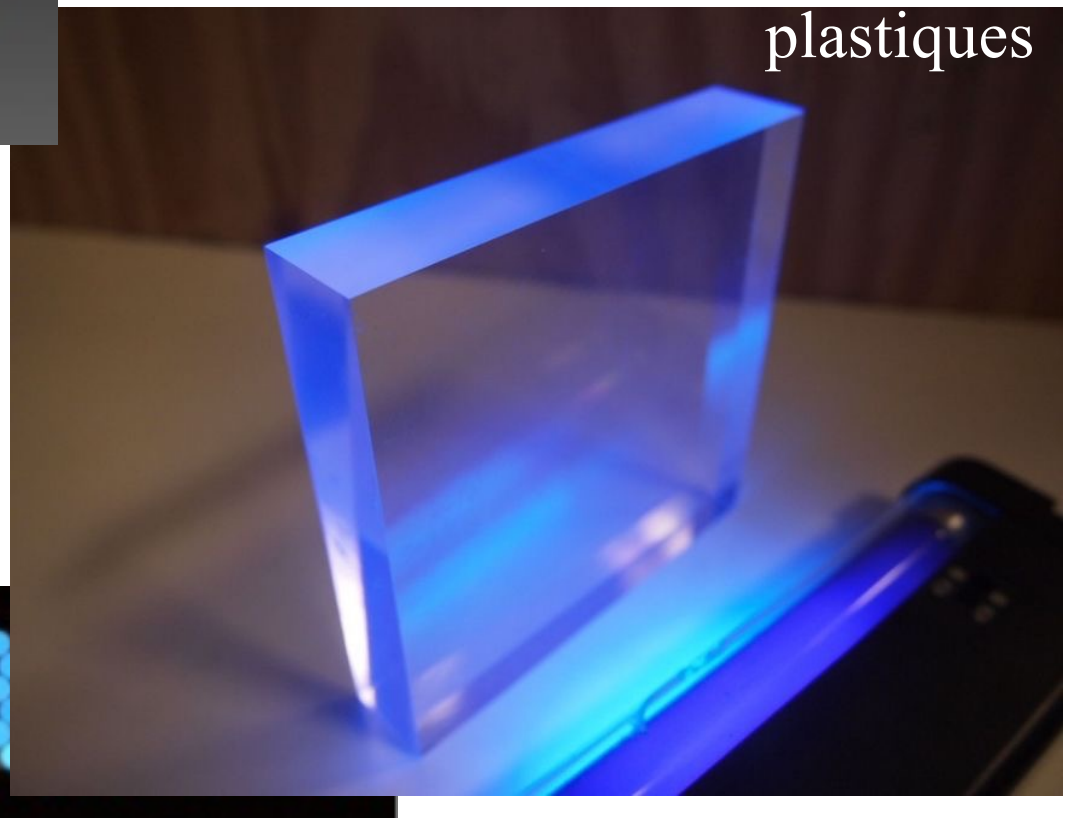
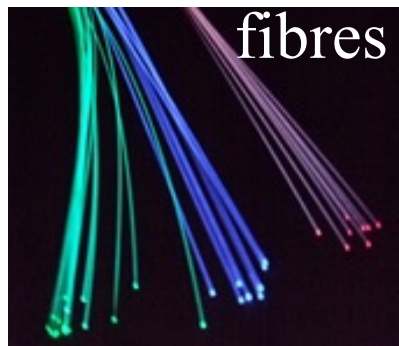


# Scintillateurs

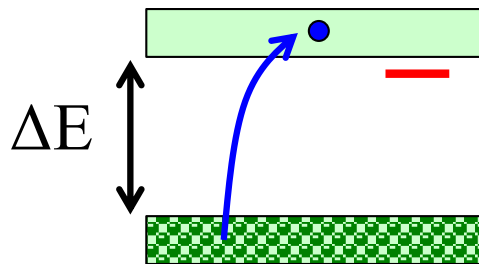
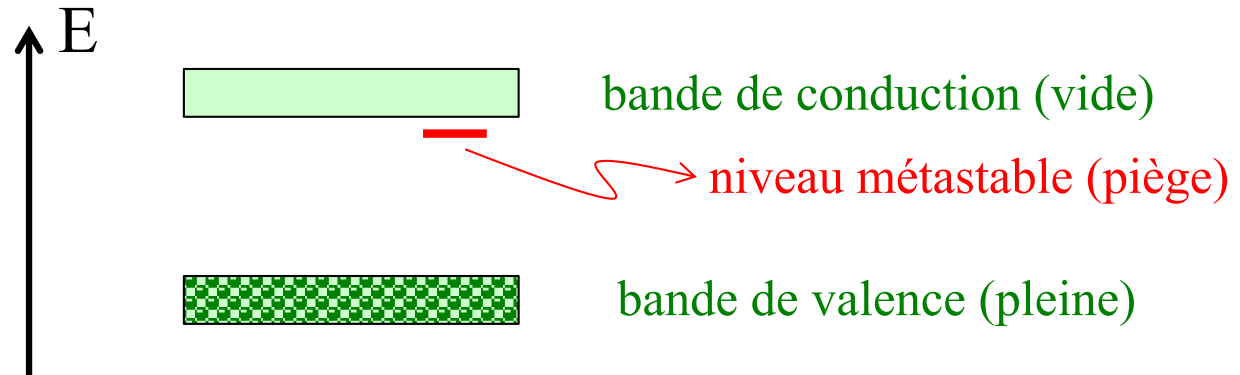


# Cristaux scintillants (inorganiques)

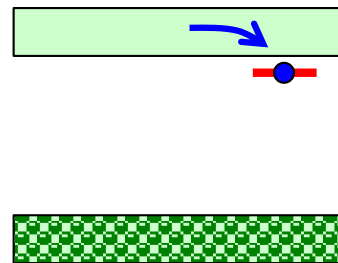
- Exemples:

- NaI(Tl)
- CsI(Tl)
- LiI(Eu)
- BaF<sub>2</sub>(Eu)

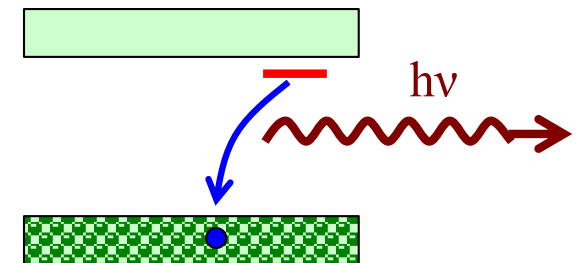
niveaux d'énergie atomiques



excitation d'un électron  
(au passage de la particule chargée)



piégeage



désexcitation  
( $\tau \sim 200\text{--}1000\text{ ns}$ )

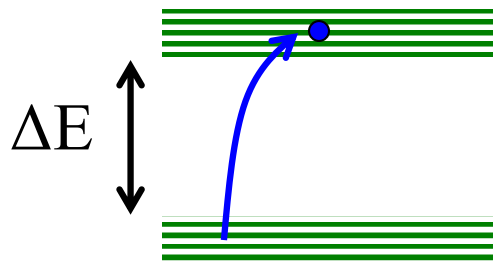
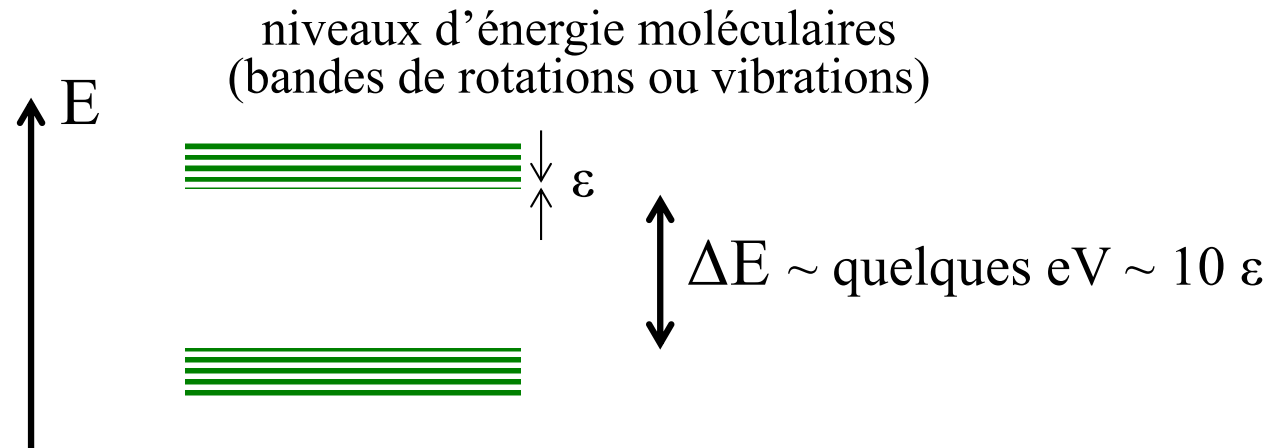
Photon émis:  $h\nu < \Delta E \rightarrow$  ne peut pas être réabsorbé

$h\nu \sim 3\text{ eV}$  pour NaI

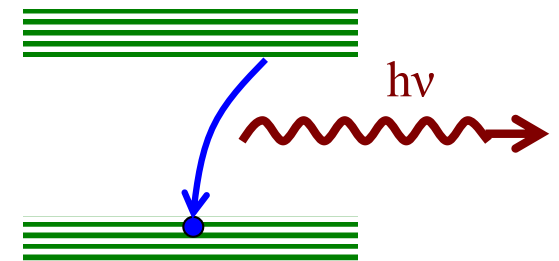
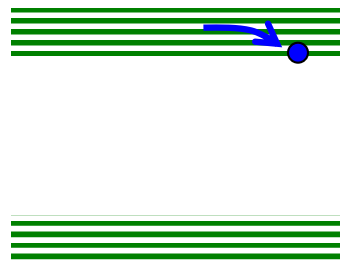
# Scintillateurs organiques

- Exemples:

- anthracène
- stilbène
- plastiques
- solutions organiques



excitation d'un électron  
(au passage de la particule chargée)



désexcitation  
( $\tau \sim 30 \text{ ns}$ )

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

Photon émis:  $h\nu = \Delta E$

# Scintillateurs

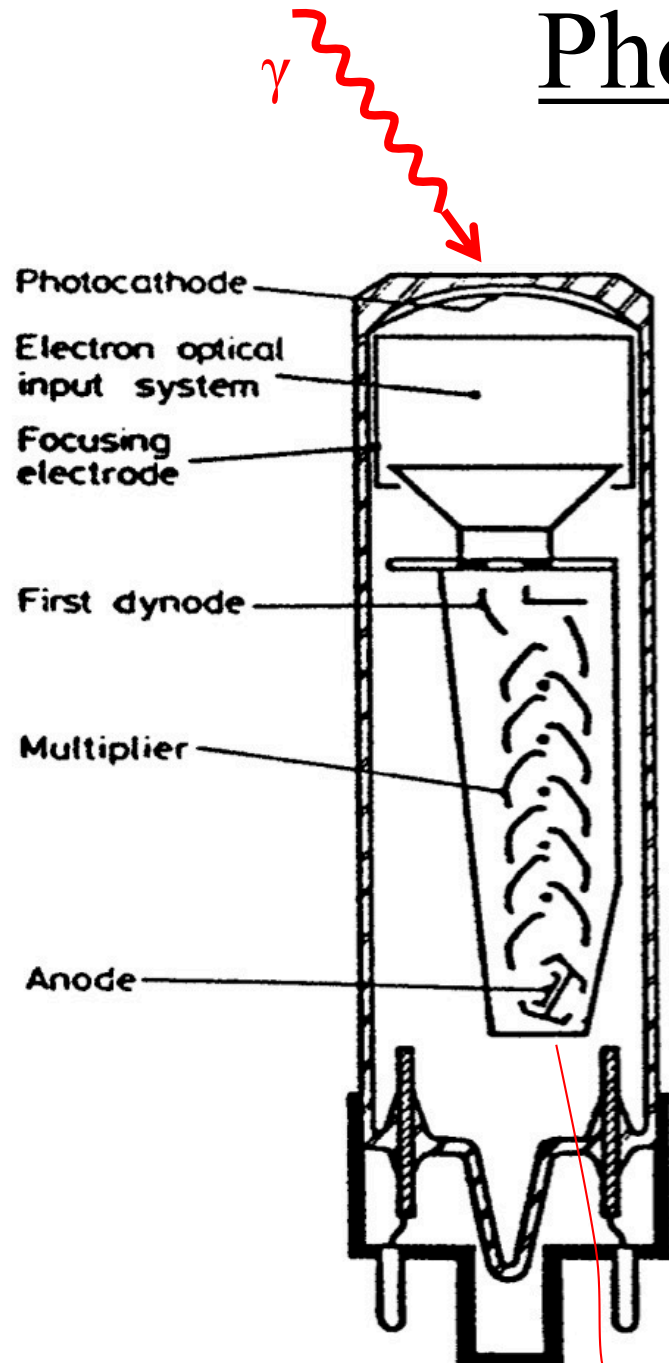
Scintillateur		$\eta$ (rel)	$\tau$ ns	$\lambda$ nm	$\eta$ = rendement de scintillation
organique	Anthracène	100	30	447	$\tau$ = durée de vie moyenne des niveaux excités
	Plastic NE 102	65	2.4	423	
	NE 111	55	1.6	370	$\lambda$ = longueur d'onde au maximum du spectre d'émission
	Liquide NE 220	65	3.8	425	
	NE 311	65	3.8	425	
	NE 313	62	4.0	425	
inorganique	Cristaux NaI(Tl)	230	230	413	$h\nu = 3.0 \text{ eV}$
	CsI(Tl)	95	1100	580	
	BaF <sub>2</sub> (Eu)	110	1000	435	
	BGO	35	300	480	

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

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



# Photomultiplicateur



$\varepsilon$  = efficacité quantique (15–25%)

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

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

$f$  = facteur de collection lumineuse

$G$  = gain photomultiplicateur  $\sim 10^7$

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

# Détecteurs d'ionisation à gaz

- Condensateur cylindrique rempli d'un gaz isolant:

- champ électrique:

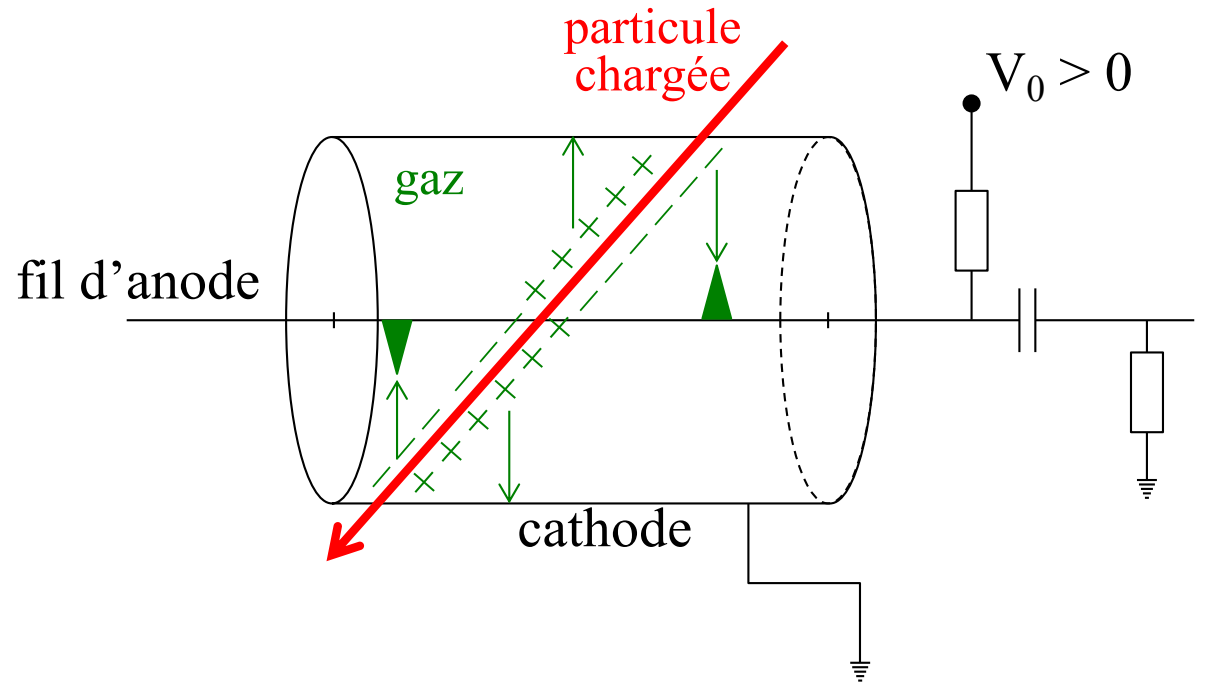
$$E(r) = \frac{1}{r} \frac{V_0}{\ln(b/a)}$$

b = diamètre tube  
a = diamètre fil

- mobilité des charges  $\mu$ :

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

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

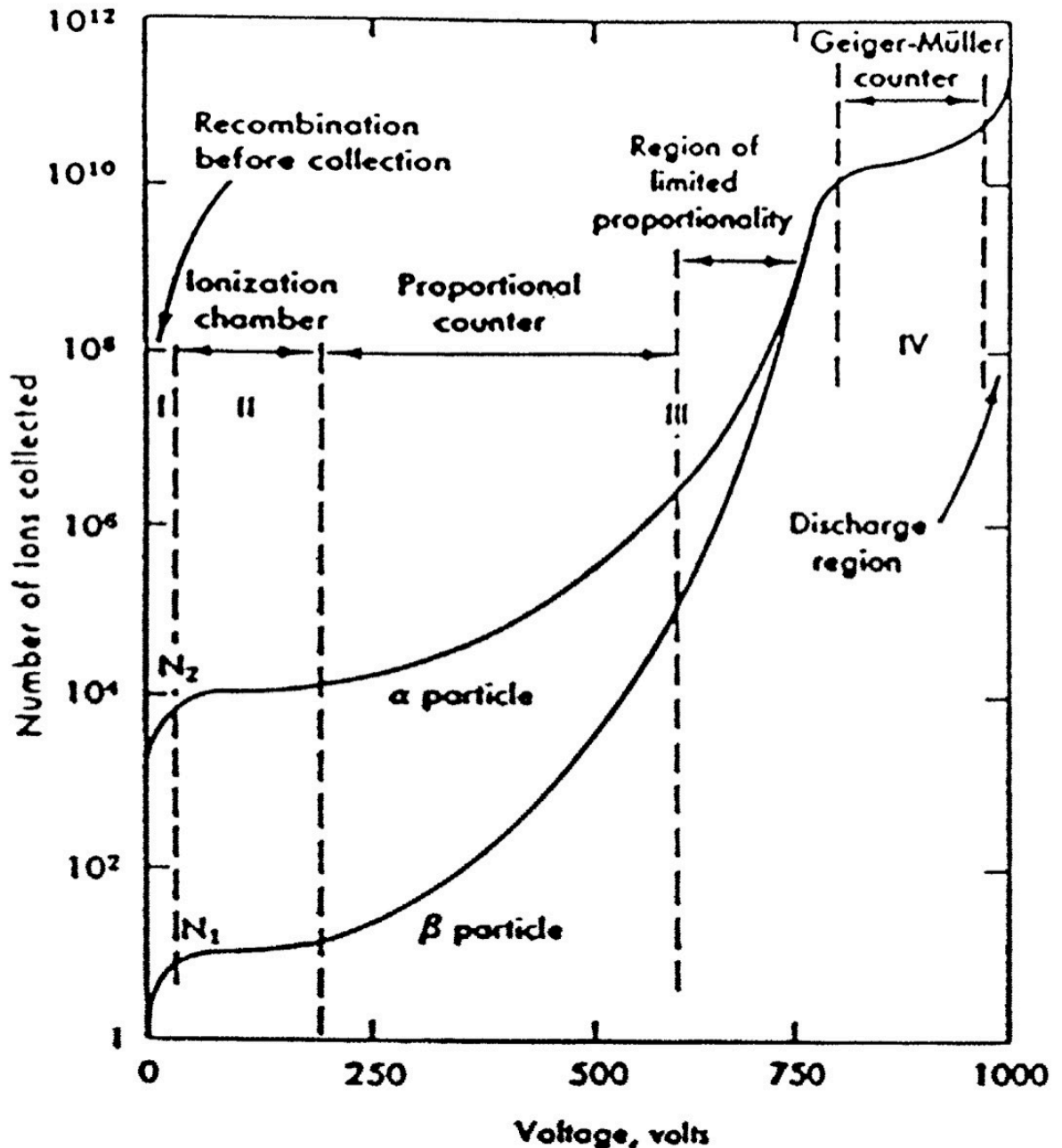


Au voisinage du fil d'anode,  
multiplication des électrons par avalanche (▲)

# 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

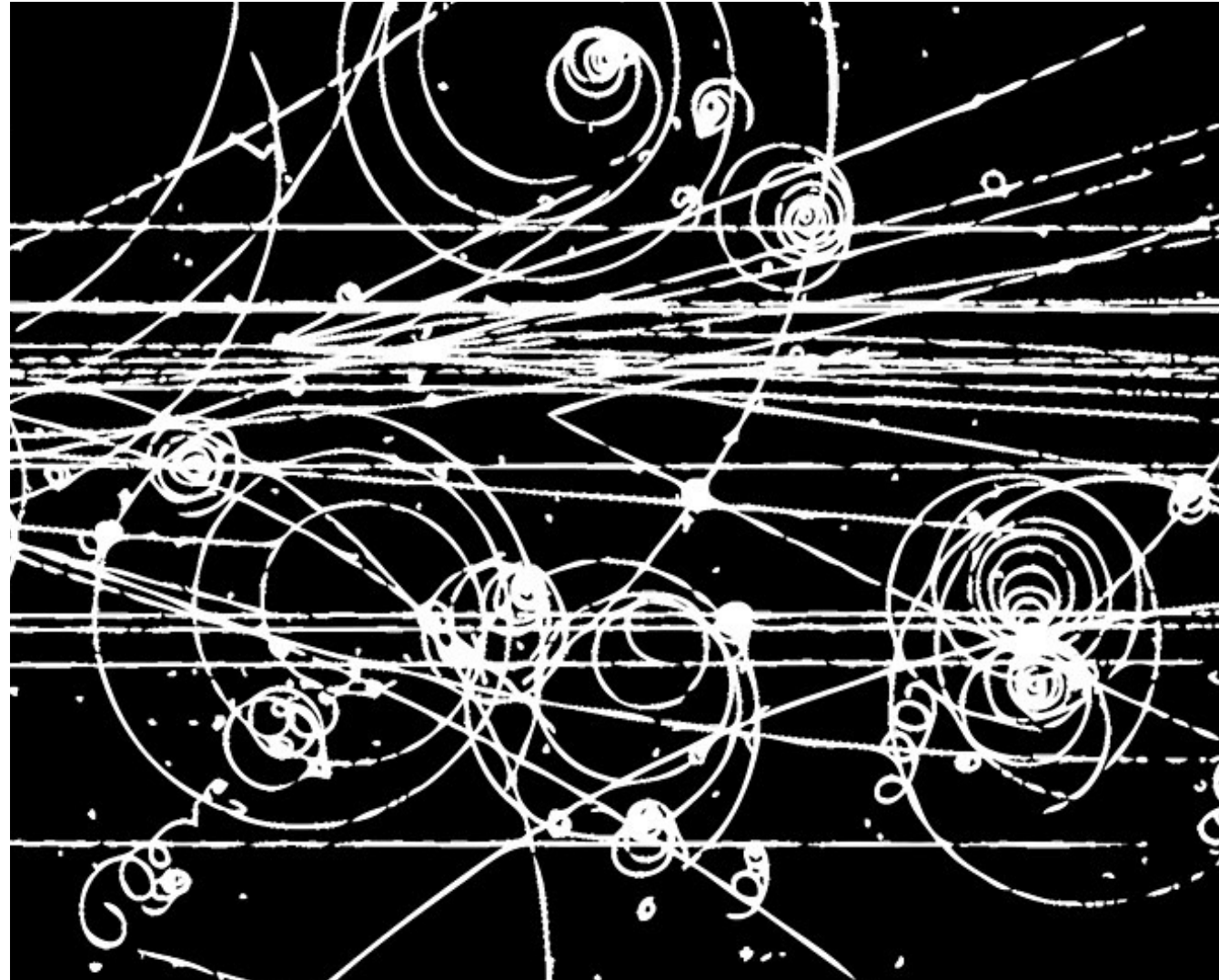
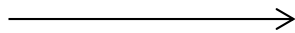
- Anciens (technique photographique)
  - chambre à brouillard
  - chambre à bulles
  - émulsions
- Modernes (technique électronique)
  - chambre proportionnelle multifilaire (MWPC)
  - chambre à dérive
  - chambre à projection temporelle (TPC)
  - détecteur à microstrips (ou pixels) de Si
  - ...

... on en invente encore aujourd'hui

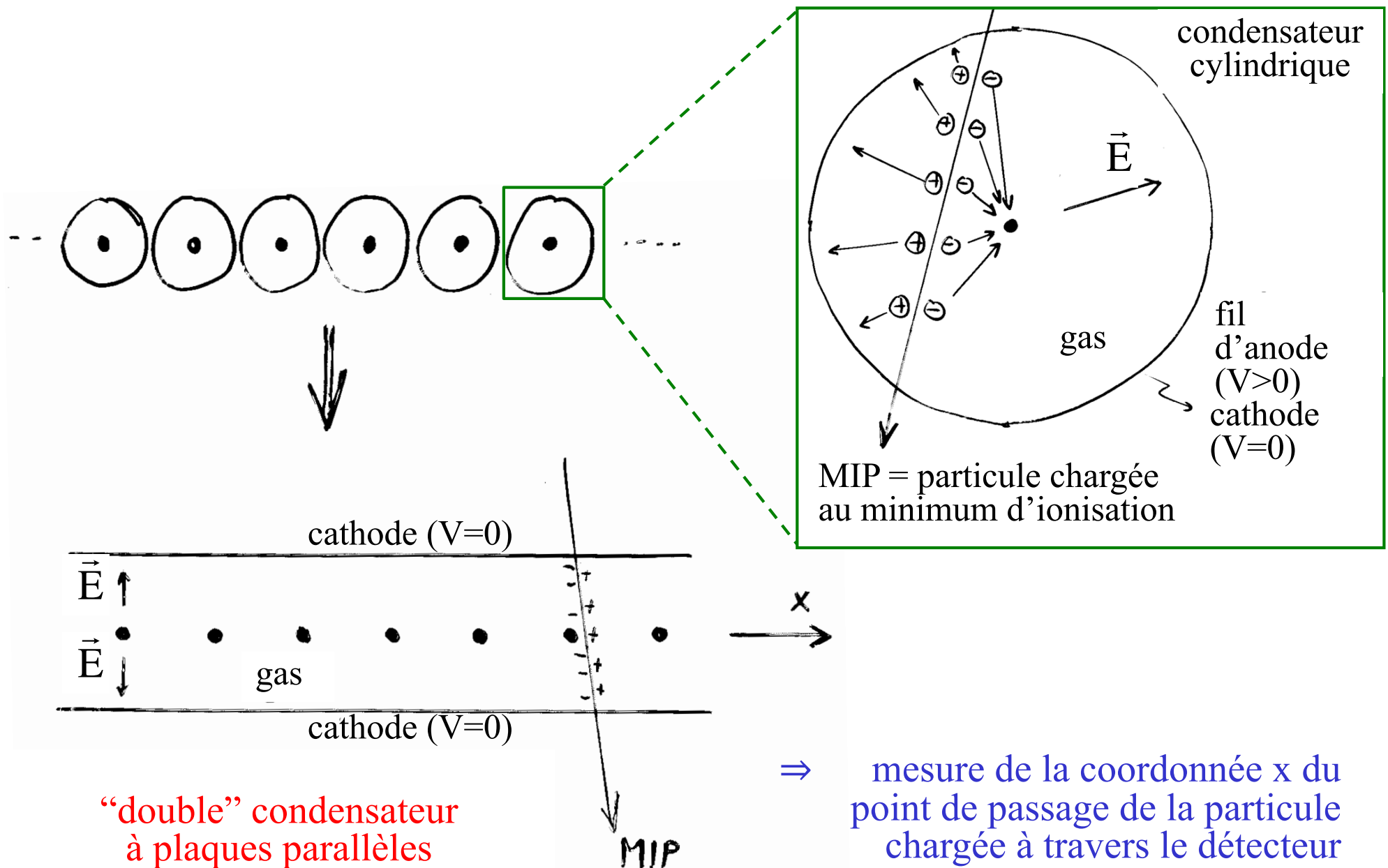
# Photographie dans une chambre à bulles

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

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

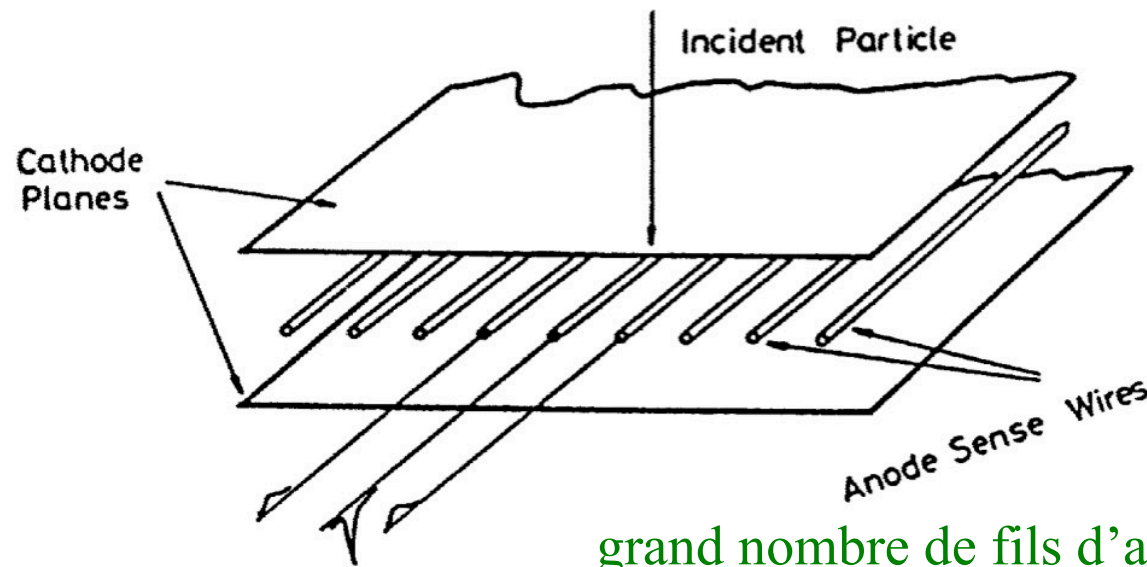


# Chambre proportionnelle multifilaire



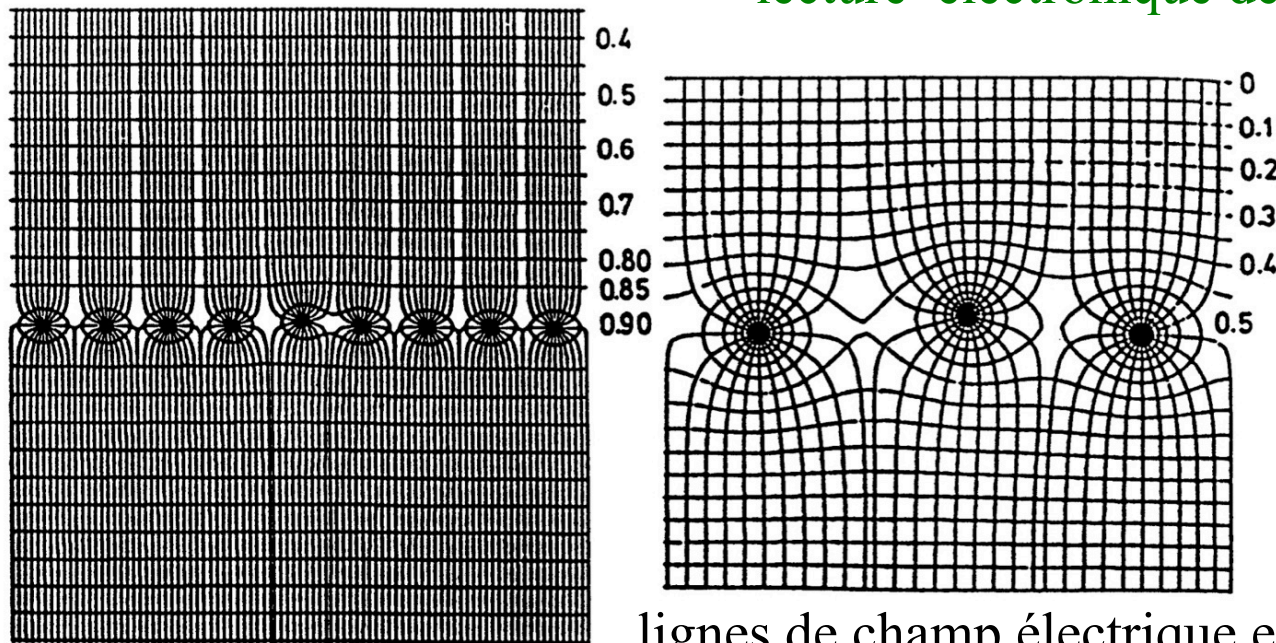


# Chambre proportionnelle multifilaire



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

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

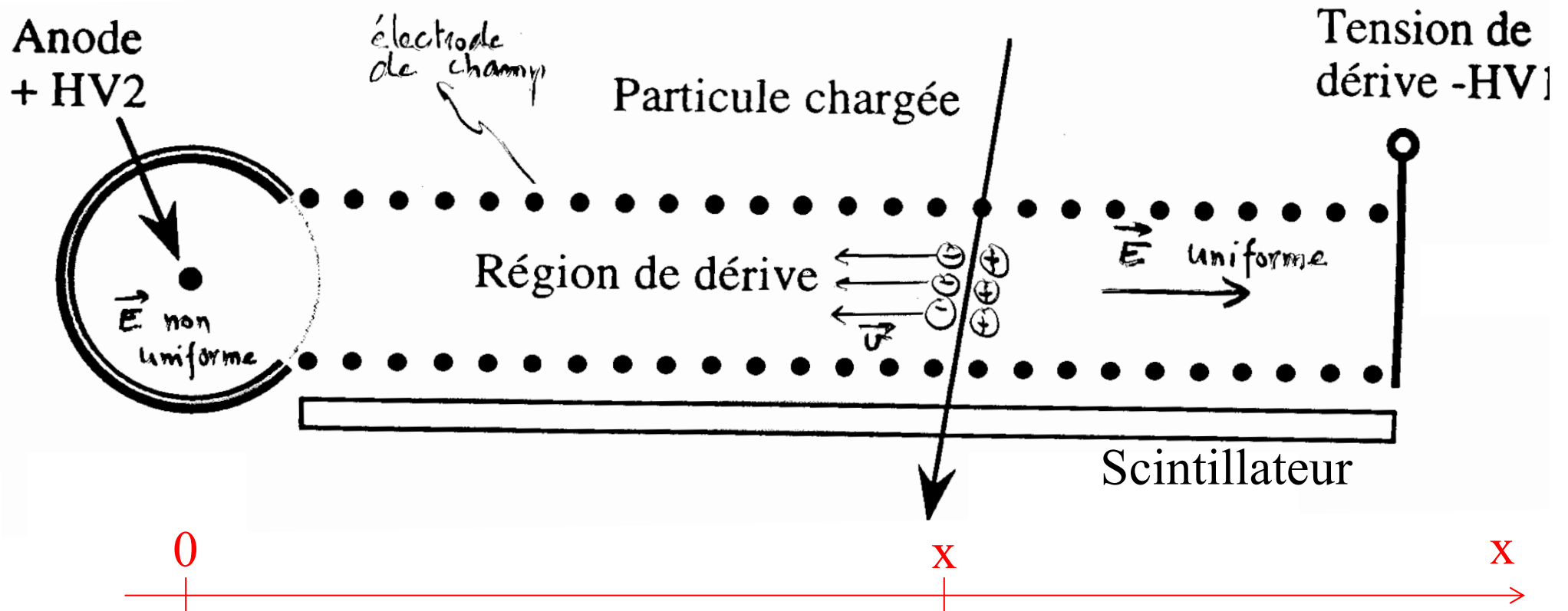


champ électrique  
~uniforme, sauf au  
voisinage des fils  
d'anode où  $E \sim 1/r$

lignes de champ électrique et equipotentiellles



# Chambre à dérivation



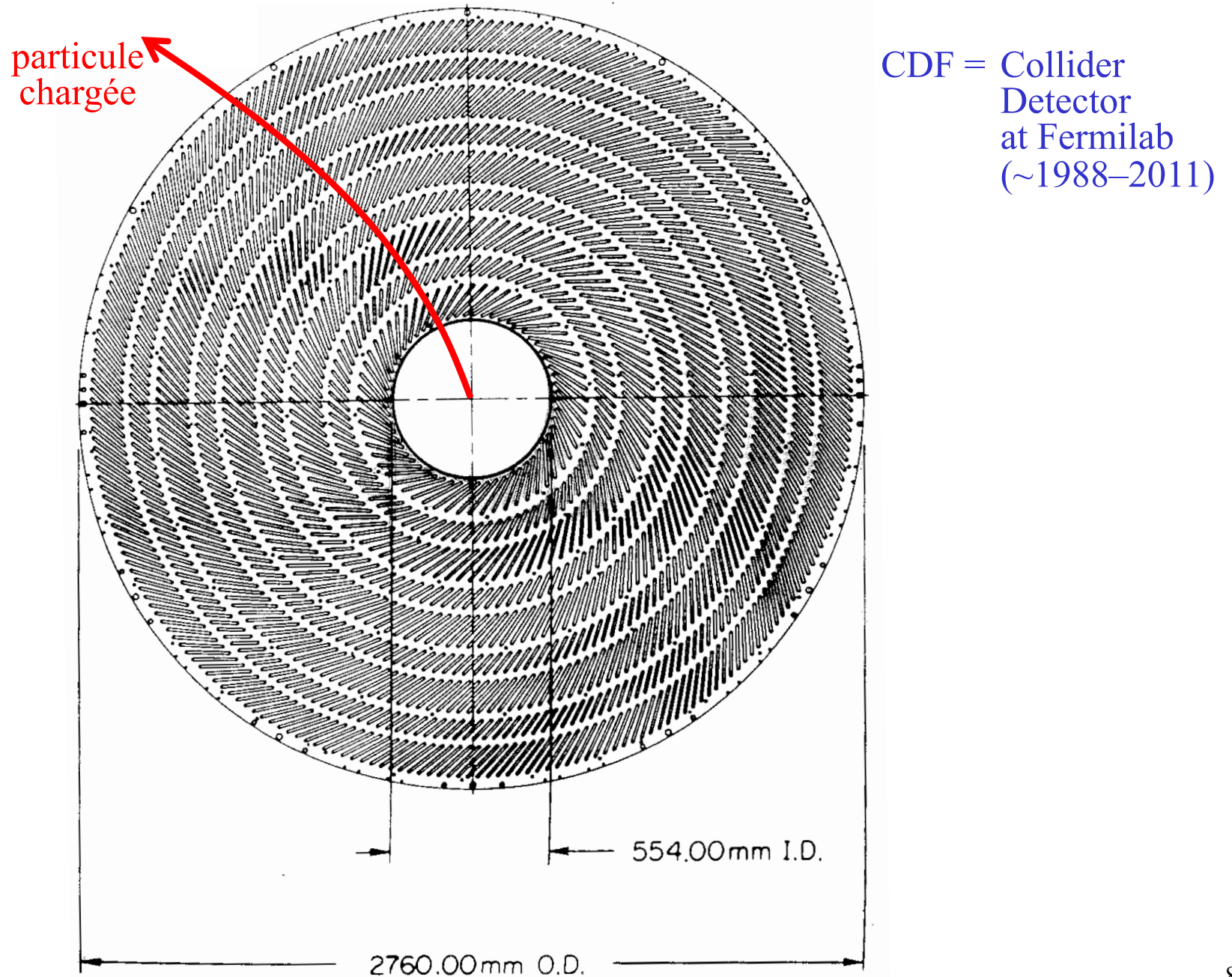
détection  
sur l'anode  
à  $t=\Delta t$  en  $x=0$

détection  
à  $t=0$  en  $x$

$$x = v\Delta t$$

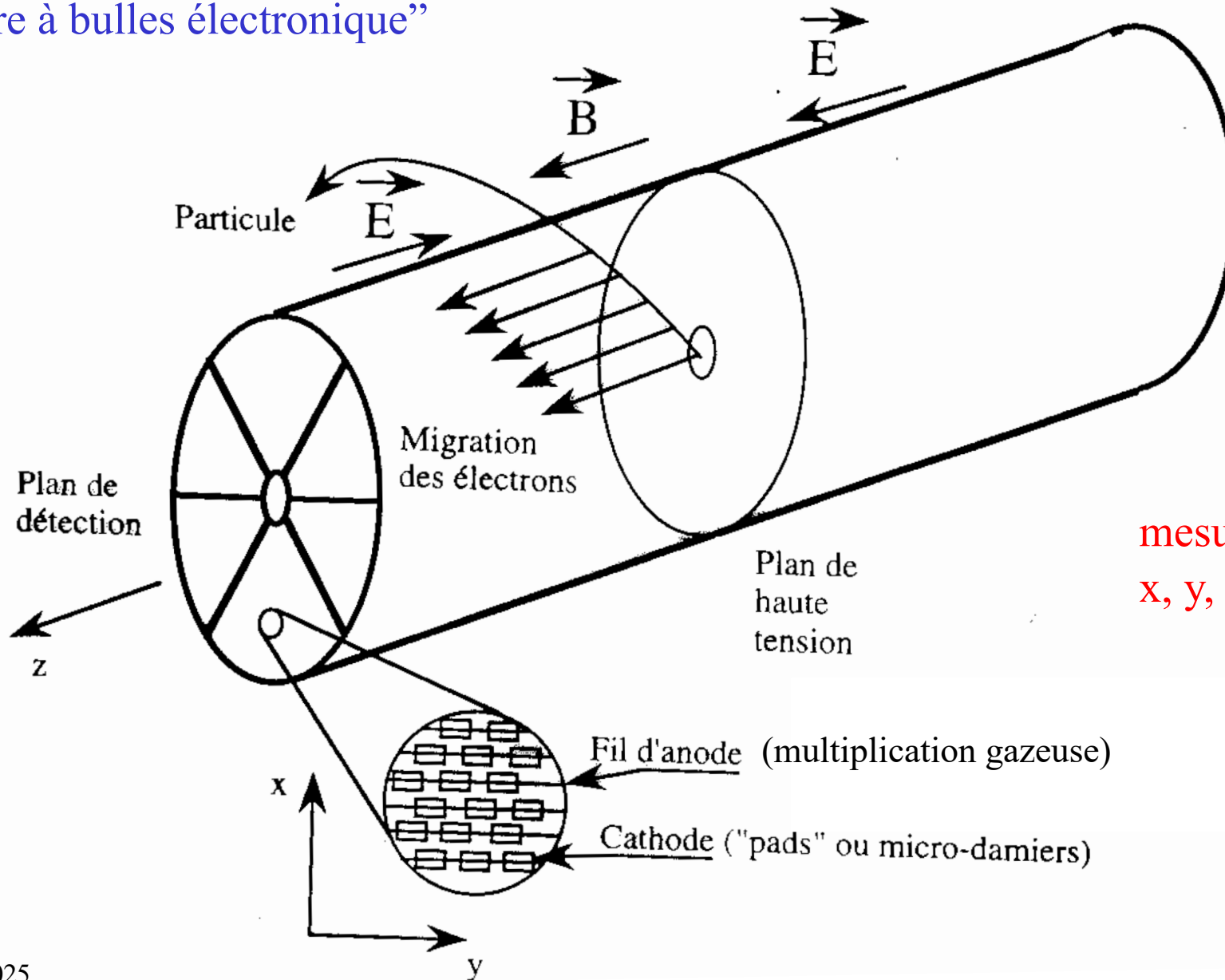
$v$  = vitesse de dérivation des électrons ( $\sim$  constante)

# Chambre à dérivation de CDF



# Chambre à projection temporelle

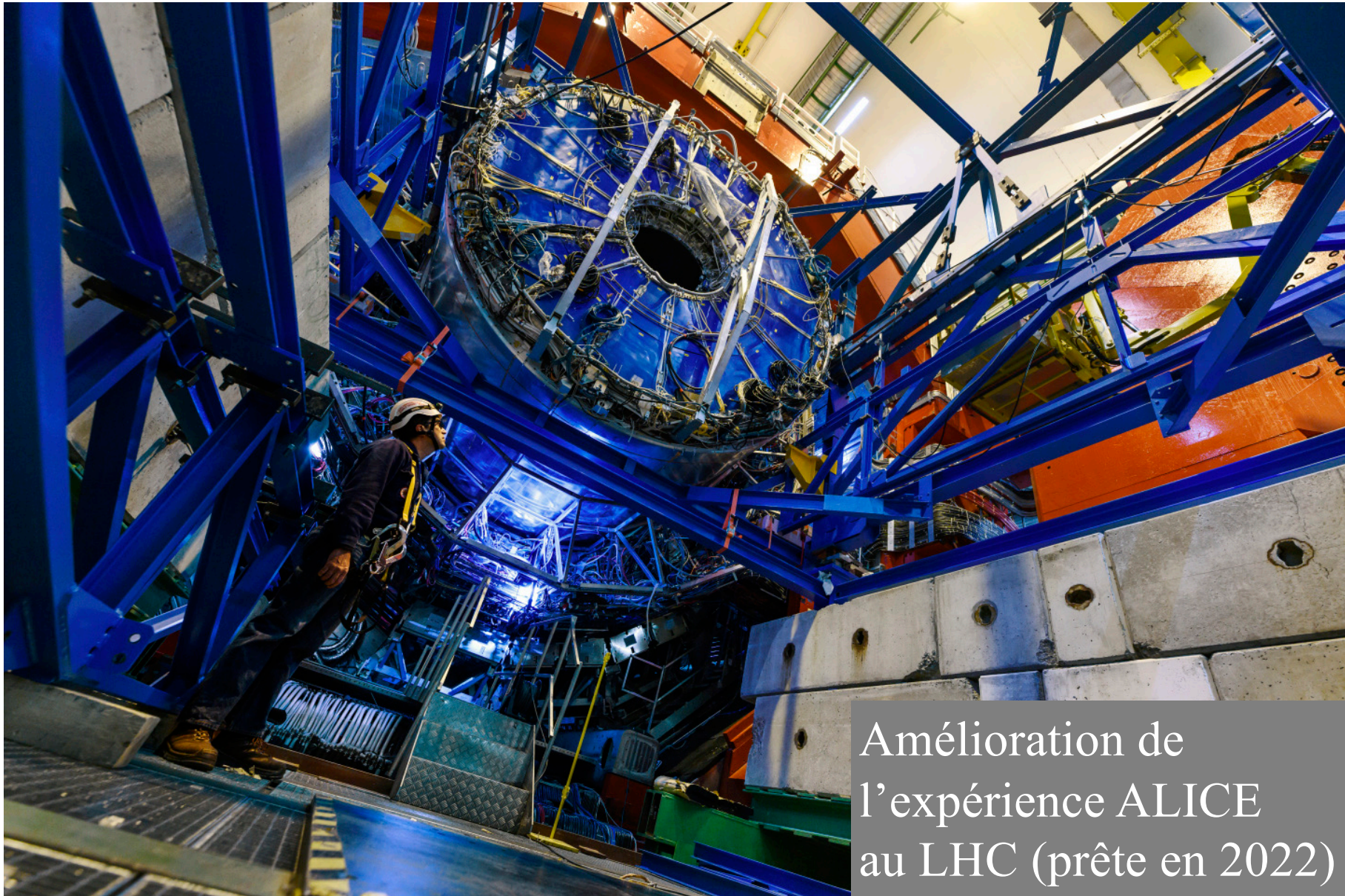
chambre proportionnelle multifilaire + chambre à dérive:  
“chambre à bulles électronique”



mesure:  
 $x, y, z, dE/dx$



# Chambre à projection temporelle



Amélioration de  
l'expérience ALICE  
au LHC (prête en 2022)

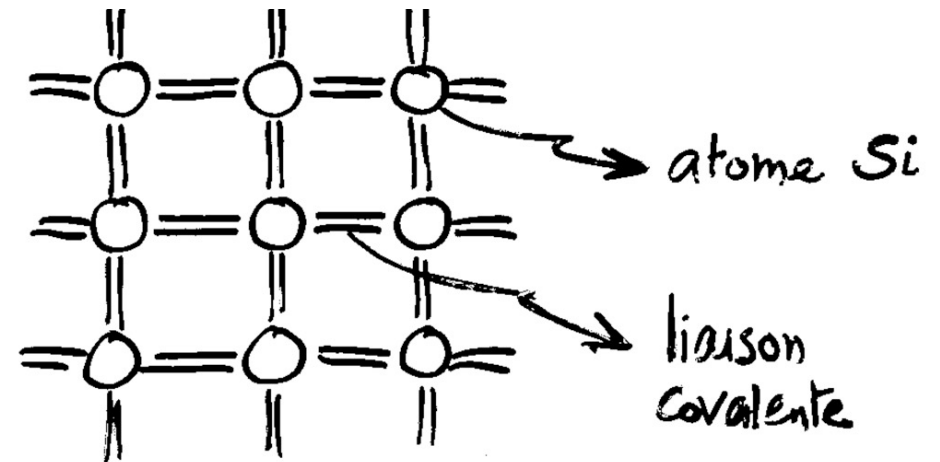
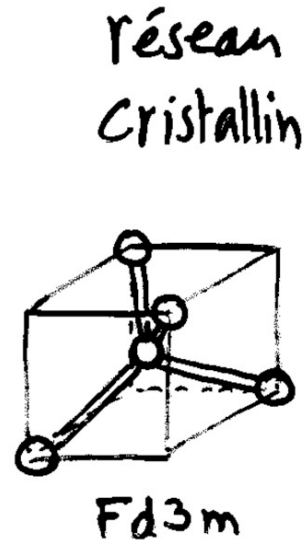
TPC = Time Projection Chamber

# Semi-conducteurs

## Intrinsèque (= pur)

### Type I

- par exemple Si, Ge
- atomes tétravalents

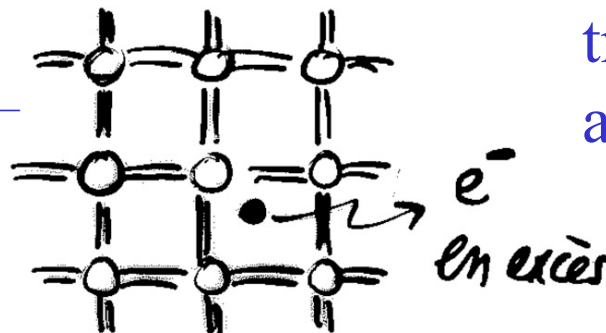


Porteurs de charge libres  
(même pour le type I, qui est  
toujours légèrement de type N)

## Extrinsèque (= dopé)

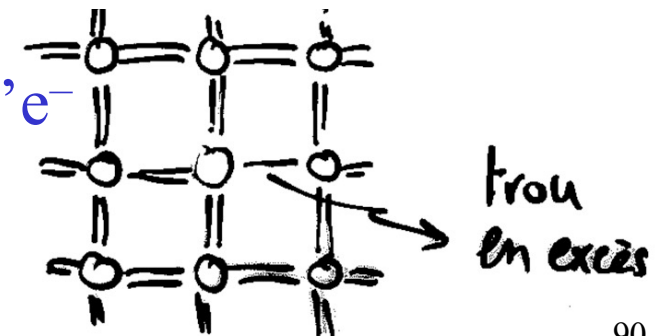
### Type N

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



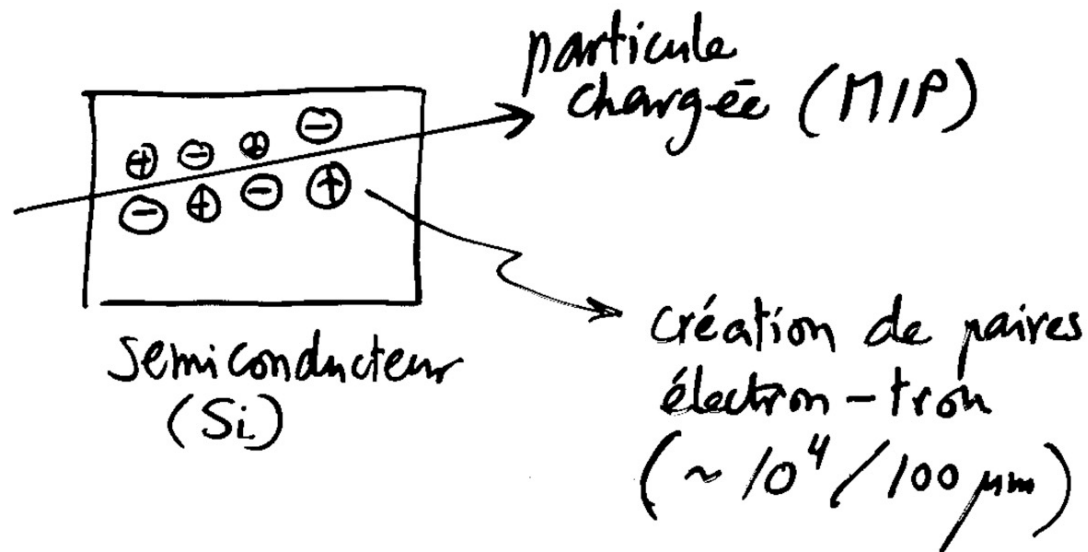
### Type P

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





# Détecteur à semi-conducteur



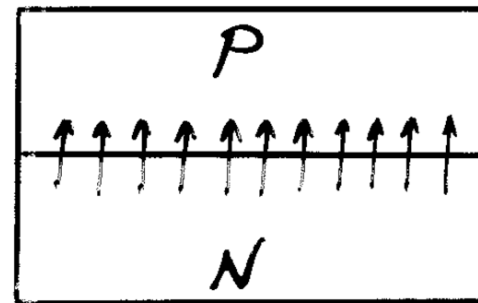
- Avantages sur les détecteurs à gaz:
  - plus compact, pas besoin de haute tension ni de bonbonnes de gaz
  - meilleure résolution
    - Energie pour créer une paire électron-trou (3.6 eV dans le Si)  
bien plus petite que celle pour ioniser un gaz (15–30 eV dans Ar)
- Mais ... un semi-conducteur n'est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

# Jonction P-N

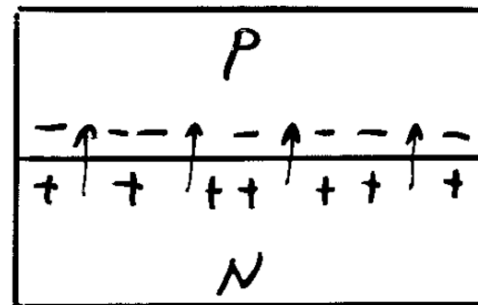
Si type P

Si type N

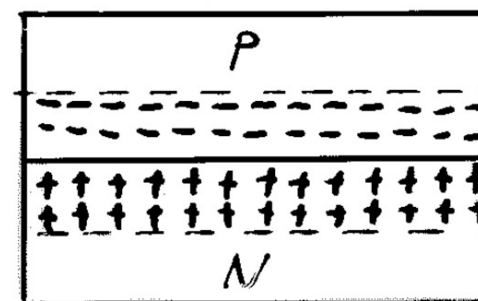
électrons  
↑  
trous  
↓



jonction P-N



$\vec{E}$  ↑

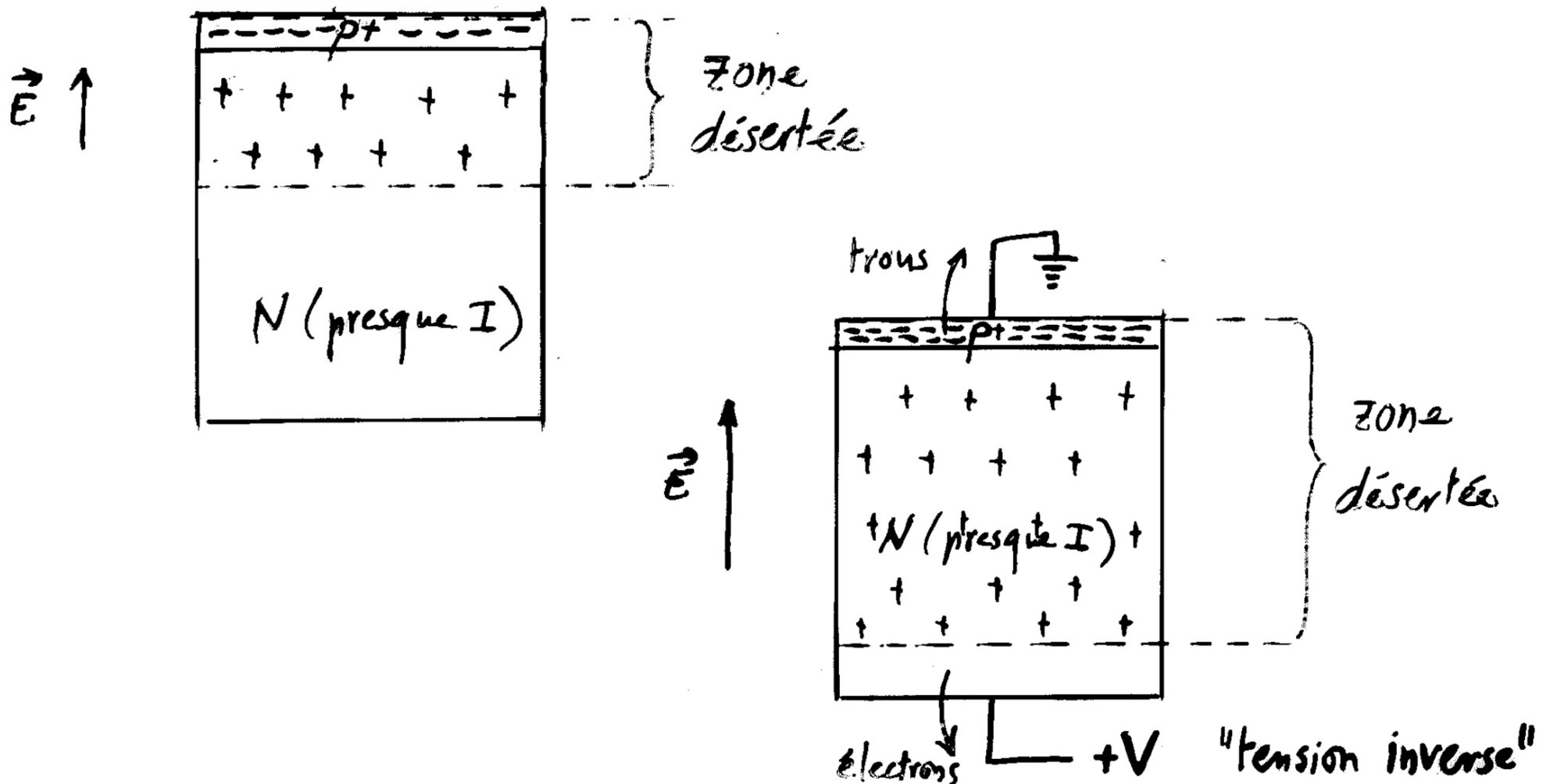


zone désertée  
exempte de  
charges mobiles



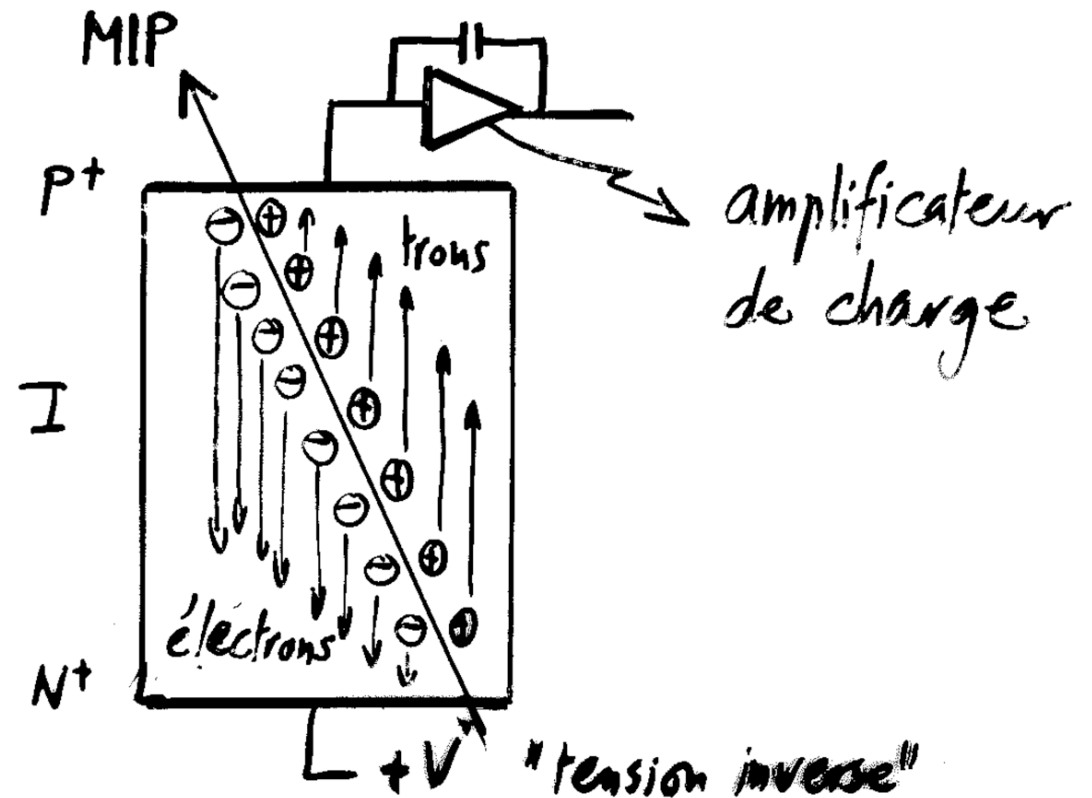
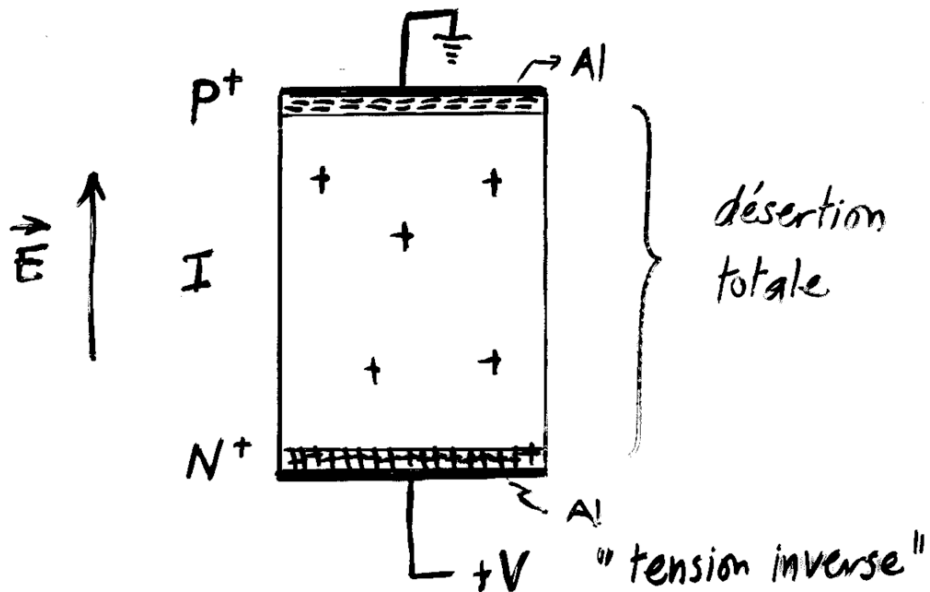
# Jonction P-N

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

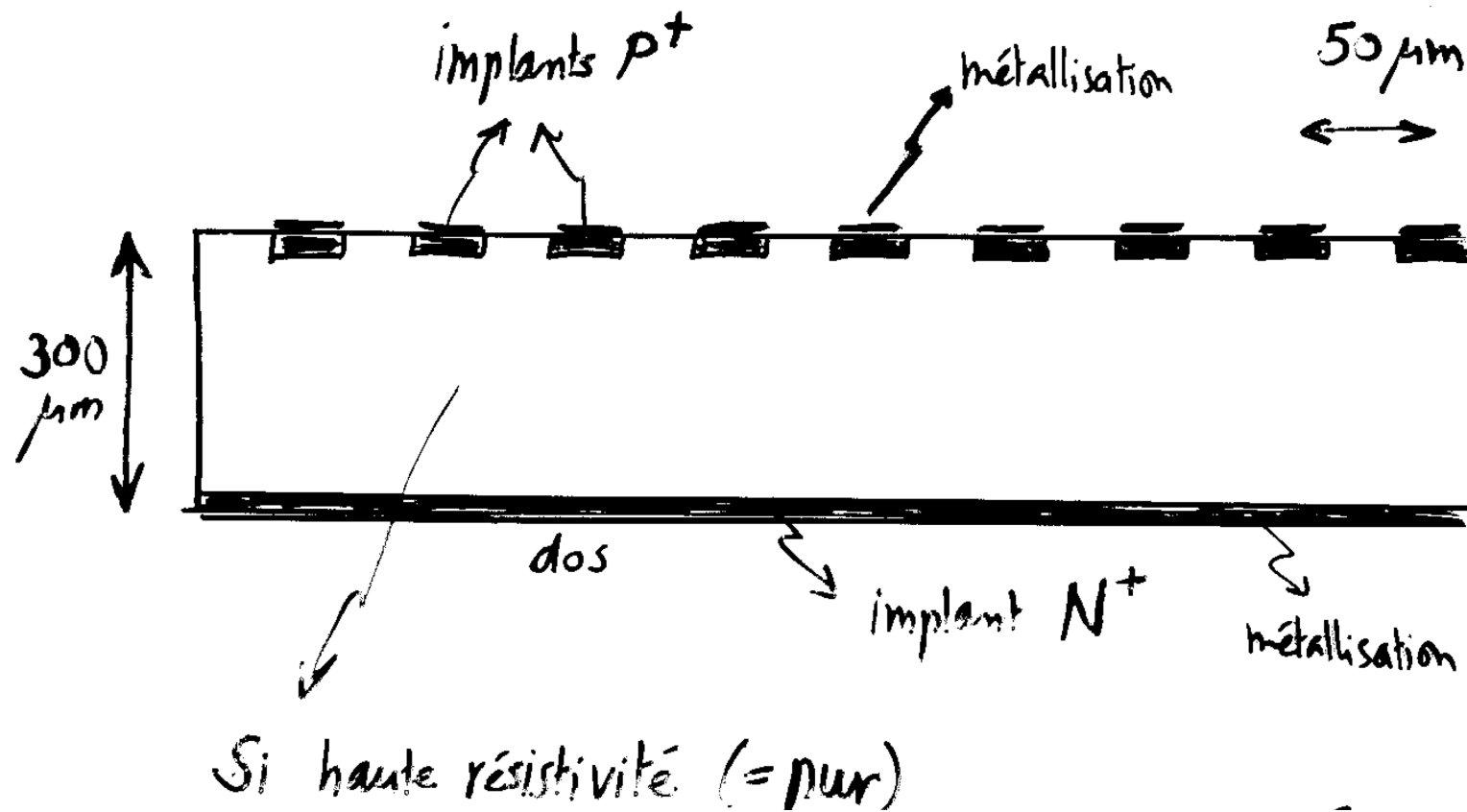


# Diode PIN

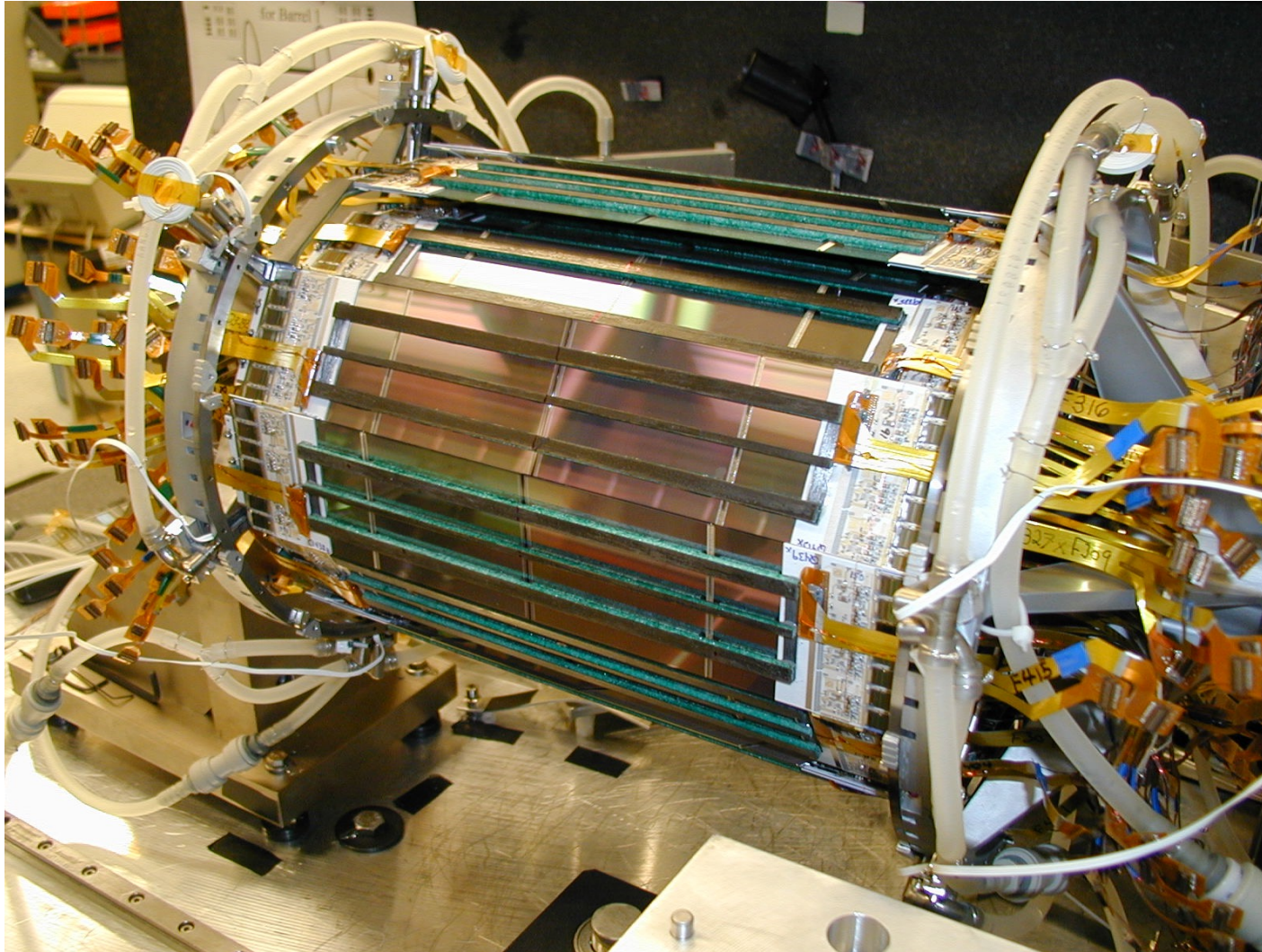
- Jonction P–N avec fort dopage N sur l'autre face (N<sup>+</sup>)
- Métallisation des deux faces (contact ohmique)



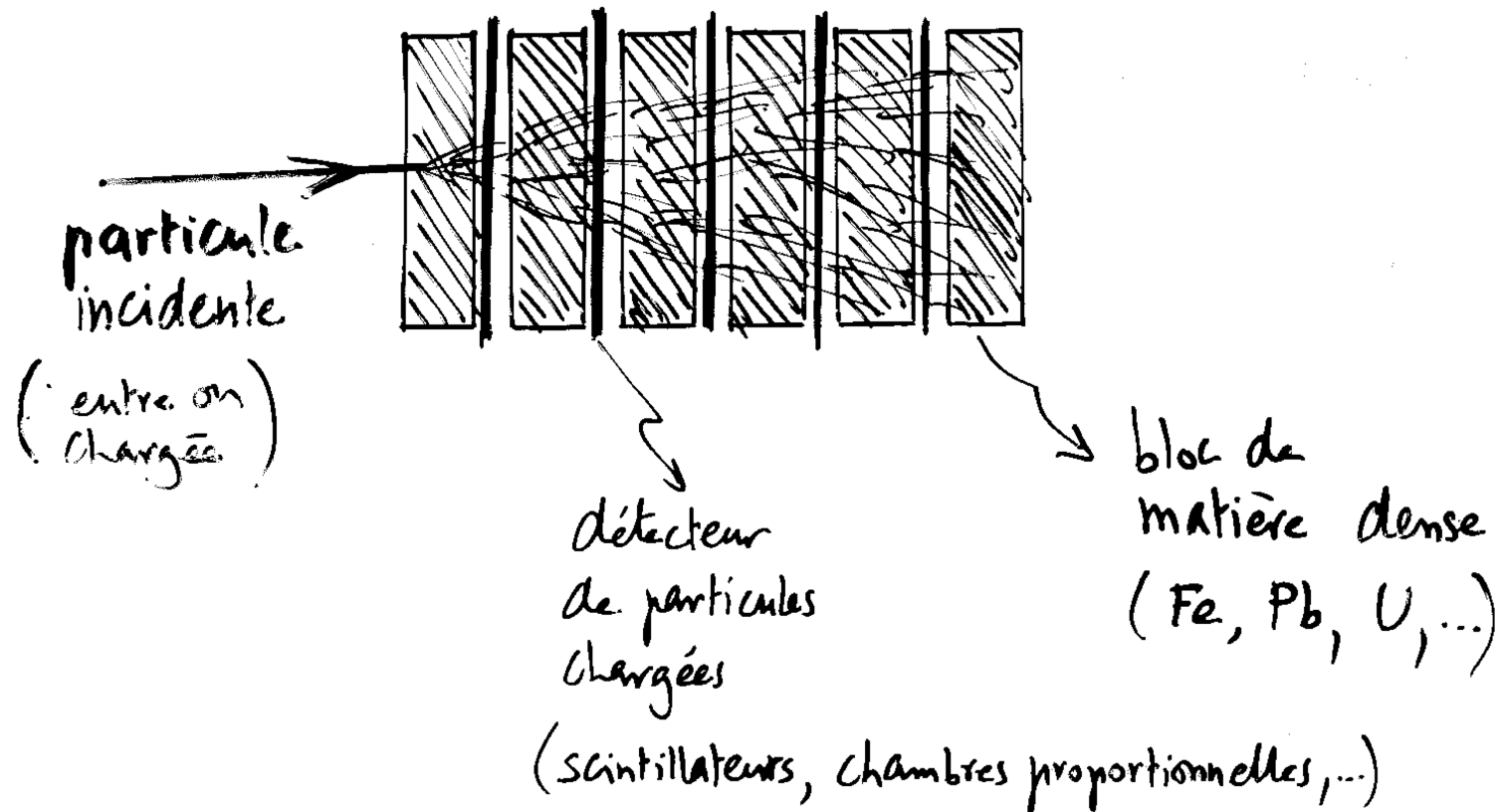
# Détecteur Si à micro-bandes



# Détecteur de vertex de CDF



# Calorimètres



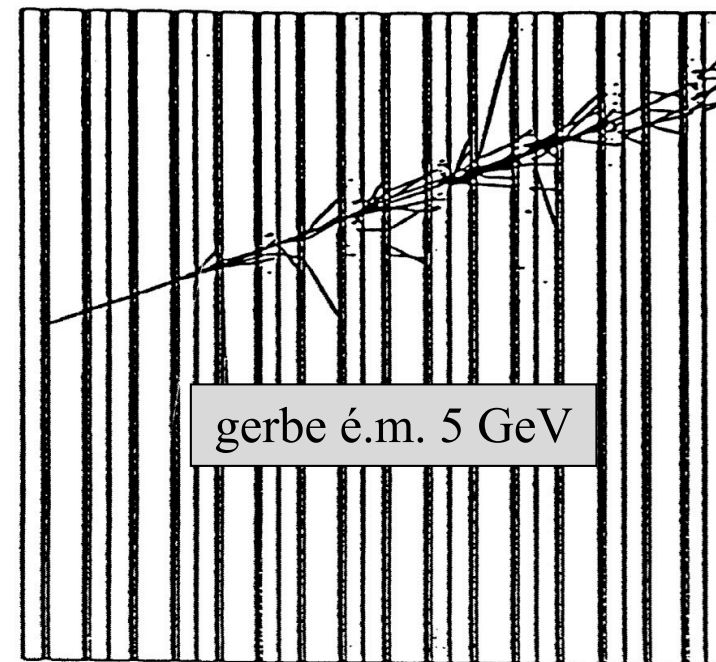
- Un bon calorimètre doit être assez épais pour stopper la particule incidente et contenir toute la gerbe
- **Mesures:** énergie déposée par la particule, position de la gerbe, forme de la gerbe (profondeur, extension latérale)



# Calorimètres

- **Calorimètre électromagnétique**

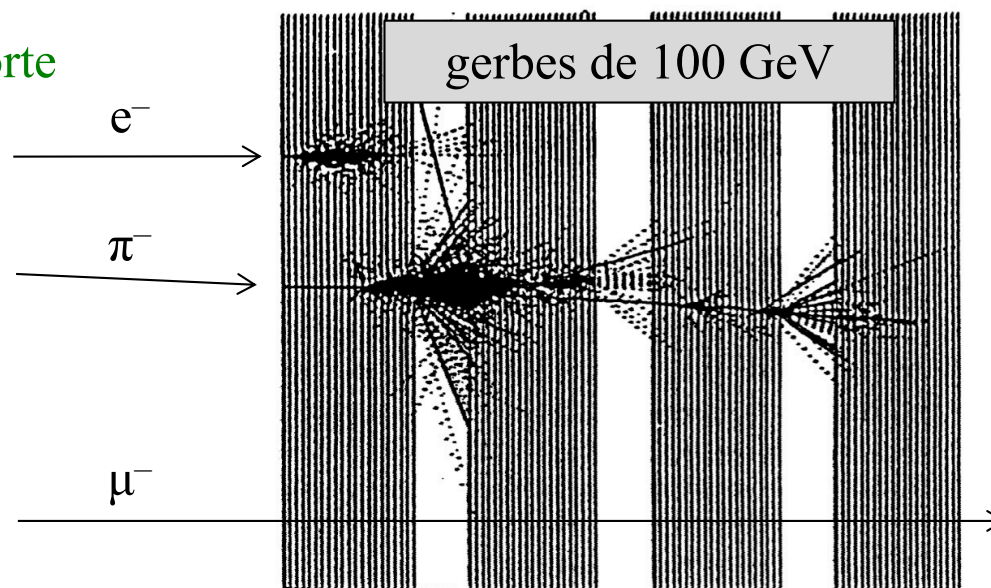
- détection de photons, électrons, positons qui forment des gerbes électromagnétiques
- également  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- épaisseur  $> 20 X_0$   
( $X_0$  = longueur de rayonnement)



- **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  $\pi^0$
- épaisseur  $> 5 \lambda$   
( $\lambda$  = longueur d'absorption  
nucléaire  $\sim 1/\sigma_{\text{abs}}$ )

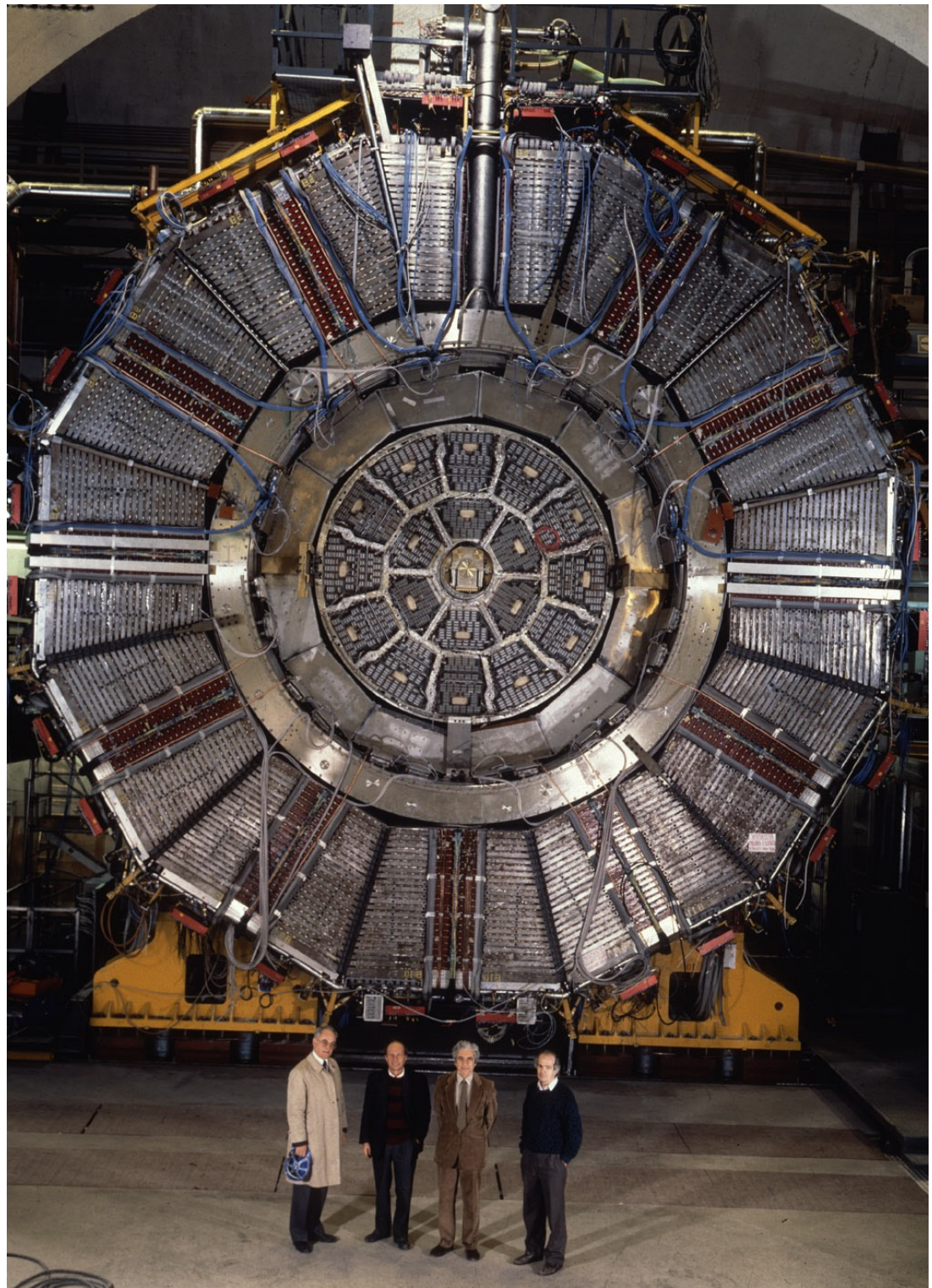




# Détecteur ALEPH

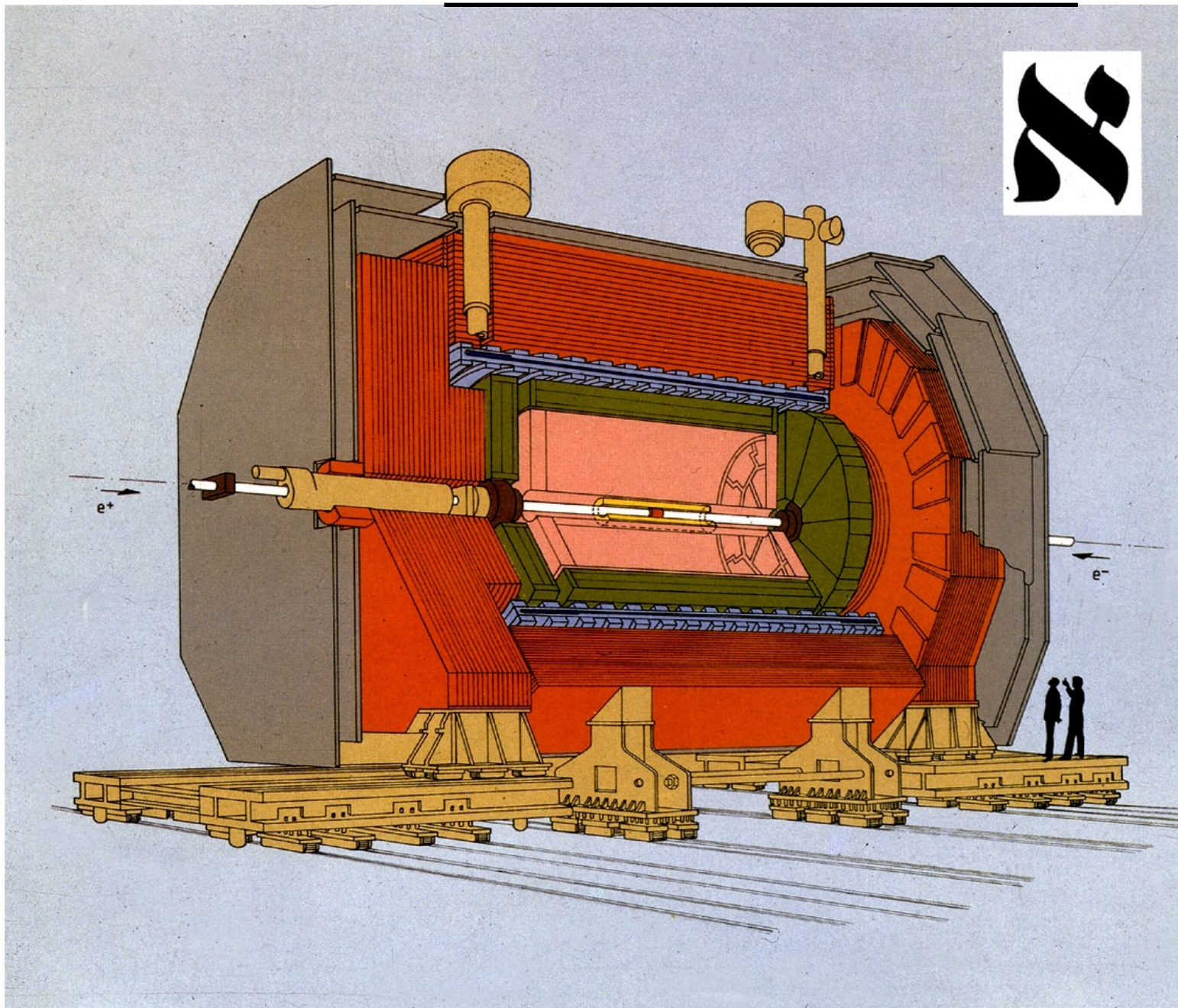
Expérience ALEPH  
au LEP (1989–2000)









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





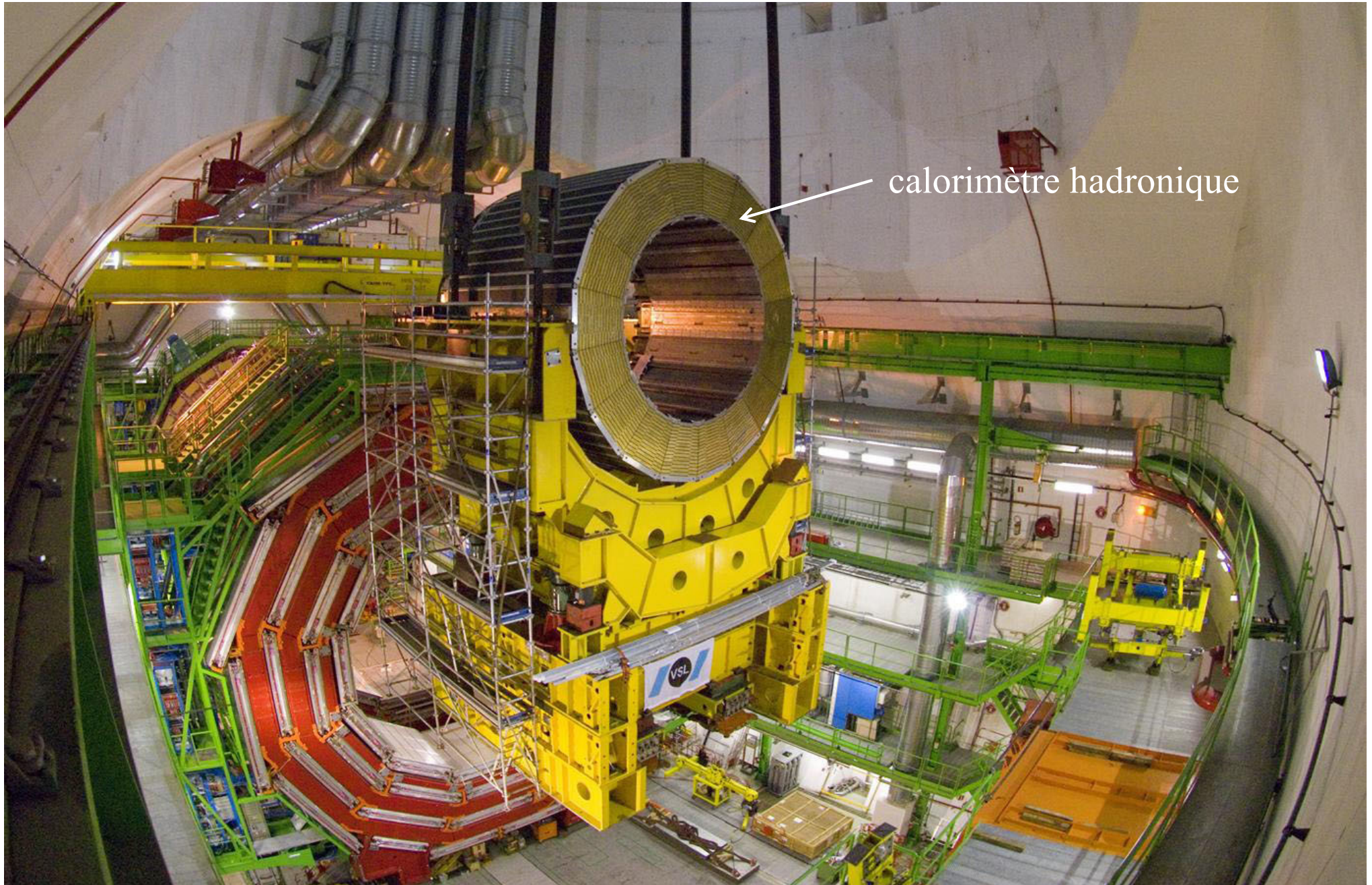
# Détecteur ALEPH



-  Vertex Detector
-  Inner Track Chamber
-  Time Projection Chamber
-  Electromagnetic Calorimeter
-  Superconducting Magnet Coil
-  Hadron Calorimeter
-  Muon Detection Chambers
-  Luminosity Monitors

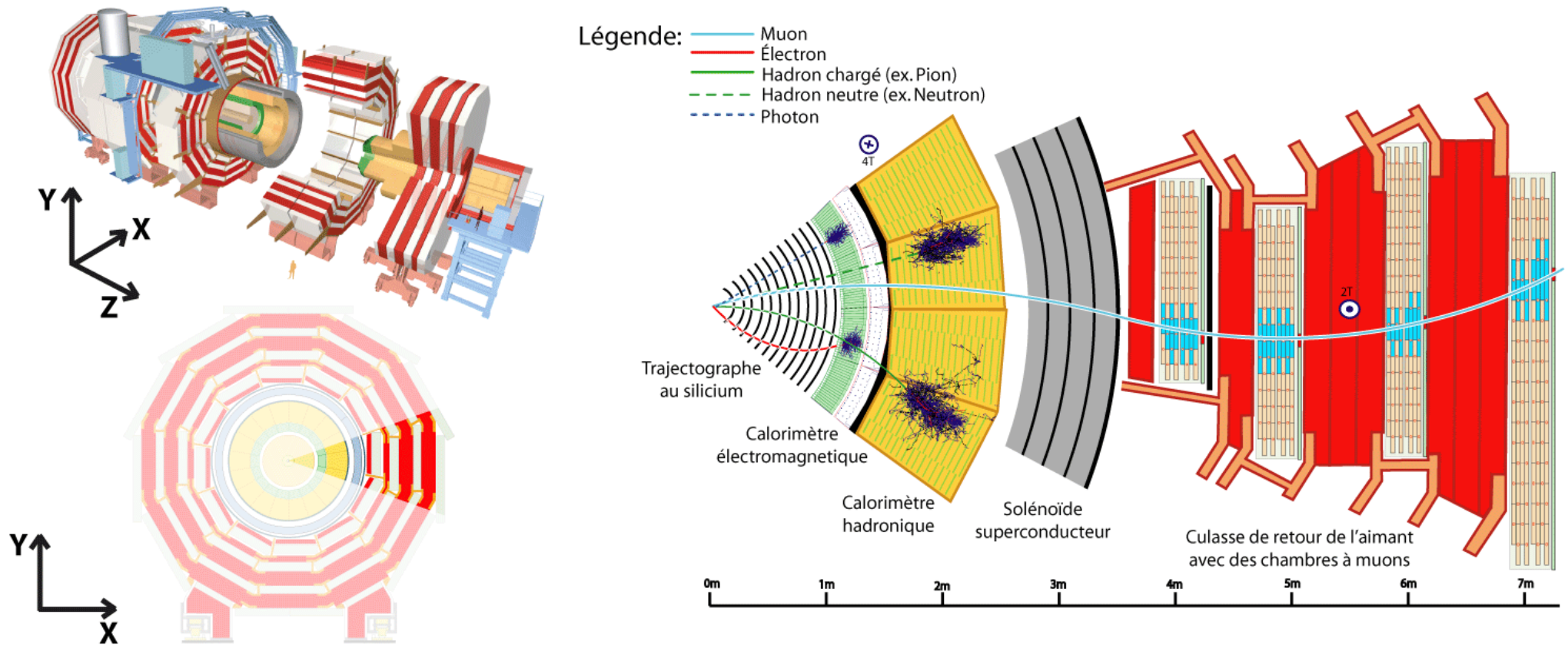


# Détecteur CMS au LHC (depuis 2008)





# Détecteur CMS au LHC (depuis 2008)



# Chapitre 4: Accélérateurs

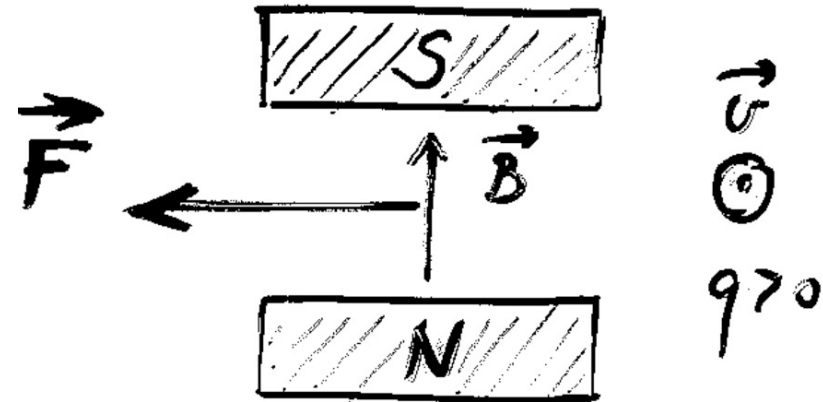
- Il faut des faisceaux de plus en plus énergétiques et intenses pour:
  - sonder la matière sur des distances de plus en plus petites ( $\lambda = h/p$ )
  - produire de nouvelles particules massives (réelles)
  - explorer des phénomènes rares (avec des sections efficaces très petites)
- Il faut donc 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  $\mu^\pm$  ( $\tau \sim 2 \mu s$ )
- 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:  $\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$

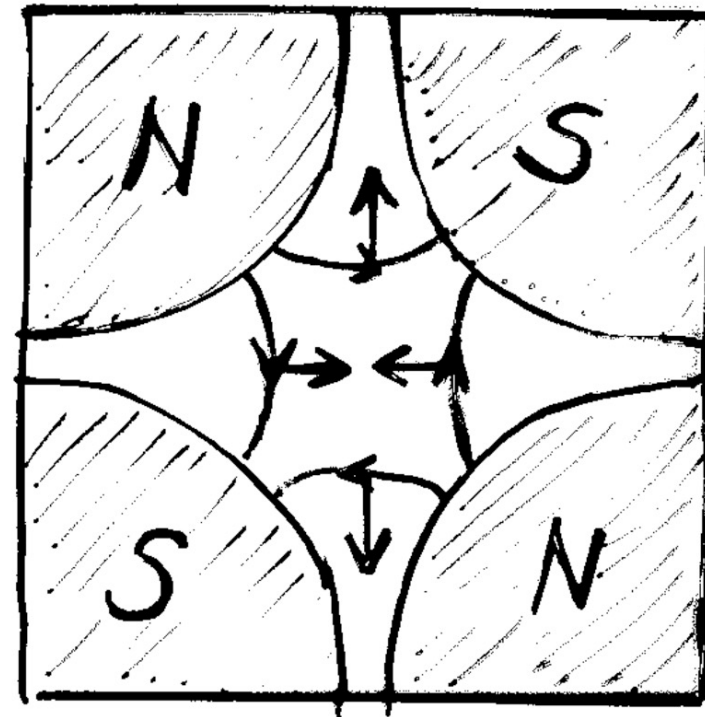
- **Déflexion**

- aimants dipolaires
- tout le faisceau dévié dans la même direction

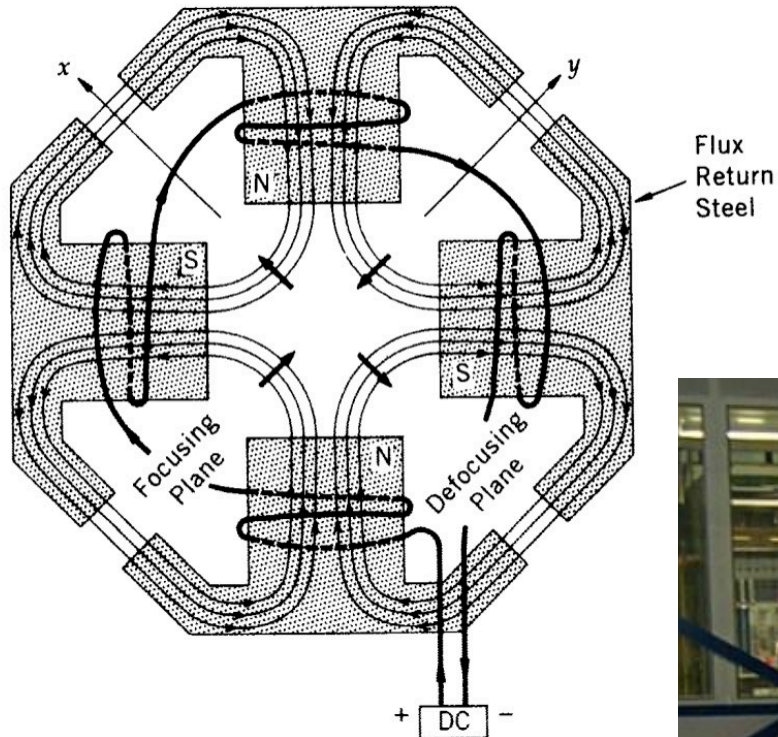


- **Focalisation**

- 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

