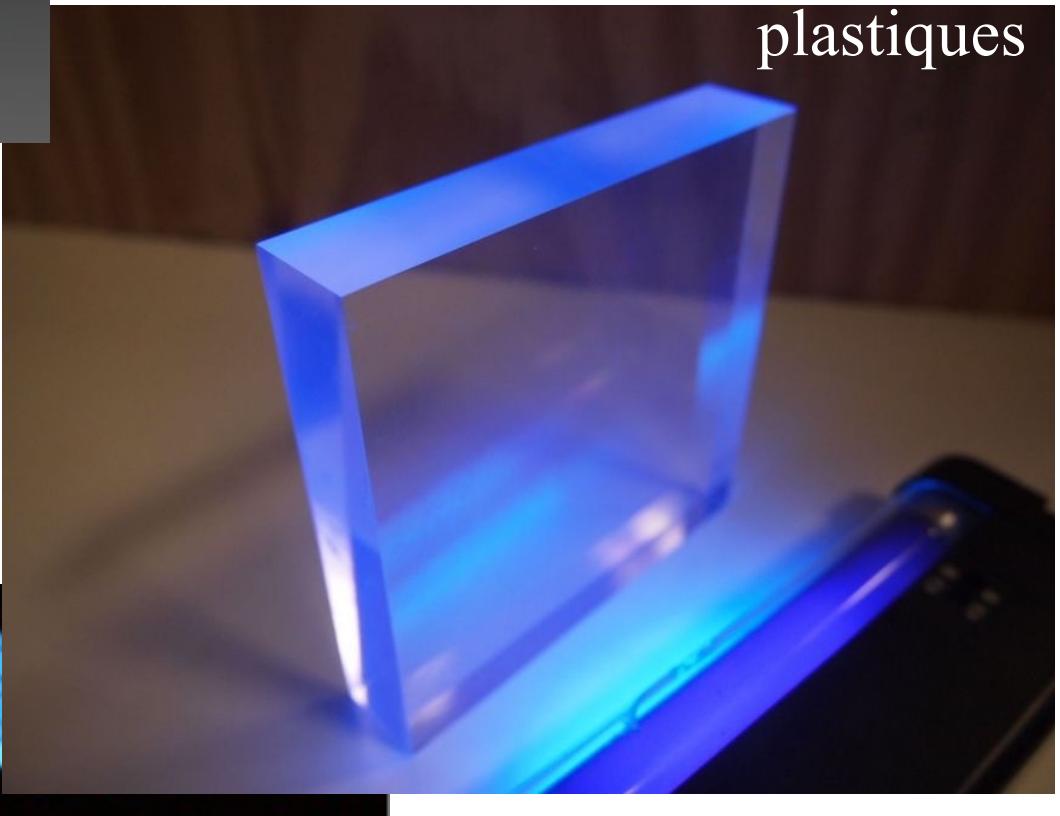
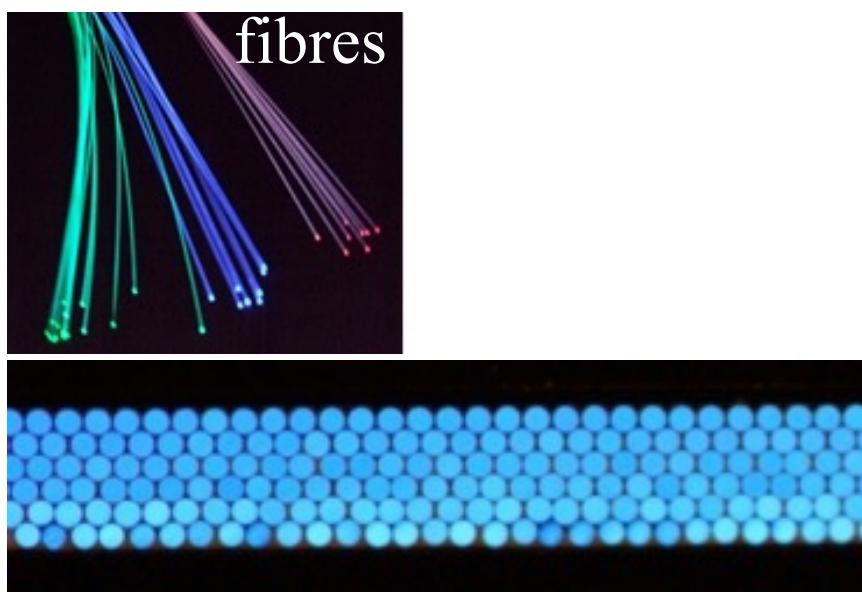
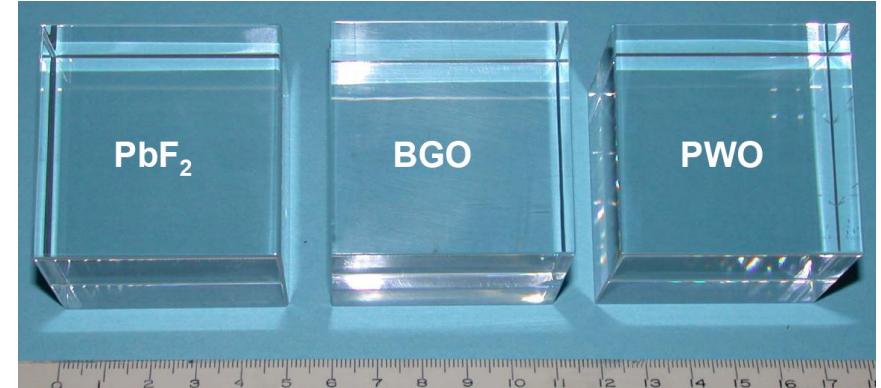


Scintillateurs

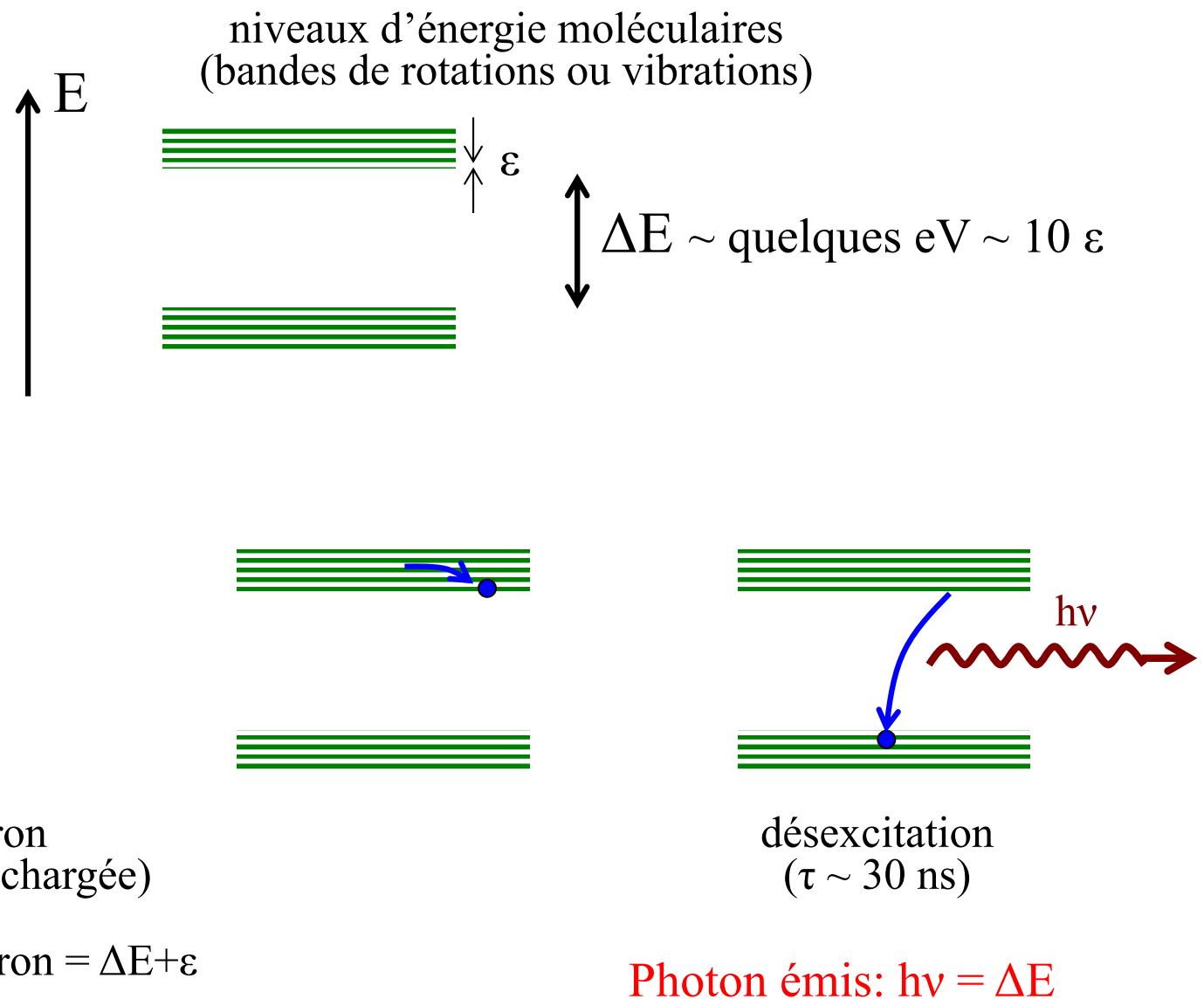


Cristaux scintillants (inorganiques)

- Exemples:
 - NaI(Tl)
 - CsI(Tl)
 - LiI(Eu)
 - BaF₂(Eu)
- niveaux d'énergie atomiques
-
- bande de conduction (vide)
- niveau métastable (piège)
- bande de valence (pleine)
- ΔE
- excitation d'un électron
(au passage de la particule chargée)
- piégeage
- désexcitation
($\tau \sim 200\text{--}1000\text{ ns}$)
- Photon émis: $h\nu < \Delta E \rightarrow$ ne peut pas être réabsorbé
 $h\nu \sim 3\text{ eV}$ pour NaI

Scintillateurs organiques

- Exemples:
 - anthracène
 - stilbène
 - plastiques
 - solutions organiques



→ énergie transmise à l'électron = $\Delta E + \varepsilon$

Photon émis: $h\nu = \Delta E$

Scintillateurs

Scintillateur		η (rel)	τ ns	λ nm
Anthracène		100	30	447
Plastic	NE 102	65	2.4	423
	NE 111	55	1.6	370
Liquide	NE 220	65	3.8	425
	NE 311	65	3.8	425
	NE 313	62	4.0	425
Cristaux	NaI(Tl)	230	230	413 → $h\nu = 3.0 \text{ eV}$
	CsI(Tl)	95	1100	580
	BaF ₂ (Eu)	110	1000	435
	BGO	35	300	480

organique

inorganique

$$E = pc = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = 2\pi \frac{\hbar c}{\lambda}$$

$$\hbar c = 197 \text{ MeV fm} = 197 \text{ eV nm}$$

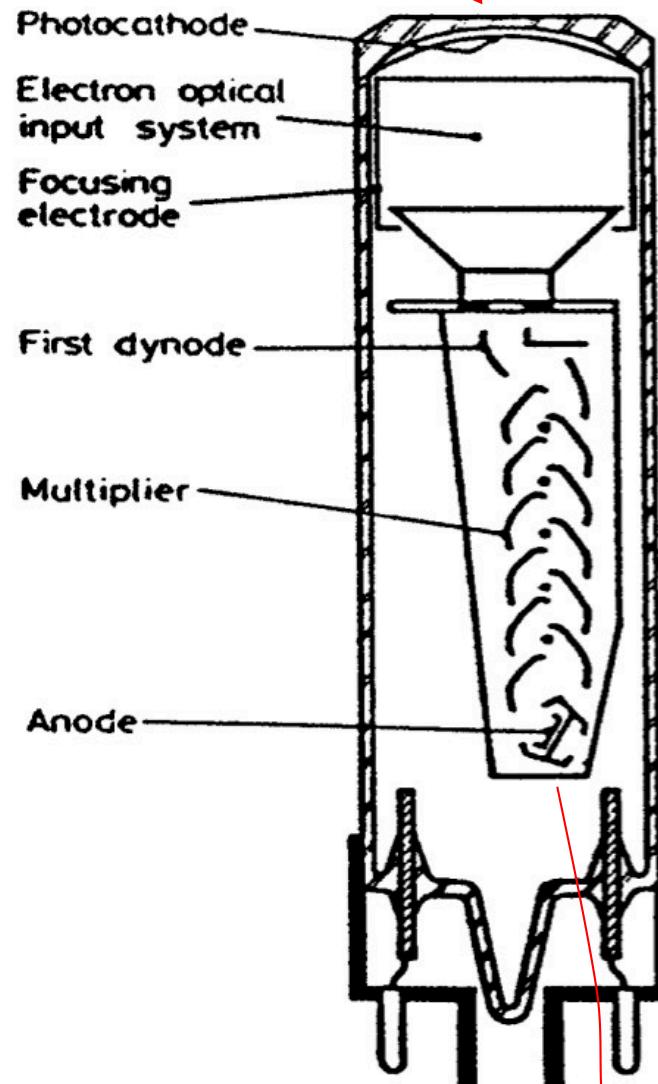
η = rendement de scintillation

τ = durée de vie moyenne des niveaux excités

λ = longueur d'onde au maximum du spectre d'émission

γ

Photomultiplicateur



$\varepsilon = \text{efficacité quantique (15--25\%)}$

$\Delta V \sim 1 \text{ kV}$

$$q = \int_0^\infty i(t) dt = N^{\text{photons}} f \varepsilon G e$$

$f = \text{facteur de collection lumineuse}$

$G = \text{gain photomultiplicateur} \sim 10^7$

$$\text{courant } i(t) = q \exp(-t/\tau)/\tau$$

DéTECTEURS d'IONISATION à gaz

- Condensateur cylindrique rempli d'un gaz isolant:

- champ électrique:

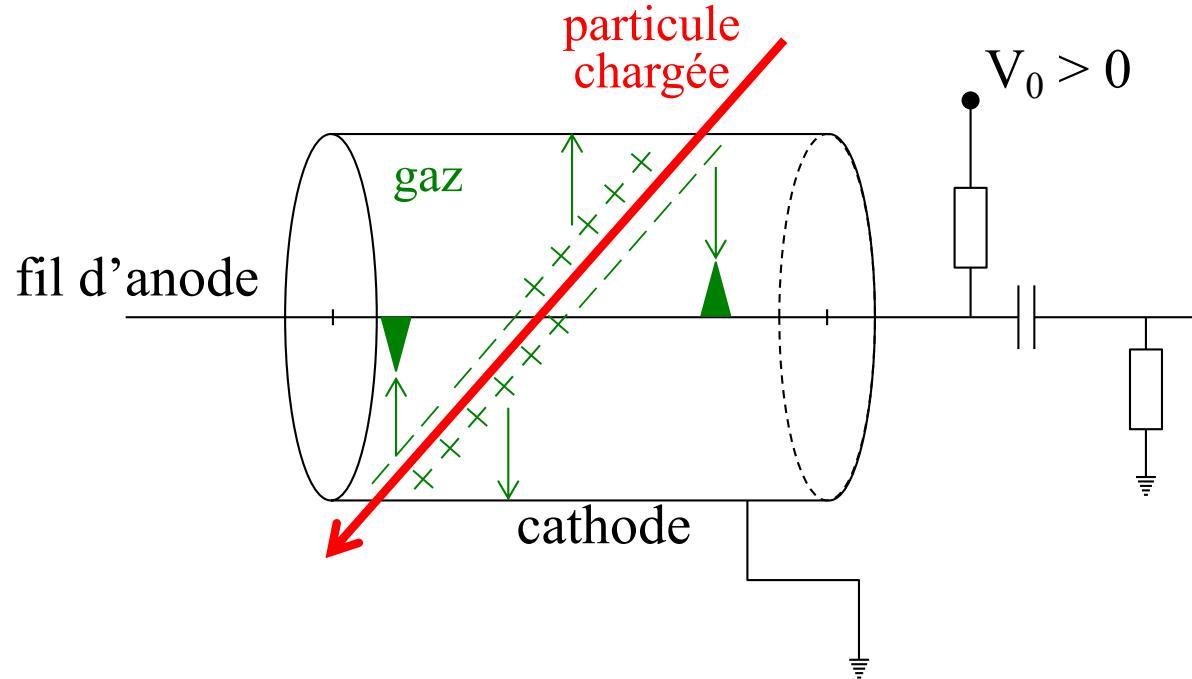
$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}$$

b = diamètre tube
a = diamètre fil

- mobilité des charges μ :

$$\vec{v}(r) = \mu \vec{E}(r)$$

$$\mu_{e^-} \sim 1000 \mu_{ion^+}$$

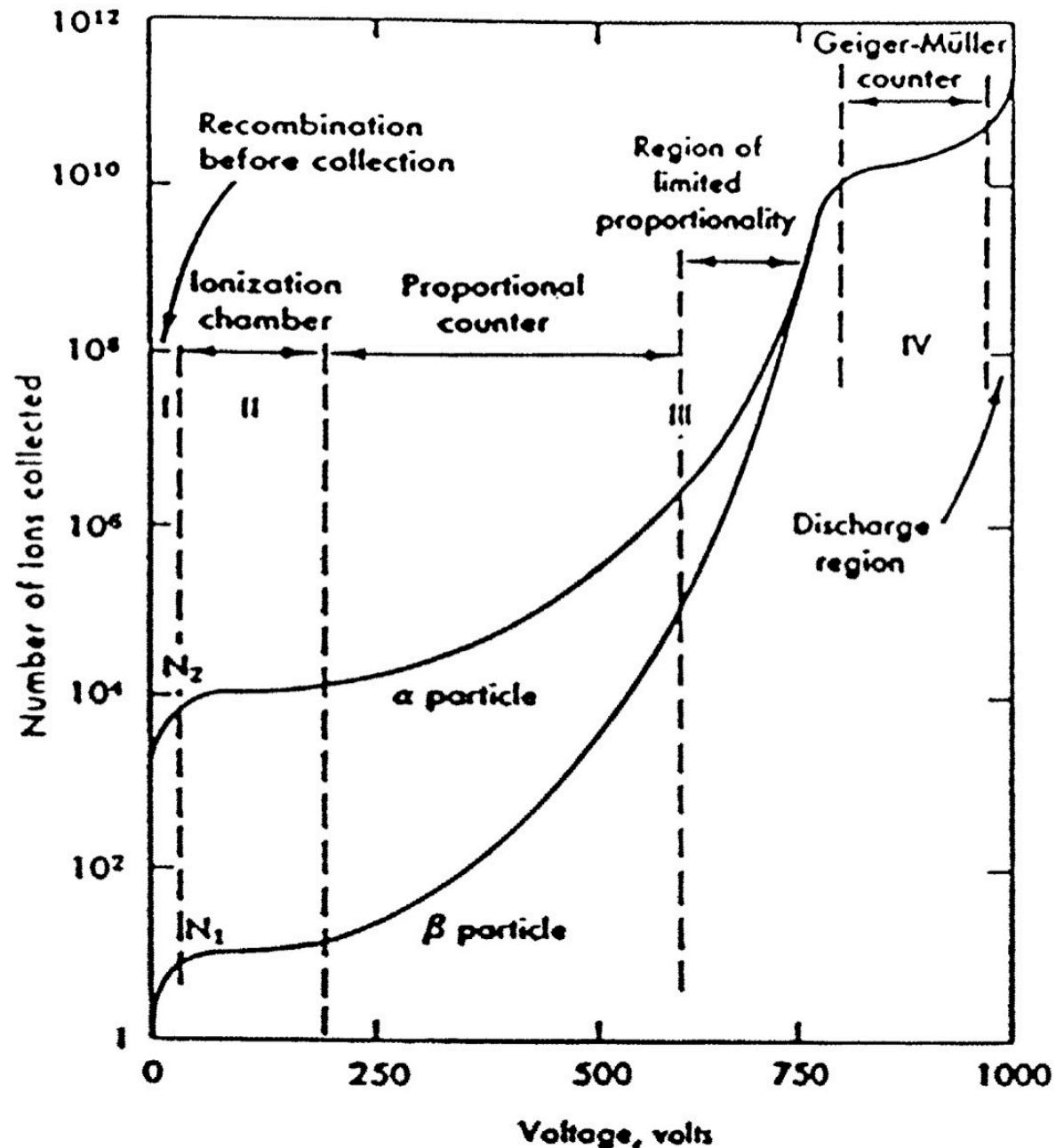


Au voisinage du fil d'anode,
multiplication des électrons par avalanche (▲)

DéTECTEURS D'IONISATION À GAZ

Modes opératoires

- I: recombinaison des charges
- II: chambre d'ionisation
- III: compteur proportionnel
- IV: compteur Geiger-Müller



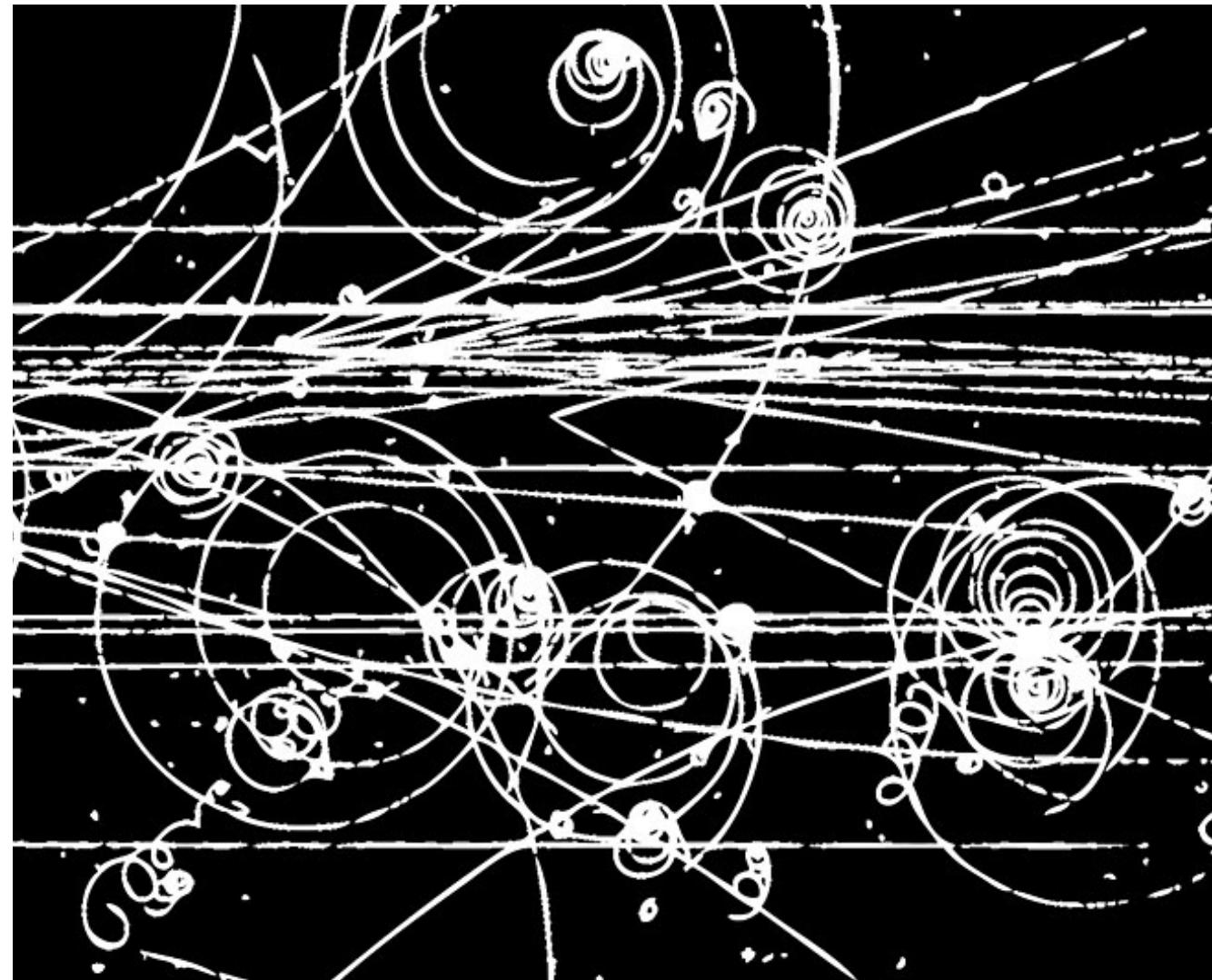
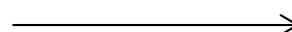
DéTECTEURS à traces

- Anciens (technique photographique)
 - chambre à brouillard
 - chambre à bulles
 - émulsions
 - Modernes (technique électronique)
 - chambre proportionnelle multifilaire (MWPC)
 - chambre à dérive
 - chambre à projection temporelle (TPC)
 - détecteur à microstrips (ou pixels) de Si
 - ...
- ... on en invente encore aujourd’hui

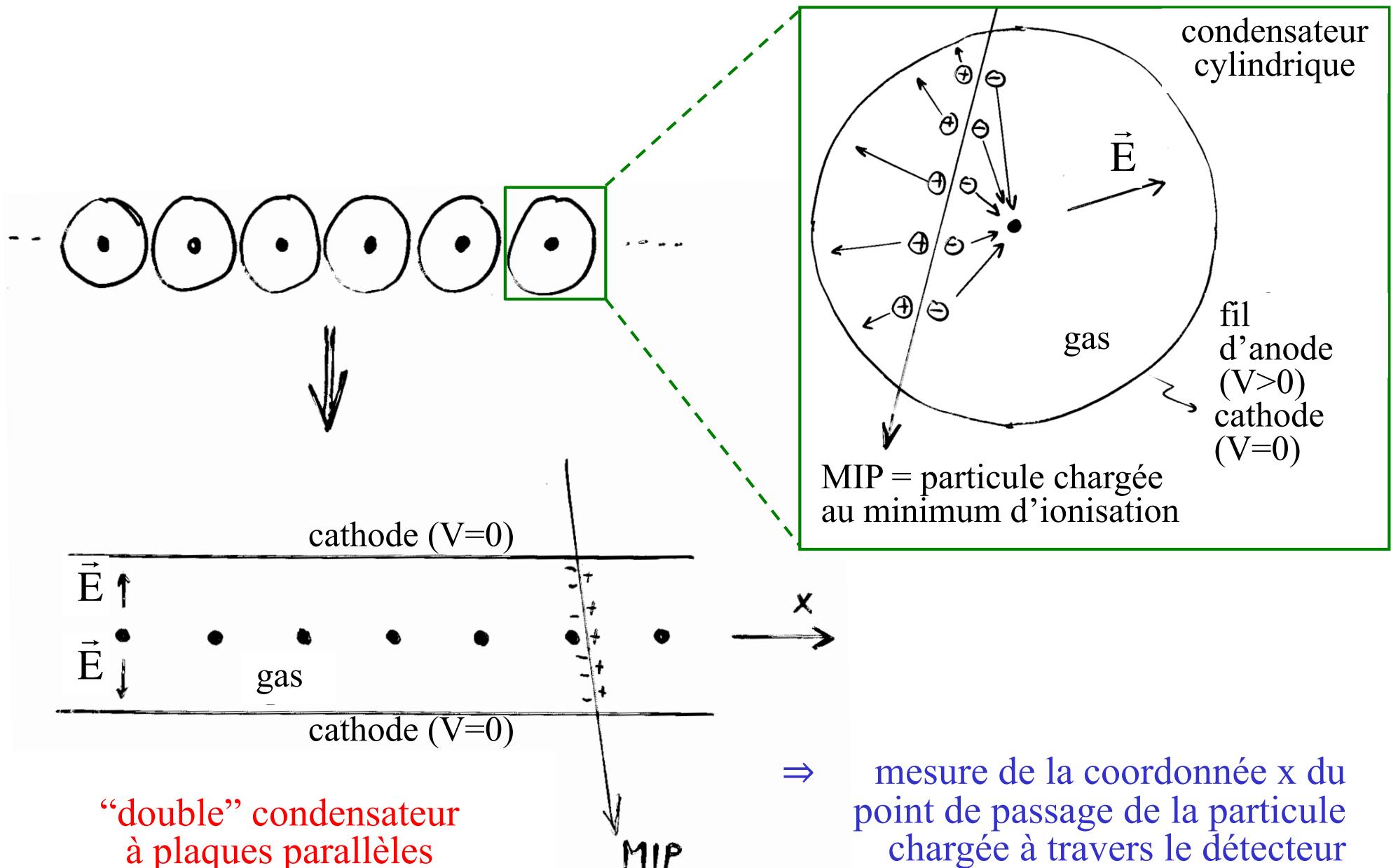
Photographie dans une chambres à bulles

- Hydrogène liquide, $B = 1.5 \text{ T}$

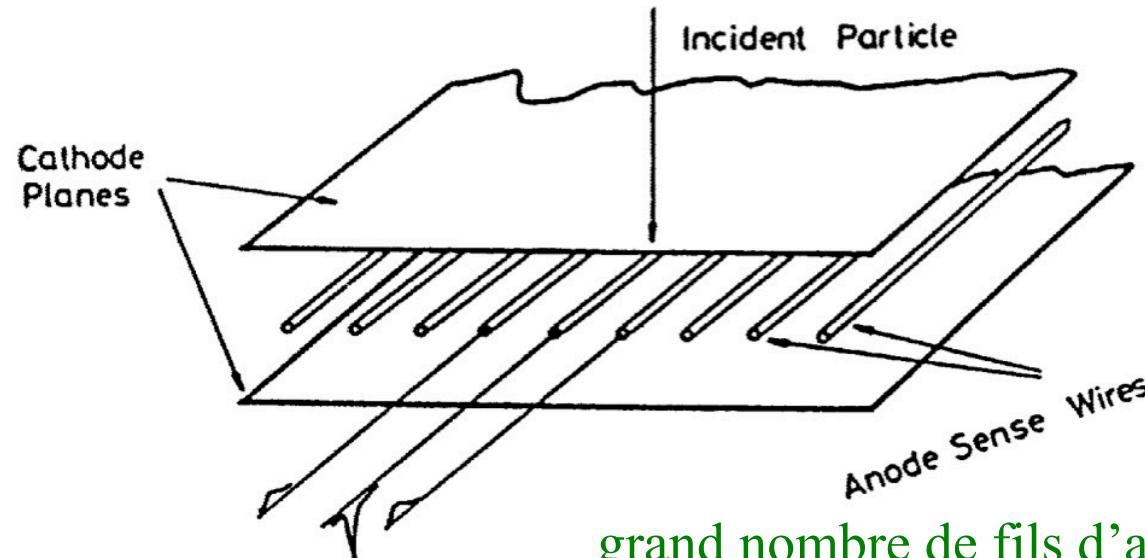
faisceau de
pions chargés
de $16 \text{ GeV}/c$



Chambre proportionnelle multifilaire

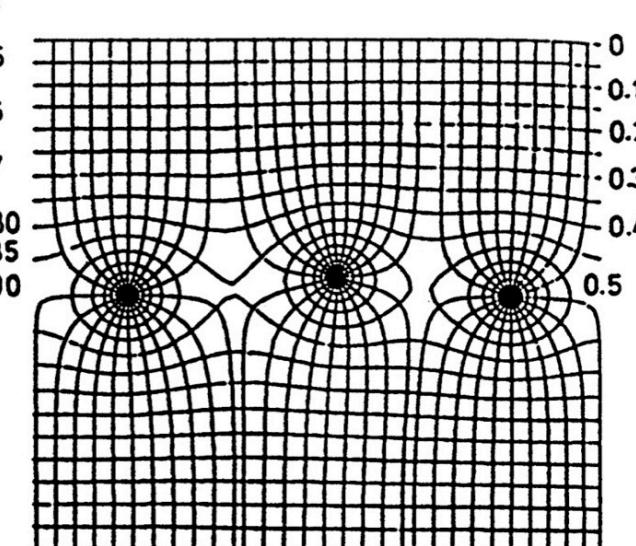
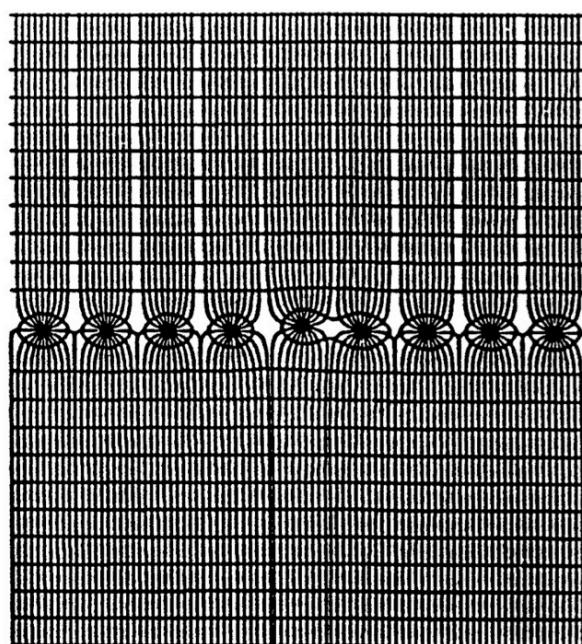


Chambre proportionnelle multifilaire



Invention de Georges Charpak (années 68–70)
→ prix Nobel en 1992

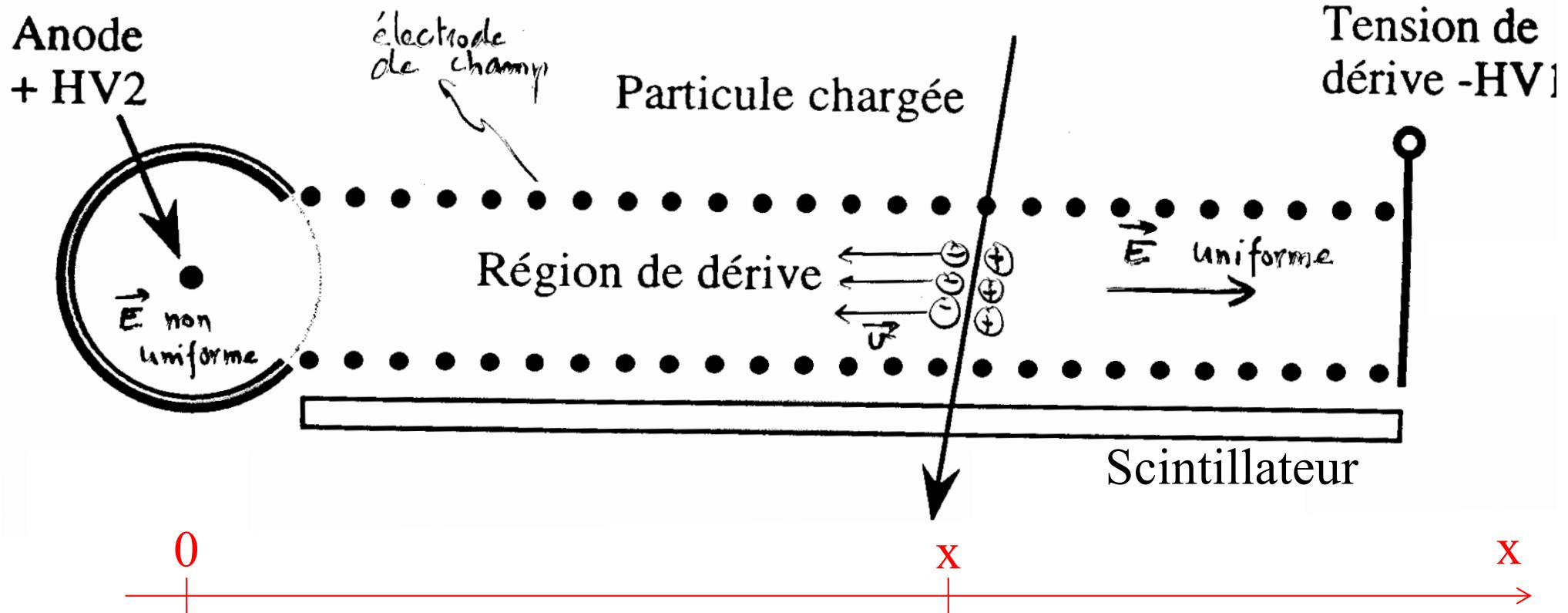
grand nombre de fils d'anode (canaux)
→ lecture électronique des signaux



lignes de champ électrique et equipotentielles

champ électrique
~uniforme, sauf au voisinage des fils
d'anode où $E \sim 1/r$

Chambre à dérive



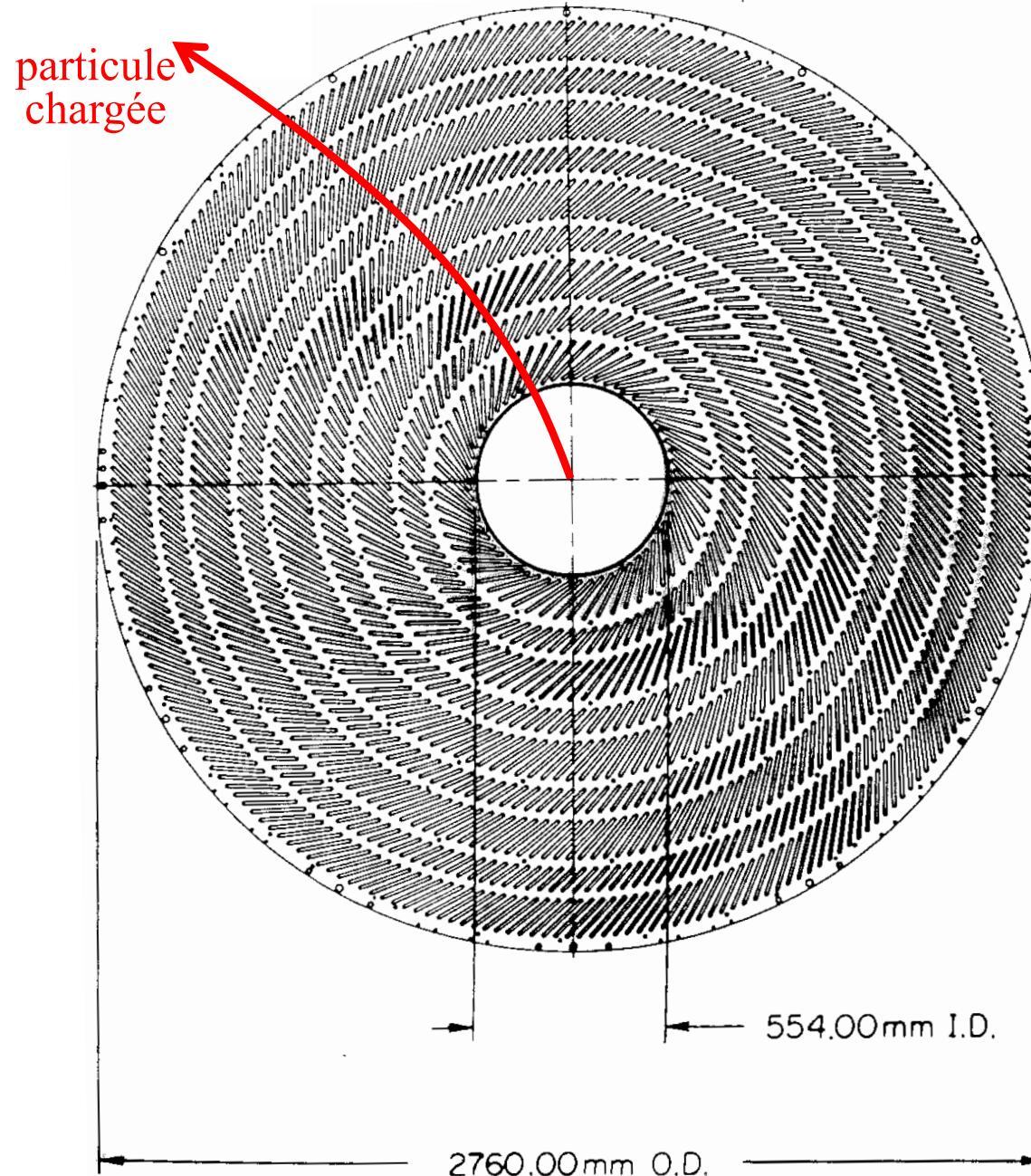
détection
sur l'anode
à $t=\Delta t$ en $x=0$

$$x = v\Delta t$$

détection
à $t=0$ en x

v = vitesse de dérive des électrons (~constante)

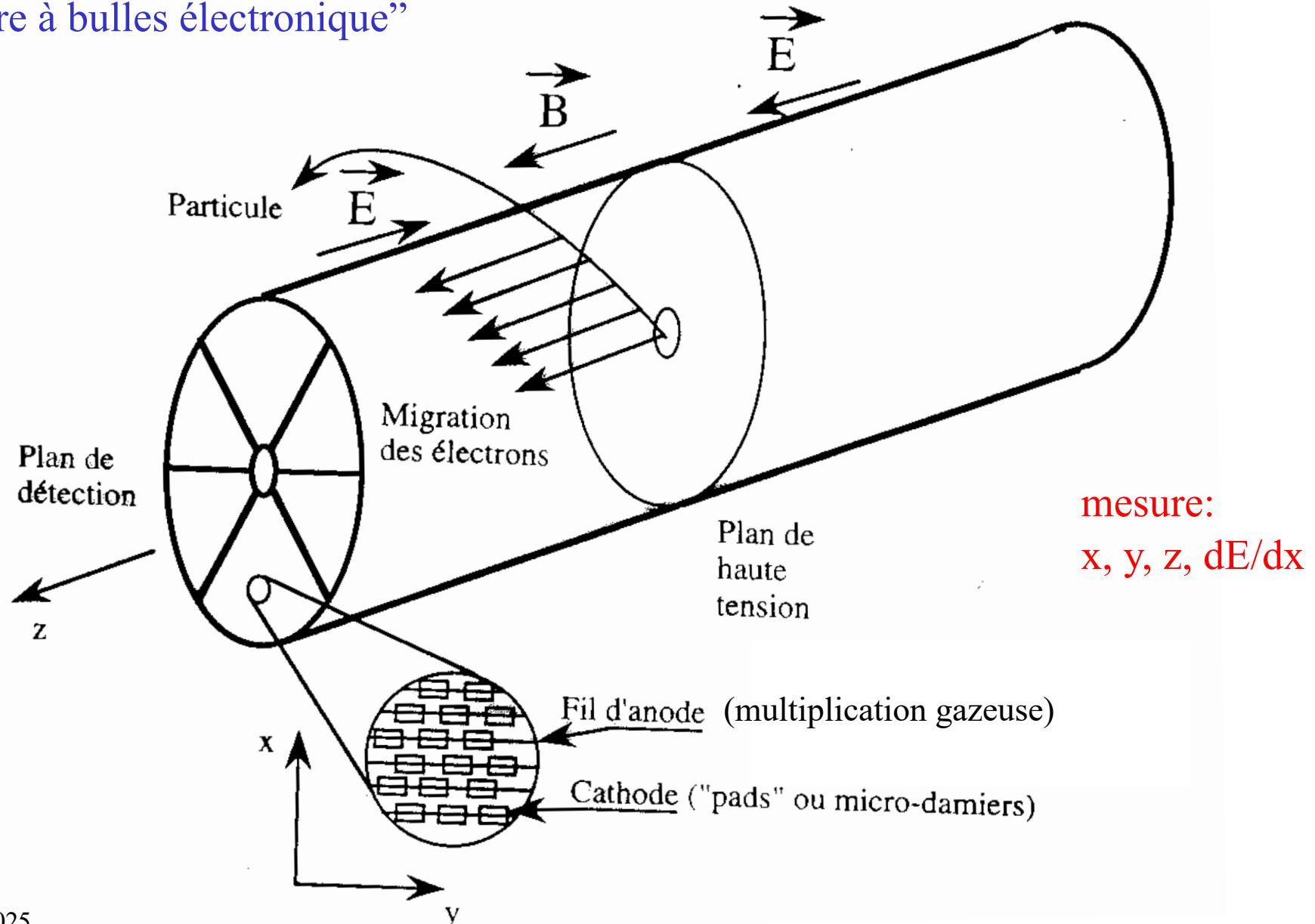
Chambre à dérive de CDF



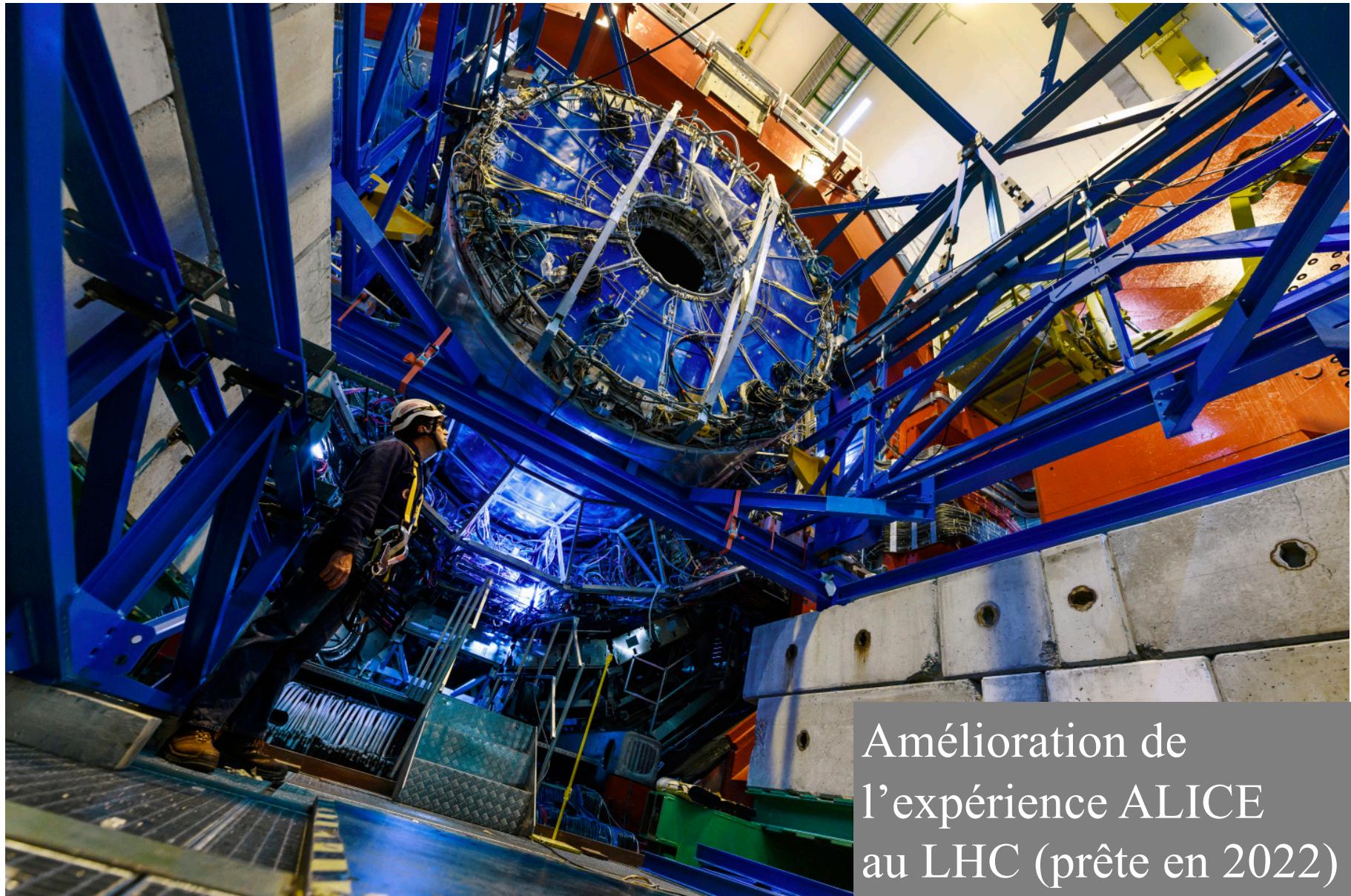
CDF = Collider
Detector
at Fermilab
(~1988–2011)

Chambre à projection temporelle

chambre proportionnelle multifilaire + chambre à dérive:
“chambre à bulles électronique”



Chambre à projection temporelle



TPC = Time Projection Chamber

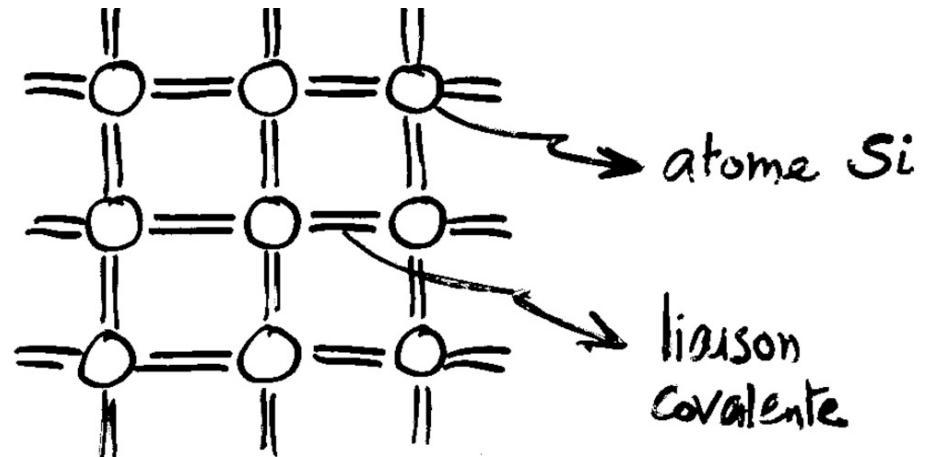
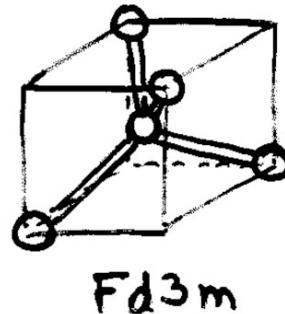
Semi-conducteurs

Intrinsèque (= pur)

Type I

- par exemple Si, Ge
- atomes tétravalents

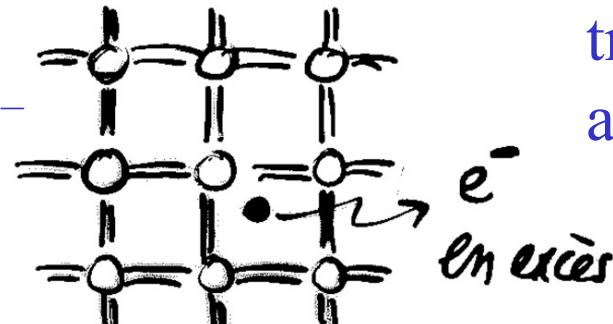
Réseau
cristallin



Extrinsèque (= dopé)

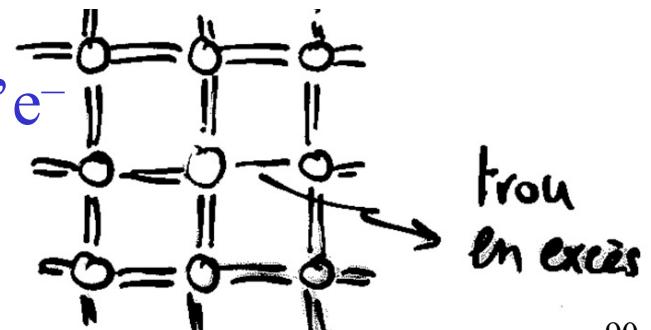
Type N

- dopant (P, As, ...)
- pentavalent donneur d'e⁻

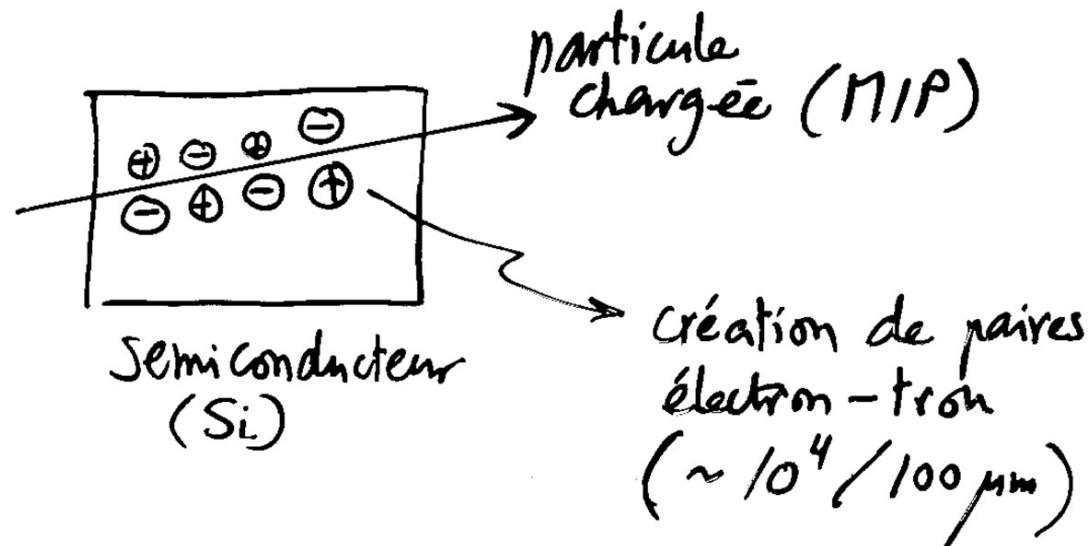


Type P

- dopant (B, Al, Ga, ...)
- trivalent accepteur d'e⁻



Détecteur à semi-conducteur



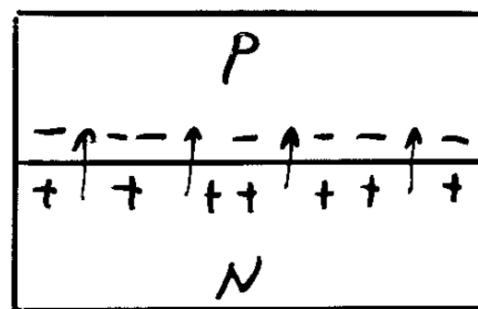
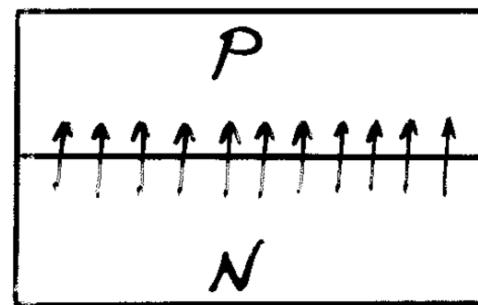
- Avantages sur les détecteurs à gaz:
 - plus compact, pas besoin de haute tension ni de bonbonnes de gaz
 - meilleure résolution
 - Energie pour créer une paire électron-trou (3.6 eV dans le Si)
bien plus petite que celle pour ioniser un gaz (15–30 eV dans Ar)
- Mais ... un semi-conducteur n'est pas isolant !
 - il contient des porteurs de charge libres
 - on ne peut pas simplement remplacer le gaz isolant par du silicium

Jonction P-N

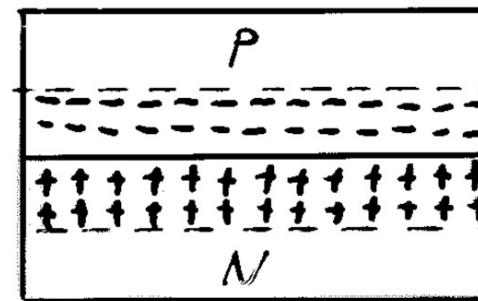
Si type P

Si type N

électrons
↑
trous



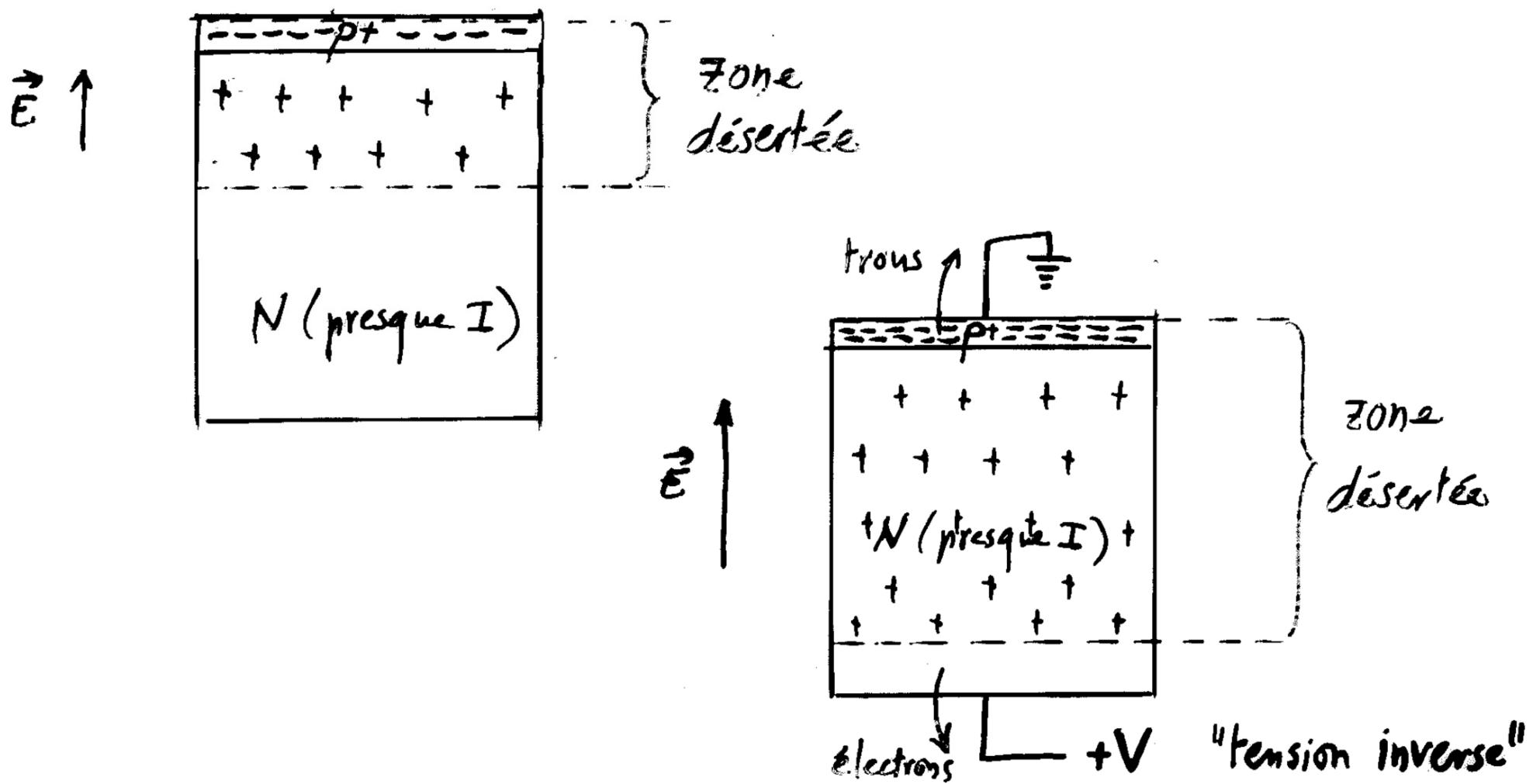
\vec{E} ↑



} zone désertée
exemple de
charges mobiles

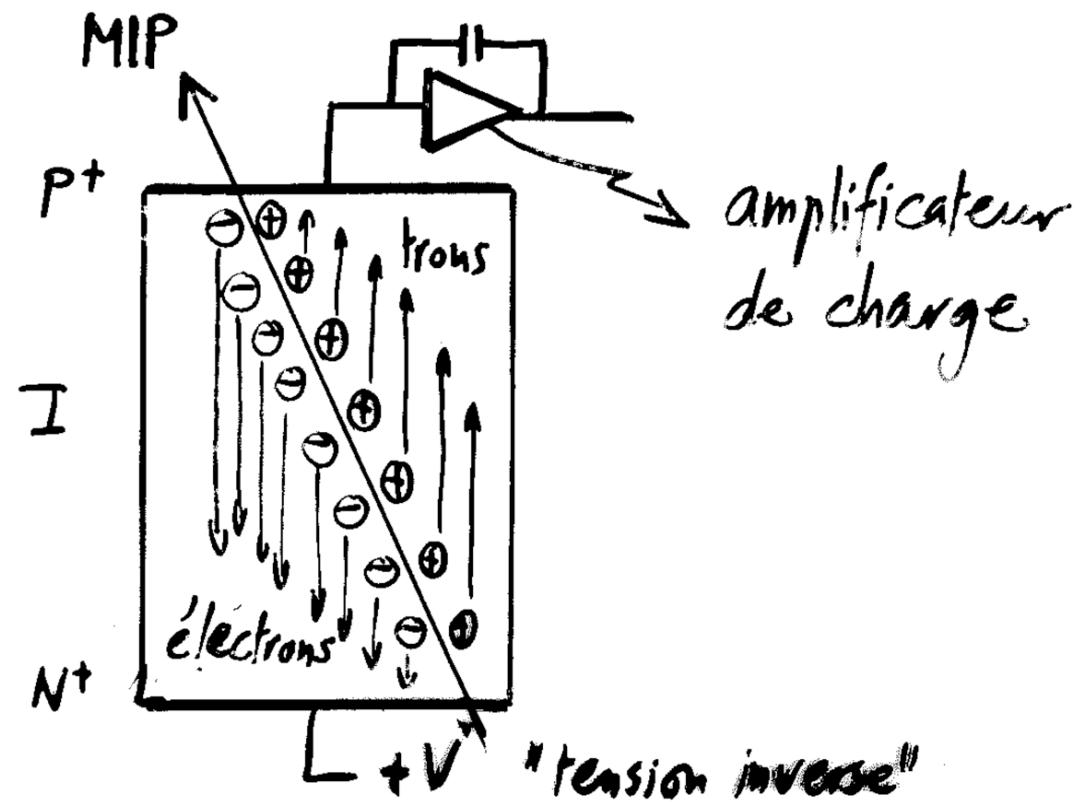
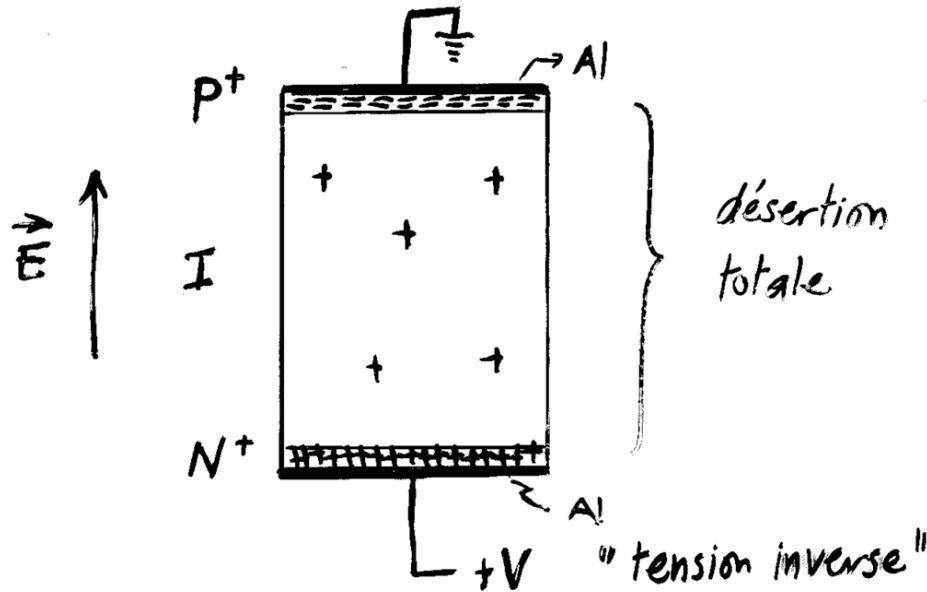
Jonction P-N

- Cristal de Si de haute résistivité (presque type I, légèrement N)
- Sur une face: dopage P très fort (P+) par implantation d'ions

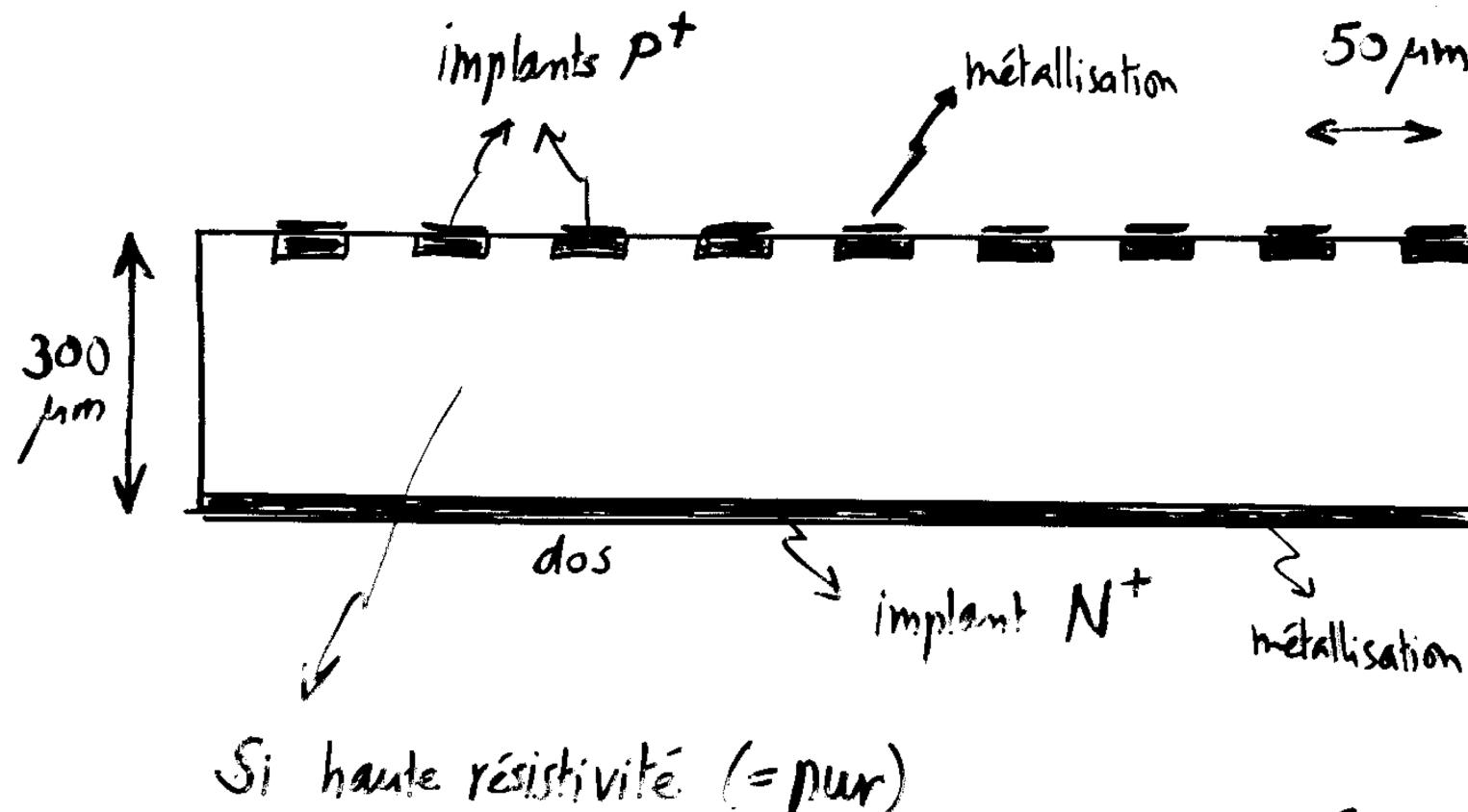


Diode PIN

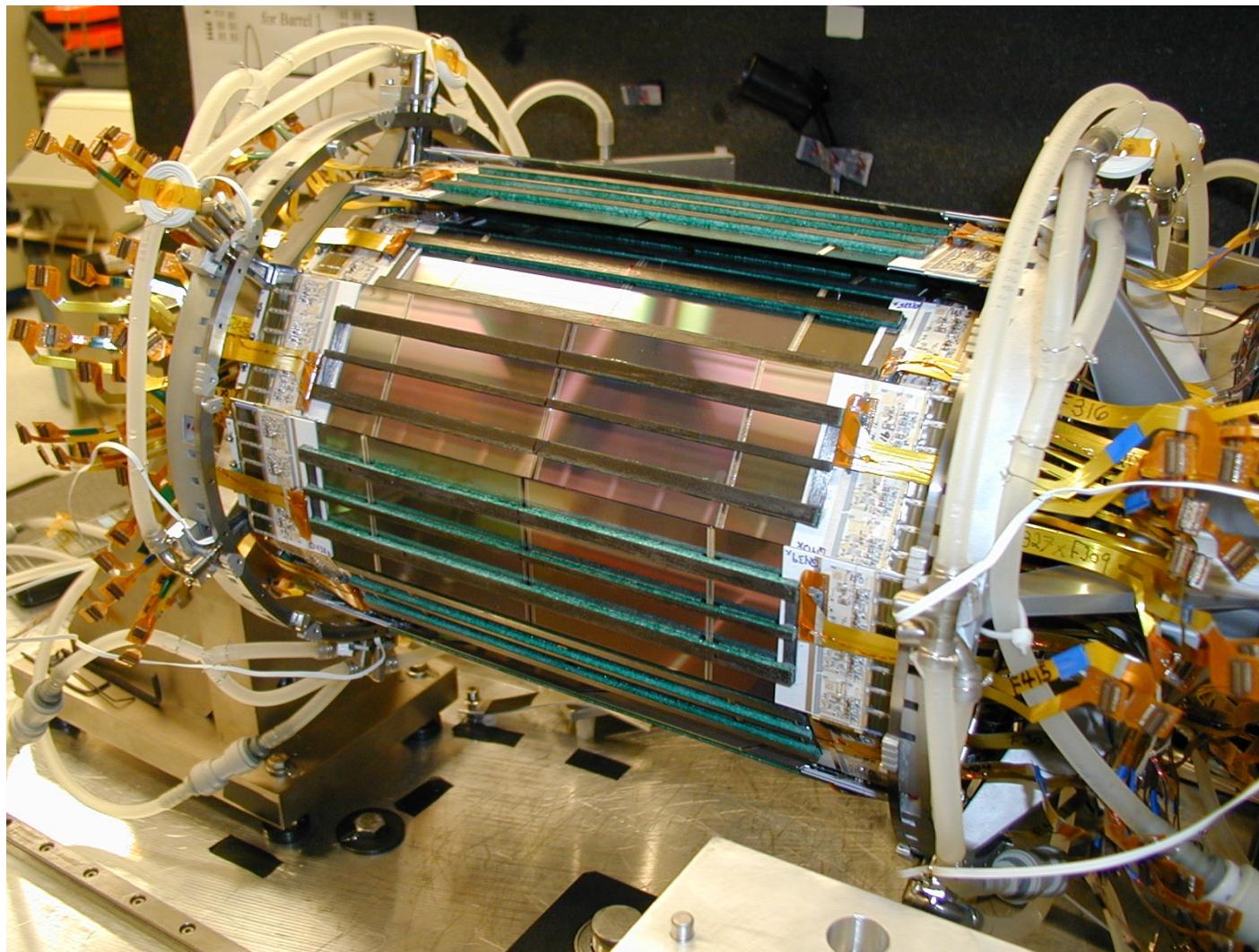
- Jonction P–N avec fort dopage N sur l'autre face (N^+)
- Métallisation des deux faces (contact ohmique)



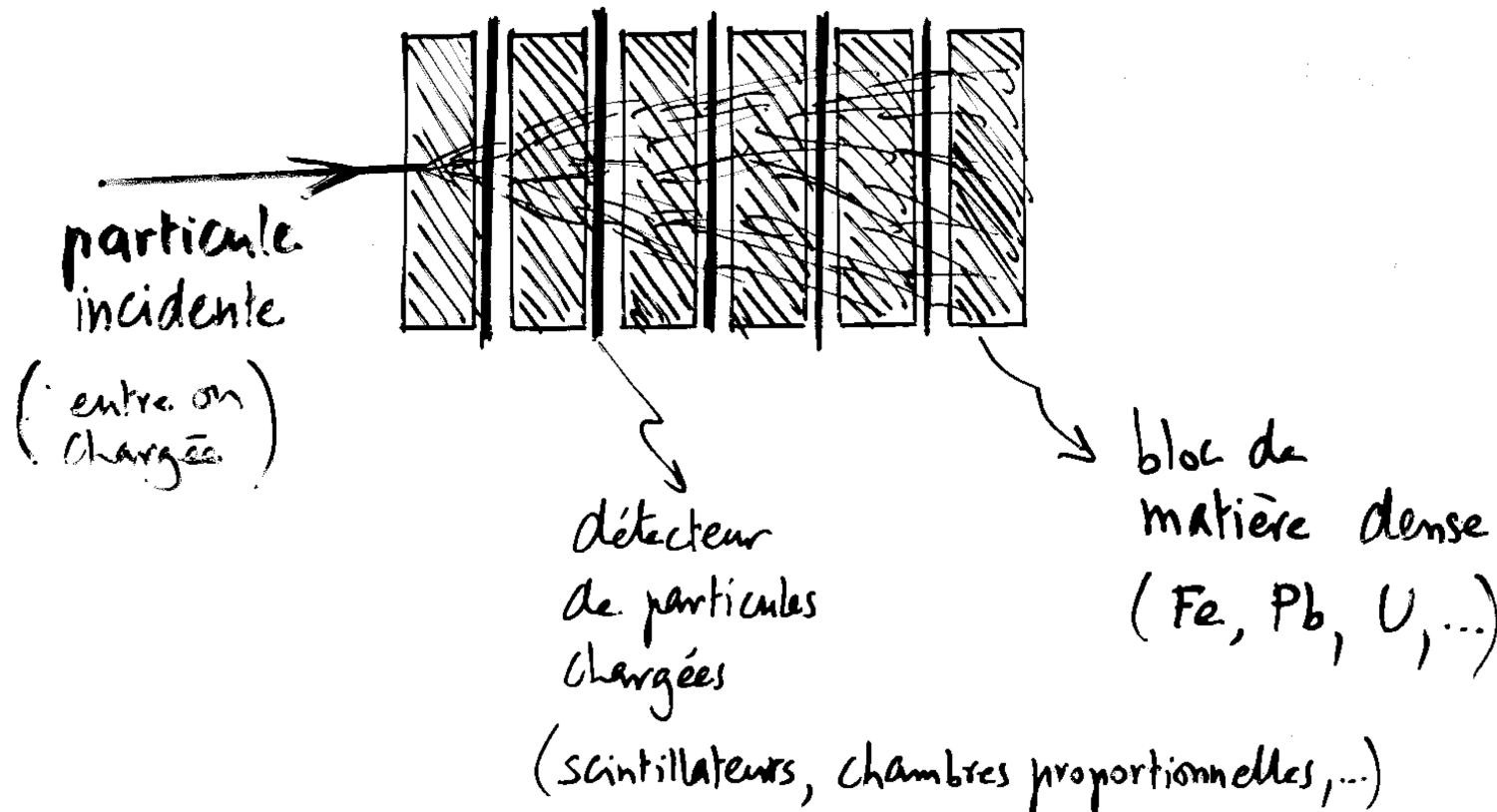
Détecteur Si à micro-bandes



Détecteur de vertex de CDF



Calorimètres

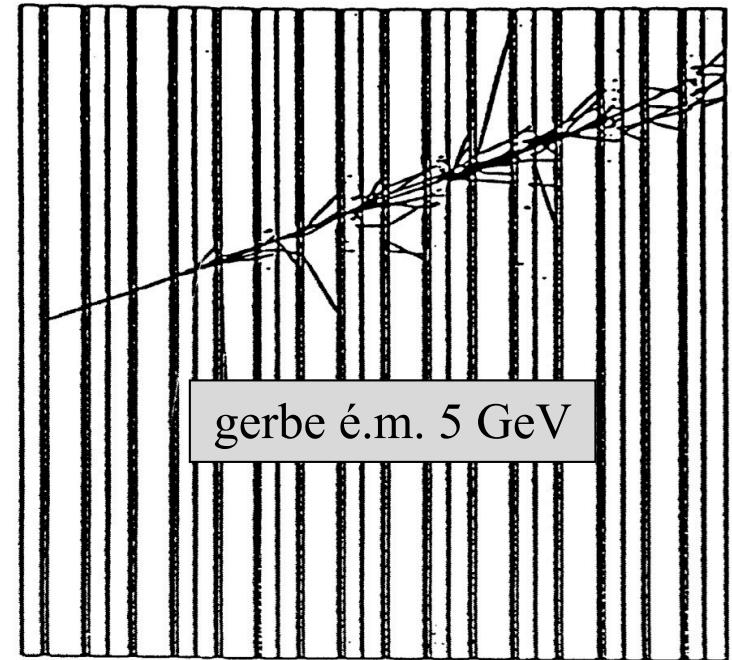


- Un bon calorimètre doit être assez épais pour stopper la particule incidente et contenir toute la gerbe
- **Mesures:** énergie déposée par la particule, **position** de la gerbe, **forme** de la gerbe (profondeur, extension latérale)

Calorimètres

- **Calorimètre électromagnétique**

- détection de photons, électrons, positons qui forment des gerbes électromagnétiques
- également $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- épaisseur $> 20 X_0$
(X_0 = longueur de rayonnement)



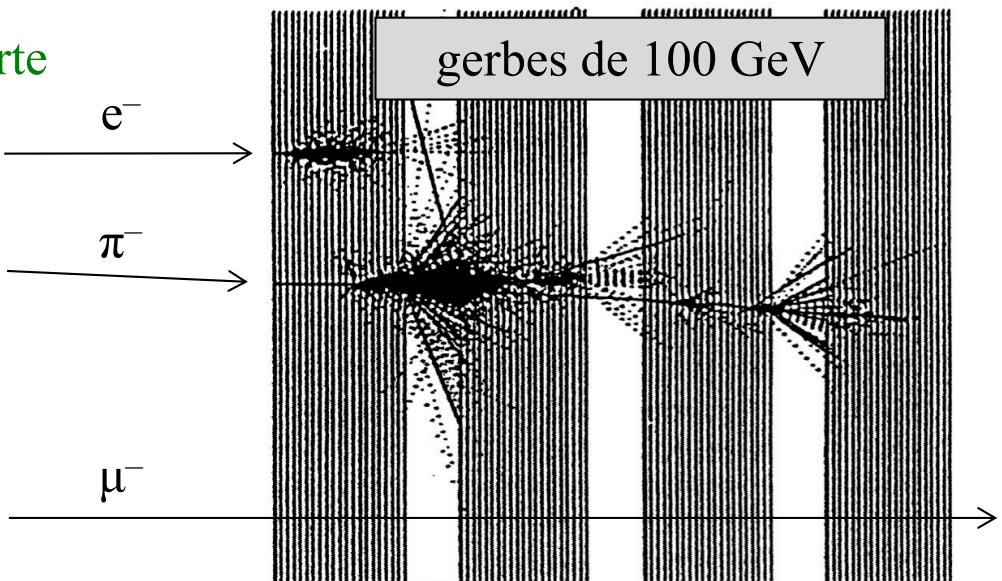
- **Calorimètre hadronique**

pour des hadrons de haute énergie

(> 5 GeV) dans la matière:

interactions é.m. \ll interaction forte

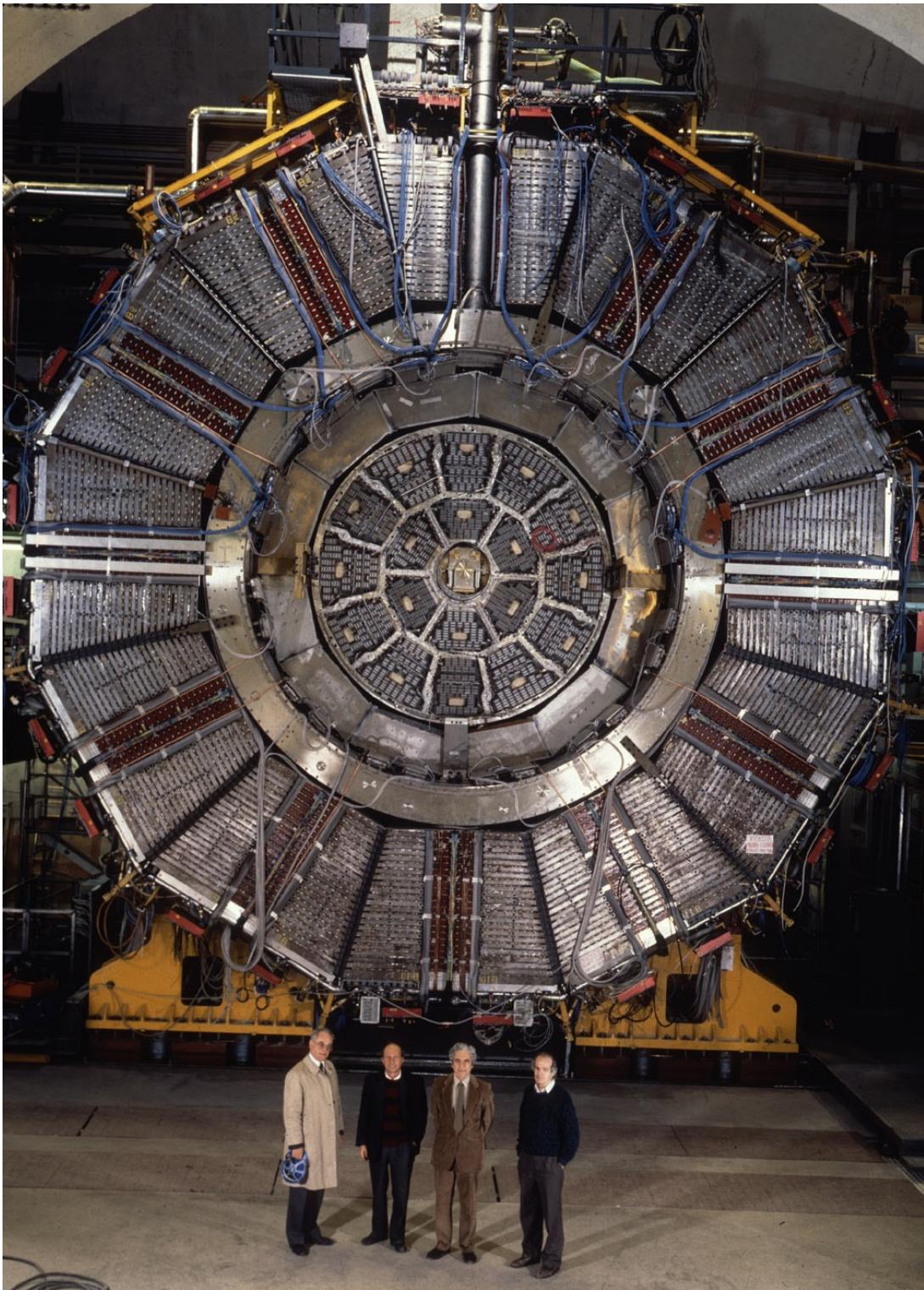
- détection de hadrons
(protons, neutrons, pions, ...) qui forment des gerbes hadroniques
 - + gerbes é.m. initiées par les π^0
- épaisseur $> 5 \lambda$
(λ = longueur d'absorption nucléaire $\sim 1/\sigma_{\text{abs}}$)



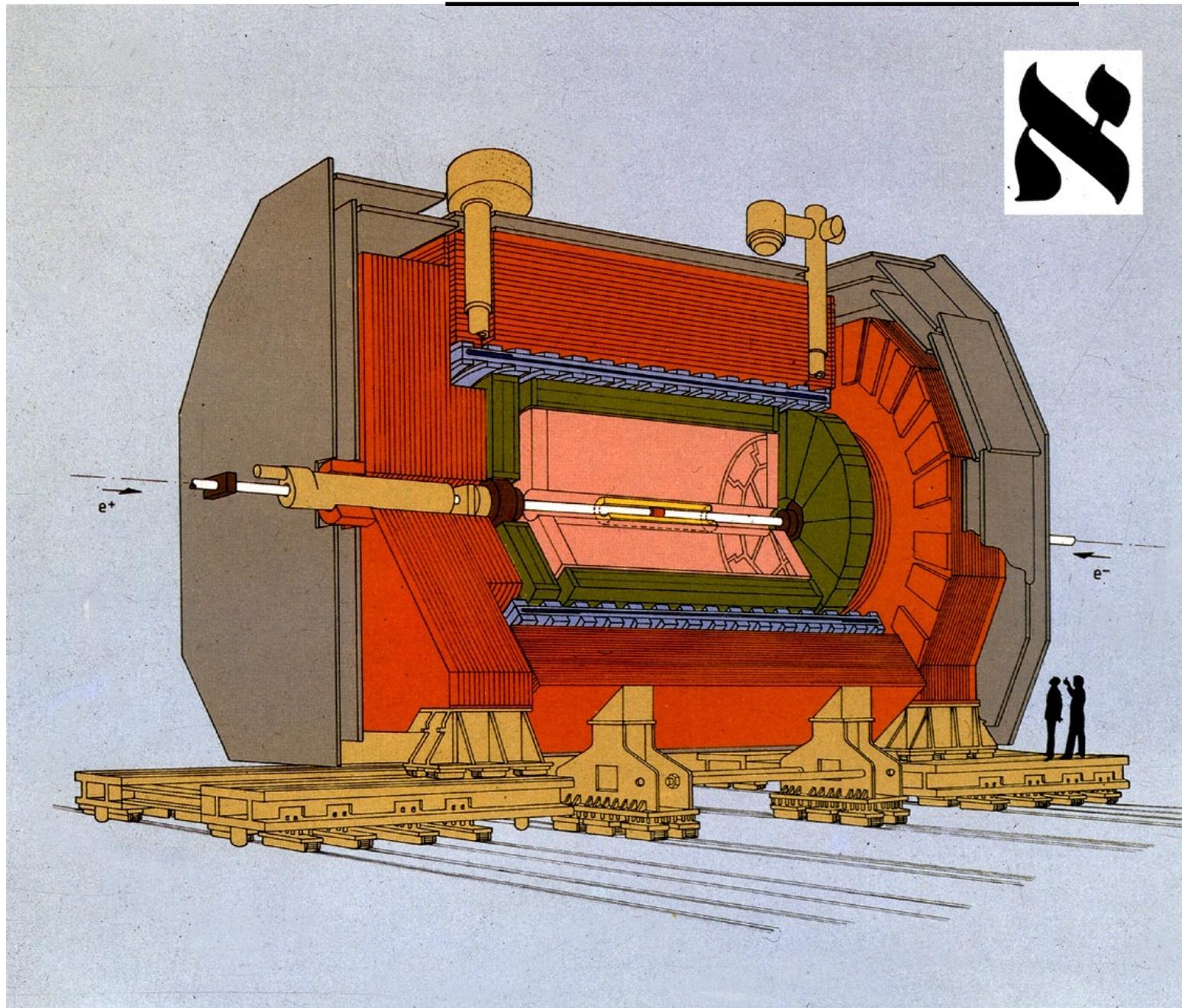
Détecteur ALEPH

Expérience ALEPH
au LEP (1989–2000)

Etude collisions e^+e^-
à $\sqrt{s} = 90\text{--}209 \text{ GeV}$



Détecteur ALEPH



Vertex
Detector

Inner Track
Chamber

Time Projection
Chamber

Electromagnetic
Calorimeter

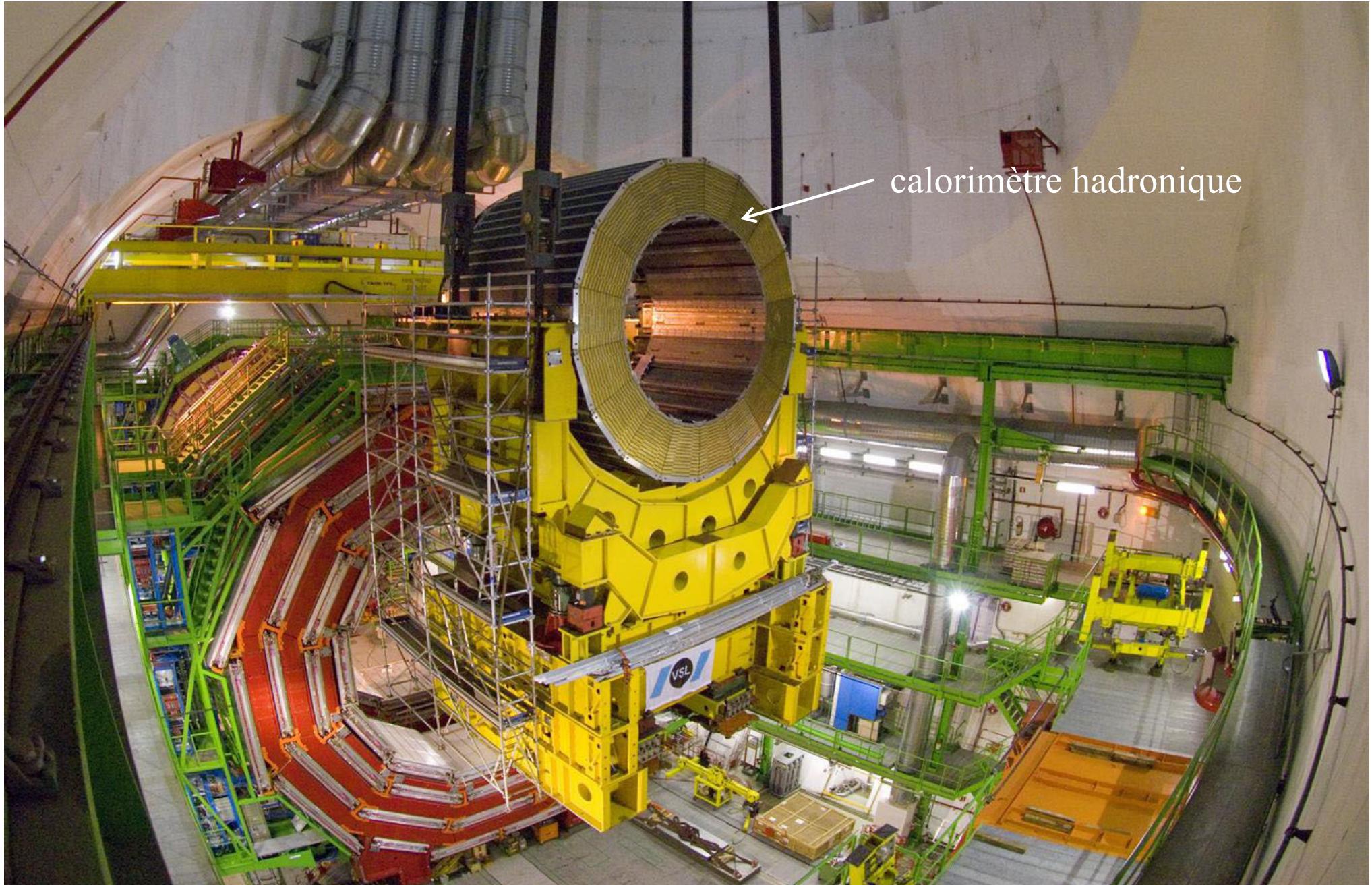
Superconducting
Magnet Coil

Hadron
Calorimeter

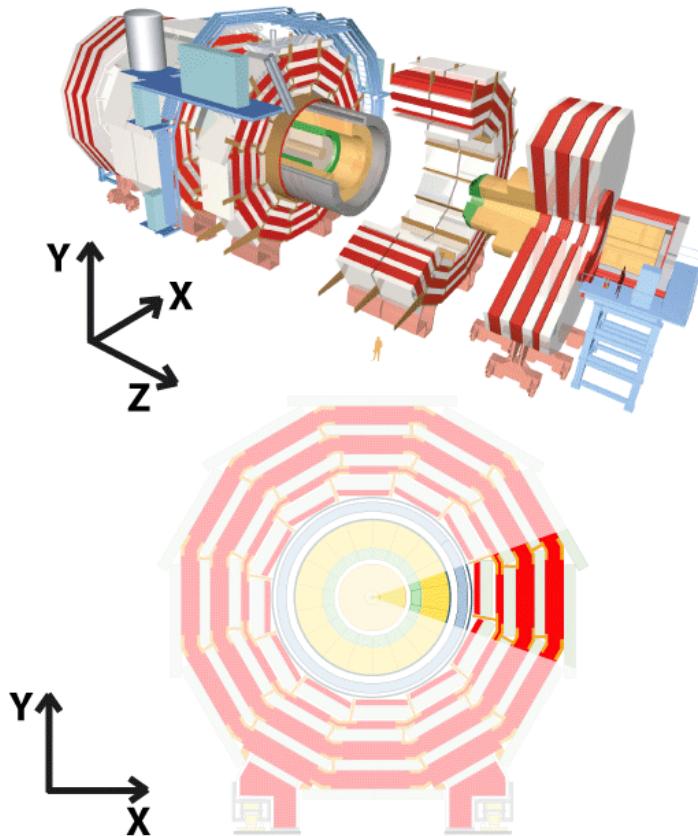
Muon Detection
Chambers

Luminosity
Monitors

Détecteur CMS au LHC (depuis 2008)

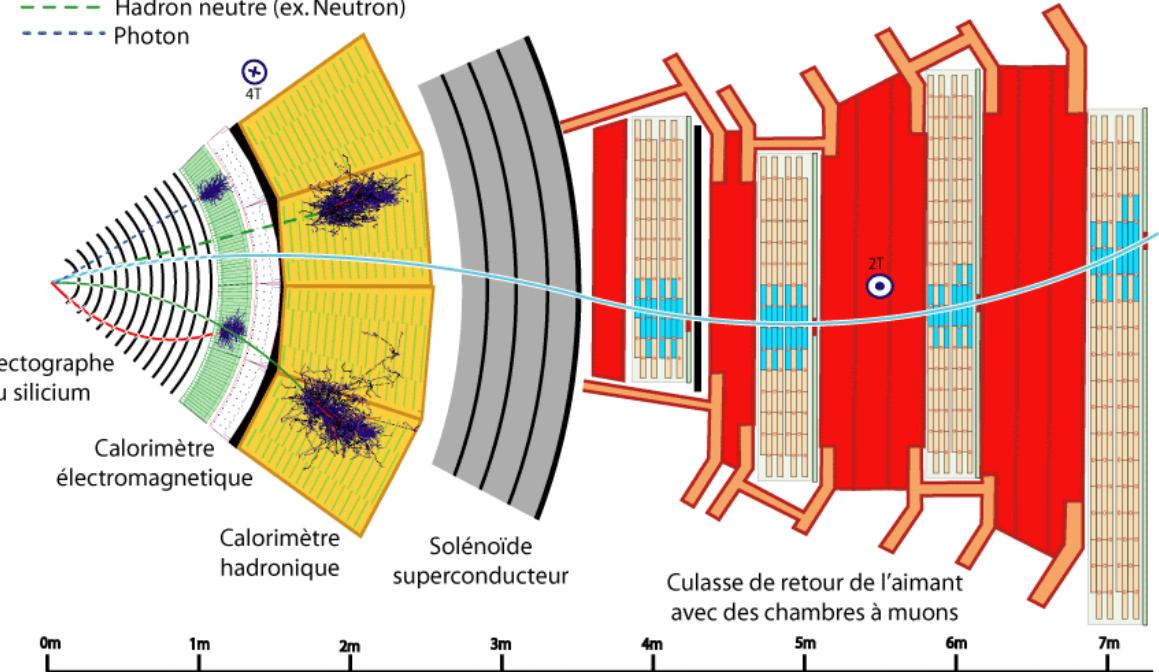


Détecteur CMS au LHC (depuis 2008)



Légende:

- Muon
- Électron
- Hadron chargé (ex. Pion)
- Hadron neutre (ex. Neutron)
- Photon



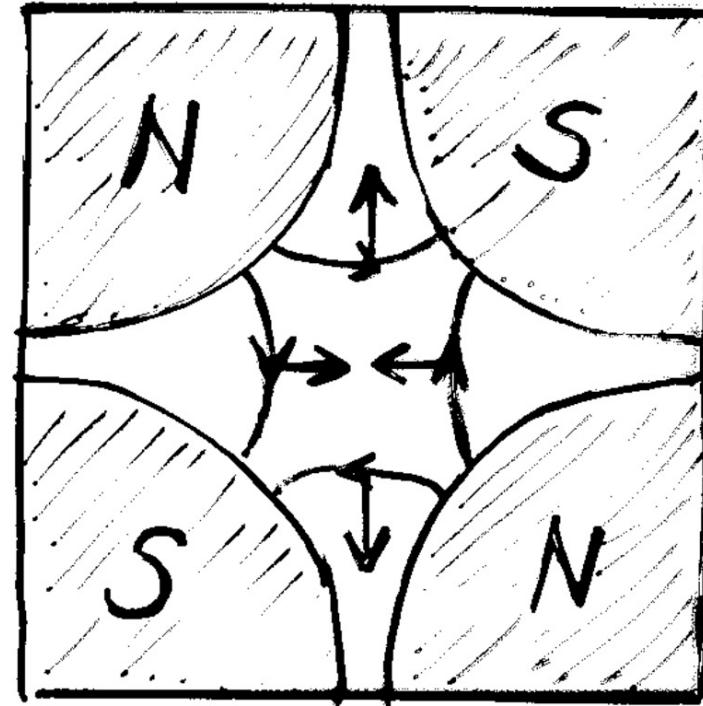
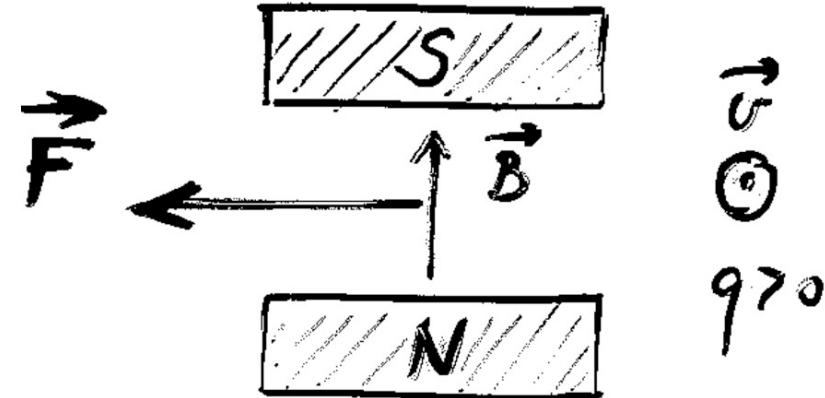
Chapitre 4: Accélérateurs

- Il faut des faisceaux **de plus en plus énergétiques et intenses** pour:
 - sonder la matière sur des **distances de plus en plus petites** ($\lambda = h/p$)
 - produire de **nouvelles particules massives** (réelles)
 - explorer des **phénomènes rares** (avec des sections efficaces très petites)
- Il faut donc des accélérateurs:
 - l’Univers (rayons cosmiques): intensité limitée à (très) haute énergie
 - accélérateurs terrestres: énergie limitée (technologie, coût, ...)
- Seules les **particules chargées “stables”** peuvent être accélérées:
 - e^- , e^+ , p , \bar{p} , ions, muons μ^\pm ($\tau \sim 2 \mu s$)
- **Composantes d’un accélérateur**
 - source de particules chargées
 - accélération (par des **champs électriques**)
 - tube à vide
 - guidage et stockage des faisceaux (par des **champs magnétiques**)

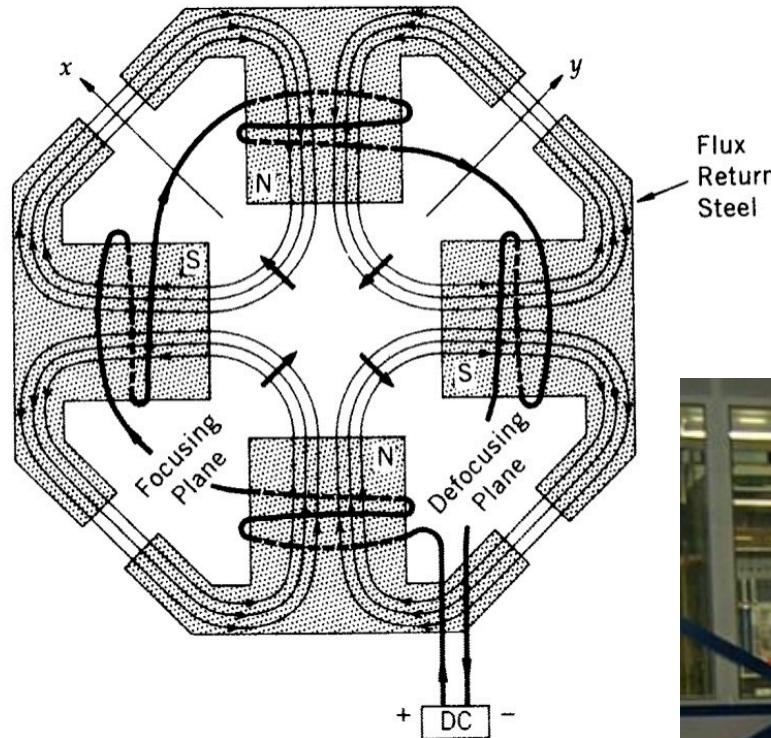
Guidage des faisceaux

Force de Lorentz: $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

- Déflexion
 - aimants dipolaires
 - tout le faisceau dévié dans la même direction
- Focalisation
 - aimants quadrupolaires
 - focalisation dans un plan transverse, défocalisation dans l'autre
 - Note: un doublet de quadrupôles focalise dans les deux plans



Aimant quadrupolaire



Double quadrupôle pour les 2 faisceaux du LHC

