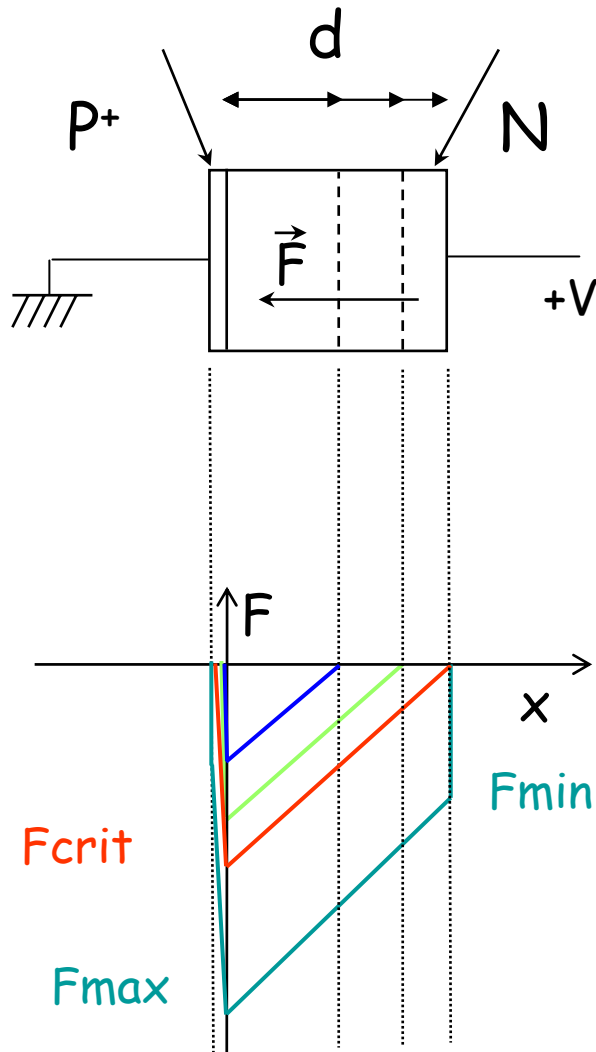


# Technologie des détecteurs

---

Quelques détecteurs silicium et germanium

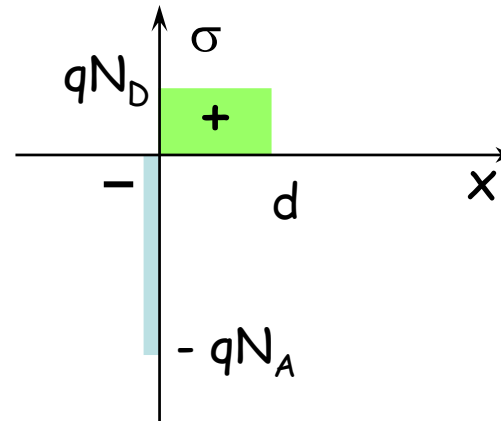
# Le détecteur est une jonction abrupte P<sup>+</sup>N



$d$  : épaisseur de la jonction  $\rightarrow$  détecteur

$$x_p = 0$$

$$x_n = d$$



- déplétion partielle
- **déplétion complète ( $F_{crit}$ )**
- **surdéplétion ( $F_{min}$ ,  $F_{max}$ )**

# Les expressions simplifiées

$$x_p = 0 \quad x_n = d$$

$$V_0 = \frac{qN_D}{2\varepsilon} d^2$$

$$d = \sqrt{\frac{2\varepsilon}{qN_D} V_0}$$

$$F_{\text{crit}} = \frac{qN_D}{\varepsilon} d = \frac{2V_0}{d}$$

$$F_{\text{min}} = \frac{V - V_0}{d}$$

$$F_{\text{max}} = \frac{V + V_0}{d}$$

$$C = \frac{\varepsilon}{d} \times S$$

pour le silicium

$$V_0(V) \sim 4 \frac{d^2_{(\mu\text{m})}}{\rho(\Omega.\text{cm})}$$

$$d \sim \frac{1}{2} \sqrt{\rho \cdot V_0}$$

$$F_{\text{max}(V/\text{cm})} \sim 4.10^4 \sqrt{\frac{V_0}{\rho}}$$

$$C_{(\text{pF} / \text{mm}^2)} = \frac{106}{d}$$

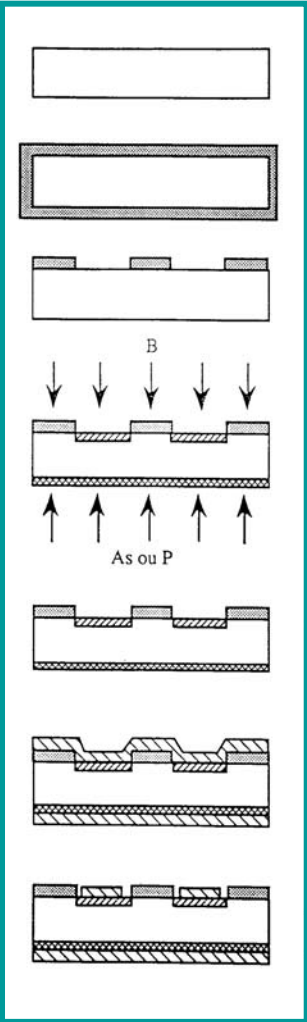
# Les détecteurs silicium

---

-> surtout pour les particules chargées

-> parfois pour des photons

# Le détecteur passivé et implanté

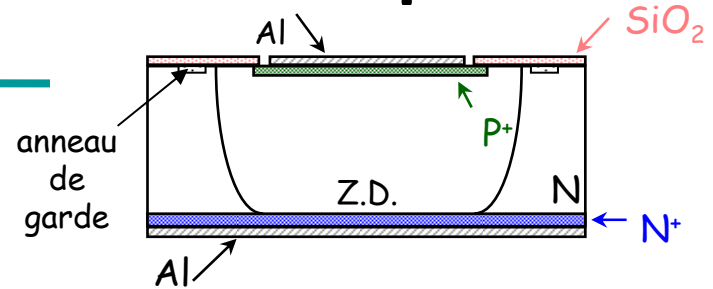


- Wafer de Si type N de haute résistivité ( $> 1000\Omega.cm$ )
- Oxydation à  $\sim 1000^\circ C$  (200 nm)
- Gravure de l'oxyde
  - Dépôt de résine
  - Masque
  - Insolation
  - Etching
- Implantation ( $\sim 50nm$ )
  - Bore ( $15 keV - 5.10^{14}cm^{-2}$ )  $\rightarrow P^+$   $\rightarrow$  jonction
  - Phosphore ( $30 keV - 2.10^{15} cm^{-2}$ )  
ou As ( $30 \text{ à } 170 keV - \sim 10^{16} cm^{-2}$ )  $\rightarrow N^+$   $\rightarrow$  ohmique
- Recuit sous  $N_2$  ( $800 \text{ à } 900^\circ C$ )
- Évaporation d'aluminium ( $\sim 100 nm$ )
- Éventuellement :
  - Gravure de l'Al
  - passivation

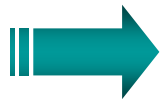


➡ Détection des ions légers et lourds

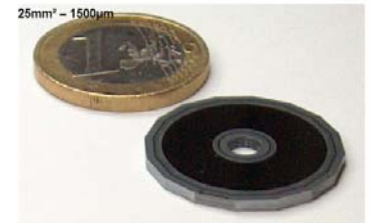
# Le détecteur passivé et implanté



- Structure générale :
  - Fenêtre d'entrée : Si(P<sup>+</sup>) + aluminium (jonction)
  - Fenêtre de sortie : Si(N<sup>+</sup>) + aluminium (contact ohmique)
  - Structure de garde (1 à plusieurs anneaux de garde) qui limite les injections de courant provenant des bords
  - Passivation sur les zones non actives



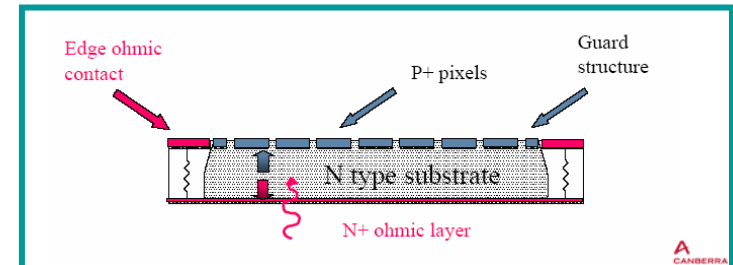
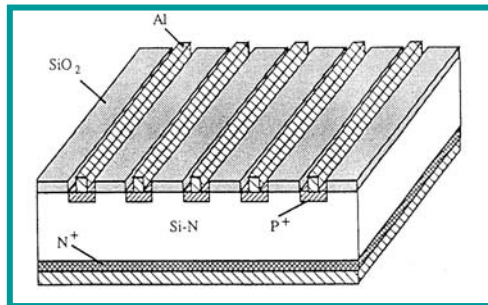
- Procédés industriels
- Wafers de 4, 5 et 6 pouces
- Épaisseurs de 30 à 2000  $\mu\text{m}$  (suivant les constructeurs)



# Le détecteur segmenté simple et double face

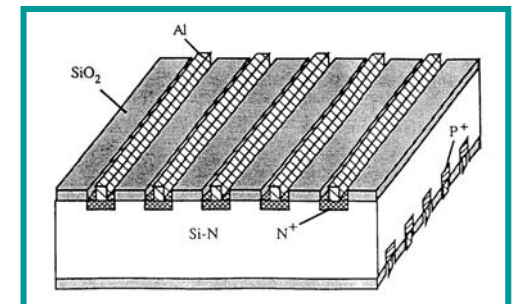
## simple face

- localisation à une dimension
- les pistes ont leur propre électronique de lecture
- les pistes sont isolées par des interpistes passivées ( $\text{SiO}_2$ )



## double face

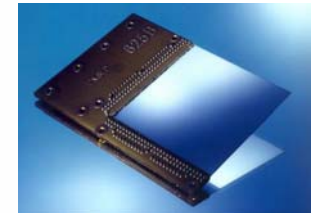
- localisation à deux dimensions
- les pistes  $\text{N}^+$  sont isolées par des pistes  $\text{P}^+$
- augmentation des voies de lecture



# Le détecteur segmenté simple et double face

- Géométries variées qui se traduisent par la réalisation de masques assez coûteux
- Les dimensions des « segments » sont assez larges ( $> 500 \mu\text{m}$ )
- Compromis entre les voies de lecture et les résolutions spatiales nécessaires

$60 \times 60 \text{ mm}^2$   
 $300 \mu\text{m}$  (60x60 pistes)

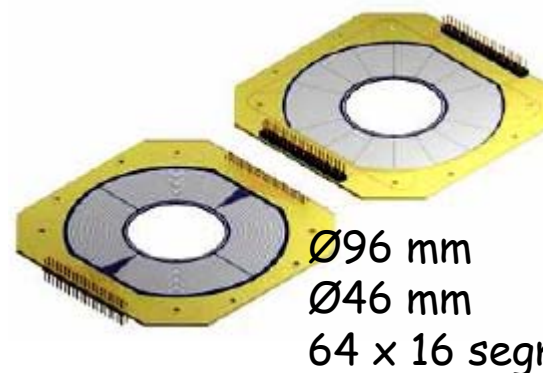
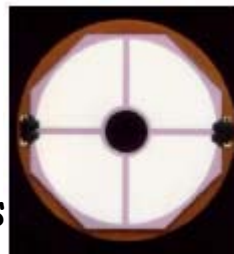


16 segments/ dia 20mm/ 1500 $\mu\text{m}$



$60 \times 40 \text{ mm}^2$   
 $100 \mu\text{m}$

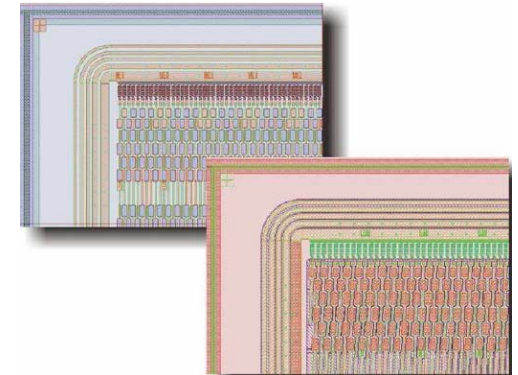
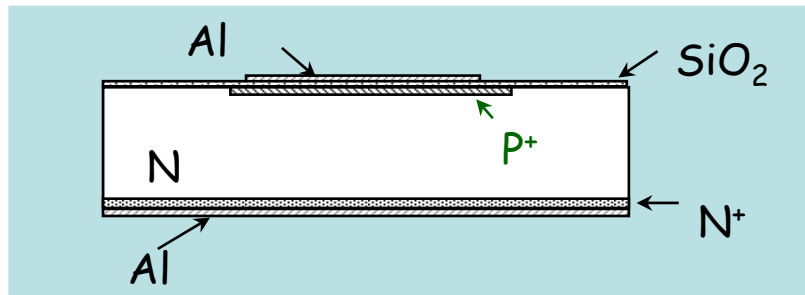
$\text{Ø}35 \text{ mm}$   
 $\text{Ø}10 \text{ mm}$   
4 segments





# et en physique des particules!

- Permet de la matière à la surface du détecteur, et la connectique sur les surfaces (capacité et résistance directement sur la surface du détecteur)

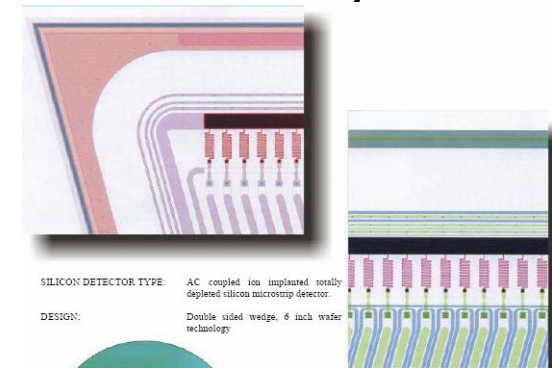


- Mais cela constitue une zone morte pour les particules chargées en physique nucléaire

Ex : 1  $\mu\text{m}$  de SiO<sub>2</sub>

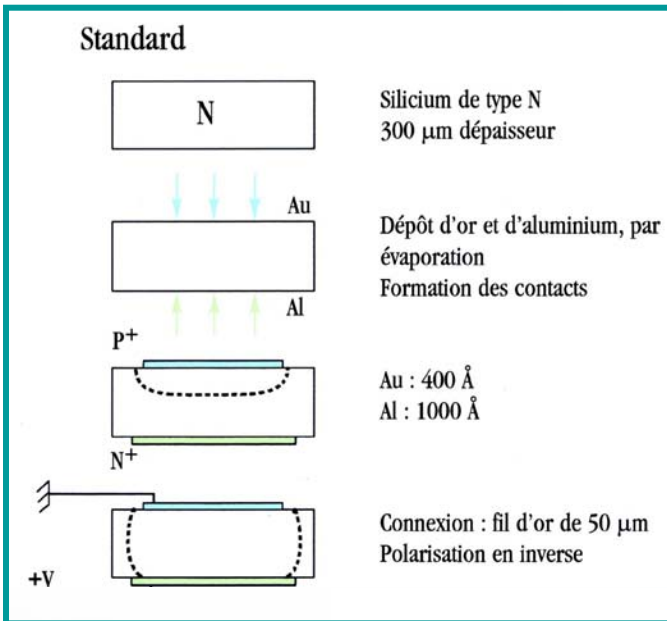
Un proton de 5 MeV perd  $\sim 10$  keV

Un alpha de 5.5 MeV perd  $\sim 100$  keV

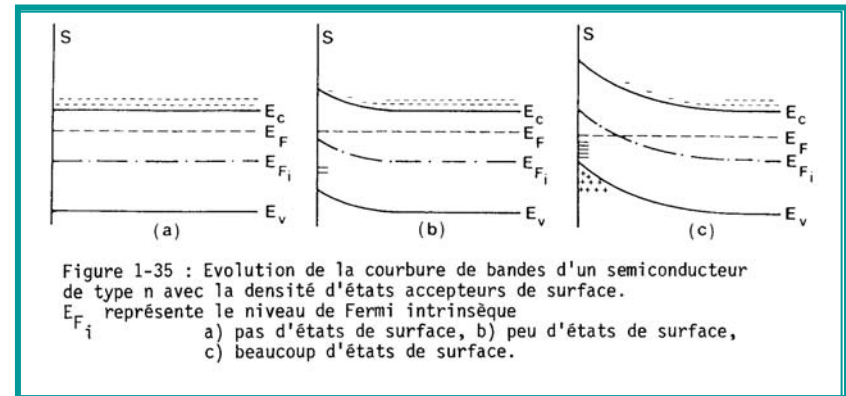


SILICON DETECTOR TYPE: AC coupled ion implanted totally depleted silicon microstrip detector.  
DESIGN: Double sided wedge, 6 inch wafer technology

# Le détecteur à barrière de surface



- La jonction se fait par un contact métallique (barrière Schottky): Au-Si
- Les états de surface sont alors de type p+



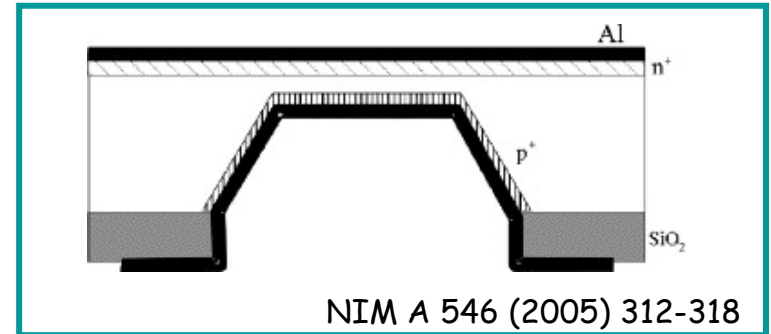
- Le contact arrière Al-Si est de type N+



Procédés encore utilisés en laboratoire, détection des ions lourds

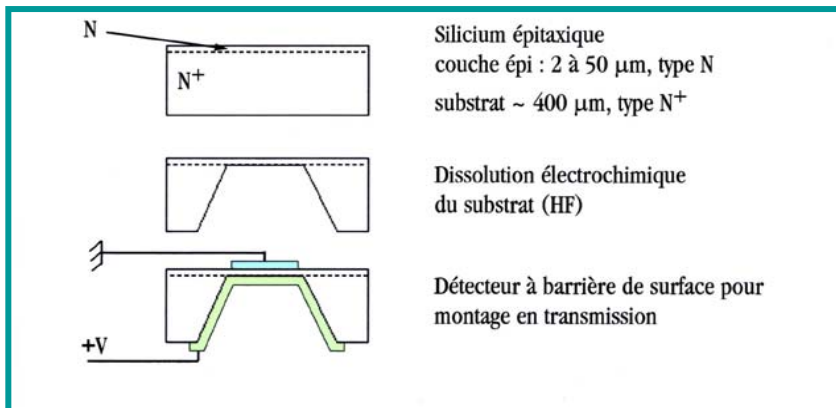
# Le détecteur aminci

- L'amincissement se fait par
  - Abrasion mécanique : long et coûteux
  - Dissolution anisotrope :
    - TMAH - 80°C- 14h
    - $\langle 100 \rangle$



- Électrolyse du silicium épitaxié :
  - dissolution sélective du substrat de type N<sup>+</sup> par rapport à la couche épitaxiée N (liée à la concentration en trous)

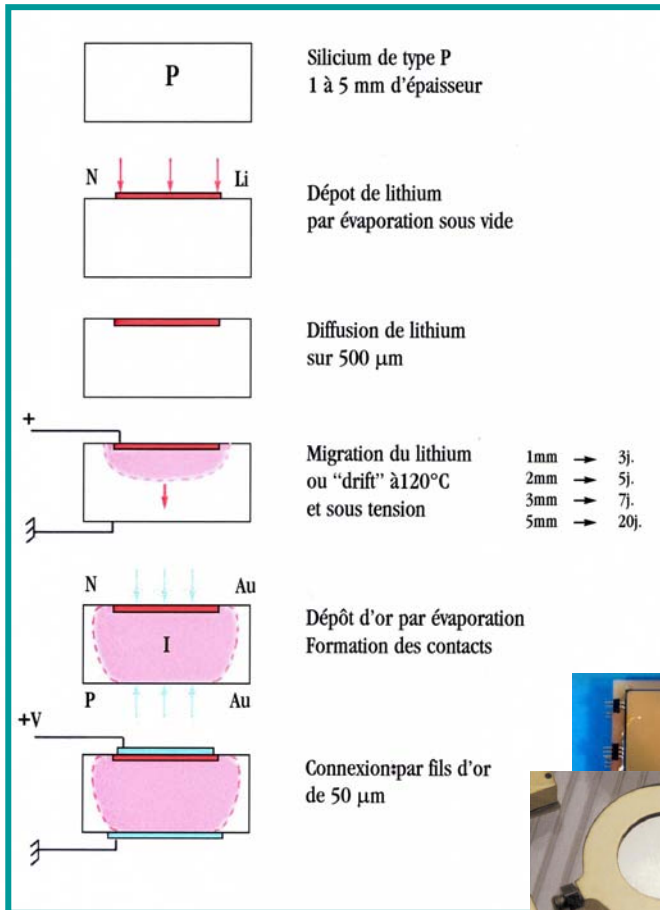
~7h - HF 5%



➡ Détection des ions lourds

# Le détecteur compensé au lithium

- Réalisation d'une zone quasi intrinsèque : zone I, de grande épaisseur (1 à 10 mm) -> type PIN

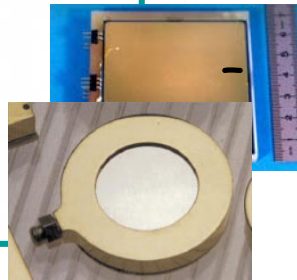


## Techniquement :

- Si de type P (dopants -> Bore)
- Diffusion de  $\text{Li}^+$ , petit et donneur : réserve de Li, dopage  $\text{N}^+$  d'où formation d'une jonction NP, que l'on polarise en inverse.
- Migration de  $\text{Li}^+$  à 120°C : neutralisation de B par  $\text{Li}^+$ , la zone tend à devenir neutre, le  $\text{Li}^+$  en position interstitielle

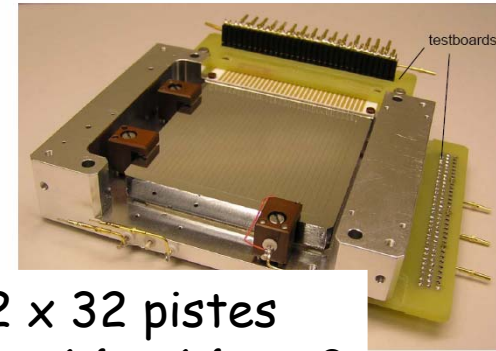
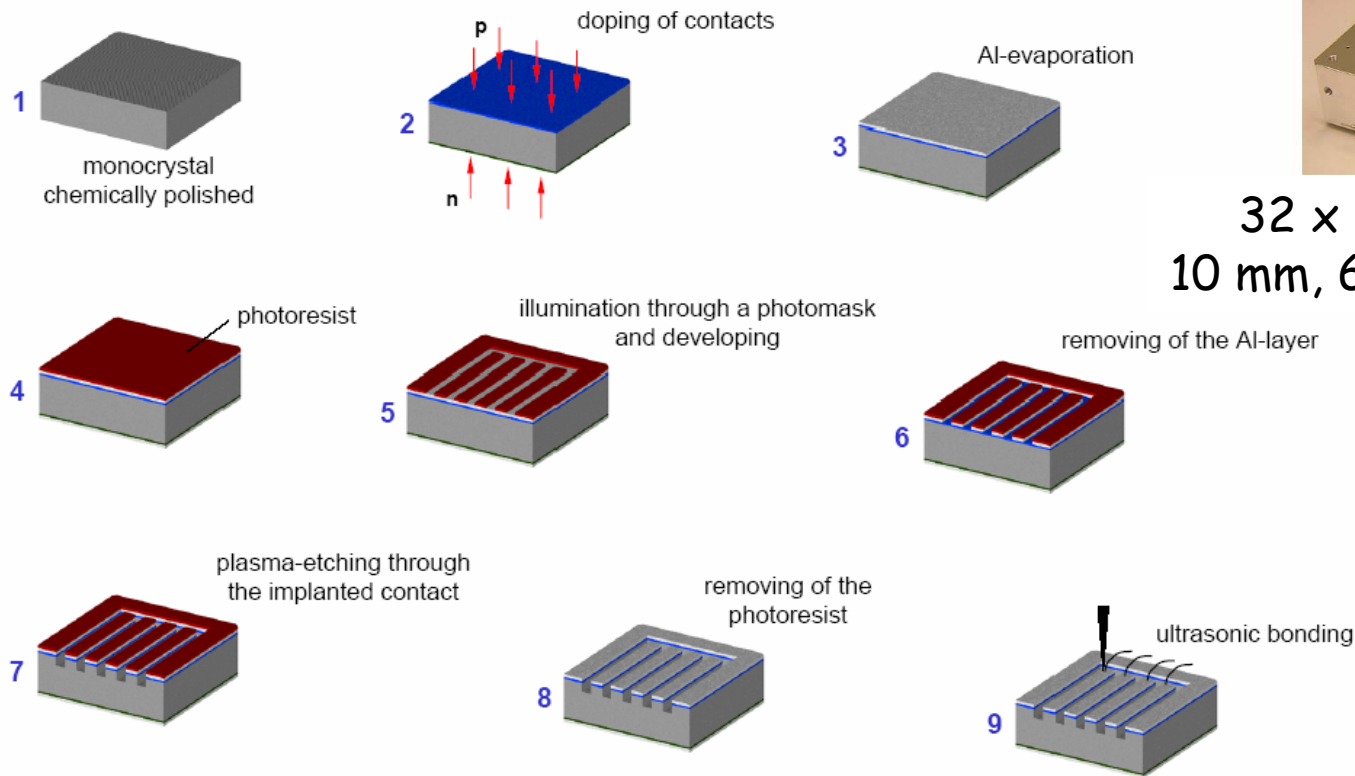
## Dépôt d'or :

- face avant : zone P<sup>+</sup>
- face arrière (réserve de Li, zone N<sup>+</sup>) : contact ohmique.

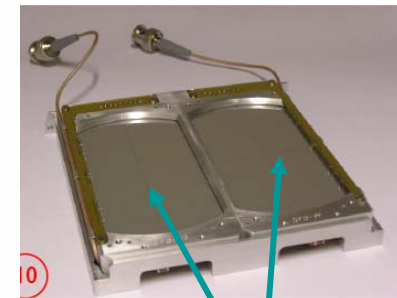


# Le détecteur Si(Li) segmenté

## Production steps for position-sensitive semiconductor detectors in IKP

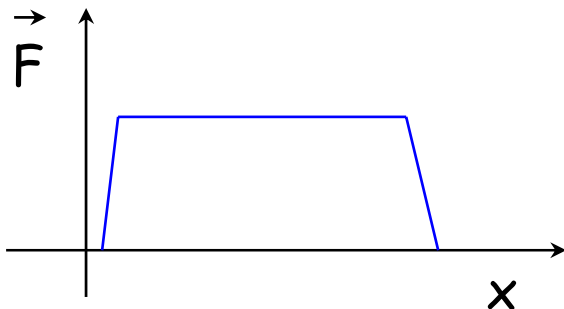
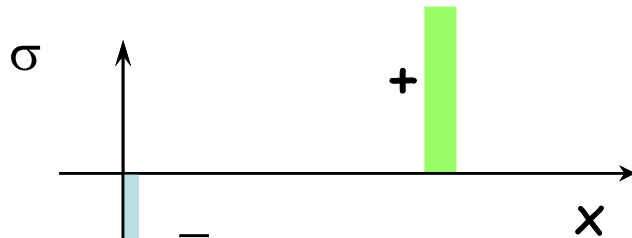
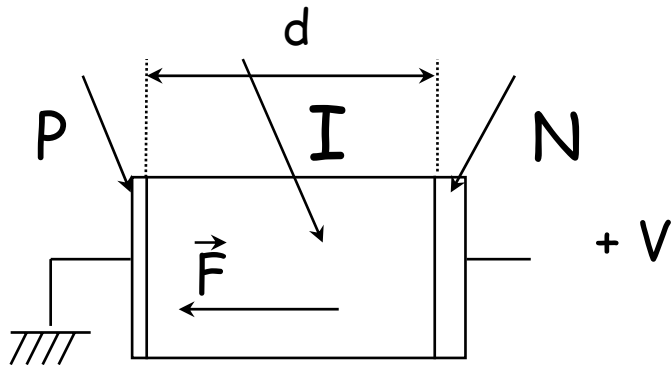


32 x 32 pistes  
10 mm, 64 x 64 mm<sup>2</sup>



8 pads  
5 mm, 55 x 100 mm<sup>2</sup>

# Le détecteur Si(Li)



- Pas de charge d'espace dans la zone I, donc champ constant :  
 $F = V/d$

- Condensateur plan  
 $C = \epsilon S/d$

➡ détection des ions  
(température ambiante)

➡ détection des électrons et  
des X (77K)

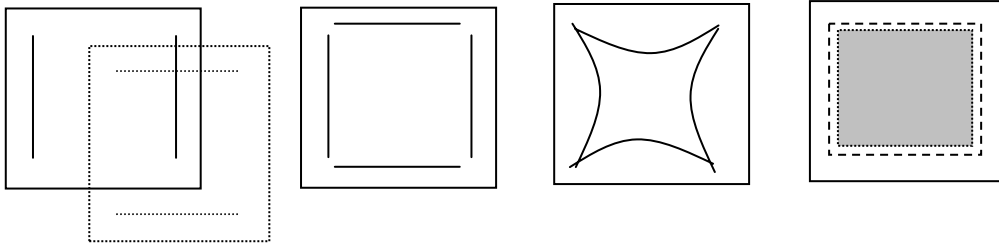
# Le détecteur à surface(s) résistive(s)

(PSD : position sensitive detector)

- les couches résistives sont réalisées par implantation (jonction et ohmique)
- les électrodes sont évaporées sur les surfaces résistives
- la division résistive des charges : le signal sur chaque électrode est proportionnel à la distance entre l'interaction et l'électrode, barycentrage des signaux



localisation des ions



Duo-latéral    tétralatéral    pin cushion    ligne résistive

- 4 électrodes
- Un signal sur chaque électrode
- Une combinaison des signaux pour donner la position

# Quelques détecteurs silicium

Type de détecteurs	Géométrie	Résolution en énergie	Raie de calibration	Spécificité
Passivé et implanté	50 mm <sup>2</sup> 300 μm	11 keV	5.486 MeV ( <sup>241</sup> Am)	Particules chargées
Barrière de surface	50 mm <sup>2</sup> 300 μm	15 keV	5.486 MeV	Particules chargées
Si(Li)	300 mm <sup>2</sup> 5 mm	< 50 keV < 20 keV	5.486 MeV 975 keV ( <sup>208</sup> Bi)	Particules chargées
Si(Li) refroidi	25 mm <sup>2</sup> 5 mm	150 eV	5.9 keV ( <sup>55</sup> Fe)	X de 1 à 30 keV



# Les détecteurs germanium

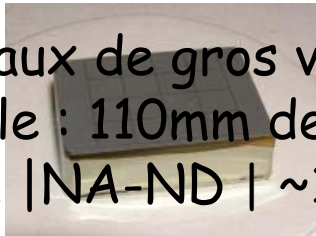
---

pour la détection  $\gamma$

# Le détecteur germanium

- Géométrie planaire ou coaxiale pour augmenter les volumes de détection

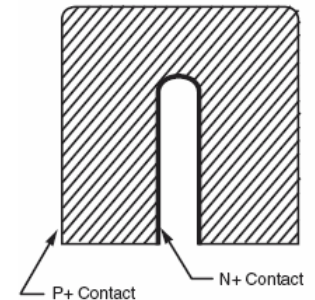
- cristaux de gros volume et de haute pureté (HPGe) :  
exemple : 110mm de long, 98 mm de diamètre, 800 cm<sup>3</sup>,  
4.4 kg, |NA-ND| ~10<sup>9</sup> cm<sup>-3</sup>



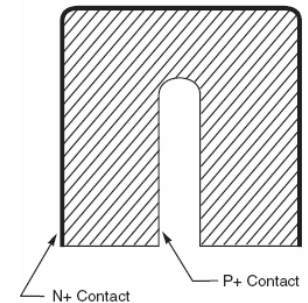
- type P (mais se dégradent plus en présence de neutrons) ou type N

- contact P<sup>+</sup> : implantation de bore (dépôt mince : 0.3 μm)

- contact N<sup>+</sup> : diffusion de lithium (couche épaisse : > 500 μm)



Ge type N

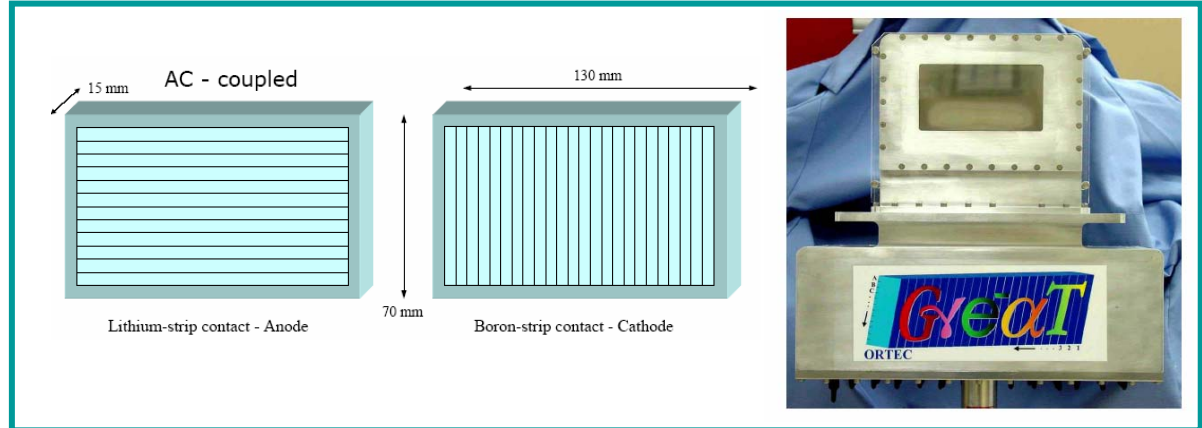


Ge type P

# La géométrie planaire

- Même structure, mêmes équations que le silicium
- Éventuellement segmenté :  
pistes

pixels (pads)



# La géométrie cylindrique

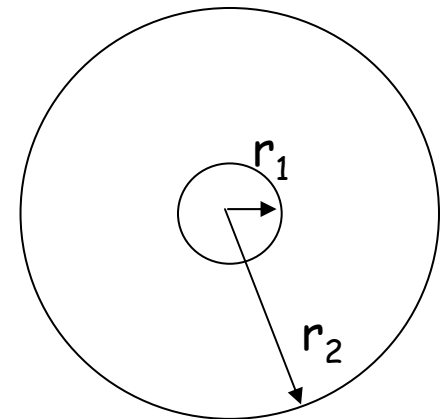
- On considère un cristal cylindrique coaxial
- On effectue le changement de coordonnées  $\rightarrow$  cylindriques
- On calcule les mêmes paramètres : tension de déplétion, champ radial, capacité....

$$V_0 = \frac{q|N_A - N_D|}{2\epsilon} \left[ r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2}(r_2^2 - r_1^2) \right]$$

$$F(r) = \frac{qN_A}{2\epsilon} r + \frac{V - \frac{qN_A}{4\epsilon}(r_2^2 - r_1^2)}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$$C = \frac{2\pi\epsilon}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

$r_1$  : rayon intérieur  
 $r_2$  : rayon extérieur

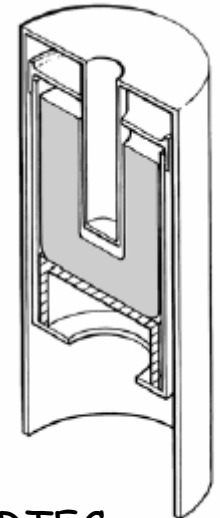


# Le fonctionnement

- Particularité : il fonctionne à basse température  $< 90\text{K}$  : azote liquide en général
- À température ambiante, la génération thermique est trop importante, le courant est élevé et le bruit statistique est trop fort.
- Nécessité d'avoir un cryostat, le cristal est sous vide
- Introduction de matière dans le parcours de la particule



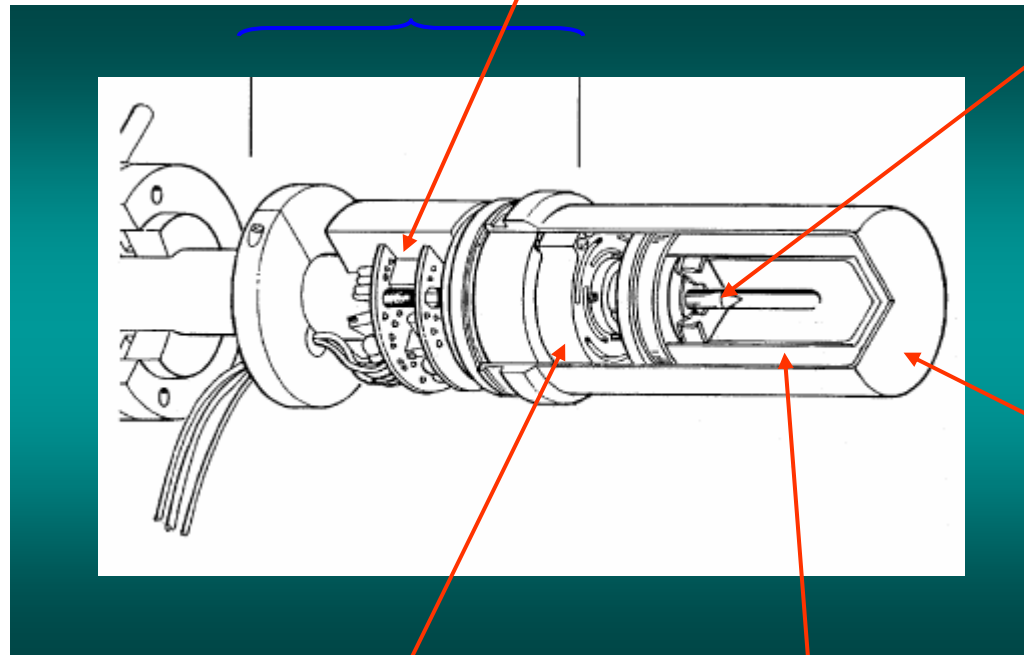
Détection des X et des gammas



ex : détecteur puits - ORTEC

# Le principe

Capot+ électronique « chaude » (préampli.)



Contact central

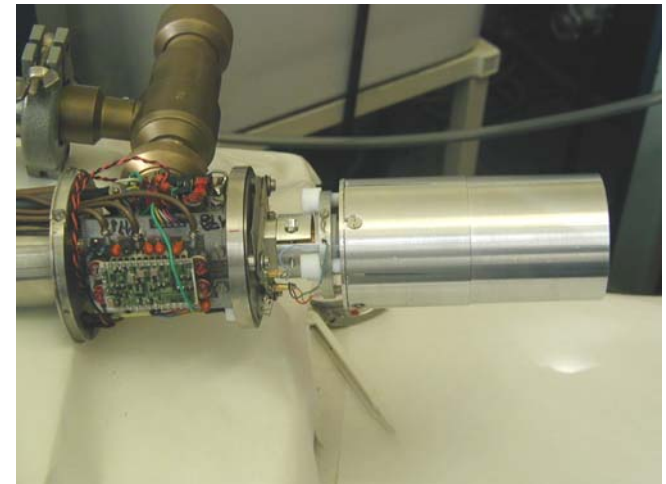
Capot externe

Capot (montage et écran thermique)

Électronique refroidie (R, C, FET)

ORTEC

# et en images



Détecteur : 50 mm de long et 50 mm de diamètre

# Les différents types de détecteurs

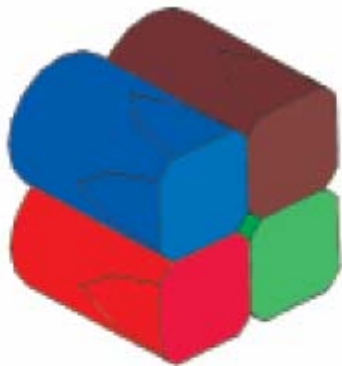
---

- 1 seul cristal
  - Adapter les volumes aux énergies attendues
  - Améliorer les résolutions
- plusieurs cristaux regroupés dans un même cryostat :
  - Augmenter la granularité
  - Améliorer les résolutions
  - Corriger les effets Doppler
- cristaux segmentés
  - Localiser les interactions
  - Reconstituer les trajectoires



# Les clovers ou « trèfles »

Les détecteurs sont regroupés dans le même cryostat

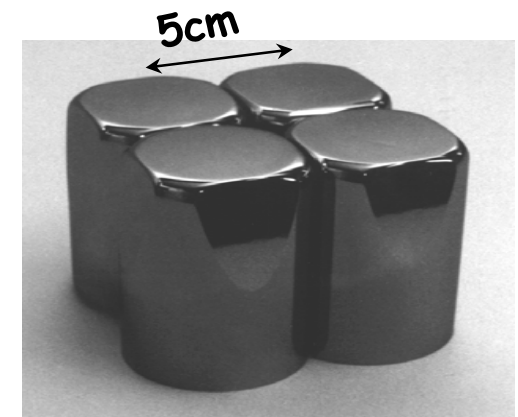


CLOVER EUROGAM

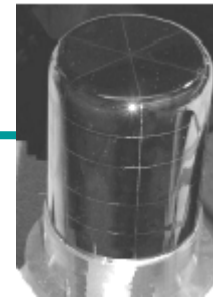
Sur  $^{60}\text{Co}$

Résolution à mi-hauteur	: 4 x 2,15 keV
$\epsilon_r$	: 4 x 20%
$\epsilon_r$ add-back	: 130%

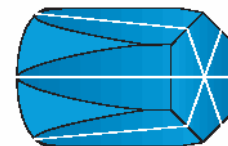
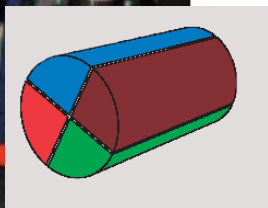
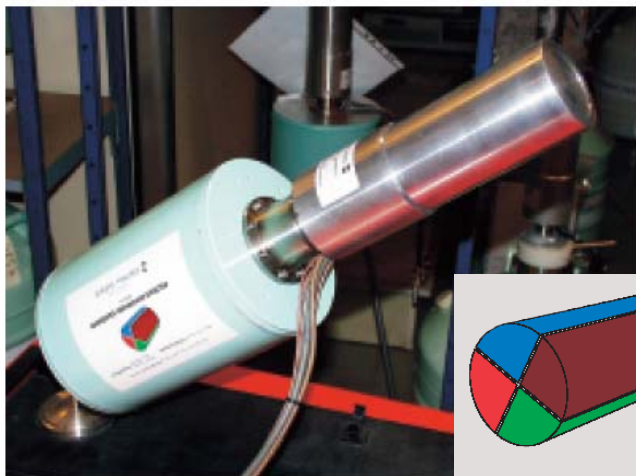
- diamètre 50 mm, longueur 70 mm (type EUROGAM)
- diamètre 50 mm, longueur 80 mm
- diamètre 60 mm, longueur 90 mm (type EXOGAM)
- diamètre 70 mm, longueur 140 mm (type VEGA).



# Les coaxiaux segmentés

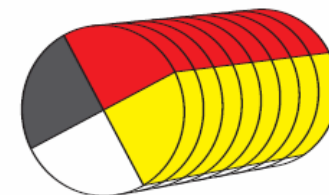


Pour la localisation des interactions



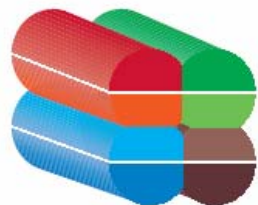
**MINIBALL**  
Détecteur à 6 segments

Sur  $^{60}\text{Co}$  { Résolution à mi-hauteur par segment : 3,0 keV  
Résolution globale à mi-hauteur : 2,2 keV



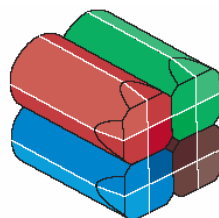
**32 SEGMENTS MSU**

Sur  $^{60}\text{Co}$  { Résolution à mi-hauteur par segment : 2,9 keV  
Efficacité relative : 75 %



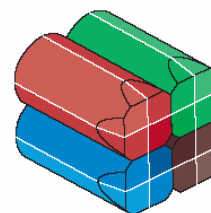
**CLOVER DEUX SEGMENTS**

Sur  $^{60}\text{Co}$  { Résolution à mi-hauteur : 4 x 2,25 keV  
& r : 4 x 22%



**SUPER CLOVER QUADRUPLE SEGMENTS**  
Ensemble de 4 détecteurs de longueur 140 mm

Résolution globale à mi-hauteur : 2,3 keV à 1,33 MeV  
Résolution à mi-hauteur des 9 segments : 3,5 keV à 1,33 MeV



**SUPER CLOVER QUATRE SEGMENTS**  
Ensemble de 4 détecteurs de longueur 140 mm

Résolution globale à mi-hauteur : 2,6 keV à 1,33 MeV  
Résolution à mi-hauteur des 16 segments : 3,2 keV à 1,33 MeV



# Les détecteurs encapsulés

Le détecteur est mis sous vide dans une capsule puis connecté à son électronique froide avant d'être intégré dans son cryostat



*Grappe CLUSTER pour EUROBALL  
(7 détecteurs GeHP encapsulés)*

*Section hexagonale - diam. 70 mm - haut. 78 mm*

*Résolution FWHM :  $\leq 2,3$  keV*

*Efficacité :  $\geq 55\%$*

*Epaisseur de paroi : 0,7 mm*

*Distance Germanium - capsule : 0,7 mm.*

# Quelques détecteurs germanium

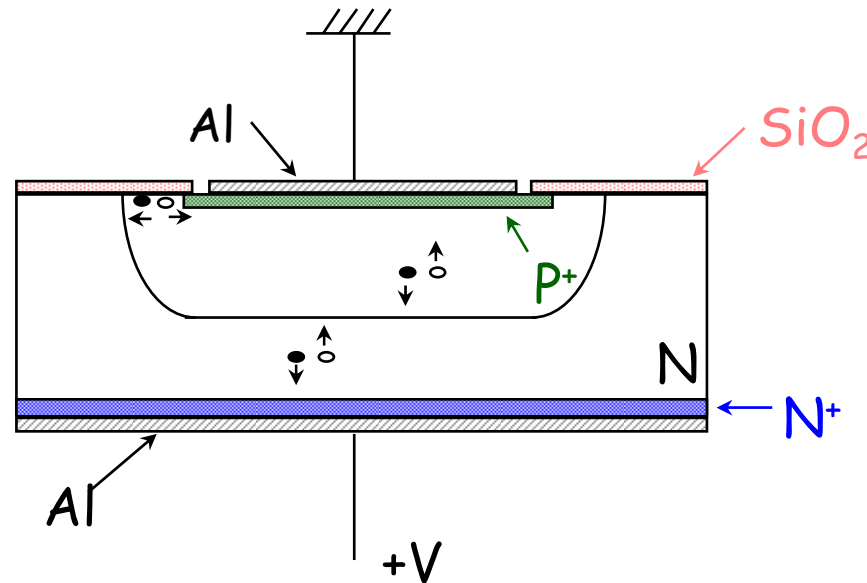
Type de détecteurs	Géométrie	Résolution en énergie	Raie de calibration	Spécificité
HPGe Type N	10 à 100% (+ fenêtre Be)	1.80 à 2.65 keV	1.332 MeV ( <sup>60</sup> Co)	γ de 3 keV à 10 MeV + neutrons
HPGe Type P	10 à 150%	1.80 à 2.40 keV	1.332 MeV	γ de 80 keV à 3 MeV
HPGe planaire	Épaisseur → 25 mm	1.3 keV	662 keV ( <sup>137</sup> Cs)	γ < 100 keV
Segmentés	Cluster (6 seg.) Clover (4 seg.) AGATA (36 seg.)	3 keV/segment 2 keV/segment 2 keV/segment	1.332 MeV	Tracking ↙ effet Doppler

# Les caractéristiques électriques en géométrie planaire

---

- Le courant
- La capacité

# Le courant



## 3 contributions au courant du détecteur :

- courant de génération dans la zone désertée, dépend de  $V$  et de la durée de vie des porteurs minoritaires
- courant de diffusion dans la zone neutre, dépend du dopage
- courant de surface, dépend des procédés de fabrication

# Le courant

- Il se mesure :  $i=f(V)$
- La caractéristique permet d'évaluer la stabilité et les risques de dégradations.

Pour les Si planar : de  $10 \text{ nA/cm}^2$

Pour le Si BdS : de  $100 \text{ nA/cm}^2$

Pour le Si(Li) : de  $1 \text{ }\mu\text{A/cm}^2$  (non refroidi)

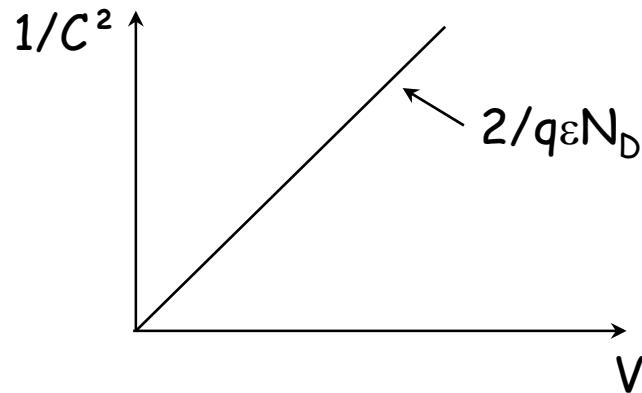
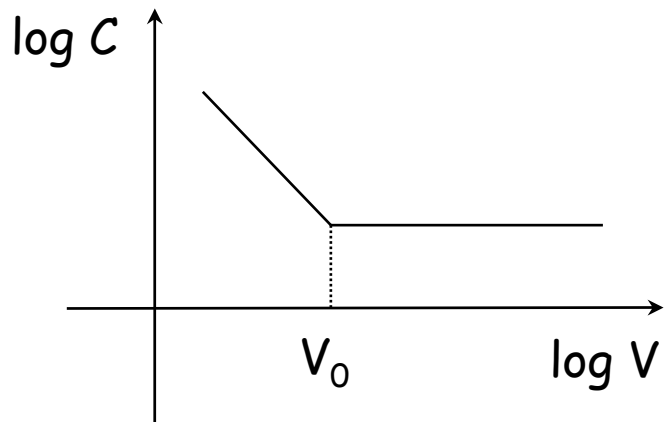
Pour le Ge :  $\sim \text{pA/cm}^2$

# La capacité

- Se calcule :  $C = \frac{\epsilon}{d} \times S$
- Se mesure et permet de déterminer :

la tension de déplétion :  $C = f(V)$

le profil d'impuretés  $N_D$  :  $\frac{1}{C^2} = \frac{2}{qN_D\epsilon} V$





# Technologie

---

FIN