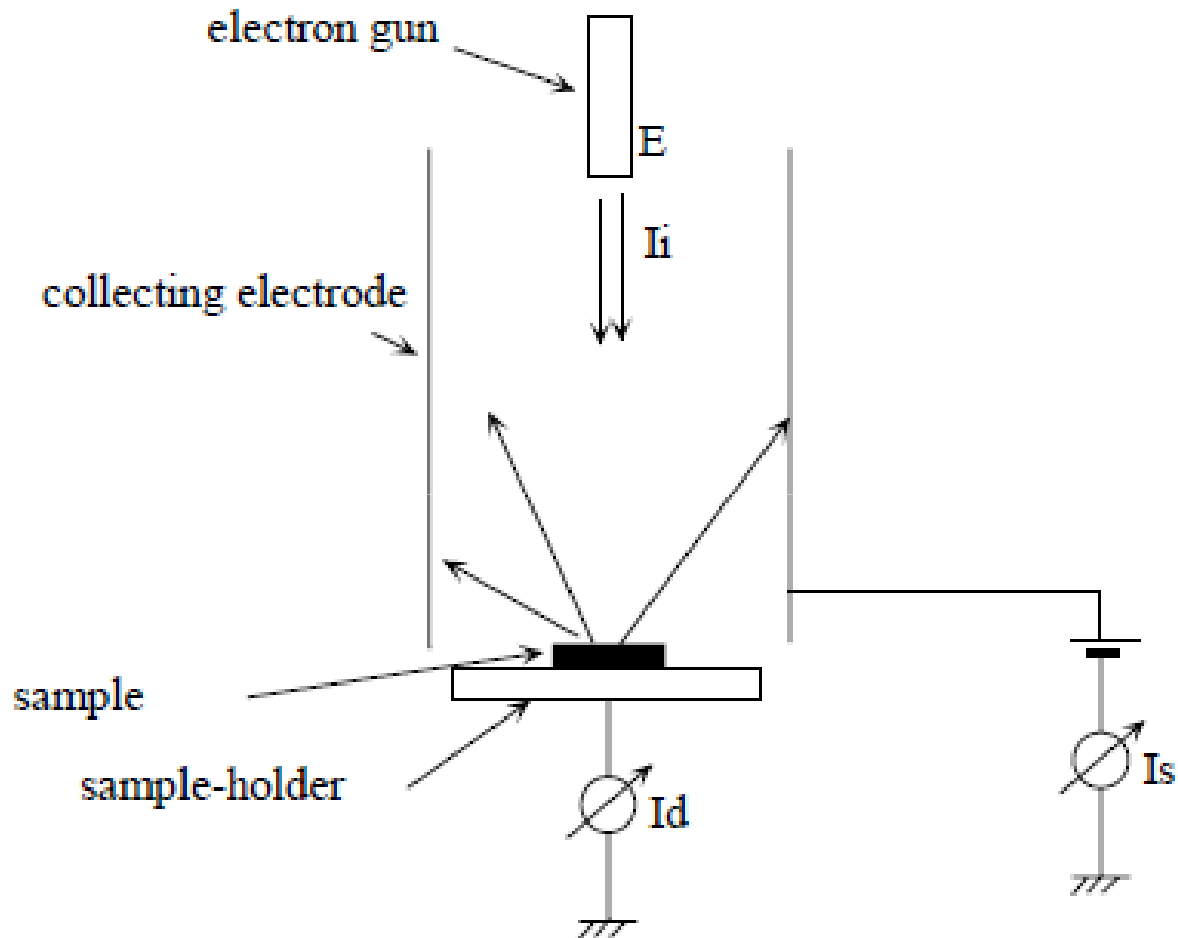
-Echange de charges

- T.E.L. $\propto \frac{1}{v_{ion}^2}$

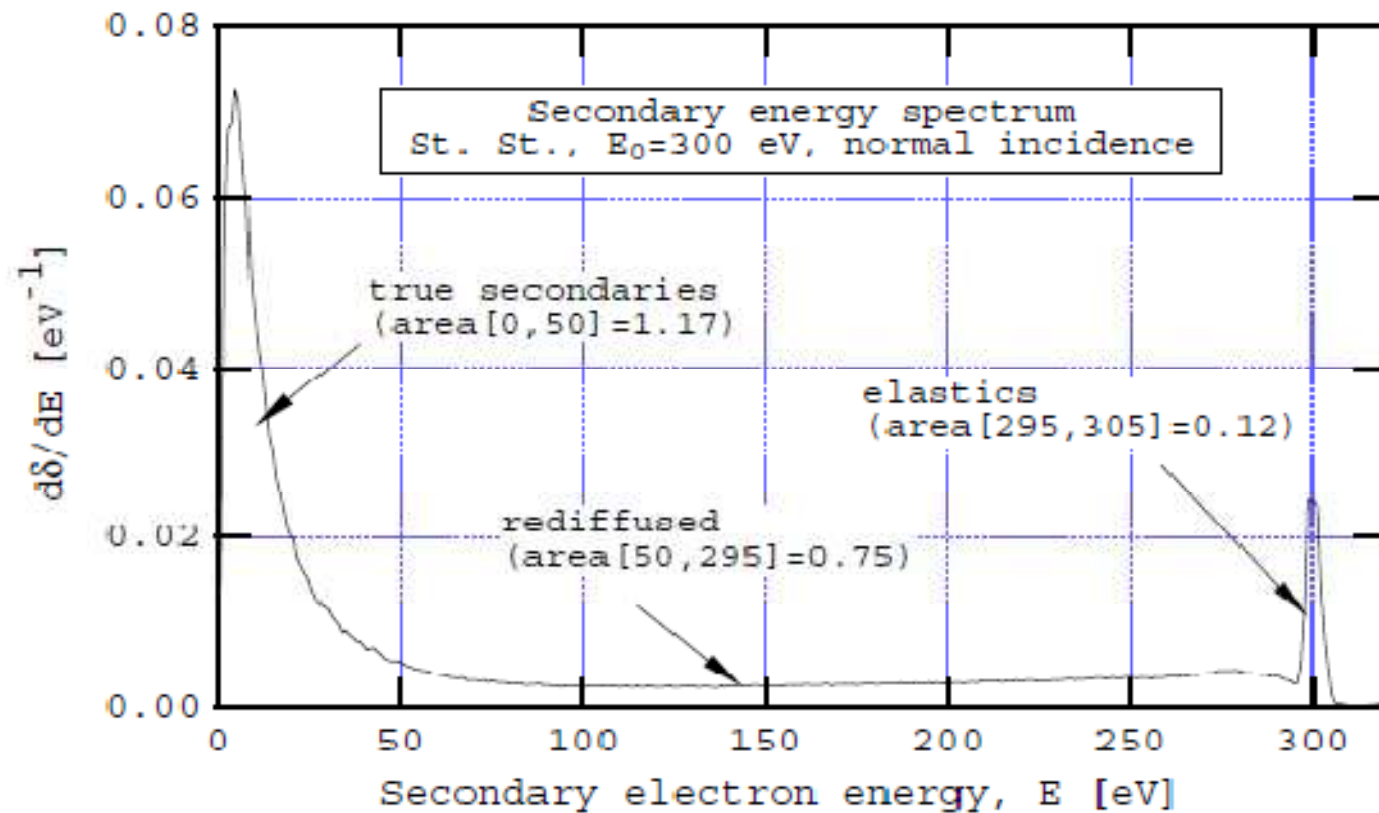
$$v_{ion} \cong v_0 \cdot Z_{ion}^{2/3}$$

v_{ion}

Secondary Emission

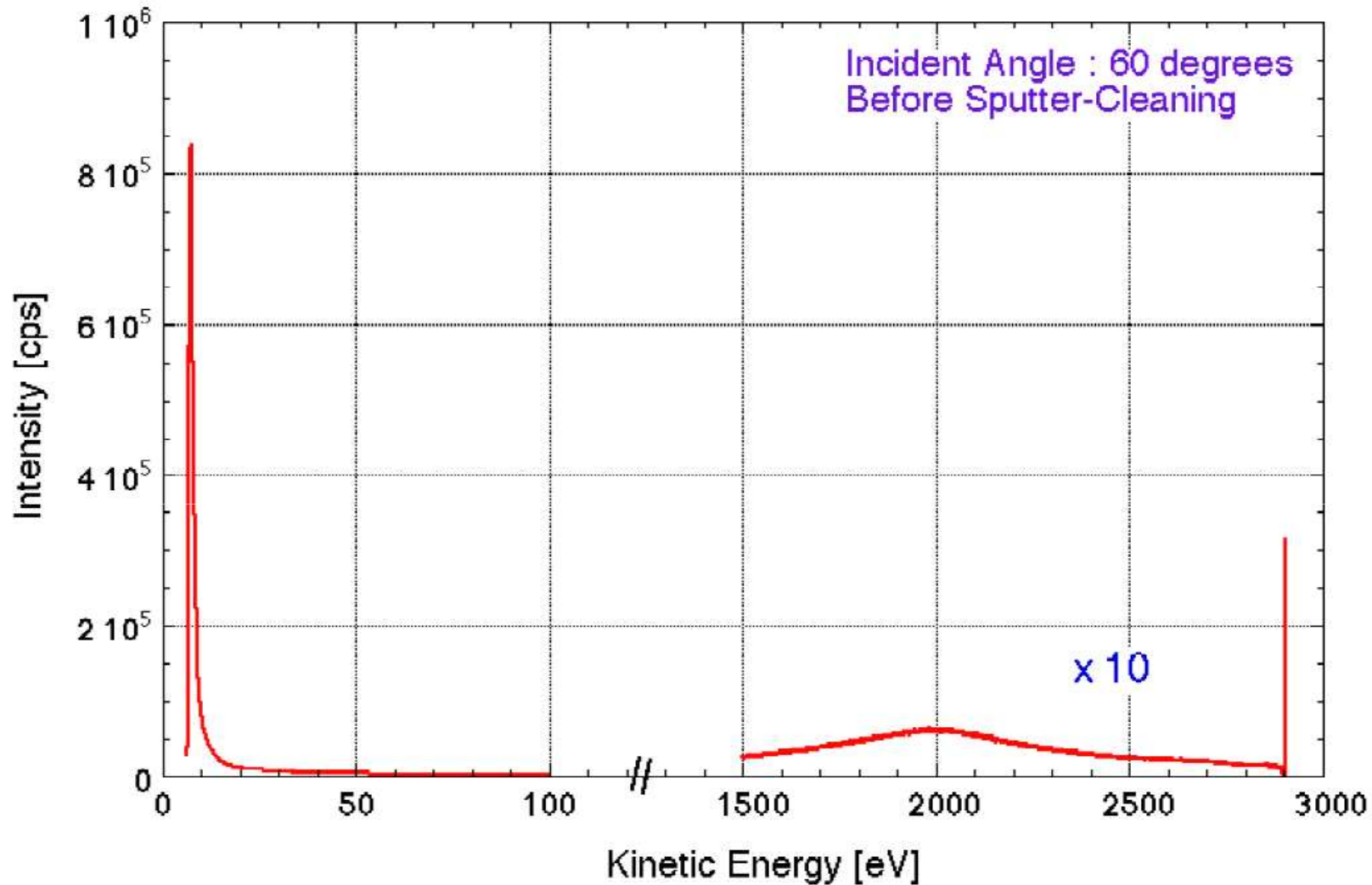


Exemple de dispositif expérimental pour l'étude de l'émission secondaire d'une cible

**Secondary Emission**

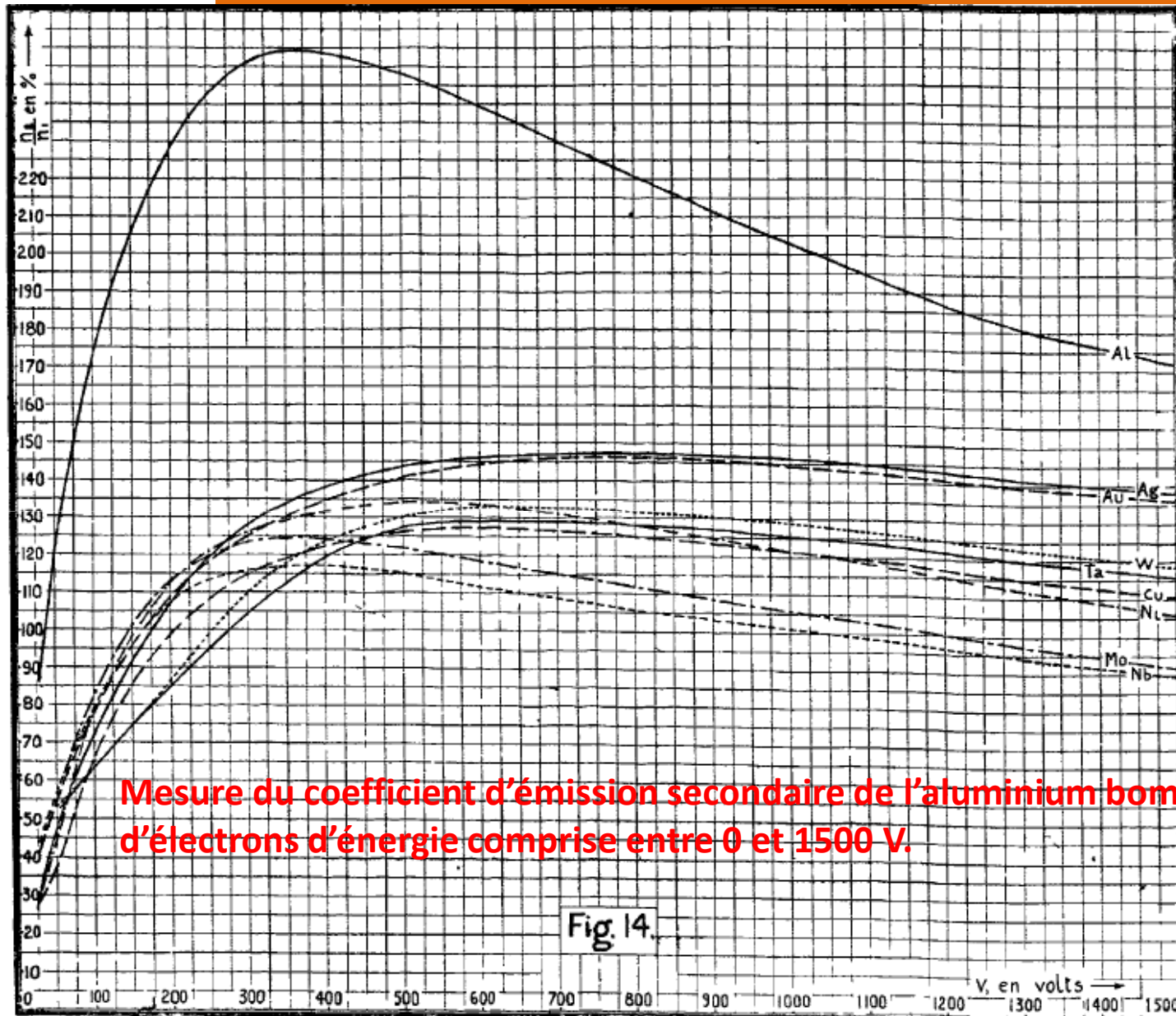
Courbe type du spectre en énergie des électrons secondaires émis par une feuille d'inox bombardée par un faisceau d'électrons de 300 eV d'énergie (incidence normale):

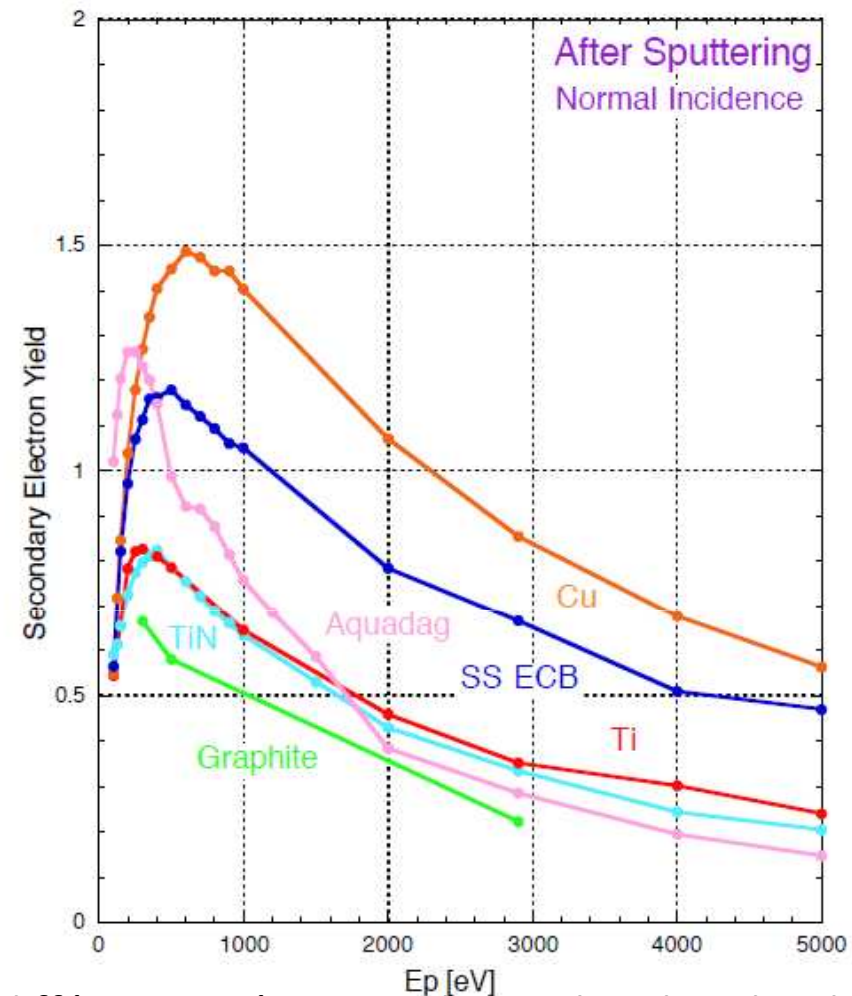
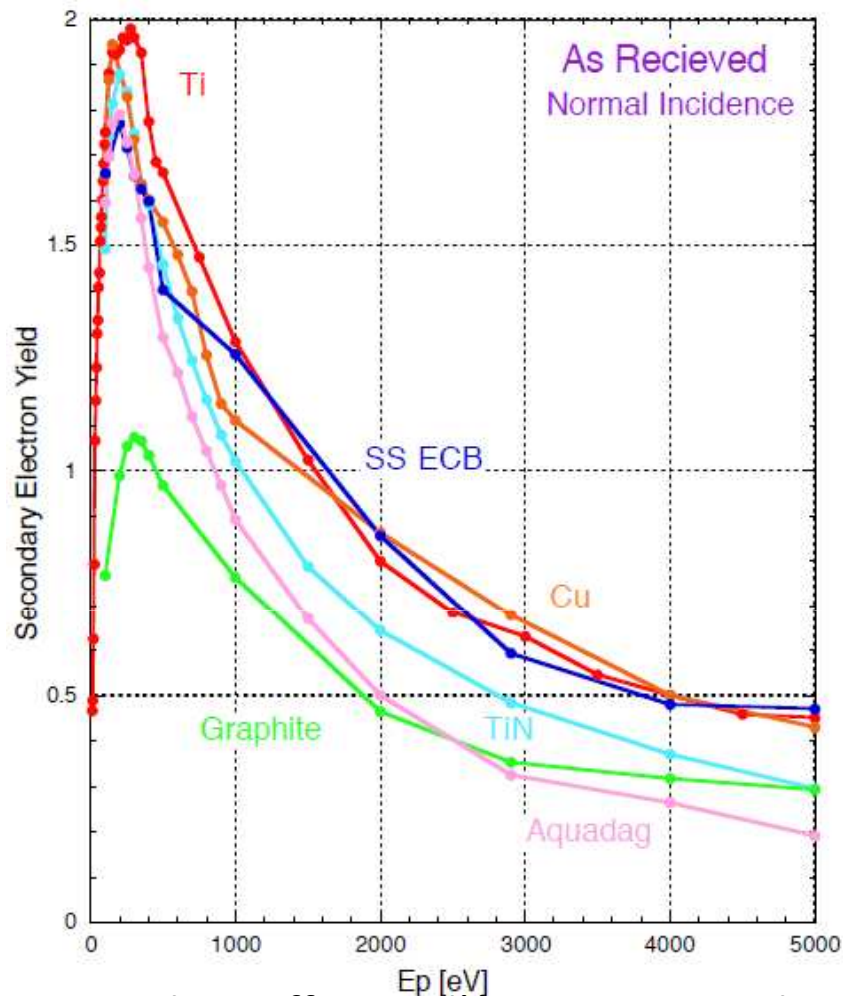
- Les électrons secondaires « vrais » d'énergie inférieure à 50 eV (frontière « arbitraire »)
- Les électrons rediffusés (correspondant à plusieurs chocs inélastiques dans le milieu)
- Les électrons rediffusés avec l'énergie du faisceau incident (chocs élastiques)



Bombardement de Ti par un faisceau d'électron de 2.9 keV sous une incidence de 60°.

D'après Ref 8





Mesure du coefficient d'émission secondaire de différents métaux et du graphite bombardés par un faisceau d'électrons d'énergie comprise entre 0 et 5keV (incidence normale) avant et après préparation de la cible par sputtering (Faisceau d'argon) [7].

Aquadag: dépôt d'un film (qq dizaines de μm d'épaisseur) de fines particules de graphite sur Cu

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
- 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.

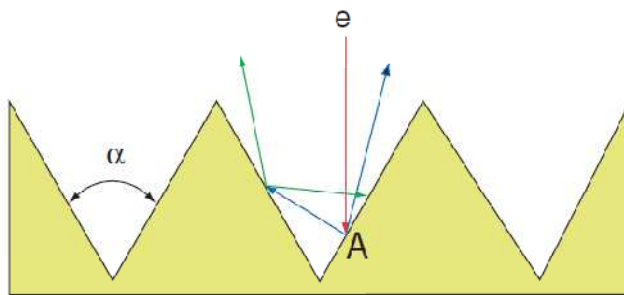
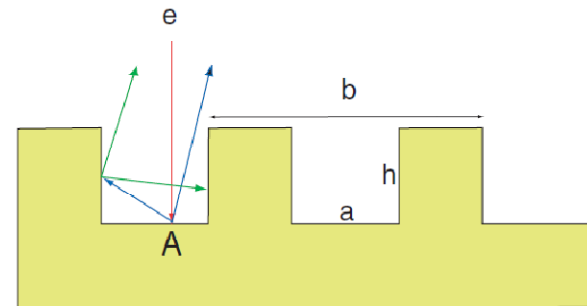
Sternglass a estimé ce rendement à :

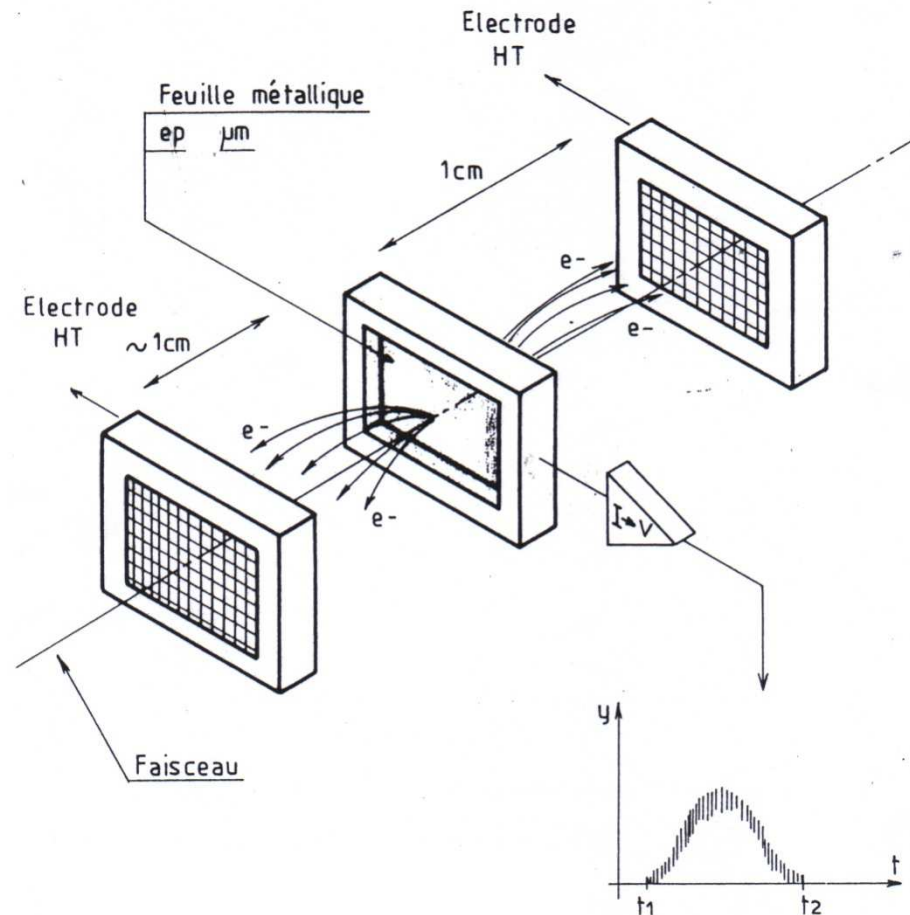
$$Y = P \cdot \frac{d_s}{E_*} \cdot \frac{dE}{dx}$$

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:

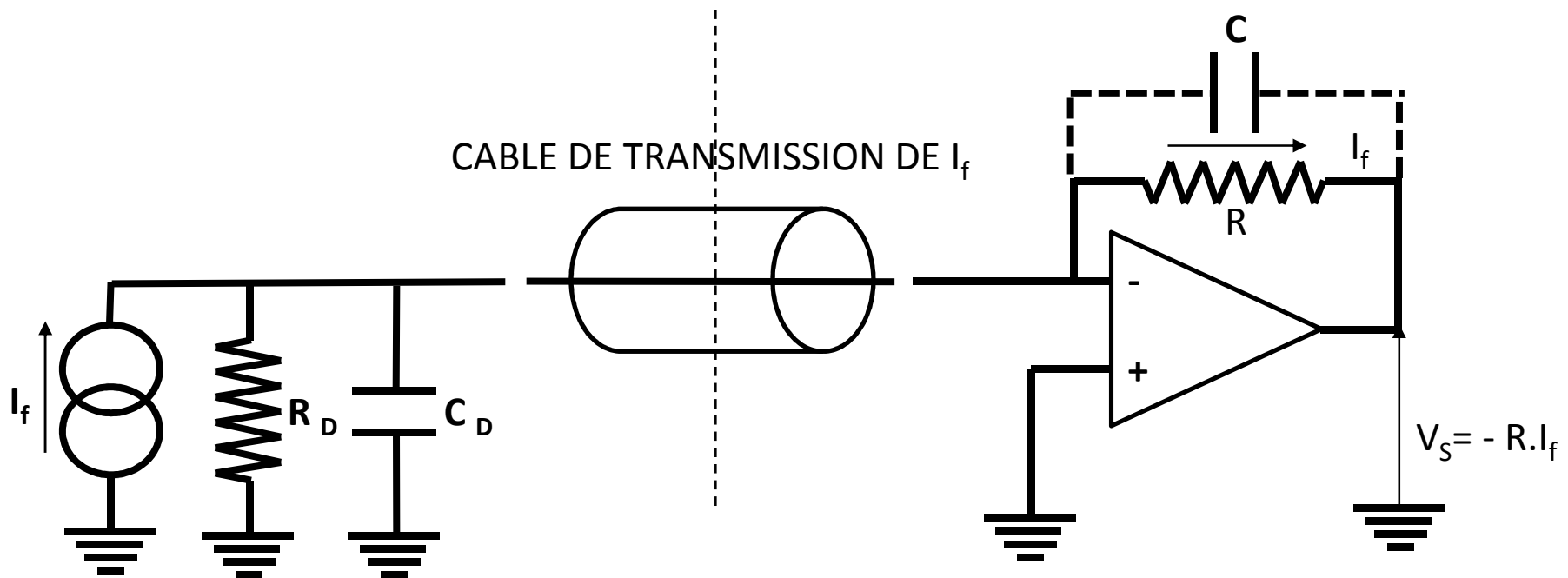
motif triangulaire (optimisation de l'angle α)motif rectangulaire (optimisation de la période b , de la profondeur h , et de la largeur a).

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

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).

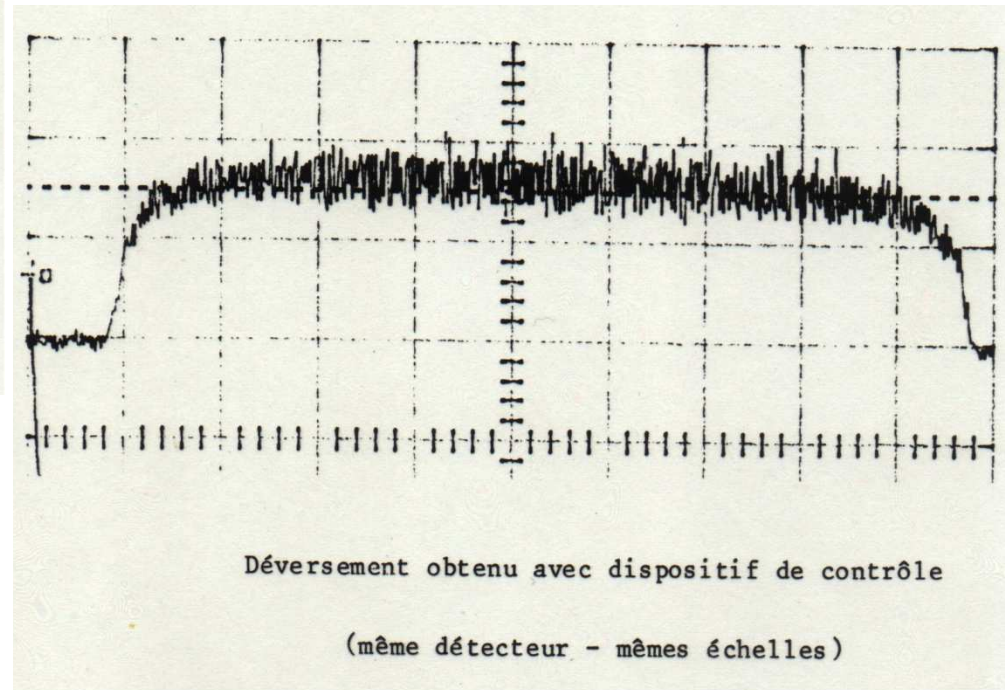
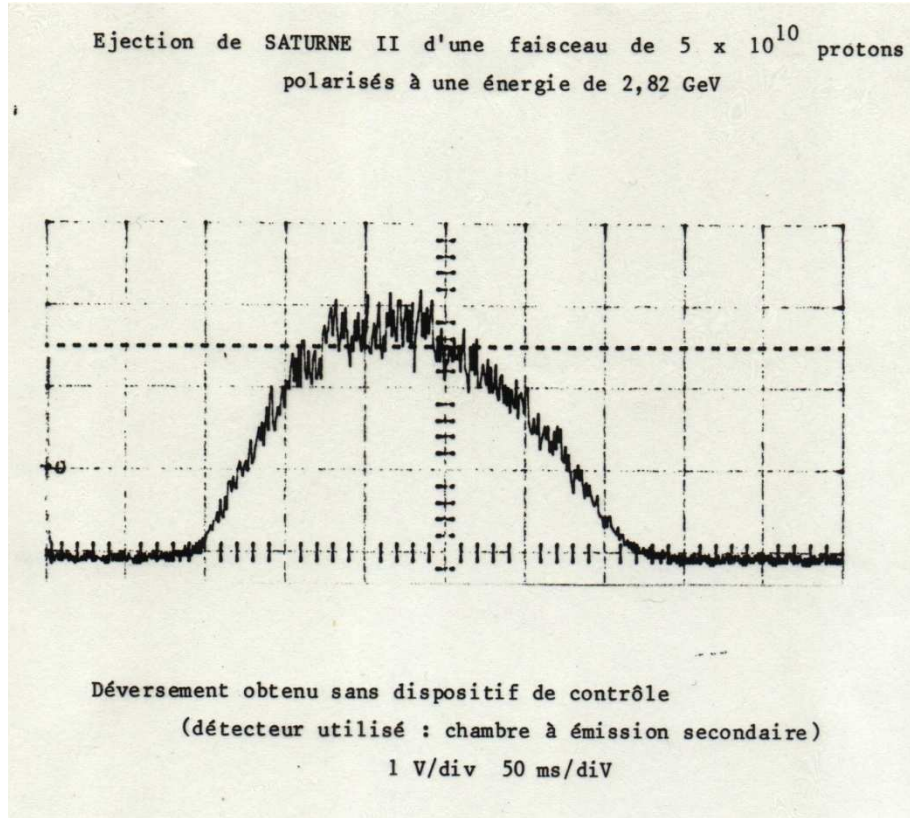
Performances du montage:

Gain : R , Impédance d'entrée $Z_e = 0 \Omega$ (ampli op parfait), Impédance de sortie $Z_s = 0 \Omega$.

Bande passante à -3dB: $f = 1/2\pi RC$ avec C cablée ou parasite (**stray capacitance**)

C parasite = 0.5 pF typique, $R = 10^9 \Omega$ alors $f \sim 300$ Hz (technique électrométrie requise)

APPLICATION AU CONTRÔLE DU DEVERSEMENT D'UN SYNCHROTRON



- 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 (\approx pA)

- Permet la mesure de la composante continue du courant du faisceau

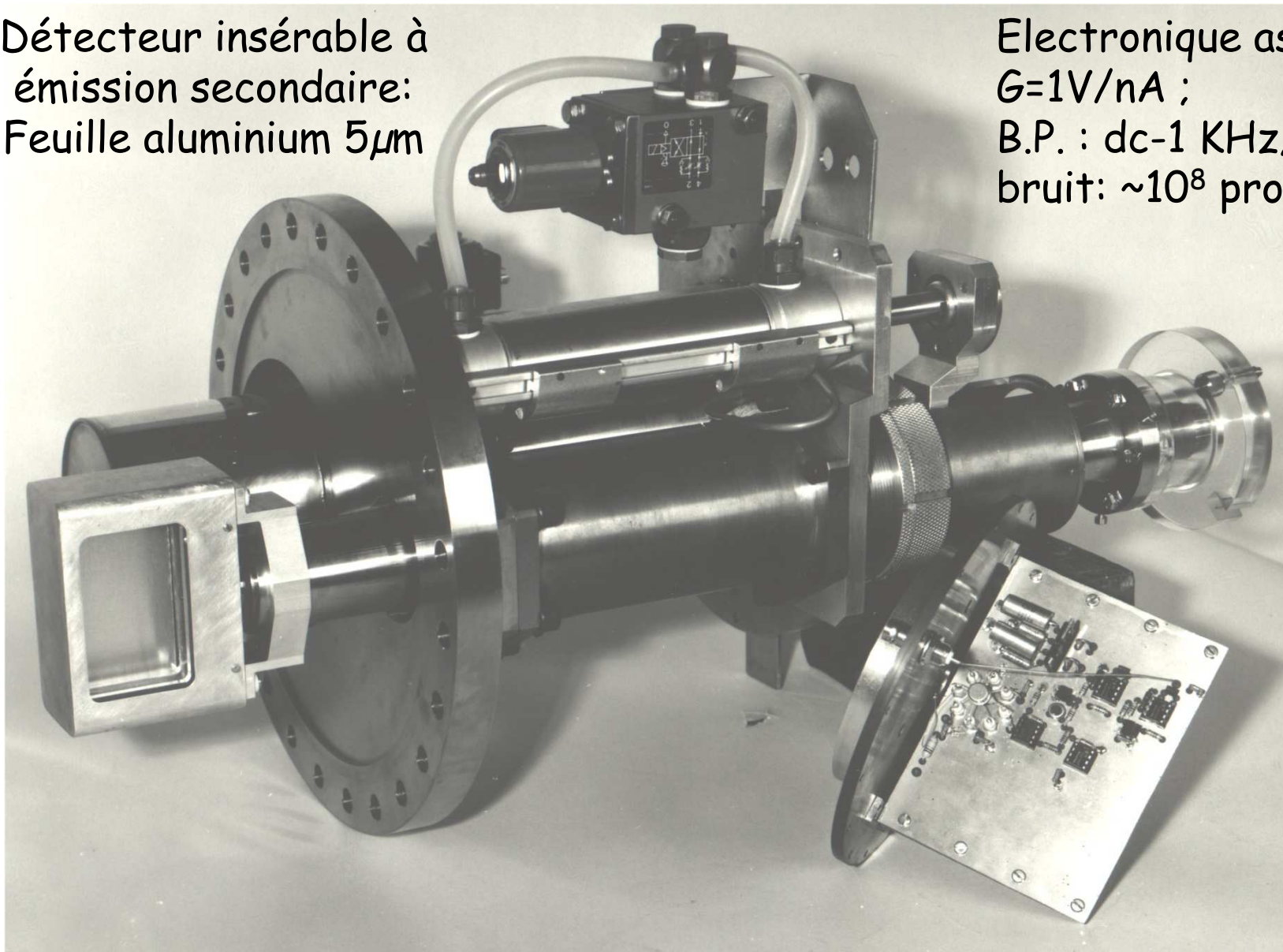
- Amélioration de la sensibilité:

- multiplication des feuilles émissives

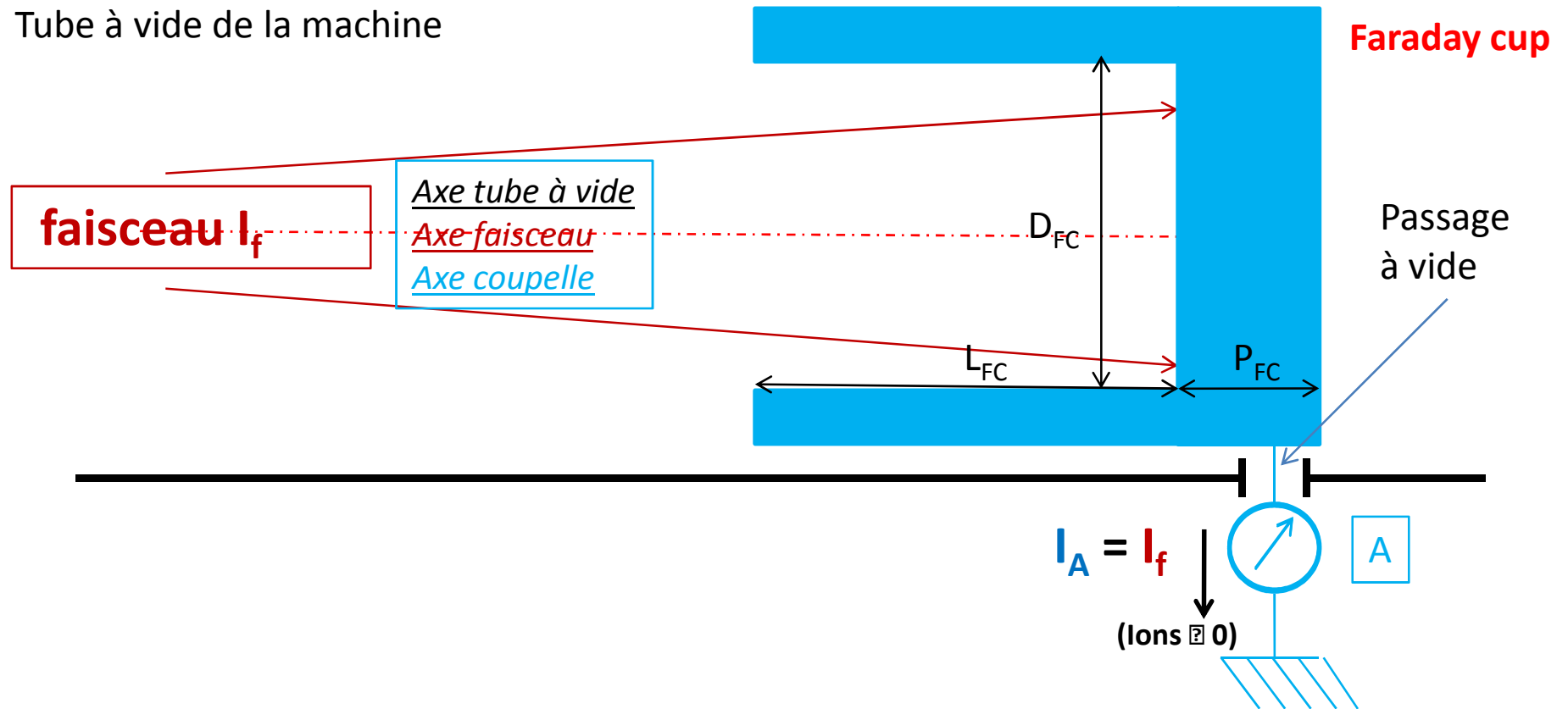
- recouvrir la feuille métallique d'une couche émissive : KCl par exemple

Détecteur insérable à
émission secondaire:
Feuille aluminium $5\mu\text{m}$

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



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

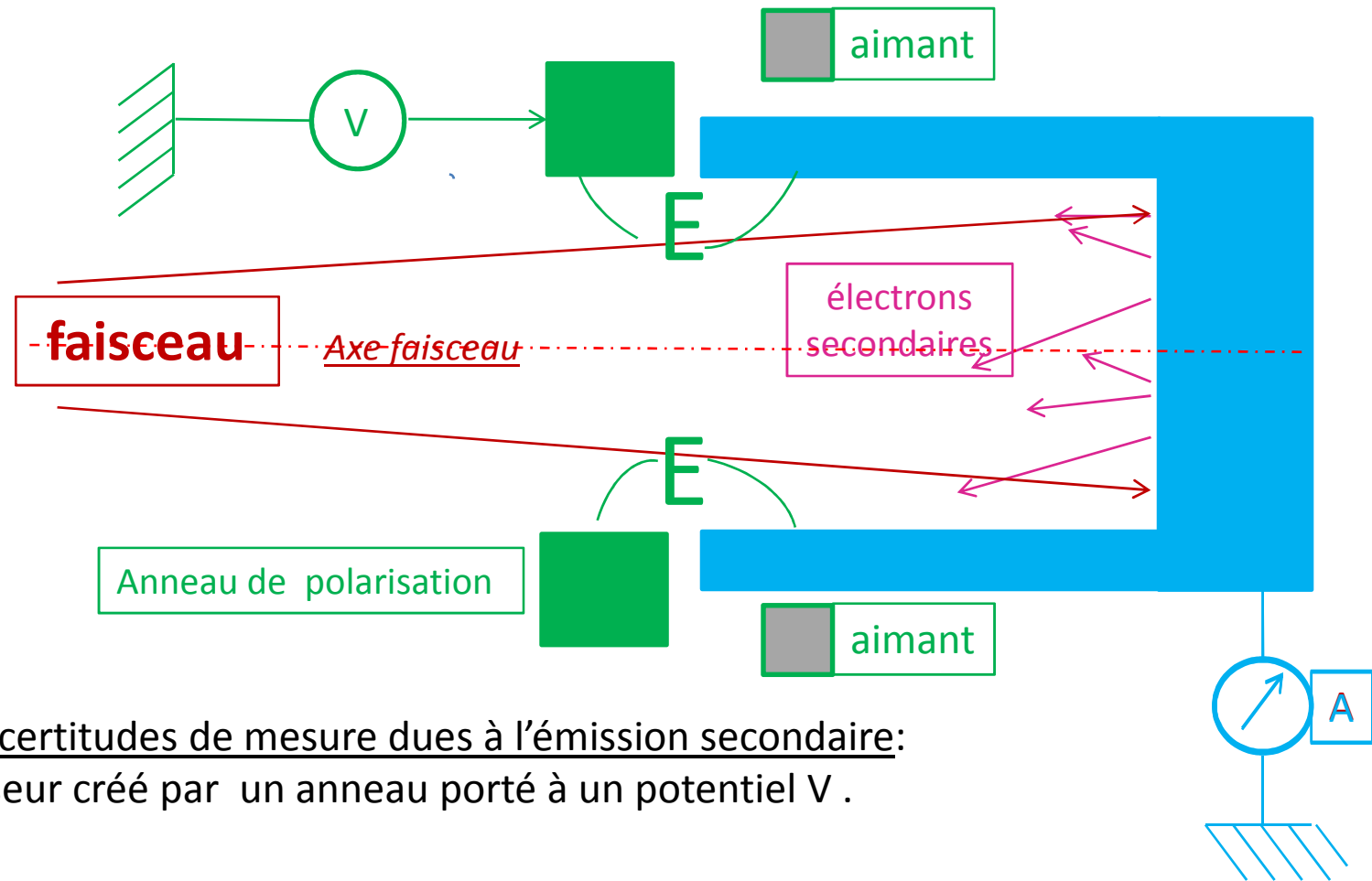
Erreur de mesure due à l'émission secondaire électronique de la coupelle de Faraday

- $L_{FC} \propto D_{FC}$ pour une diminution de l'effet de l'émission secondaire en $\cos \theta$
- $L_{FC} \sim D_{FC}$ alors $I_A \neq I_f$:
- Ions positifs incidents: I_A et I_f de même sens et $I_A = I_f + \delta I_f$ (quelle que soit la valeur du coefficient d'E.S. δ)
- Ions négatifs incidents: $I_A = I_f - \delta I_f$.

{	I_A et I_f de même sens si la valeur du coefficient d'E.S. $\delta \leq 1$
}	I_A et I_f de sens contraire si la valeur du coefficient d'E.S. $\delta > 1$

Solution

- Création d'un champ électrique «repousseur» E par une grille portée à un potentiel V: Une centaine de Volt suffit car les électrons secondaires ont une énergie inférieure à 50 V
- Etablissement d'un champ d'induction magnétique « repousseur » par un aimant:
- Combinaison des deux solutions précédentes.



Correction des incertitudes de mesure dues à l'émission secondaire:
 Champ E repousseur créé par un anneau porté à un potentiel V .

Autre cause d'erreur:

Sputtering : dépôt d'atomes sur les isolants. L' isolation décroît: le courant de fuite augmente

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.

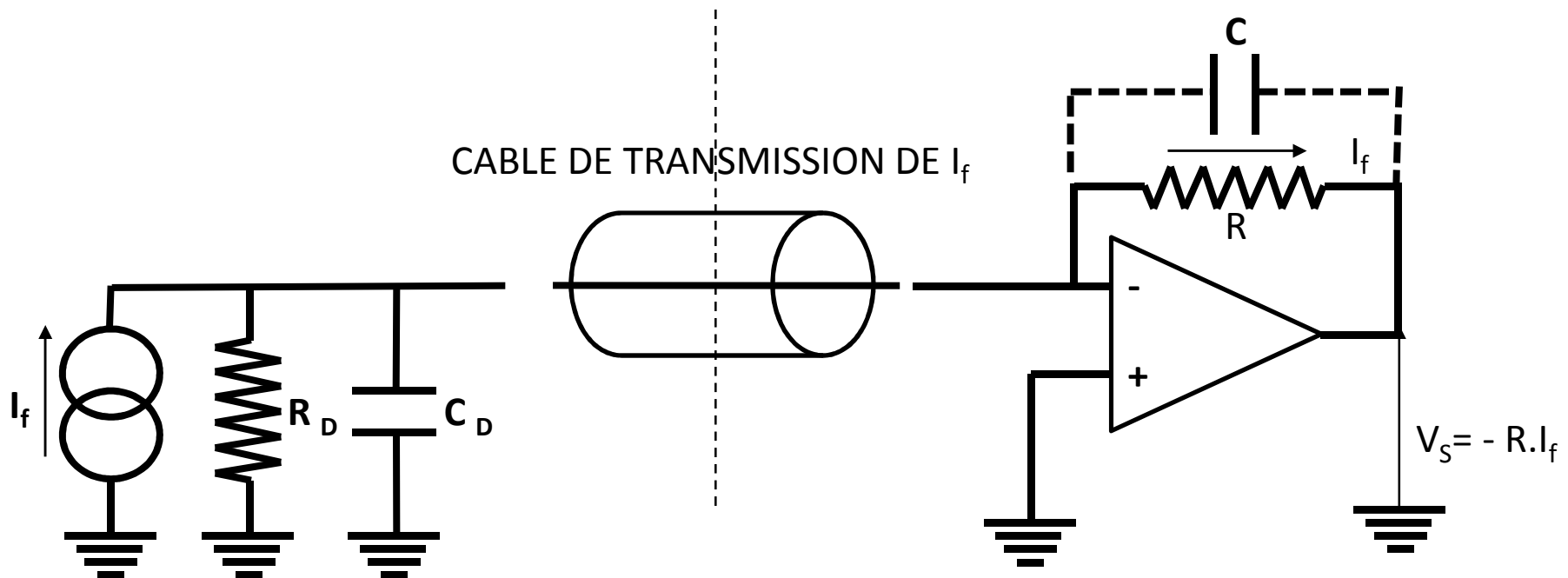
- Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) produit un rayonnement de photons X. Un blindage est nécessaire (généralement du plomb). L'encombrement de la coupelle augmente.

- 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 :

On a vu plus haut que l'énergie perdue par rayonnement varie comme Z^2 et l'énergie perdue par ionisation et excitation varie comme Z . L'énergie critique à laquelle les deux pertes sont égales dépend du matériau et on est ainsi conduit à interposer une couche de matériau de faible Z pour arrêter les électrons incidents. Une couche de matériau à plus fort Z placée derrière la première couche arrête les charges produites par Bremsstrahlung.

SCHEMA EQUIVALENT DETECTEUR

CONVERTISSEUR COURANT TENSION



R_D : Resistance d'isolement de la coupelle de Faraday (supérieure à $1 \text{ G}\Omega$)

C_D : Capacité de la Coupelle par rapport à la masse ($\sim 100 \text{ pF}$)

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

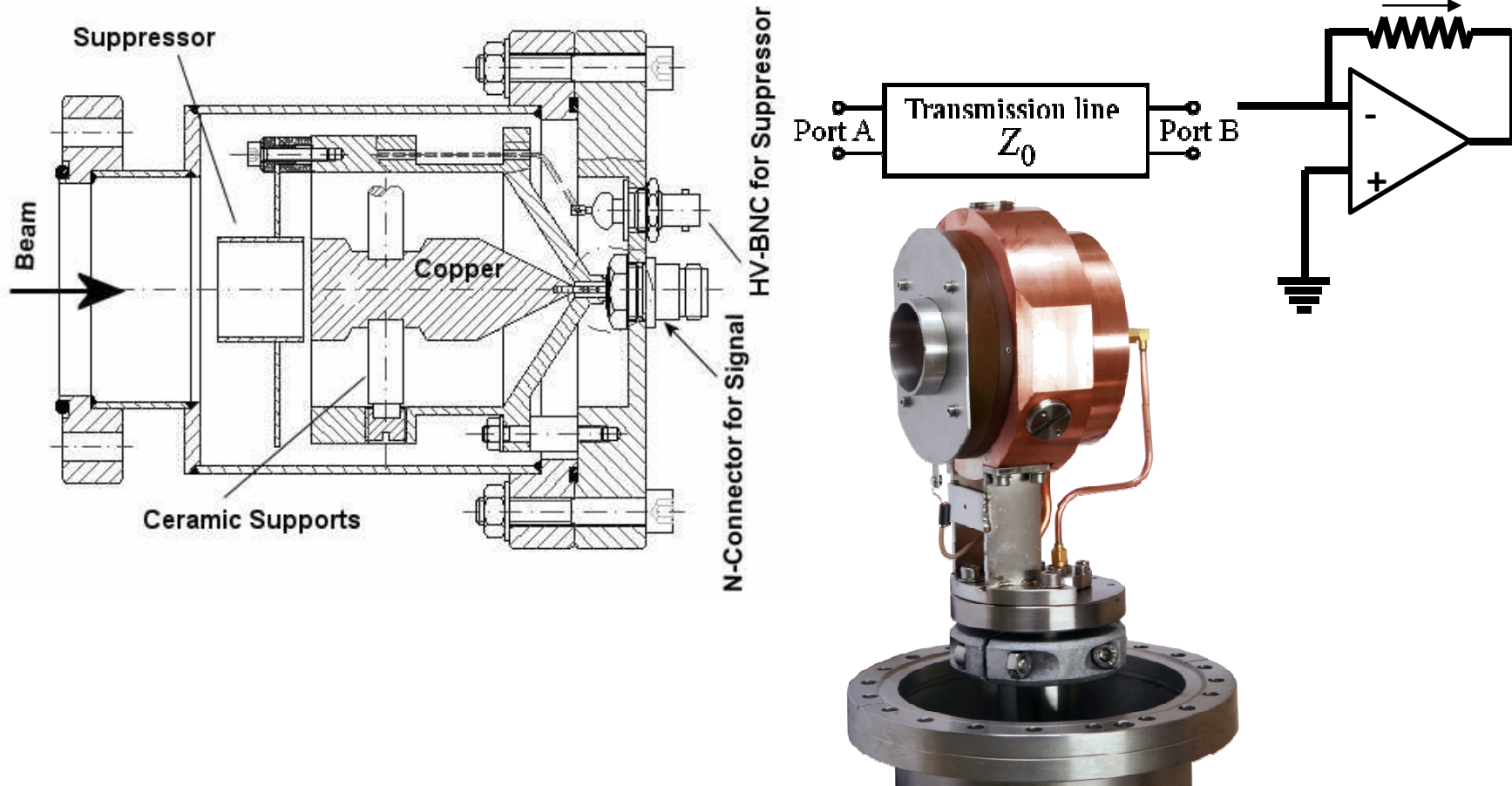
Performances du montage:

Gain : R , Impédance d'entrée $Z_e = 0 \text{ }\Omega$ (ampli op parfait), Impédance de sortie $Z_s = 0 \text{ }\Omega$.

Bande passante à -3dB : $f = 1/2\pi RC$ avec C cablée ou parasite (**stray capacitance**)

C parasite = 0.5 pF typique, $R = 10^9 \text{ }\Omega$ alors $f \sim 300 \text{ Hz}$ (technique électrométrie requise)

Les Coupelles décrites précédemment ne permettent pas toujours l'observation temporelle des bunch par suite de la limitation intrinsèque de la bande passante.



Coupelle de Faraday rapide de SPIRAL 2

La coupelle est considérée comme un dispositif hyperfréquence couplée à un convertiseur I / V ou un amplificateur de tension

Utilisation des coupelles de Faraday de faible puissance dans les accélérateurs de particules:

- Faisceau d'ions lourds à basse énergie (sensiblement inférieure à ~ 10 MeV protons):
Au dessus les réactions nucléaires apparaissent , les mesures deviennent fausses
- Faisceau d'électrons incidents: les effets liés au rayonnement de freinage (Bremsstrahlung) deviennent importants au dessus de 10 MeV environ dans les matériaux usuellement utilisés .
- Ions lourds de puissance «modérée» :
A basse énergie le parcours des ions lourds est très faible (4 mm de Cu arrêtent 50 MeV protons). L'apport local d'énergie devient très important et la coupelle devient difficile à refroidir.
Quelques kW de puissance sont un maximum à envisager.

- Les coupelles de Faraday sont généralement utilisées dans les sections de basse énergie: sources d'ions, après les RFQ , dans les toutes premières sections de LINAC. Dans ces sections la place disponible est généralement très faible. (5 MeV protons sont arrêtés par 0,08 mm de Cu)
- Les coupelles de Faraday non refroidies sont particulièrement intéressantes pour la mesure des faisceaux continus de faible intensité.(domaine du fA à $1\mu\text{A}$)
- Les coupelles de Faraday servent également de bloc d'arrêt faisceau (pendant le réglage des machines)

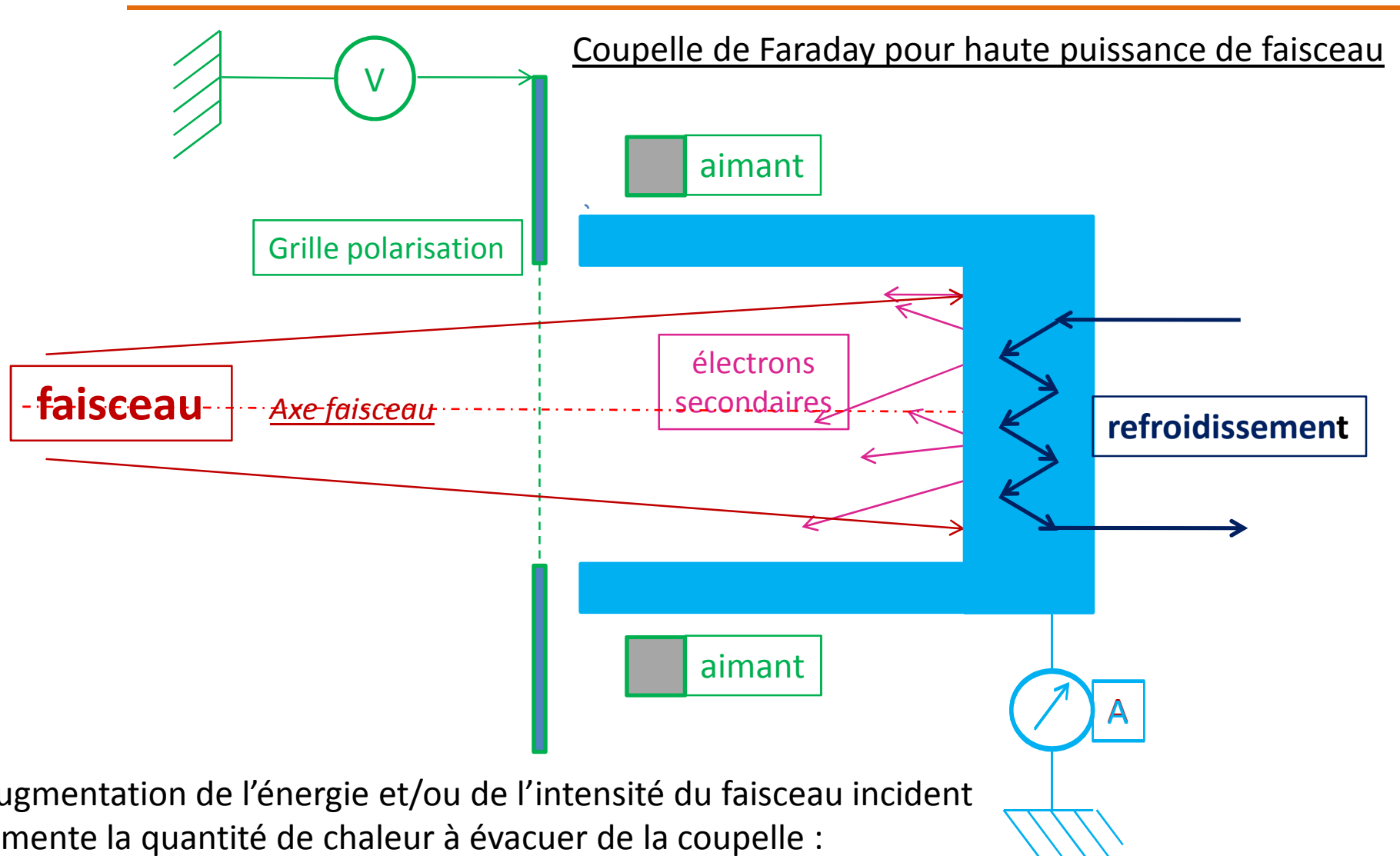
Utilisation des coupelles de Faraday à haute puissance de faisceau incident:

- L'utilisation des C.F. comme diagnostics de faisceau dans les accélérateurs est généralement limitée par les processus physiques à des faisceaux d'énergie incidente ≥ 10 MeV.
- La puissance admissible d'une C.F. non refroidie est de qq W. On considère donc ici $I_f \approx 1 \mu\text{A}$

Bilan énergétique dans les Coupelles de Faraday:

- Apport d'énergie dans la coupelle: Energie perdue par le faisceau incident. A considérer:
 - Structure « temporelle » de l'apport: Fonctionnement C.W. ou pulsé de l'accélérateur (structure temporelle du faisceau incident)
 - Structure « spatiale » de l'apport: densité de puissance par unité de surface (dimensions transverses du faisceau incident)
 - Longueur de pénétration du faisceau incident (énergie du faisceau) dans la coupelle. Ions lourds: La puissance déposée en fin de parcours est importante (Pic de Bragg)
 - Possibilité de transfert thermique et de dissipation de l'énergie:
 - Conduction et convection ne peuvent s'exercer dans le vide (environnement de la C.F.)
 - Par rayonnement: Gouverné par la loi de Stefan-Boltzmann: $P = S \cdot \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$
- P : puissance rayonnée, S : surface d'émission, ϵ : émissivité qui est une caractéristique du matériau. Les valeurs typiques sont comprises entre 0.1 et 0.9

$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/M}^2/\text{K}^4$: Constante de Stefan-Boltzmann



Refroidissement des coupelles de Faraday à haute puissance de faisceau incident:

Nécessaire pour maintenir la Coupelle à une température très inférieure à la température :

- De fusion du matériau employé (destruction de la coupelle)
- D'émission électronique thermoïonique (voir chapitre profilers transverses)

Solutions possibles pour le refroidissement

➤ Par contact (à faible puissance du faisceau: qq W à QQ dizaines de W):

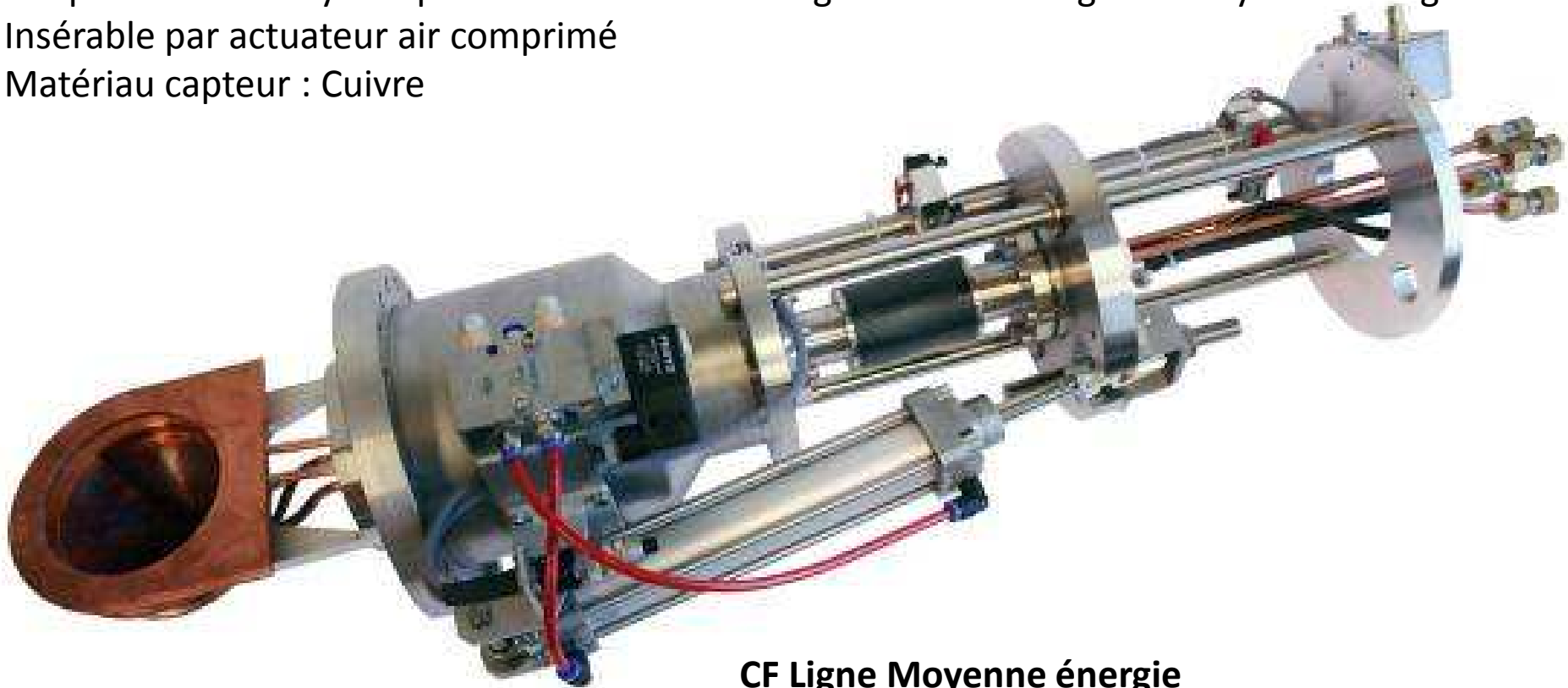
- Elle s'exerce à un niveau très faible par le conducteur central du passage à vide (négligeable)
- Interposition de matériaux isolants électriques et à haute conductivité thermique entre la coupelle et une structure conduisant la chaleur vers l'extérieur:

BeO: Oxyde de beryllium, AlN: Nitrite d'aluminium, Al_2O_3 : alumine

➤ Par circulation d'eau dé-ionisée (à forte puissance du faisceau: qq kW):

- Limitée à environ une évacuation de 100 w/cm^2 . (Le refroidissement par circulation d'eau ne dissipe que la puissance moyenne)
- L'eau même dé-ionisée crée des fuites électriques par création de couples galvaniques . La mesure du courant de coupelle peut être faussée de plusieurs nA
- L'emploi du refroidissement par circulation d'eau est limitée aux forts courants (au dessus du μA si on veut éviter les erreurs de mesures importantes).

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

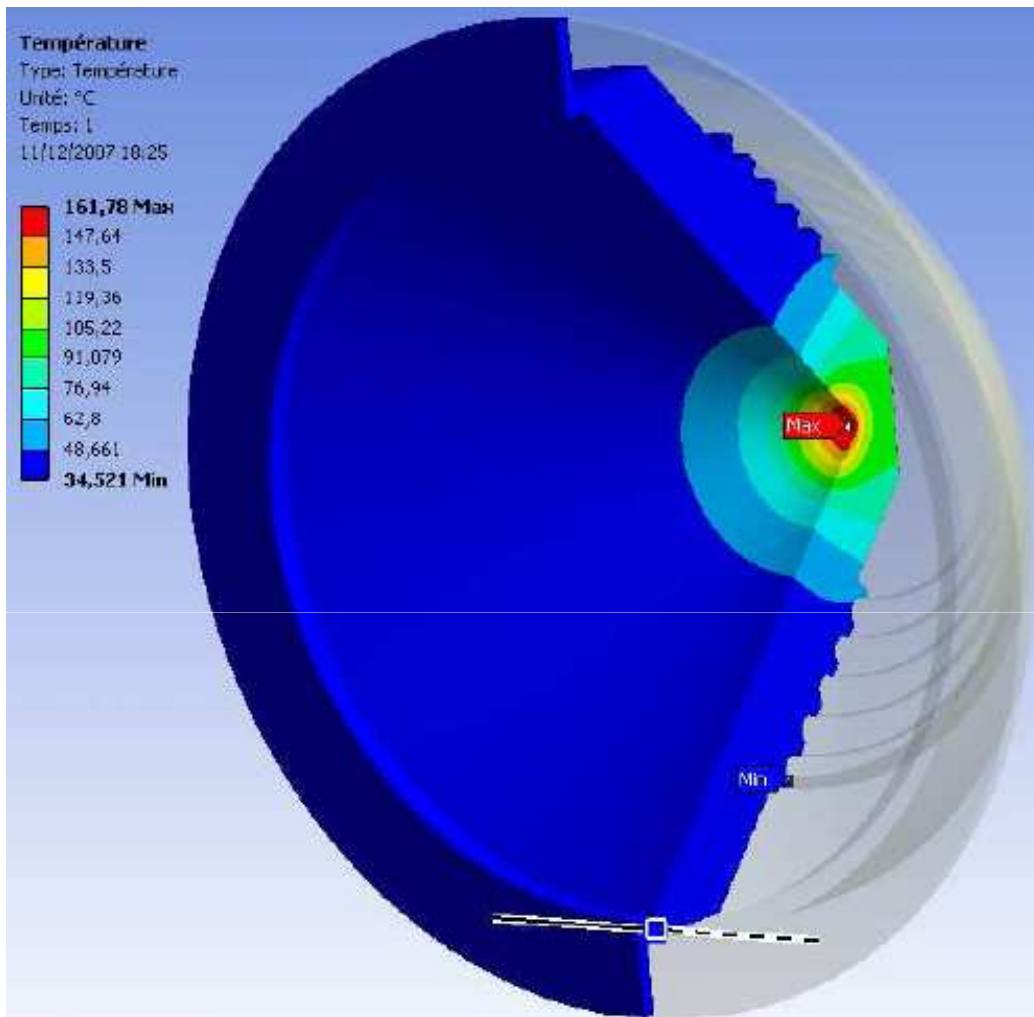
Densité puissance faisceau ($\sigma=3\text{mm}$): 2120W/cm²

CF Ligne Moyenne énergie

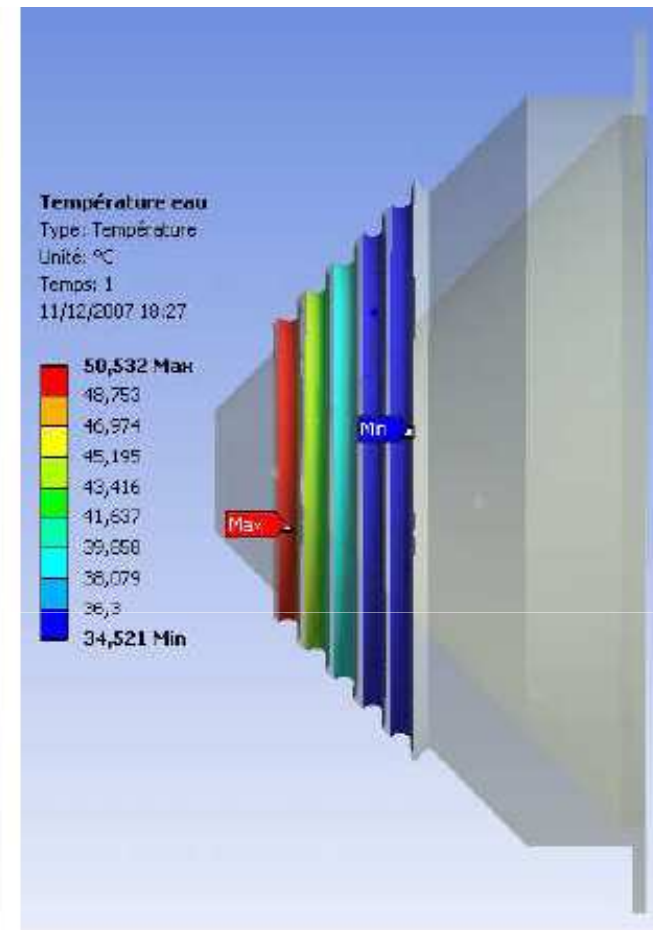
Diamètre : 60mm

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

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

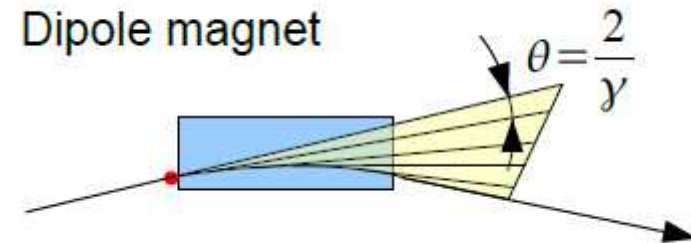
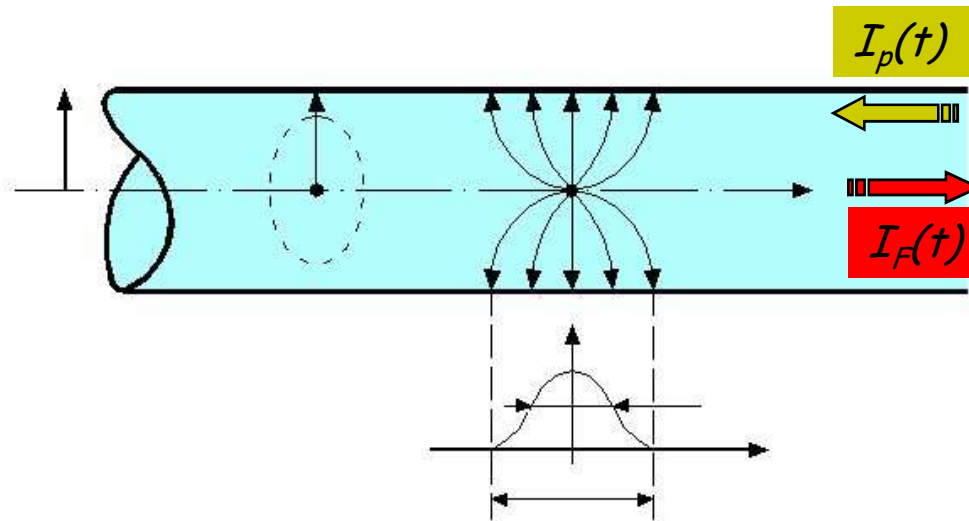


Température de la coupelle



Température face eau

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

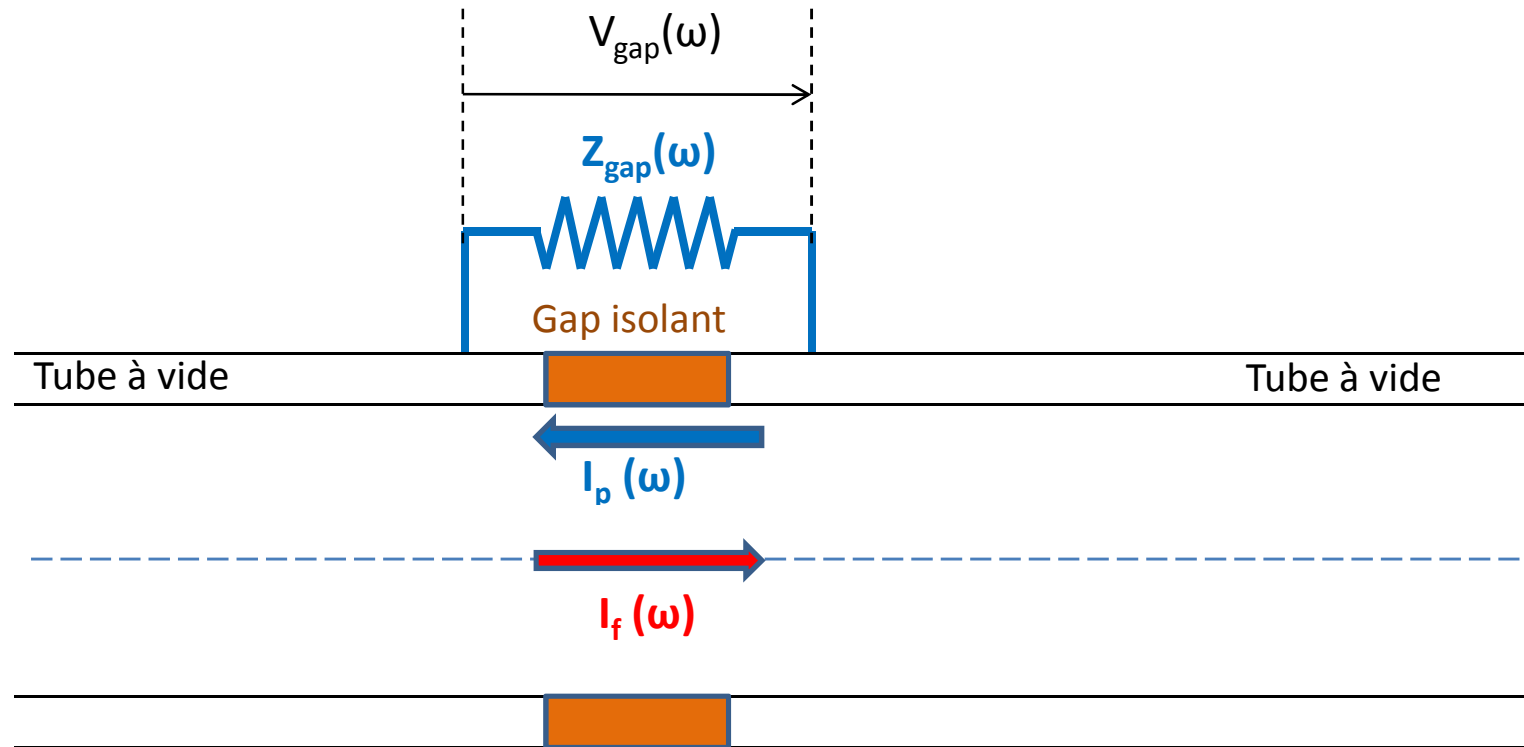


Champ non radiatif:

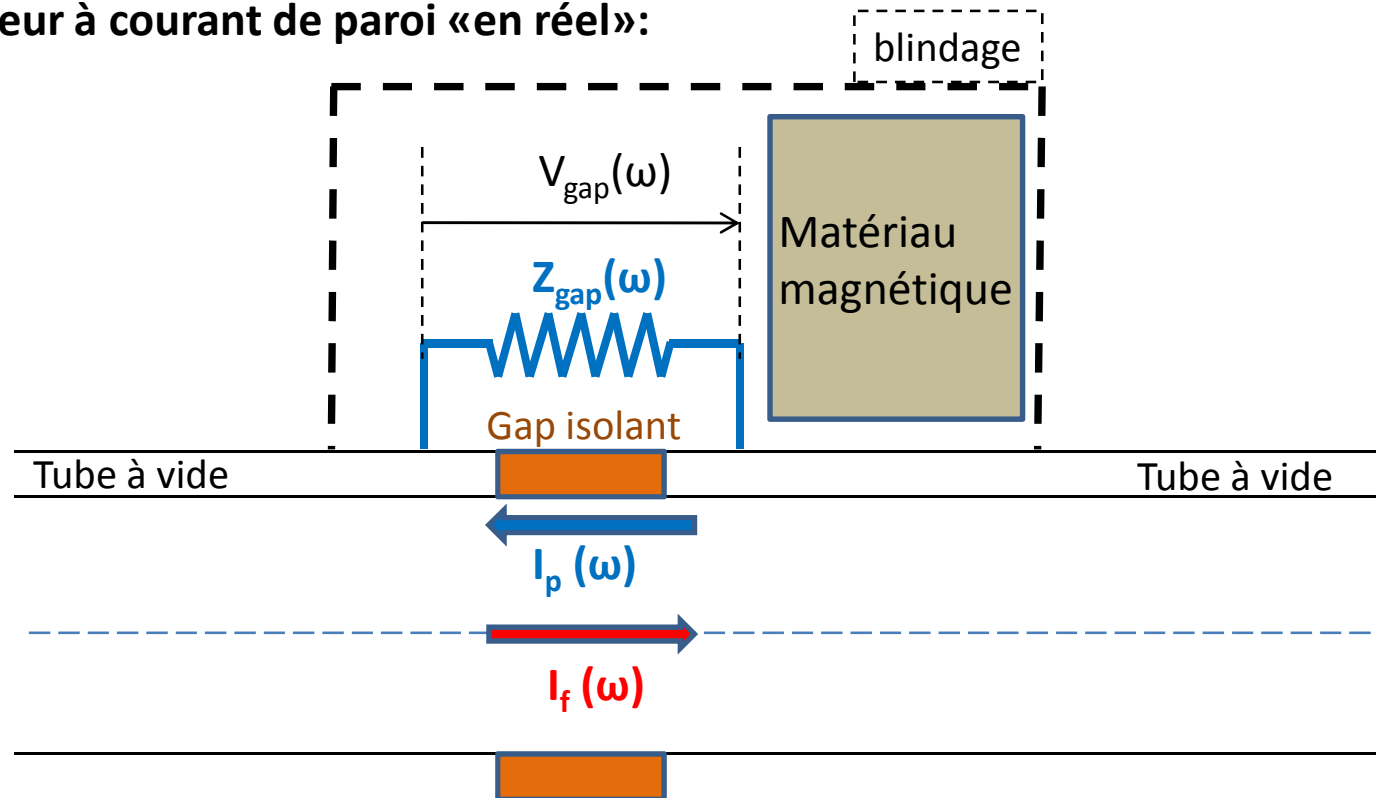
- Fréquence du champ EM associé incompatible avec dimensions du tube à vide pour une propagation (qq 100 Mhz)
- Création d'un courant de paroi
- Le détecteur mesure localement les propriétés du faisceau

Champ radiatif:

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

DéTECTEUR à courant de paroi : Wall current monitor

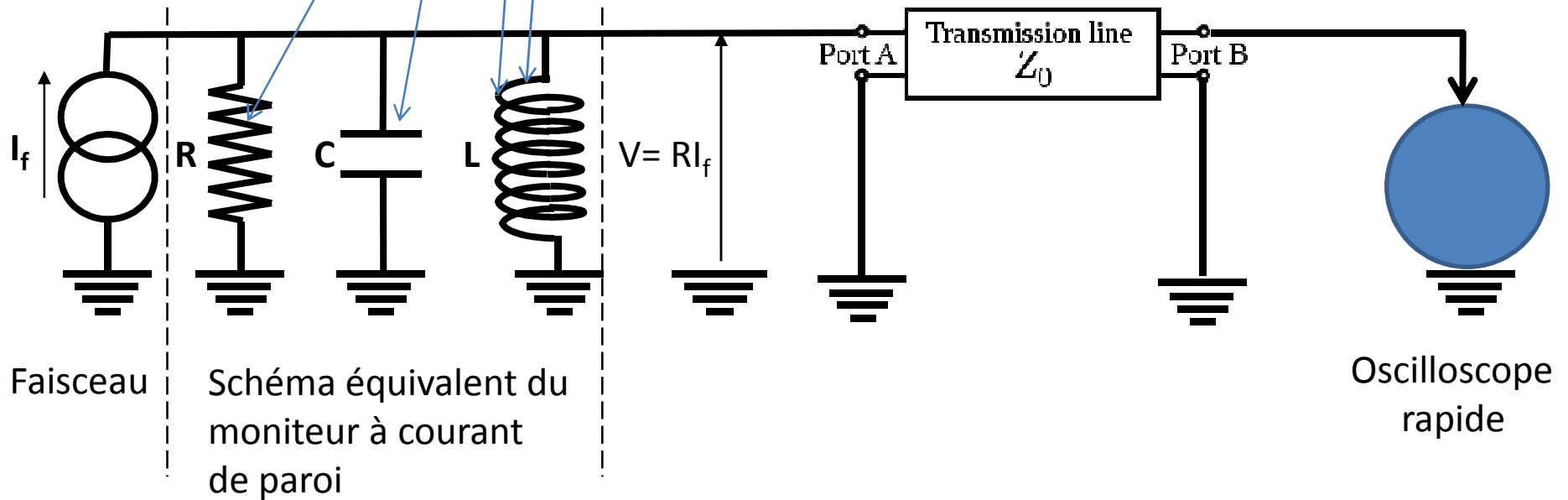
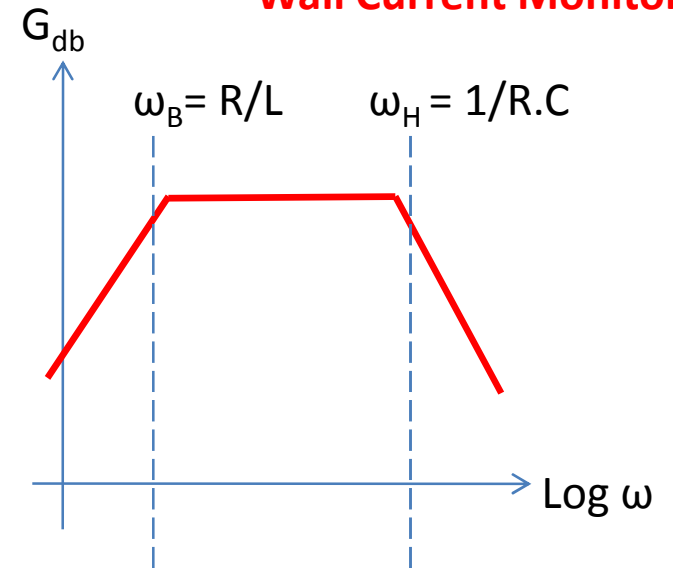
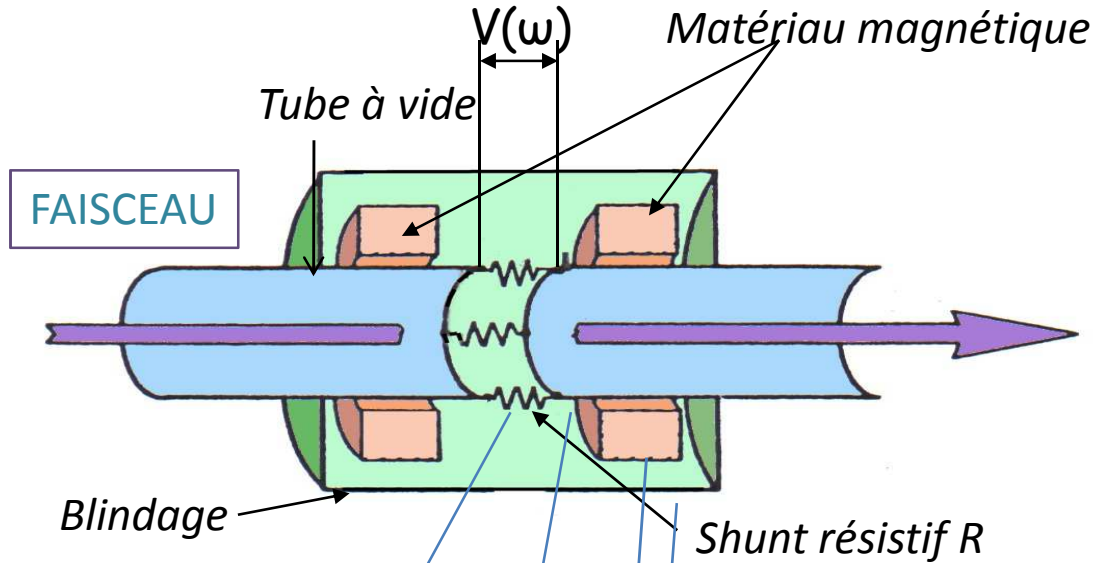
Principe de fonctionnement: Le tube à vide est interrompu par un gap isolant. Le courant de paroi doit circuler dans une résistance «shunt» connectée aux bornes du gap isolant aux bornes duquel la tension est proportionnelle au courant de paroi donc au courant du faisceau.

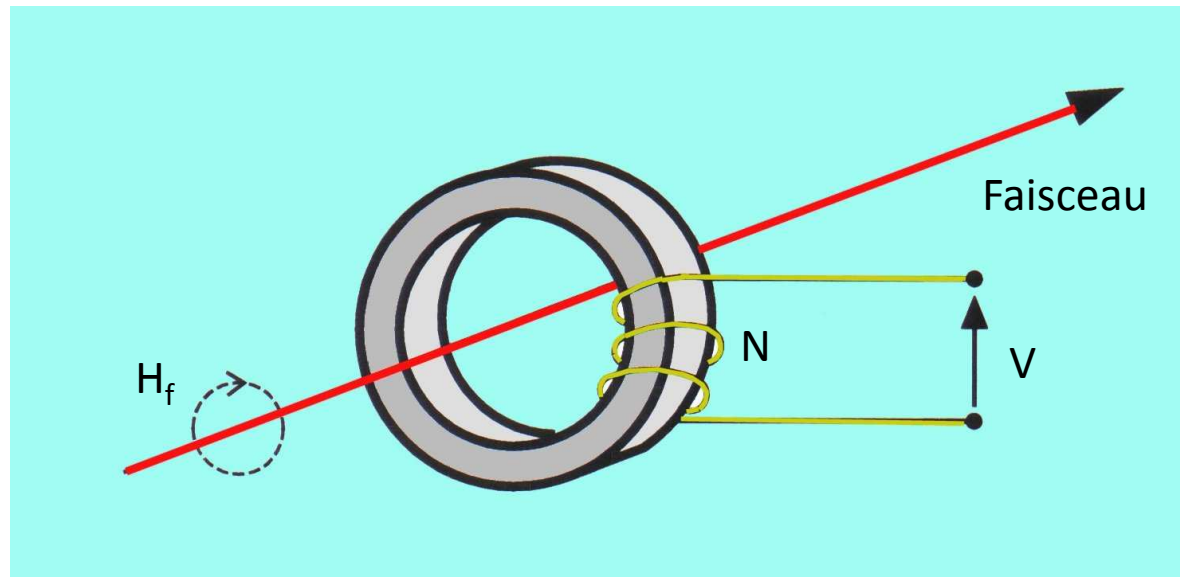
DéTECTEUR à courant de paroi «en réel»:

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)

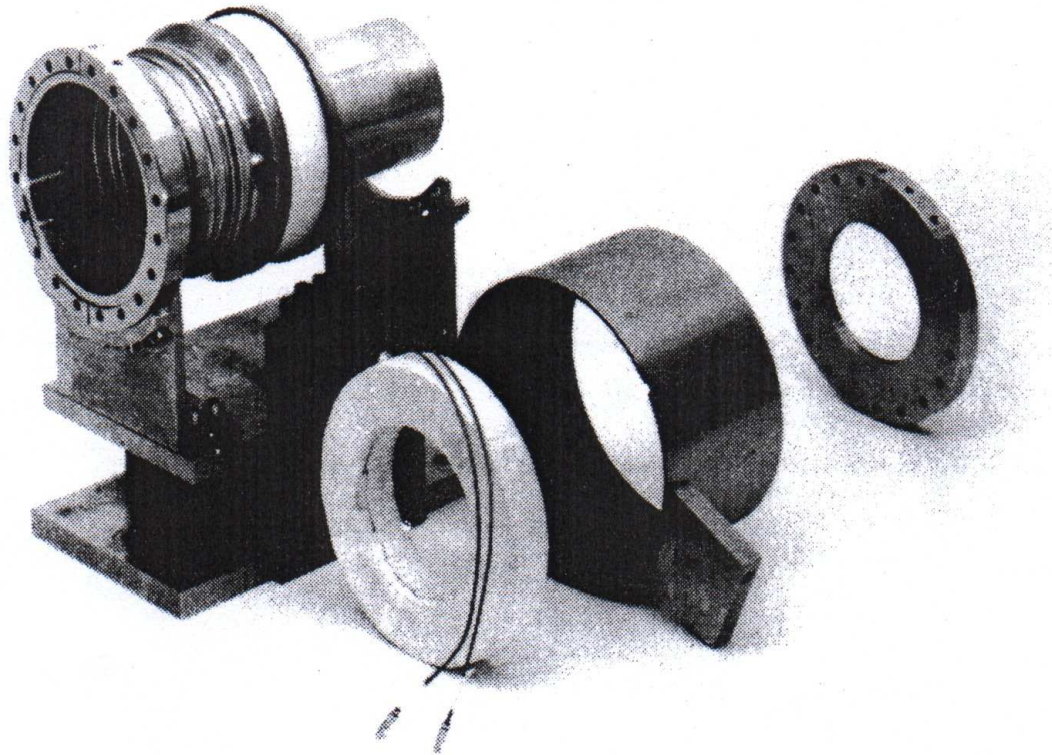
Wall Current Monitor



Beam Current Transformer

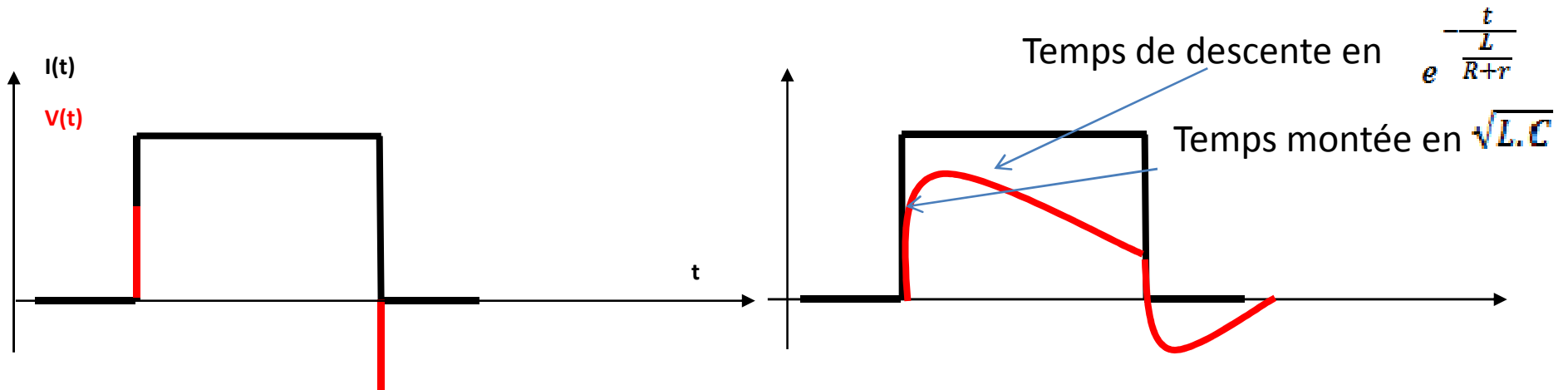
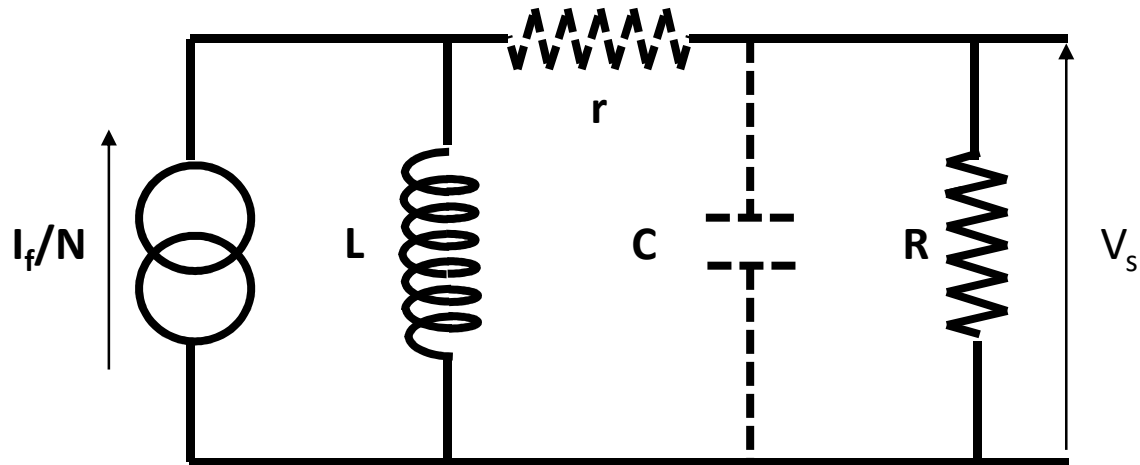
Principe de fonctionnement: Le faisceau passe à travers un tore à haute perméabilité magnétique autour duquel sont enroulées N spires. La loi de l'induction donne pour la tension V secondaire:

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



Éléments constitutifs d'un transformateur d'intensité.
Exemple: Transformateur pour la ligne de transfert pour ISR (CERN)

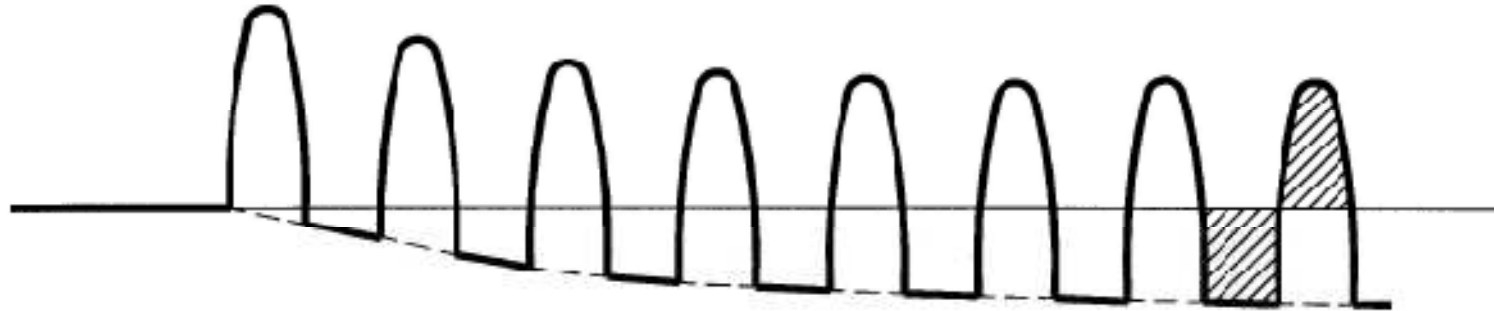
Bande passante du transformateur réel: réponse en basse fréquence C est négligé)



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 .

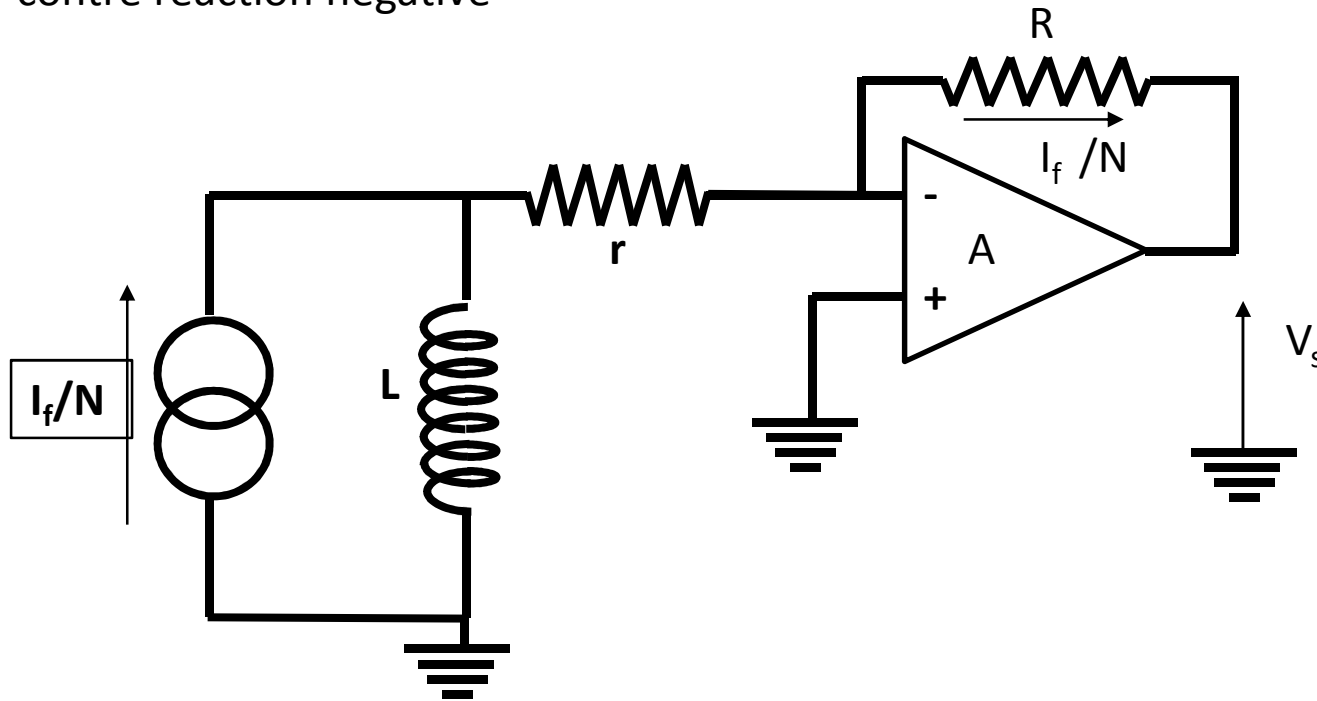


Réponse d'un transformateur réel à un train d'impulsion . La durée d'une impulsion est inférieure à la constante de temps de descente du transformateur. La composante continue N'est pas transmise .

Utilisation du transformateur de courant :

- Dispositif complètement transparent au faisceau: utilisé si le faisceau passe plusieurs fois (synchrotrons)
 - La «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

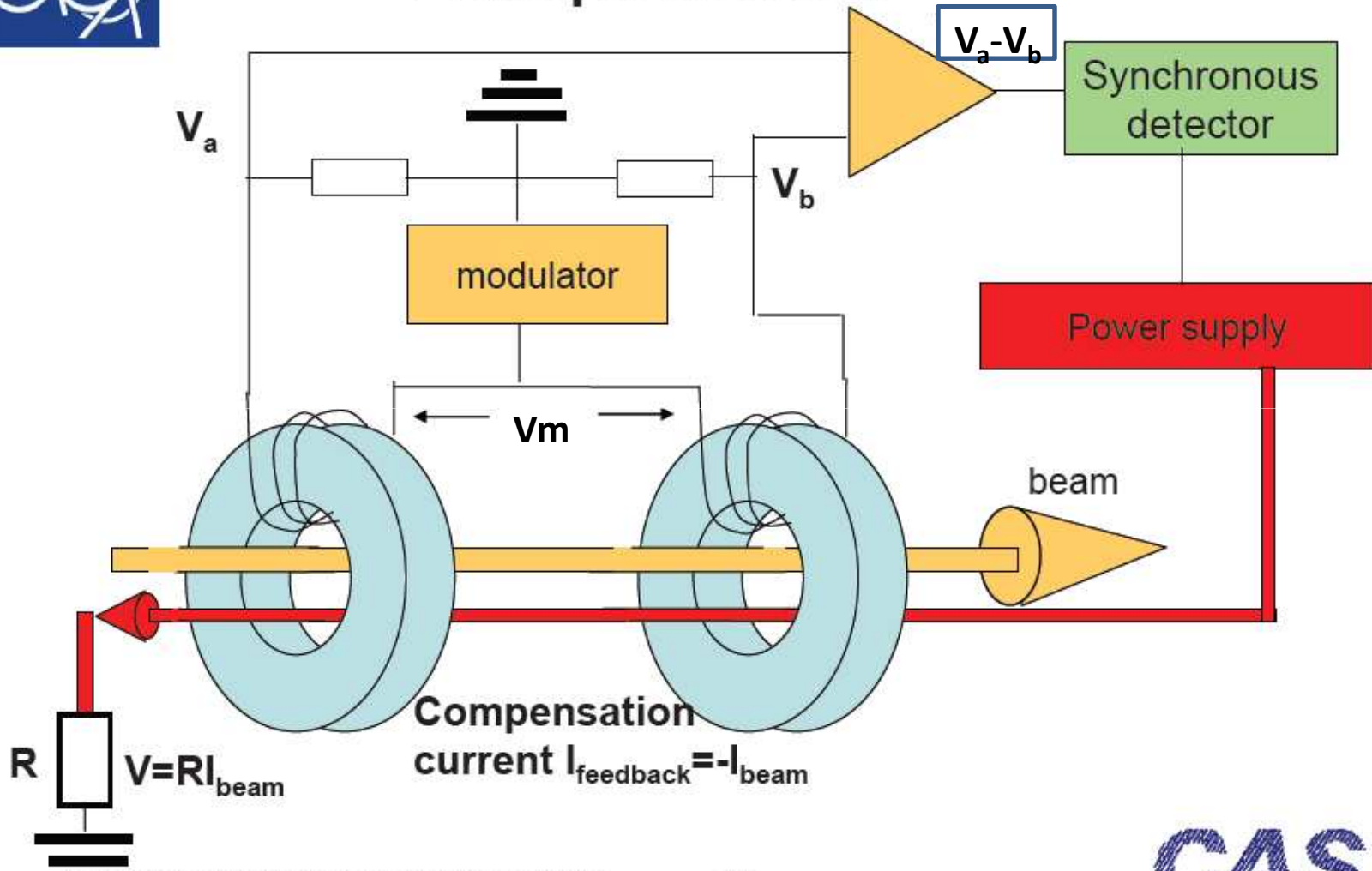


Le montage actif permet d'obtenir une constante de temps basse L/r ne dépendant que des caractéristiques de la self. La sensibilité en R/N du transformateur idéal est conservée.

faisant apparaître la nouvelle constante de temps: L/r et non plus $\tau = \frac{L}{R+r}$



Principle of DCCT



U. Raich CERN Accelerator School 2005

27



- En pratique:

- Le signal de polarisation a une fréquence de quelques centaines de Hz à plusieurs kHz avec les matériaux magnétiques actuels: matériau nano cristallin ou amorphe ($\mu_r=10^5$)
- Par conséquent la bande passante utile ne dépasse pas quelques dizaines à centaines de Hz
- Les réalisations commerciales les plus récentes ont des courants de polarisation atteignant la centaine de KHz et donc des bandes passantes utiles de plusieurs KHz.
- Par principe de fonctionnement du DCCT, les caractéristiques magnétiques des deux tores doivent être aussi identiques que possible. C'est la principale difficulté à surmonter pour la construction d'un DCCT.
- Les dérives en fonction de la température sont à considérer car elles peuvent influencer sur les caractéristiques magnétiques des matériaux.
- Les transformateurs doivent être blindés contre les champs magnétiques extérieurs.
- Un circuit de démagnétisation des tores (annulation du champ rémanent) doit être utilisé à chaque changement de type de fonctionnement du DCCT : mise en route, après intervention..

Tore gauche: Transformateur DC

300 μ A- 1 A;

B.P.: D.C. - 20 kHz (200 kHz)

Résolution: 2 μ A

Rayon int.: 135 mm

Rayon ext.: 145 mm

Hauteur tore: 10 mm

Matériau : Vitrovac 6025F $\mu = 10^5$

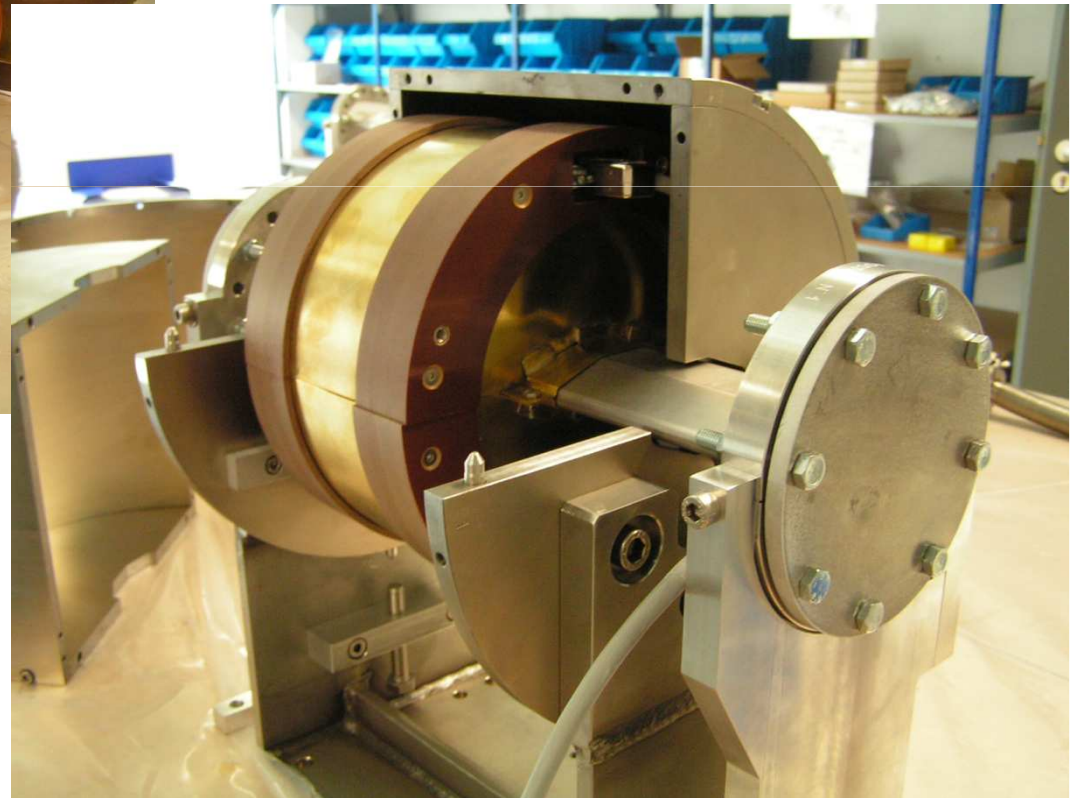
Tore milieu : Transformateur AC
(correction transformateur DC)

Tore droite: Transformateur AC
rapide : $\zeta \sim 0.5 \mu$ s
(contrôle injecteur)

Gap isolant: alumine



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

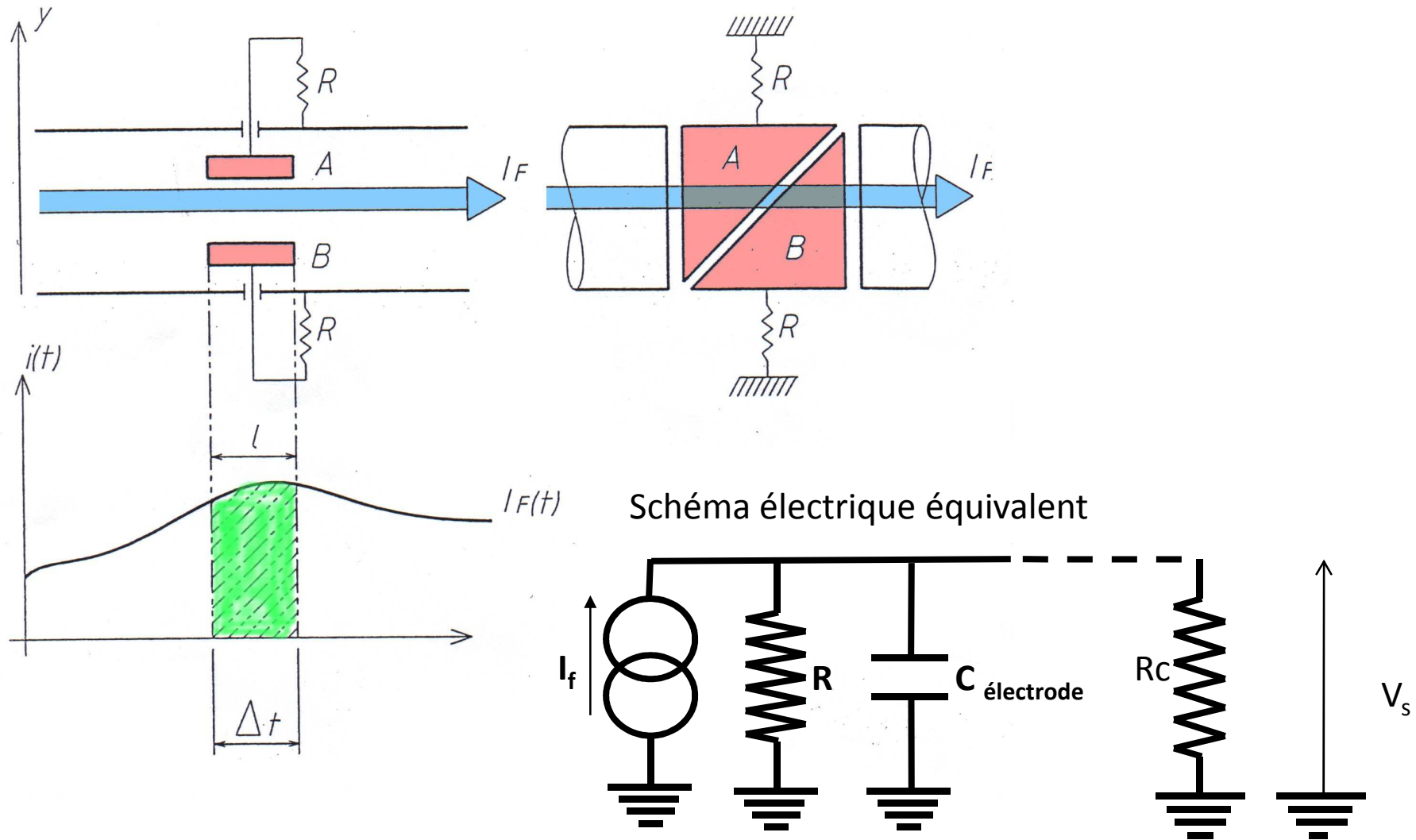




Exemple de réalisation d'une
électrode capacitive

Electrode pour accélérateur « IPHI »
(Mesure de l'énergie par temps de vol)

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



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 l'impédance de transfert Z_t (inversement proportionnelle au rayon du tube à vide) et par conséquent la sensibilité.
- L'impédance de transfert étant également proportionnelle à la longueur de l'électrode, on est donc 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.

- 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 de ces amplificateurs peut atteindre une centaine de MHz (naturellement fonction du niveau du signal d'entrée).

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

Fréquences des machines à électrons:

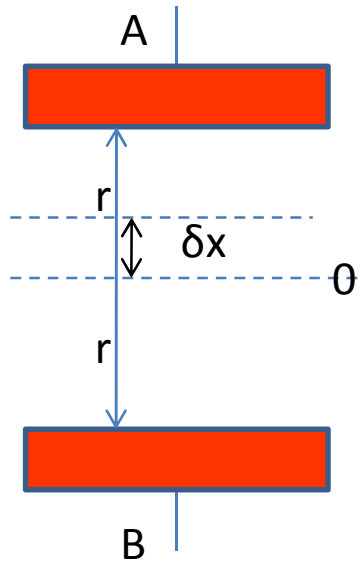
- synchrotrons: plusieurs centaines de MHz ; Linac à électrons: 3 GHz

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 est alors de plusieurs dizaines de MHz.

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

En A: charge induite à une distance δx de l'axe central de la forme: $\frac{k}{(r - \delta)^2}$

En B: $\frac{k}{(r + \delta)^2}$

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

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

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

$$\frac{A - B}{A + B} = 2 \cdot \frac{\delta}{r}$$

$$\delta = \frac{r}{2} \cdot \frac{\Delta}{\Sigma}$$

L'écart de position du centre de gravité du faisceau est proportionnel au rapport de la somme et de la différence des tensions recueillies sur les résistances de charge des électrodes tant que cet écart reste petit devant le rayon du tube à vide (on néglige les termes du deuxième ordre).

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

position horizontale: $x = \frac{1}{S_x} \cdot \frac{\Delta}{\Sigma}$ position verticale: $y = \frac{1}{S_y} \cdot \frac{\Delta}{\Sigma}$

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

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

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

Le détecteur de position le plus simple est une paire de plaques conductrices formant chacune un condensateur avec le tube à vide.

- Plus le faisceau passe près de l'électrode et plus le signal induit sur l'électrode est fort.
 - La différence des signaux V_A et V_B produits par les deux électrodes opposées fournit la position du faisceau.

- Un jeu d'électrodes placé dans le plan horizontal et un jeu dans le plan vertical vont fournir la position horizontale et verticale du faisceau.

- La charge image $Q_{\text{electrode}}$ induite sur l'électrode est :

$$Q_{\text{induit}} = \frac{S_{\text{electrode}}}{S_{\text{tube à vide}}} \cdot Q_{\text{faisceau}}$$

- $S_{\text{tube à vide}}$ représente la surface totale d'une électrode qui entourerait le faisceau à l'endroit de l'électrode de mesure: $2\pi \cdot a \cdot l$.

- Le courant (I_{induit}) induit dans l'électrode s'écrit:

$$I_{\text{induit}} = \frac{dQ_{\text{induit}}}{dt} = \frac{S_{\text{electrode}}}{S_{\text{tube à vide}}} \cdot \frac{dQ_{\text{faisceau}}}{dt}$$

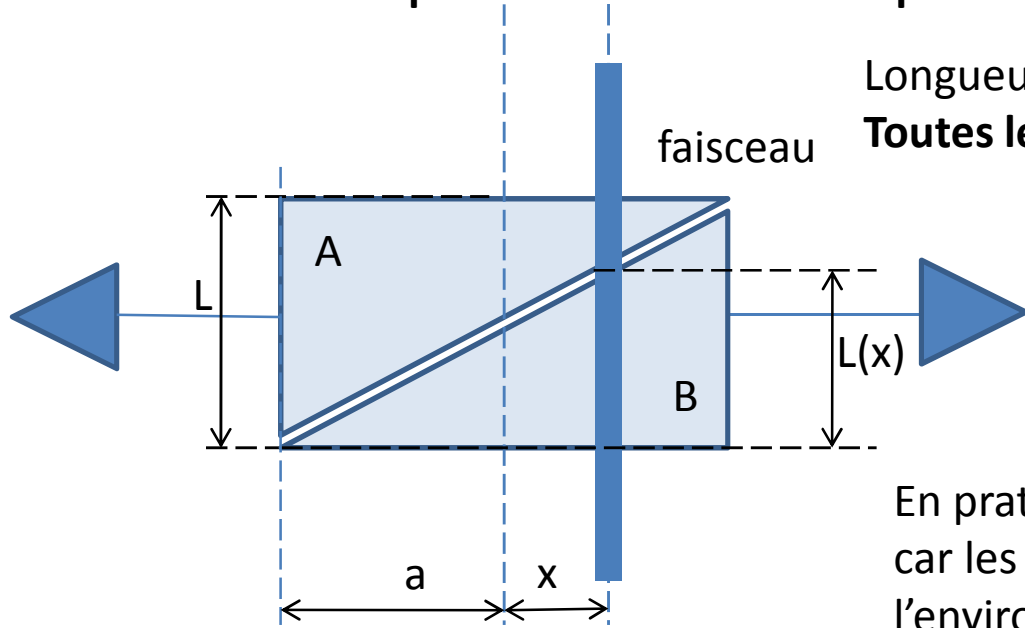
- Avec la charge du faisceau en regard du tube à vide supportant l'électrode. Si $\beta \cdot c$ est la vitesse des particules et l la longueur de l'électrode :

$$\frac{dQ_{\text{faisceau}}}{dt} = \frac{dl_{\text{faisceau}}}{dt} \cdot \frac{l}{\beta \cdot c}$$

- Donc:

$$I_{\text{induit}} = \frac{dQ_{\text{induit}}}{dt} = \frac{S_{\text{electrode}}}{S_{\text{tube à vide}}} \cdot \frac{l}{\beta \cdot c} \cdot \frac{dl_{\text{faisceau}}}{dt}$$

Linéarisation de la réponse d'un moniteur de position électrostatique



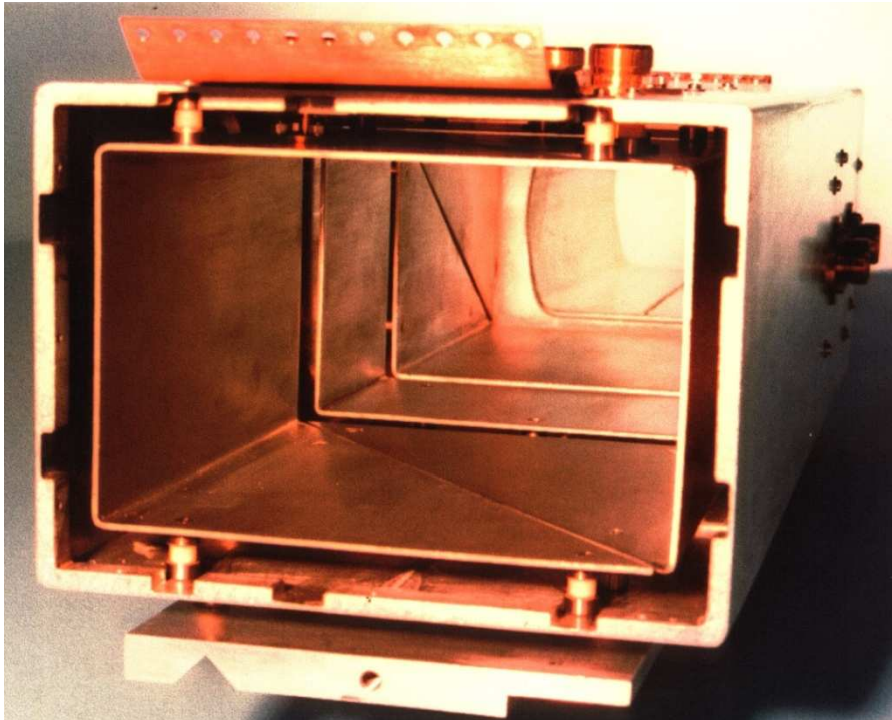
Longueur électrode << diamètre électrode :
Toutes les lignes de champ influencent l'électrode

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

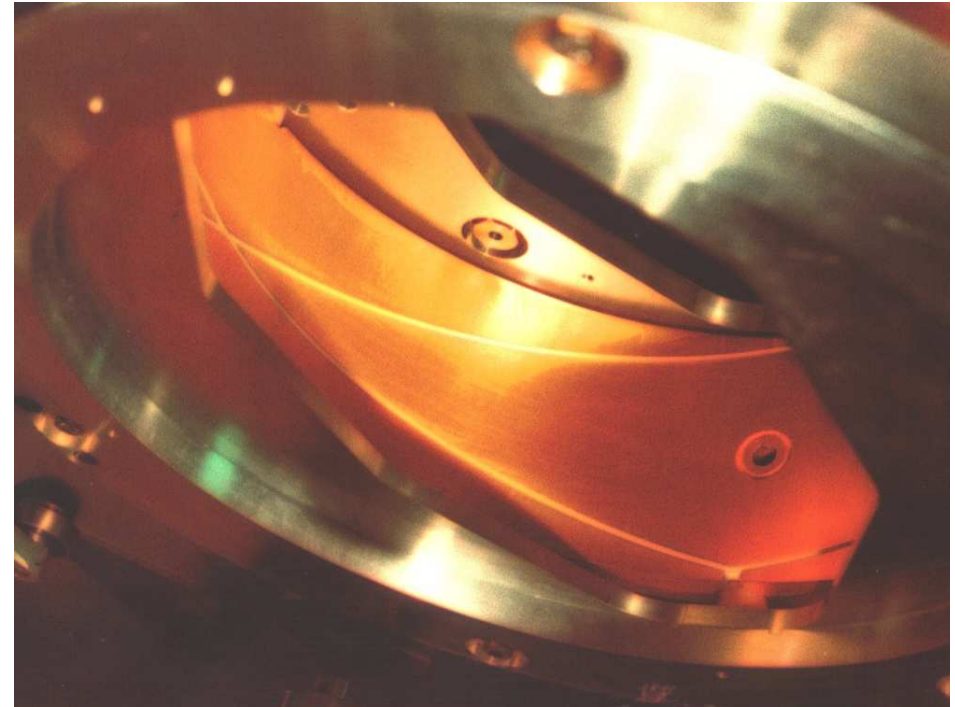
Les électrodes entourent complètement le faisceau et coupe diagonale des électrodes

$$\frac{Q_B}{L} = \frac{a+x}{2a} \quad \text{et} \quad \frac{Q_A}{L} = \frac{a-x}{2a} \quad \text{donc} \quad x = a \cdot \frac{Q_B - Q_A}{Q_B + Q_A} \quad \text{et } S = 1/a$$

Electrode capacitive rectangulaire « shoe-box » et circulaire : détection du faisceau circulant dans synchrotron « SATURNE 2 »



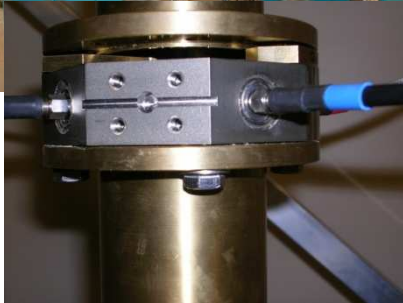
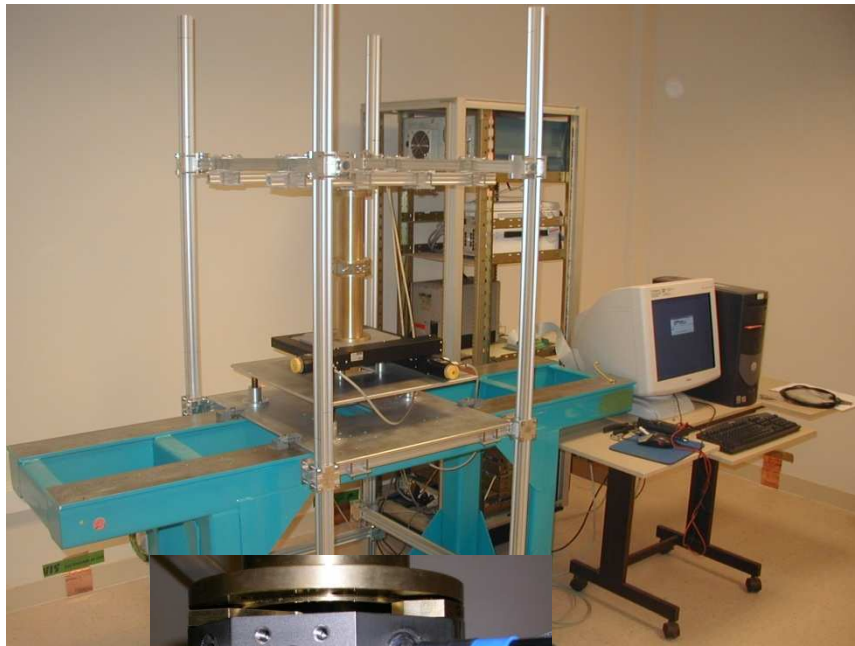
- Capacité: ~ 120 pF
Fréquence R.F. : 850 kHz - 8.8 MHz
- 10^8 à $\sim 10^{11}$ p/ bunch
 - Précision: ± 2 mm
 - Résolution: 0.5mm



- Fréquence R.F.:
- 850 kHz - 8.8 MHz
- P.U. + électronique:
- Précision absolue: 1mm
 - Résolution: 0.1mm
- Gamme de mesure: 10^9 à $2 \cdot 10^{12}$ p/bunch

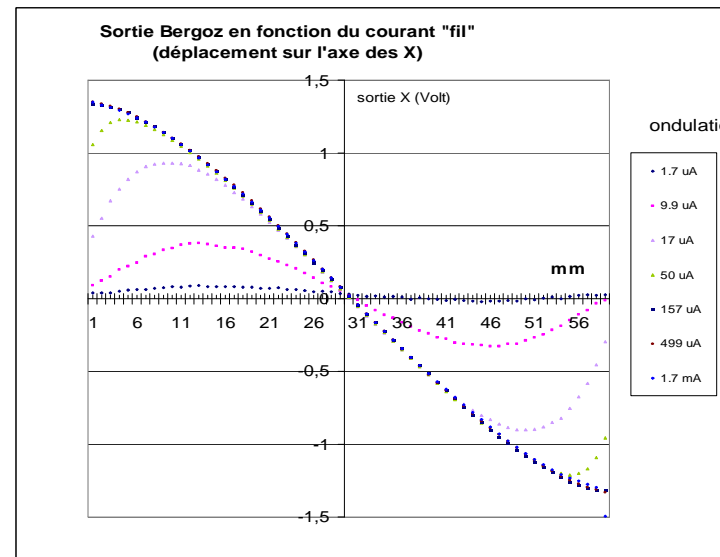
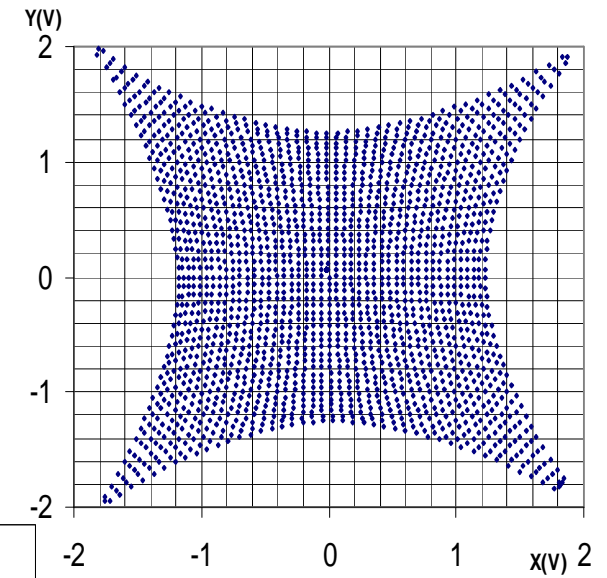
Mesure de la position du faisceau

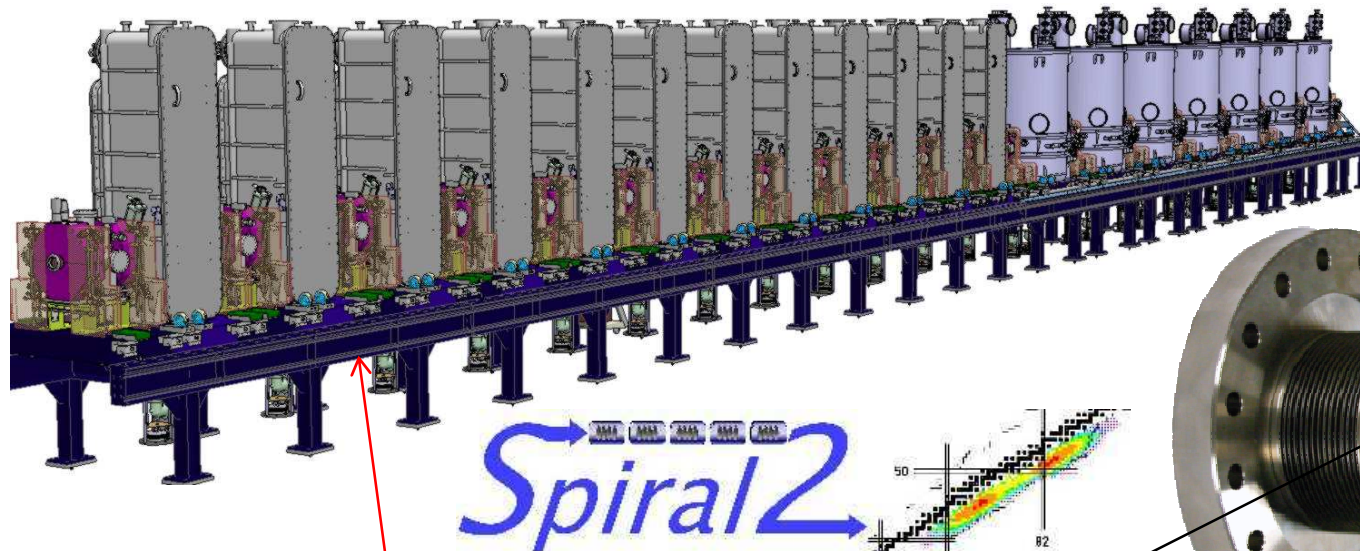
Détecteur électrostatique



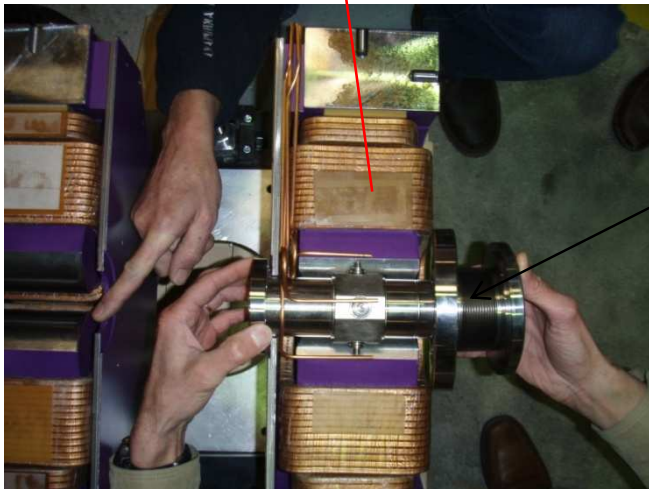
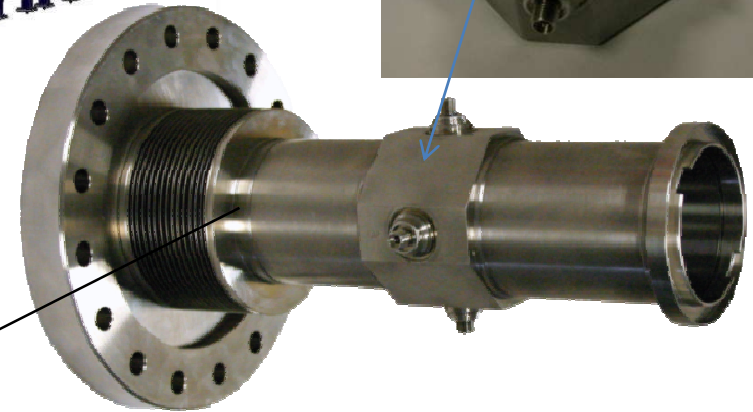
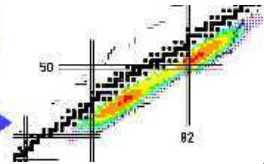
Pas de déplacement du fil: 5 μm

Mapping cartésien
1 point tous les mm





Spiral2

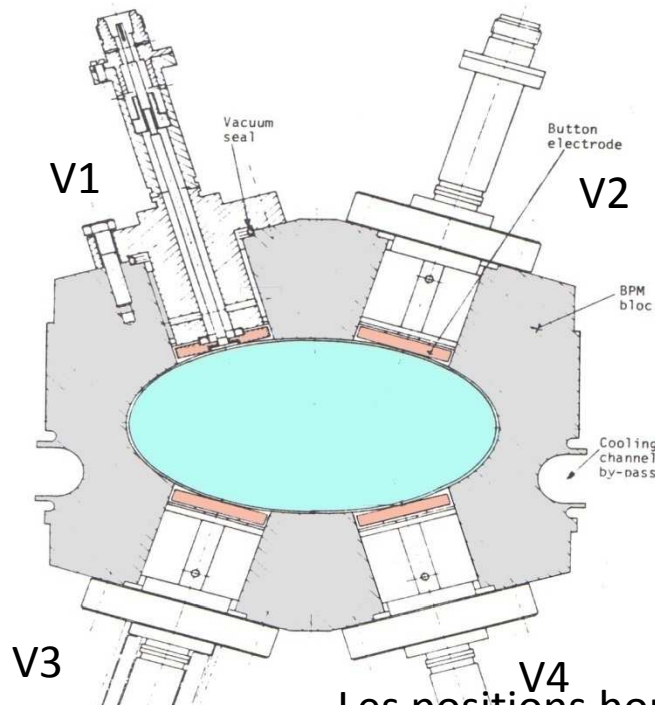


Transverse Beam Position Monitor:
Capacitive probe

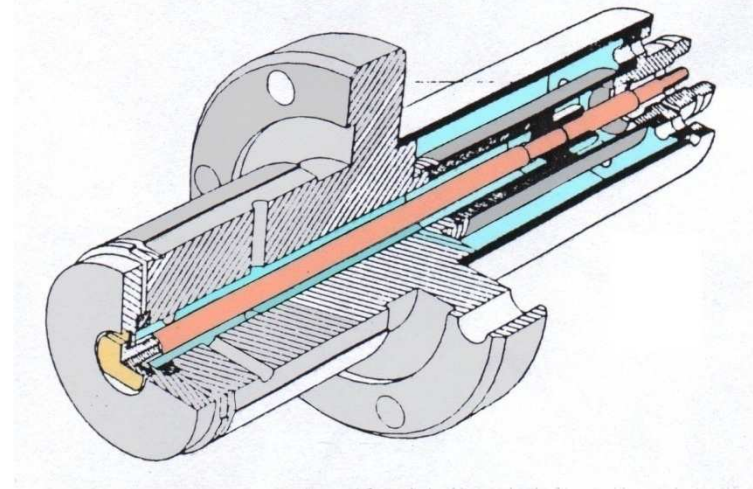
- Inner \varnothing : 48 mm - Length : 39 mm
- Subtented lobe-angle: 60°

Electronics

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



Electrode « bouton »



Gauche : Schéma d'un bloc BPM de LEP .

Droite : schéma d'une électrode (C= 8,7 pF)

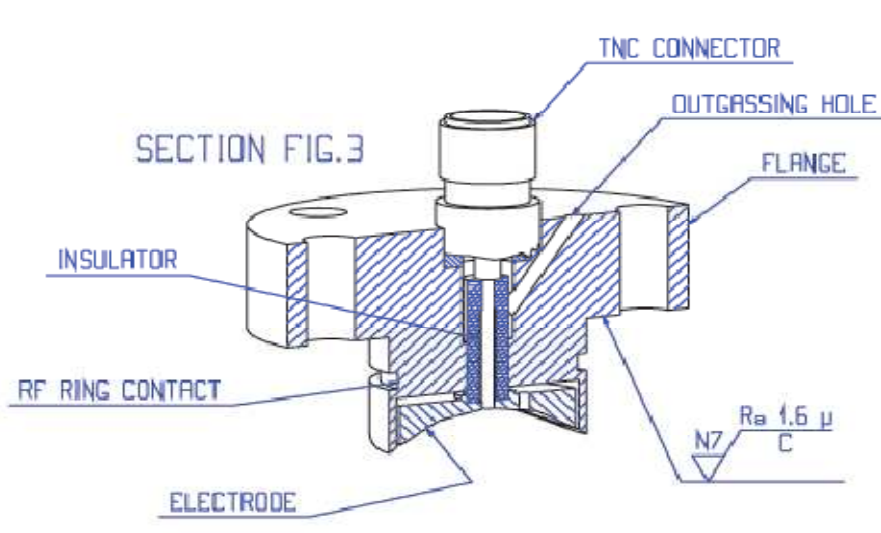
Les positions horizontales et verticales sont données par:

- Les électrodes n'entourent plus le faisceau
- Aucune électrode dans le plan médian
- La charge induite est: $Q_{induite} = \frac{S_{\text{électrode}}}{\text{circonférence tube}} \cdot \frac{I_f}{\beta \cdot c}$

➤ Les positions horizontales et verticales sont données par:

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

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



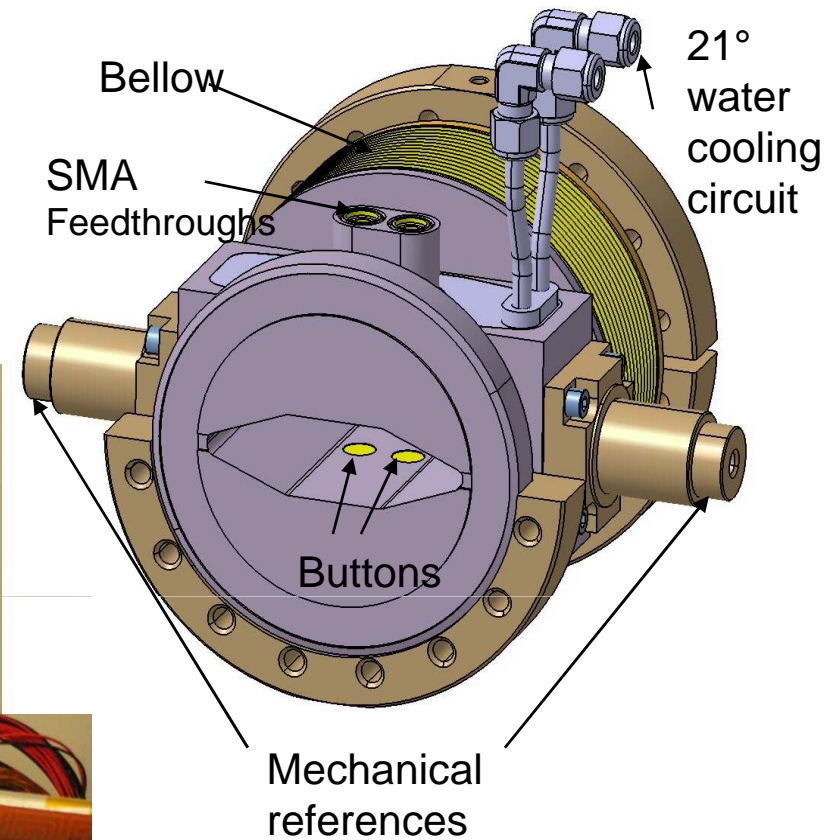
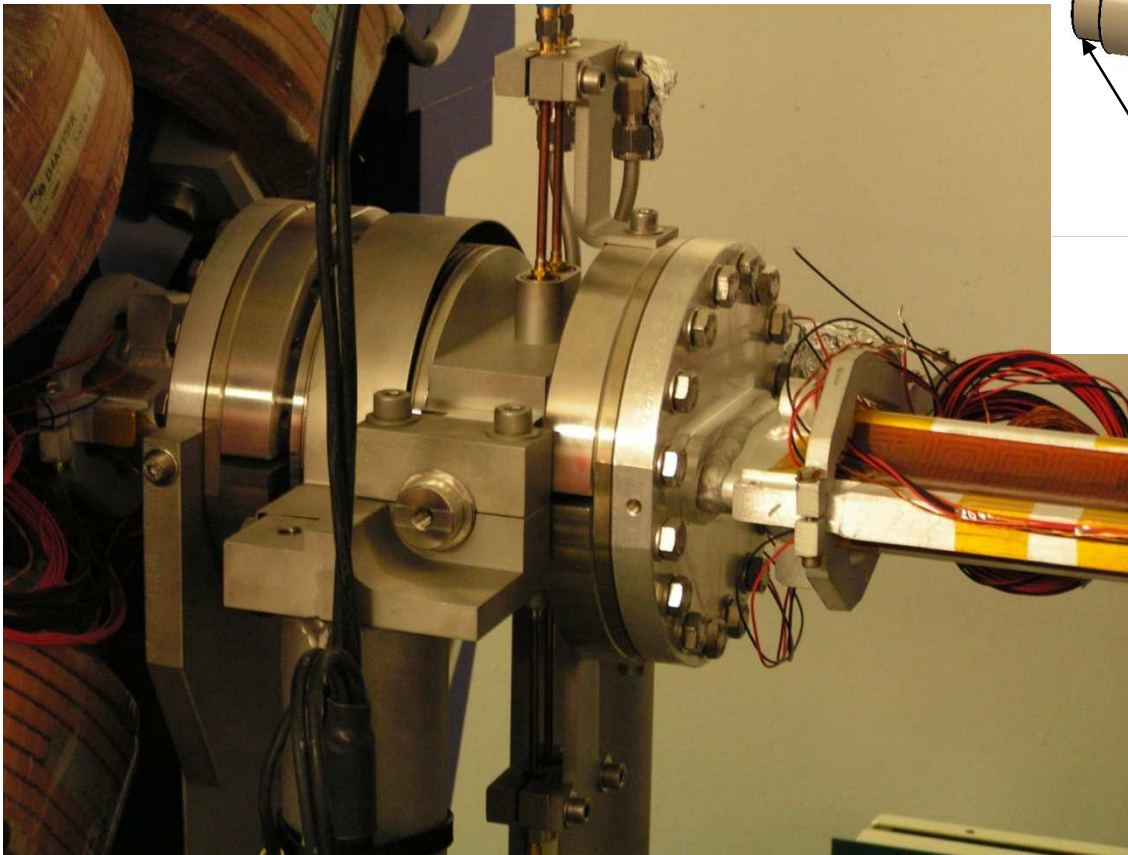
$$Z_{T_{\infty}} = \frac{A}{(2\pi r) \times c \times C_e} = \frac{\pi \times (12\text{mm})^2}{(2\pi \times 24.5\text{mm}) \times c \times (8\text{pF})} = 1.2\Omega$$

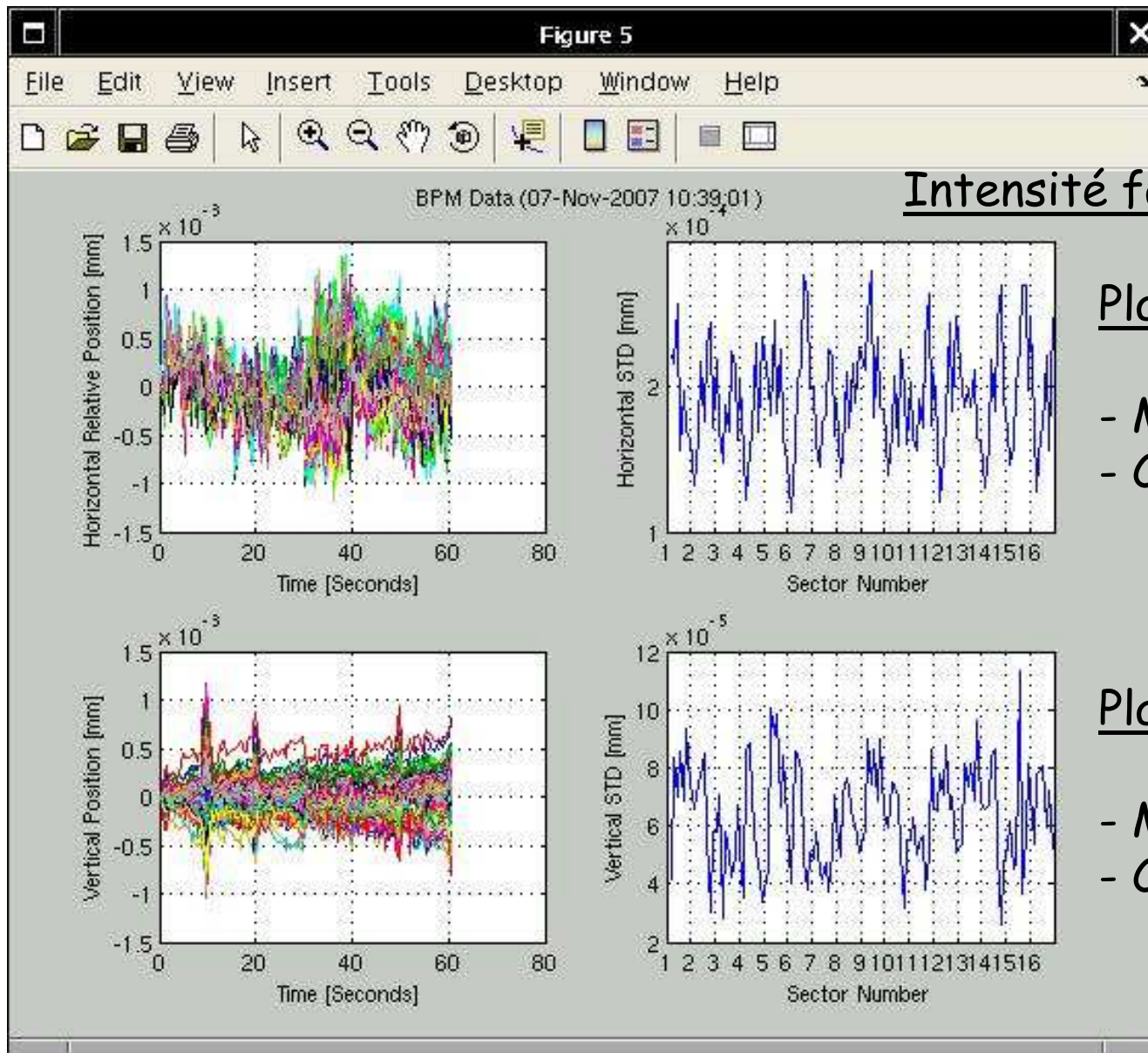
$$f_L = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 50\Omega \times 8\text{pF}} = 400\text{MHz}$$

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

Electrode « bouton » : SOLEIL

- 120 BPM autour de l'anneau
- Arc: BPM sur poutre Section Droite: sur colonne
- Fixée dans le sol
- Electrode separation: 16 mm hor. 25 mm vert.
- Refroidissement: $21 \pm 0.1^\circ\text{C}$





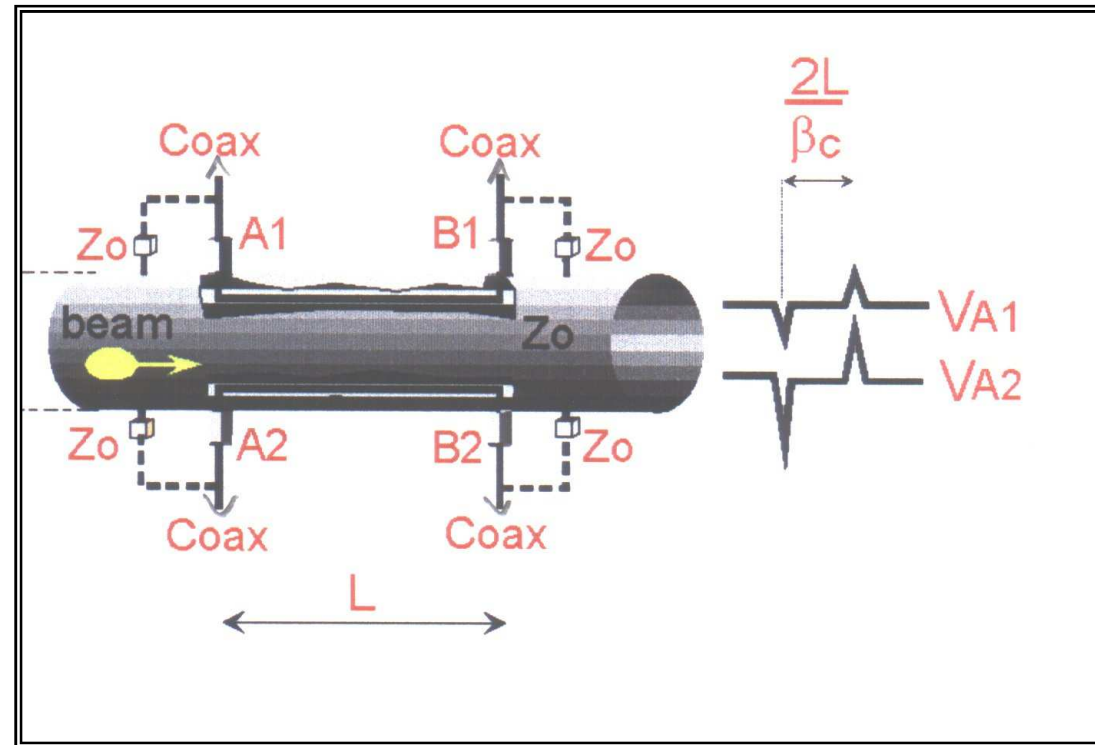
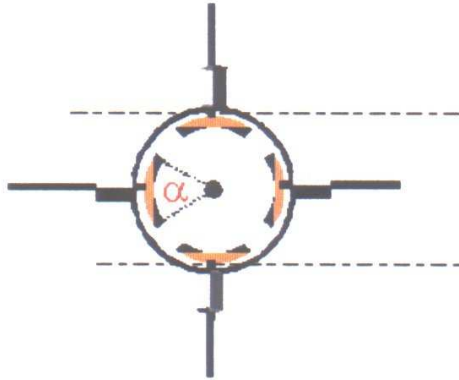
Intensité faisceau stocké: 158 mA

Plan Horizontal:

- Mesures sur 60s
- Calcul bruit rms: 0.2 μ m

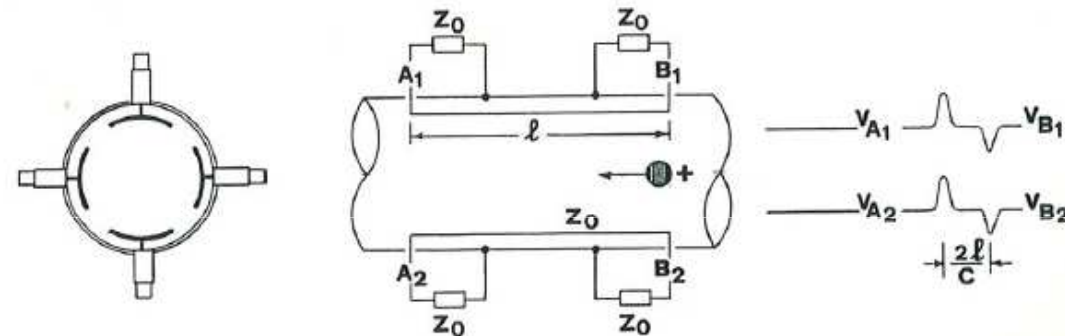
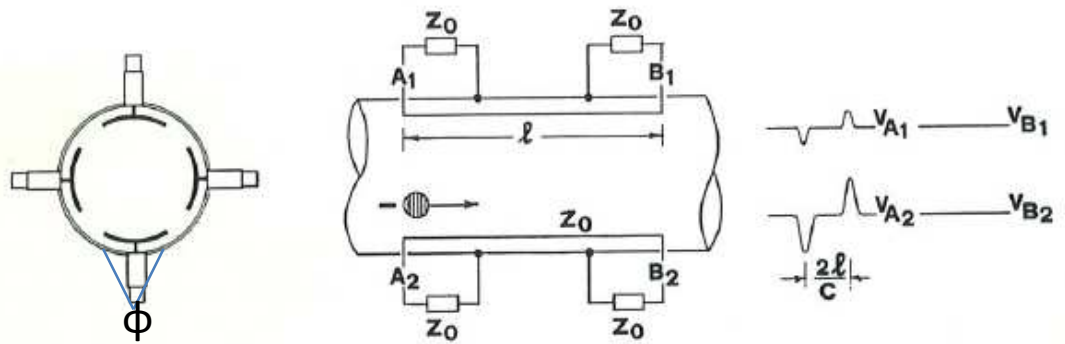
Plan Vertical:

- Mesures sur 60s
- Calcul bruit rms: 60 nm



Propriétés:

- Non interceptif. Moniteur pouvant fonctionner pour toutes les natures de faisceau.
- Utilise le champ électromagnétique associé au faisceau.
- Equipe les machines à protons (longueur du bunch < longueur de l'électrode) et surtout les collisionneurs grâce à ses propriétés directionnelles.
- Contrôle de l'orbite fermée du faisceau, asservissement de position du faisceau
- Réponse en position non linéaire: nécessite un étalonnage



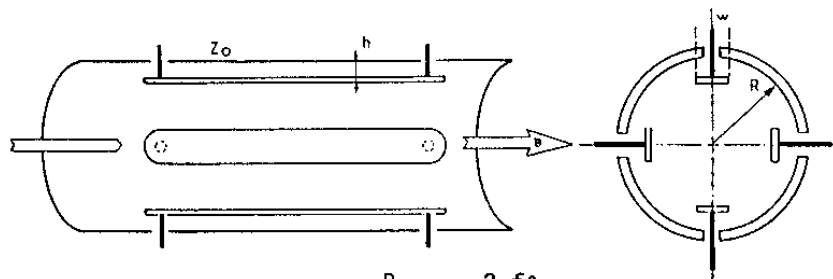
Réponse temporelle

$$V_{\text{amont}} = \frac{Z_0}{2} \cdot \frac{Q}{2\pi} \cdot \left[I(t) - I\left(t - \frac{L}{\beta_b c} - \frac{L}{\beta_{sc} c}\right) \right]$$

$$V_{\text{aval}} = \frac{Z_0}{2} \cdot \frac{Q}{2\pi} \cdot \left[I\left(t - \frac{L}{\beta_{sc} c}\right) - I\left(t - \frac{L}{\beta_b c}\right) \right]$$

$\beta_s = \beta_b = 1$ tension sur le port aval nulle

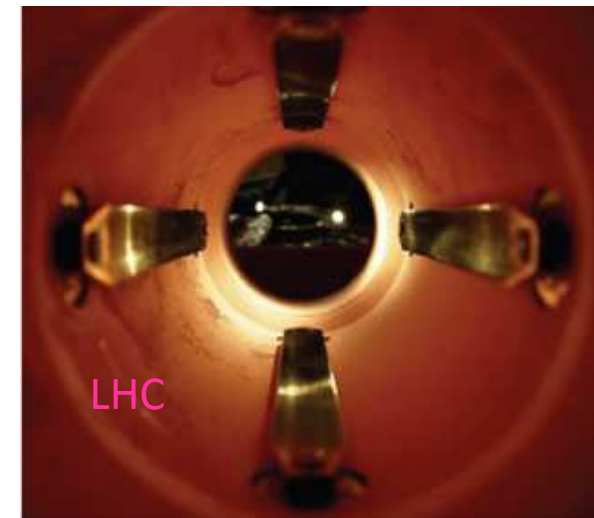
$\beta_s = \beta_b =$ tension sur le port amont nulle



$$Z_{CO} = 60 \Omega \ln \frac{R}{R-h} \sin \frac{2\pi f l}{c}$$

Z_0

for the strip-line $Z_0 = 50 \Omega$ if $h = 0.1 R$ $W = 5h$

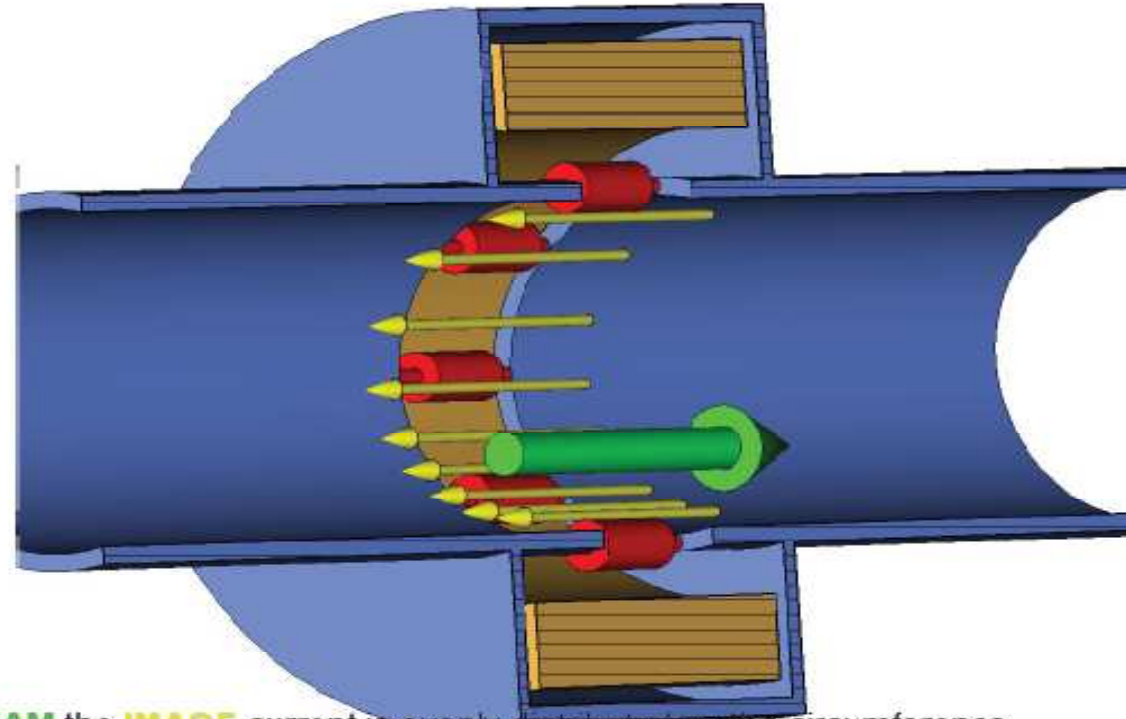




WCM as a Beam Position Monitor

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

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



- 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

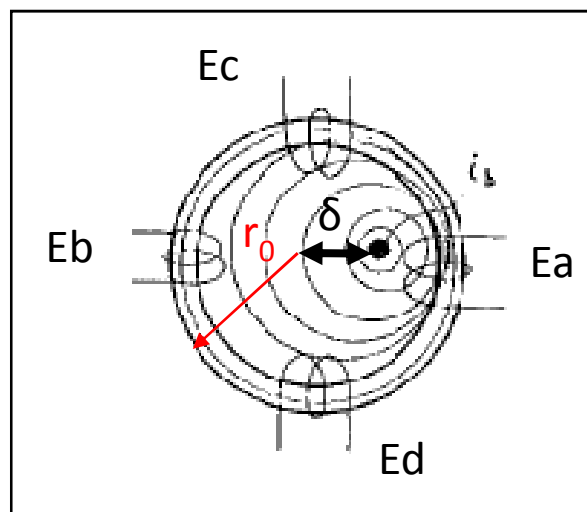
U. Raich CERN Accelerator School 2005

76

CAS

Slide by M. Gasior

THE CERN ACCELERATOR SCHOOL



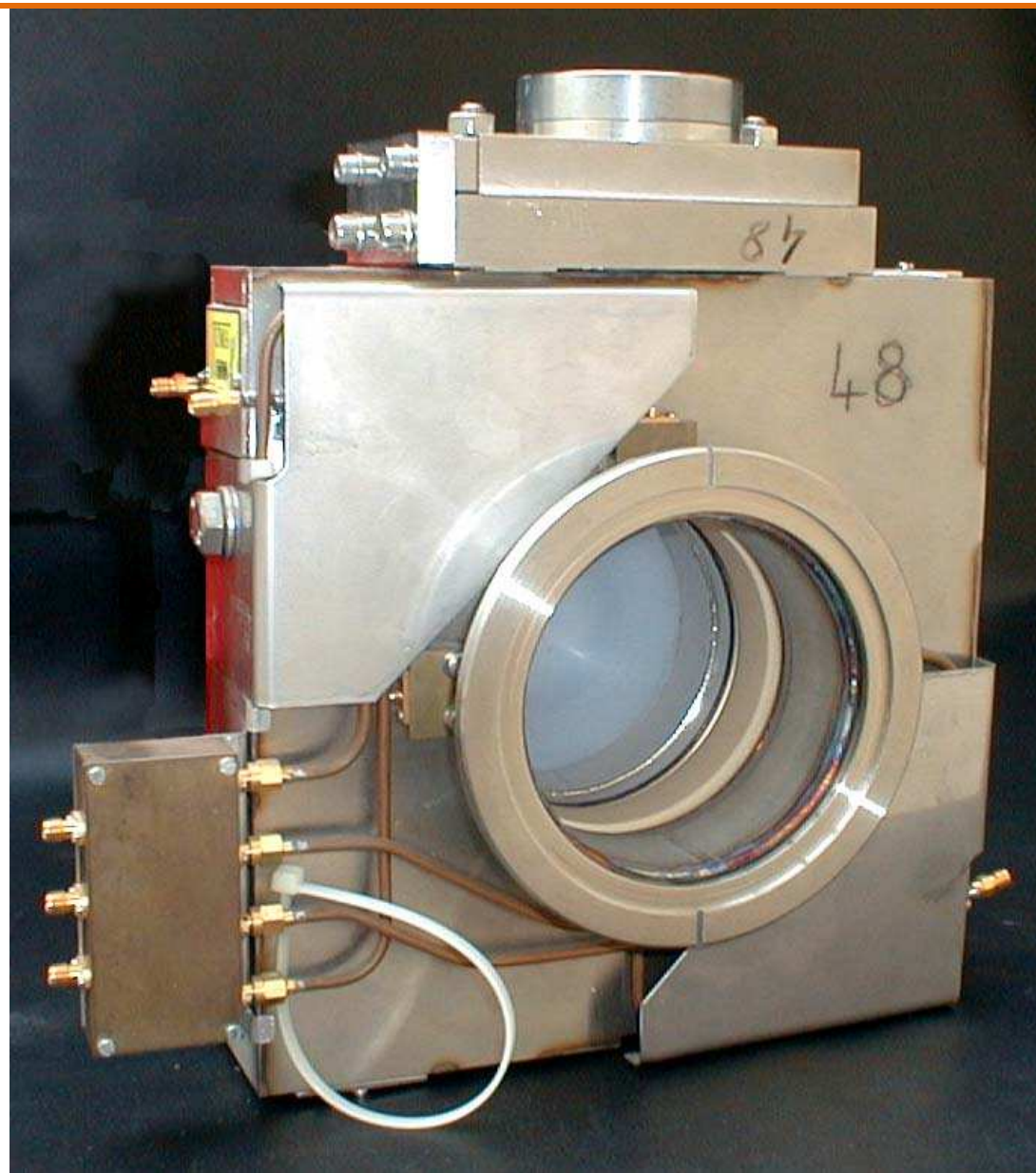
$$\frac{E_a - E_b}{E_a + E_b} = \frac{\delta}{r_0} = \frac{\Delta}{\Sigma}$$

Sensibilité sous 50 Ω du signal

$$\Sigma = 65 \text{ mV} / 0.33 \text{ mA}$$

Sensibilité sous 50 Ω du signal

$$\Delta = 2000 \text{ mV} / 10 \text{ A.mm}$$



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.

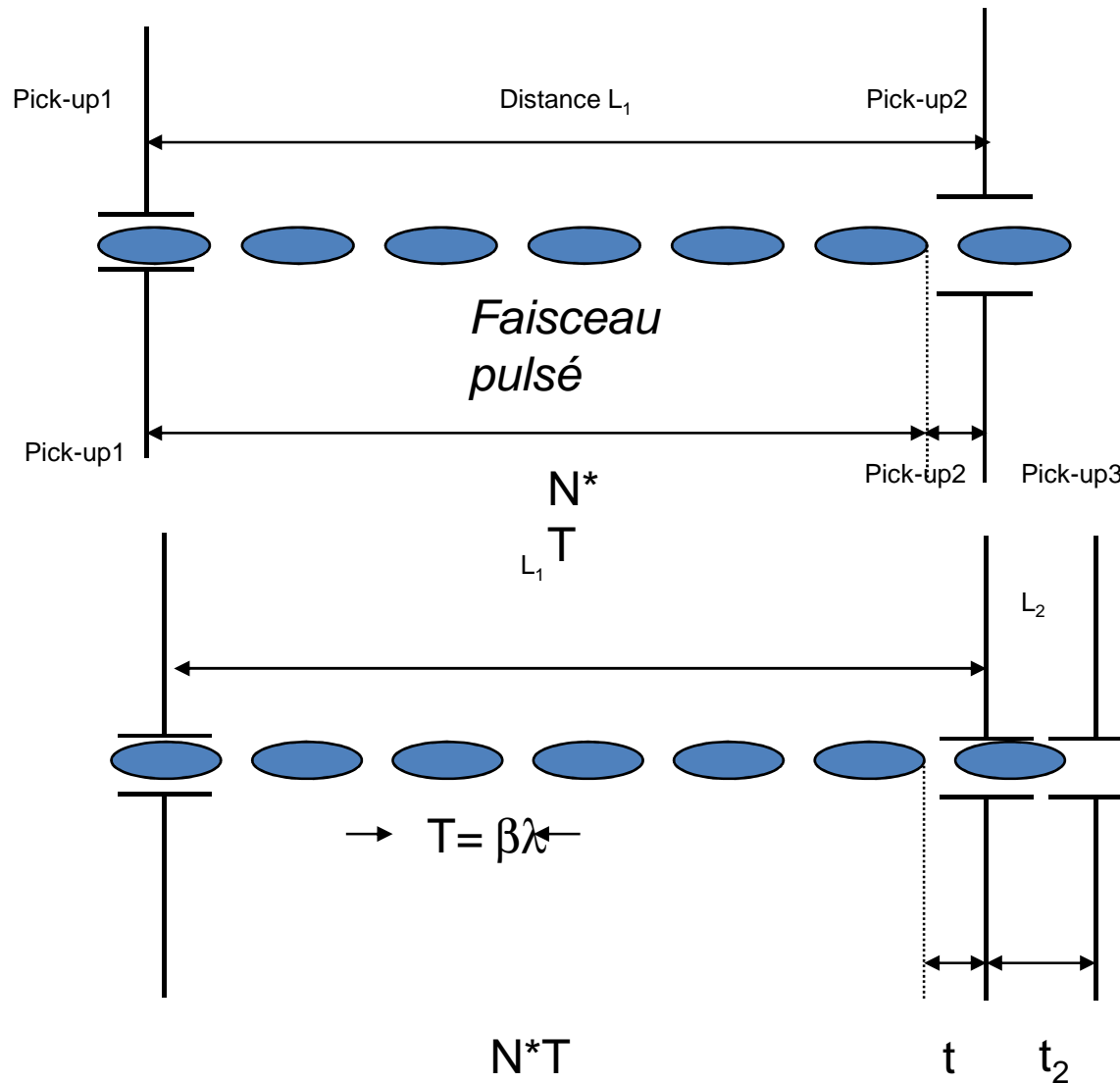
Dynamique de mesure (dynamic range) : C'est la gamme d'intensité ou de charges dans laquelle le détecteur doit fonctionner. Par exemple, la réponse en position d'un moniteur de position doit être indépendante de l'intensité du faisceau à l'intérieur de la gamme de mesure. Pour obtenir une large gamme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



$$\beta \cdot c = \frac{L}{NT + t}$$

Précision:

$$\frac{\Delta\beta}{\beta} = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t}{NT + t}\right)^2}$$

Limité aux faibles vitesses