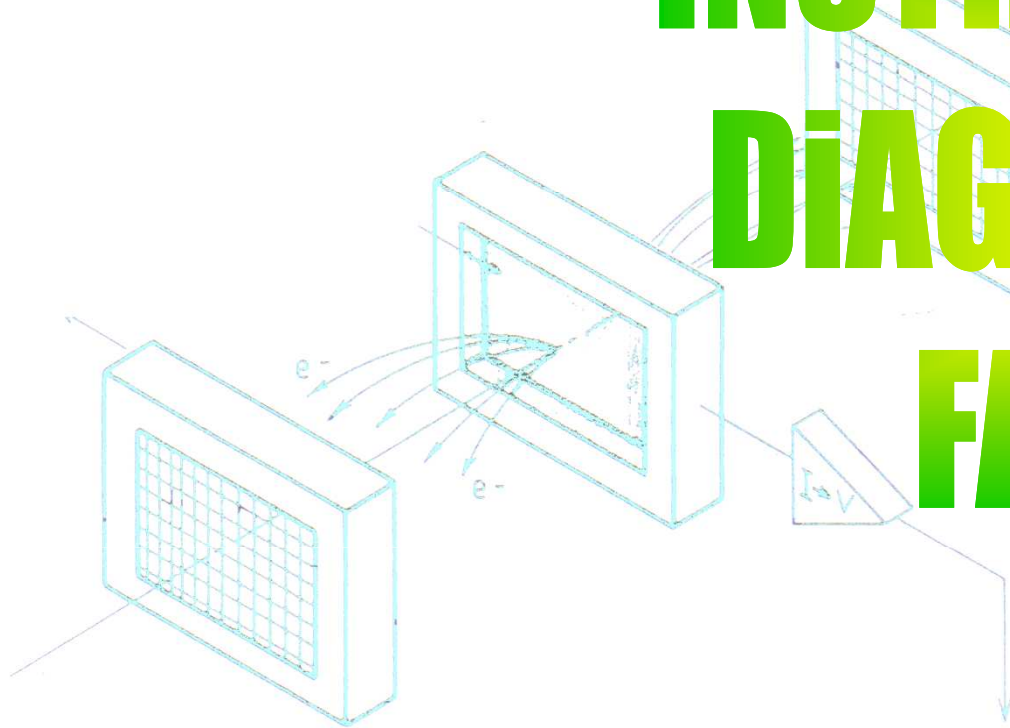


2<sup>e</sup> Partie

# INSTRUMENTATION DIAGNOSTICS DE FAISCEAUX



*Patrick AUSSET*



*Ecole Accélérateur In2p3*  
*Benodet 4 - 10 décembre 2011*<sub>1</sub>

# 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

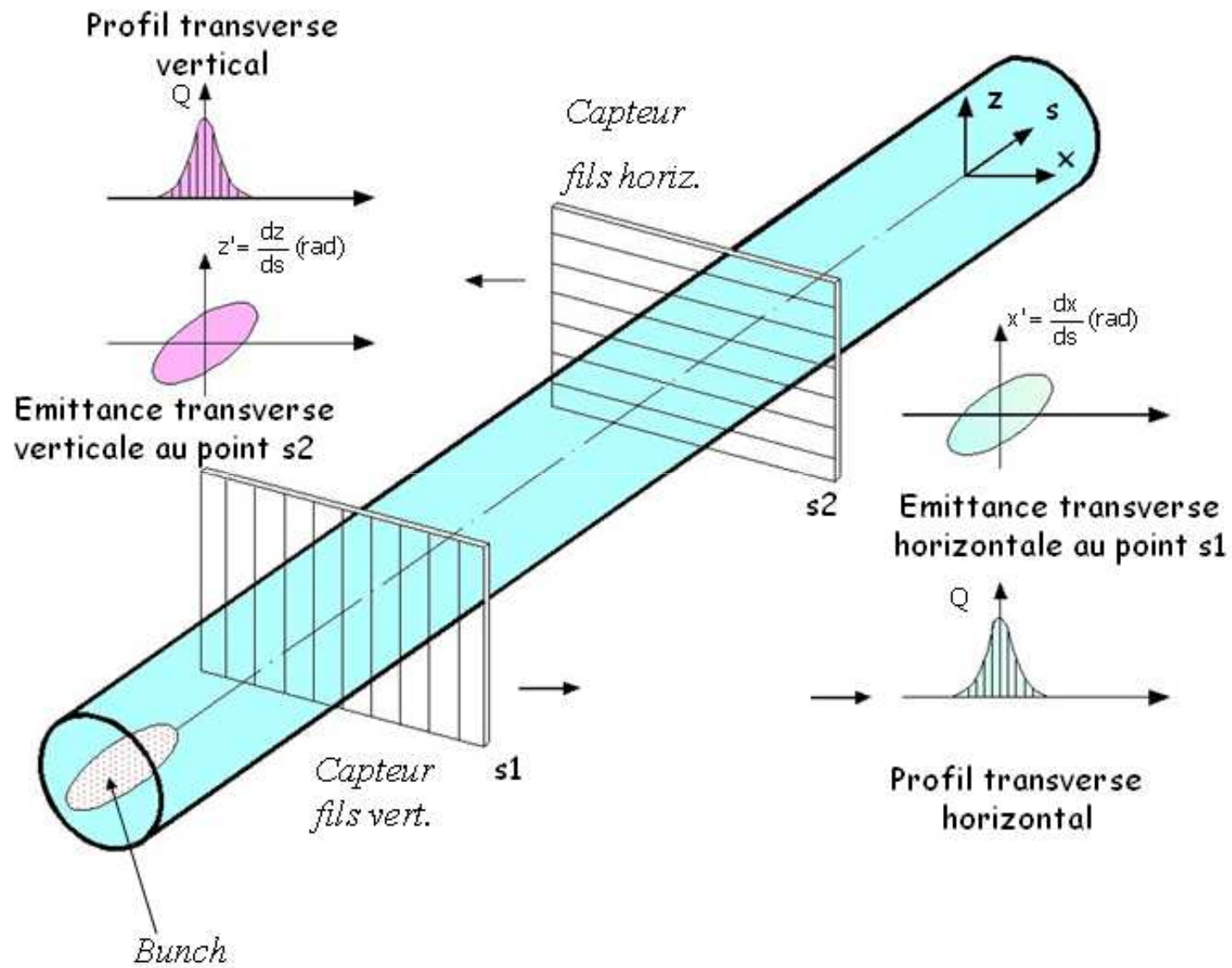
Mesure de l'émittance

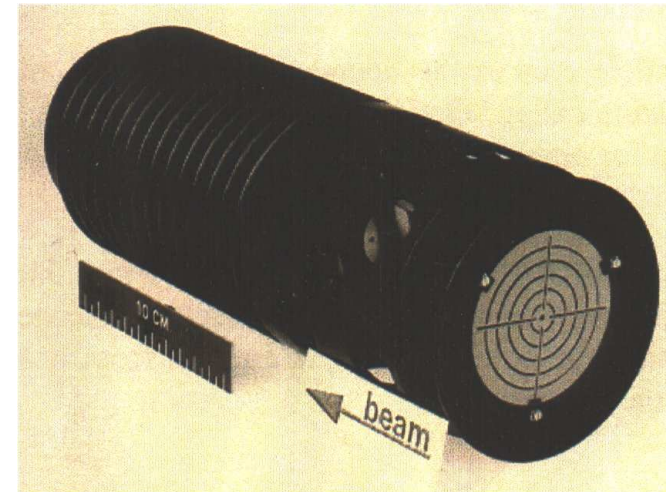
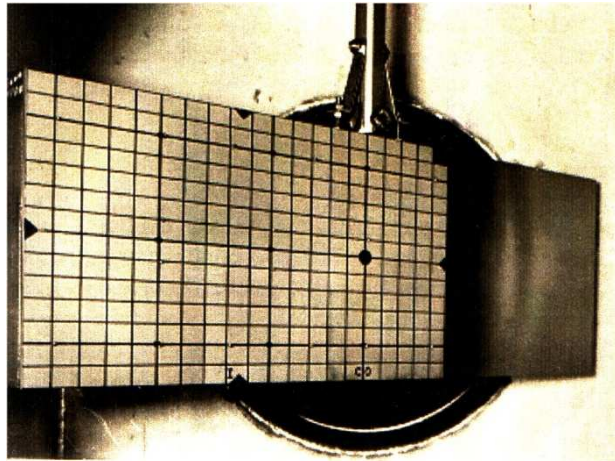
## 6 MESURES SPECIFIQUES

Mesure de longueur de bunch : camera à balayage de fente

Mesure de la lumière : camera CCD, photomultiplicateur

## 7 MONITEURS DE PERTES DE FAISCEAU





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

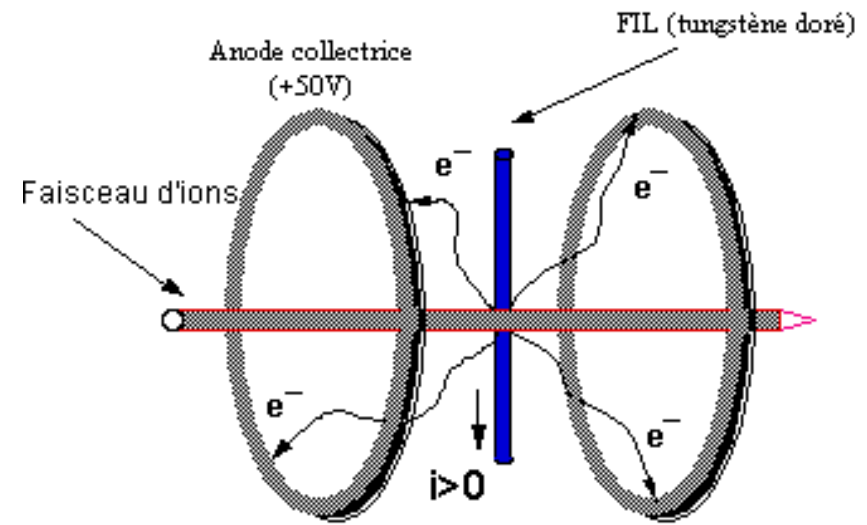
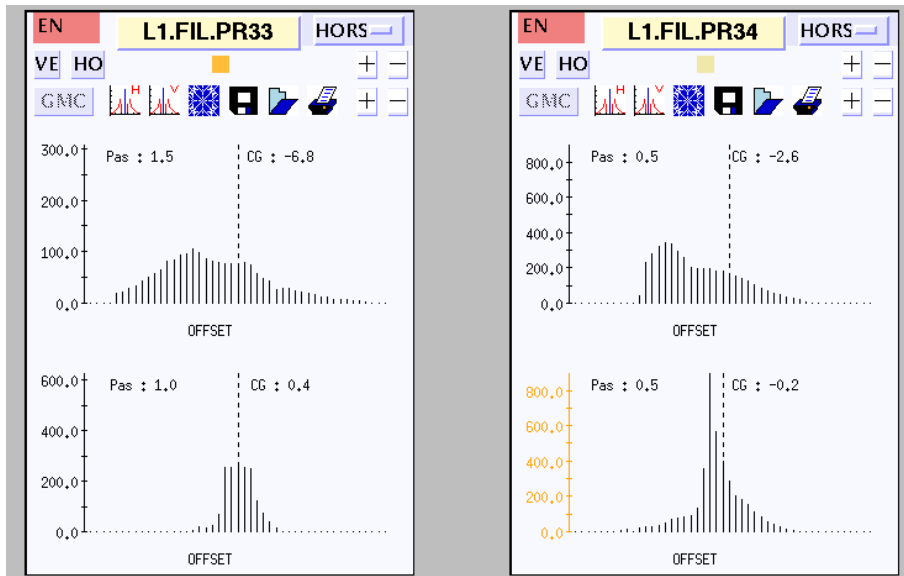
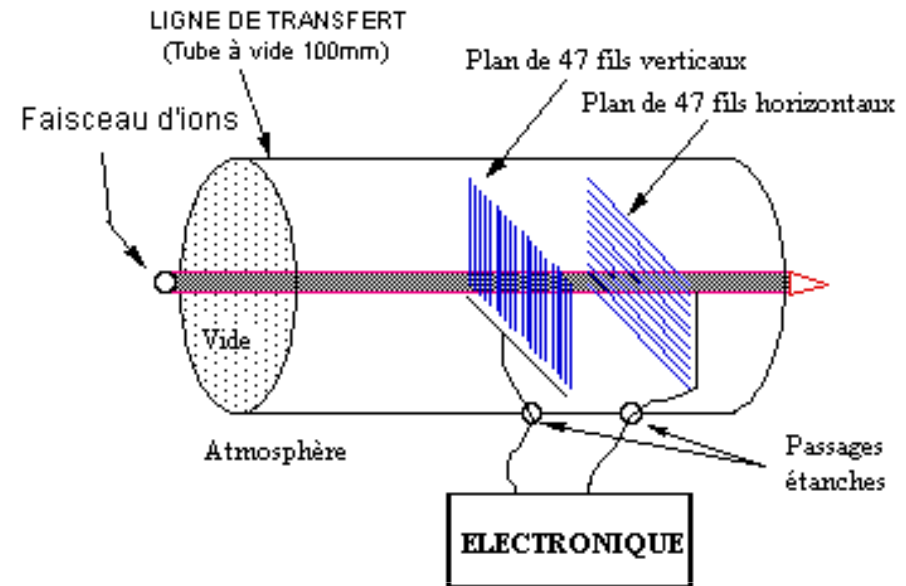


Type	Material	Activator	Sensitivity
<b>Luminesc.</b>	CsI	Tl	$6 \cdot 10^5$
“	$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.5%Cr	$3 \cdot 10^7$
“	Glass	Ce	$3 \cdot 10^9$
“	Quartz	none	$6 \cdot 10^9$
<b>OTR [bwd]</b>	Al		$2 \cdot 10^{10}$
“	Ti		$2 \cdot 10^{11}$
“	C		$2 \cdot 10^{12}$
<b>Luminesc. GSI</b>	P43: $\text{Gd}_2\text{O}_2\text{S}$	Tb	$2 \cdot 10^7$

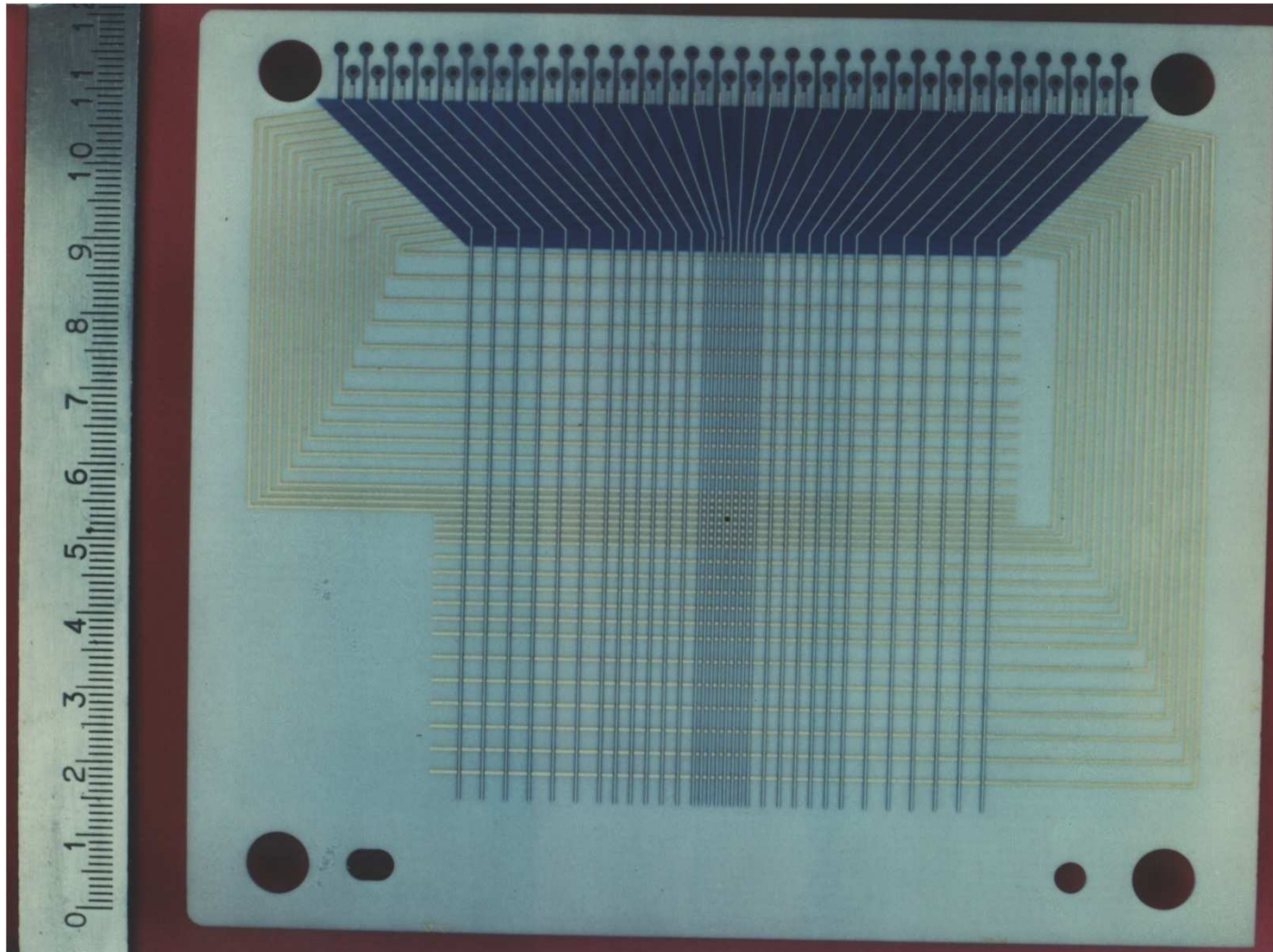


Principe :

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







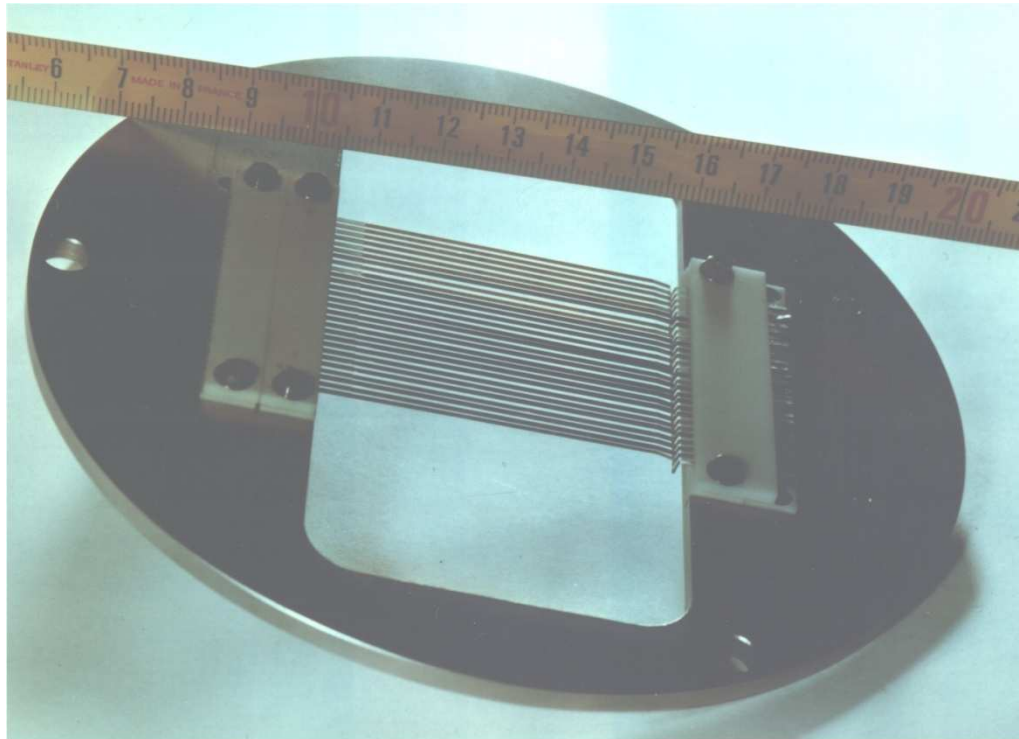
Capteur multicouches  
Montage en ultravide

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





## Profils transverses



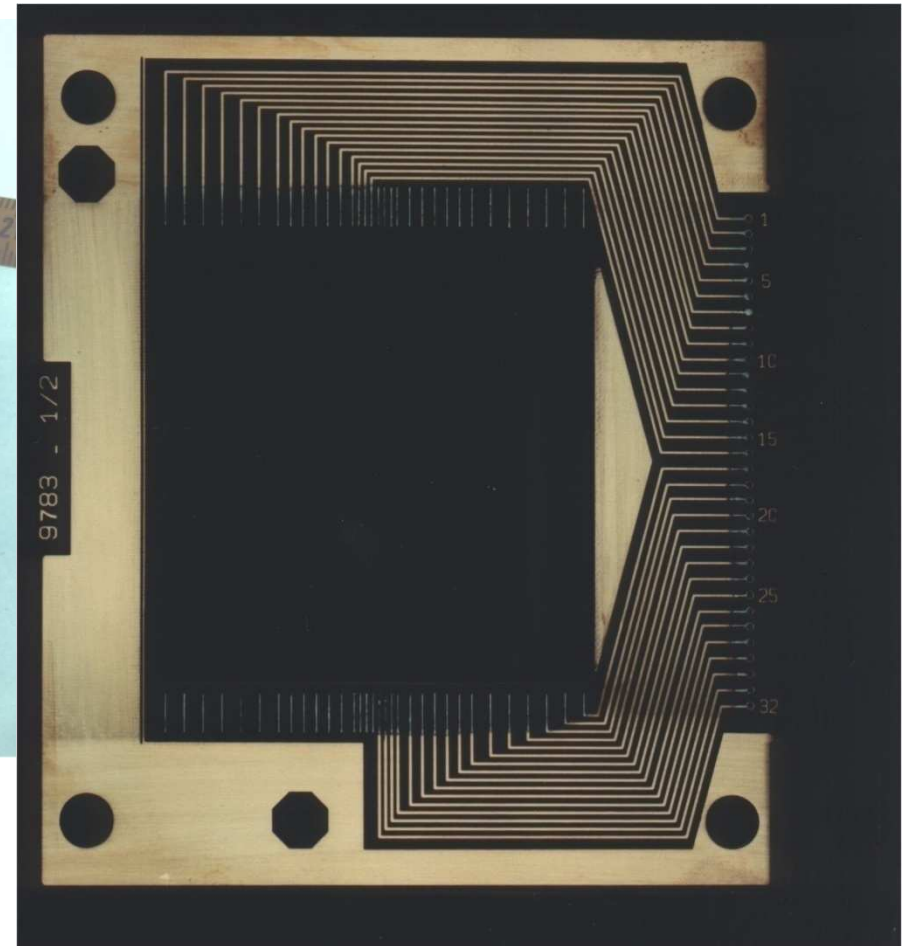
Capteur type « ruban »

Matériau nickel

épaisseur:  $20\ \mu\text{m}$  ; largeur ruban: 1mm

Support: alumine (bon isolement électrique)

## Profileurs à émission secondaire



Capteurs à fils de tungstène:

Diamètre:  $30\ \mu\text{m}$

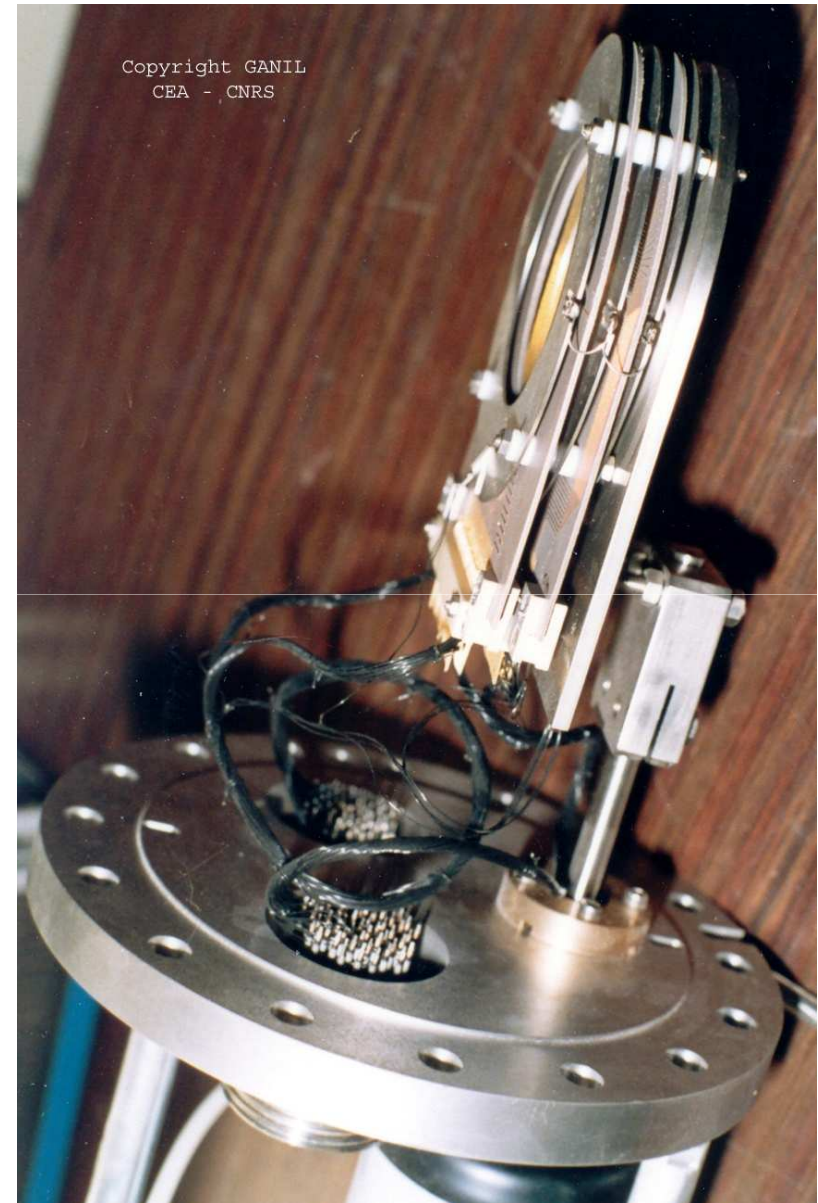
Substrat: epoxy

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

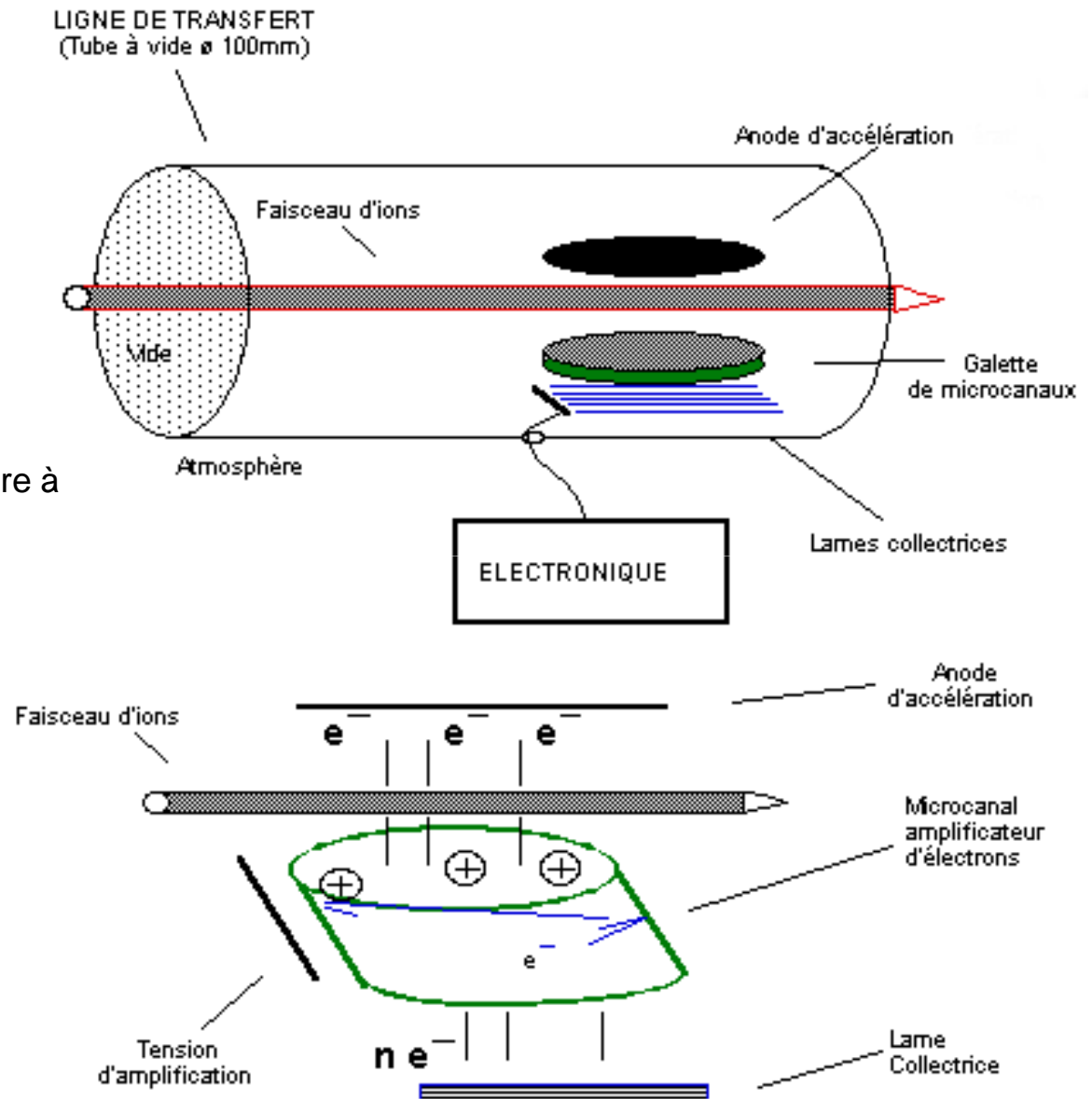
Principe :  
détection du courant électrique créé par les électrons secondaires émis par l'impact du faisceau sur des fils organisés en plans verticaux et horizontaux  
(voir fiche suivante)

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  $\mu$ Ap
  - autour de 10MeV/u : 10 nAp
  - vers 100 MeV/u : 100 nAp
- intensité minimale : 1 nAp



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

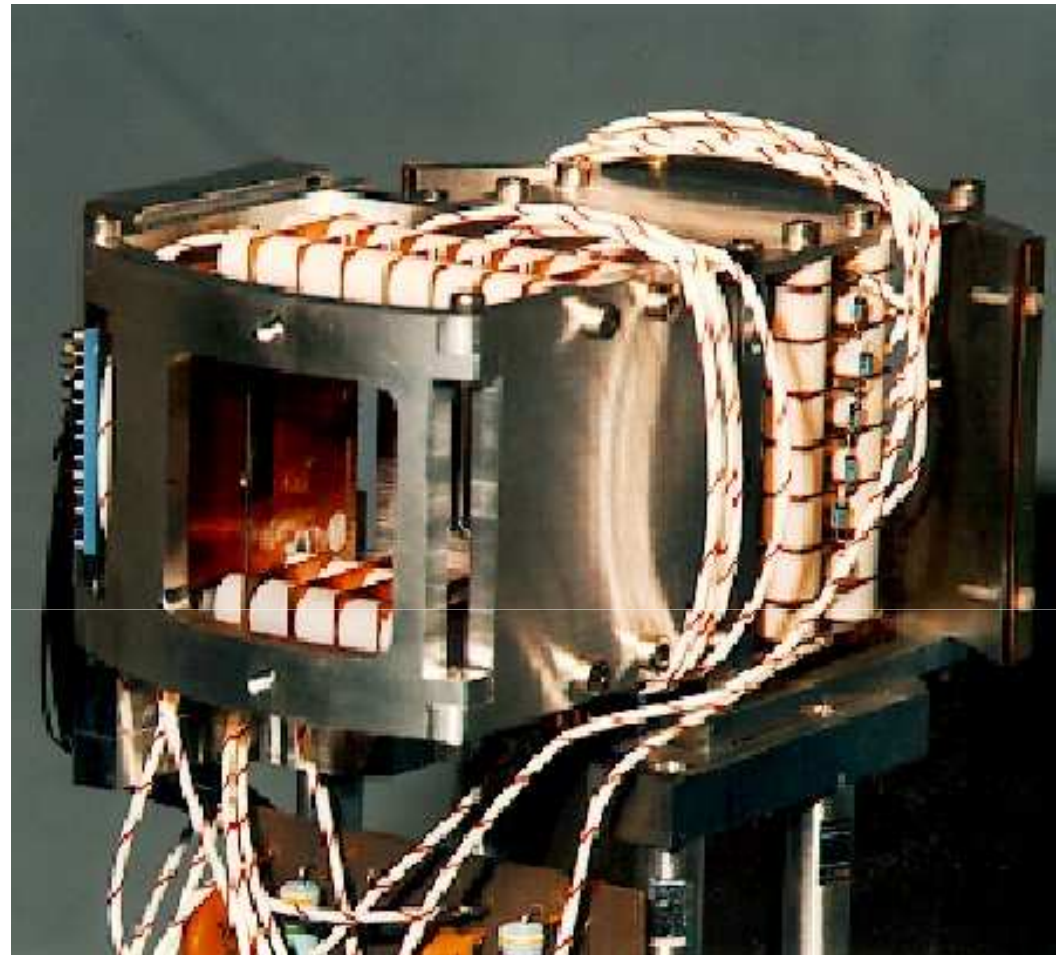


Utilisation : mesure du profil transverse et de la position du centre de gravité du faisceau d'ions

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

Performances :

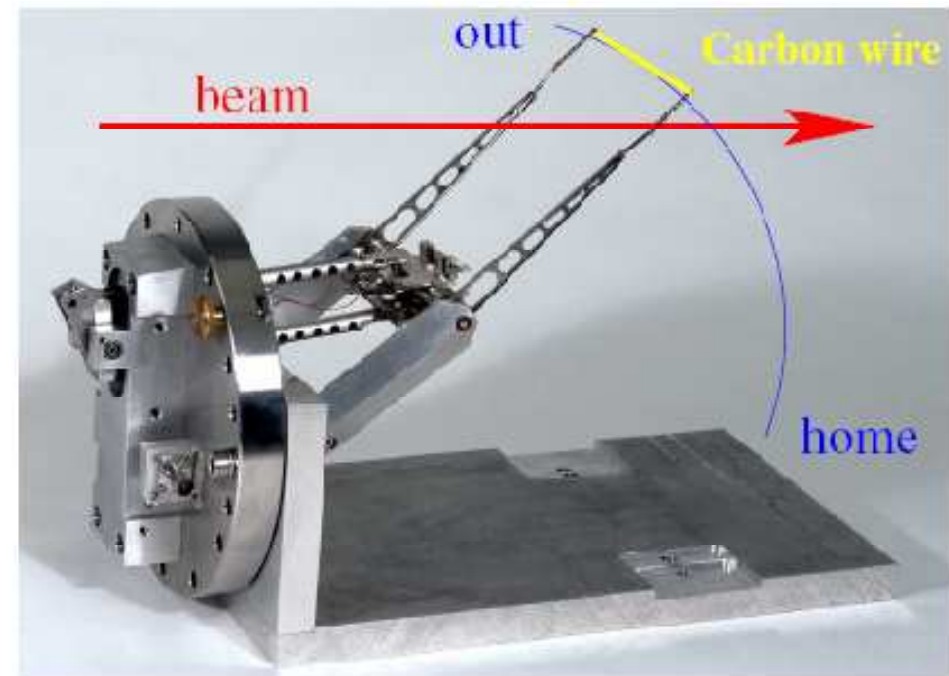
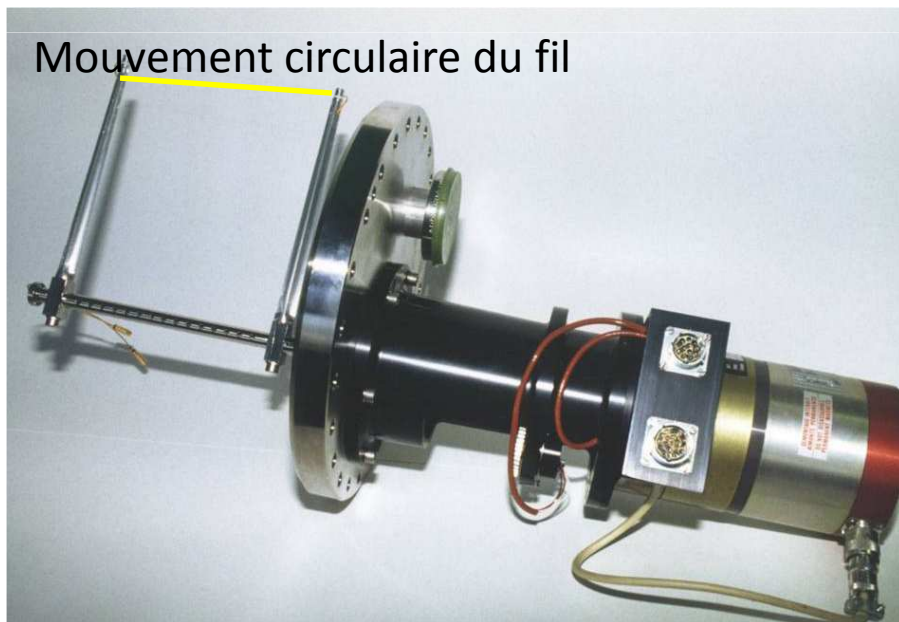
- précision en position : 0,5mm
- résolution : 1 mm
- intensité maximale du faisceau :  $> 100 \mu\text{Ap}$
- intensité minimale : 1 nAp





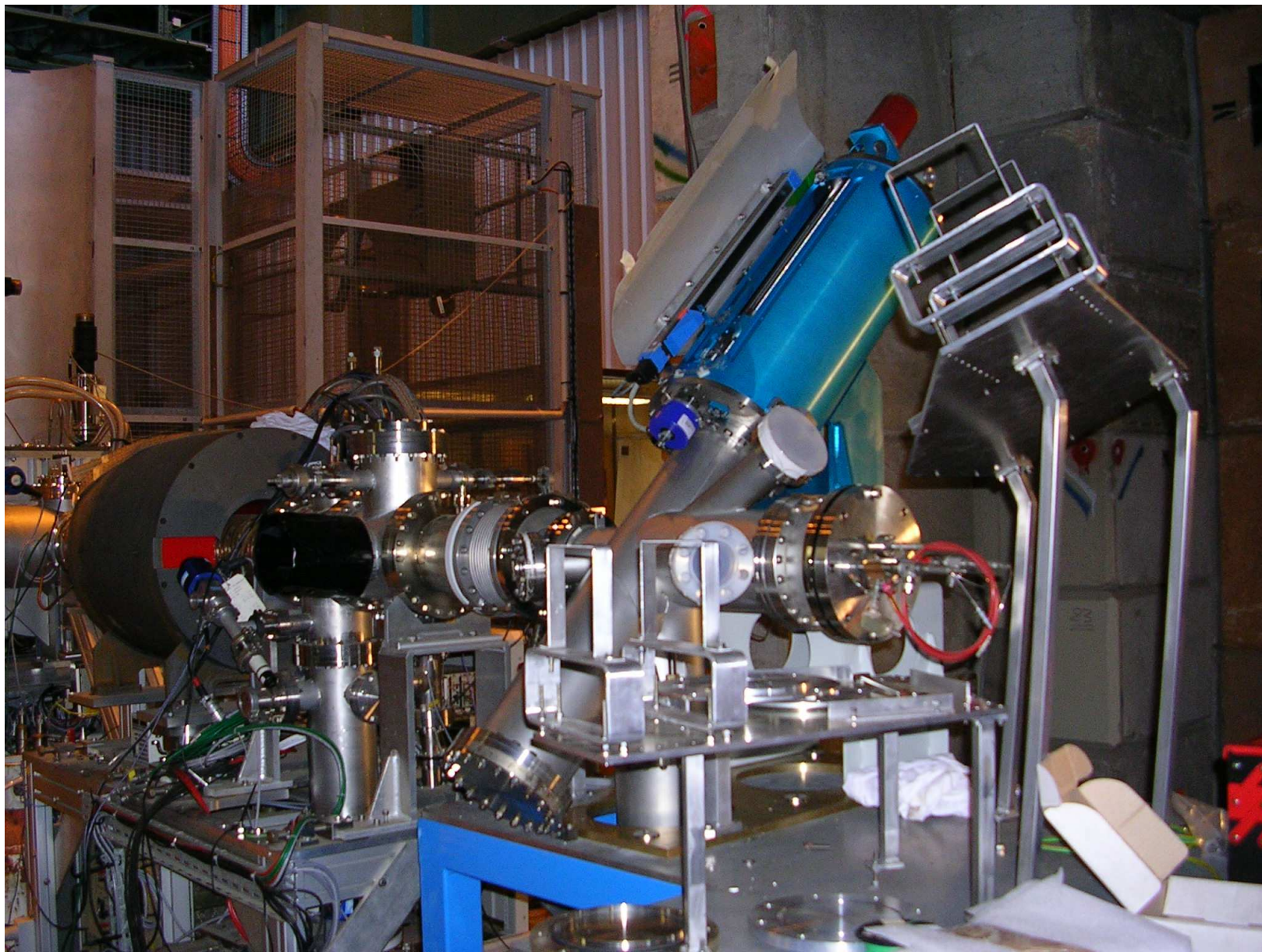
- Detection

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



Mouvement pendulaire du fil



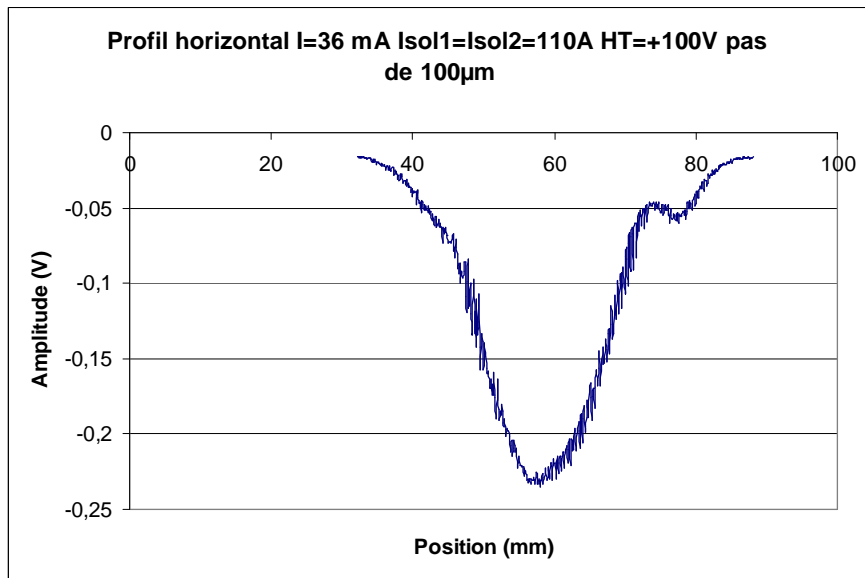
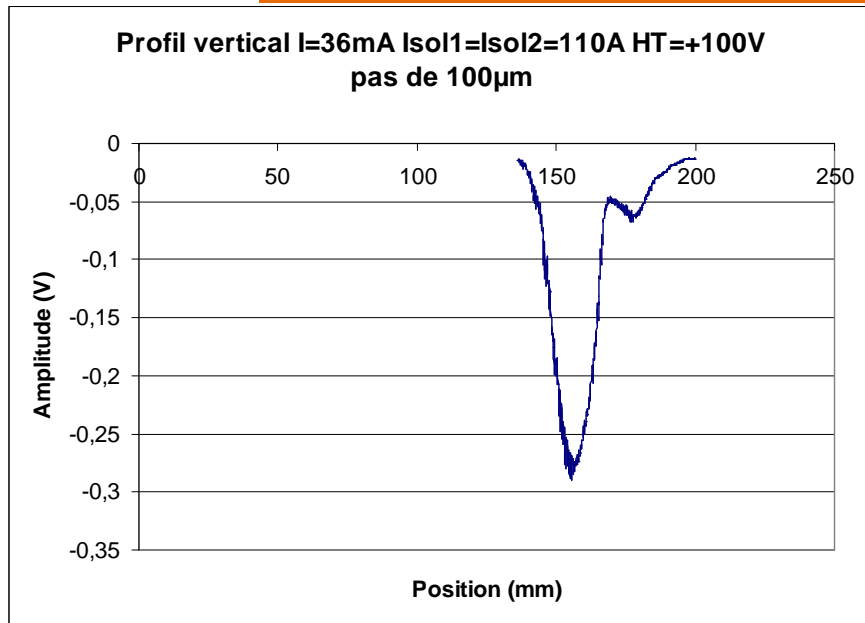


Montage fil carbone  
Diamètre 33 microns



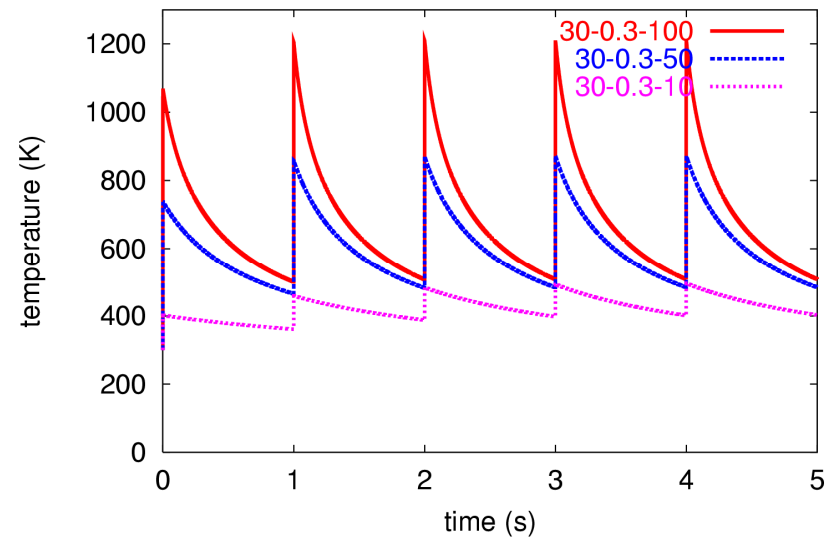
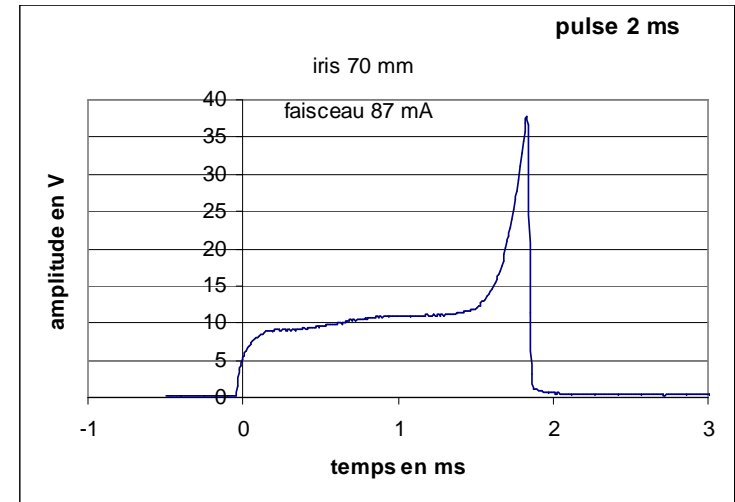


# Profileur



# Wire scanner à translation linéaire

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



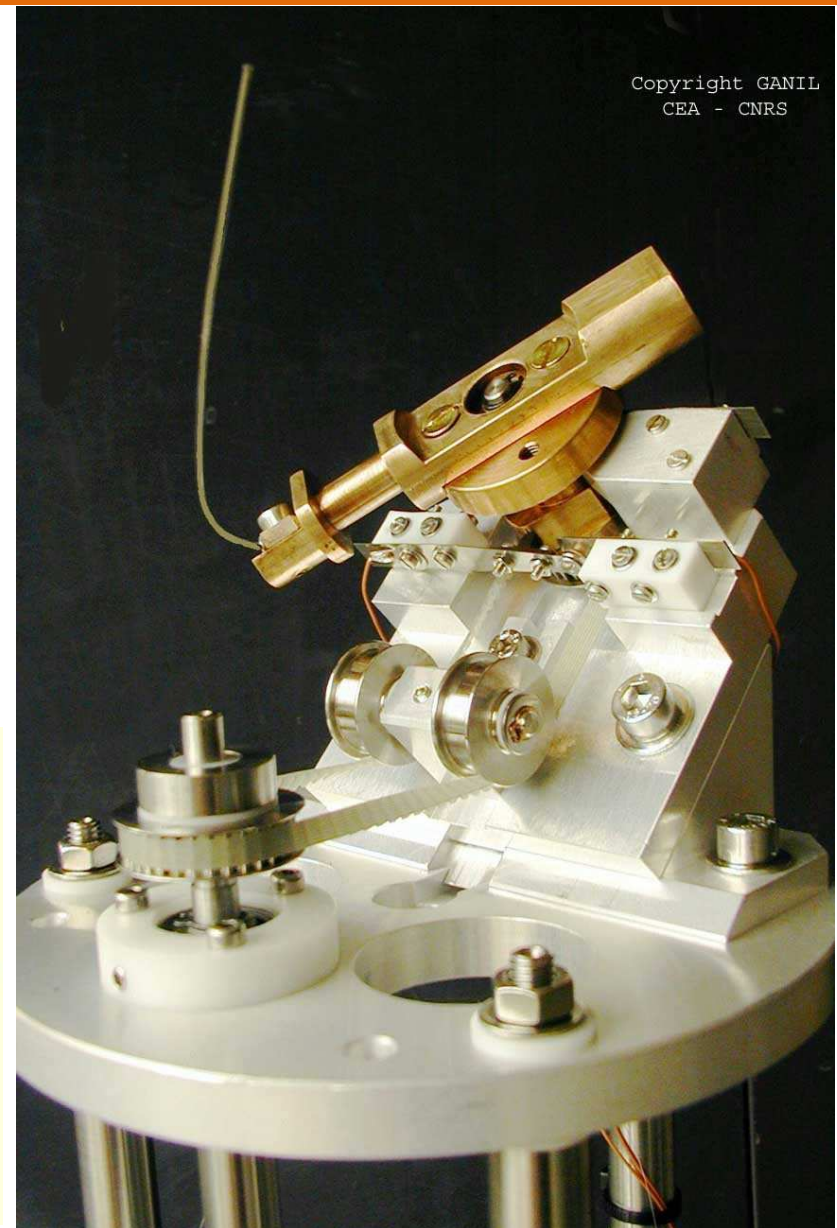
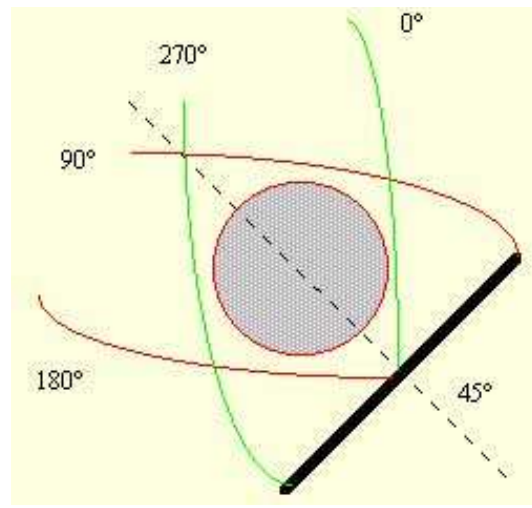
Utilisation : mesure du profil transverse du faisceau et de la position du centre de gravité

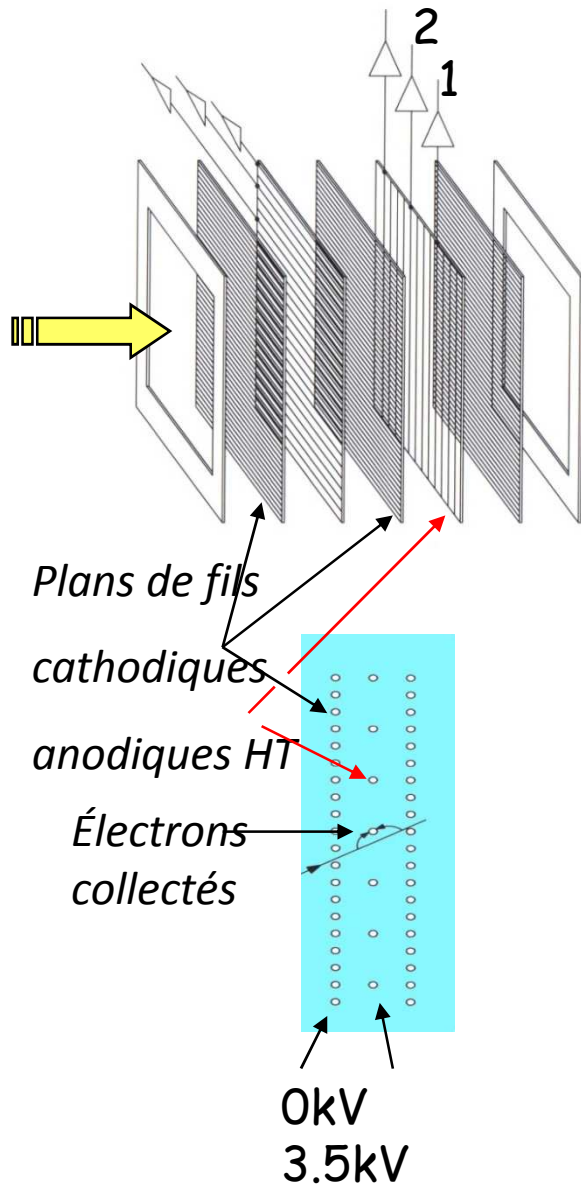
Principe :

- 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

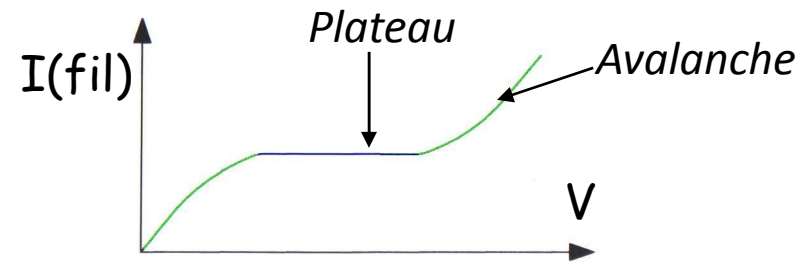
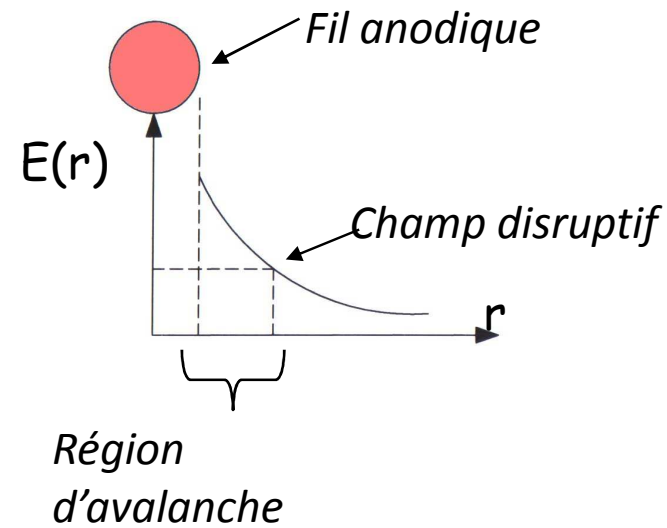
Performances :

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





# Détecteurs destructifs





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

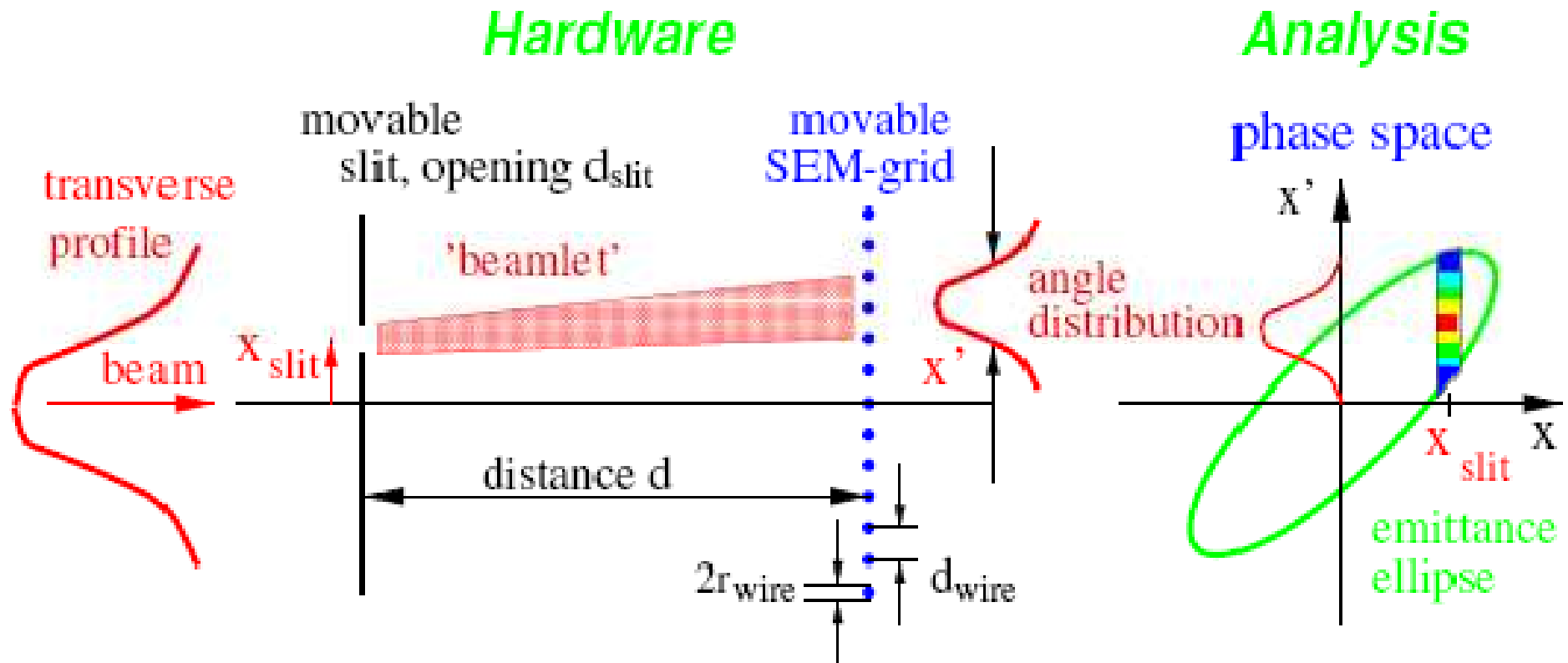
Principe :  
détection sur des plans de fils du courant électrique créé par la ionisation du gaz circulant dans la chambre

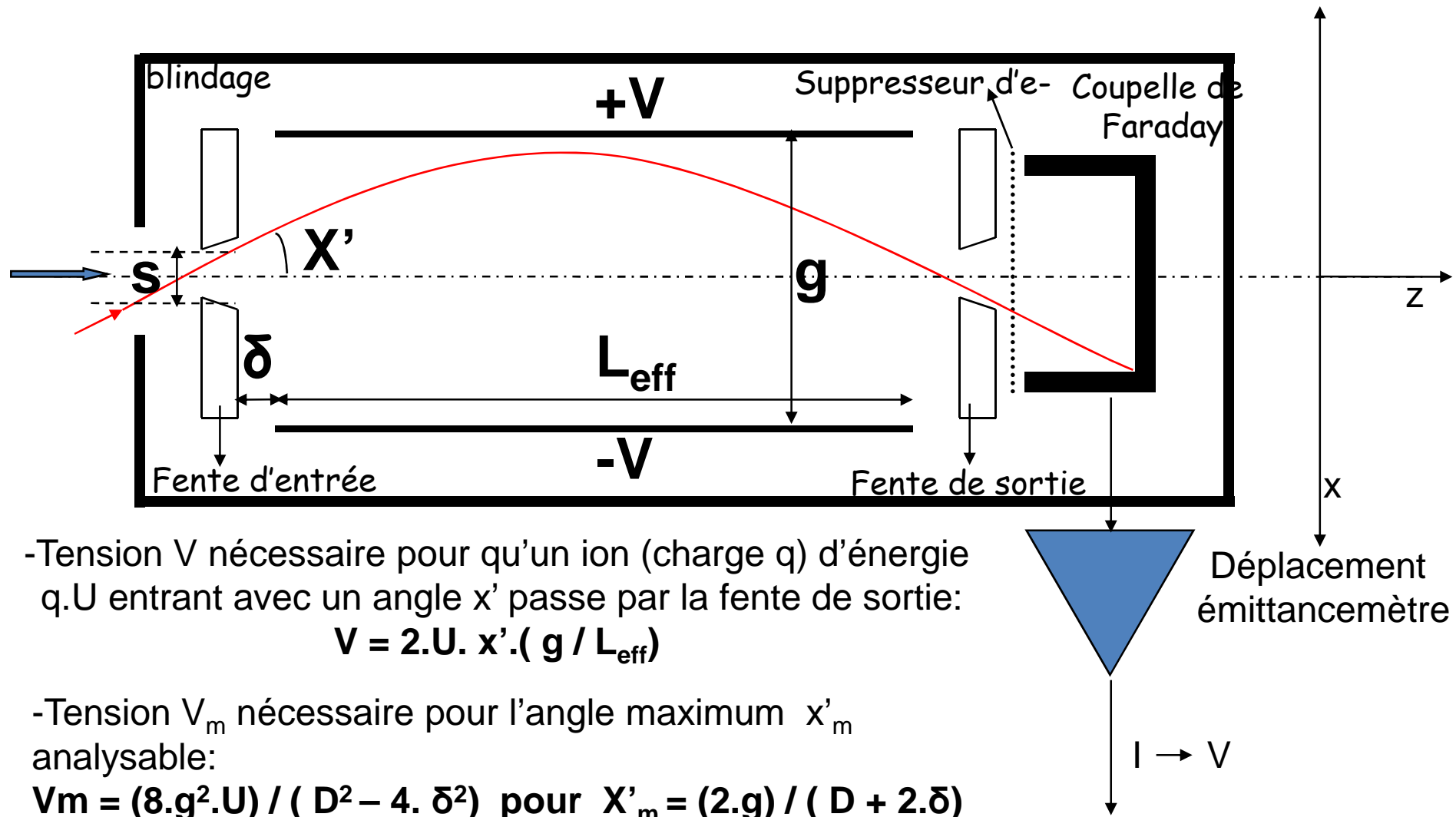
Performances :

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

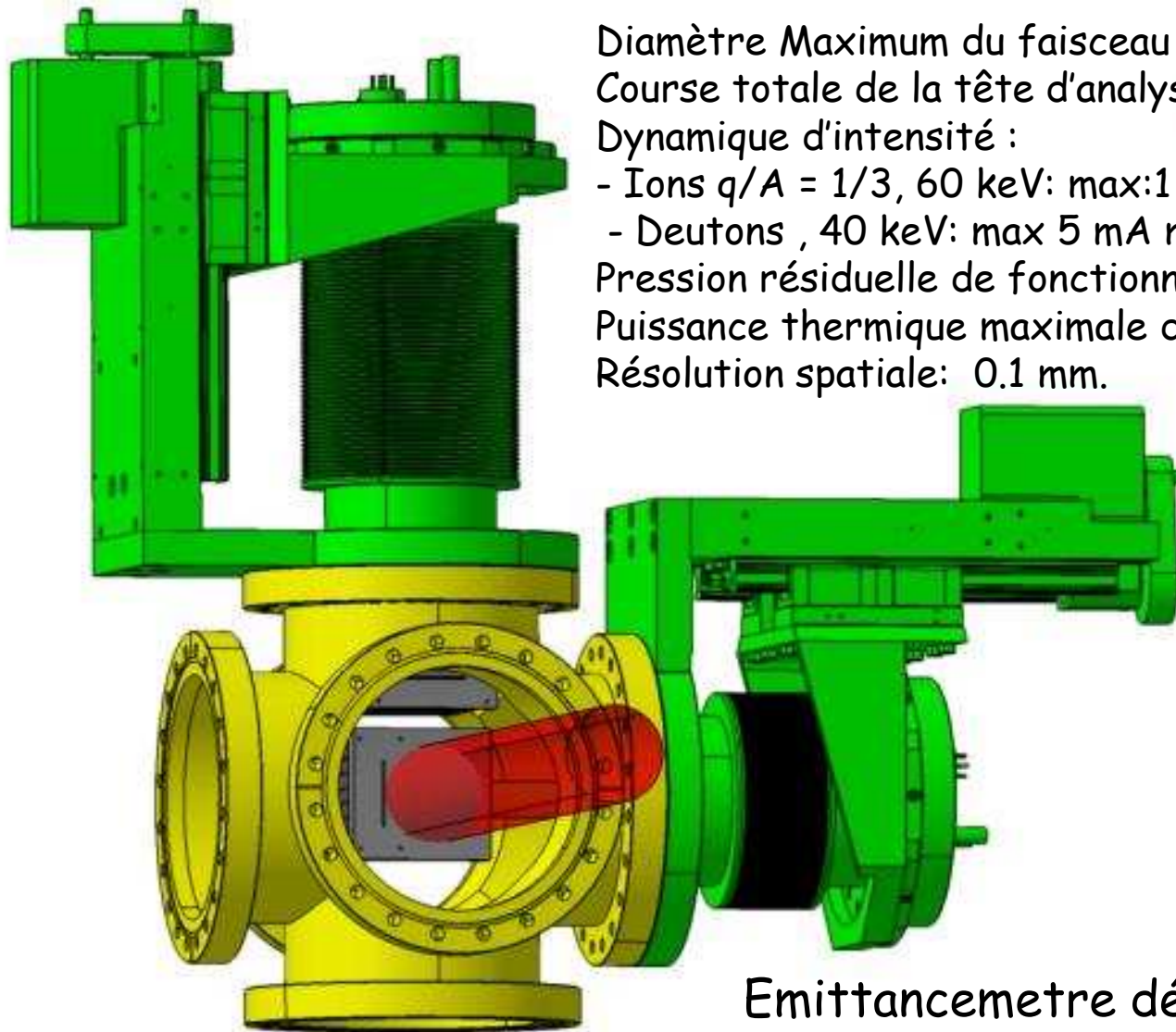


Copyright GANIL  
CEA - CNRS





# 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  $\mu A$

- Deutons , 40 keV: max 5 mA min.: 100  $\mu A$

Pression résiduelle de fonctionnement :  $1 \times 10^{-8}$  mbar.

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

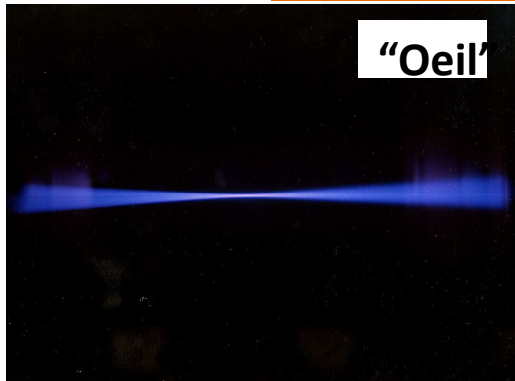
Résolution spatiale: 0.1 mm.

Emittancemetre développé pour SPIRAL2



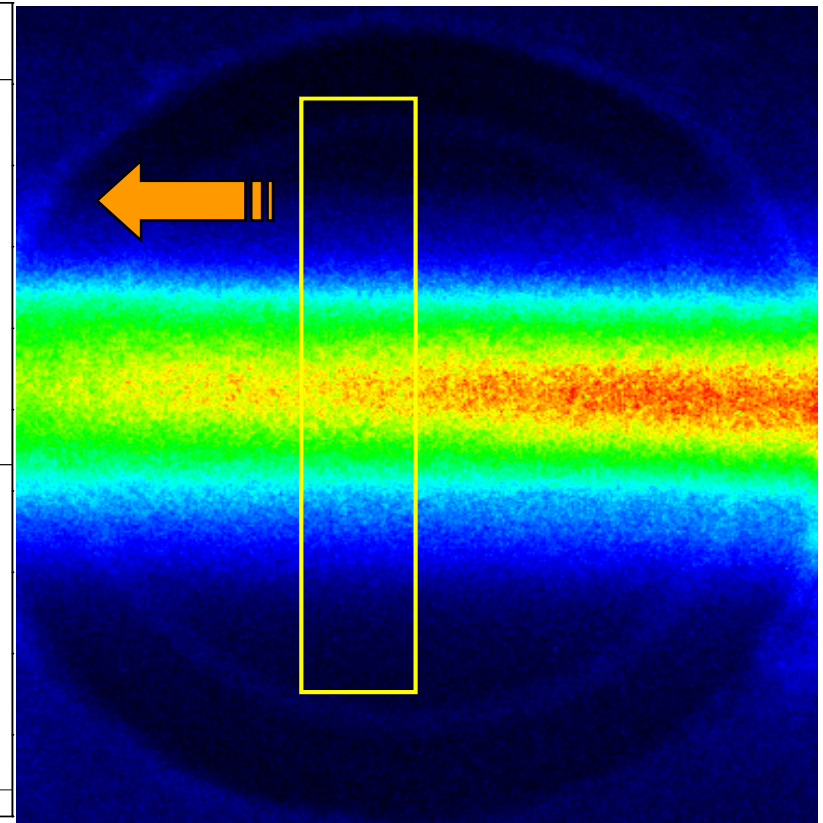
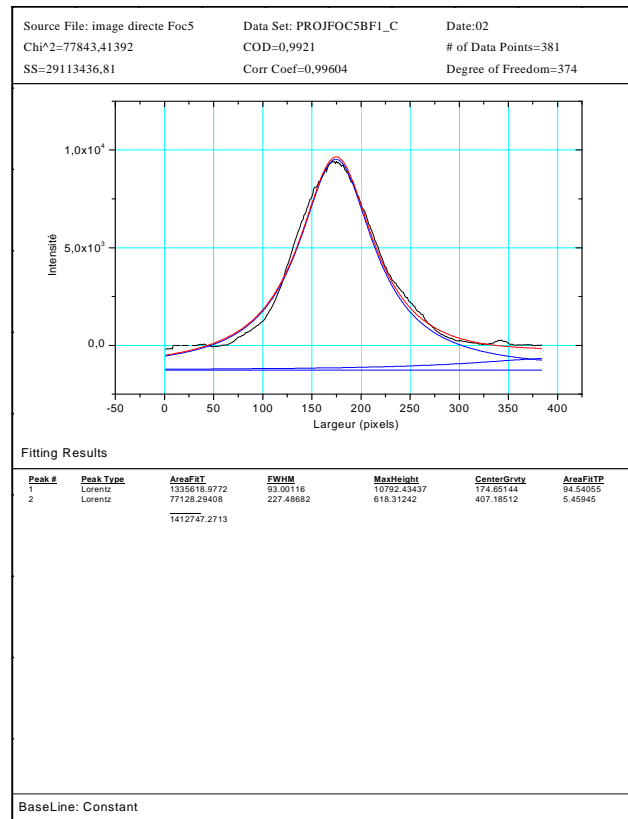


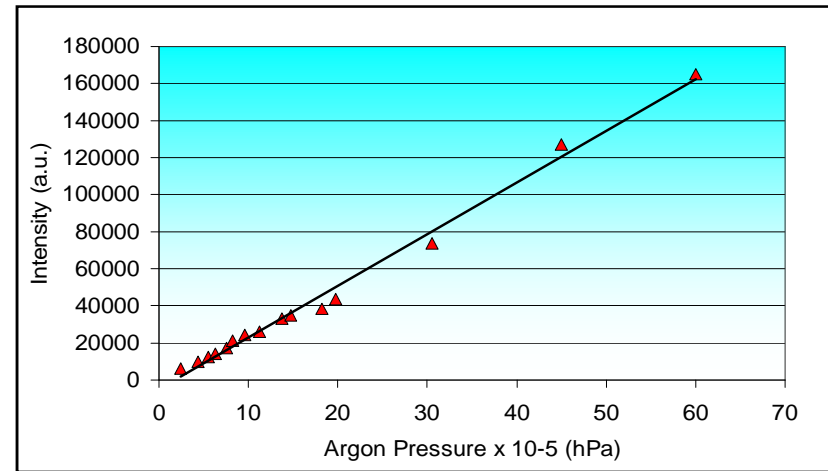
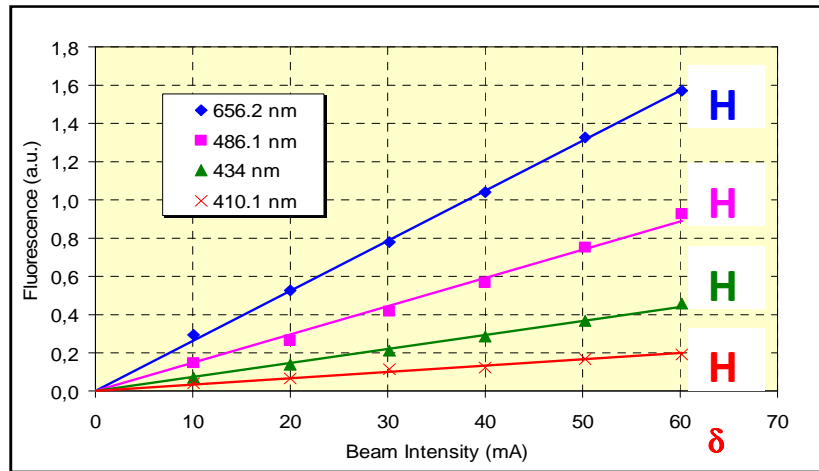
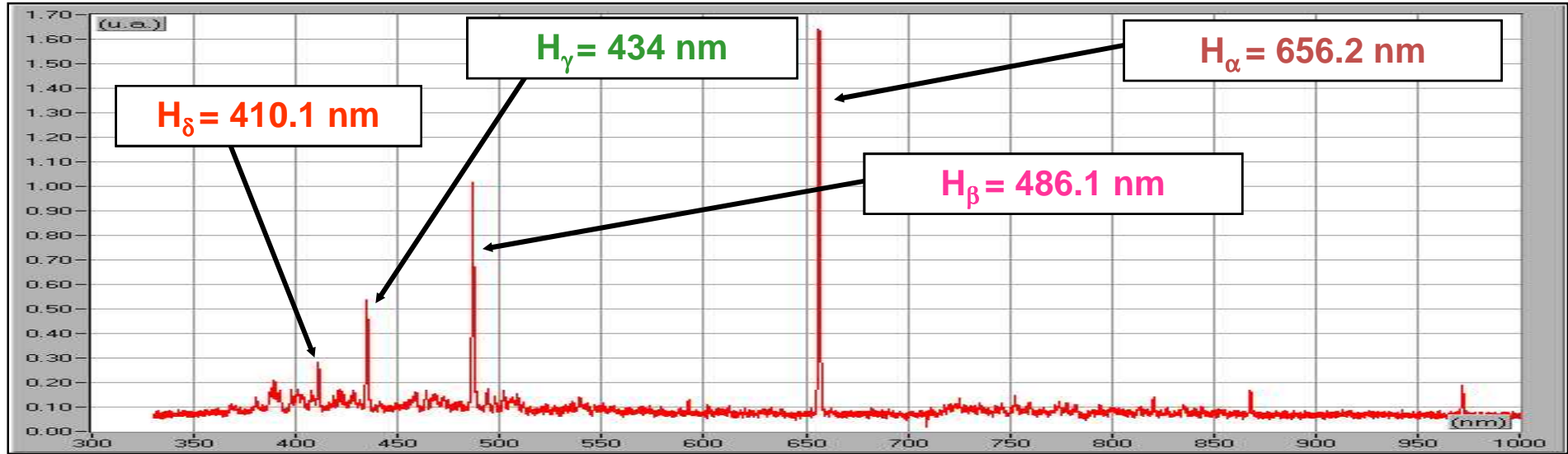


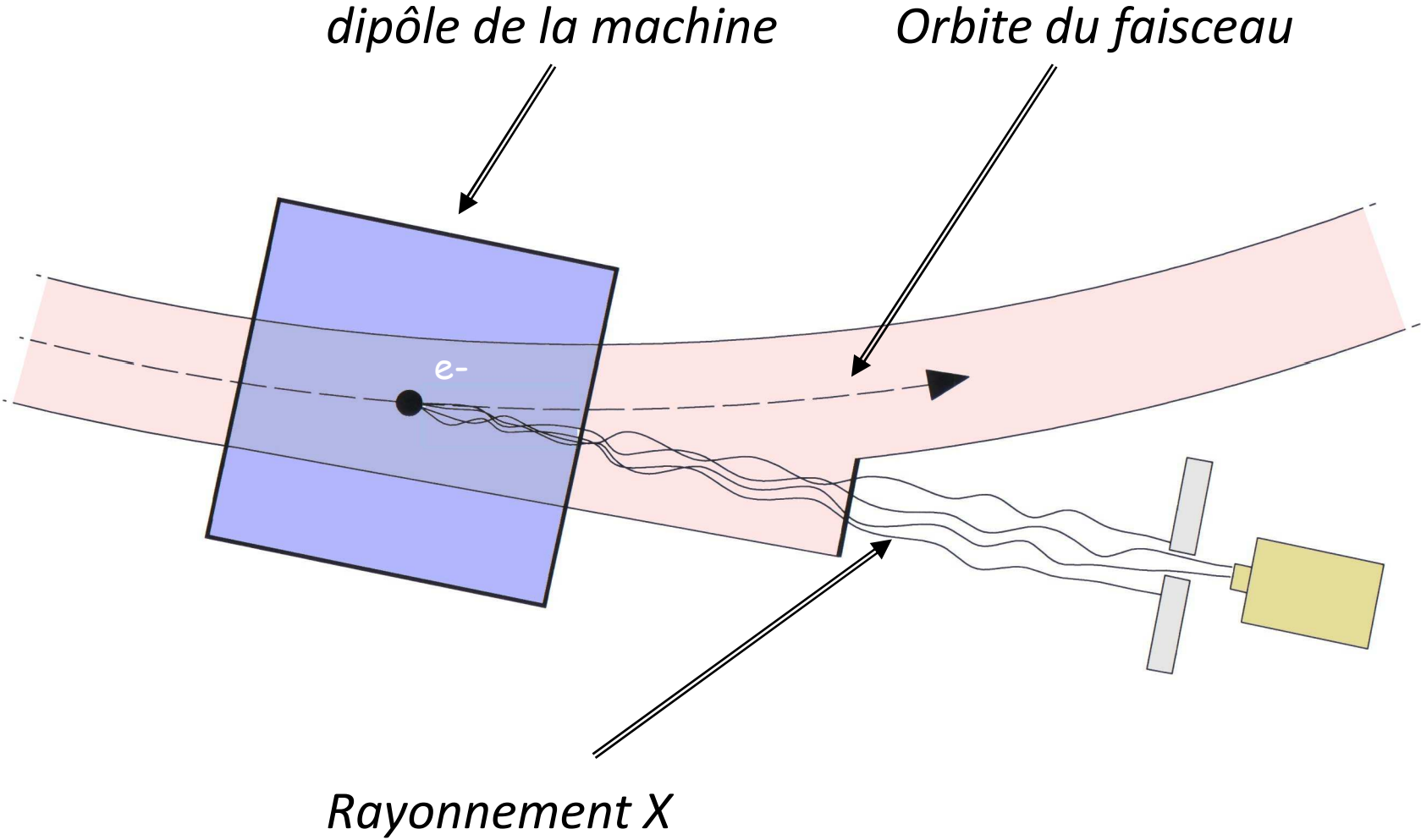


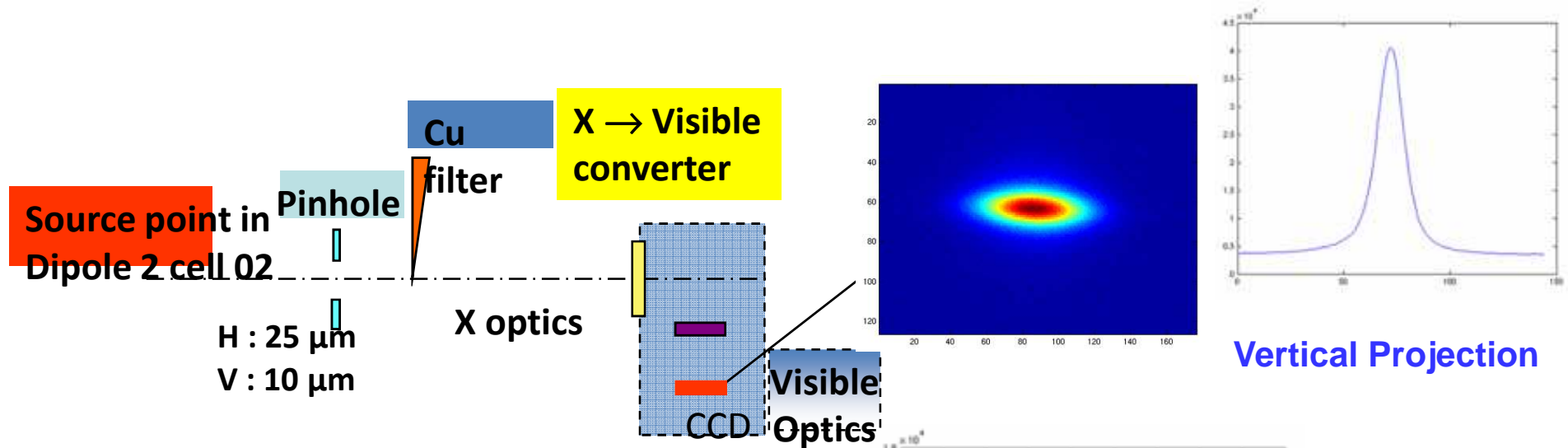
## Interaction: faisceau proton / gaz résiduel ( Hydrogène: $2 \cdot 10^{-3}$ Pa)

82 KeV  $2 \times 10^{-5}$  faisceau global









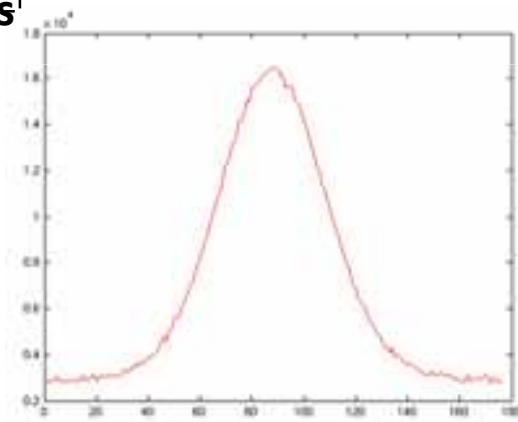
Resolution 5  $\mu\text{m}$  rms :

- trou de 10  $\mu\text{m}$
- 0.3 mm (Copper filter)
- includes 3.7  $\mu\text{m}$  CCD resolution

**9  $\mu\text{m}$  rms V. beam size including 5  $\mu\text{m}$  instrument resolution**

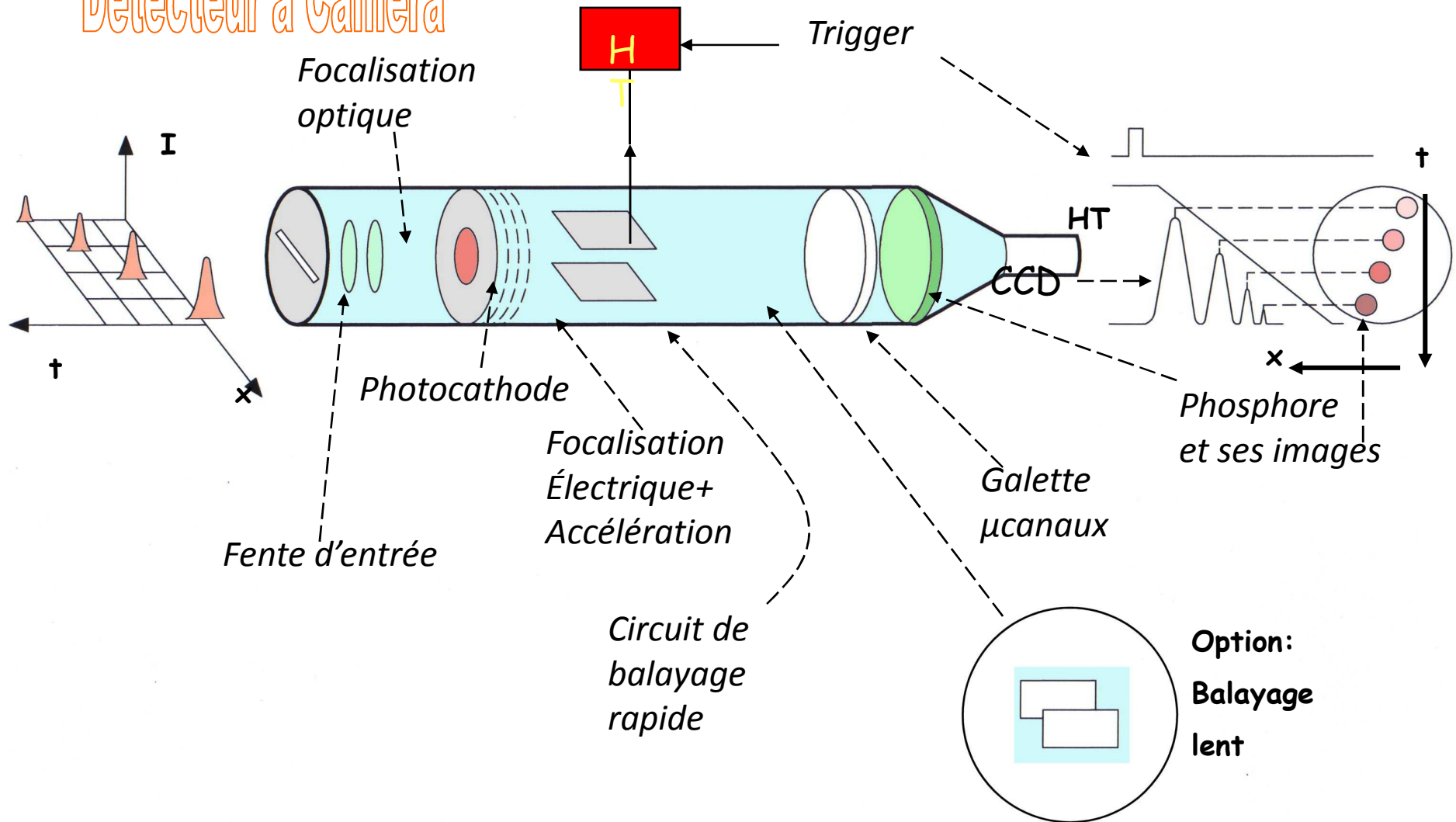
**$\epsilon_z < 5 \text{ pm.rad}$  ( $\kappa < 0.13 \%$ )**

**@200 mA with Fast Transverse Feedback turned on**



# Principe d'une Caméra à Balayage de Fente

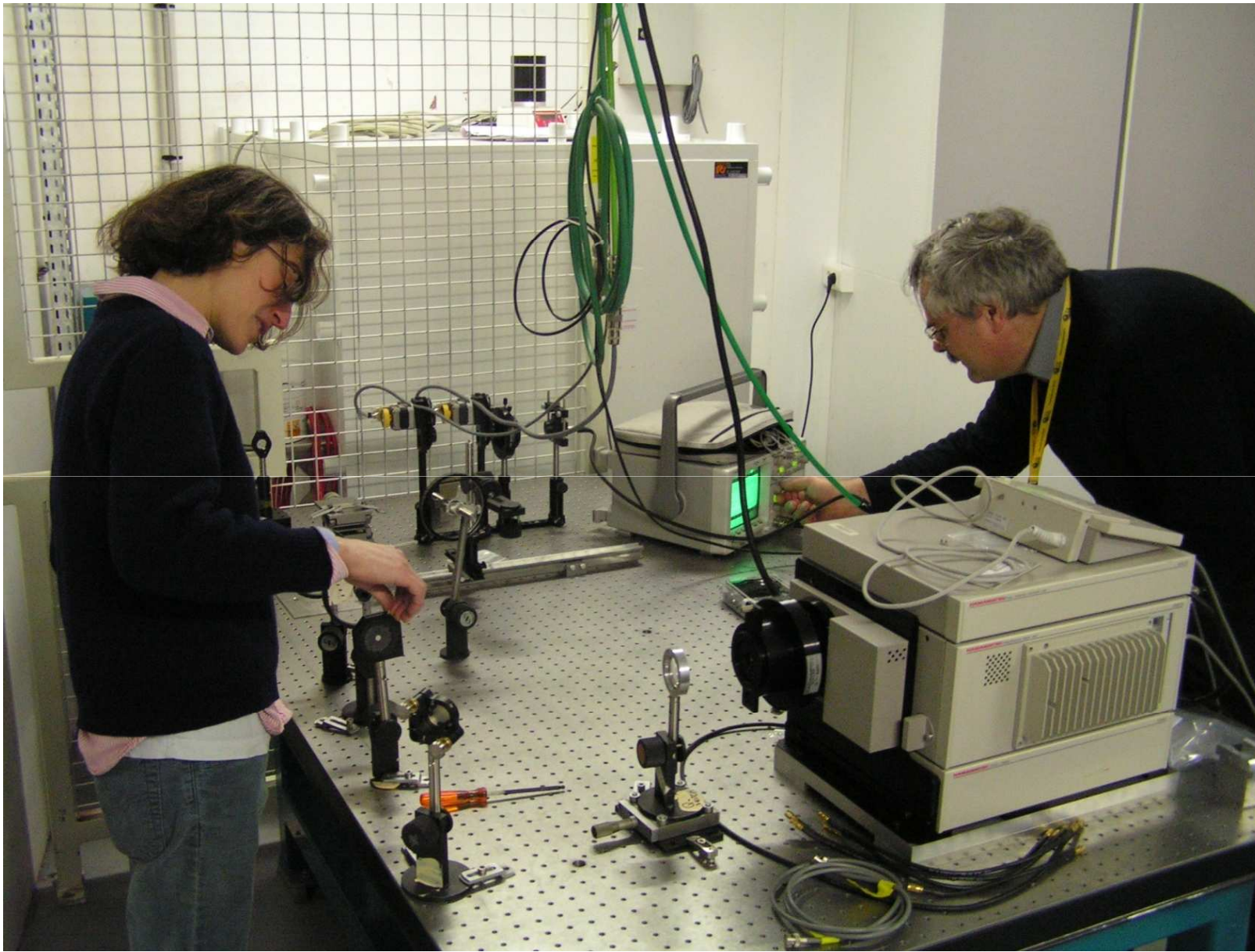
## Détecteur à Caméra





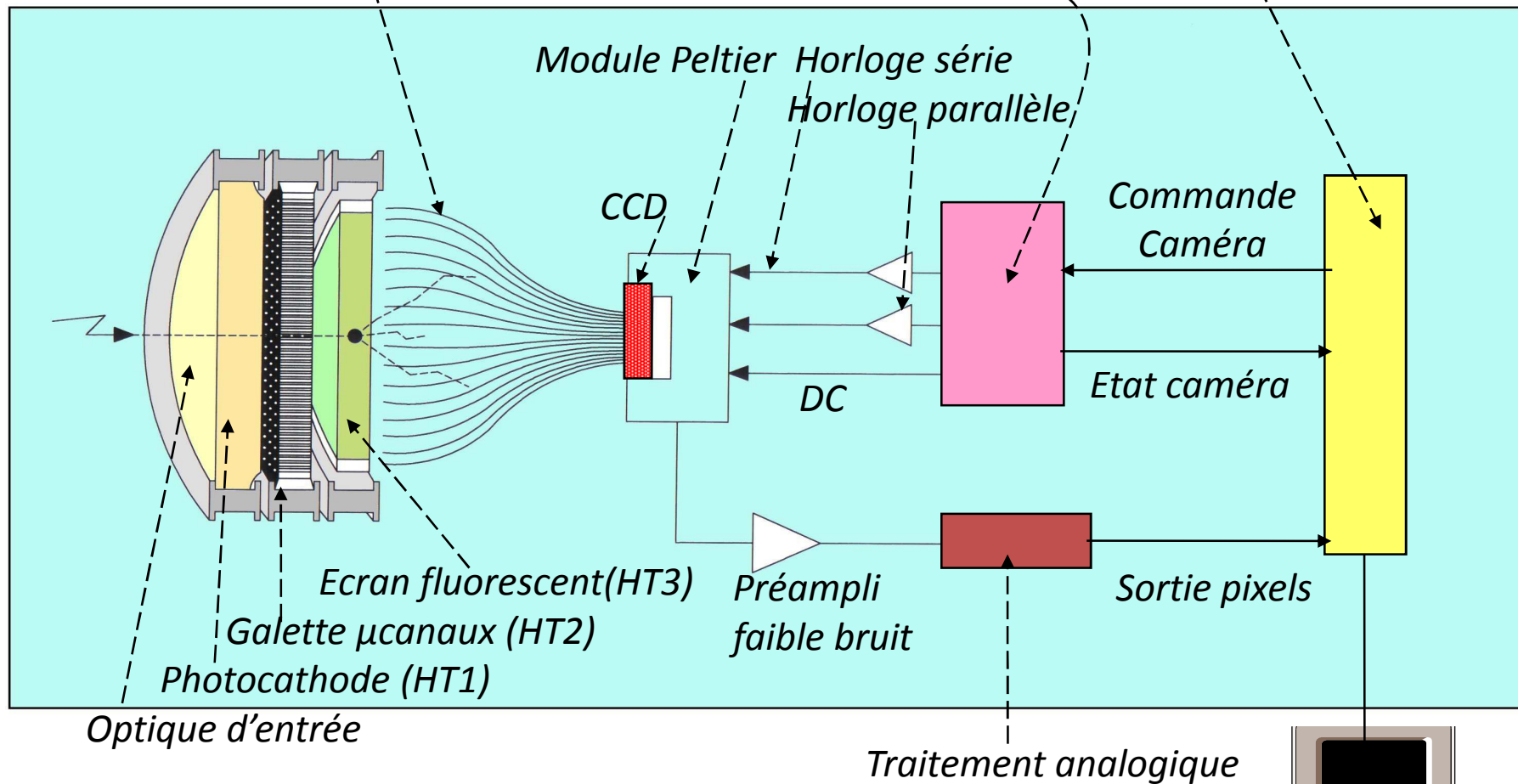
# Caméra à Balayage de Fente

---

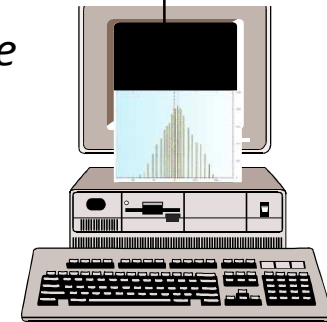


# Principe d'une Caméra CCD Intensifiée refroidie

Couplage par fibres optiques    Contrôle et Gestion caméra    Interface PC



Détecteur à Caméra



### ROLE DES DETECTEURS DE PERTES DE FAISCEAU

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

### EFFETS DES RADIATIONS IONISANTES

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

### SOURCE DE RADIATIONS IONISANTES

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

### PRINCIPE DE LA DETECTION

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

### TYPES DE PERTE DE FAISCEAU

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



### PLICs: PANOFSKY LONG IONISATION CHAMBERS

SLAC 1966:

- Câble coaxial RG-319 /U rempli avec Ar/CO<sub>2</sub>, 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 cm<sup>3</sup> . ( Temps de montée : 10ns, dynamique: 10<sup>5</sup> ). Sensibilité meilleure que les chambres à ionisation mais technologie liée à l'utilisation des P.M.: alimentations stabilisées , intercalibration des moniteurs nécessaire.

### SOLID STATE ION CHAMBERS ( PIN Diodes)

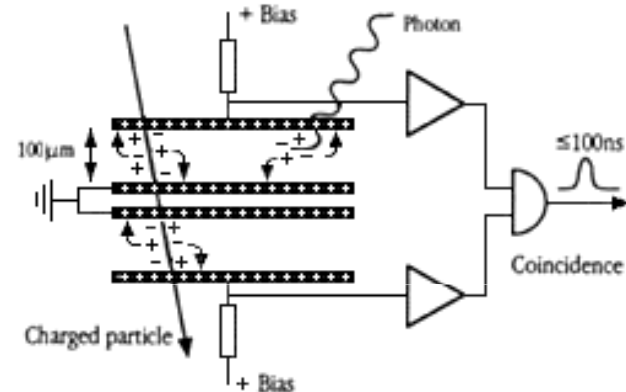
- Chambre à ionisation à l'état solide : diode PIN polarisée en inverse
- Surface sensible:  $100 \text{ mm}^2$  , zone déplétion: 100 à 300  $\mu\text{m}$  (Siemens, HAMAMATSU)
- Amélioration : 2 diodes montées en coïncidence

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)

Operating principle



### CRYOGENIC MICROCALORIMETERS

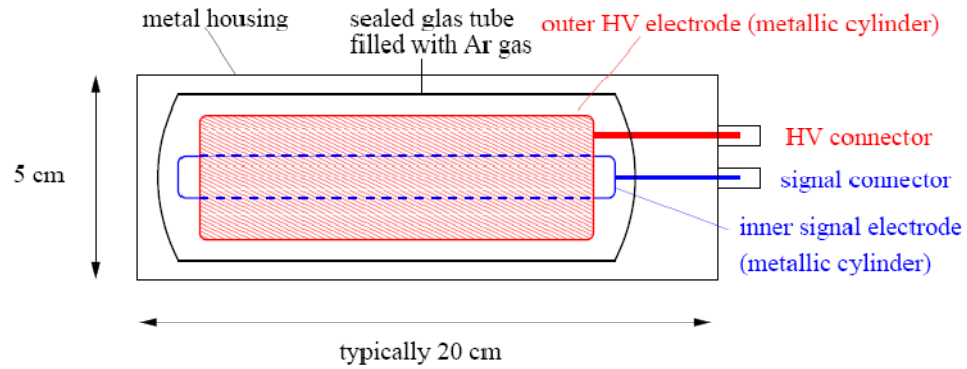
- LEP/ CERN 1992: Un thermomètre ( résistance carbone) mesure l'élévation de température d'un « mini- cryostat » contenant de l'hélium liquide chauffé par les pertes de faisceau ( pas de création de charges électriques par les particules perdue

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

# Exemples de moniteurs de perte de faisceau

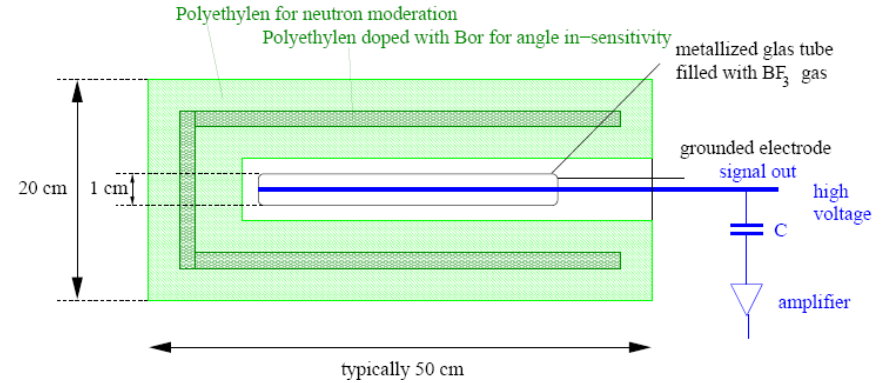
## Ionization chamber

Measurement of charged particles *only*.

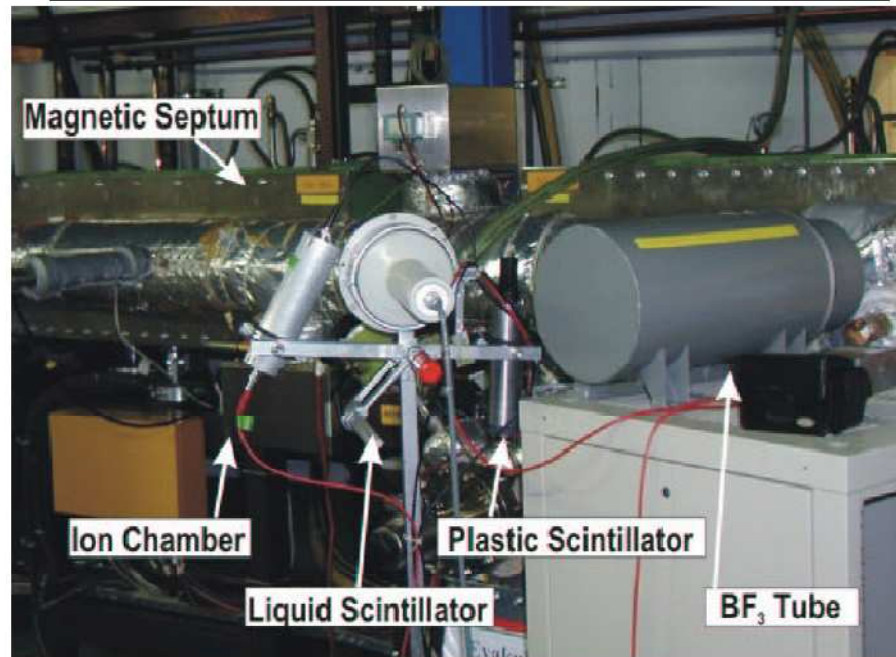


## BF<sub>3</sub> proportional tube

Measurement of neutrons *only*.



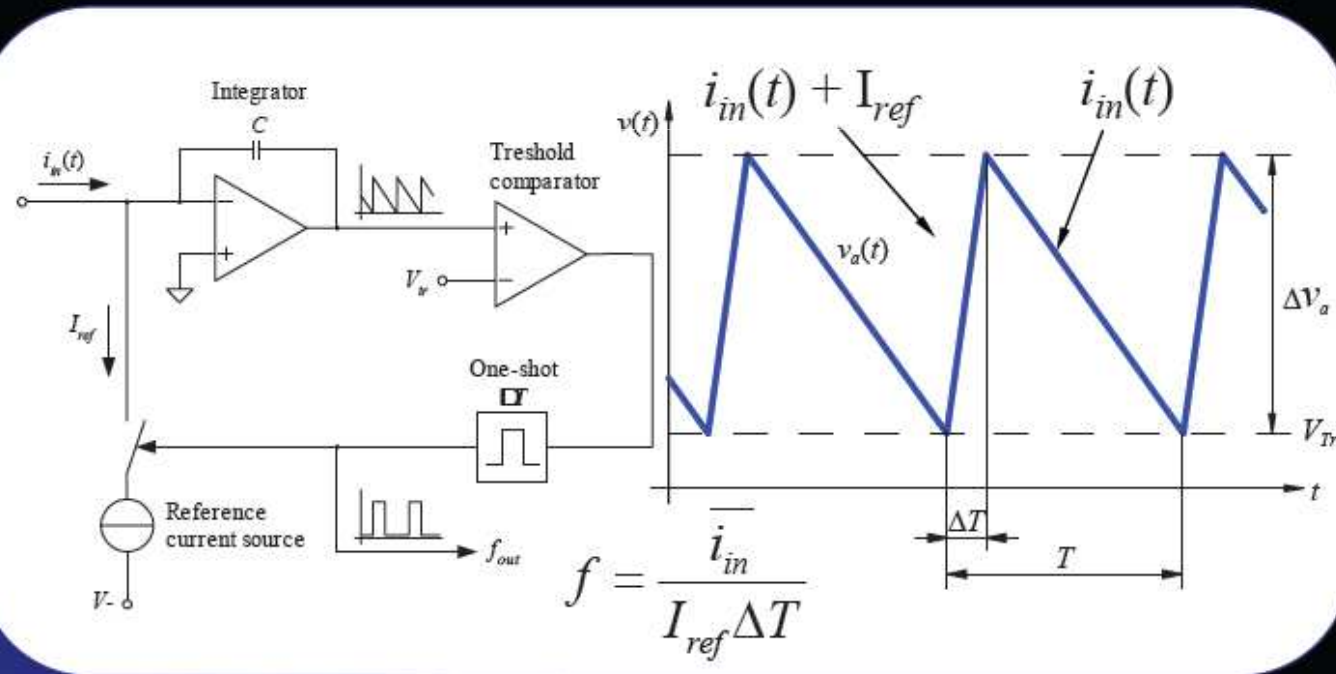
## Different beam loss detectors at the GSI-synchrotron





# Beam Loss Detectors

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



LHC



# Evolution des salles de commande

A  
G  
S



A  
G  
S

A  
G  
S



S  
N  
S





## Références bibliographiques

---

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

---

**Ce fut un plaisir!**  
**Merci de votre**  
**courageuse**  
**attention!!**



---

# Annexes

---

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

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

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

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

$\beta$  et  $\gamma$ : *facteurs relativistes usuels*

$N$ : *Nombre d'Avogadro = 6.022 1415 · 10<sup>23</sup>*

$z$ : *Etat de charge de la particule incidente*

$A$ : *masse atomique du milieu absorbeur en g.mol<sup>-1</sup>*

$dx$  : *densité surfacique du milieu en g.cm<sup>2</sup>*

$m_e \cdot c^2$ : *masse de l'électron. c<sup>2</sup> = 0.510 998 918 MeV*

$Z$ : *nombre atomique de l'absorbeur*

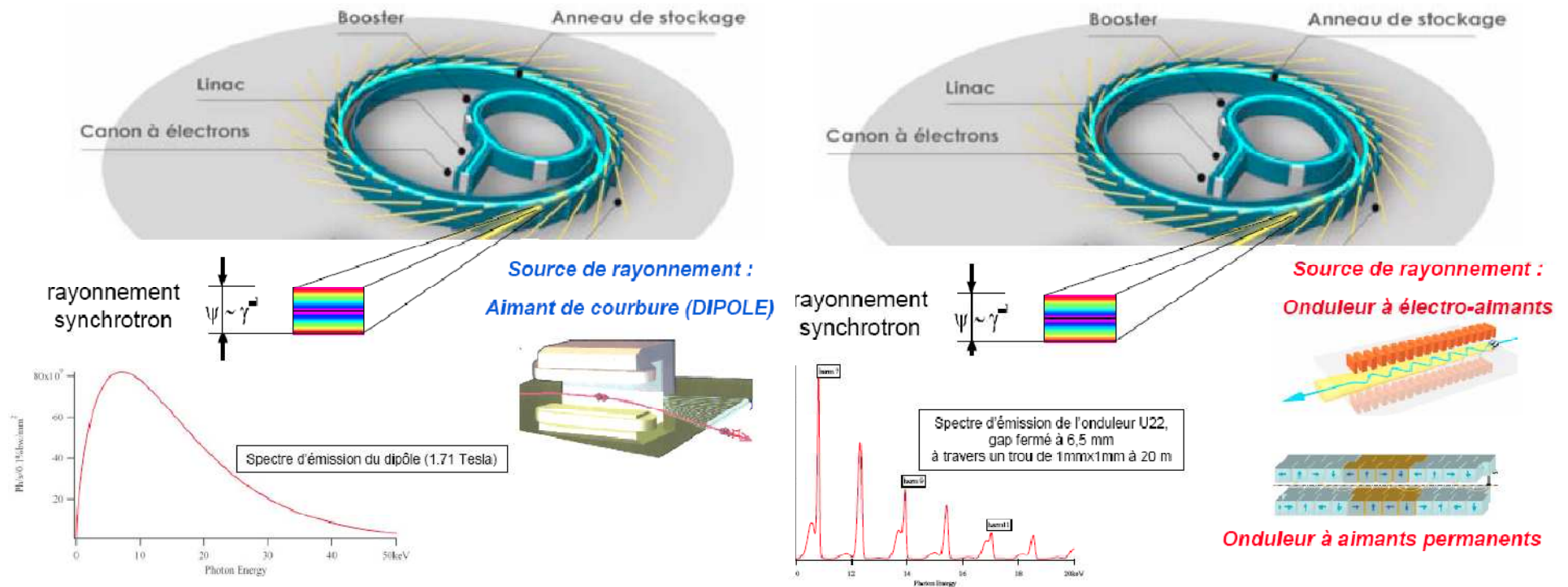
$$\frac{dE}{dx} : \frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}}$$

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

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



**Les accélérateurs  
et lignes de lumières**



## Anneau de stockage:

Circonférence: 354,1m  
 Energie: 2,75 GeV  
 Fréquence : 0,846 MHz  
 I faisceau= 500 mA

## Anneau booster:

Circonférence: 157m

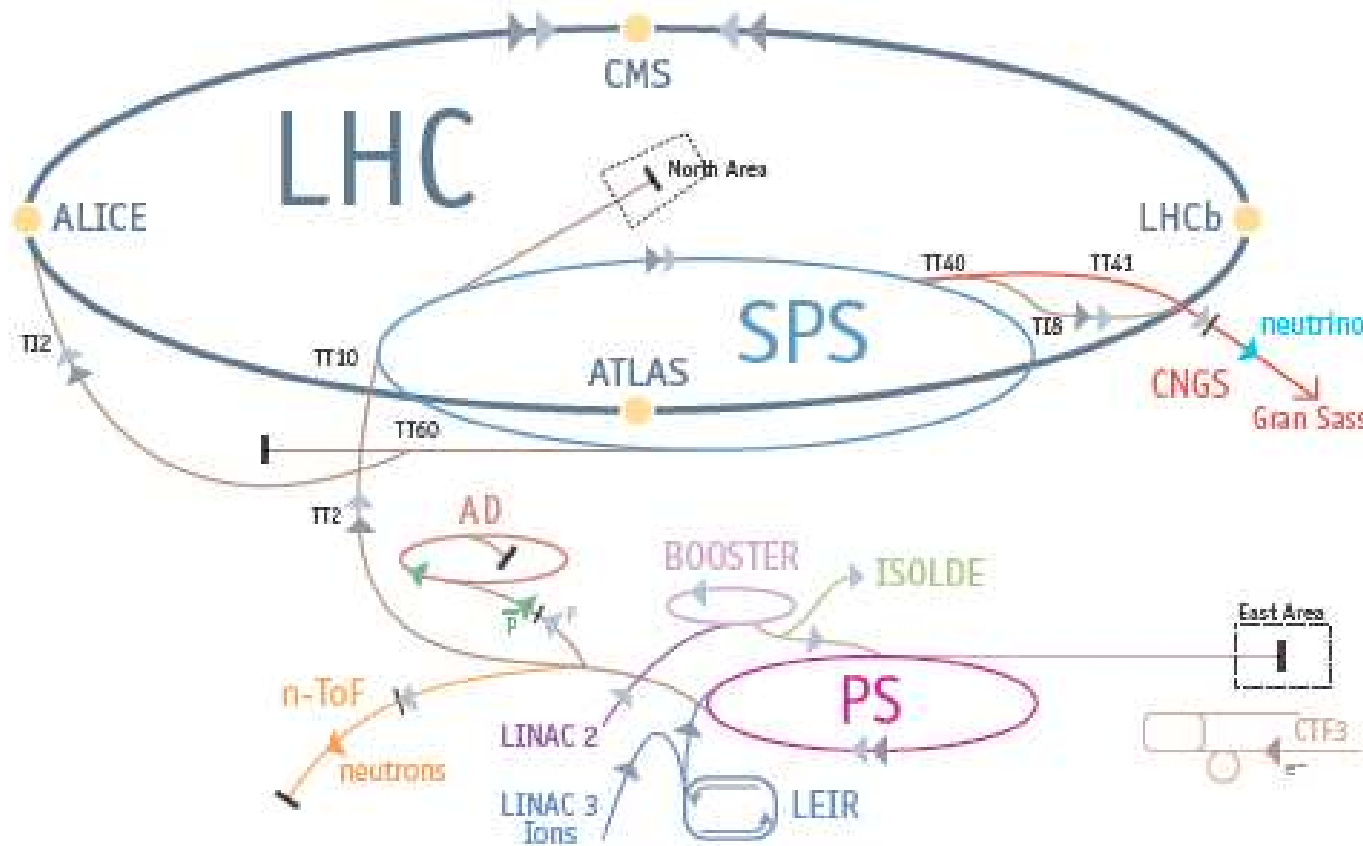
## LINAC:

500 mA dans 416 bunch  
 100 mA dans 8 bunch

## Ligne de lumière:

43 lignes possibles:  
 11 en operation: oct 2007  
 21 lignes sur onduleur





**LHC:**  
 protons 7 TeV  
 Pb 54+: 2,76 TeV / A

**SPS: 450 GeV**

**P.S. : 24 GeV**

**BOOSTER: 1,4 GeV**

- 1232 dipoles principaux cryogéniques: 1,9°K; 8,33 T max; 11700 A. - 392 Qpôles
- Energie stockée dans les aimants: 11 GJ
- 8 cavités supra ( 4,5°K) RF par faisceau. Champ 5 M V/m . 400 MHz
- Durée de remplissage: 4'20'' par anneau. Durée accélération: 20'. Durée vie: 10 h
- Faisceau: 2808 bunches x  $1,1 \cdot 10^{11}$  p/bunch - 25 ns entre bunch - Energie: 350 MJ
- **Luminosité:  $10^{34}$  cm<sup>-2</sup>.s<sup>-1</sup>. -  $600 \cdot 10^6$  collisions par seconde**

## LHC General Parameters

Energy at collision	7	TeV
Energy at injection	450	GeV
Dipole field at 7 TeV	<a href="#">8.33</a>	T
Coil inner diameter	56	mm
Distance between aperture axes (1.9 K)	194	mm
Luminosity	1	E34 cm <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>
Beam beam parameter	<a href="#">3.6</a>	E-3
DC beam current	<a href="#">0.56</a>	A
Bunch spacing	7.48	m
Bunch separation	24.95	ns
Number of particles per bunch	<a href="#">1.1</a>	E11
Normalized transverse emittance (r.m.s.)	3.75	μm
Total crossing angle	300	μrad
Luminosity lifetime	10	h
Energy loss per turn	<a href="#">7</a>	keV
Critical photon energy	44.1	eV
Total radiated power per beam	<a href="#">3.8</a>	kW
Stored energy per beam	<a href="#">350</a>	MJ
Filling time per ring	<a href="#">4.3</a>	min