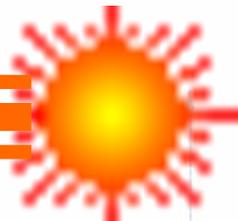
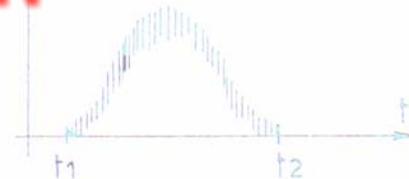
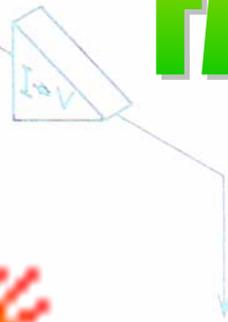
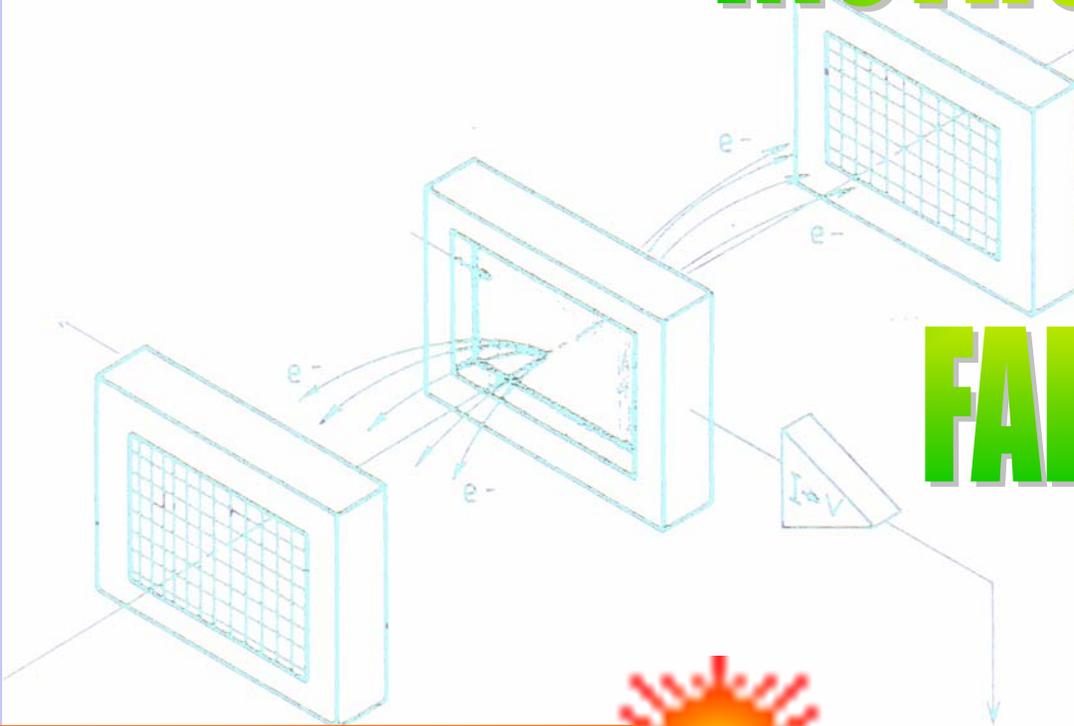
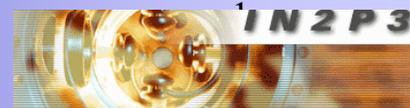


INSTRUMENTATION DES FAISCEAUX



Patrick AUSSET



SOMMAIRE

1° INTRODUCTION

- ☞ **Accélérateurs de particules et nécessité des diagnostics de faisceau**

2° GENERALITES SUR LES DIAGNOSTICS DE FAISCEAU

- ☞ **Caractéristiques physiques essentielles d'un faisceau de particules chargées accélérées**
- ☞ **Mesures à effectuer. Les phénomènes physiques utilisés pour la mesure des faisceaux**
- ☞ **Les perturbations apportées au faisceau**
- ☞ **Les contraintes de mesure liées à l'environnement**

3° LES CAPTEURS DE FAISCEAU ASSOCIES AUX MESURES FONDAMENTALES

- ☞ **Intensité du faisceau**

- Capteurs destructifs: cage de Faraday, détecteur à émission secondaire
- Capteurs non destructifs: transformateurs de courant, « wall current monitor », électrode capacitive.

- ☞ **Mesure de phase, mesure de longueur de bunch, mesure de l'énergie**

- Electrodes capacitives
- transformateurs de courant, « wall current monitor », autres méthodes.

- ☞ **Position du faisceau**

- Capteurs non destructifs: « pick-up » électrostatiques, coupleurs directifs

- ☞ **Profils transverses du faisceau**

- Capteurs destructifs: chambres à émission secondaire, scintillateurs, chambres à ionisation
- Moniteurs à ionisation du gaz résiduel
- Mesure par fluorescence du gaz résiduel
- Utilisation du rayonnement synchrotron
- Rayonnement de transition

SOMMAIRE 2/2

4° AUTRES DETECTEURS, AUTRES MESURES

- ☞ **Multiplicateurs de charges: Multiplicateurs d'électrons.**
- ☞ **Amplificateurs de lumière: Photomultiplicateurs.**
- ☞ **Dispositifs à transfert de charges. Caméra CCD**
- ☞ **Caméra à balayage de fente**

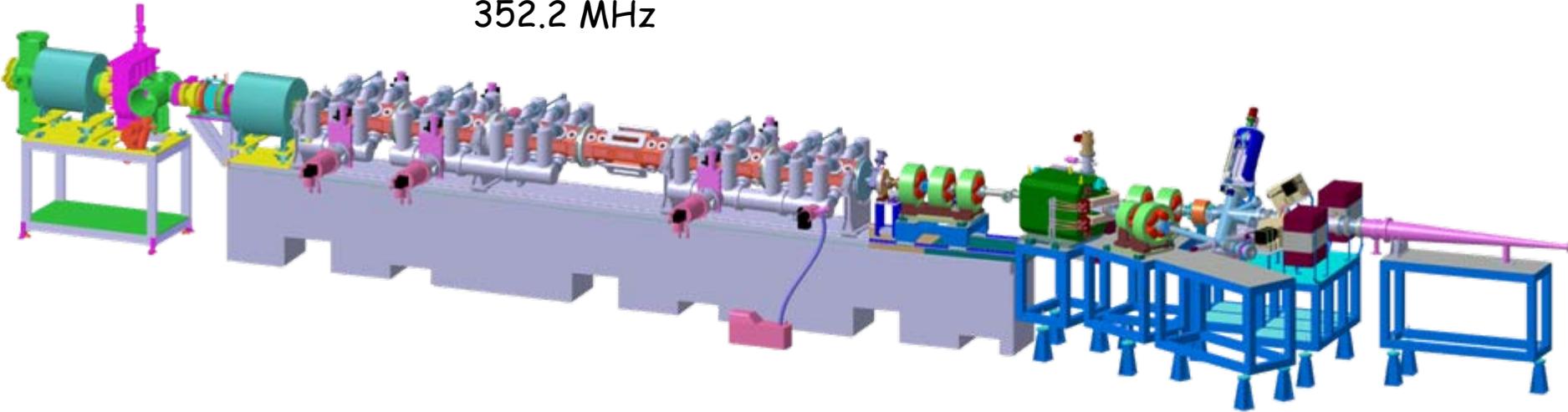
5° MONITEURS DE PERTES DE FAISCEAU

- ☞ **Contrôle du faisceau dans les accélérateurs. Pertes de faisceau**
- ☞ **Mesures à effectuer. Exemples de détecteurs**

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



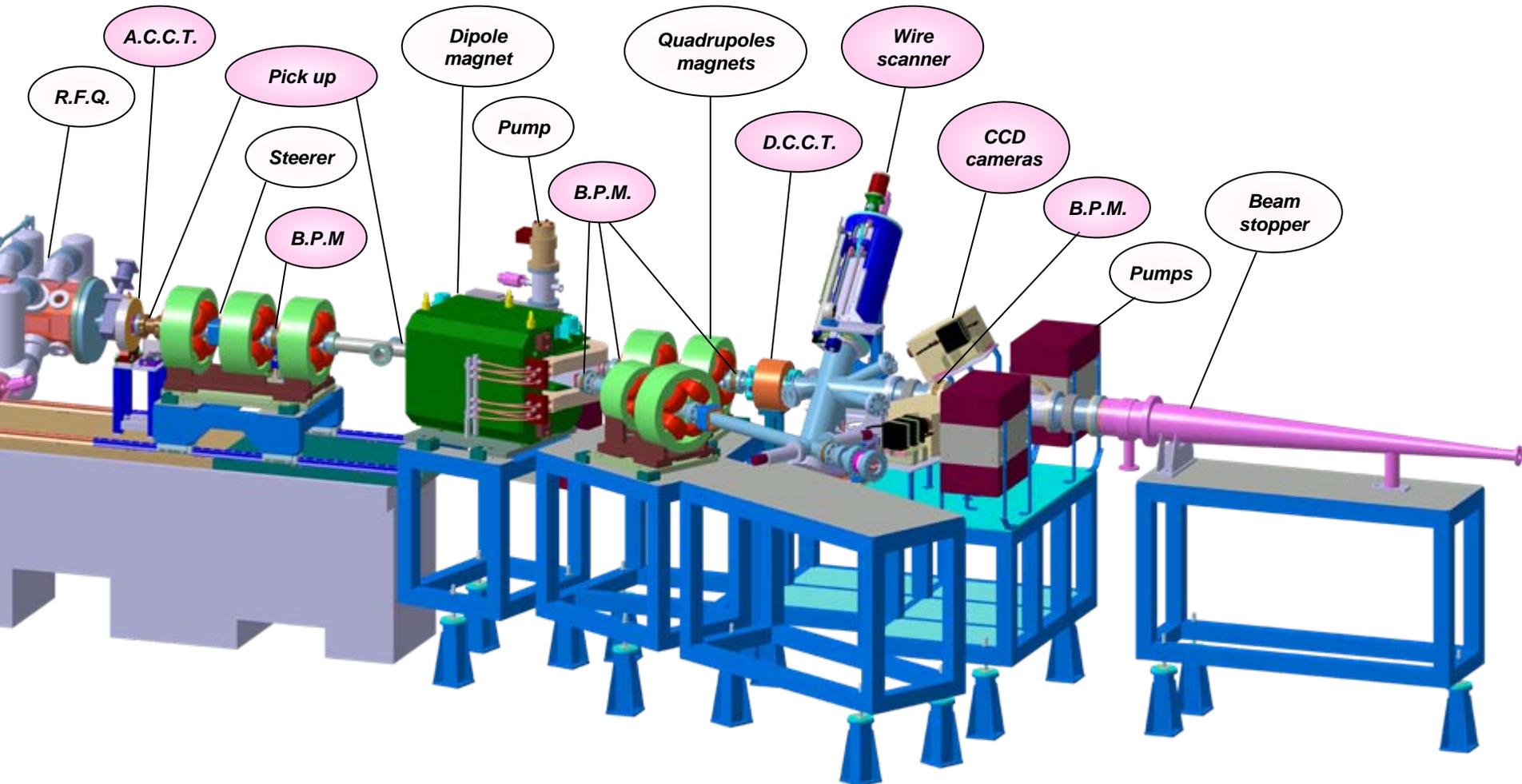
Source SILHI: Protons
100 KeV; 100 mA; C.W.

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

- Fin 2007- 2008: Transfert du RFQ au CERN dans le cadre du projet « Super Proton Linac »

Exemple d'implantation de diagnostics de faisceau: Ligne Haute Energie de IPHI



ROLE DES DIAGNOSTICS DE FAISCEAU

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

LES MESURES A EFFECTUER

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.

LES MESURES A EFFECTUER (suite)

Mesures spécifiques (études du fonctionnement de la machine, développement):

Mesures statiques sans excitation du faisceau

Exemples: orbite fermée dans les synchrotrons, fluctuations transverse et longitudinale, mesures tour par tour si la bande passante des détecteurs est suffisante. (machines circulaires)

Mesures dynamiques avec excitation du faisceau

(Etude de la réponse à l'excitation transverse ou longitudinale du faisceau)

Exemples: Orbite fermée, nombre d'onde, fonction de transfert du faisceau ...et toutes les mesure spécifiques aux synchrotrons. Dispersion d'énergie dans les Linac.

Mesures dynamiques avec excitation du faisceau:

(L'excitation du faisceau dépend de la réponse du détecteur)

Exemples: Feedback de position (collisionneurs; machines à rayonnement synchrotron),
contrôle de l'intensité du faisceau (machines médicales)

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ELEMENTAIRES DU FAISCEAU

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

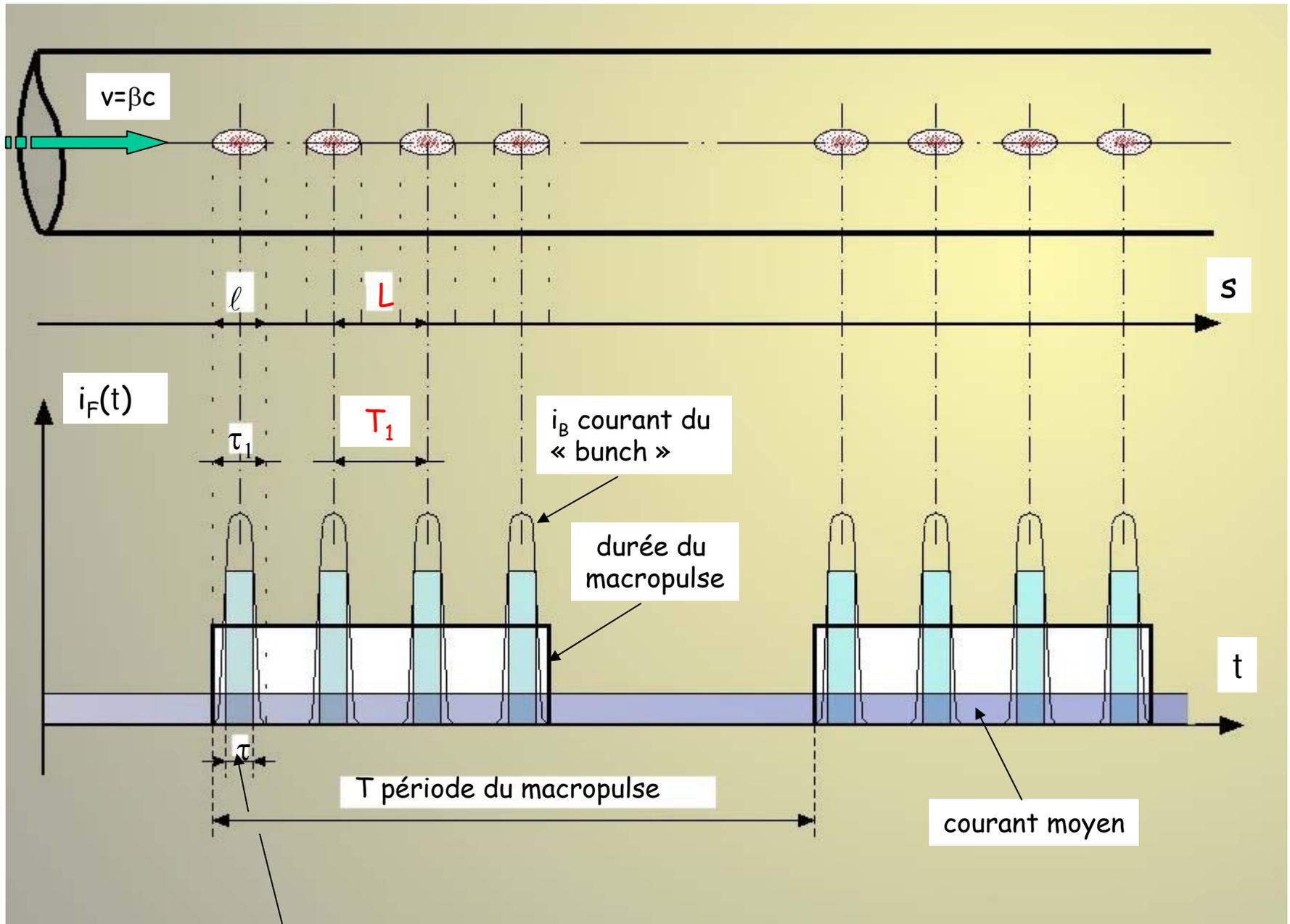
...

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

CARACTERISTIQUES ELEMENTAIRES DU FAISCEAU



τ durée du bunch (équivalent rectangulaire)

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES FONDAMENTALES DU FAISCEAU

Densité volumique de charges $\rho(V)$.

- Pour un volume élémentaire dV : $\rho(V) = \frac{dQ}{dV}$ Elle s'exprime en C/m^3

Densité linéique de charges λ (s) du bunch:

- Dans le cas d'un faisceau de dimensions transversales petites par rapport à la dimension longitudinale, on définit la densité linéique de charges λ (s) par:

Unité: C/m

- En faisant apparaître le courant électrique $I(t)$:

$$\lambda(s) = \rho(V) \cdot \Sigma$$

$$I(t) = \frac{dQ}{dt} = \frac{dQ}{ds} \times \frac{ds}{dt} = \lambda(s) \times v = \lambda(s) \times \beta \times c$$

CARACTERISTIQUES ELECTRIQUES FONDAMENTALES DU FAISCEAU

Densité linéique de charges $\lambda(s)$ du bunch:

- Pour les calculs, les densités de particules sont très souvent estimées par des courbes de « Gauss »:
- Par exemple, la distribution linéique des charges d'un bunch s'écrit:

$$\lambda(s) = \frac{Q}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma_L} e^{-\frac{(s-s_0)^2}{2\sigma_L^2}}$$

- Approximation plus sommaire: répartition constante des particules. Elle est représentée par une fonction « créneau ».

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ELEMENTAIRES DU FAISCEAU

Energie cinétique d'une particule:

- A faible vitesse: $W = \frac{1}{2} m_0 \times v^2$ (eV, keV, MeV, GeV, TeV)

Avec m_0 , masse au repos de la particule et v , vitesse de la particule

- Hautes vitesses: la masse augmente selon la loi: $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\beta^2}}$ avec $\beta = \frac{v}{c}$

- Energie cinétique = Energie totale - Energie au repos

$$W = E - E_0 = (m - m_0).c^2$$

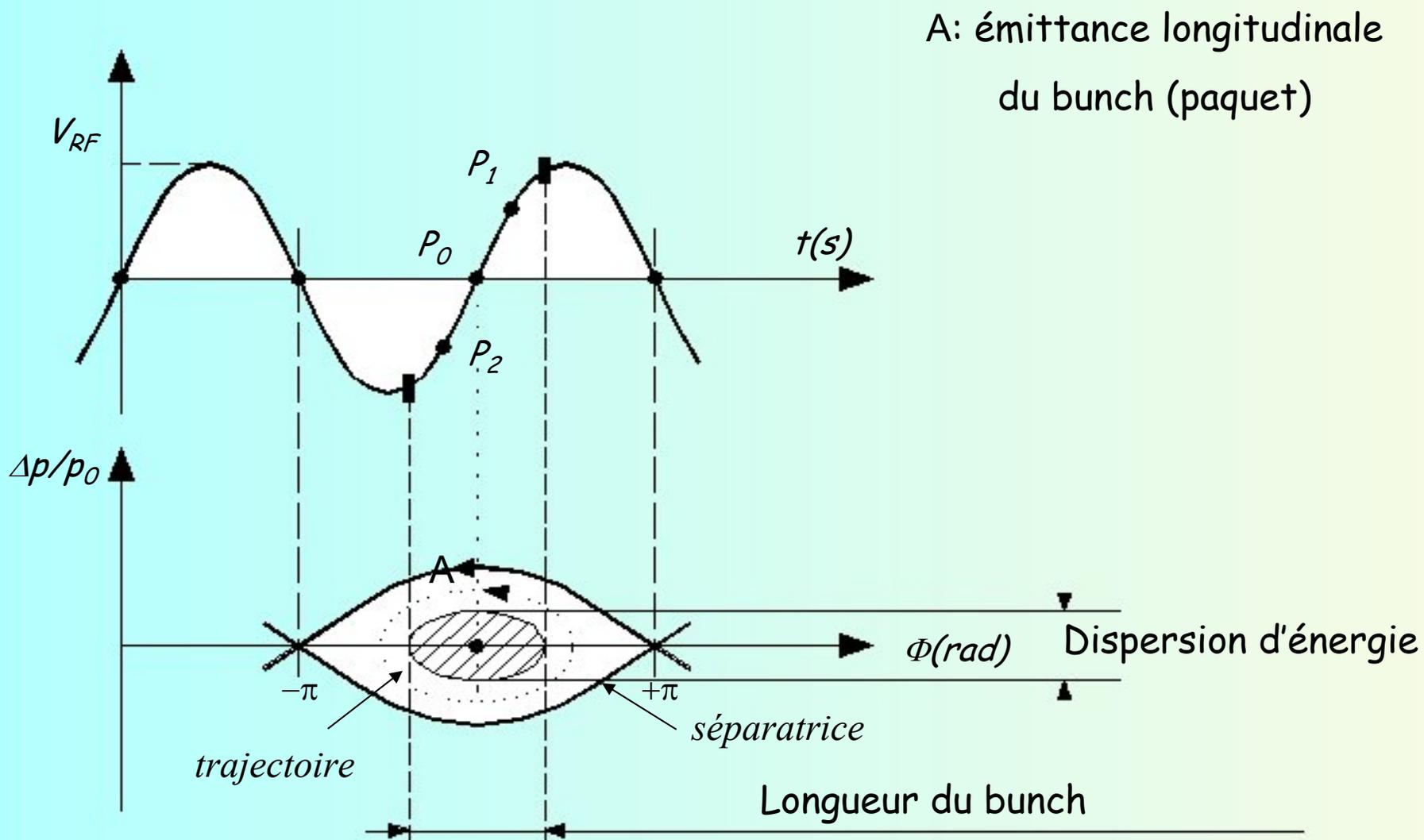
Quantité de mouvement «p» d' une particule:

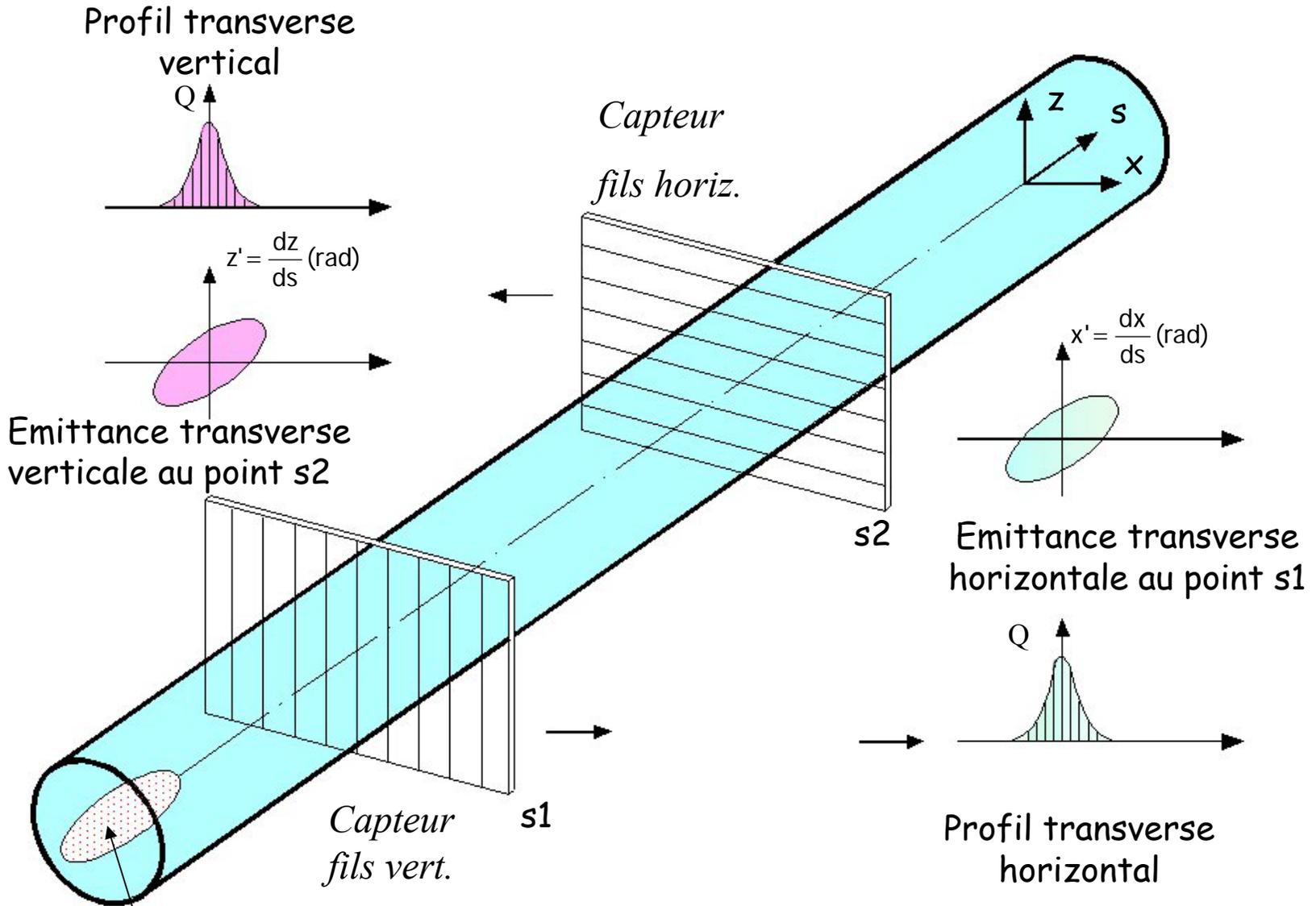
$$(p^2 c^2) = E^2 - E_0^2$$

Elle s'exprime en eV/c, keV/c, MeV/c, GeV/c, TeV/c

L' énergie cinétique et la quantité de mouvement d'un faisceau de particules accélérées présentent en pratique une dispersion ΔW et Δp par rapport à la valeur nominale.

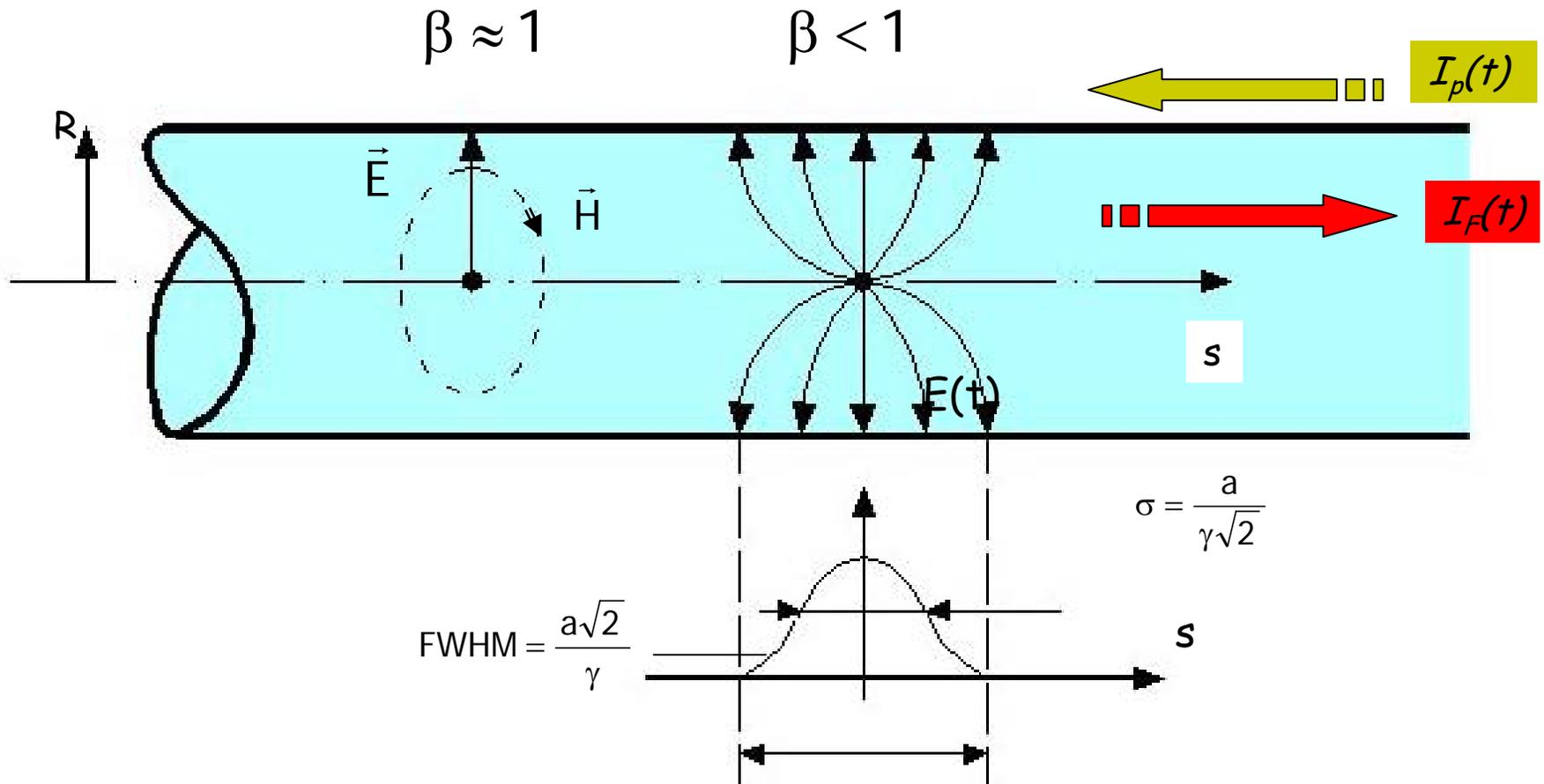
CARACTERISTIQUES LONGITUDINALES DU FAISCEAU





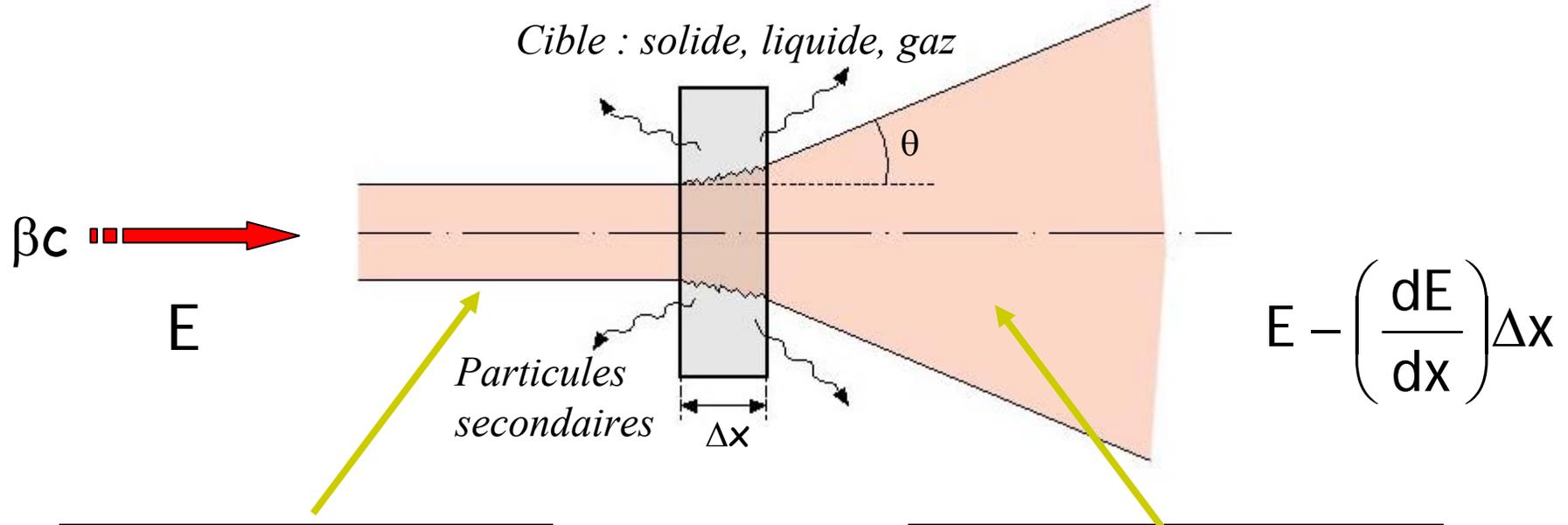
CARACTERISTIQUES TRANSVERSALES ELEMENTAIRES DU FAISCEAU

CHAMP ELECTROMAGNETIQUE ASSOCIE AU FAISCEAU



- ⚡ Champ EM du type TEM
- ⚡ Courant de paroi égal et opposé à celui du faisceau
- ⚡ La répartition du courant de paroi dépend de la position du faisceau dans le tube à vide

INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE



Faisceau incident
-e et β^+
-protons et ions lourds

Faisceau transmis
-perte d'énergie
-modif. caract. optiques

- Interception des charges électriques. Ionisation
- Echauffement de la cible
- Emission de particules secondaires
- Emission de rayonnement EM

INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

RAYONNEMENT ou RADIATION:

- Mode de propagation dans l'espace de l'énergie sous forme de particules matérielles ayant une masse au repos (ions lourds, électrons, neutrons) ou d'ondes électromagnétiques (X , γ).
- Détection d'un rayonnement par interaction avec la matière qu'il traverse et dans laquelle il cède toute ou partie de son énergie cinétique.

- Rayonnement particulaire incident chargé électriquement: protons et ions lourds

- Interaction coulombienne avec les électrons des atomes de la cible. 2 cas:
 - ✓ *Energie incidente "suffisante" ($>$ énergie de liaison ~ 16 eV):*

- Ionisation par arrachement d'un électron aux atomes de la cible (création de paires ion positif - électron) puis réarrangement du cortège électronique aboutissant à l'émission de rayons X de fluorescence ou (beaucoup plus rare) émission d'électrons (électrons AUGER)
- Création d'électrons δ très énergétiques responsables à leur tour d'autres ionisations ou excitations

- ✓ *Energie incidente "insuffisante" ($<$ énergie de liaison ~ 16 eV):*
Excitation transitoire de l'atome cible (rupture des molécules dans certains cas) puis réarrangement du cortège électronique comme précédemment.

- Capture électronique par l'ion lourd incident d'un électron de l'atome cible.

INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

Rayonnement particulaire incident chargé électriquement: électron (rayonnement β^-)

- Interaction coulombienne prépondérante avec les électrons des atomes de la cible:
 - ✓ La masse de l'électron étant 1836 fois inférieure à celle du proton, les phénomènes de diffusion sont très importants: la notion de trajectoire rectiligne n'est plus valable.
 - ✓ Mêmes phénomènes d'ionisation qu'avec les ions lourds
- Diffusion élastique sur les noyaux:
 - ✓ Peu de perte d'énergie en raison de la grande différence de masse
- Diffusion inélastique sur les noyaux: Bremsstrahlung
 - Au voisinage du noyau, l'électron est soumis à une variation de son accélération:
 - => Rayonnement d'énergie proportionnellement à γ^2 (donc négligeable en proton et ion lourd): émission de photons et ralentissement.
 - => Rayonnement devient important à partir de quelques MeV.

Rayonnement particulaire incident chargé électriquement: positon (rayonnement β^+)

- Interaction coulombienne et diffusion identique à celles des électrons
- Annihilation en fin de diffusion avec un électron libre de la cible: disparition de la paire électron/positon. Emission de 2 photons de 511 keV dans 2 directions opposées.

INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

- Rayonnement particulaire incident non chargé électriquement: Neutrons.

Electriquement neutre, masse pratiquement identique à celle du proton: pas dévié de sa trajectoire par le cortège électronique et interagit avec les noyaux cibles. (traverse aisément la matière)

➤ Interaction (nucléaire) avec les noyaux des atomes de la cible:

✓ Neutron intermédiaire et rapide (énergie cinétique > 1 keV):

- Diffusion (déviation du neutron incident), transmission d'une partie de son énergie cinétique au noyau cible

✓ Neutron lent

- Capture radiative par le noyau cible (création d'un isotope) et émission de photon avec l'excédent d'énergie:

Activation neutronique: noyau radioactif

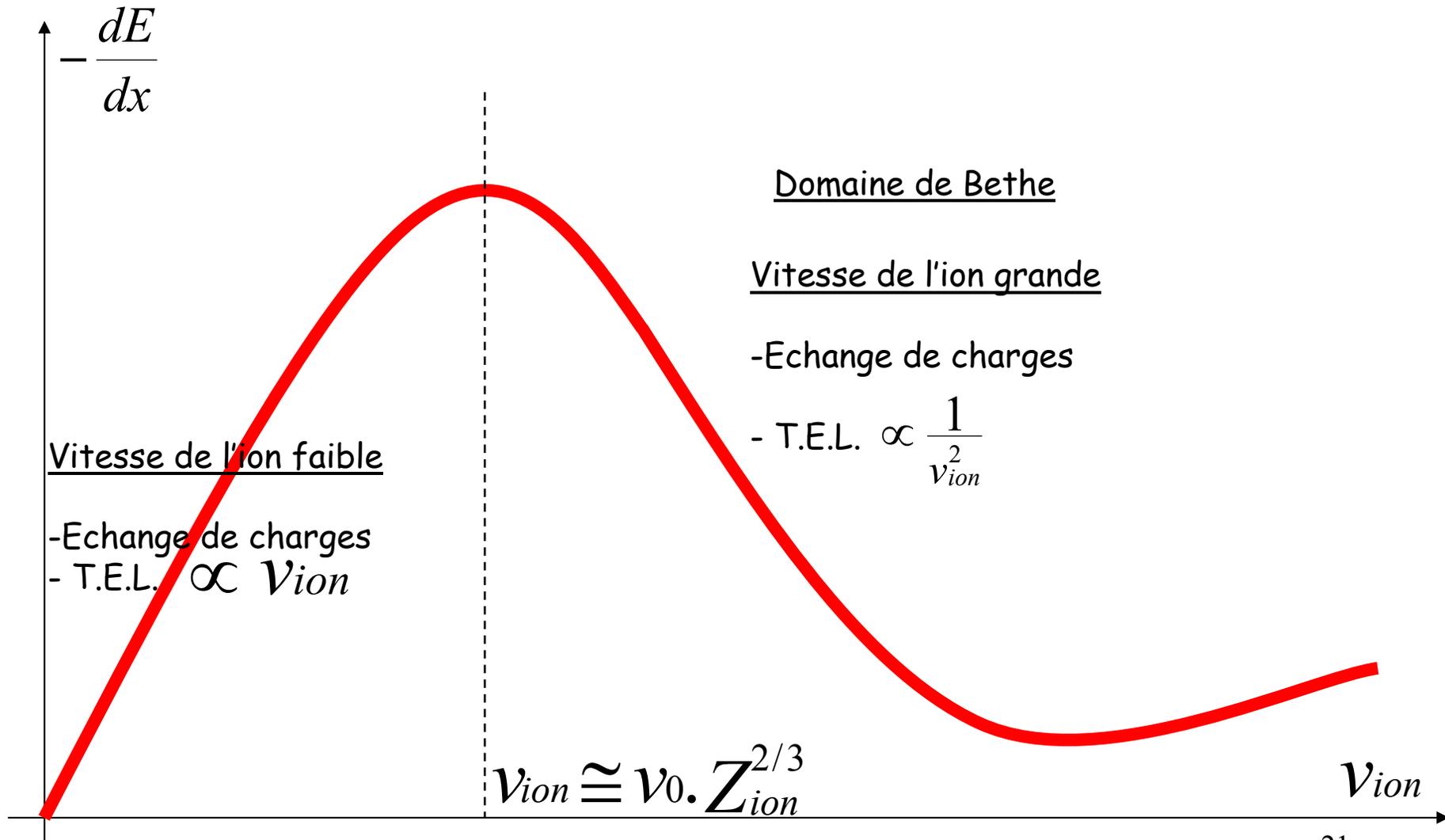
Capture stérile: noyau stable.

- Capture non radiative: Fission (éclatement du noyau cible)

- La détection des neutrons s'effectue grâce aux particules chargées produites par diffusion et/ou capture dans la matière

INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

Pouvoir d'arrêt - Transfert d'Energie Lineique: protons et ions lourds



INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

Pouvoir d'arrêt des protons et ions lourds

Vitesse de l'ion élevée: Formule de Bethe-Bloch

$$\frac{dE}{dx} = D \frac{\rho_{cible} \cdot Z_{cible}}{A_{cible}} \left(\frac{Z_{proj}}{\beta} \right)^2 \left(\frac{1}{2} \text{Ln} \left(\frac{2 m_e \beta^2 c^2 \gamma^2}{I} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} - \frac{C}{Z_{cible}} \right)$$

Avec

$$- D = 4 \cdot \pi \cdot N_A \cdot r_e^2 \cdot m_e^2 \cdot c^2 = 0,3070 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2 / \text{g}$$

- ρ_{cible} , Z_{cible} , A_{cible} : masse volumique, charge, nombre de masse de la cible

- Z_{proj} , β : charge et vitesse du projectile

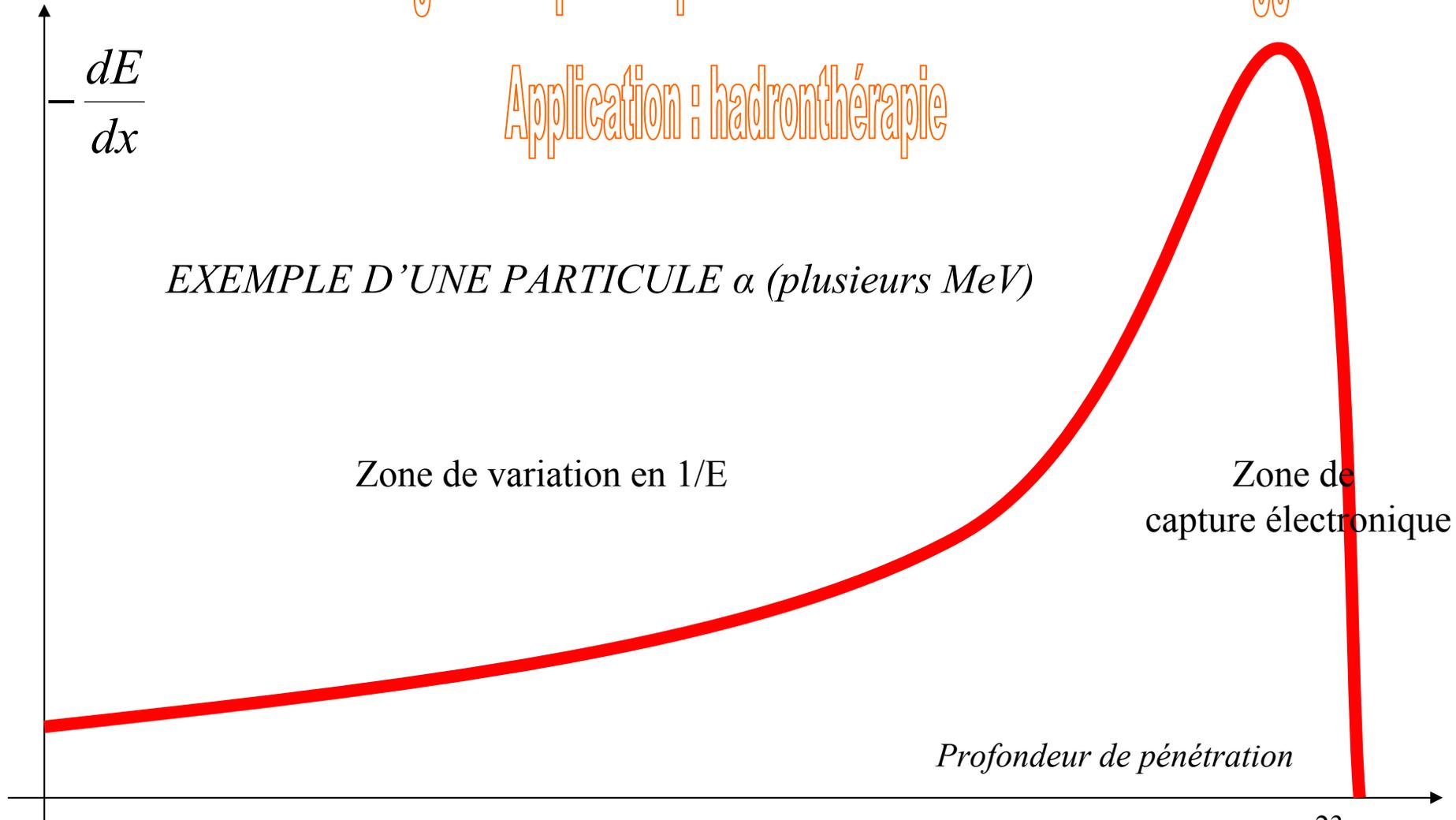
- I : potentiel moyen d'ionisation de l'atome cible

δ , C : facteurs correctifs (effet de densité et des couches électroniques profondes)

INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

Transfert d'Energie Lineique des protons et ions lourds: courbe de Bragg

Application : hadronthérapie



INTERACTION RAYONNEMENT MATIERE

Pouvoir d'arrêt - Transfert d'Énergie Lineïque: électrons

Electrons:

Au dessus de « l'énergie critique », les électrons perdent également leur énergie par rayonnement:

$$\left(\frac{dE}{dx} \right)_{total} = \left(\frac{dE}{dx} \right)_{ionisation} + \left(\frac{dE}{dx} \right)_{rayonnemen\ t}$$

INTERACTION FAISCEAU-MATIÈRE

Diffusion multiple-parcours

L'angle de déviation moyen d' un faisceau traversant une cible peut être estimé par :

$$\theta_0 = \frac{15 \text{ MeV} / c}{p\beta \sqrt{\frac{\delta_x}{L_R}}} \quad \text{avec } L_R \text{ longueur de radiation}$$

Longueur de radiation L_R :

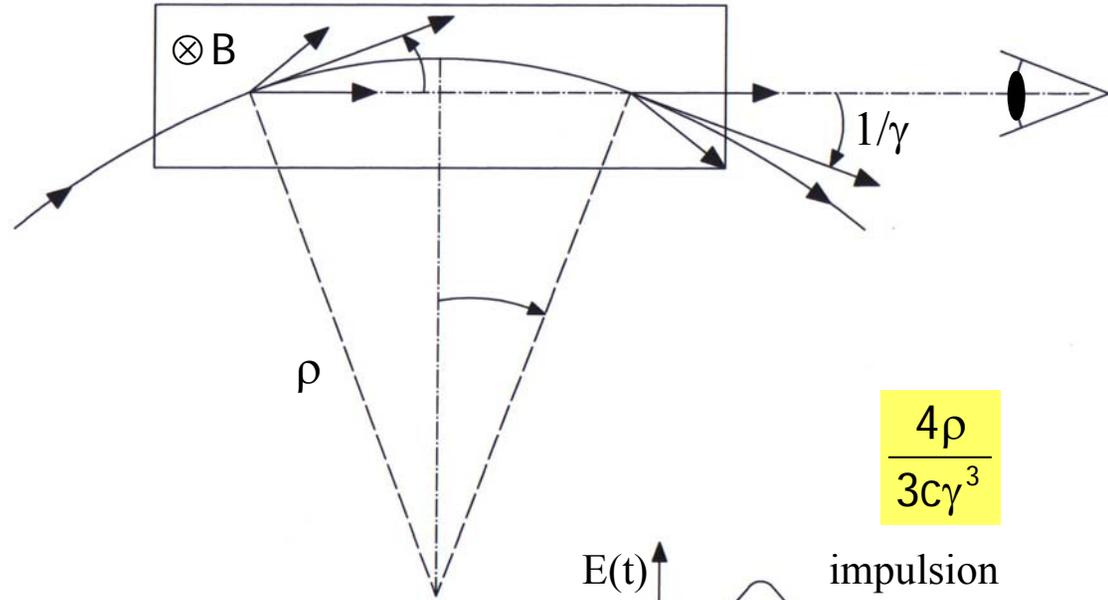
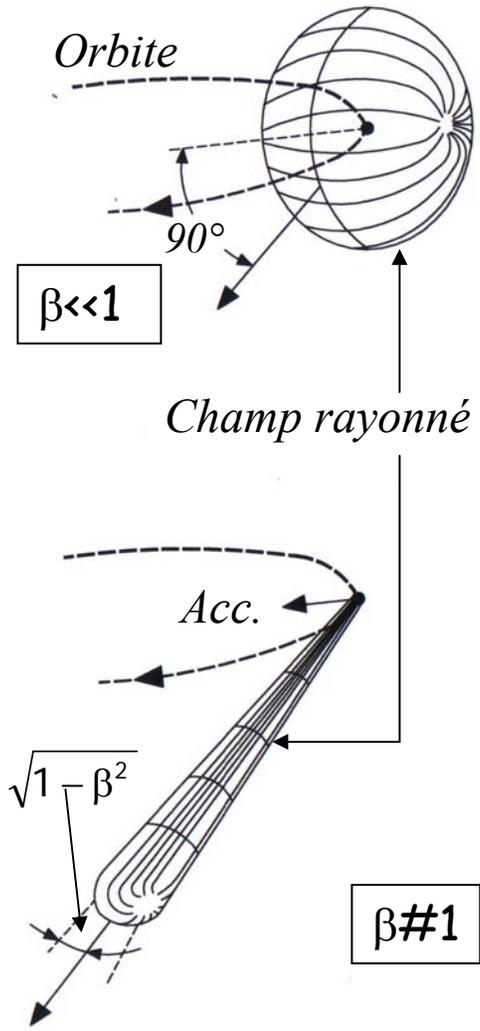
Distance au bout de laquelle l' énergie d' un électron incident est divisée par 1/e par perte radiative uniquement.

Parcours:

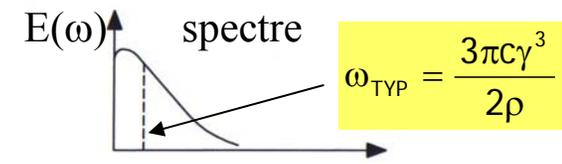
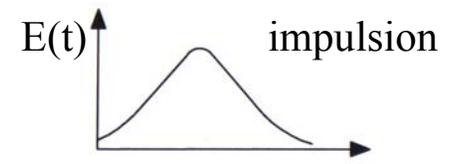
Dans le cas de l' hypothèse (grossière) du ralentissement continu, on définit le parcours comme la distance au bout de laquelle la moitié des particules du faisceau est arrêtée:

$$P(T) = \int_0^{T_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE$$

RAYONNEMENT SYNCHROTRON



$$\frac{4\rho}{3c\gamma^3}$$



Direction d'observation

Angle d'ouverture

Durée d'observation

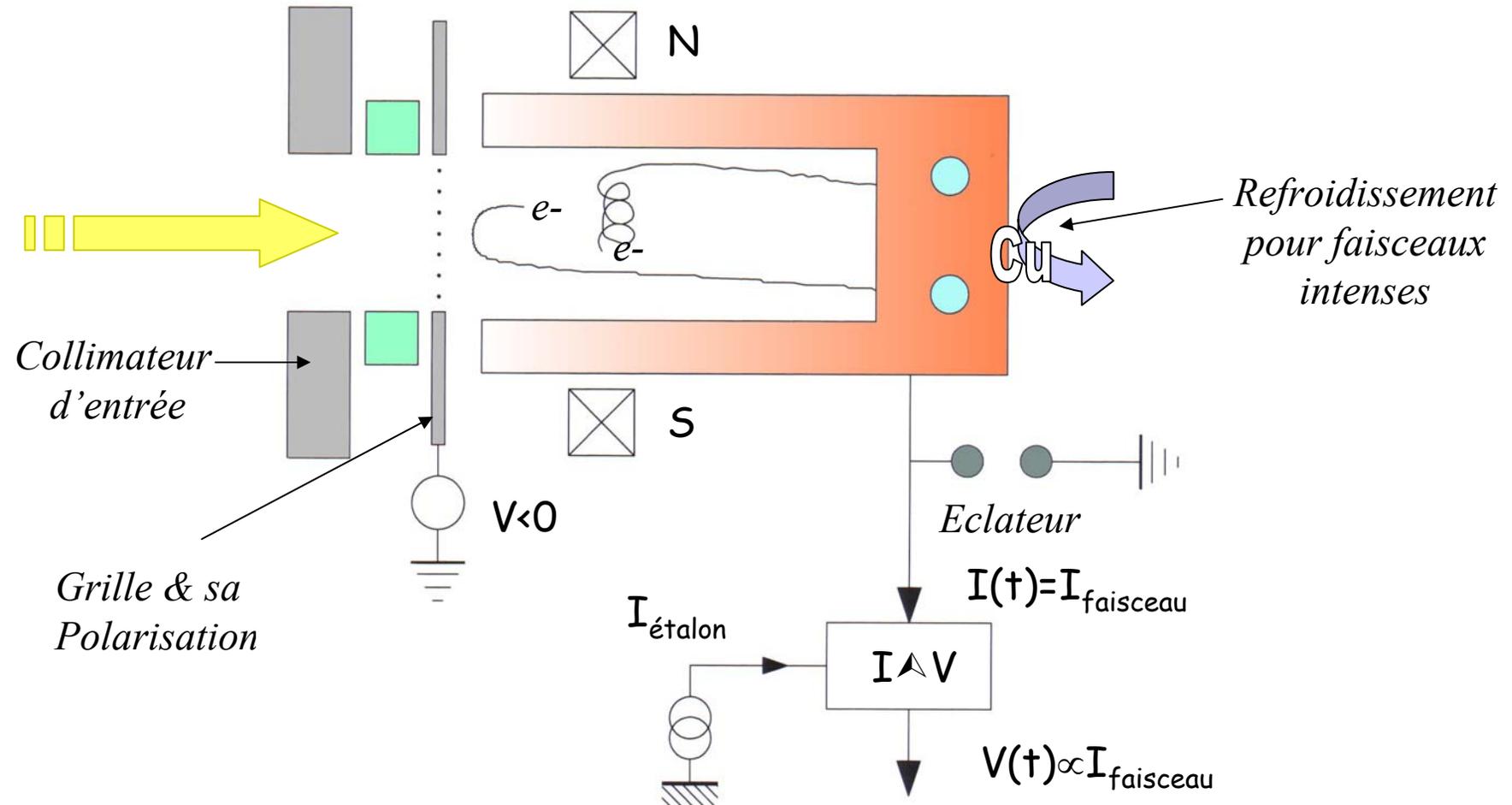
CONTRAINTES DE CONCEPTION ET DE REALISATION DE L'INSTRUMENTATION FAISCEAU LIEES A L'ENVIRONNEMENT DES ACCELERATEURS

Capteurs + Electronique:

- Champs électriques, magnétiques, électromagnétiques.
Perturbations lumineuses parasites:
Acquisition de signaux faibles, transmission et traitement des signaux.
- Rayonnements nucléaires,
- Perturbations mécaniques: défauts et modifications d'alignement, vibrations mécaniques.
- Echauffement du capteur et de l'électronique.

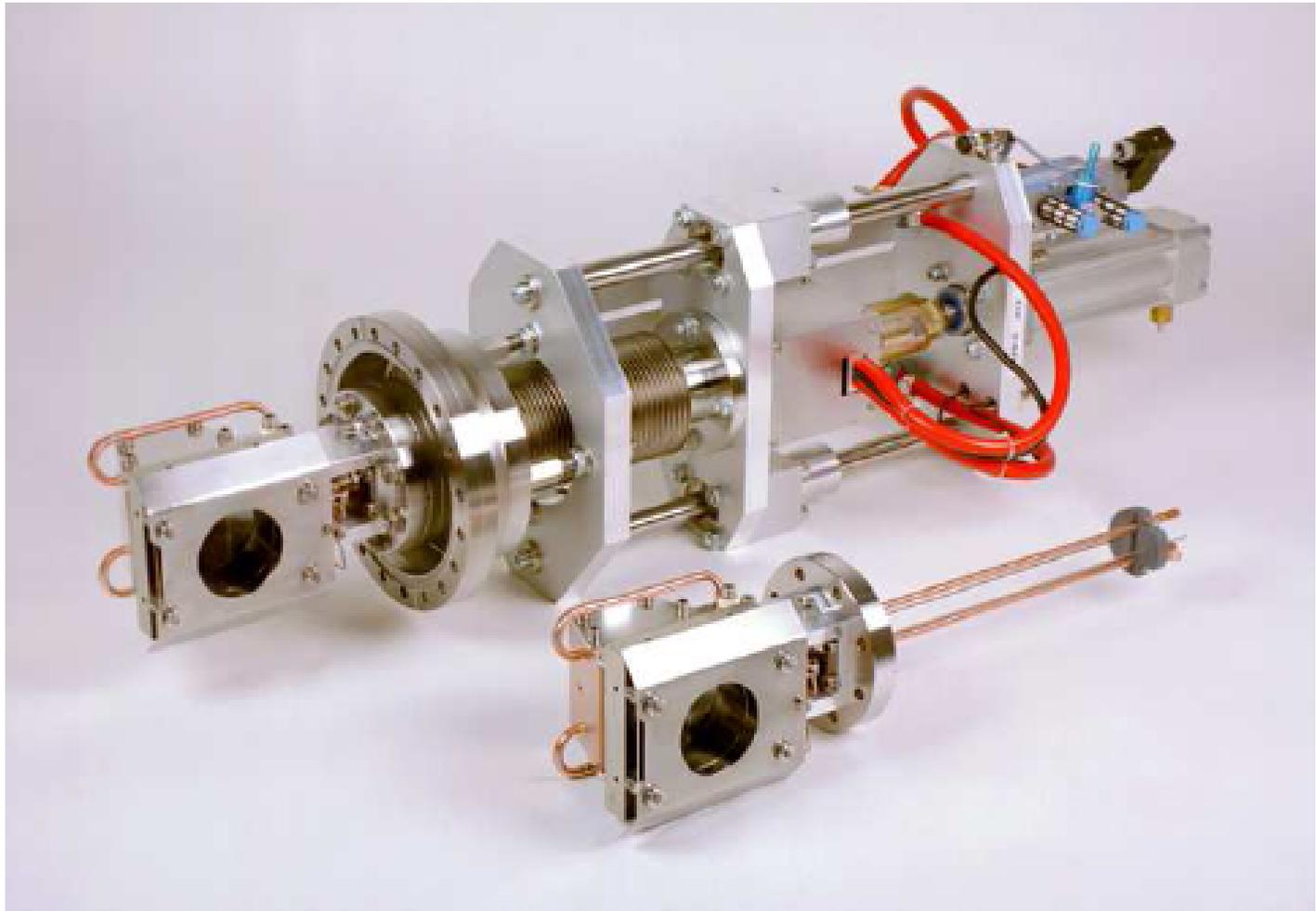
Les Mesures d'Intensité

Les cages de Faraday: principe de fonctionnement



Exemples de Réalisation

Les cages de Faraday pour forts faisceaux



Cage de Faraday et bloc d'arrêt de 25 KW. Linac de GSI. (Bride 150 mm)

Exemples de Réalisation

Les cages de Faraday pour forts faisceaux



Cage de Faraday non refroidie (Linac de GSI) Diamètre utile: 50 mm avec dispositif magnétique et électrique de suppression d'électrons secondaires

Exemples de Réalisation

Les cages de Faraday coaxiales

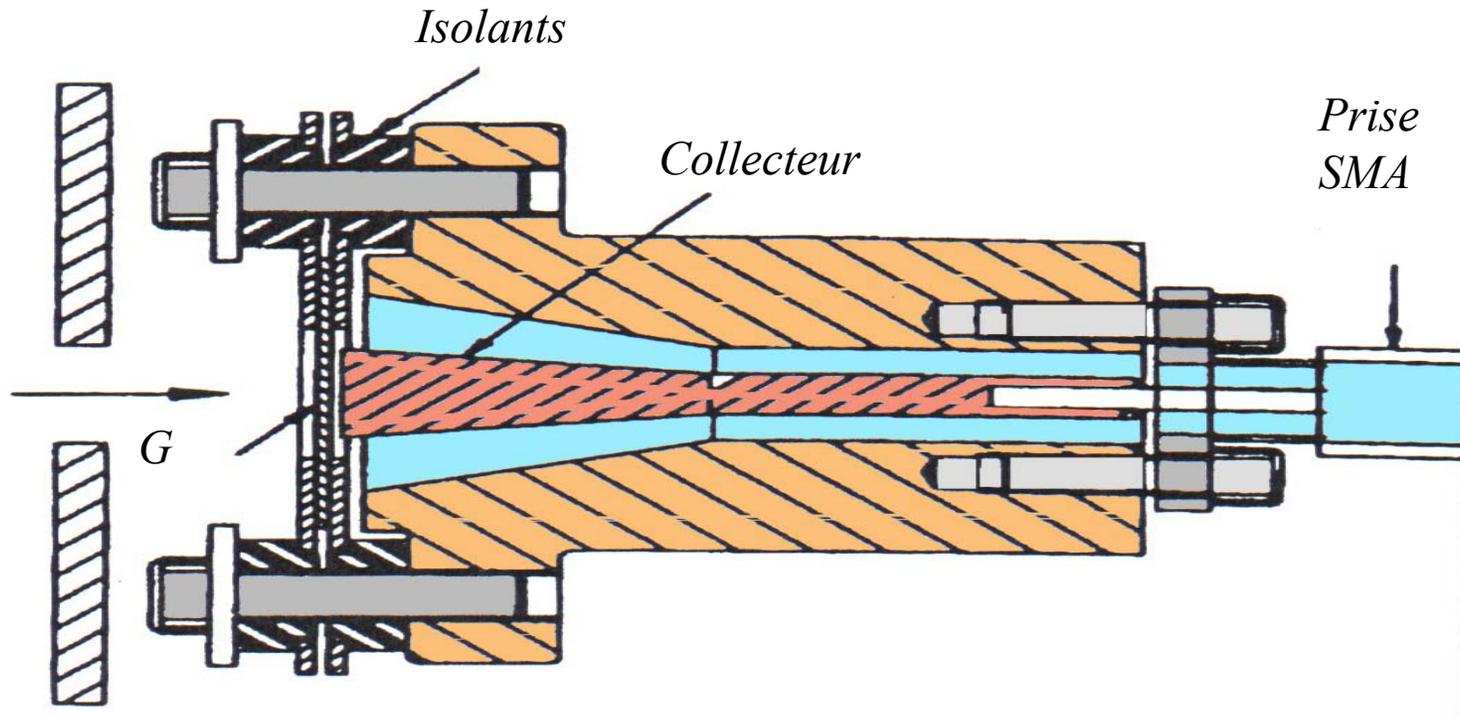


Schéma de principe d'une cage de Faraday adaptées aux hautes fréquences

Exemples de Réalisation

Les cages de Faraday coaxiales



Exemple de réalisation d'une cage de Faraday (G.S.I.):

Gauche: ensemble monté;

Milieu: grille de polarisation;

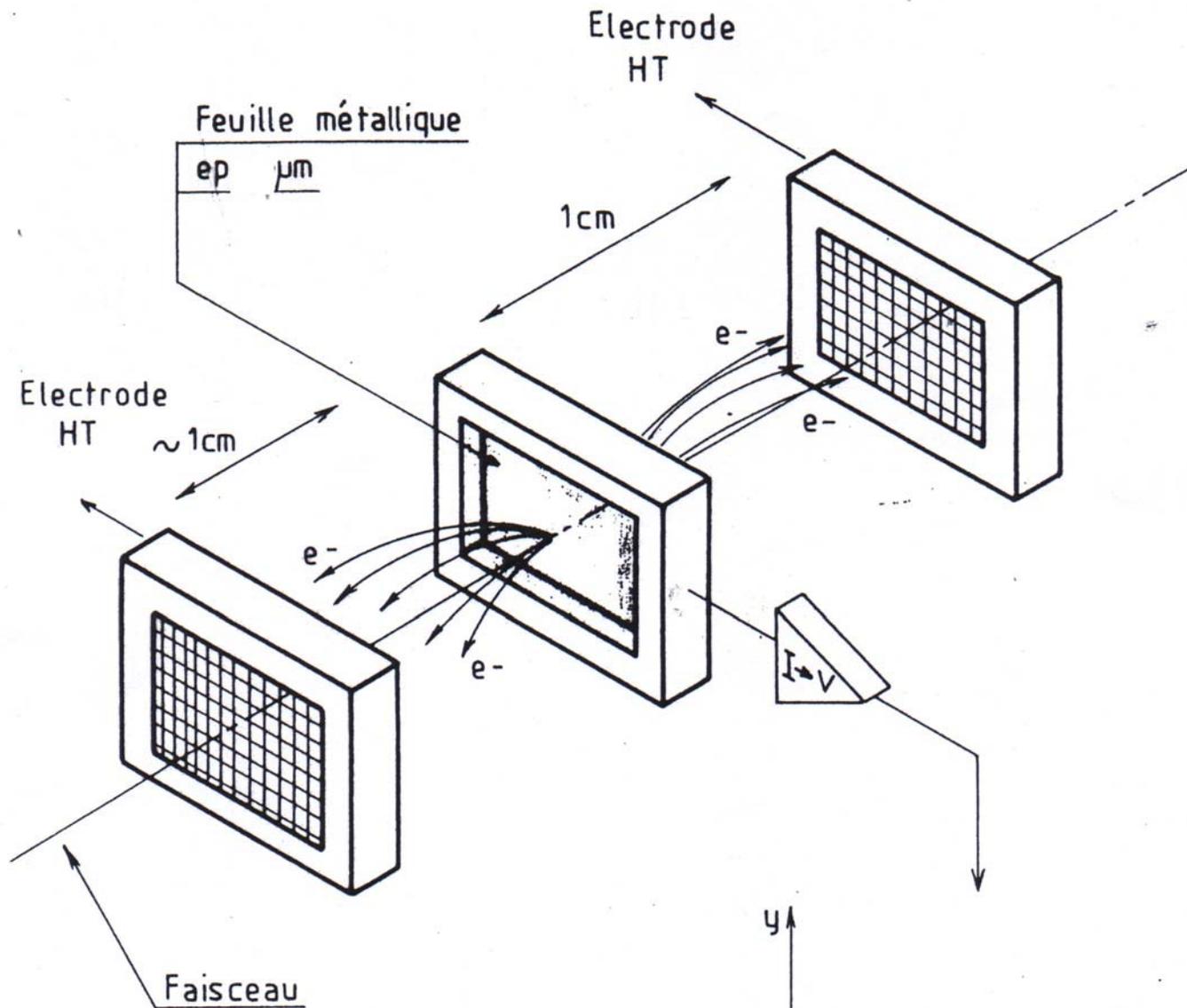
Droite: collecteur et circuit de refroidissement

Les Mesures d'Intensité

Les Détecteurs à Emission Secondaire

Propriétés:

- Détecteur (peu) interceptif.
- Moniteur nécessitant un étalonnage.
- Moniteur fonctionnant pour toutes les natures de faisceau.
- Bande passante étendue pouvant dépasser le GHz.
- Moniteur utilisé dans les lignes de transfert de faisceau.

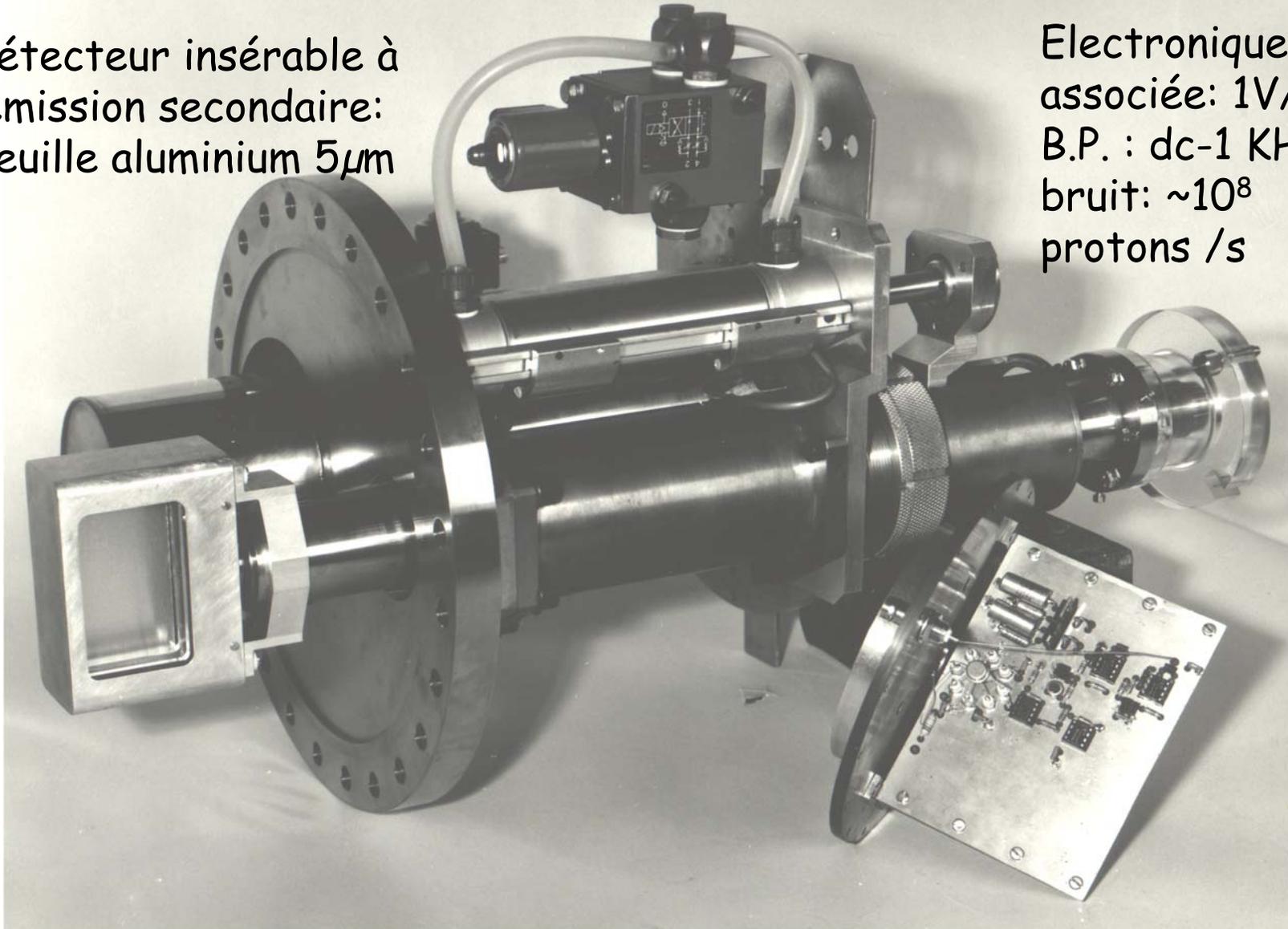


Principe de fonctionnement d'un détecteur à émission secondaire

Les Mesures d'Intensité

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

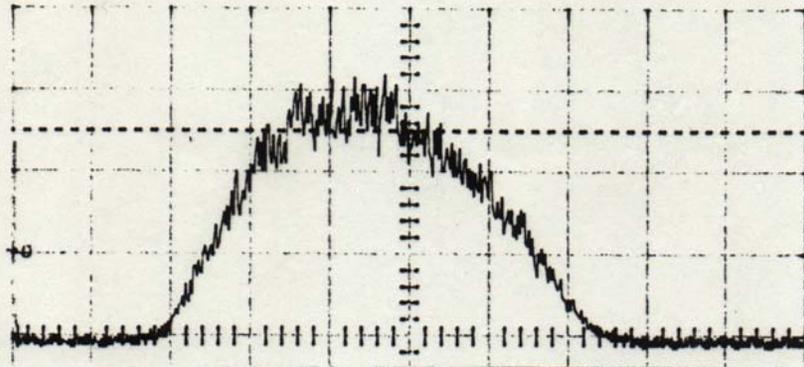
Electronique
associée: $1\text{V}/\text{nA}$;
B.P. : dc-1 KHz;
bruit: $\sim 10^8$
protons /s



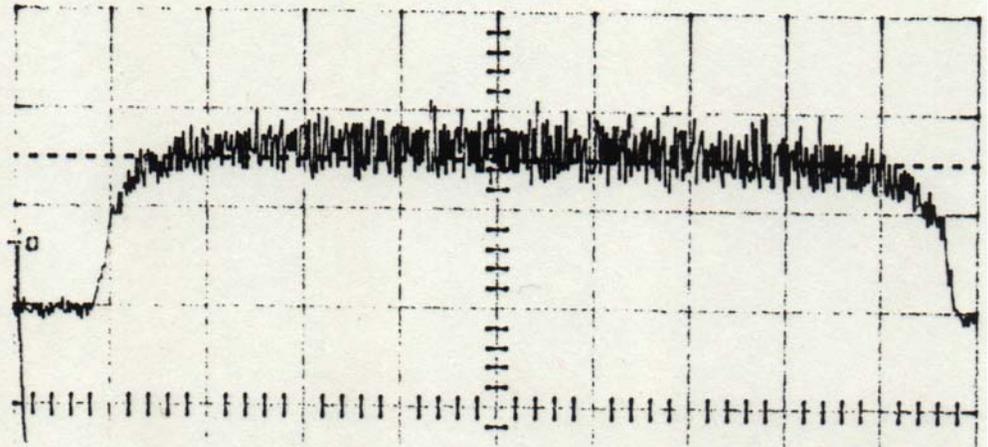
Les Détecteurs à Emission Secondaire

APPLICATION AU CONTRÔLE DU DEVERSEMENT DU DEVERSEMENT DU SYNCHROTRON SATURNE II

Ejection de SATURNE II d'un 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



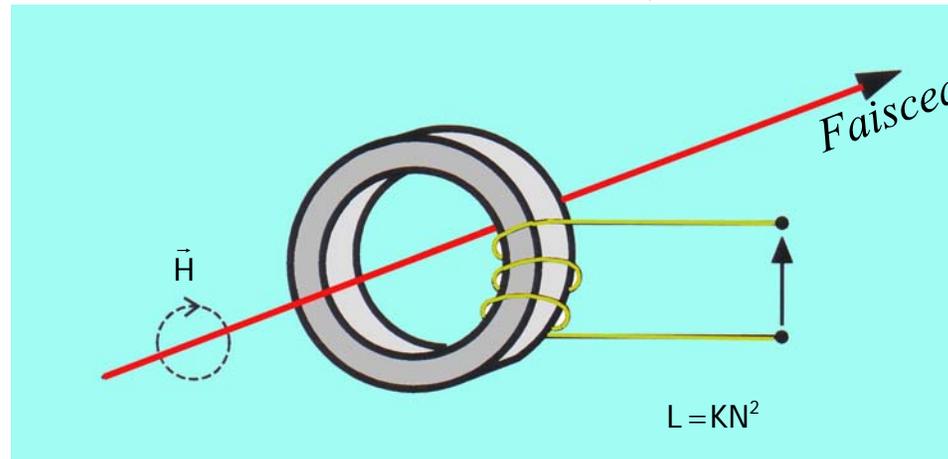
Déversement obtenu avec dispositif de contrôle
(même détecteur - mêmes échelles)

Les Mesures d'Intensité

Les Transformateurs d'Intensité

Propriétés:

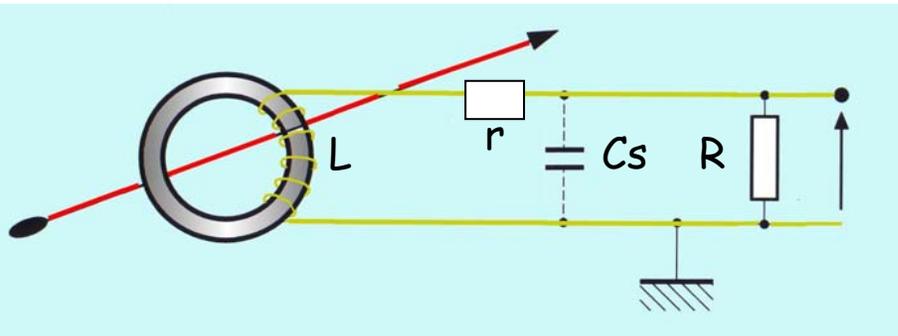
- Utilise le champ H associé au faisceau
- Non destructif du faisceau
- Moniteur absolu.
- Large bande passante possible: ~ 1 GHz
- Utilisable pour toutes les particules accélérées chargées
- Nombreuses réalisations commerciales disponibles



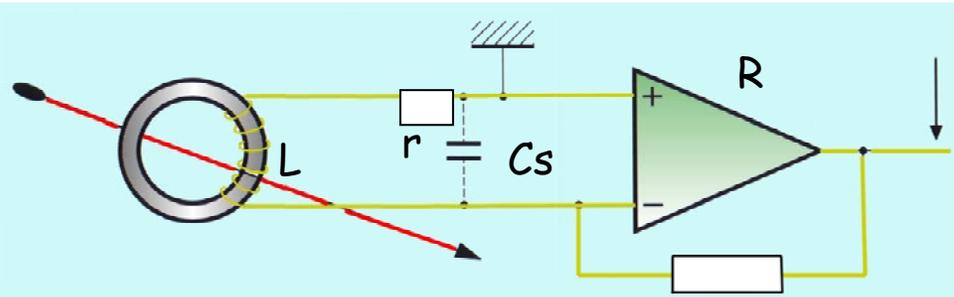
$$V = L \frac{dI_{\text{faisceau}}}{dt}$$

Les Mesures d'Intensité

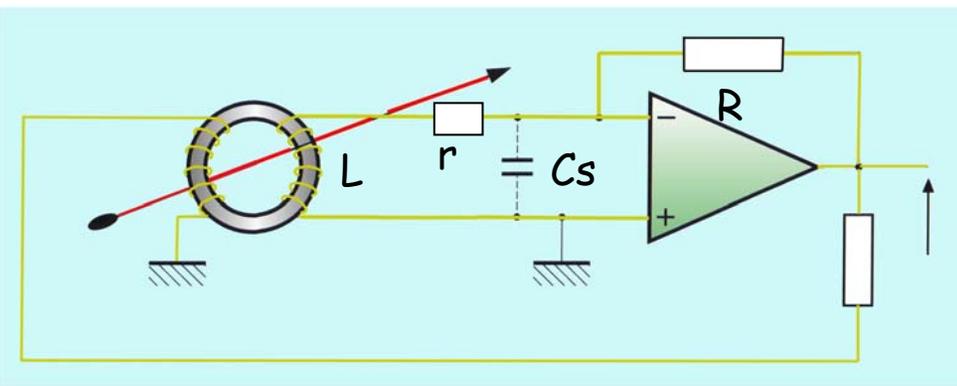
Les Transformateurs d'Intensité



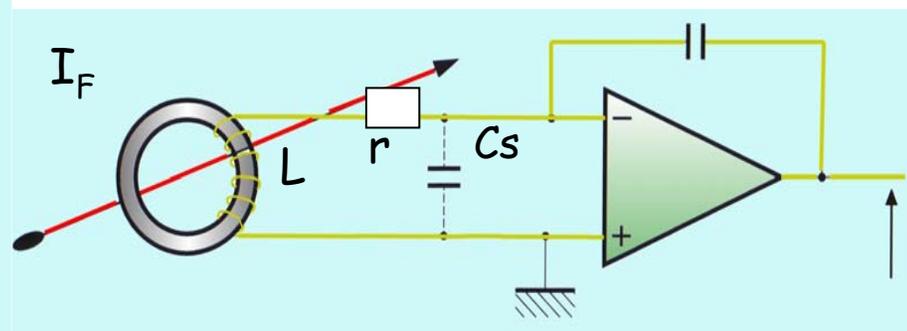
Transformateur AC passif



Transformateur AC actif



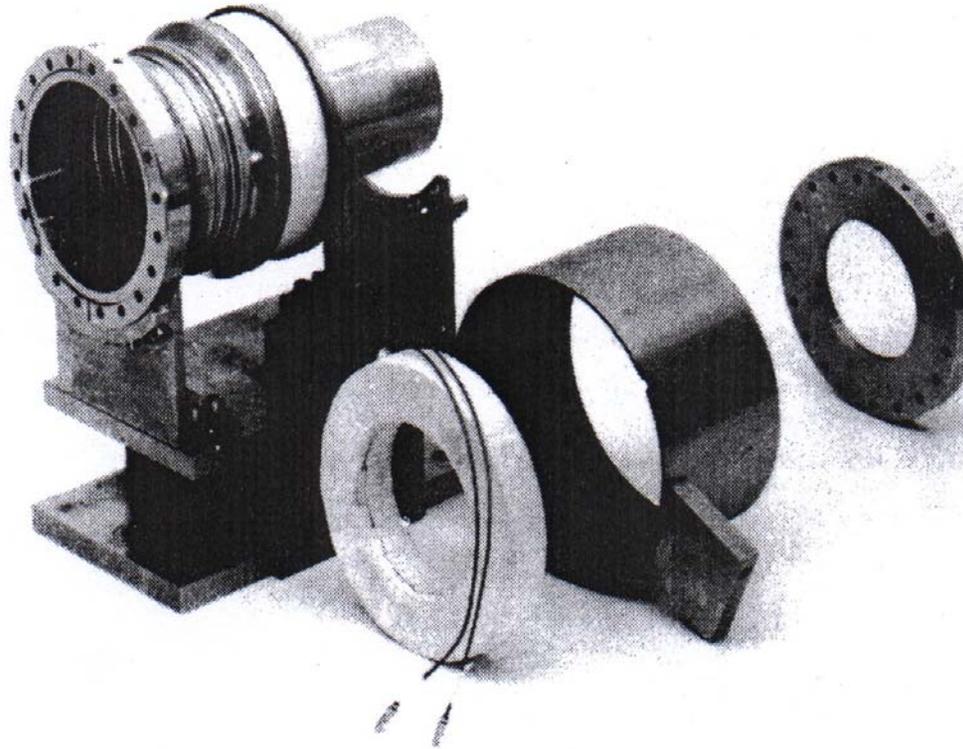
*Transformateur AC actif à contre-réaction
par enroulement supplémentaire*



*Transformateur AC couplé à
un circuit intégrateur*

Les Mesures d'Intensité

Les Transformateurs d'Intensité



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

Les Mesures d'Intensité



INSTRUMENTATION

Les Transformateurs d'Intensité

Utilisation : mesure de l'intensité électrique du faisceau d'ions

Principe :

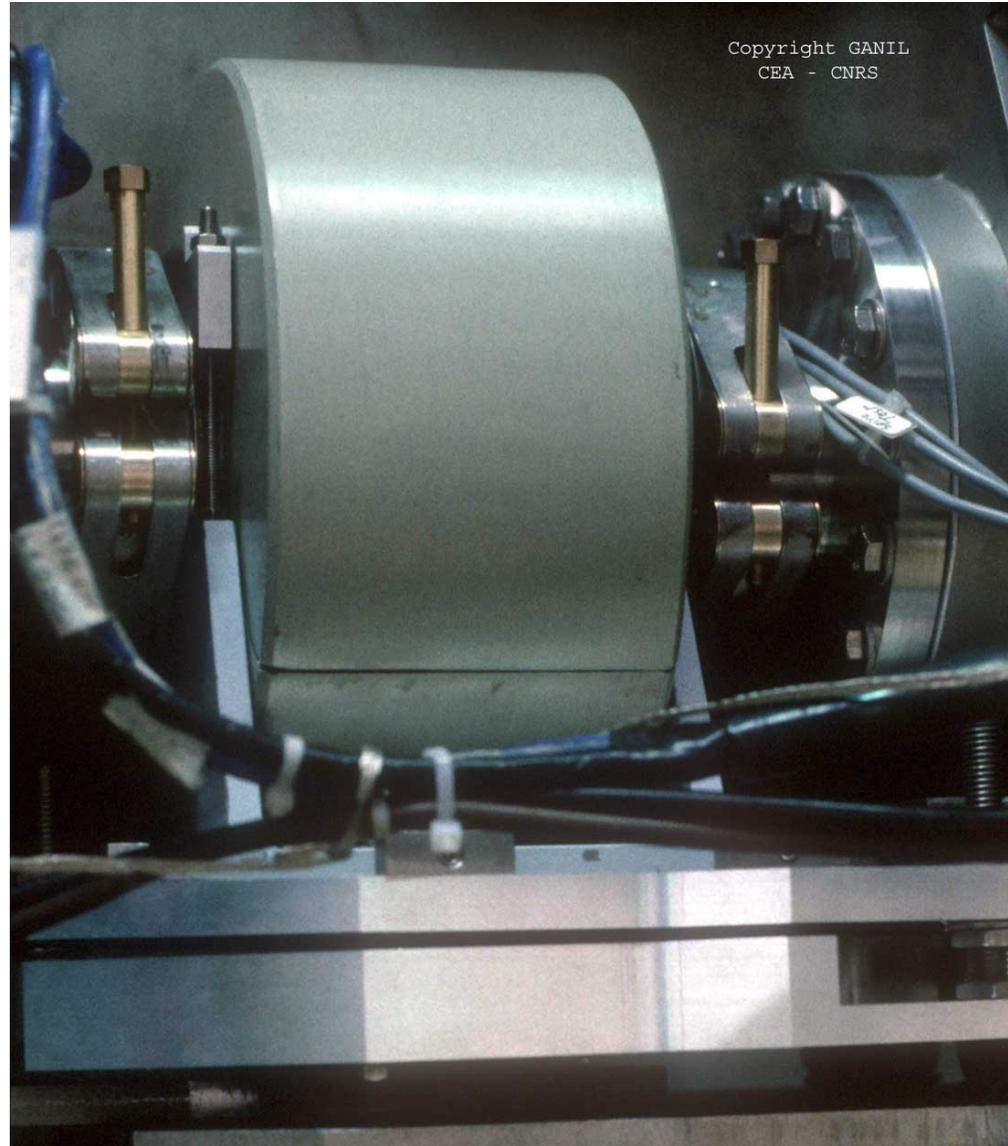
détection synchrone à double pesée (avec et sans faisceau) du signal issu d'un transformateur d'intensité dont le primaire est le faisceau haché à 530Hz

(voir fiche suivante)

Performances :

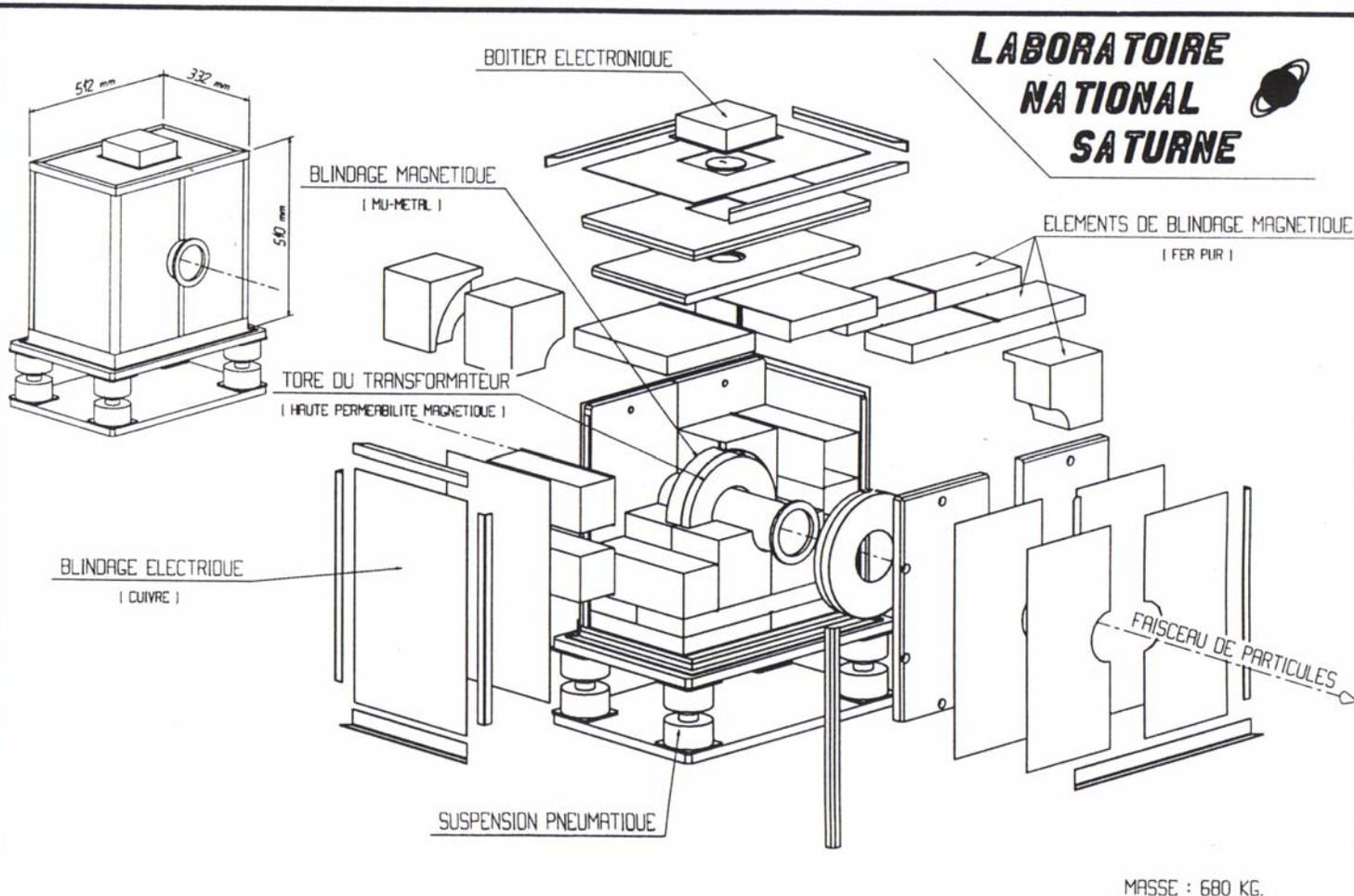
- précision : $< 2\%$
- offset : $< 10 \text{ nAe}$
- résolution : 1 nAe

Contact : E.Petit (petit@ganil.fr)



Les Mesures d'Intensité

Les Transformateurs d'Intensité



T.I. – A.C. actif:

Tore:

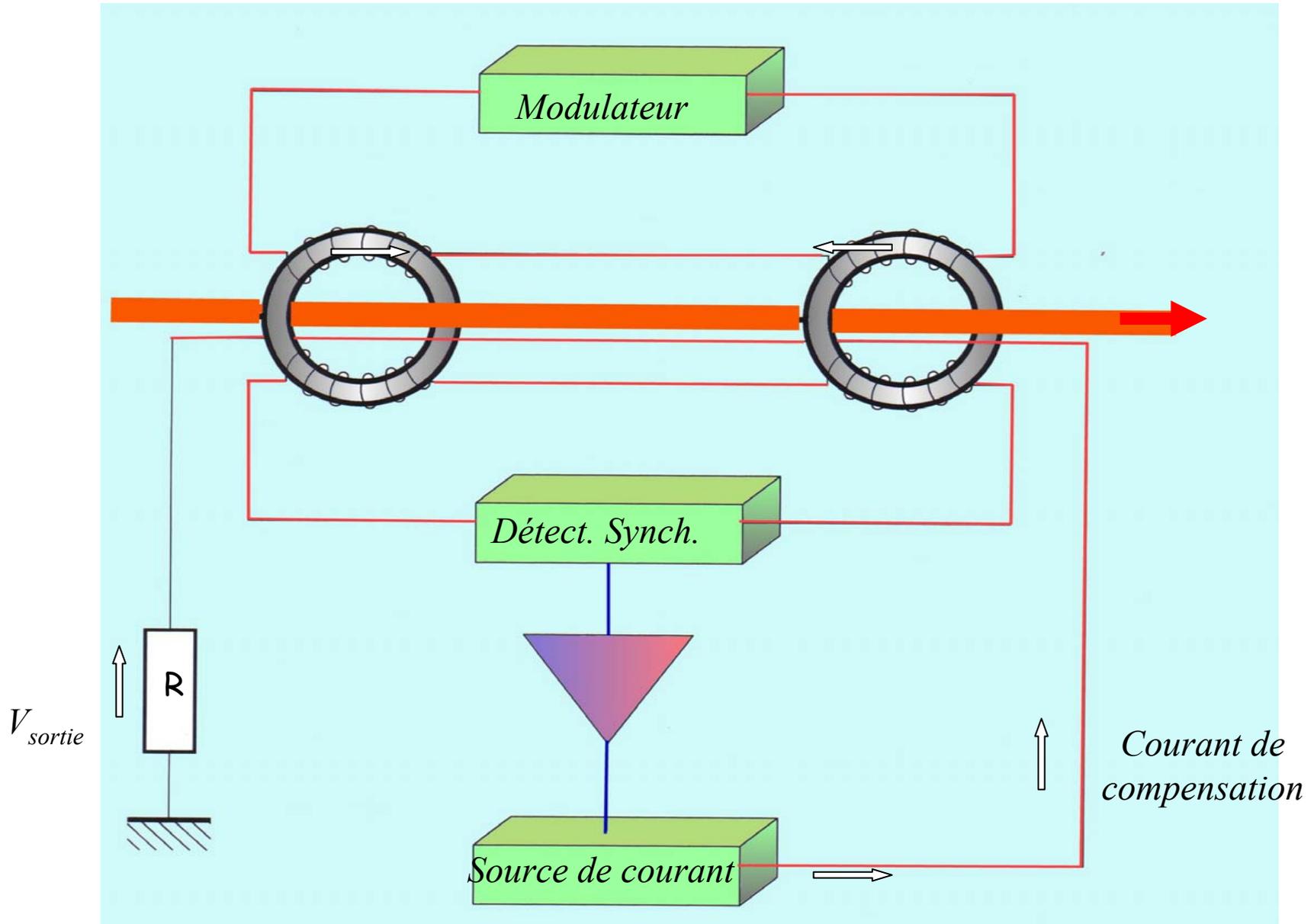
- Ultraperm
- $\varnothing_{ext} = 240$ mm
- $\varnothing_{int} = 130$ mm
- H= 40mm
- N= 770
- L= 128 H

Tore

+amplificateur:

- 1V/ 100nA
- B.P.: 1Hz-3KHz
- Bruit crête: 80 nA

Les Mesures d'Intensité

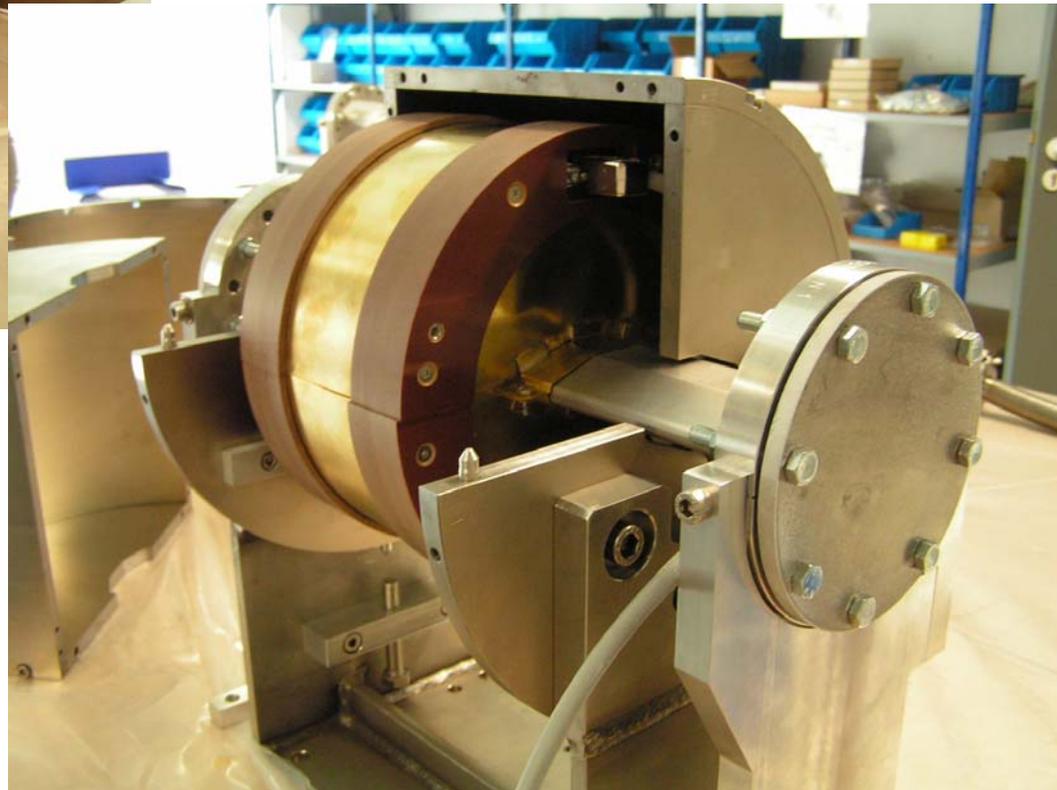


Principe de fonctionnement du transformateur d'intensité « D.C.C.T ».

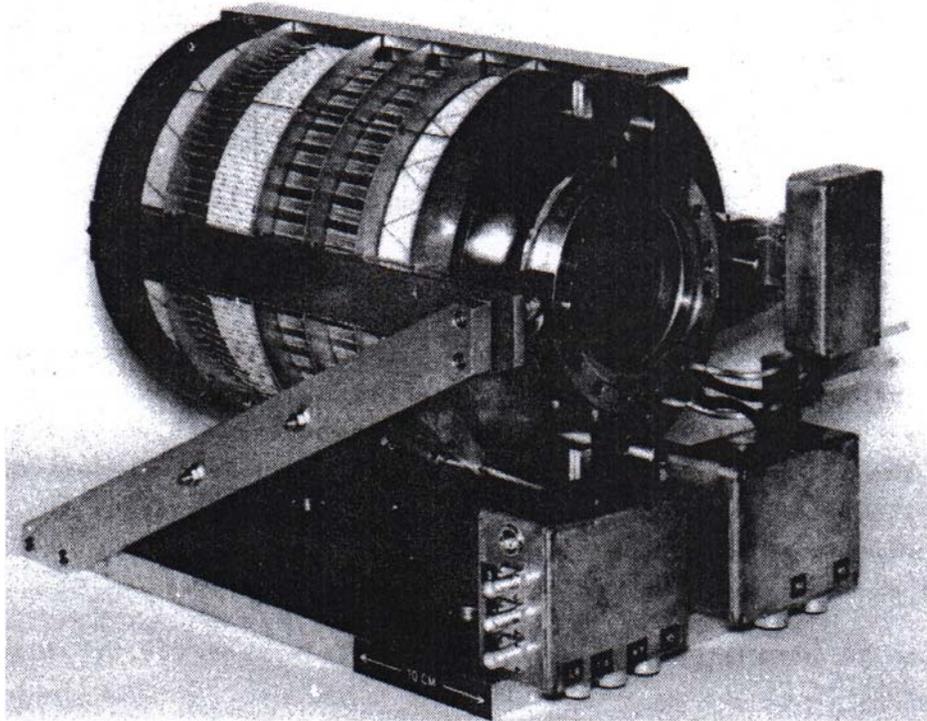
Les Mesures d'Intensité



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



Les Mesures d'Intensité



Transformateur D.C.C.T. de AA

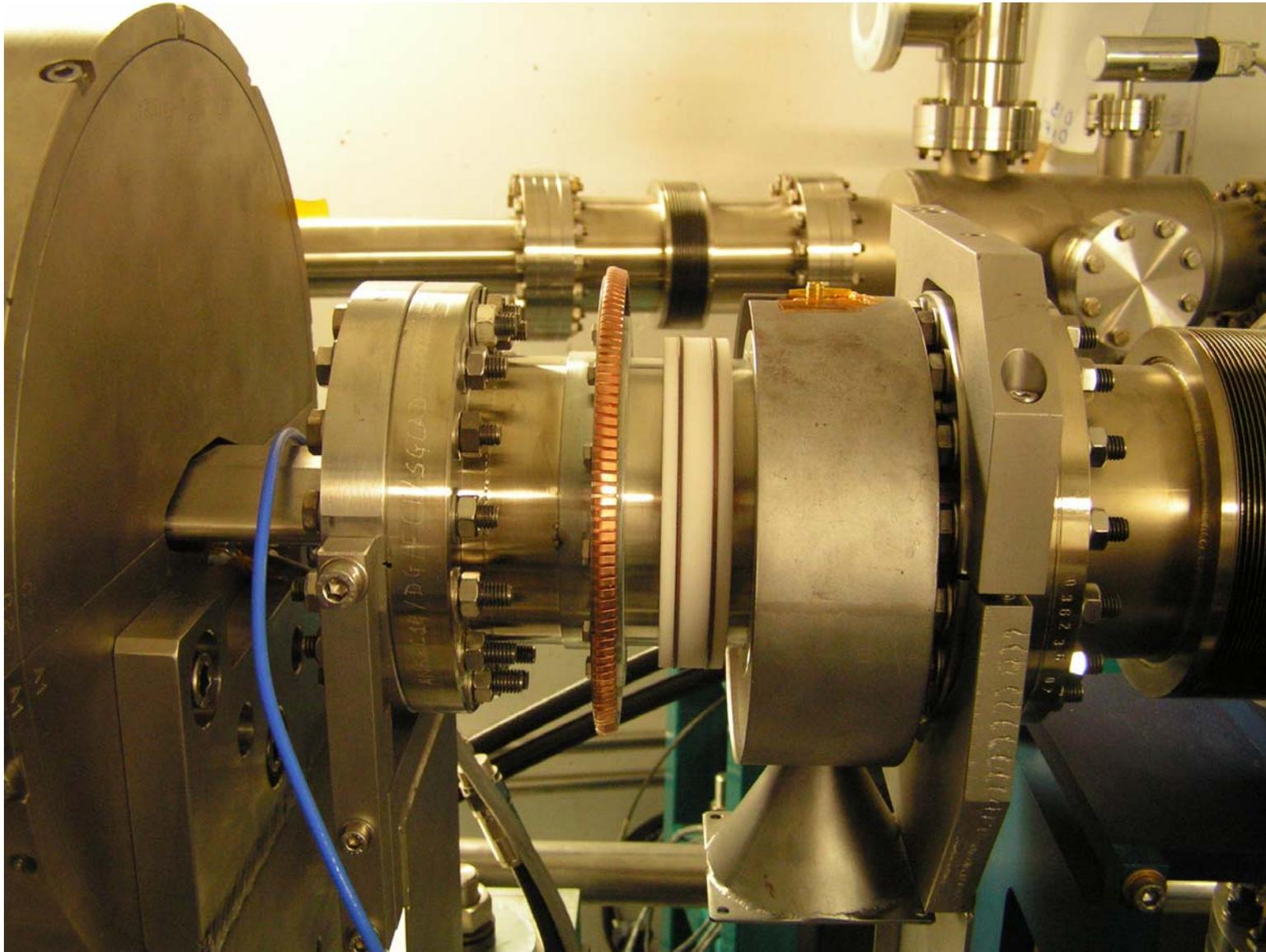
Faisceau AA: -500mA... 0 ... +500 mA

B.P.: dc-50 KHz;

Résolution: 1 μ A avec 200 ms d'intégration

Matériau: Ultraperm (Ni-Fe)

Les Mesures d'Intensité



F.C.T. monté sur l'anneau SOLEIL (B.P. \gg 500MHz)

Les Mesures d'Intensité

Tore gauche: Transformateur DC
300 μA - 1 A;
B.P.: D.C. - 20 kHz (200 kHz)
Résolution: 2 μA

Tore milieu: Transformateur AC
(correction transformateur DC)

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

Rayon int.: 135 mm
Rayon ext.: 145 mm
Hauteur tore: 10 mm
Matériau : Vitrovac 6025F
 $\mu = 10^5$
Gap isolant: alumine



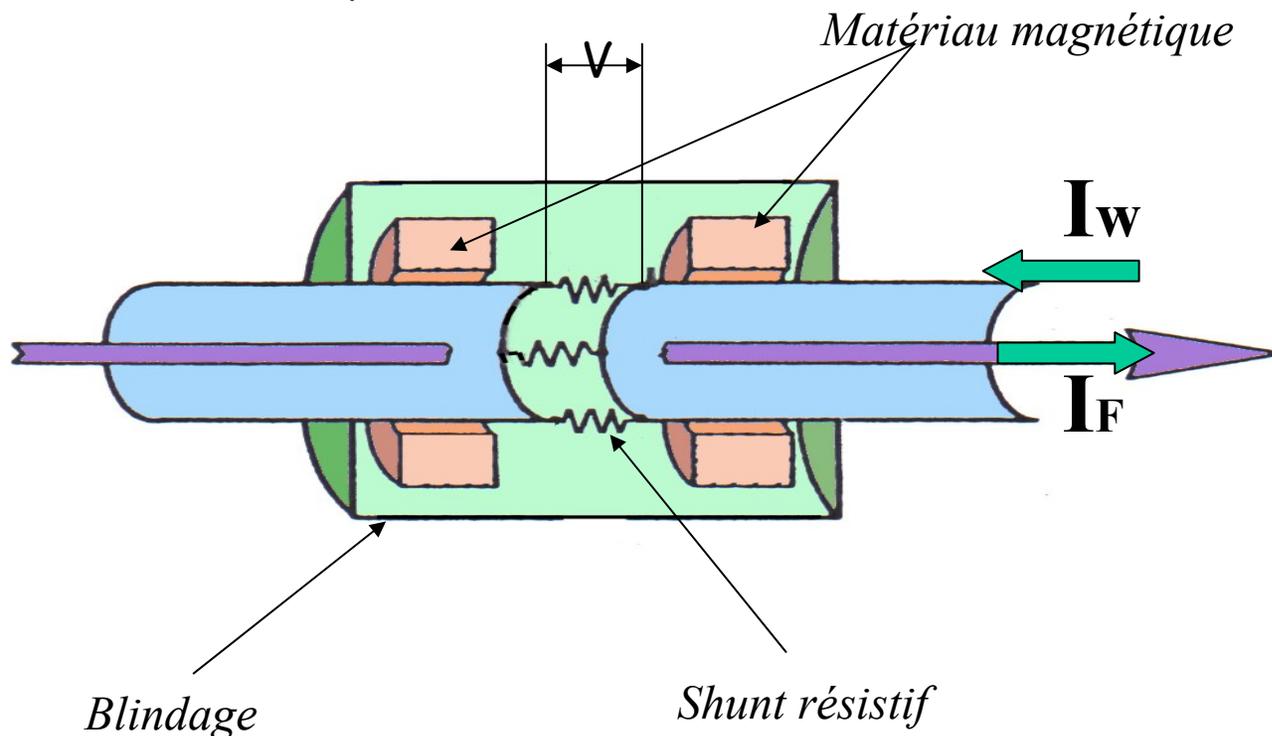
Ensemble de 3 transformateurs (G.S.I.)

Les Mesures d'Intensité

"Wall current monitor"

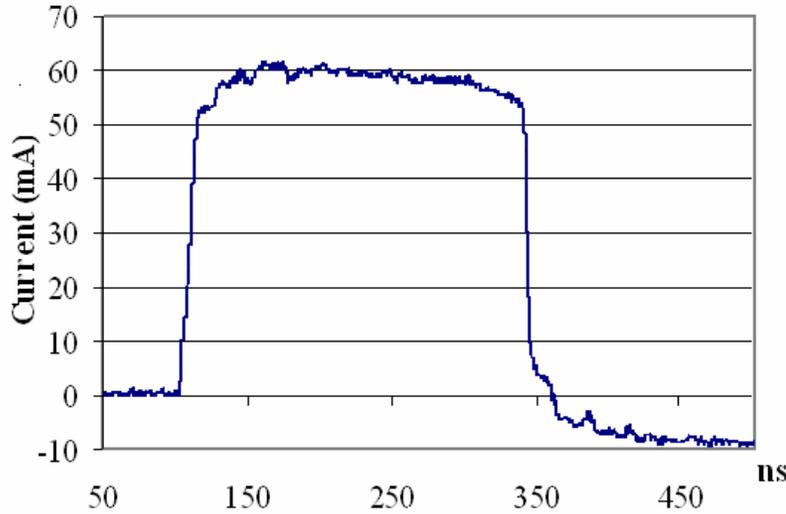
Propriétés:

- Utilise le courant de paroi.
- Non destructif du faisceau
- Large bande passante possible: plusieurs GHz.
- Possibilité d'obtenir la position du faisceau

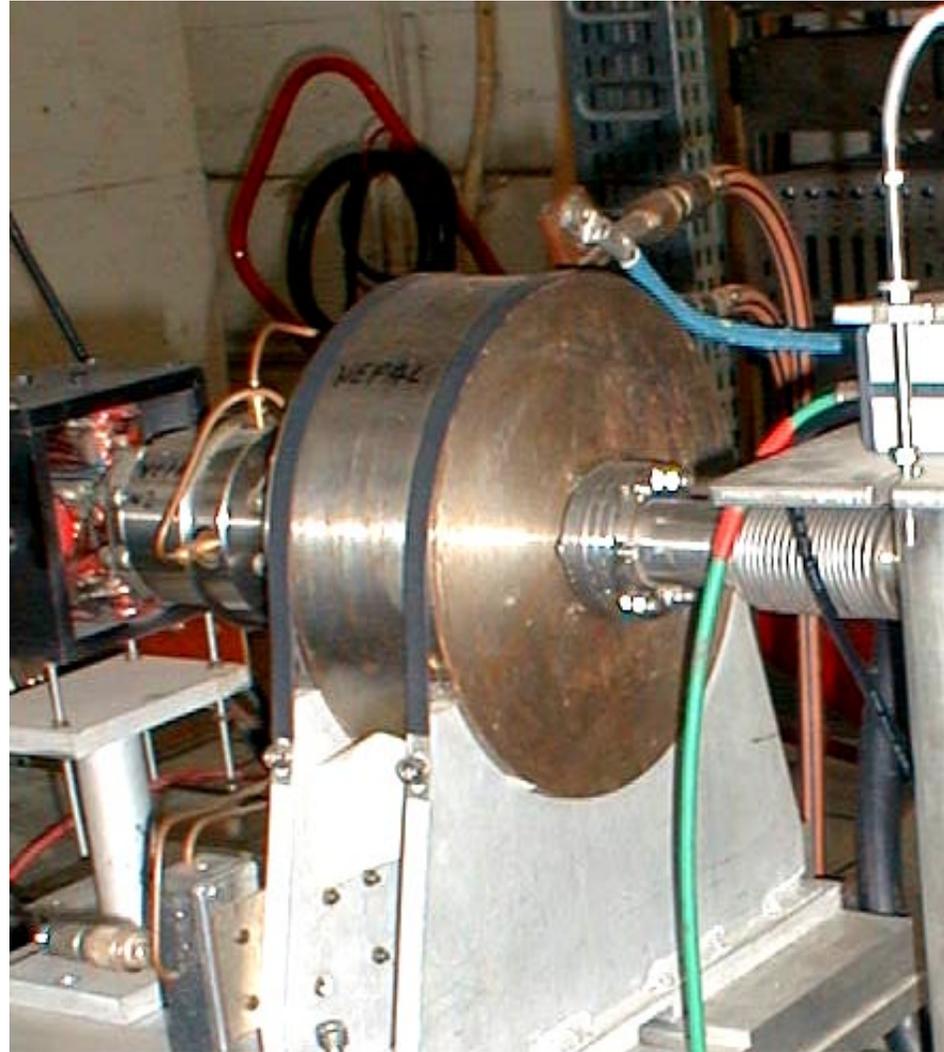
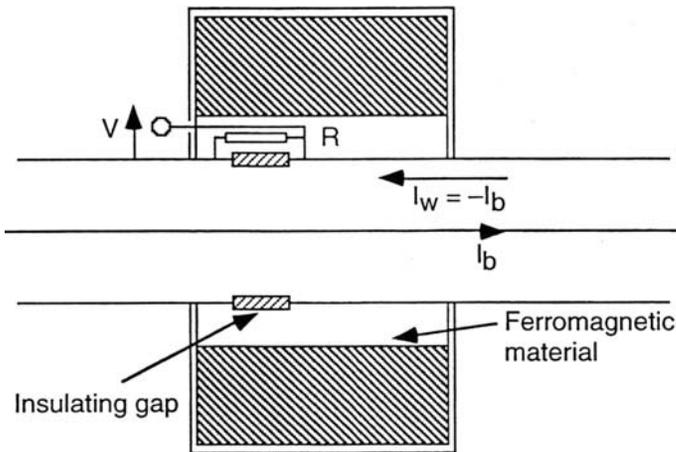


Les Mesures d'Intensité

"Wall current monitor" monté sur "ALTO" - IPNO

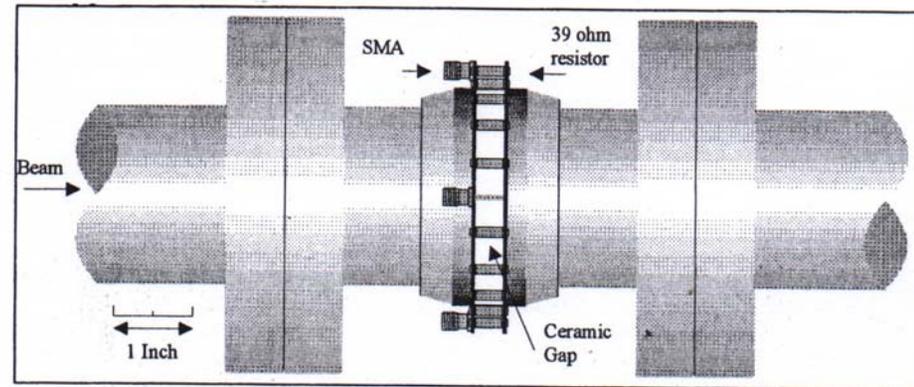
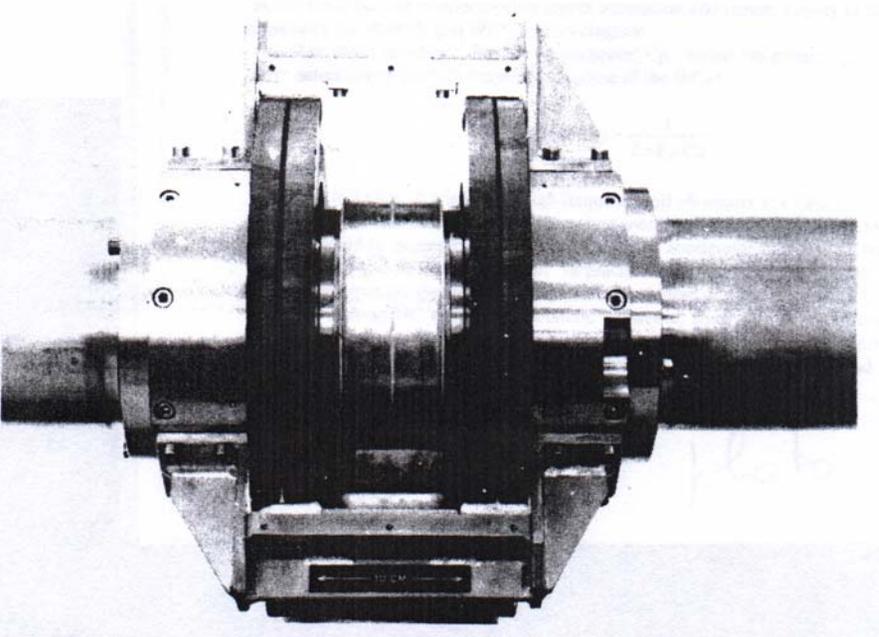


Sensibilité sous 50Ω du signal 1V/A



Les Mesures d'Intensité

Exemples de réalisation:



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

"Wall current monitor"

Gap du Wall current monitor I.S.R.
(CERN)

Les Mesures d'Intensité

Electrode capacitive

- Non interceptif.
- Moniteur fonctionnant pour toutes les natures de faisceau.
- Nécessite en pratique un étalonnage.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée aux machines à protons (longueur du bunch \gg longueur de l'électrode)
- Contrôle de la forme des bunches, mesure de la phase faisceau / R.F.

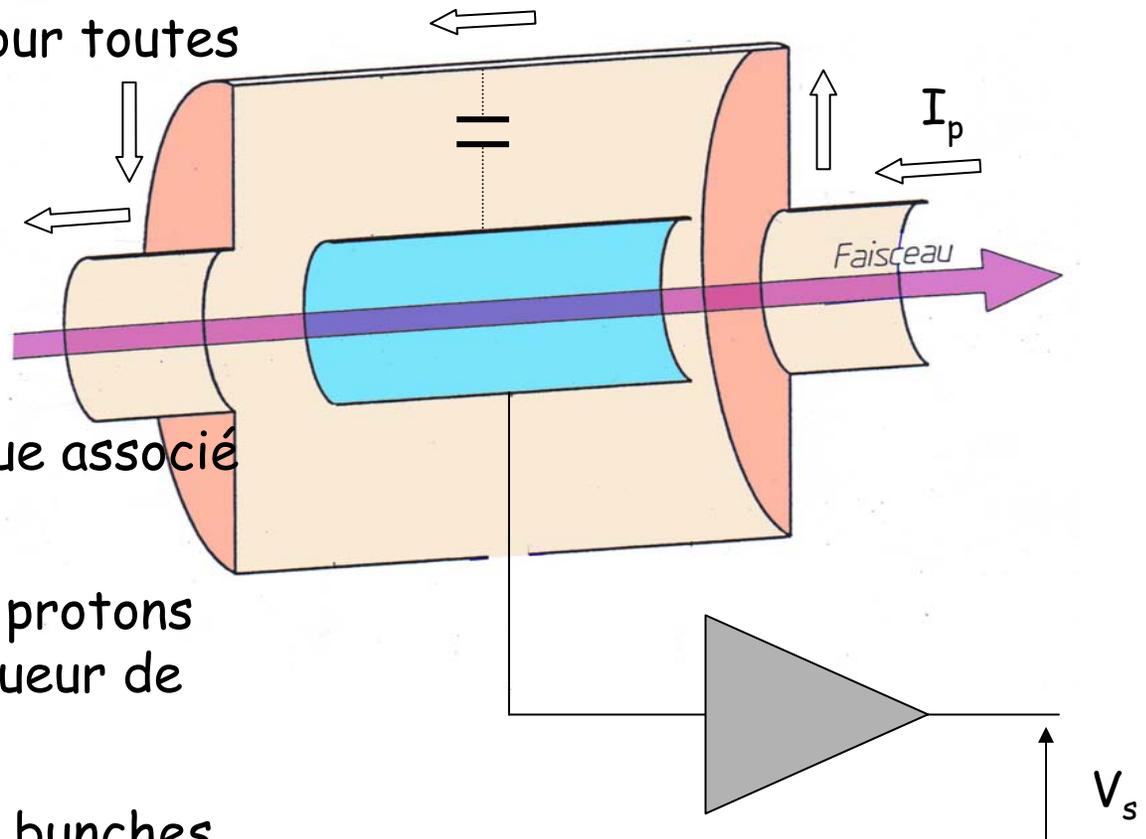
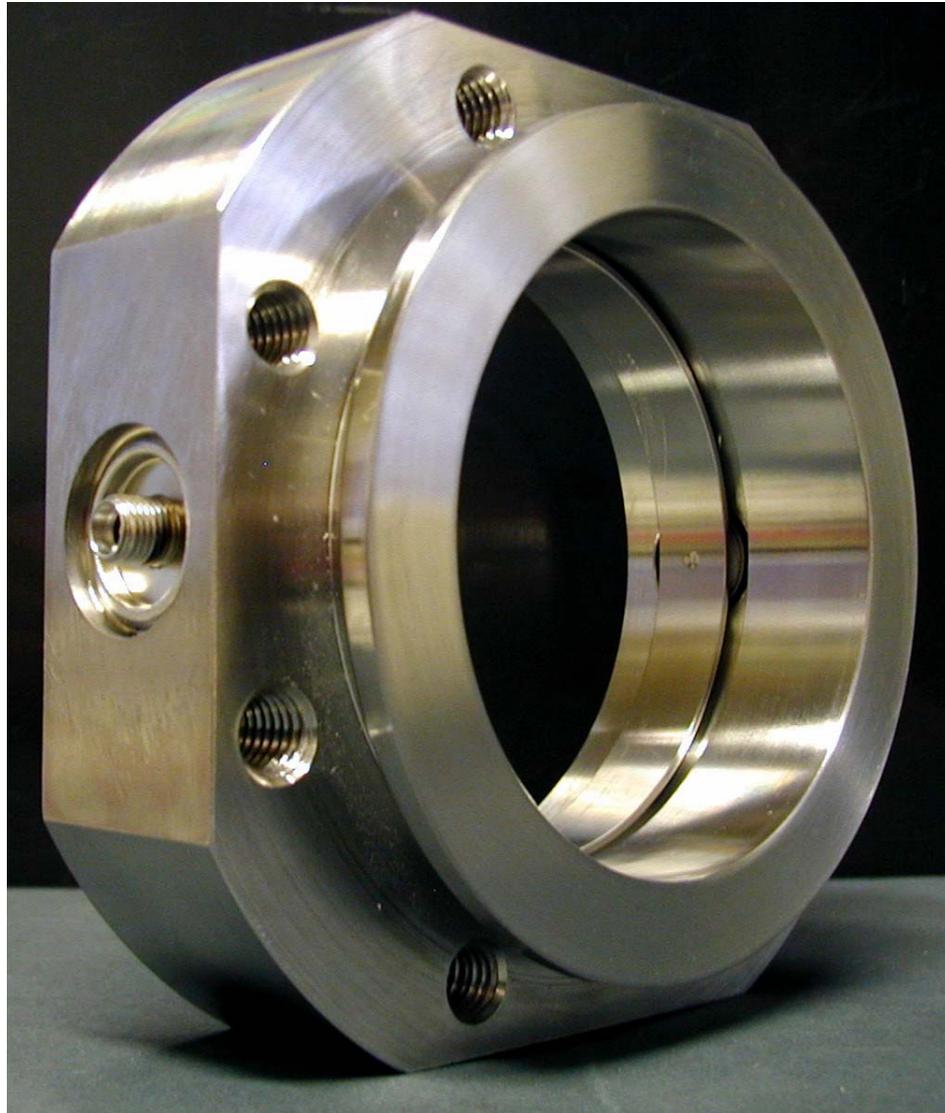


Schéma de principe d'une P.U. capacitive

Les Mesures longitudinales

Electrode capacitive: Forme du bunch et phase



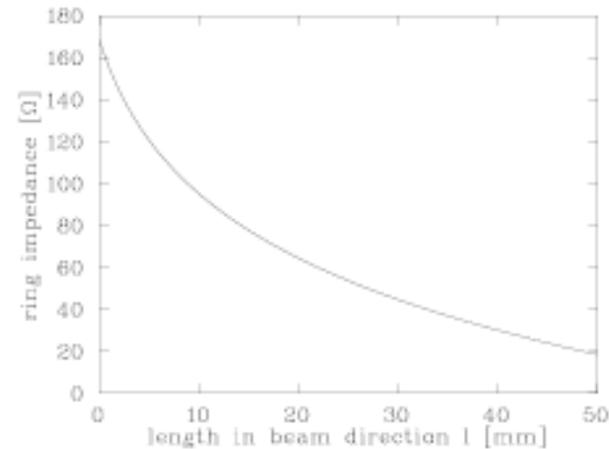
Exemple de réalisation d'une électrode capacitive

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

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

La Détection de longueur de bunch

Electrode capacitive Haute fréquence



Impédance d'une électrode P.U. circulaire
l: Longueur électrode
h: Distance conducteur interne / externe
D: Epaisseur électrode

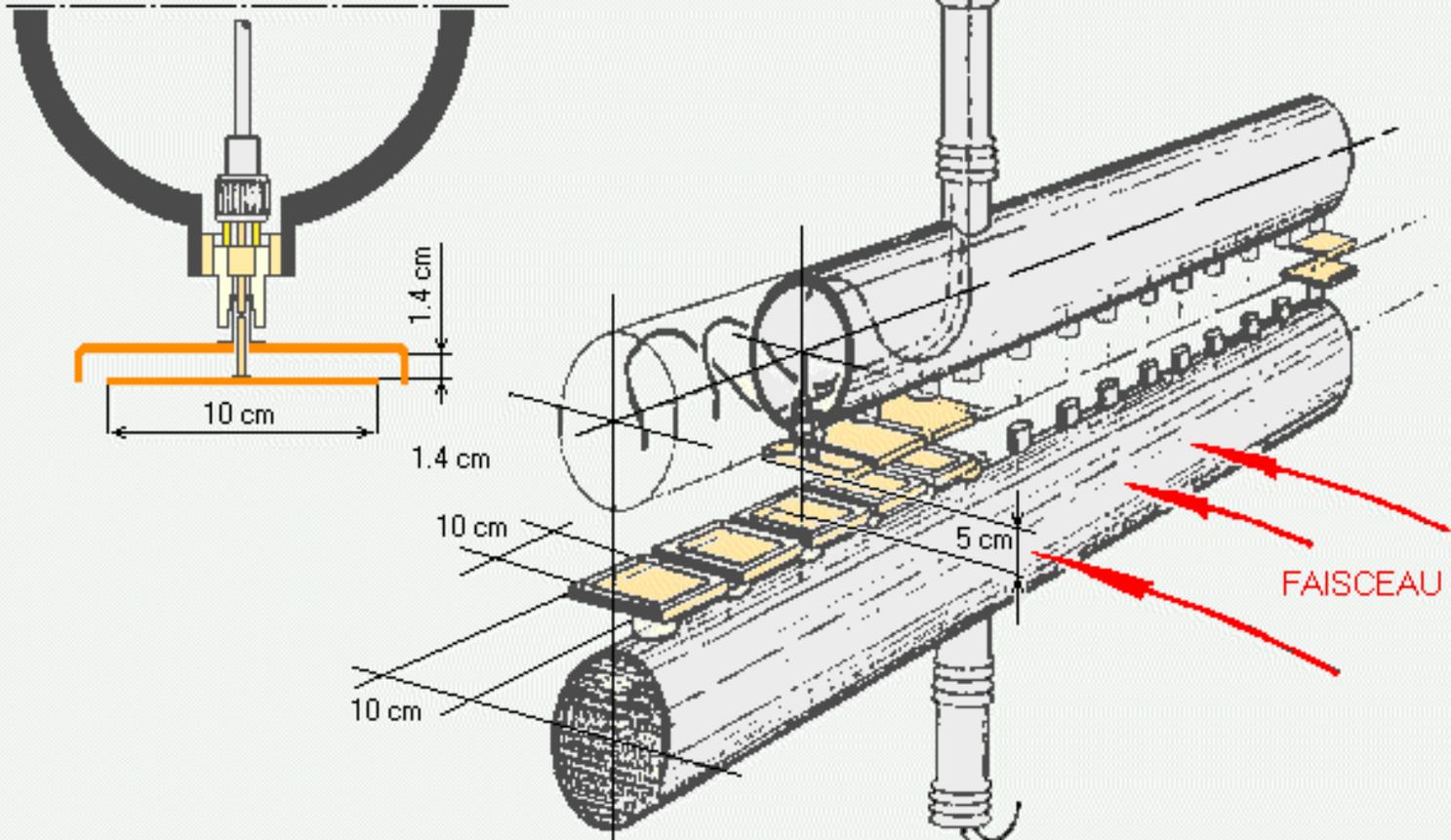
$$Z_0(l) = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.4}} \ln \left(\frac{5.98h}{0.8l + d} \right)$$

Mesure de longueur de bunch
Electrode capacitive 50 Ω
Diamètre utile: 35 mm
Linac de GSI à 108 MHz

La Détection de Phase

Electrode capacitive

dans le cyclotron GANIL



La Détection de Phase

Sonde de Phase

Utilisation :

mesure de la phase des paquets d'ions au long de l'accélération dans les CSS par rapport à la tension HF d'accélération afin de régler l'isochronisme.

Principe :

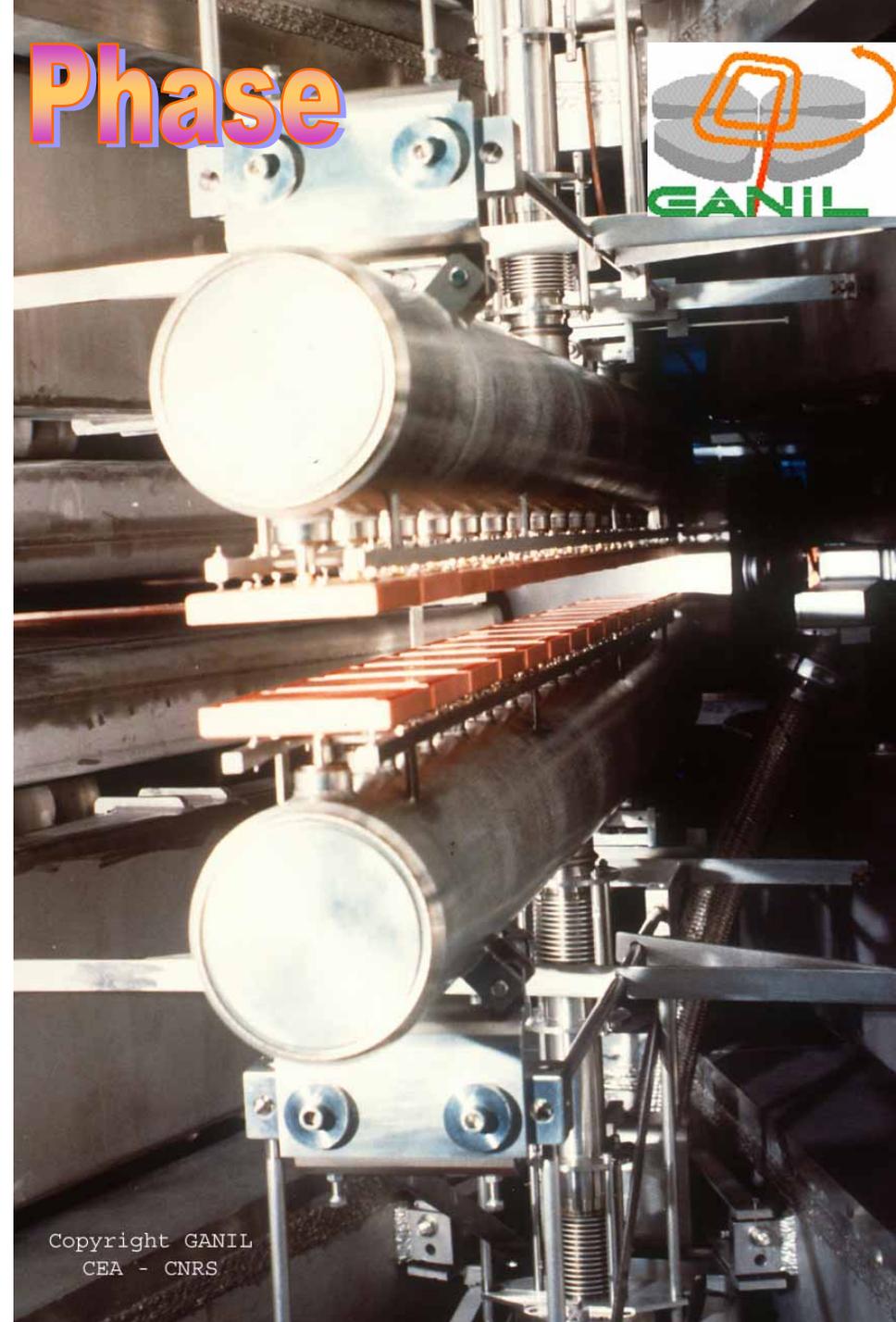
mesure de la phase de l'harmonique 2 de la structure HF faisceau ($f_{HF} = 7$ à 14 MHz) à l'aide d'une détection synchrone effectuée par deux multiplieurs entre le signal issu des électrodes et la fréquence double de la HF en phase et en quadrature.

Un multiplexeur permet de faire la mesure sur les 15 électrodes et sur un signal de référence.
(voir les fiches sur l'électronique)

Performances :

- résolution : $0,1^\circ$ rms (BP=10Hz) pour $2nAe$
- précision relative entre électrodes : $\pm 0,5^\circ$

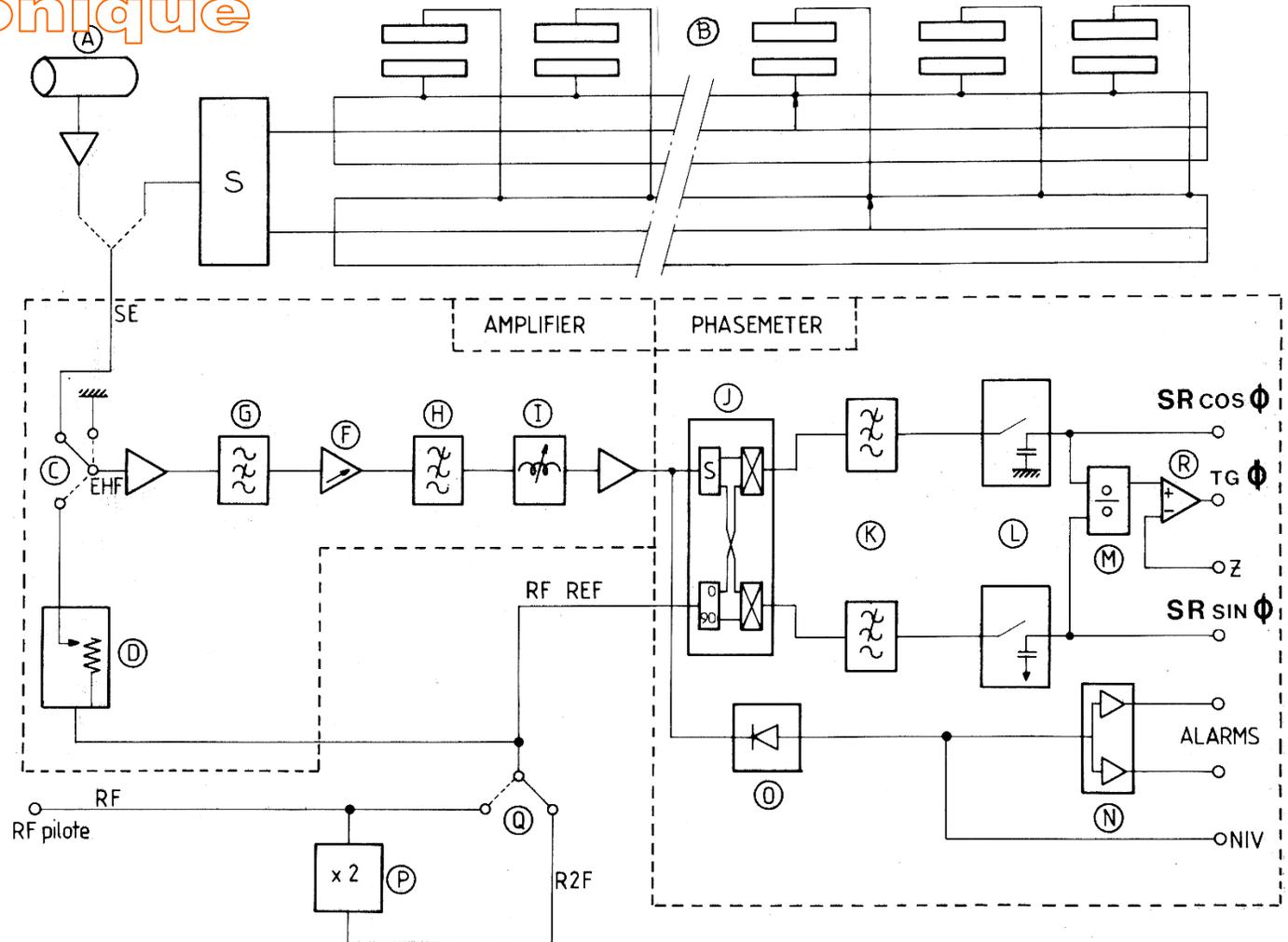
Contact : F.Loyer (loyer@ganil.fr)



La Détection de Phase

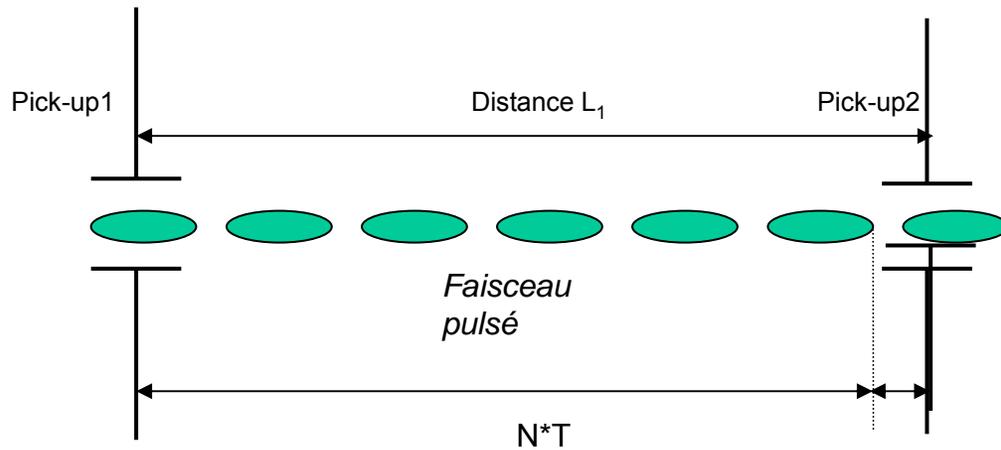
Sonde de Phase

-Electronique



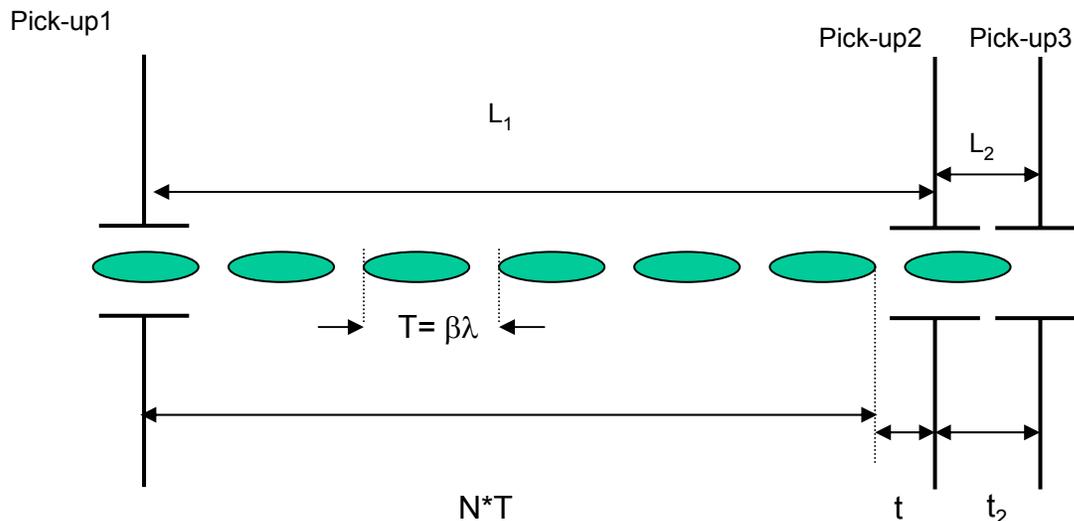
Application des détecteurs P.U.: Mesure d'énergie

Temps de vol entre P.U. : (*Faisceaux non relativistes*)



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

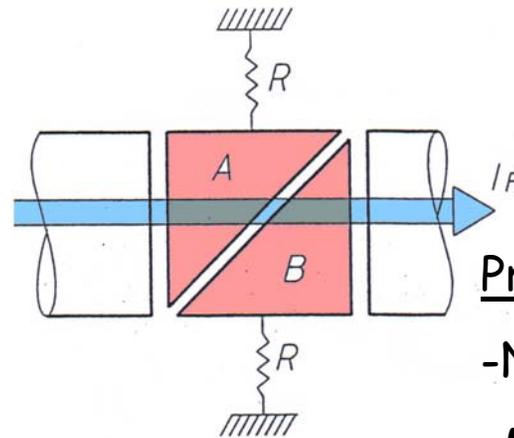
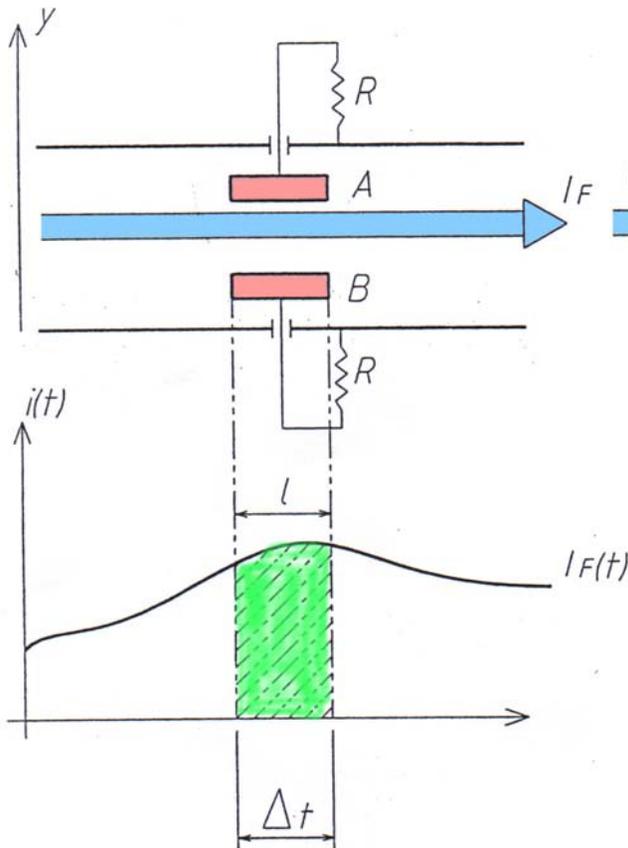
Précision:



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

La Détection de Position

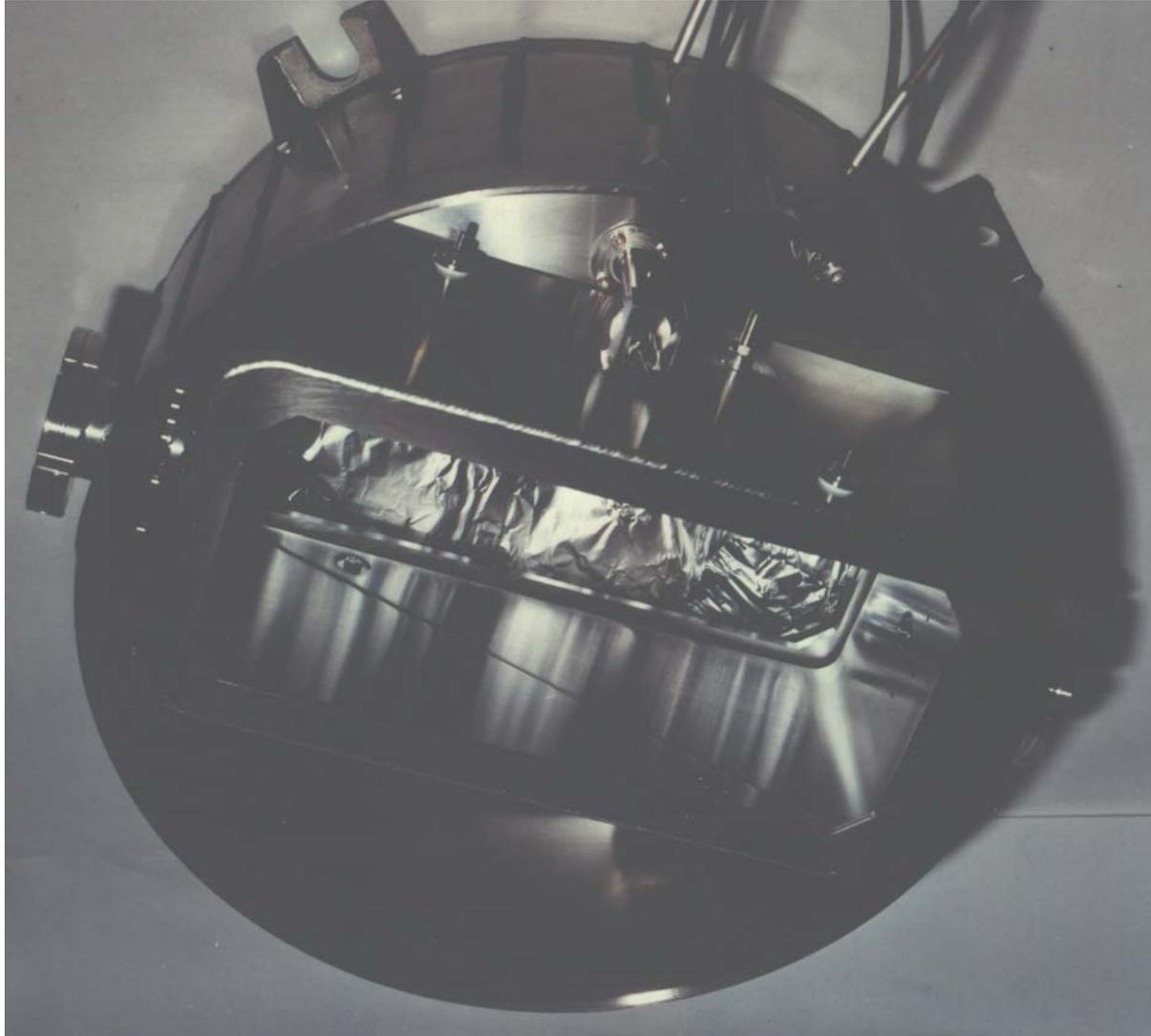
Electrode "Pick-up" capacitive



Propriétés:

- Non interceptif.
- Moniteur fonctionnant pour toutes les natures de faisceau.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée aux machines à protons (longueur du bunch \gg longueur de l'électrode)
- Coupe diagonale pour linéariser la réponse en position.

La Détection de Position



Electrode
capacitive rectangulaire
« shoe-box » montée dans
le synchrotron « MIMAS »

Compatible ultravide
Etuvable à 300 ° C

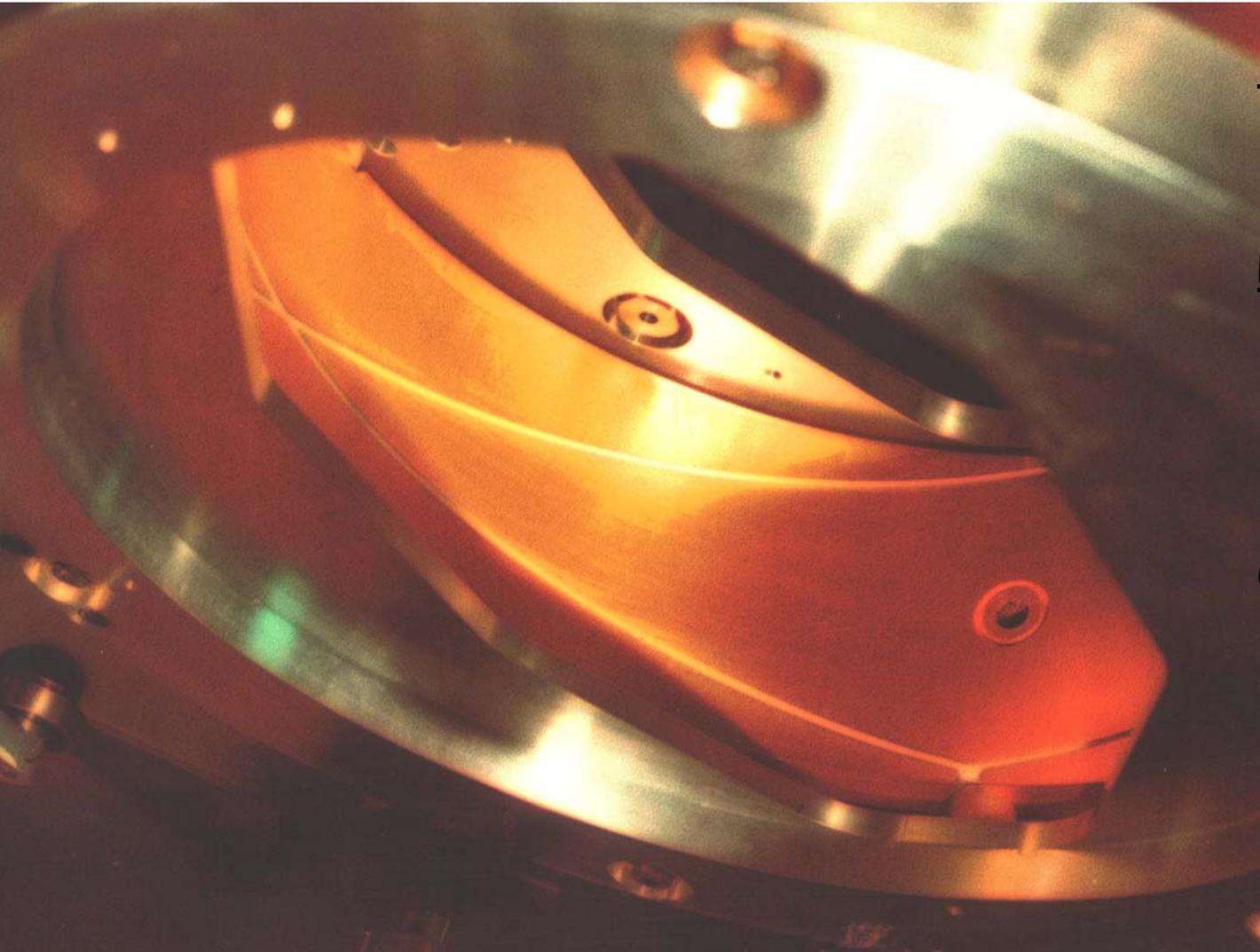
L = 18 cm (H) 10,4 cm (V)
C ~ 120 pF

P.U. + électronique:
Détection à partir de 10^8
protons/ bunch

Précision absolue: 1 mm à 2
mm
Résolution: 0.5mm

La Détection de Position

Electrode capacitive électrostatique à coupe diagonale pour la détection du faisceau circulant dans le synchrotron « SATURNE »



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

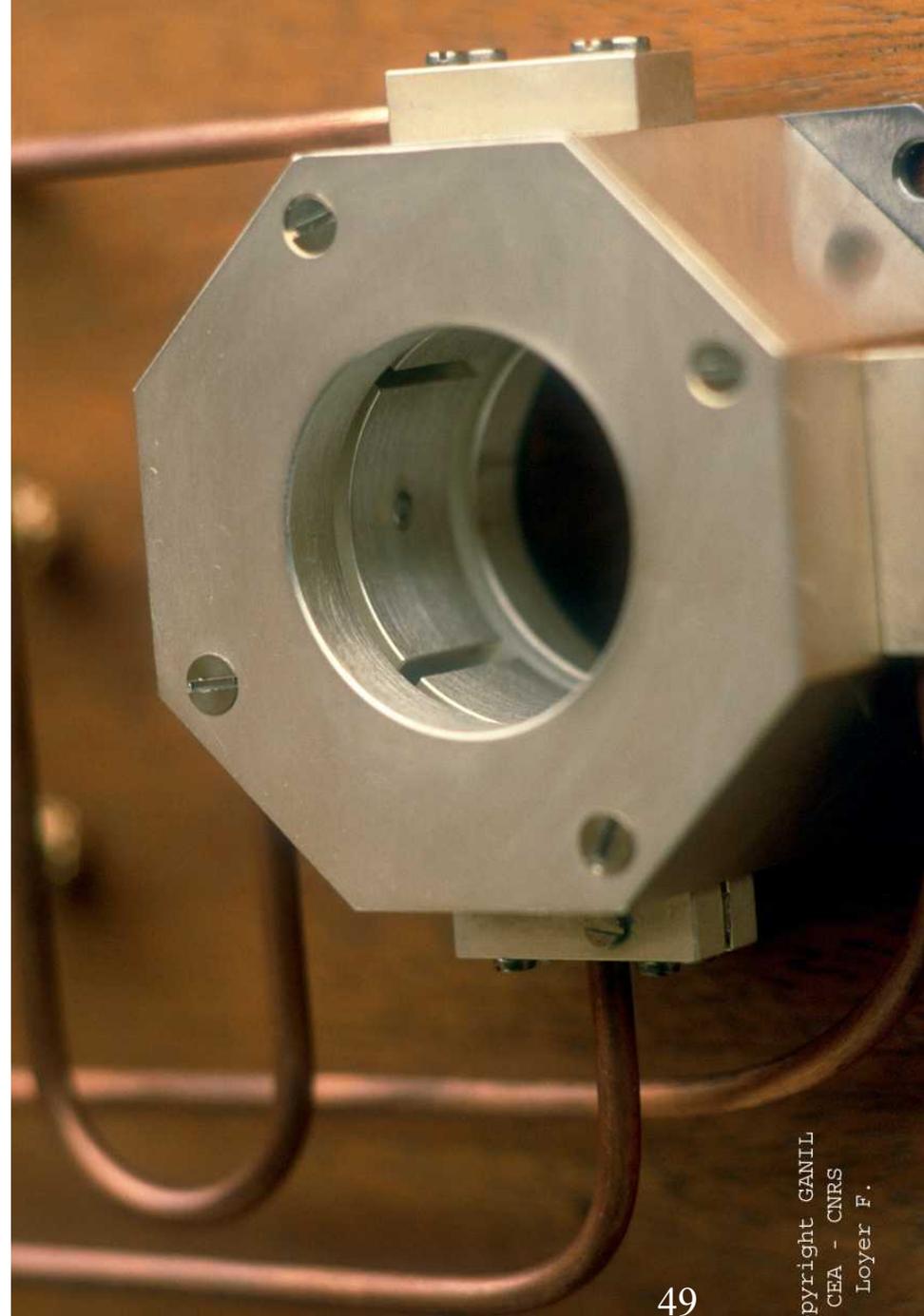
Sonde de Position Capacitive

Utilisation : mesure de la position du centre de gravité du faisceau d'ions dans le canal d'injection du cyclotron injecteur

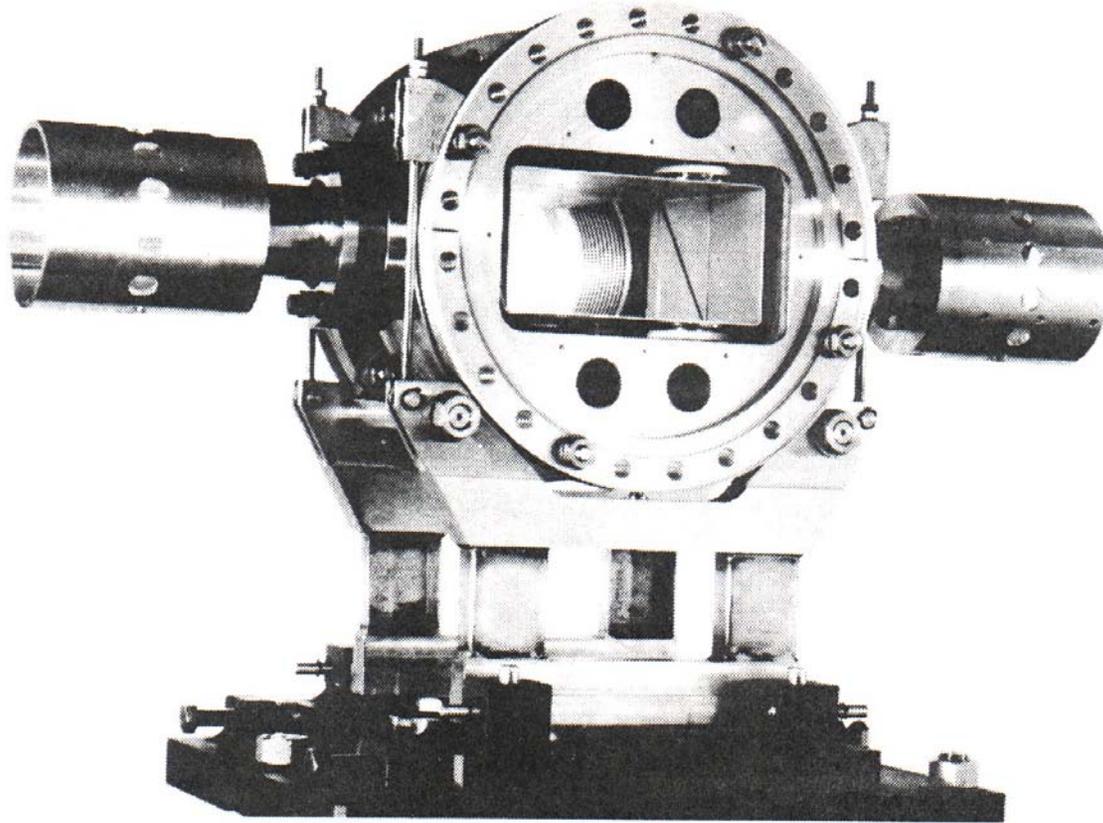
Principe : détection synchrone sur l'harmonique 2 de la structure HF du faisceau (fréquence intermédiaire à 10kHz) puis extraction de la position du faisceau par transformation de la différence d'amplitude des signaux en différence de phase.

Performances : pour 10nAe à 30keV/u

- ouverture : 30mm
- résolution : 0,1mm (intégration 1s)
- précision absolue : 0,5mm au voisinage du centre ($<R/3$)



La Détection de Position



- Electrode P.U. « shoe box »
- Pour I.S.R. (53 par anneau)
- Fonctionne dans l'ultravide
- Etuvable à 350°C
- Ouverture utile: 50 x 150mm
- Capacité: 76 pF.
- Précision absolue: $\pm 0.5 \times 10^{-3}$
- Appariement: $\pm 0.3 \times 10^{-3}$
- Capacité inter-électrode: ~ 5 pF

Avec l'électronique:

- (Préalpli à tube)
- Résolution pour 1 bunch
 $12 \cdot 10^{11}$ p/bunch : 0.5mm
« mode D.C. » (moyenne sur
10ms à 100 ms): 0.04 mm

La Détection de Position

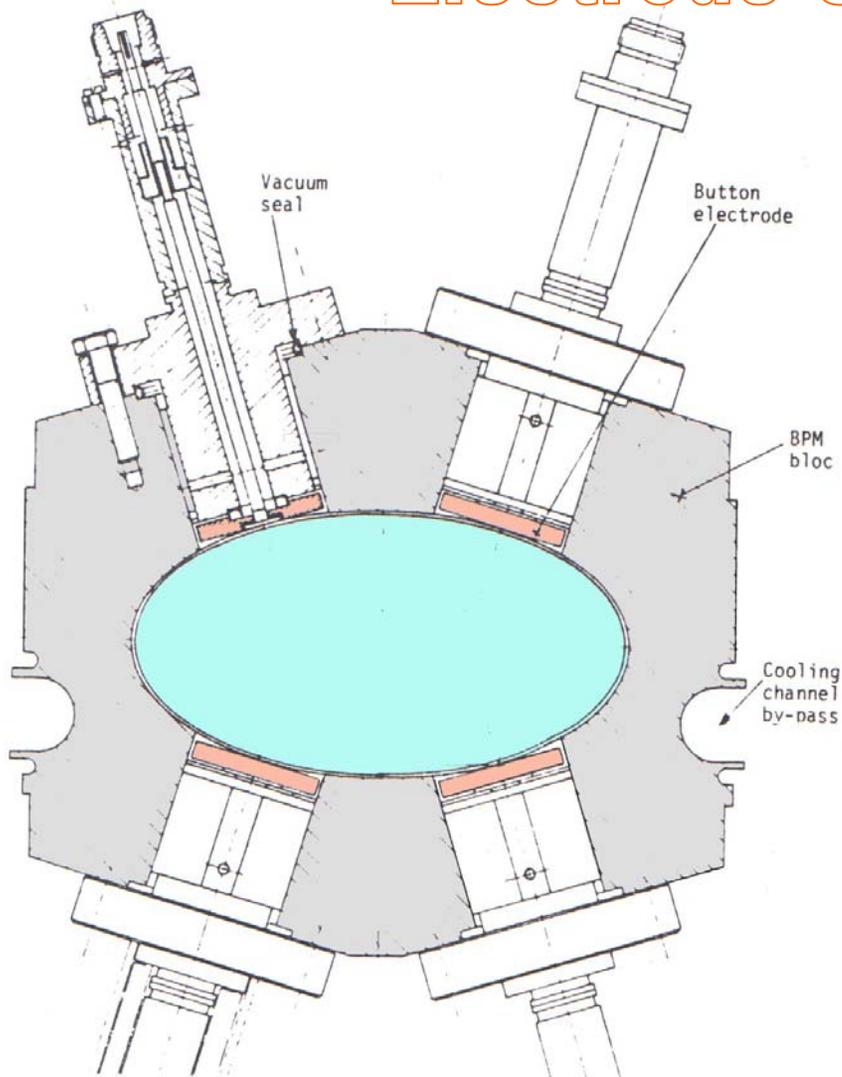
Electrode Capacitive "Bouton"

Propriétés:

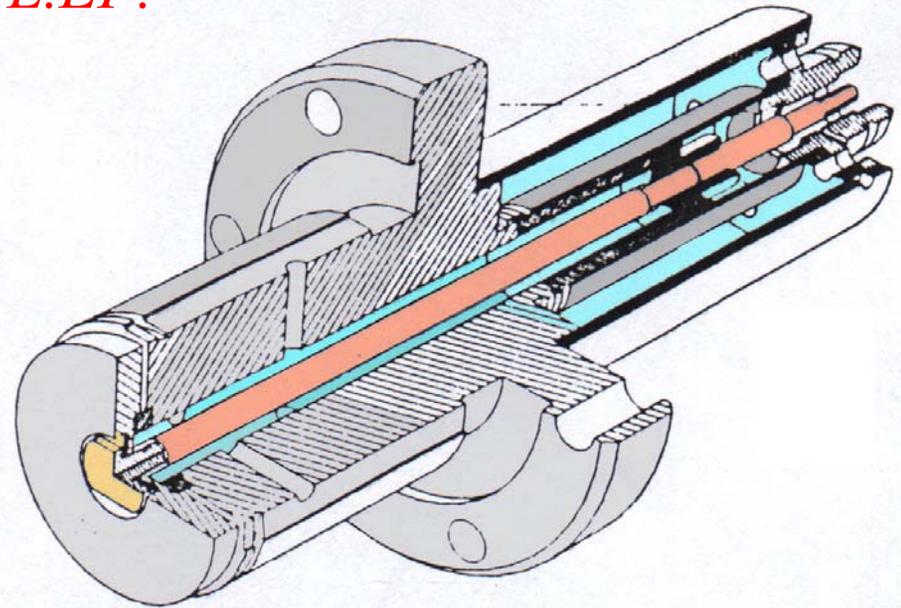
- Non interceptif. Moniteur pouvant fonctionner pour toutes les natures de faisceau.
- Utilise le champ électrique associé au faisceau.
- Destinée généralement aux machines à électrons et aux machines à rayonnement synchrotron (longueur du bunch \sim longueur de l'électrode)
- Contrôle de l'orbite fermée du faisceau, asservissement de position du faisceau
- Réponse non linéaire : nécessite un étalonnage.

La Détection de Position

Electrode Capacitive "Bouton"



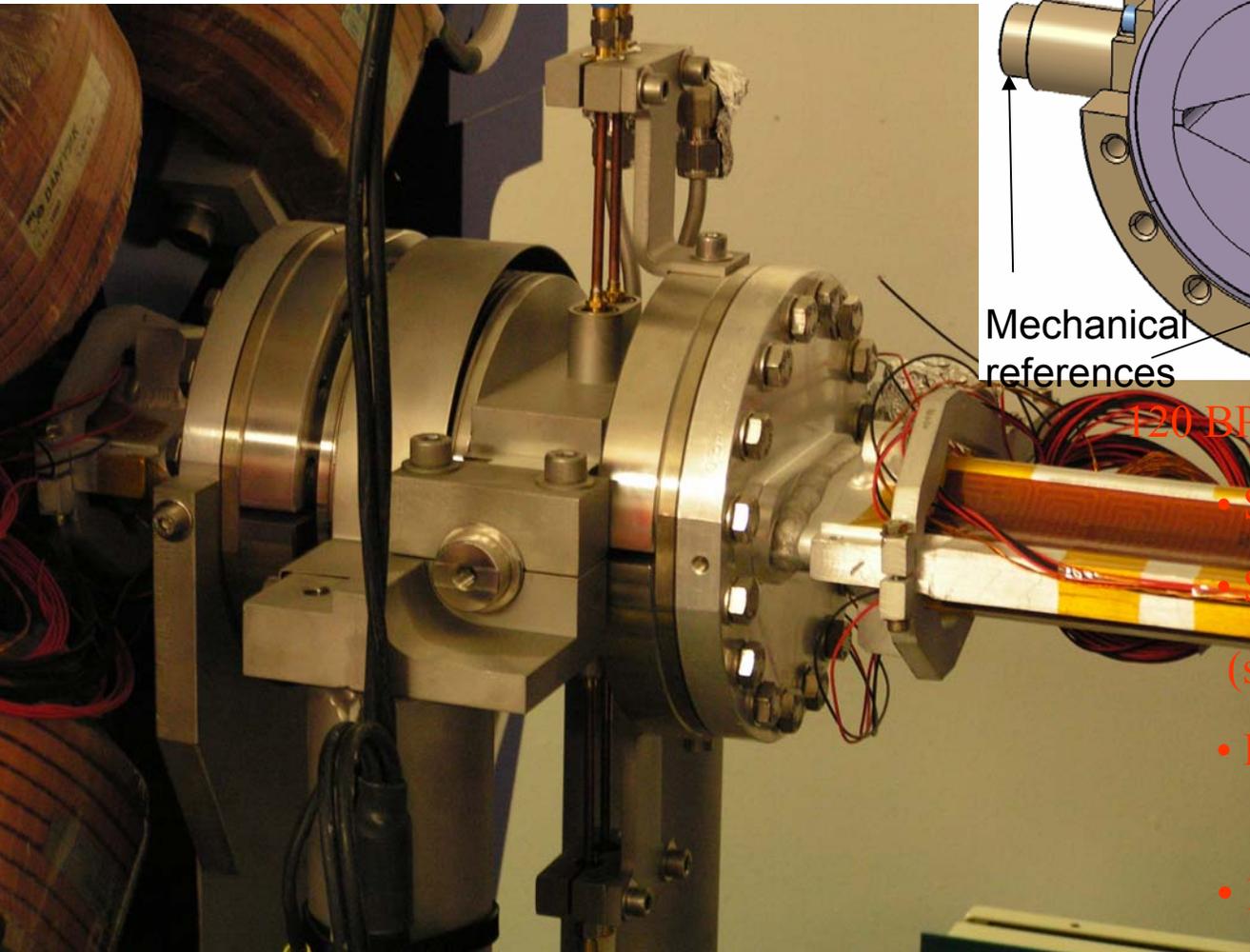
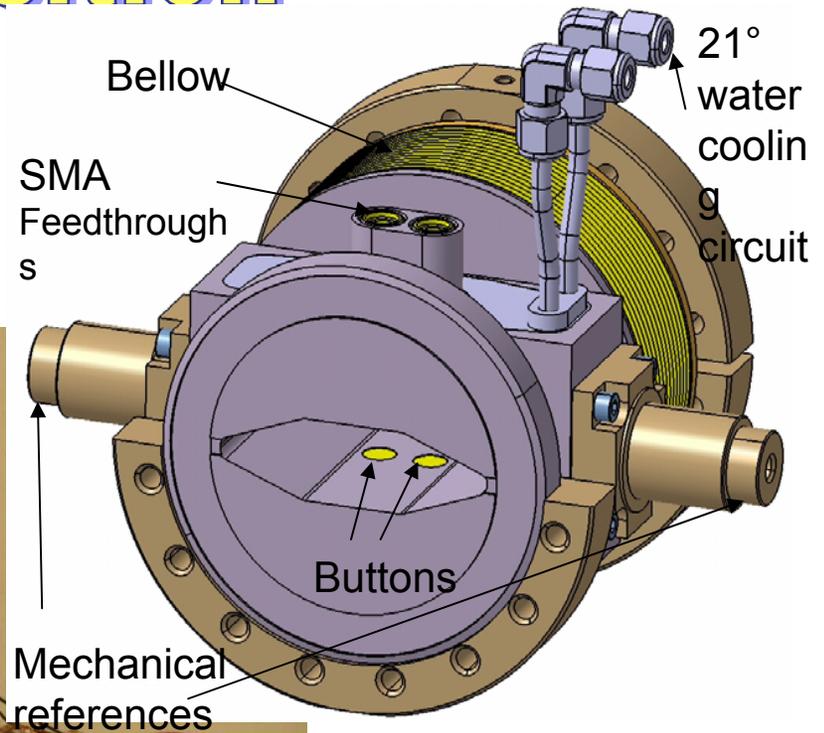
L.EP.



Bloc BPM typique pour machine à électrons

La Détection de Position

B.P.M. SOLEIL

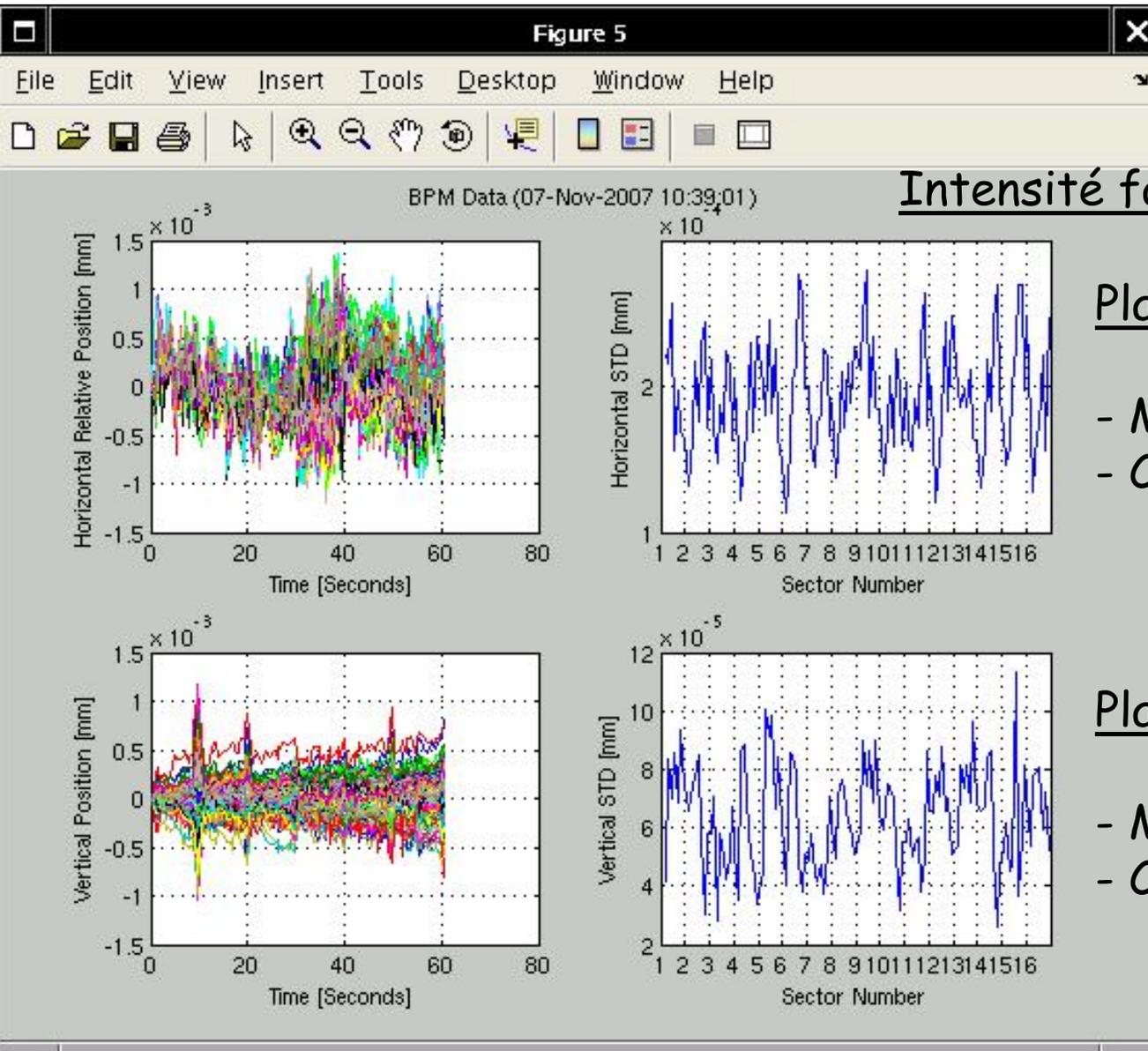


120 BPM autour de l'anneau

- Sur poutre (arc BPMs)
- Sur colonne fixée dans le sol (sections droites)
- Electrode separation: 16 mm horiz. 25 mm vert.
- Refroidissement: $21 \pm 0.1^\circ\text{C}$

La Détection de Position

B.P.M. SOLEIL



Intensité faisceau stocké: 158 mA

Plan Horizontal:

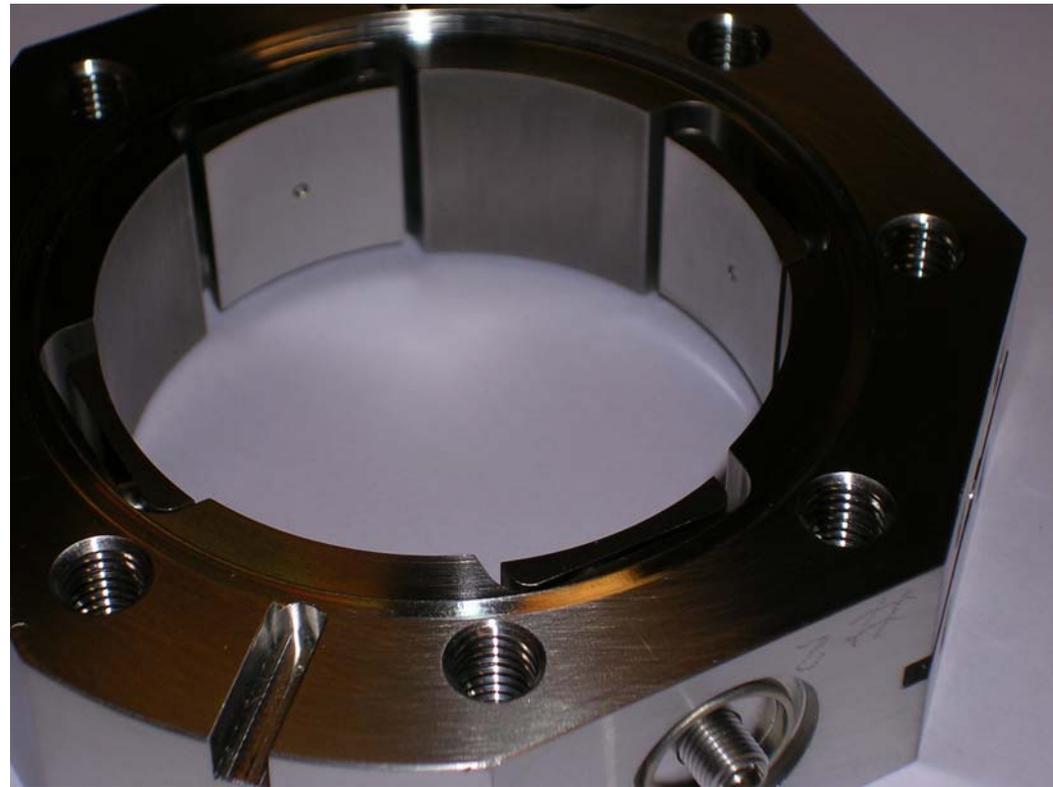
- Mesures sur 60s
- Calcul bruit rms: $0.2 \mu\text{m}$

Plan Vertical:

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

La Détection de Position

B.P.M. IPHI

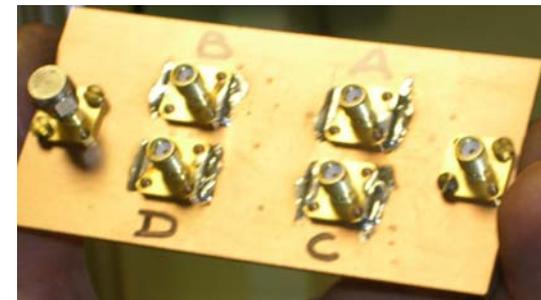


Exemple: BPM IPHI

Bouton Φ : 24 mm

Φ Int. chambre vide: 66mm

$C \sim 9.5$ pF



La Détection de Position

Coupleur Directionnel ou "Micro-stripline"

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

La Détection de Position

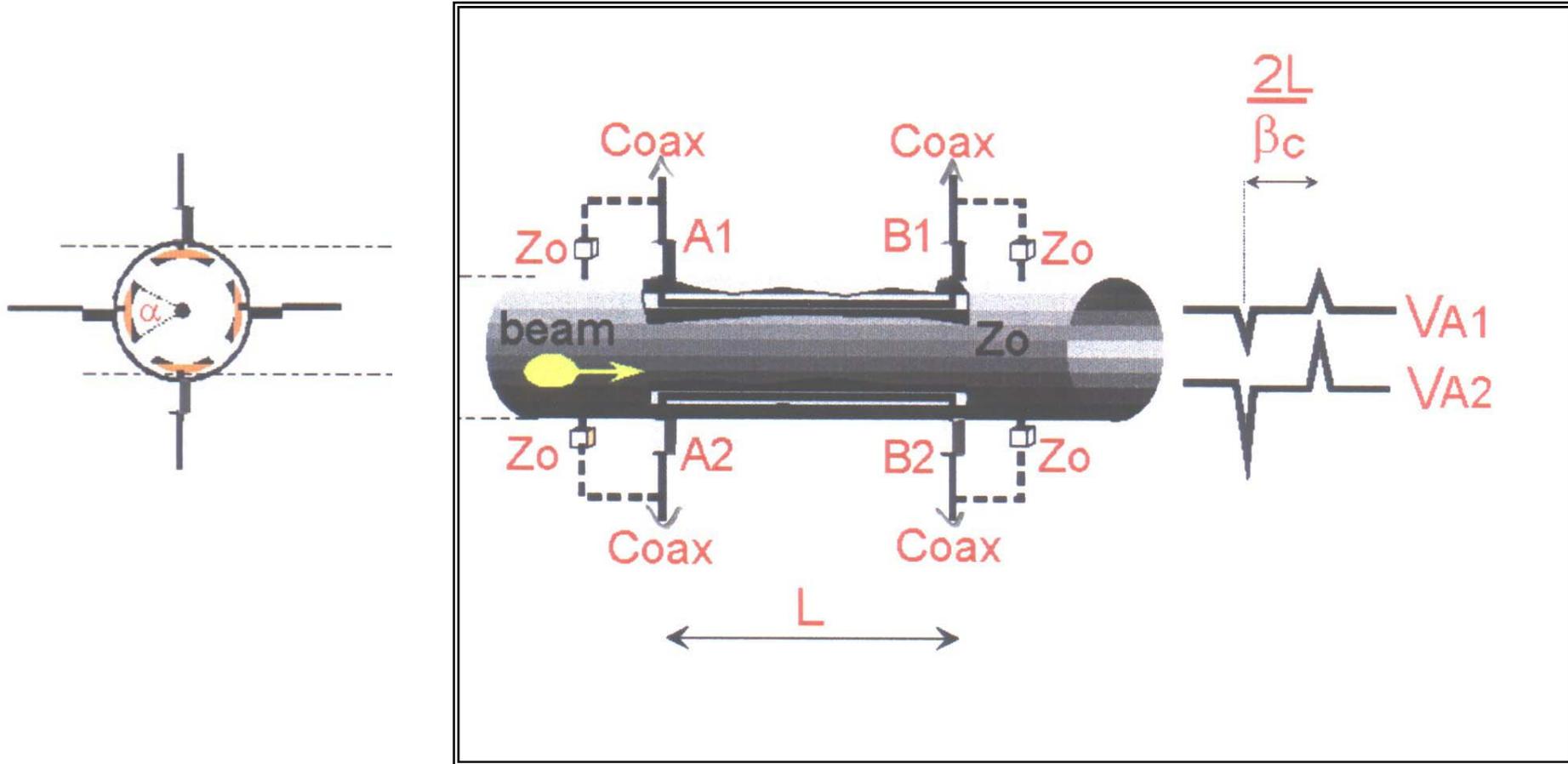
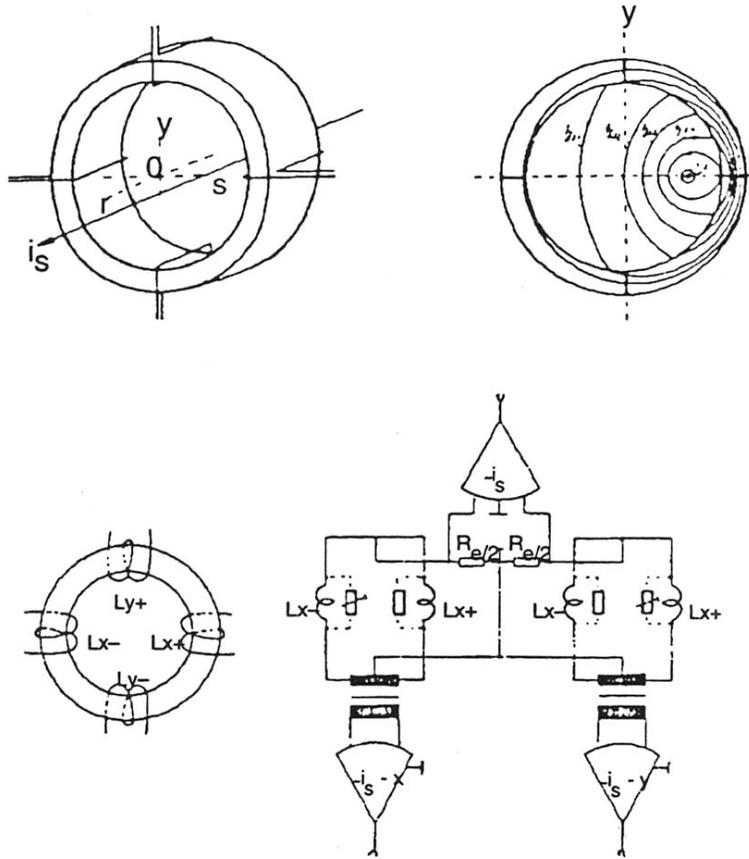


Schéma de principe d'un coupleur directionnel ou « stripline »

La Détection de Position



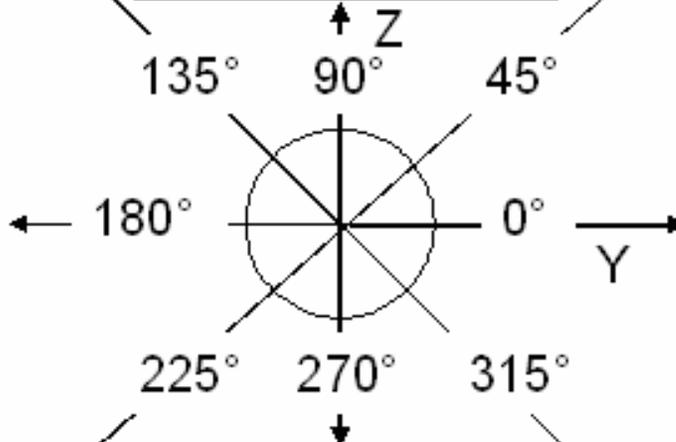
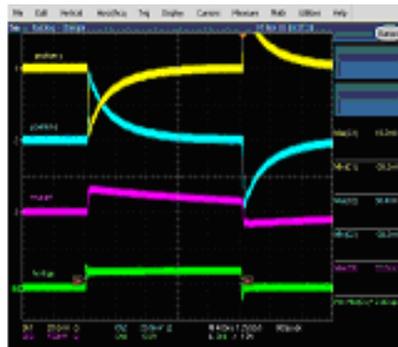
Sensibilité sous 50 Ω du signal
 $\Sigma = 65 \text{ mV} / 0.33 \text{ mA}$
 Sensibilité sous 50 Ω du signal
 $\Delta = 2000 \text{ mV} / 10 \text{ A.mm}$



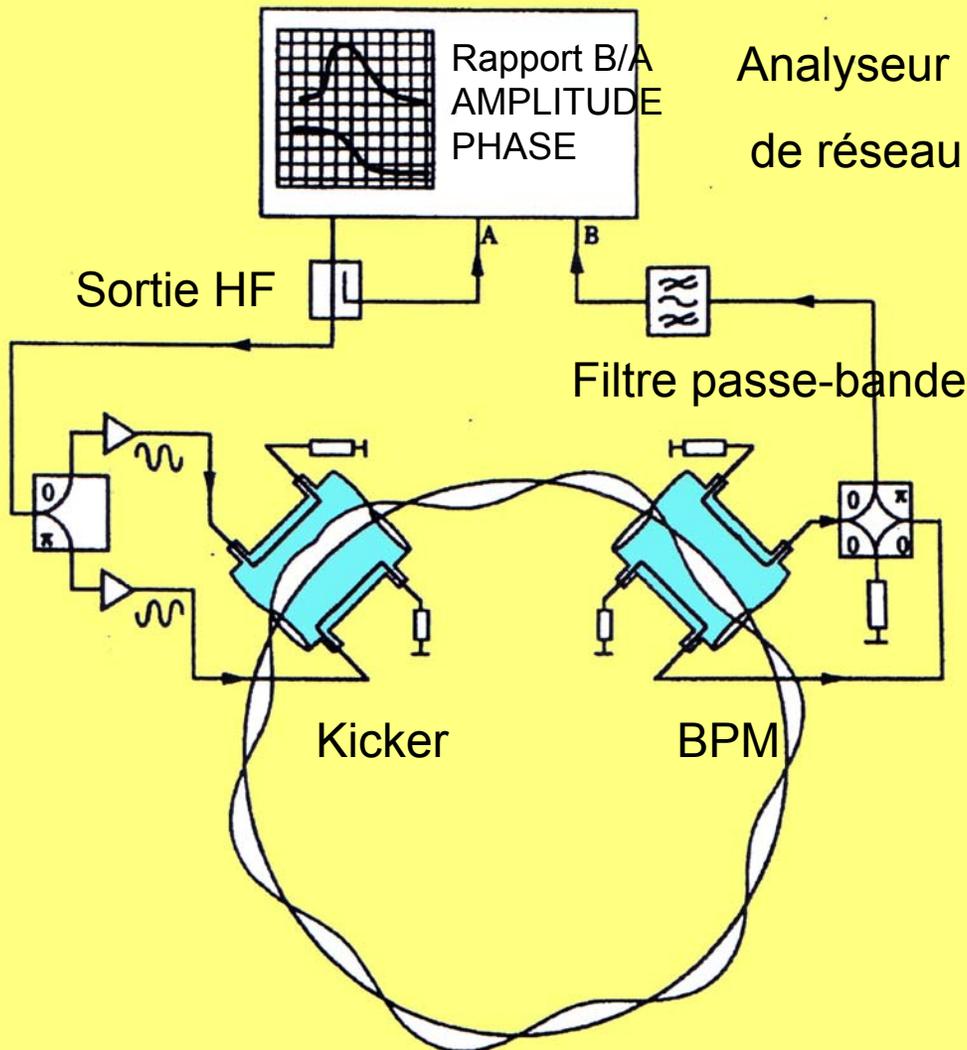
B.P.M. type « magnétique » monté sur ALTO

La Détection de Position

-  ΔH
-  ΔV
-  Faisceau
-  Σ



Application des détecteurs P.U. : Fonction de transfert du faisceau



Nombre d'onde

Excitation du faisceau:

Impulsion $\tau \ll F_{\text{rev}}$

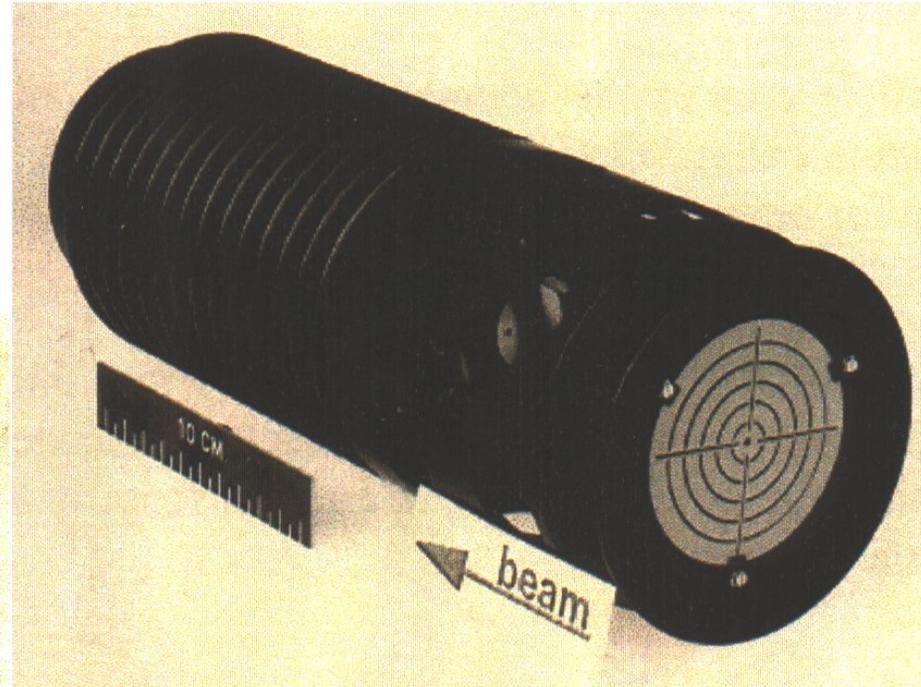
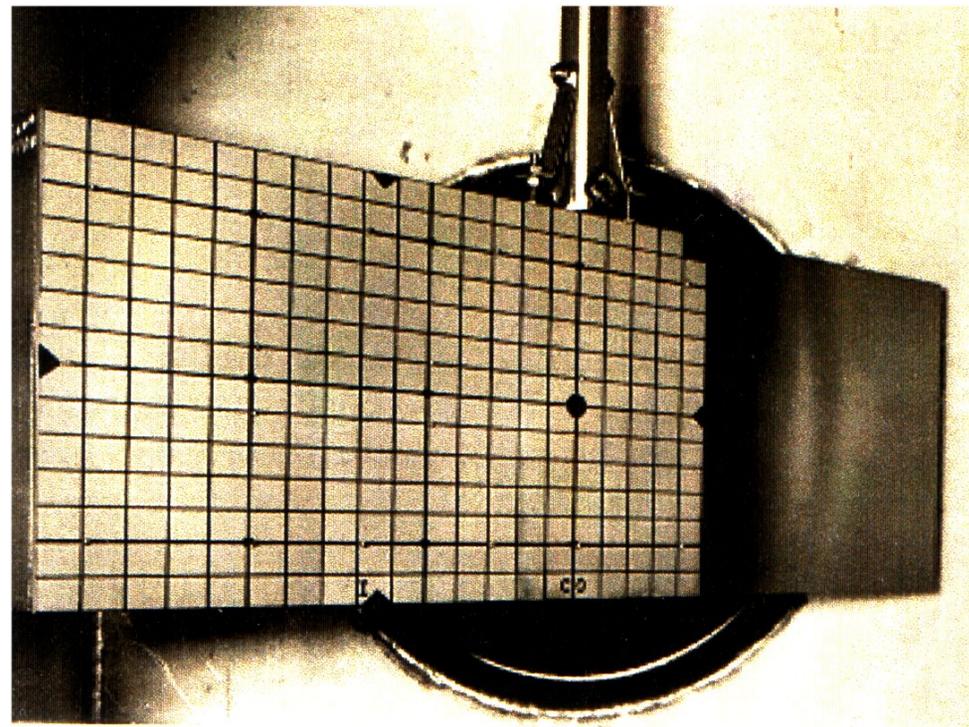
Fonction de transfert

- Excitation faisceau:

- 1) Sinusoidale C.W.
(*balayage en fréquence*)
- 2) Bruit blanc

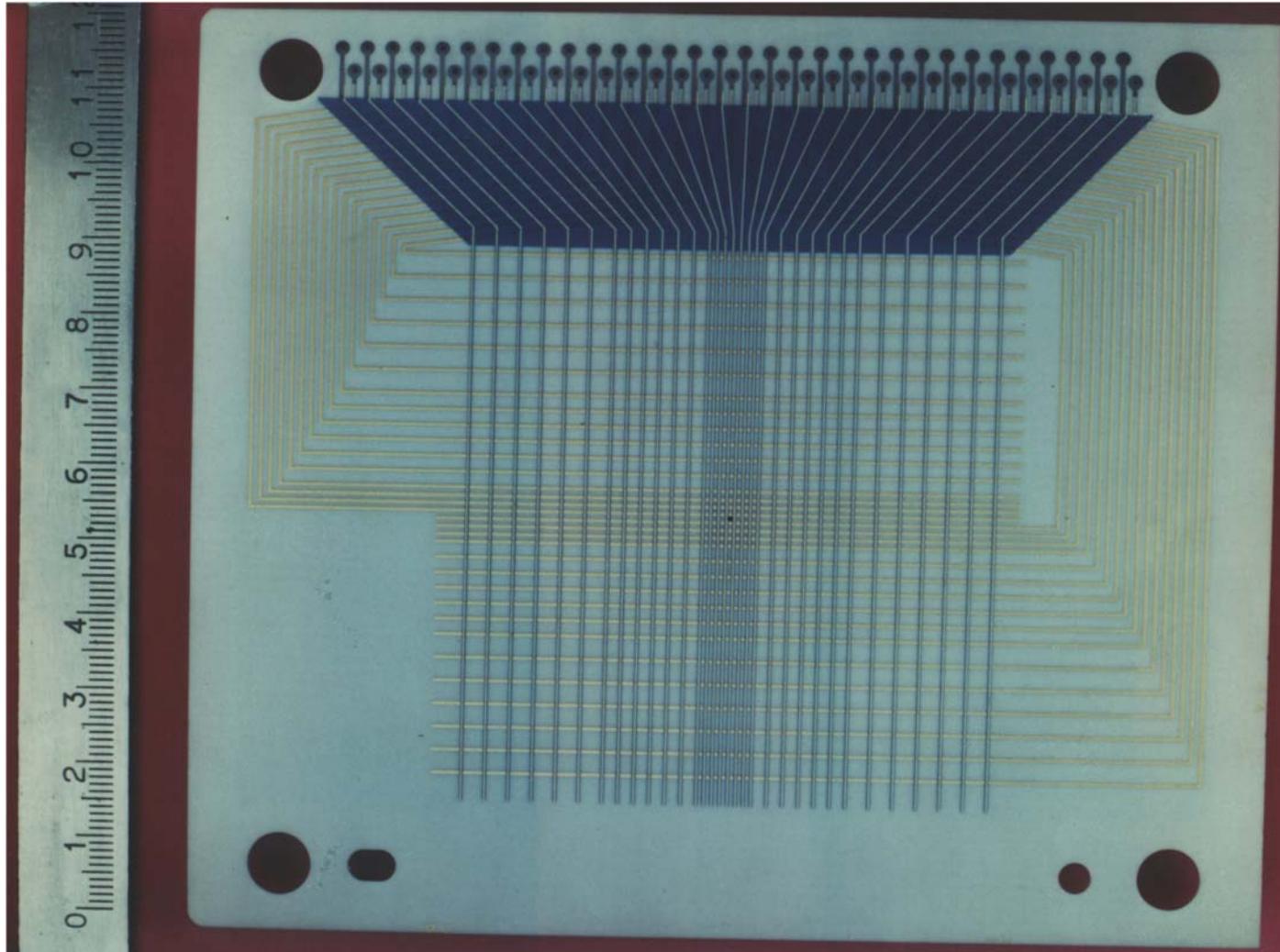
Profils transverses

Détecteurs complètement destructifs (faisceau intercepté):
scintillateurs dopés



Profils transverses

Détecteurs destructifs interception quasi-totale du faisceau



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

Profils transverses

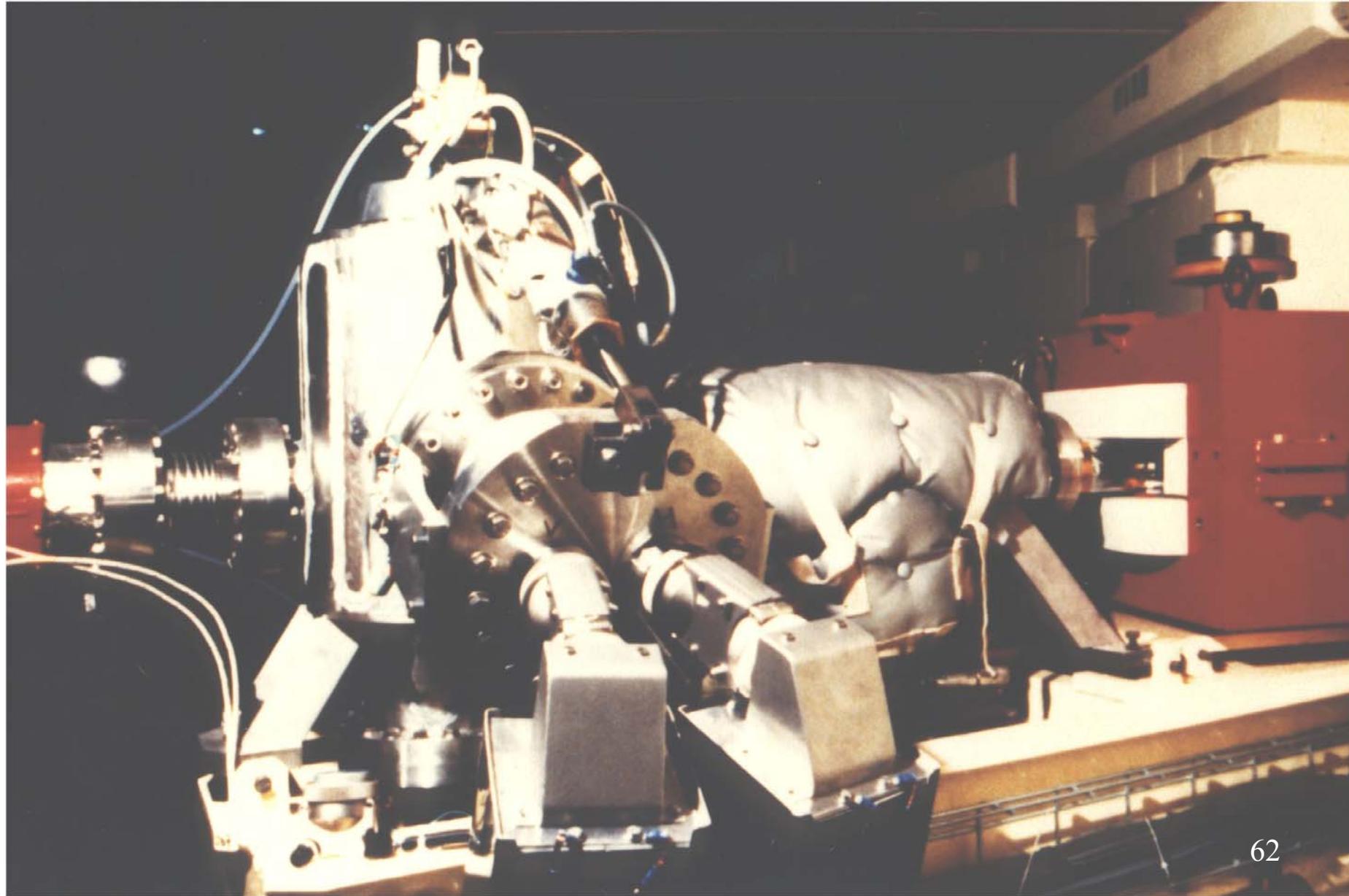
Capteur multicouches monté sur profileur
Technologie ultravide

- Profils horizontal et vertical (2x32 voies)
- Insertion par vérin pneumatique

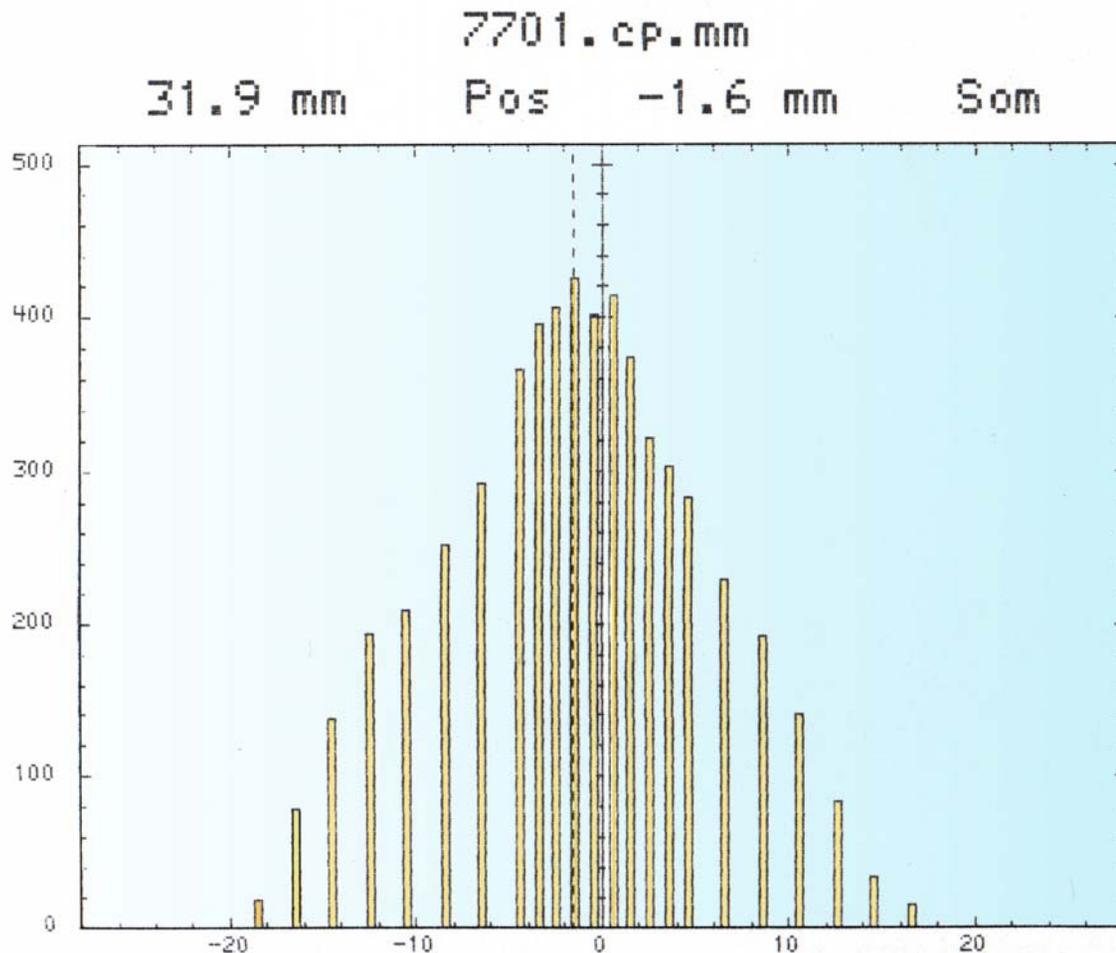


Profils transverses

Exemple de profileur monté sur une machine



Profils transverses



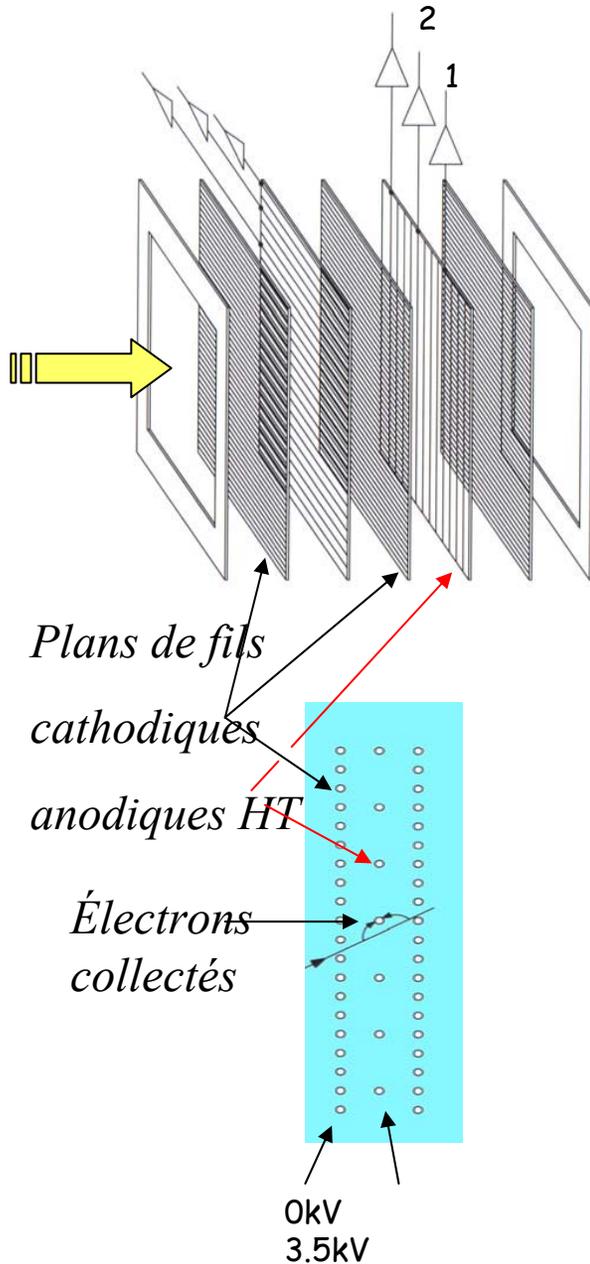
Exemple de présentation des résultats

Profileur de 32 fils:
fils au pas de 1 mm, de
2mm, de 3 mm.

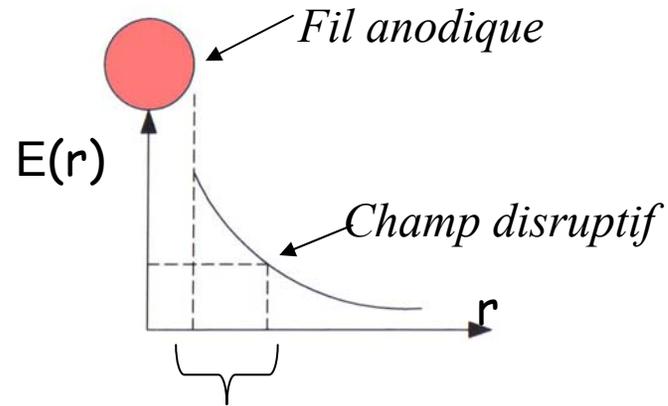
- Calcul et affichage automatique du centre de gravité
- Calcul de la largeur à x%
- Contrôle de l'intensité du faisceau

Profils transverses

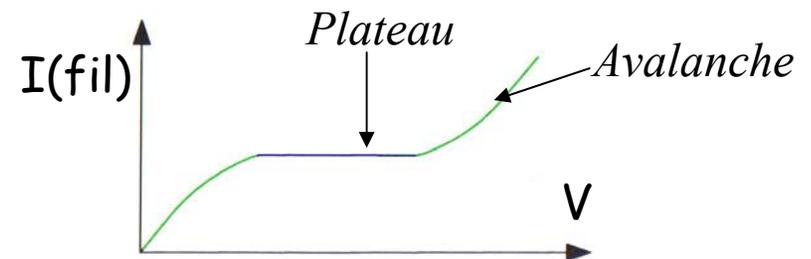
Détecteurs destructifs



chambre à ionisation



Région d'avalanche



Profils transverses

Sonde de profil à Circulation de Gaz

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

Principe :
détection sur des plans de fils du courant électrique créé par la ionisation du gaz circulant dans la chambre (voir fiche suivante)

Performances :

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

Contact : J.L.Vignet (vignet@ganil.fr)



Copyright GANIL
CEA - CNRS

Profils transverses

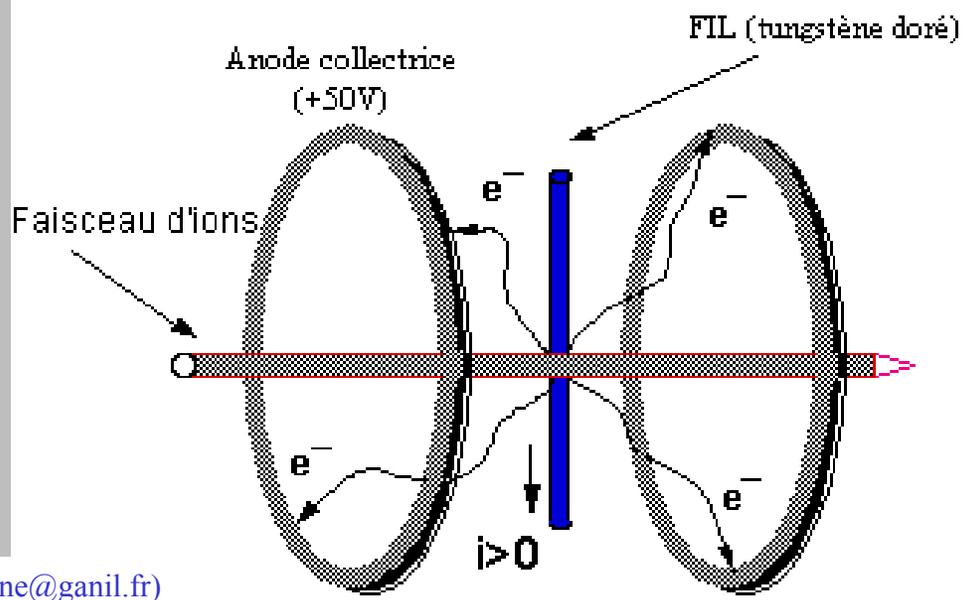
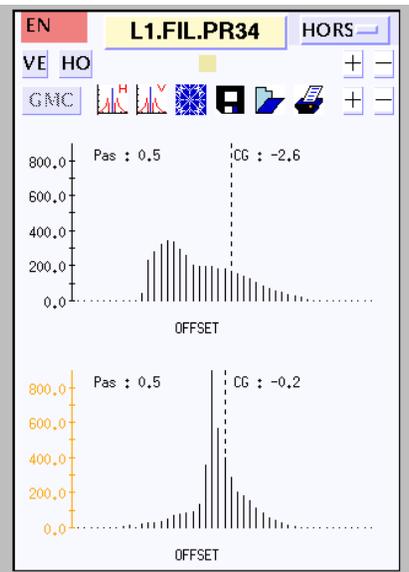
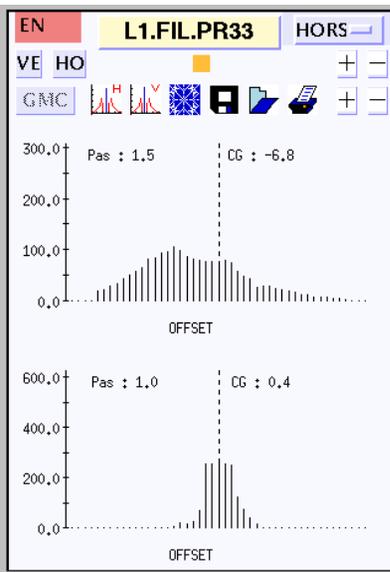
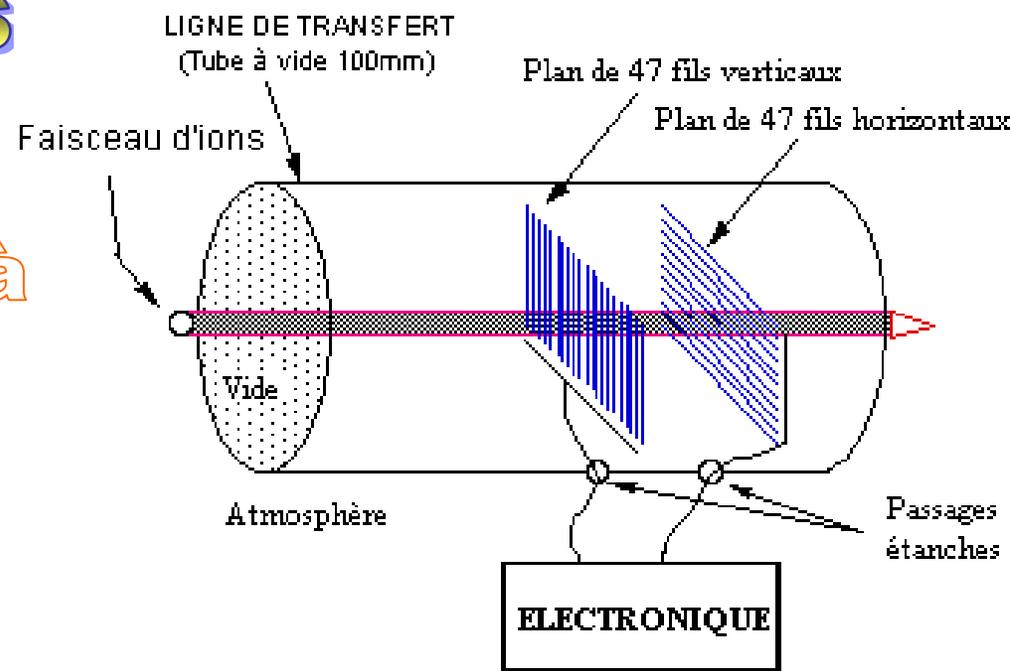


INSTRUMENTATION

Sonde de profil à Plan de Fil

Principe :

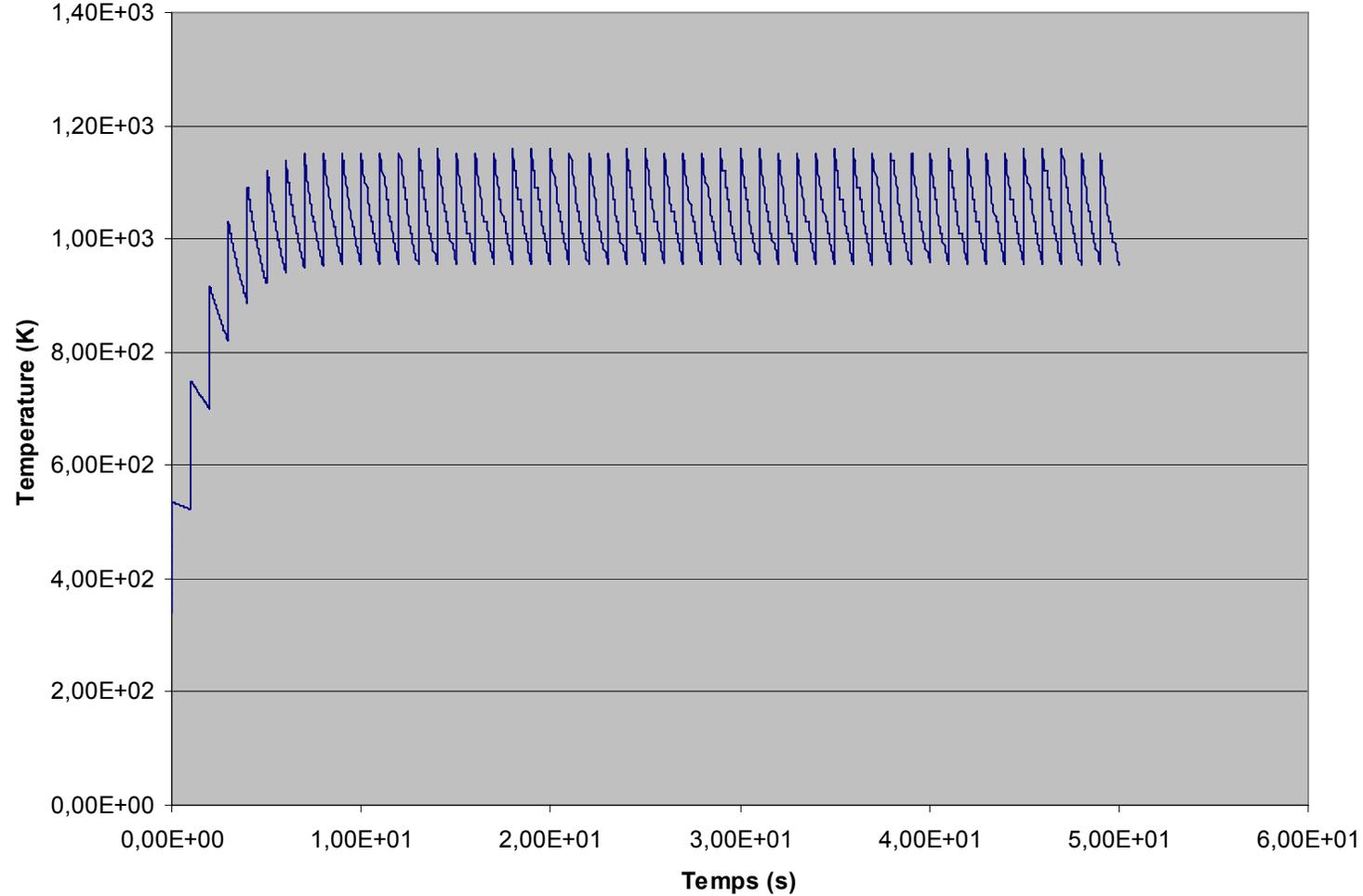
détection du courant électrique créé par les électrons secondaires émis par l'impact du faisceau sur des fils organisés en plans verticaux et horizontaux



Détection interceptive de faisceaux de forte intensité

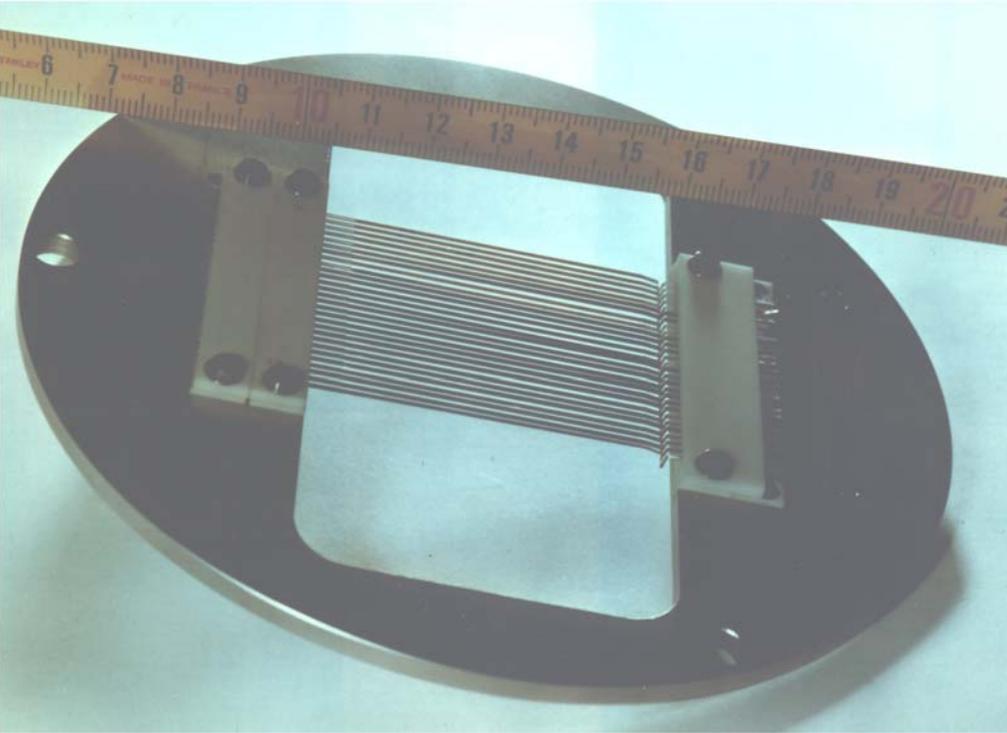
Echauffement d'un fil de profileur à émission secondaire

øFil W = 150 µm Faisceau: 1,5 MeV - 5 mA - øFa = 2 cm - Δt: 1ms - T: 1s



Profils transverses

Détecteurs interceptifs "semi-Destructifs"

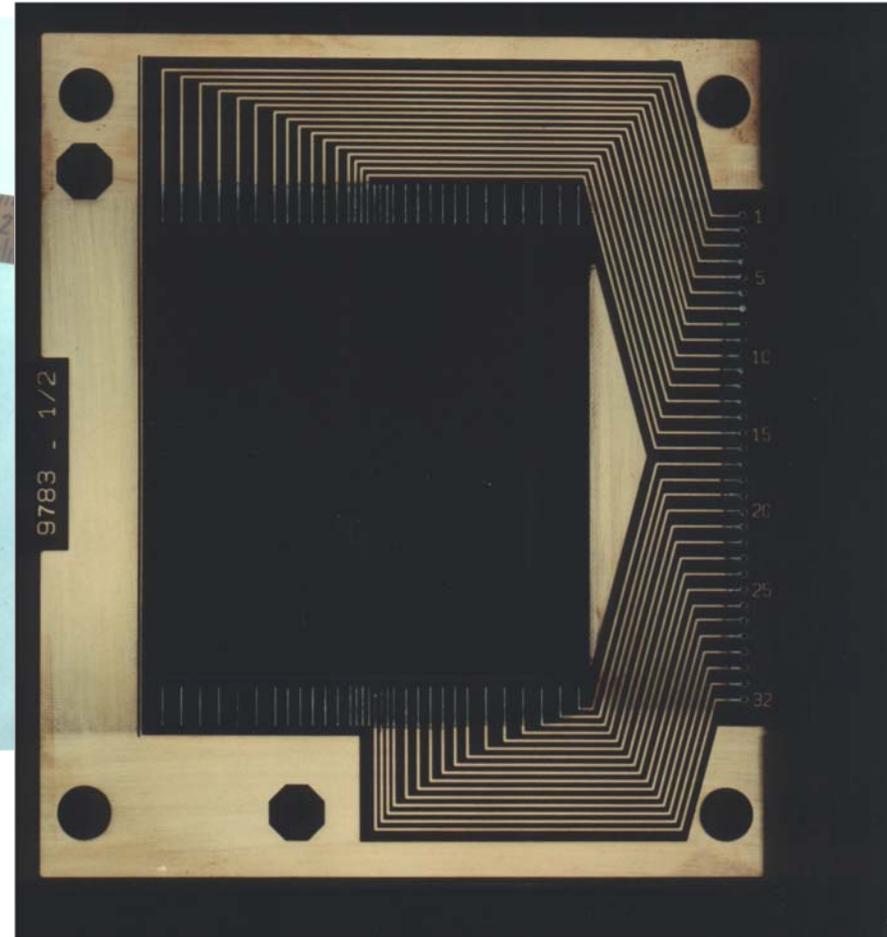


Capteur type « ruban »

Matériau nickel

épaisseur: 20 μm ; largeur ruban: 1mm

Support: alumine (bon isolement électrique)



Capteurs à fils de tungstène:

Diamètre: 30 μm

Substrat: epoxy

Sonde de profil à Plans de Fils

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

Principe :

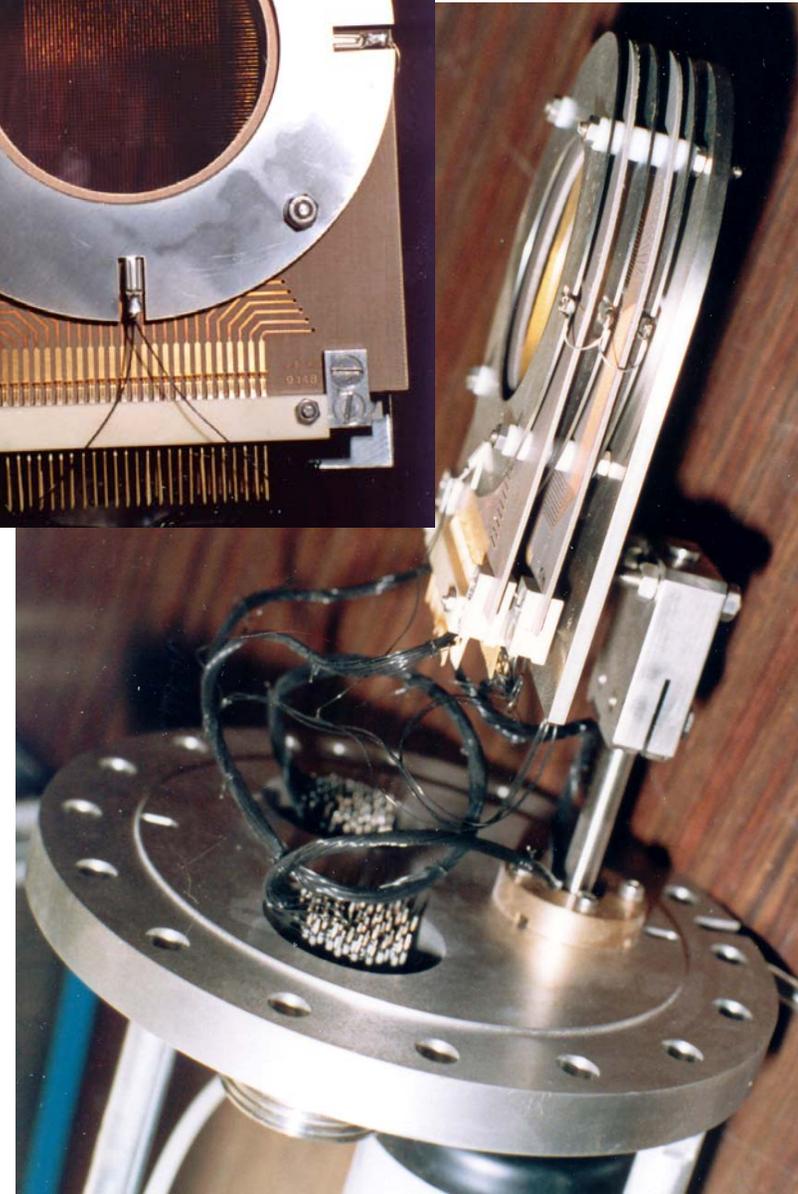
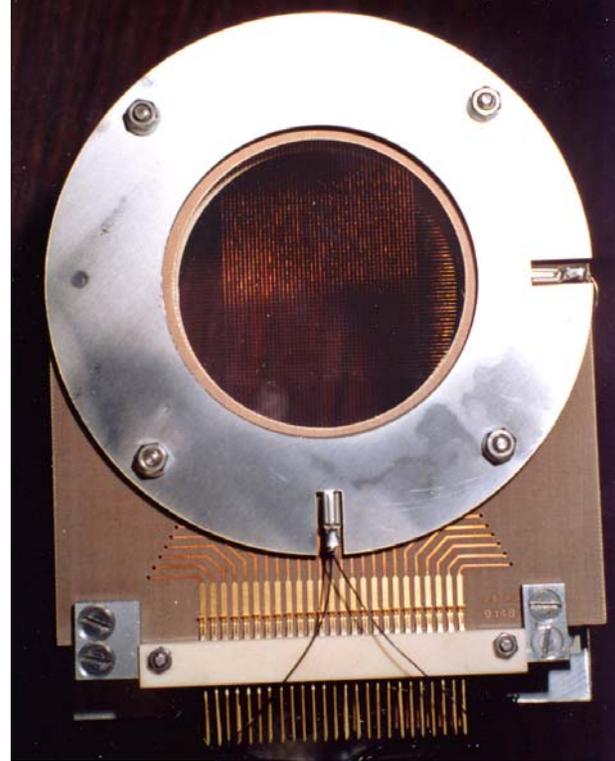
détection du courant électrique créé par les électrons secondaires émis par l'impact du faisceau sur des fils organisés en plans verticaux et horizontaux

(voir fiche suivante)

Contact : R. Anne (anne@ganil.fr)

Performances :

- précision en position : 0,5mm
- résolution : entre 0,5 et 1,5 mm selon distance entre fils
- intensité maximale du faisceau (rupture des fils):
 - < 1 MeV/u : 1 μ Ap
 - autour de 10MeV/u : 10 nAp
 - vers 100 MeV/u : 100 nAp
- intensité minimale : 1 nAp



Profils transverses

Détecteurs "peu" destructifs

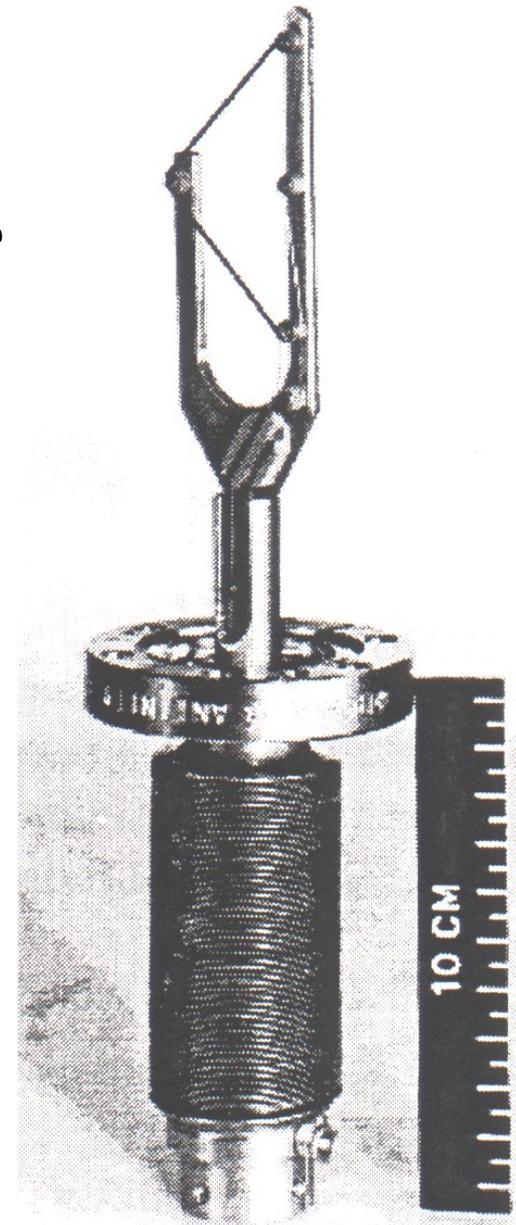
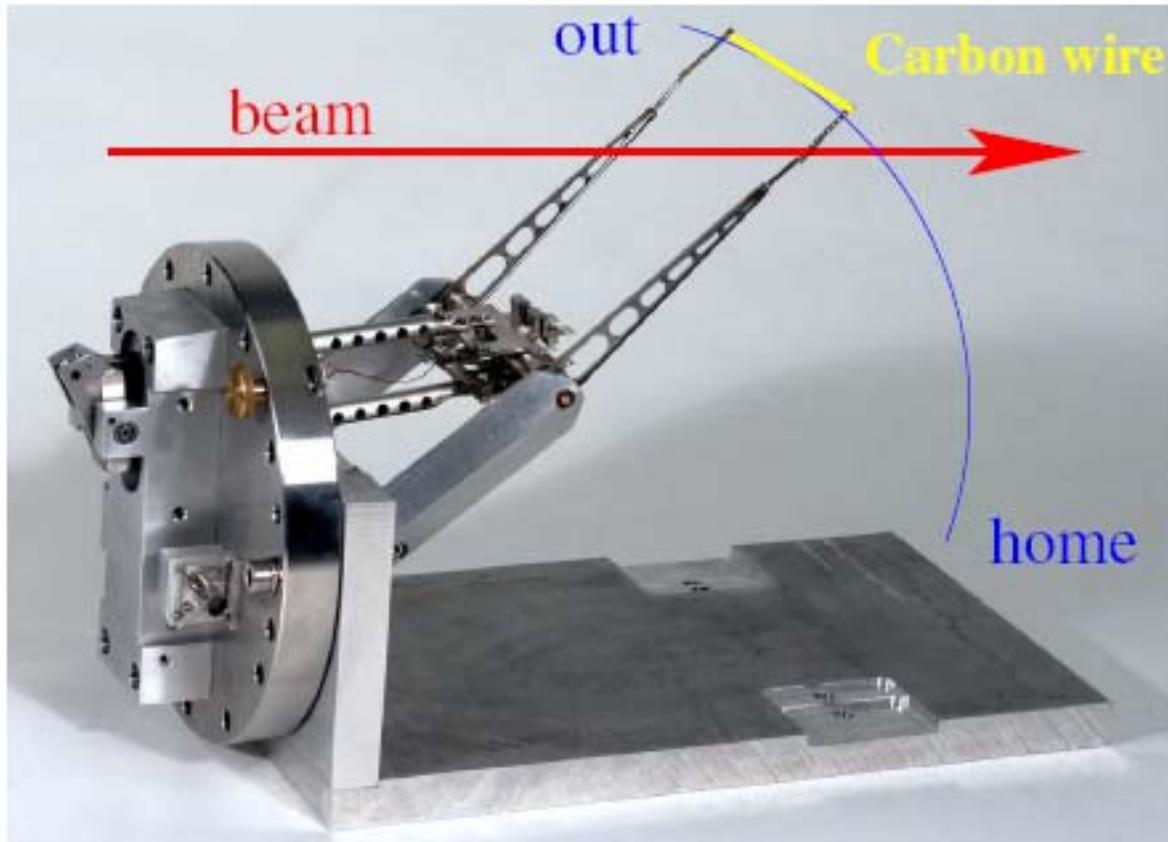
Wire scanner

Mouvement pendulaire: les plus rapides

Wire Scanner du PS du CERN.

- Moteur DC 400W

- Vitesse 10 ; 15; 20 m/s



Translation linéaire: 1 à 2m/s

Sonde de profil à fil tournant

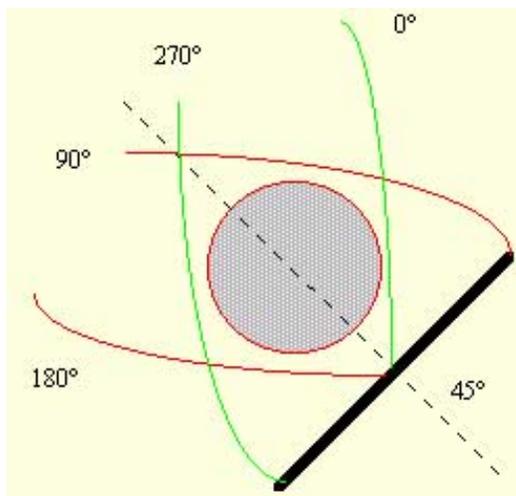
Utilisation : mesure du profil transverse du faisceau et de la position du centre de gravité

Principe :

- par sa forme et son orientation, le fil balaie le plan vertical puis horizontal à chaque tour
- mesure du courant électrique recueilli sur le fil tournant (charges électriques du faisceau plus électrons secondaires)
- déduction du profil et de la position par calcul

Performances :

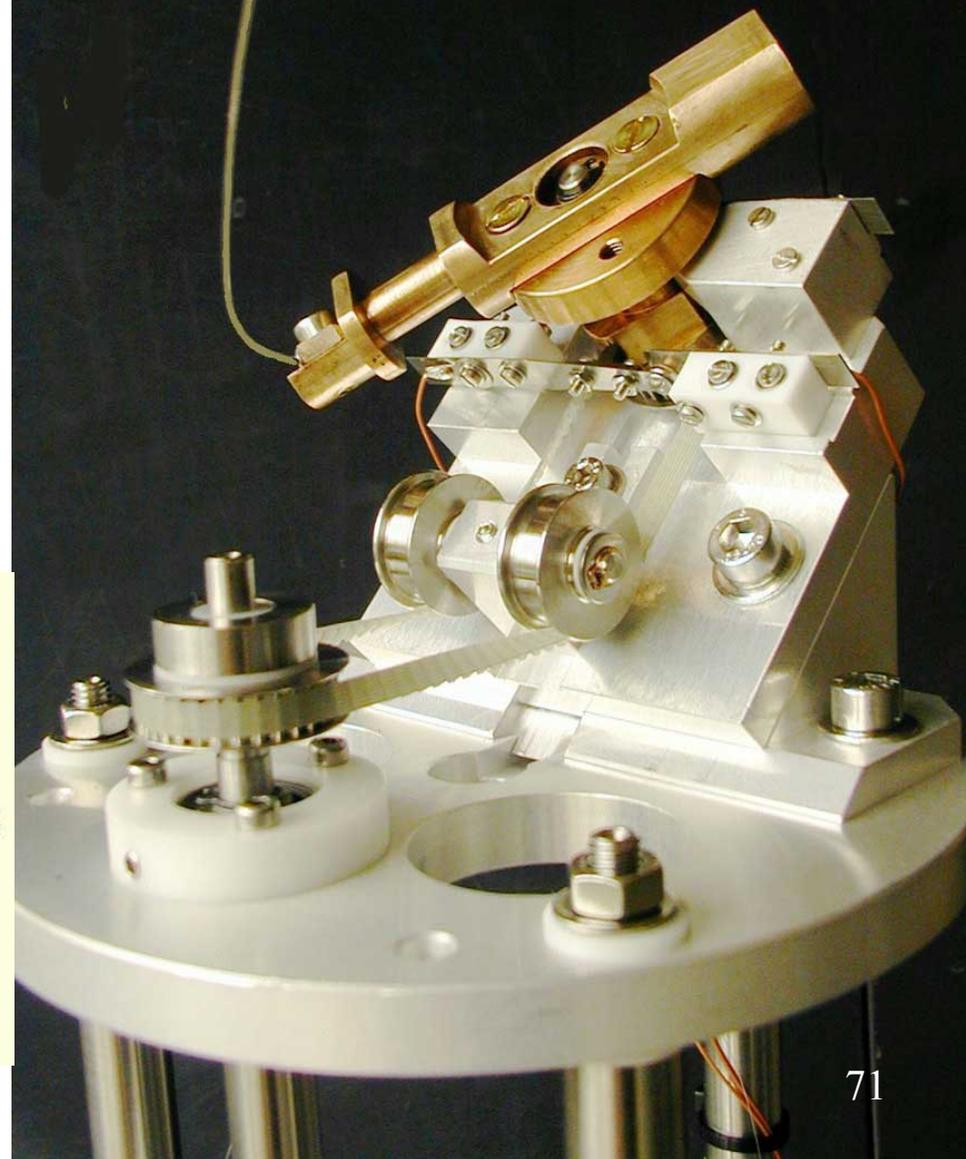
- supporte de fortes intensités de faisceau ($>100\mu\text{A}$ continu)
- intensité minimale : $> 100\text{nAe}$
- précision/résolution en position : 0,5mm



Contact : C.Doutressoules
(doutressoules@ganil.fr)

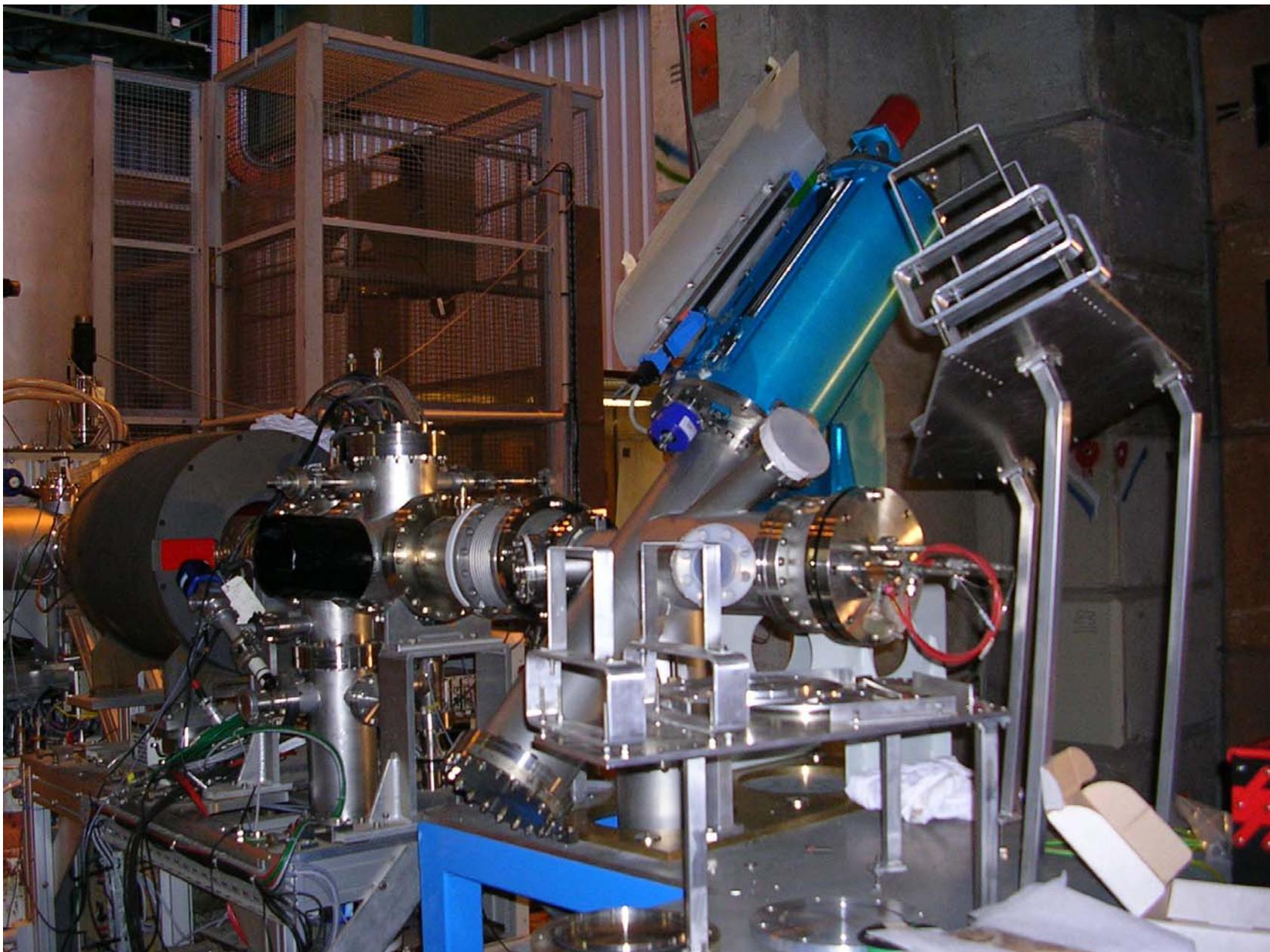


Copyright GANIL
CEA - CNRS



Profils transverses

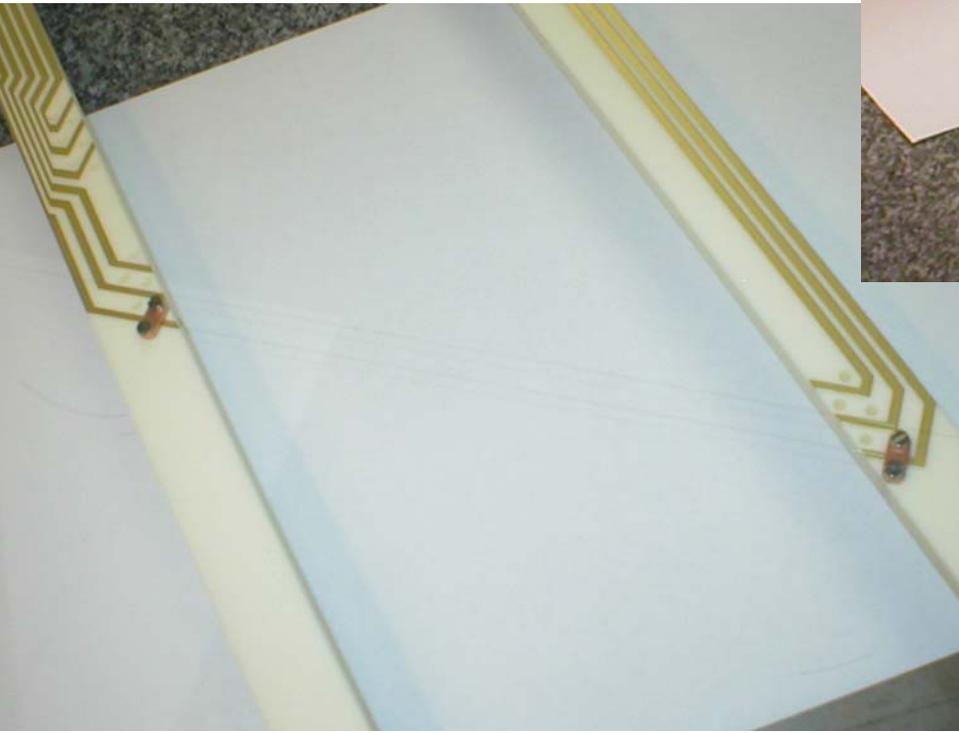
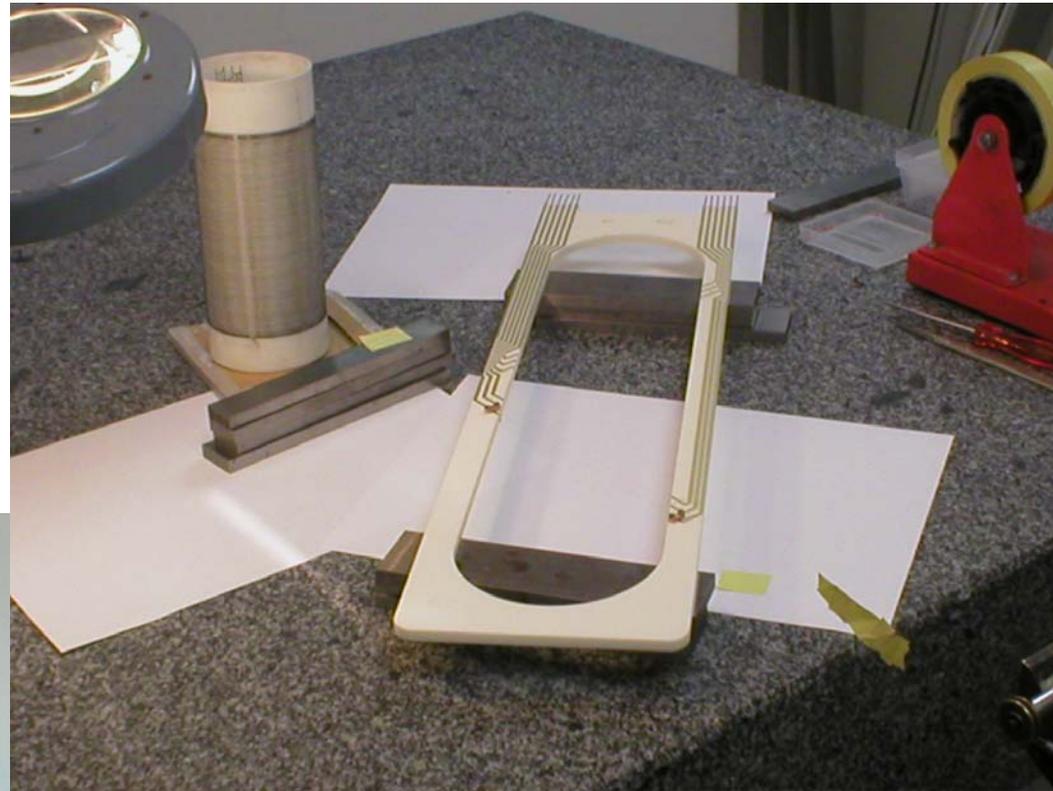
Wire scanner IPHI



Profils transverses

Wire scanner IPHI

Montage fil carbone
Diamètre 33 microns

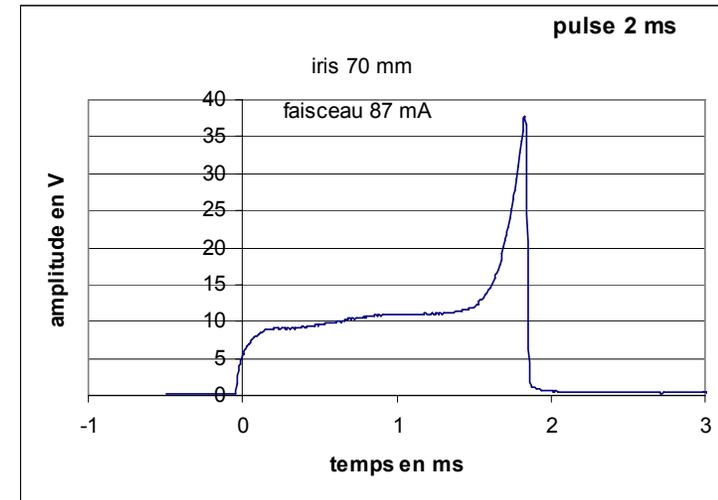
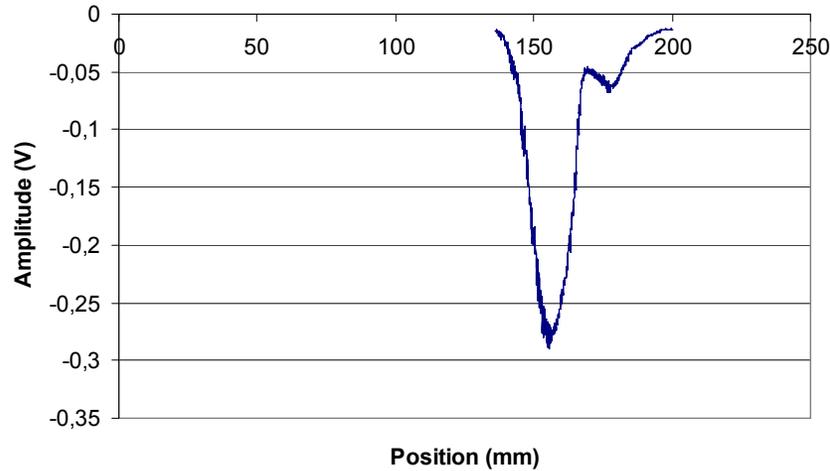


Profils transverses

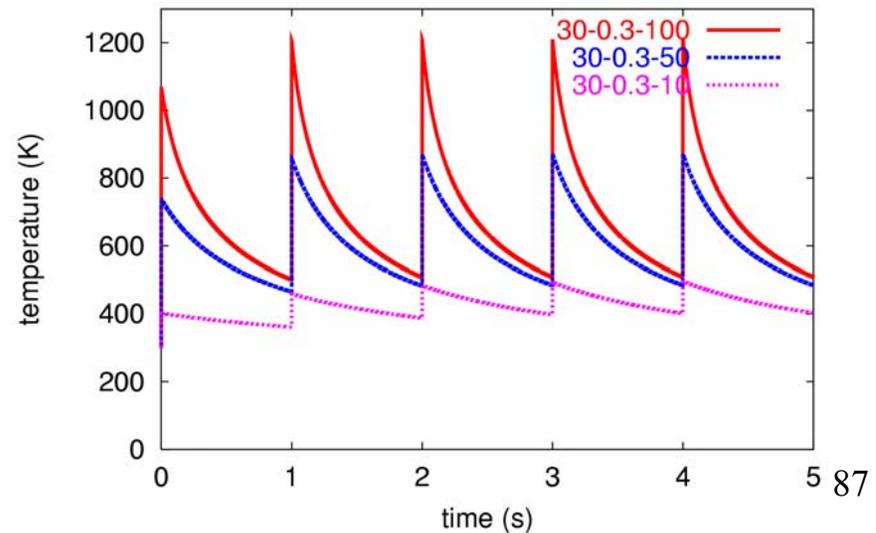
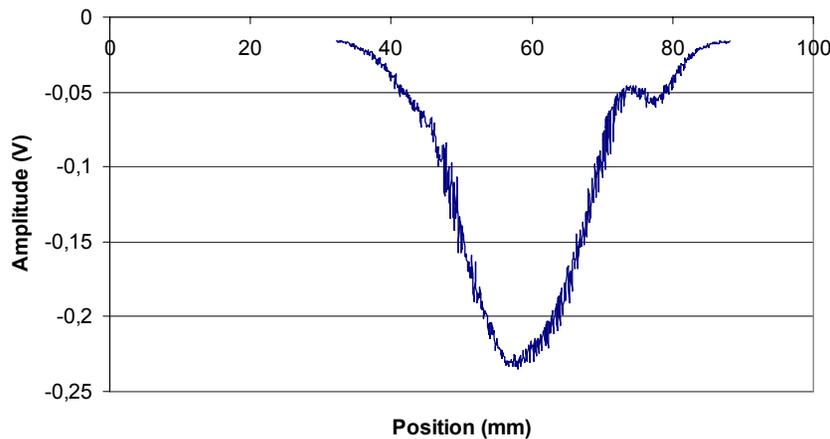
Wire scanner IPHI

- Durée du Pulse: 1 ms - Repetition : 1 s
- Courant faisceau protons: 36 mA
- Pas: 100 μm

Profil vertical I=36mA Isol1=Isol2=110A HT=+100V
pas de 100 μm



Profil horizontal I=36 mA Isol1=Isol2=110A HT=+100V pas
de 100 μm



Profils transverses

Détecteurs "semi"

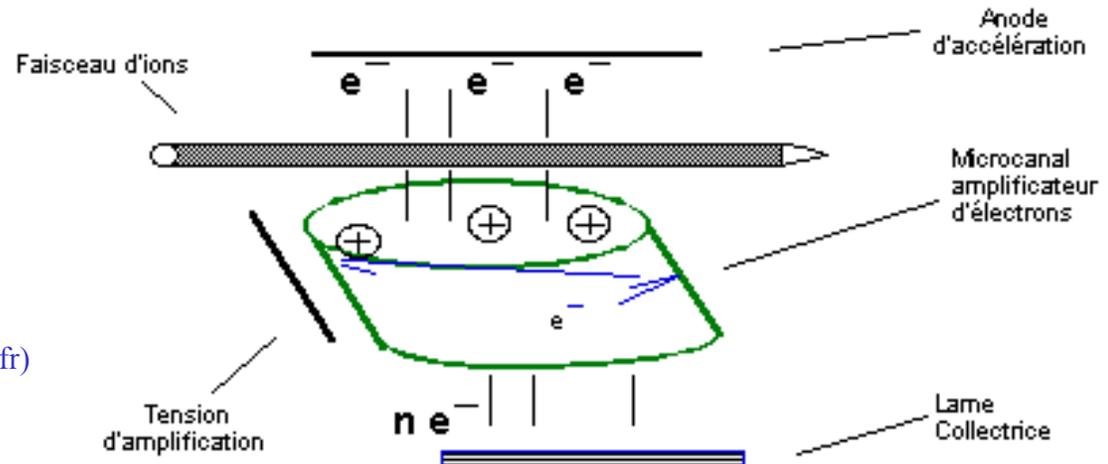
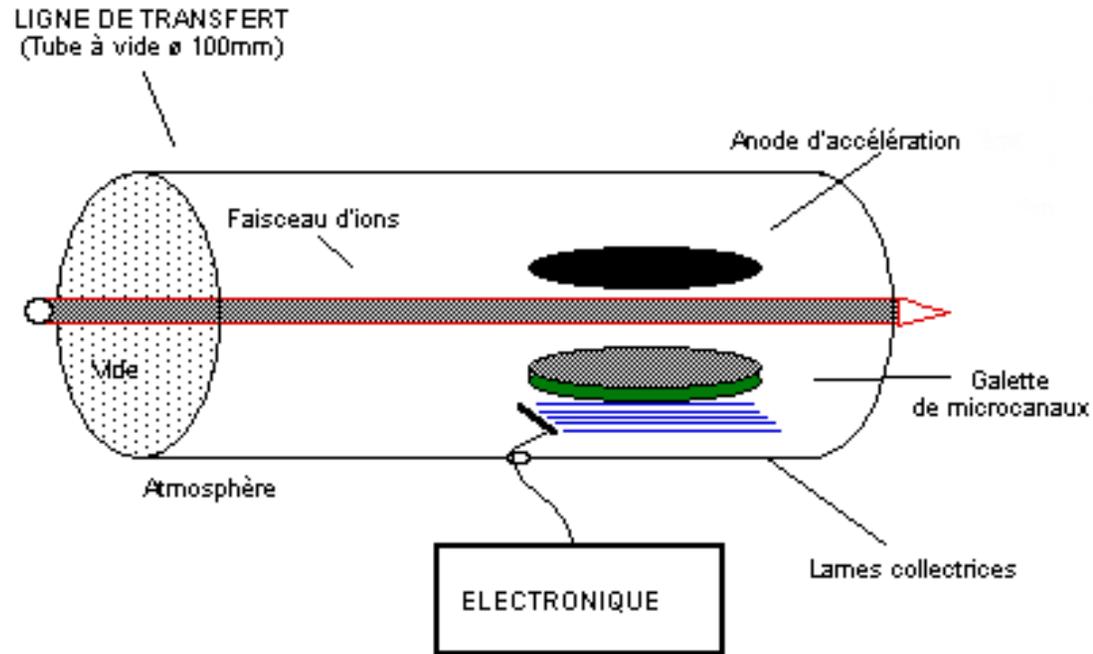
-destructifs

SONDE DE PROFIL A GAZ

RESIDUEL

Principe :

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



Contact : J.L.Vignet (vignet@ganil.fr)

Profils transverses

Sonde de profil à Gaz résiduel



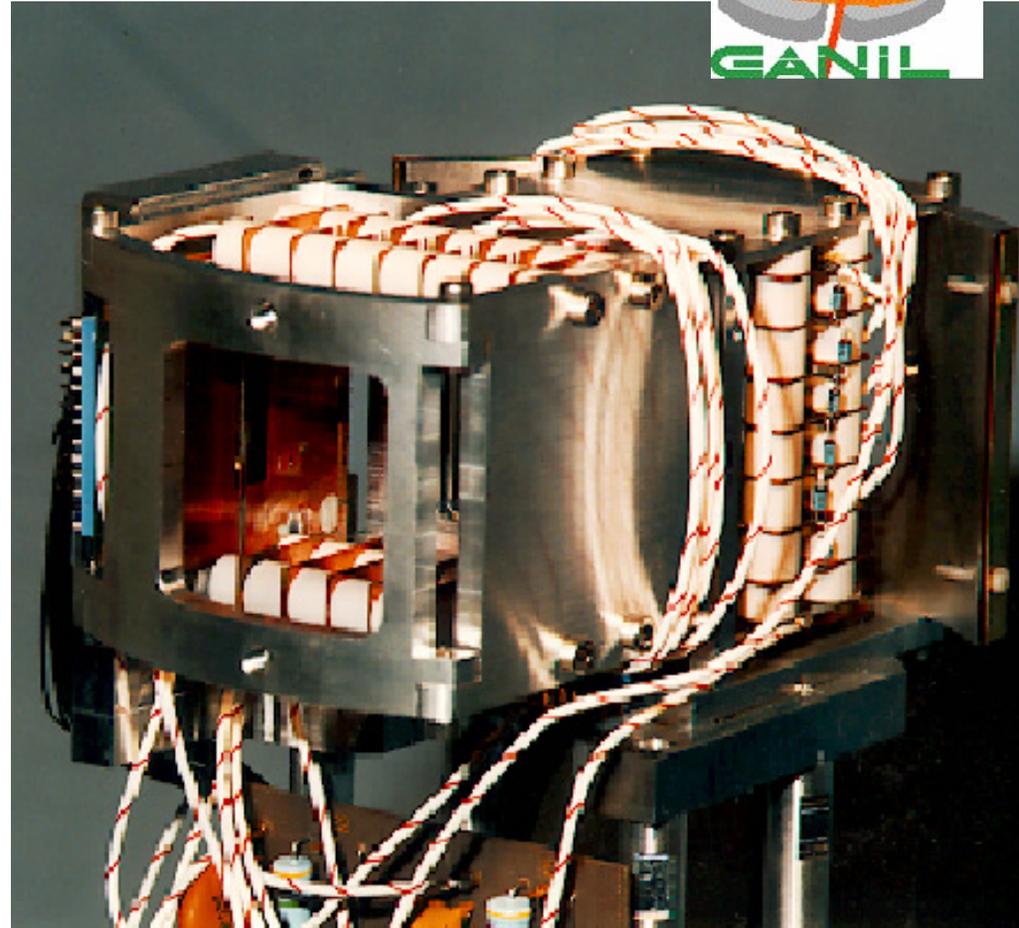
Utilisation : mesure du profil transverse et de la position du centre de gravité du faisceau d'ions

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 :

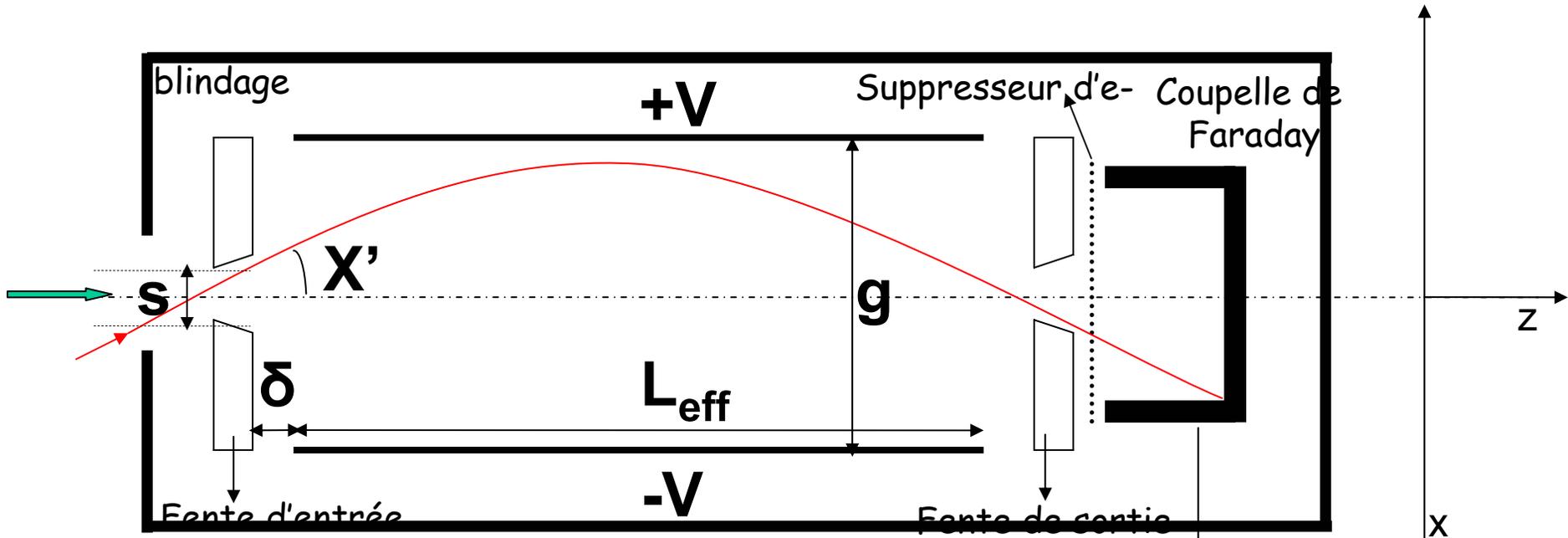
- précision en position : 0,5mm
- résolution : 1 mm
- intensité maximale du faisceau : > 100 μ Ap
- intensité minimale : 1 nAp

Contact : J.L.Vignet (vignet@ganil.fr)



La Mesure de l'émittance transverse

EMITTANCEMETRE DE TYPE SCANNER

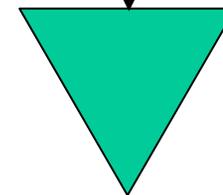


-Tension V nécessaire pour qu'un ion (charge q) d'énergie $q.U$ entrant avec un angle x' passe par la fente de sortie:

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

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

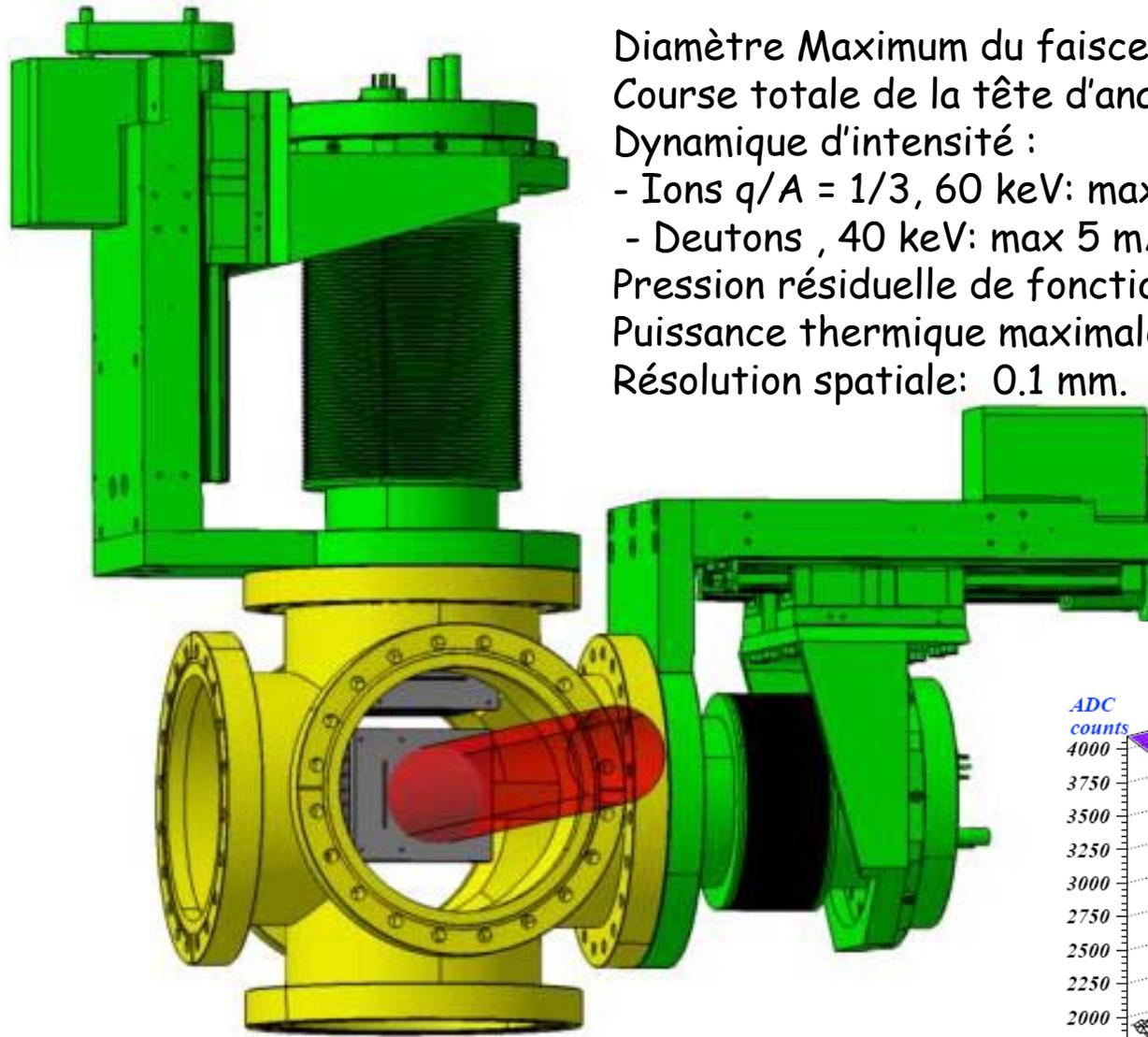
$$V_m = (8.g^2.U) / (D^2 - 4. \delta^2) \text{ pour } X'_m = (2.g) / (D + 2.\delta)$$



Déplacement émittancemètre

$I \rightarrow V$

EMITTANCEMETRE DE TYPE SCANNER



Diamètre Maximum du faisceau : 80 mm

Course totale de la tête d'analyse : 120 mm

Dynamique d'intensité :

- Ions $q/A = 1/3$, 60 keV: max:1 mA min: 1 μ A

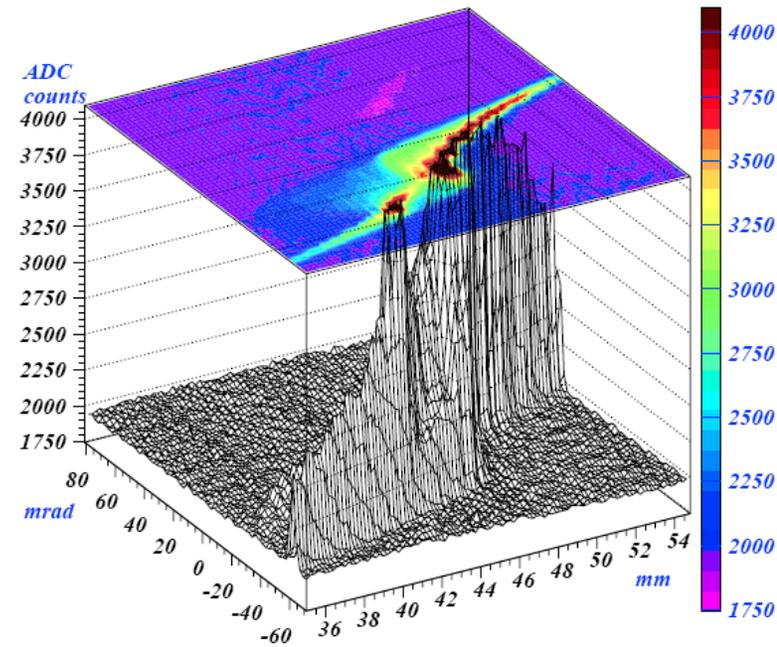
- Deutons , 40 keV: max 5 mA min.: 100 μ A

Pression résiduelle de fonctionnement : 1×10^{-8} mbar.

Puissance thermique maximale dissipable (C.W.) : 300 Watts

Résolution spatiale: 0.1 mm.

Emittance Horizontale
Faisceau Source Phoenix
AR 4^+ - I= 1 μ A à 18 μ A

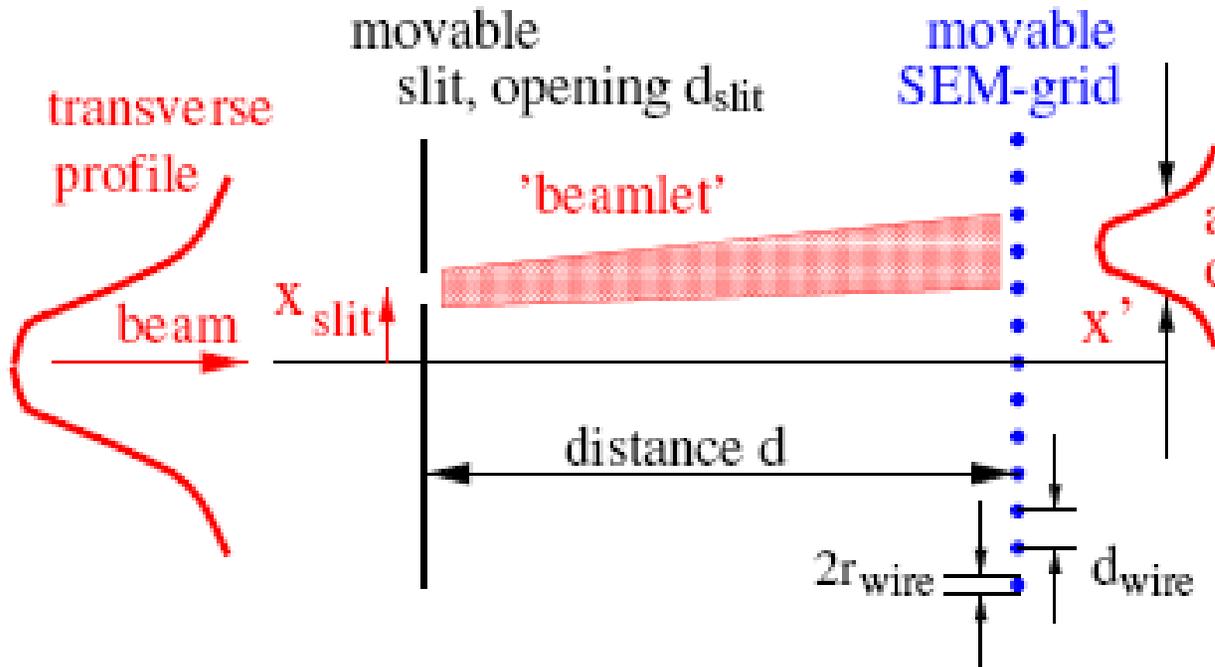


Emittancemètre développé pour SPIRAL2
(réalisation I.P.H.C.)

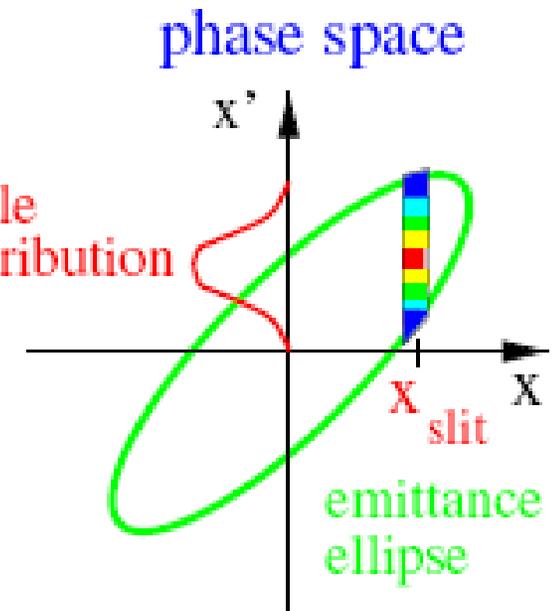
La Mesure de l'émittance transverse

EMITTANCEMÈTRE DE TYPE "fente - profileur"

Hardware



Analysis



Profils transverses

par fluorescence



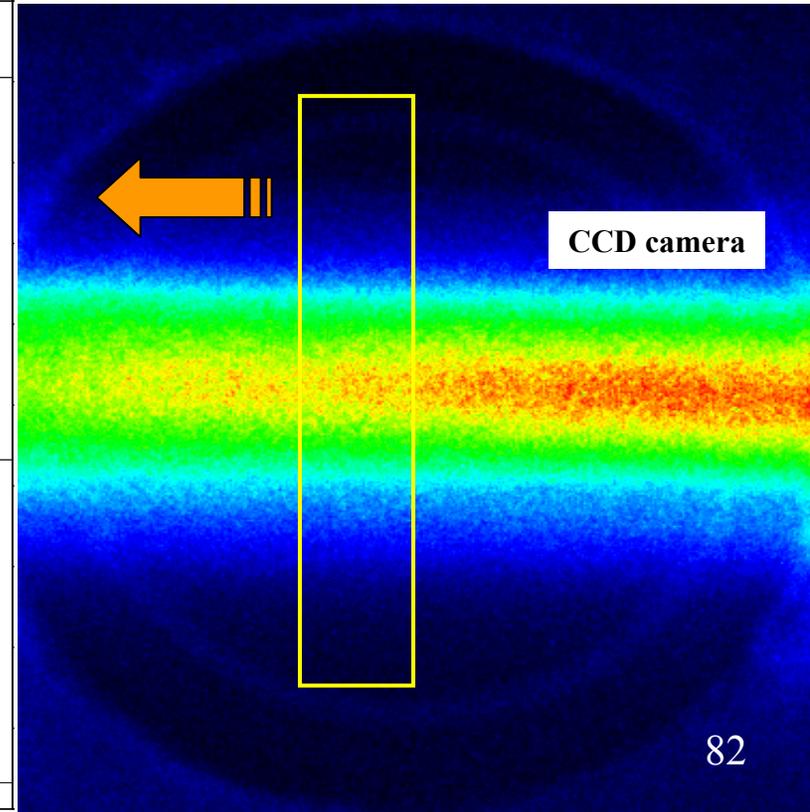
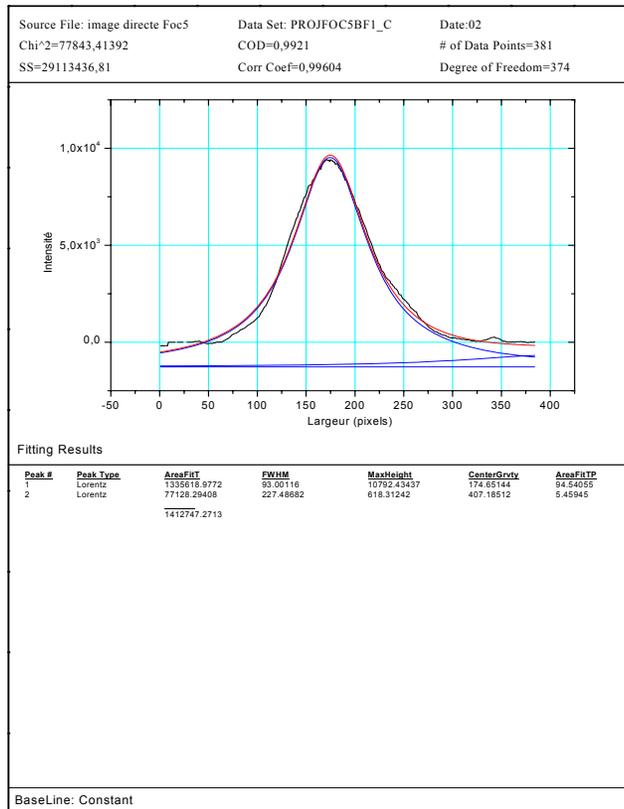
Profils transverses

“Oeil”

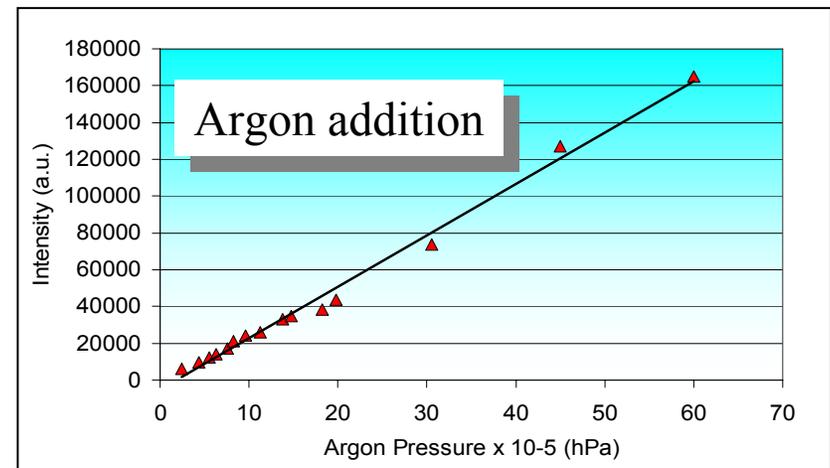
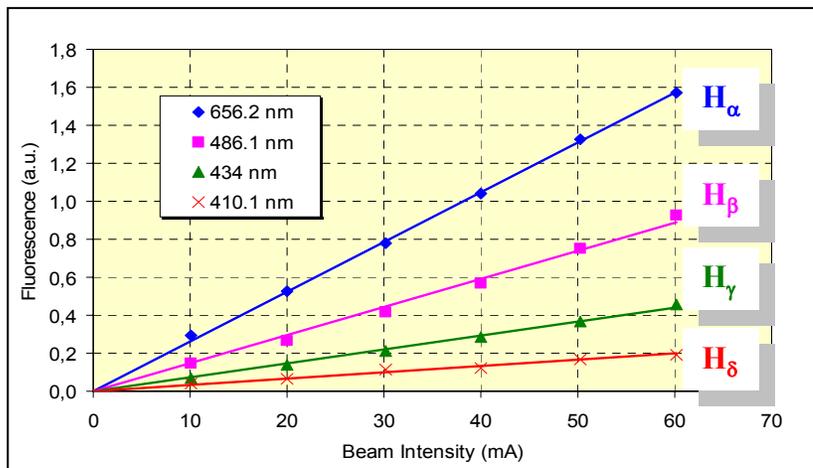
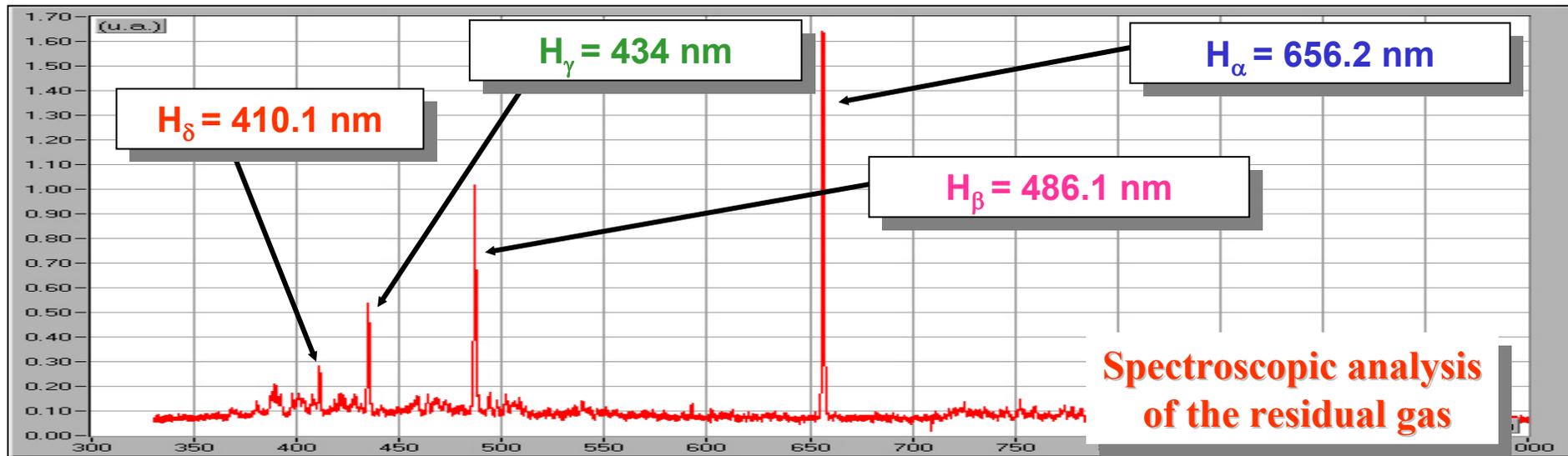
par fluorescence

Interaction: faisceau proton / gaz résiduel
(Hydrogène: 2.10^{-3} Pa)

82 KeV 2×10^{-5} faisceau global

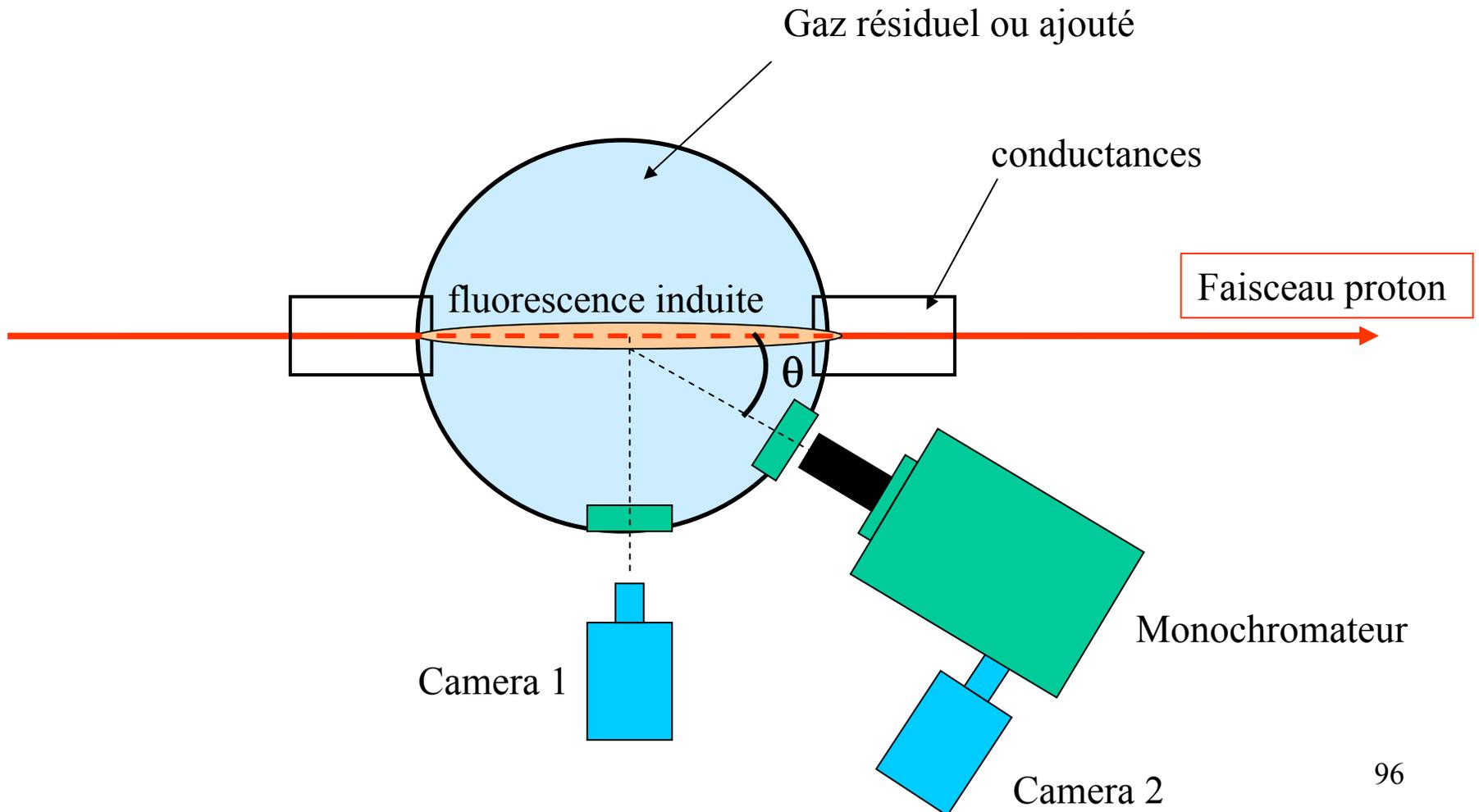


Analyse spectroscopique de la lumière émise par un faisceau de protons de 3 MeV



Emission de lumière par l'Hydrogène excité par un faisceau de protons de 3 MeV

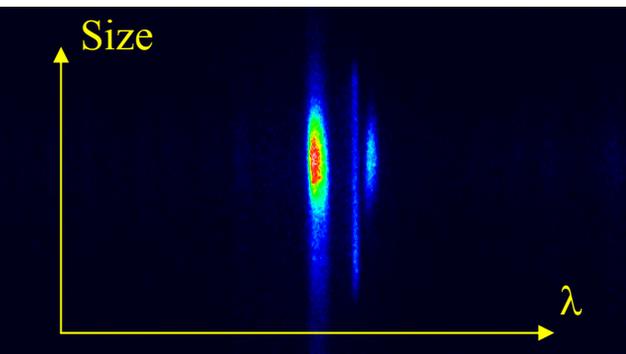
Mesures optiques : Décalage Doppler des raies de Balmer



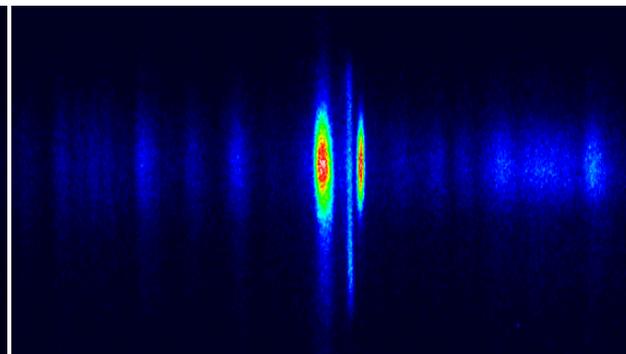
Emission de lumière par l'Hydrogène excité par un faisceau de protons de 3 MeV

Mesures optiques : Décalage Doppler des raies de Balmer

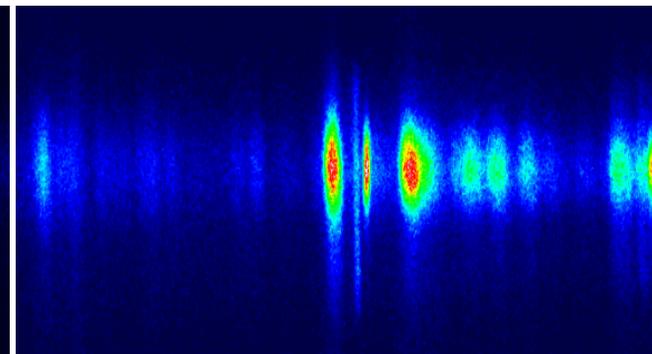
$$\Delta\lambda \approx \lambda_0 \cdot \frac{v}{c} \cdot \cos\theta$$



H_α : 656.2 nm

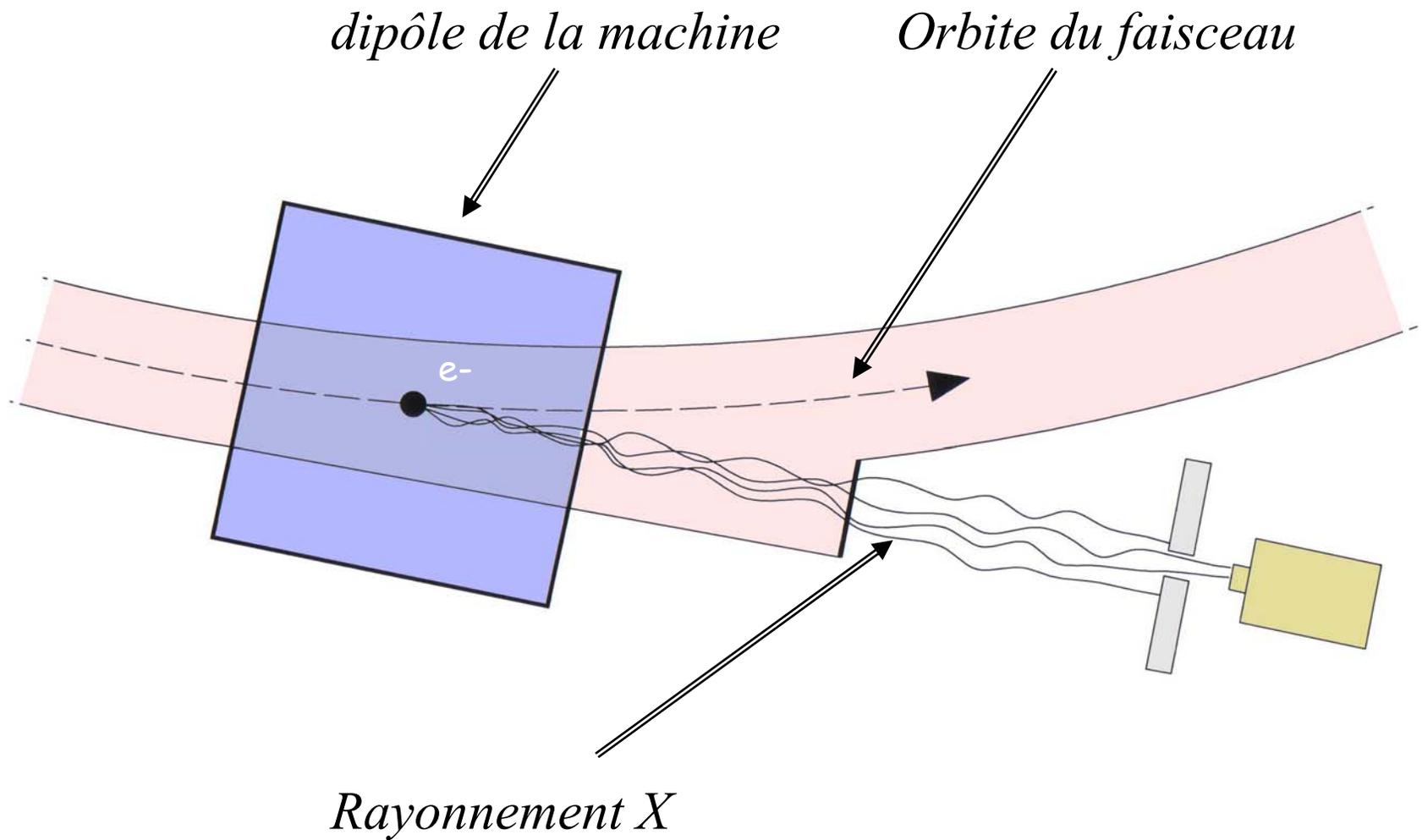


H_β : 486.1 nm

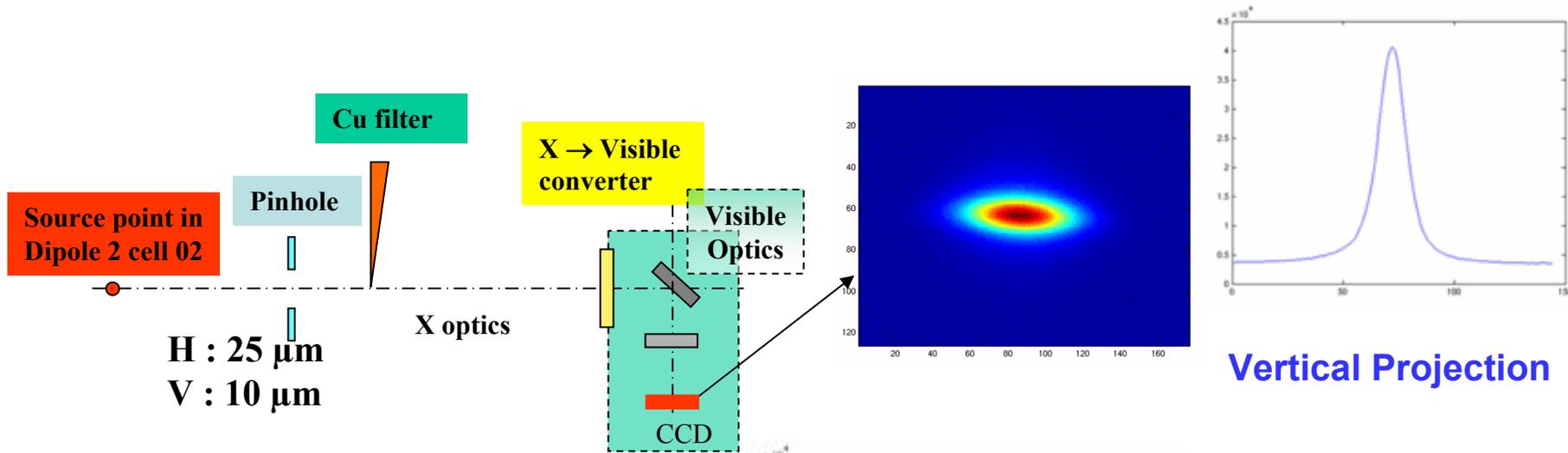


H_γ : 434 nm

Le Rayonnement Synchrotron



Le Rayonnement Synchrotron



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

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

@200 mA with Fast Transverse Feedback turned on

Emittance: Pinhole Camera

Profils transverses

Rayonnement de transition

1919: Observation expérimentale du rayonnement de transition (Lumière émise par impact des e^- sur l'anode d'un tube à vide)

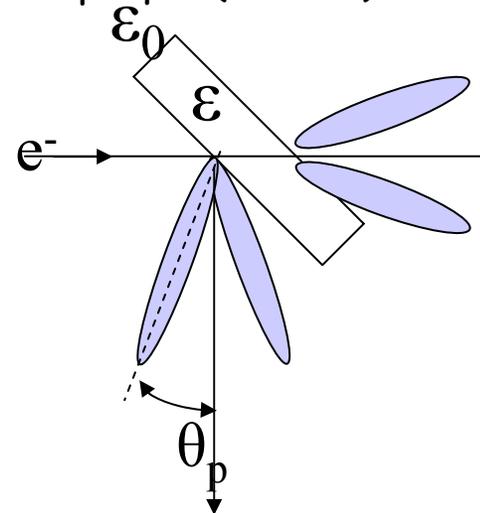
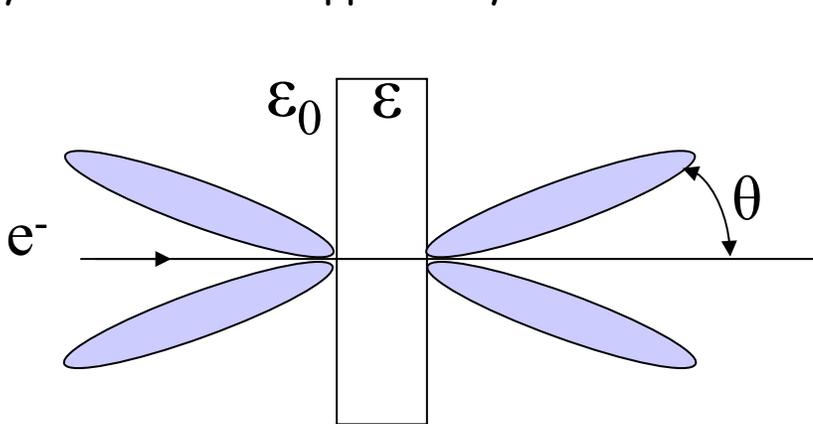
1945: Développement théorique par I. FRANCK et V. GINSBURG

1975: L. WARTSKY utilise le rayonnement de transition pour mesurer l'énergie d'un faisceau d'un LINAC à e^- , les profils transverses et invente l'interférométrie OTR à 2 feuilles.

1983 ...: R.B. FIORITO et D.W. RULE développent les méthodes de diagnostic OTR pour les accélérateurs.

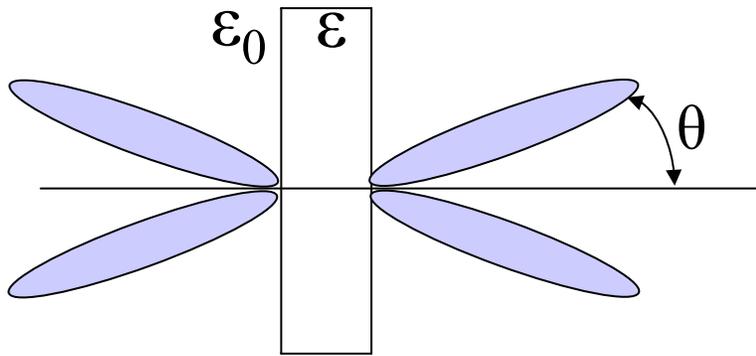
Phénomène physique

- Le rayonnement de transition (TR) est émis à l'interface séparant 2 milieux de constantes diélectriques différentes traversés par une particule chargée; La partie visible de ce rayonnement est appelé Rayonnement de Transition Optique (O.T.R.)

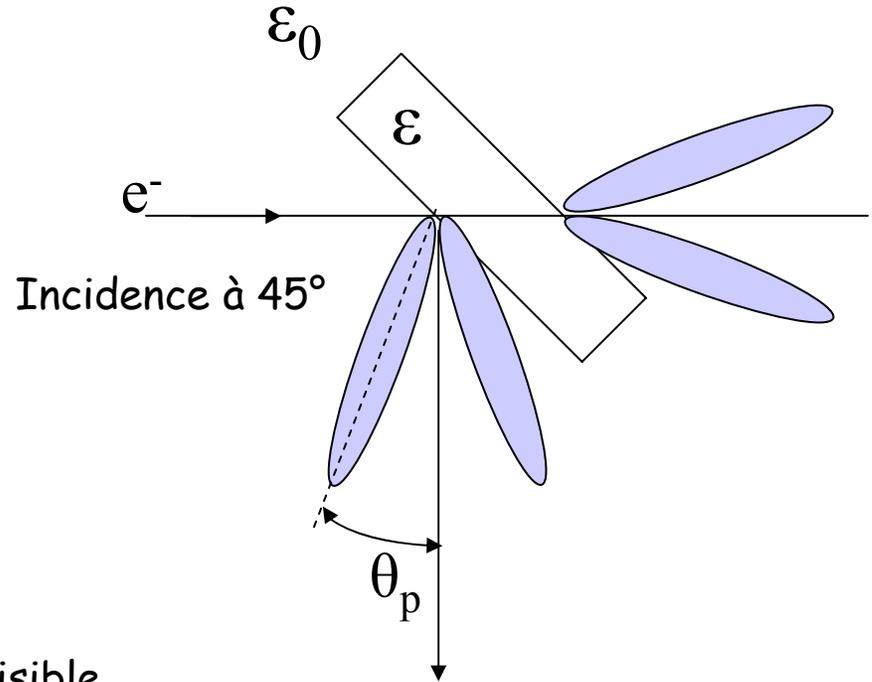


Profils transverses

Rayonnement de transition



Incidence normale



Rayonnement de transition:

- Phénomène de surface.
- Efficacité: 1 photon pour 1000 e^- dans le visible
- Ouverture du cône de lumière: $1/\gamma$

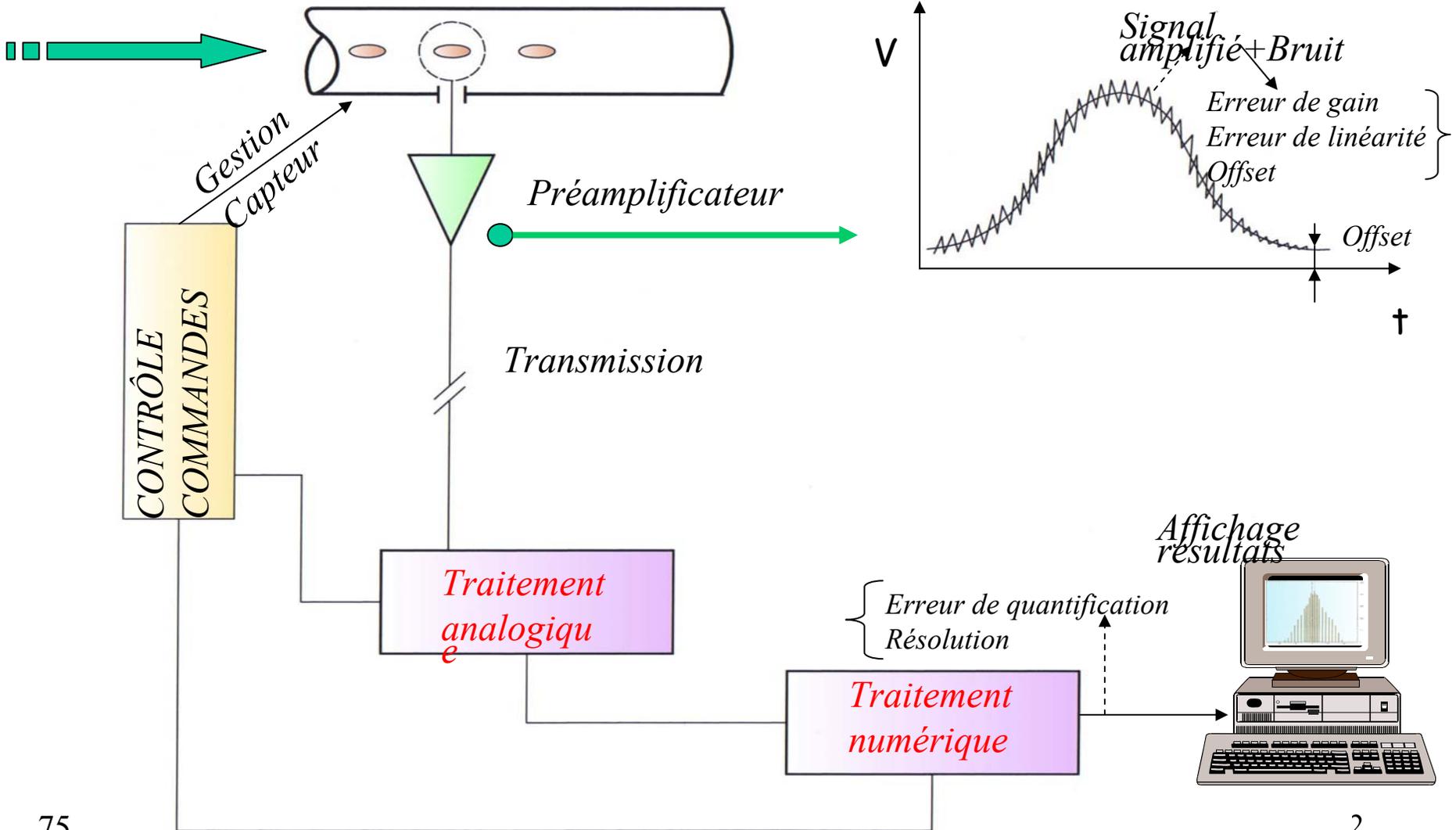
-Amélioration: Utilisation de 2 feuilles (interférométrie).

-Application: Mesure des profils transverses, émittance , énergie. Accélérateurs à e^-

Instrumentation Electronique associée

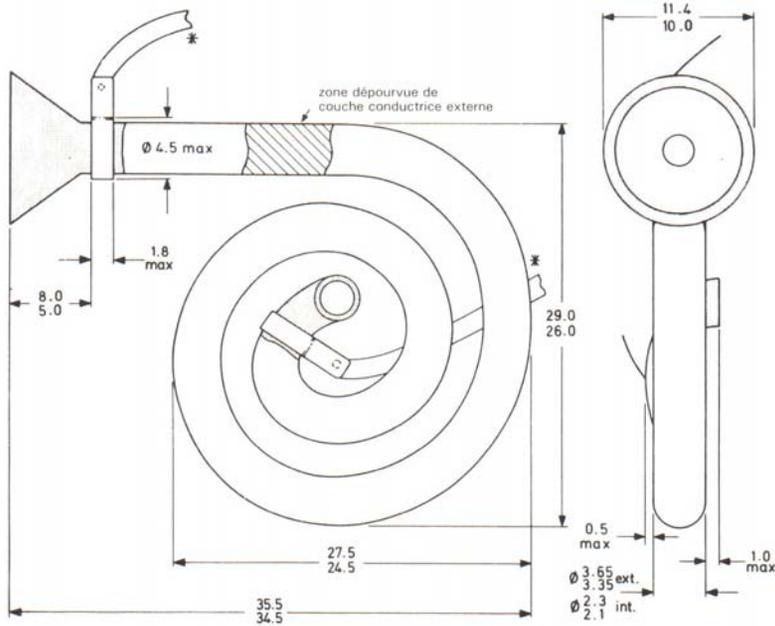
Notions de base

Chaine de traitement



Les multiplicateurs de charges

Multiplicateur d'électrons tubulaire

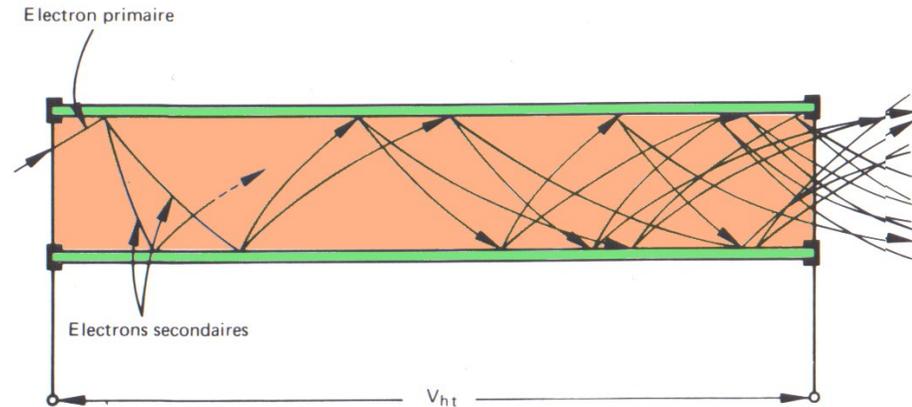
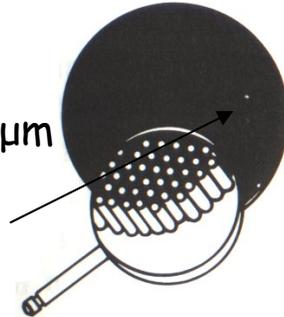


X719AL

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 $\sim 1 \text{ kV}$

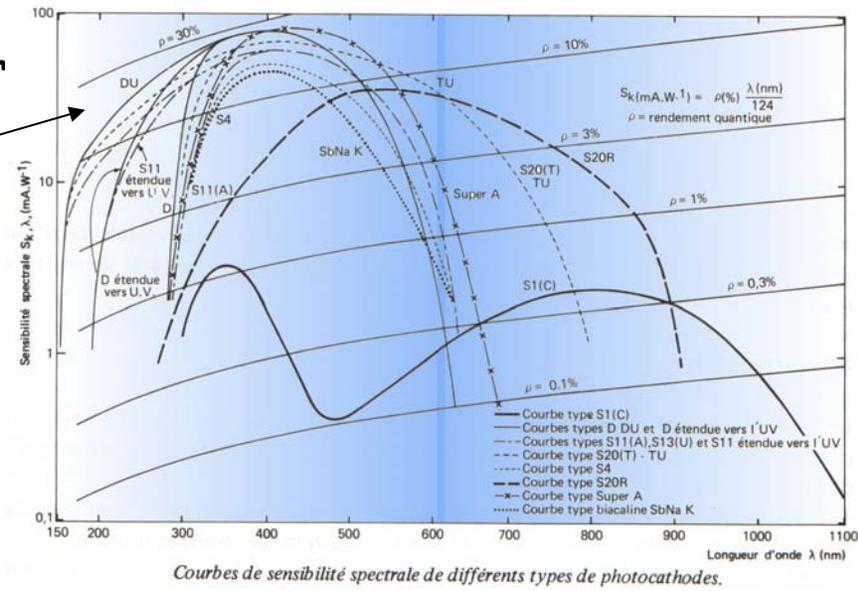
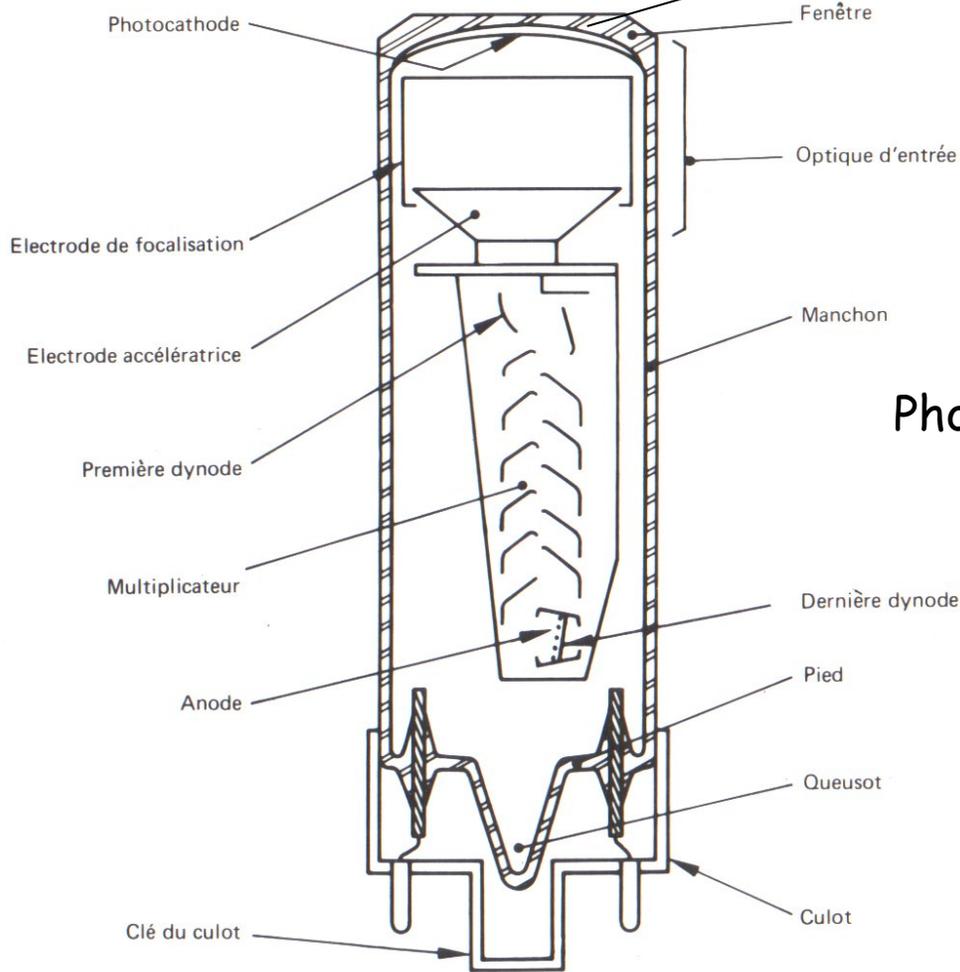


Les Amplificateurs de Lumière

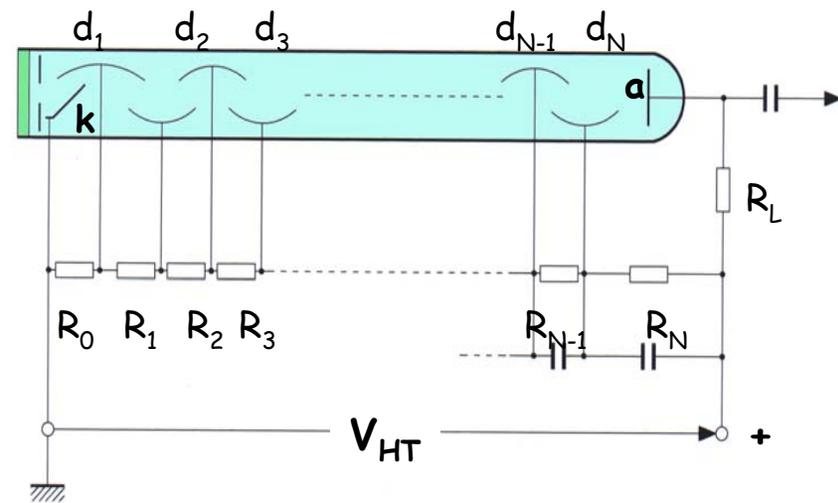
Photo-Multiplicateur



Schéma de principe d'un photo-multiplicateur

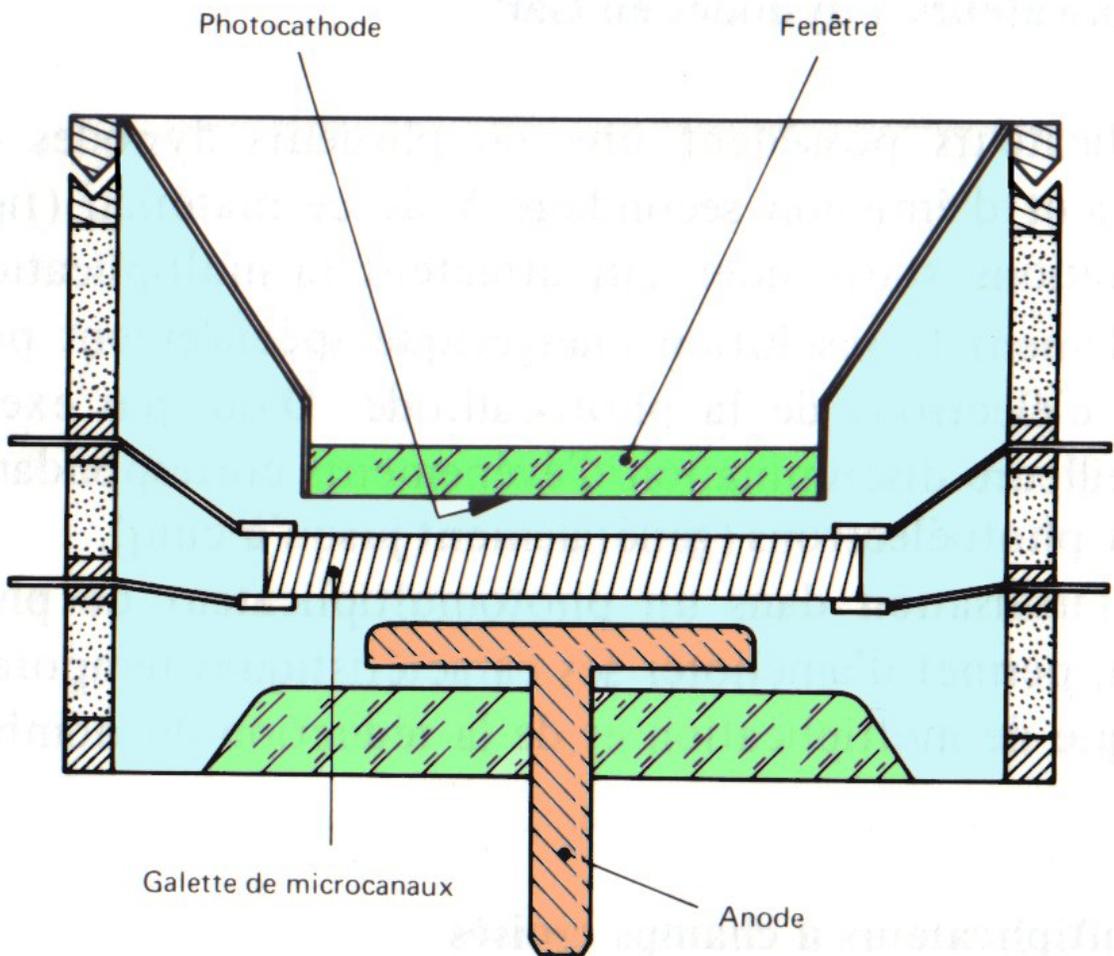


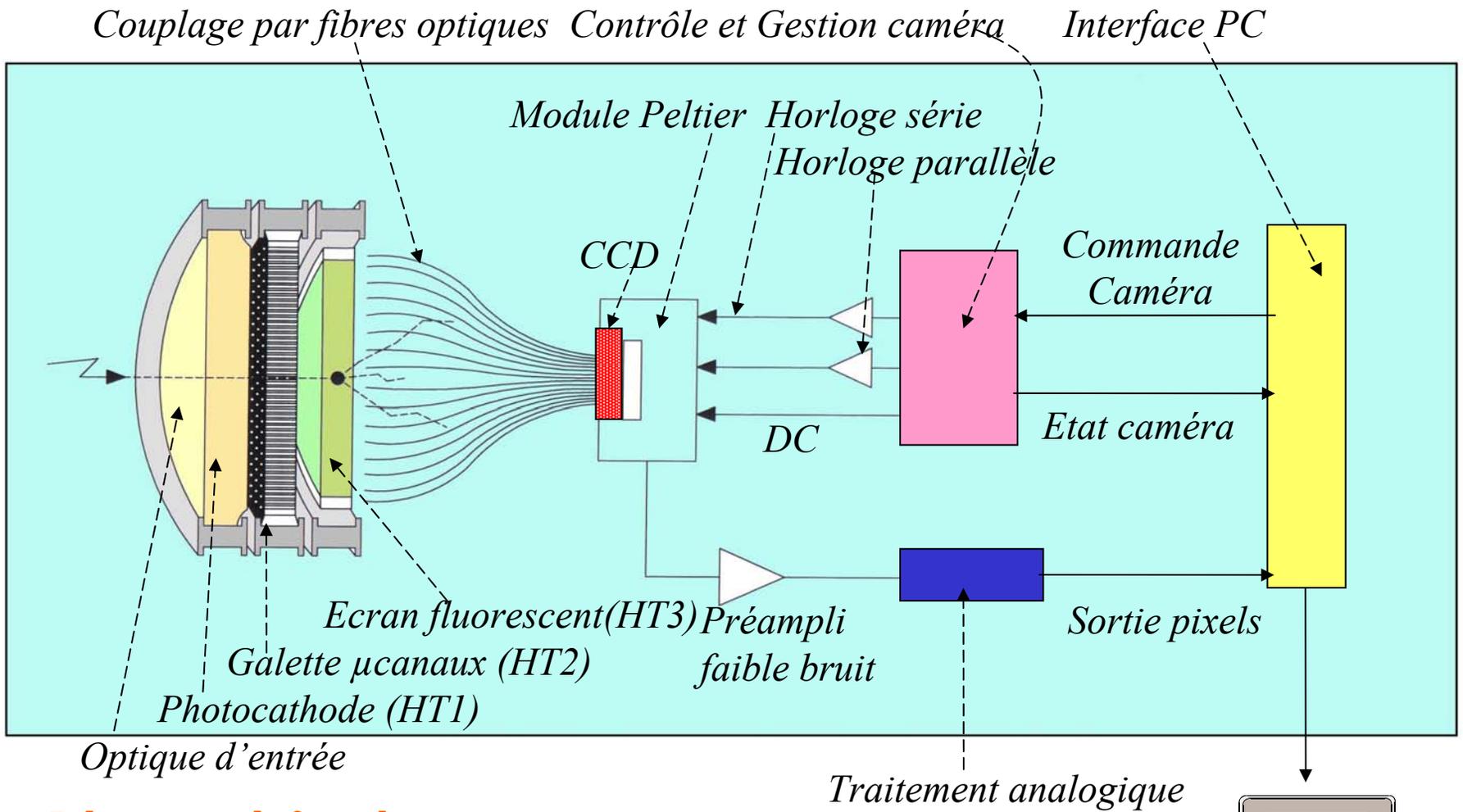
Photocathode: Conversion photon-électron



Amplification électronique: Alimentation H.T. des dynodes

Schéma de principe d'un photo-multiplicateur à galette de μ canaux



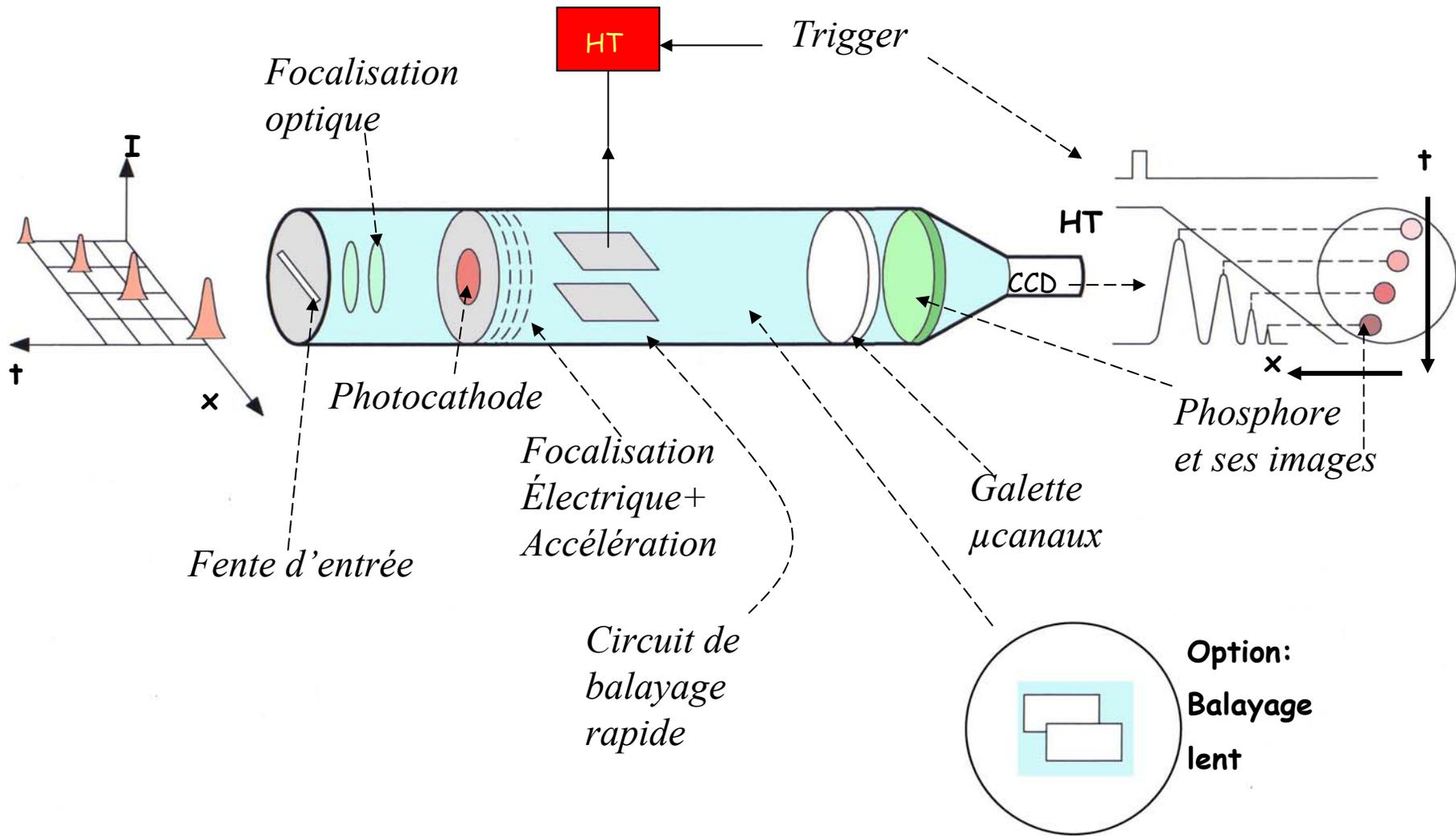


Détecteur à Caméra

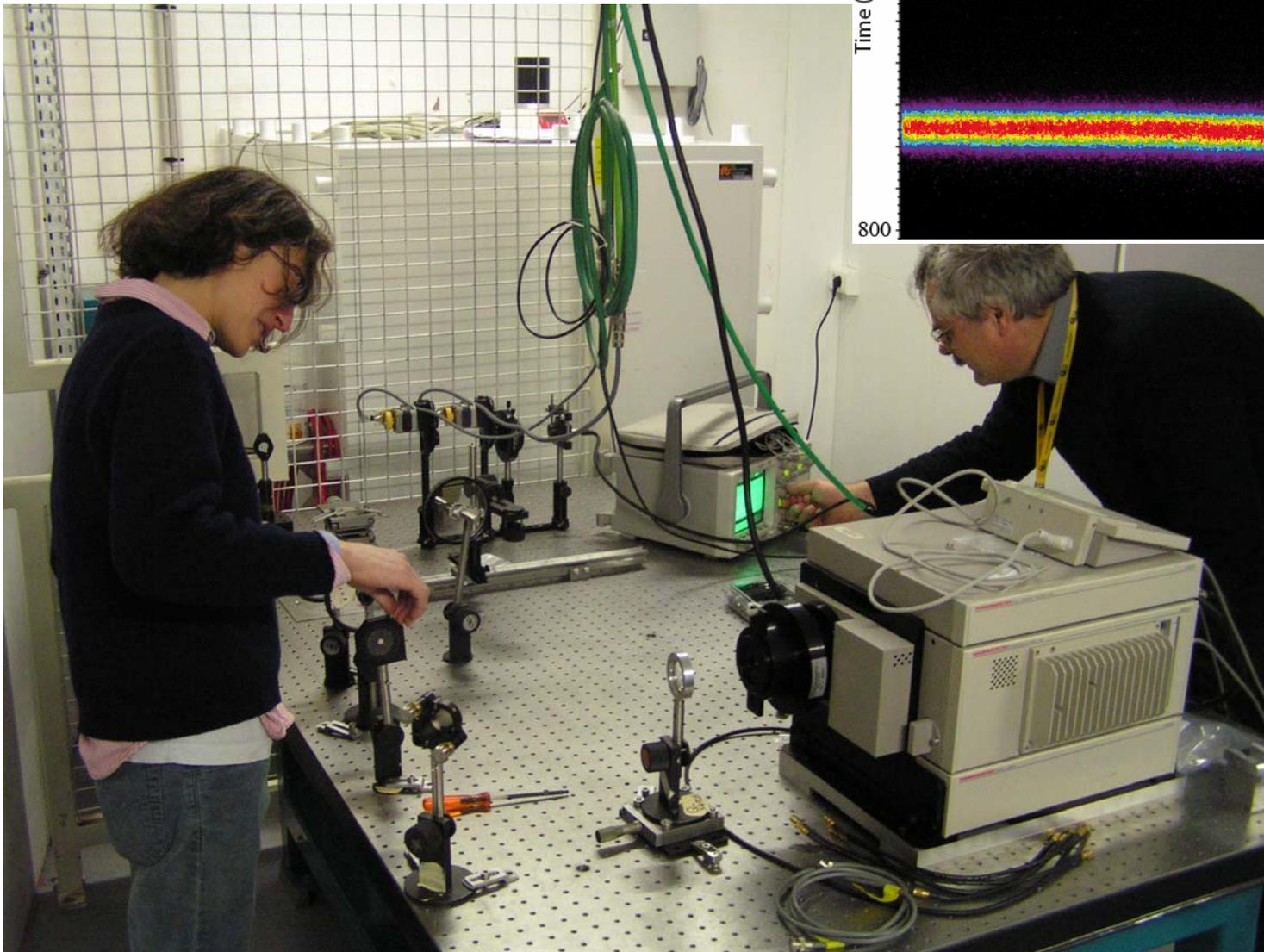
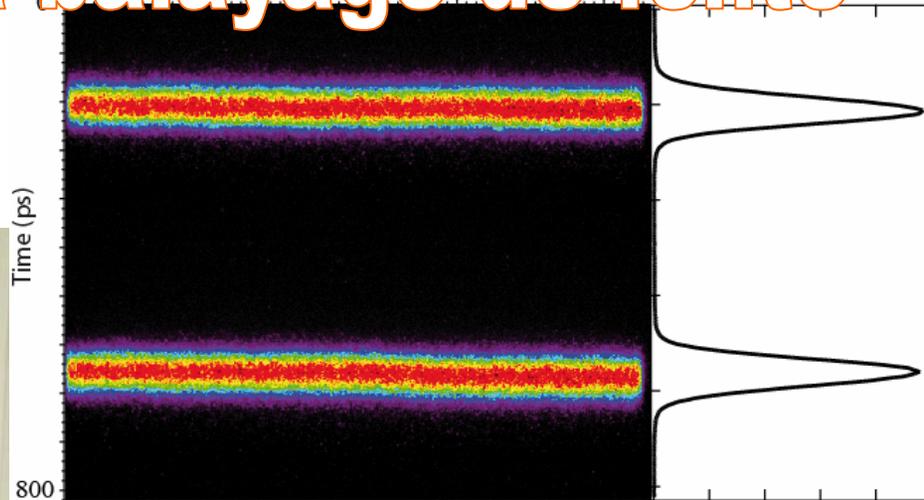
Principe d'une Caméra CCD Intensifiée



Détecteur "Caméra à balayage de fente"



Détecteur "Caméra à balayage de fente"



Moniteurs de pertes de faisceau

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

Moniteurs de pertes de faisceau

Exemples de détecteurs

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 pertes de faisceau

Exemples de détecteurs

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 A 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 » Beam Loss Monitor: 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.

Moniteurs de pertes de faisceau

Exemples de détecteurs

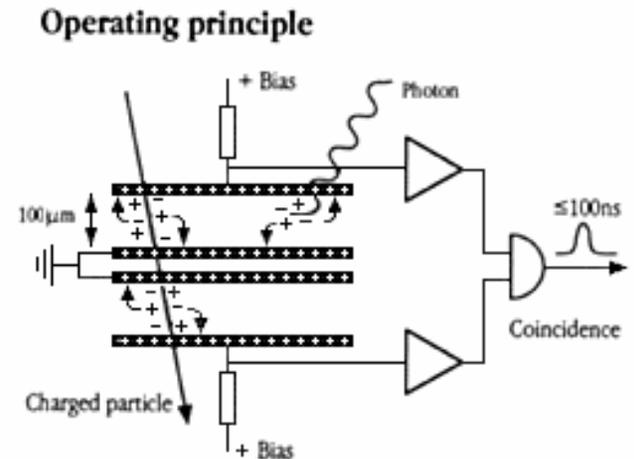
SOLID STATE ION CHAMBERS (PIN Diodes)

- Chambre à ionisation à l'état solide : diode PIN polarisée en inverse
- Surface sensible: 100 mm^2 , zone déplétion: 100 à 300 μm (Siemens, HAMAMATSU)
- Amélioration : 2 diodes montées en coïncidence

Exemple:

- Détection des pertes de protons sur HERA
- La coïncidence permet de diminuer la contribution due aux photons résultant des pertes d'e- circulant dans l'anneau voisin.

Taux de comptage max: 10.4 MHz
(Bergoz)



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 perdue

Et beaucoup d'autres détecteurs de perte faisceau...

Conclusion

Mesures de base passives:

- Le bunch est considéré comme une « macro particule ». L'échelle de temps est celle de la révolution dans une machine circulaire ou de la répétition dans un LINAC.
- Le contrôle précis de la qualité des faisceaux, l'étude de la machine nécessitent la mesure de plus en plus fine de l'intensité, de la position et des profils.
- On en déduit les rendements de transmission, les durées de vie (anneaux de stockage),
- Les émittances seront mesurées en vue de l'adaptation entre les machines,
- L'augmentation de la bande passante permet l'étude des oscillations du faisceau, des instabilités, des couplages entre les bunch
- Certaines machines nécessitent la mise en oeuvre de dispositifs spécifiques: mesure de la polarisation du faisceau par exemple.

Mesures dynamiques:

- On s'intéresse à l'observation des signaux pendant une durée inférieure à la période de répétition HF ou même plus petite que celle du bunch. Le faisceau est considéré comme une distribution spatiale et temporelle de particules. Son étude nécessite le développement de nouvelles techniques
- L'évolution va ensuite vers l'augmentation des performances des machines en agissant sur le faisceau par l'intermédiaire de kickers pilotés par les signaux des diagnostics :
Cooling stochastique par exemple

Références:

DOCUMENTS :

- Laboratoire National Ganil (F. LOYER)
- Laboratoire National SATURNE
- E.S.R.F.
- CERN (« Diagnostics » de J. BORER, R. JUNG, «beam Instrumentation» de J. BOSSER)
- G.S.I. (cours « JUAS » 2002)
- I.P.N.O

BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE:

- CERN Accelerator School
- Publications dans les conférences et workshops: EPAC, PAC, APAC, DIPAC, BIW...
- Les écoles de l'IN2P3 : physique détecteurs , électronique, traitement du signal
- Publications sur le « WEB »: site du CERN et des autres laboratoires.