

Les détecteurs à semi-conducteurs - silicium et germanium - en physique nucléaire

Laurence Lavergne

Institut de Physique Nucléaire
Division Instrumentation
Service Détecteurs
lavergne@ipno.in2p3.fr



- Bref rappel historique des détecteurs Si et Ge
- Généralité sur le semi-conducteur
- Technologie des détecteurs Si et Ge
- Formation du signal
- Quelques ensembles de détection

En physique nucléaire!

- 1948 : premiers dispositifs pour détecter des α
 - Une diode Ge à pointe polarisée en inverse (Mac Kay)
 - Une diode à jonction NP
- 1958 : le premier détecteur à barrière de surface Au-Si
- 1960-1970 :
 - 1960 : le premier symposium aux USA sur les détecteurs à SC (Washington)
 - 1963 : le premier symposium européen (Liège, Belgium)
 - Le process de compensation au Li dans le Si et Ge

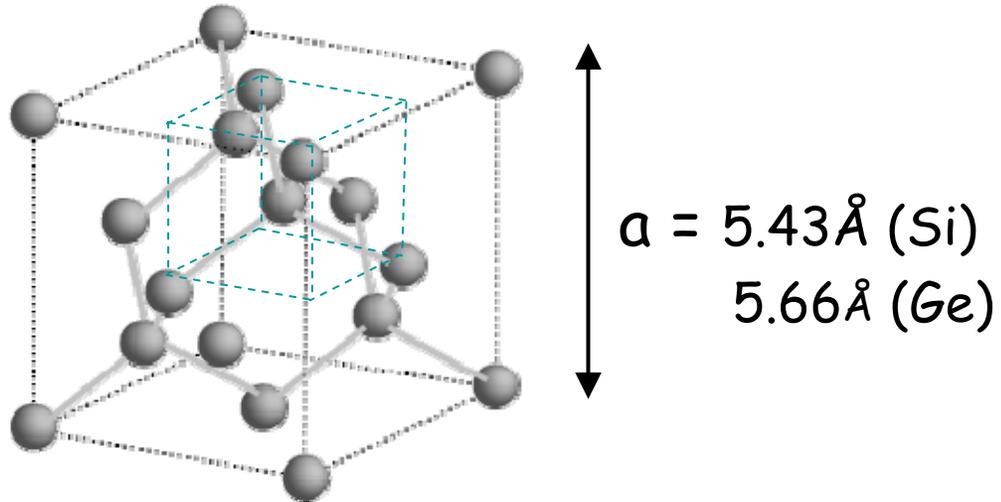
- Fin 60 à fin 80 : les détecteurs Ge(Li)
- Fin 70 : les détecteurs HPGe
- 1980 : le process planar (Kemmer)
 - > détecteurs à pistes
 - > détecteurs à pixel
 - > détecteurs à drift (Gatti, Rehak)
 - > détecteurs 3D

- Apport du semi-conducteur à la détection nucléaire
 - haut pouvoir d'arrêt des particules chargées
 - grande densité $\sim 10^{22}/\text{cm}^3$
 - chambre d'ionisation solide
 - faible énergie moyenne de création de charges, $\sim 3\text{eV}$ (Si, Ge) contre 30eV (gaz)
 - efficace pour la détection γ

- Choix du matériau
 - Nature des particules à détecter
 - Énergie
 - Applications (environnement, température,....)
- Intérêt des détecteurs à SC
 - Identification des particules, des ions
 - Localisation
 - Tracking

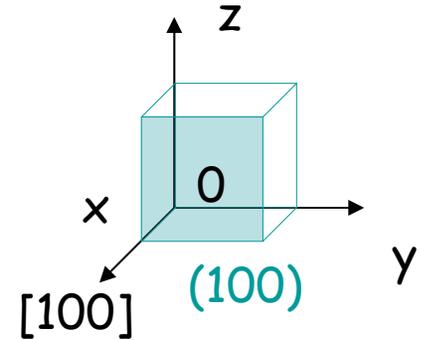
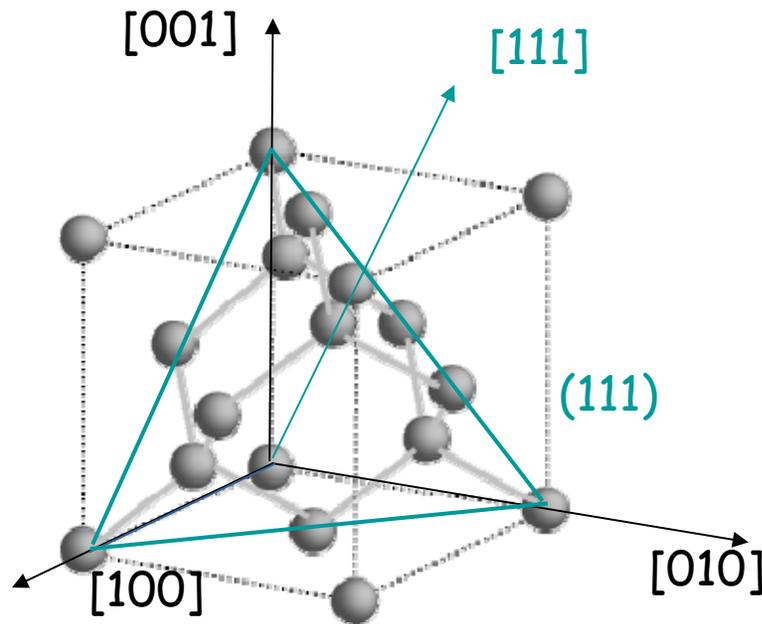
- Aujourd'hui
 - Spectroscopie nucléaire
 - Mesure de position (précision accrue, électronique de lecture rapide...)
 - Identification des particules par reconnaissance de forme
 - Intégration de l'électronique de sortie

- Structure diamant : Si ou Ge

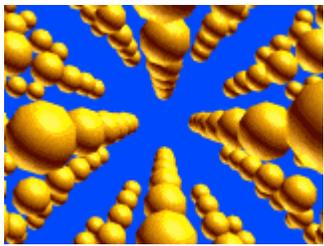
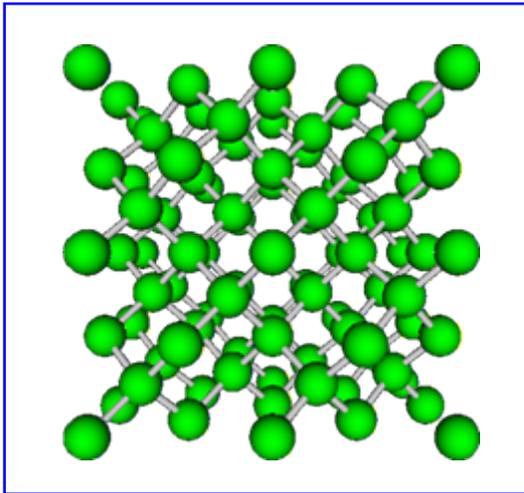


Structure cubique à faces centrées
2 CFC imbriqués, 8 atomes dans une maille

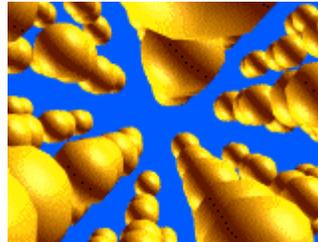
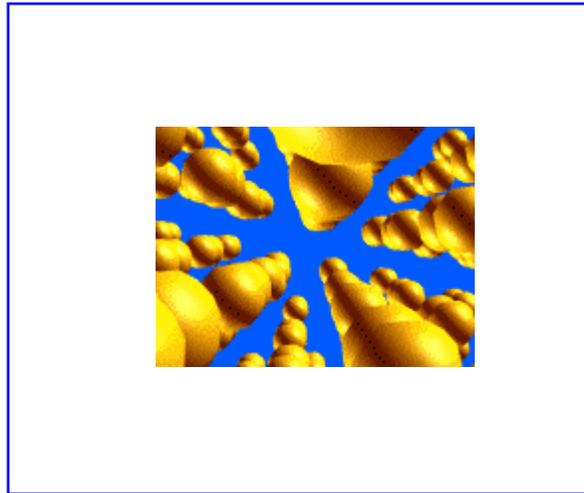
- Différentes densités suivant les plans cristallographiques
- Impact sur les propriétés des détecteurs



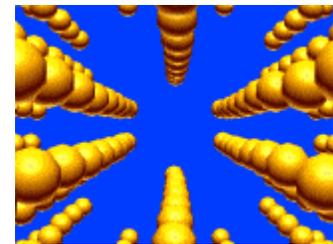
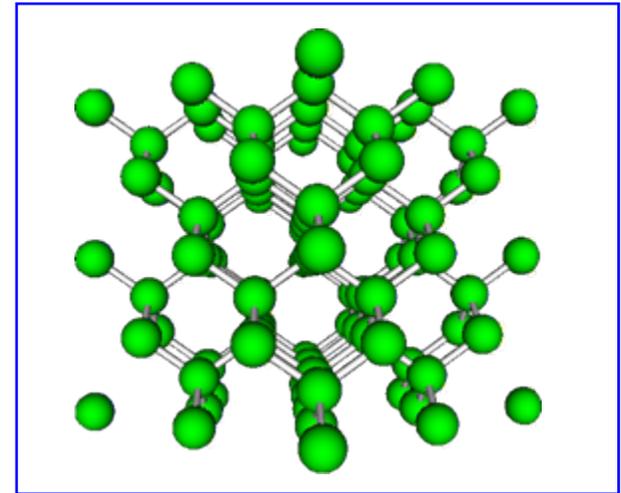
(100)



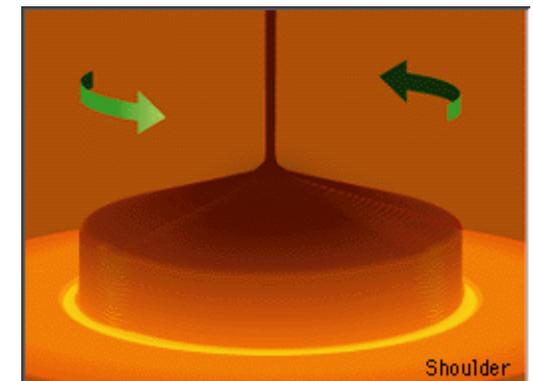
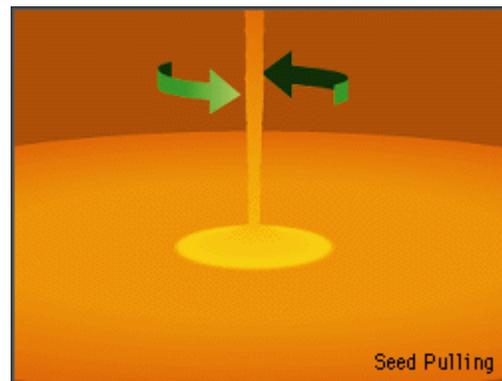
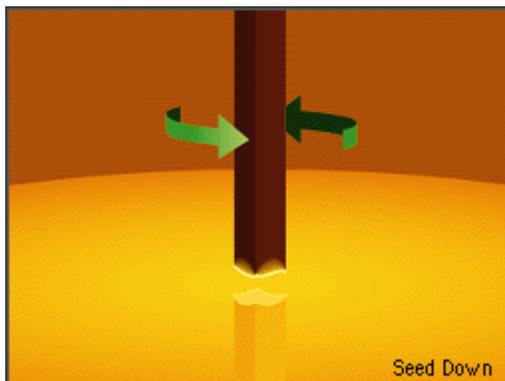
(111)



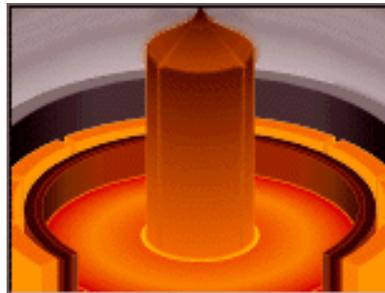
(110)



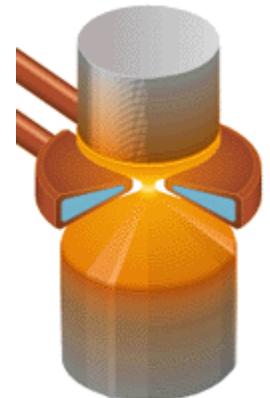
- Un germe monocristallin est introduit dans le mélange (Si fondu)
- Le germe est tiré lentement en rotation à partir de la surface du mélange
- Le Si se refroidit dès la sortie du mélange -> croissance du lingot monocristallin
- Le diamètre du lingot est fonction de la vitesse de tirage



- Méthode Czochralski (CZ)
 - Les lingots contiennent des impuretés indésirables
 - Méthode peu utilisée pour les applications de détection



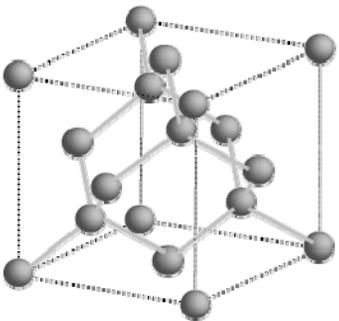
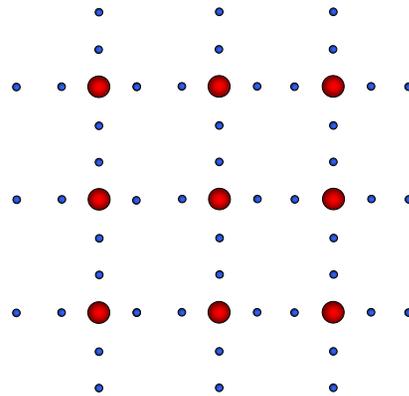
- Le procédé Float Zone (FZ)
 - Matériau de départ : barreau de Si polycristallin de haute pureté avec un germe monocristallin
 - Une petite zone est chauffée, fondue
 - La zone fondue est déplacée à partir du germe sur tout le long du lingot en déplaçant le chauffage vers le haut
 - En fin de process, le Si s'est refroidit et a la même orientation que le germe
 - Méthode utilisé pour la détection



- Le diamètre des lingots utilisés pour la détection va jusqu'à 6" (152 mm)
- Les lingots sont découpés en tranches (wafers), les surfaces subissent des traitements mécaniques (polissage) et chimiques (etchings)

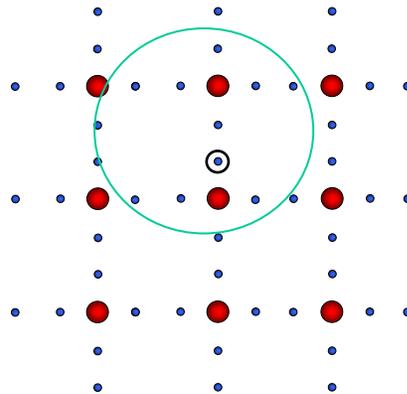


- Chaque atome est entouré de 4 voisins et partage ses 4 électrons périphériques avec ses voisins, formant des liaisons covalentes



L'atome de silicium \rightarrow 4 électrons de valence

- À basse énergie tous les électrons de valence restent liés
- À température plus élevée, les vibrations thermiques peuvent rompre les liaisons covalentes et un électron de valence devient un électron libre, laissant derrière lui une lacune ou trou (de charge positive)
- L'électron et le trou libres sont alors disponibles pour la conduction



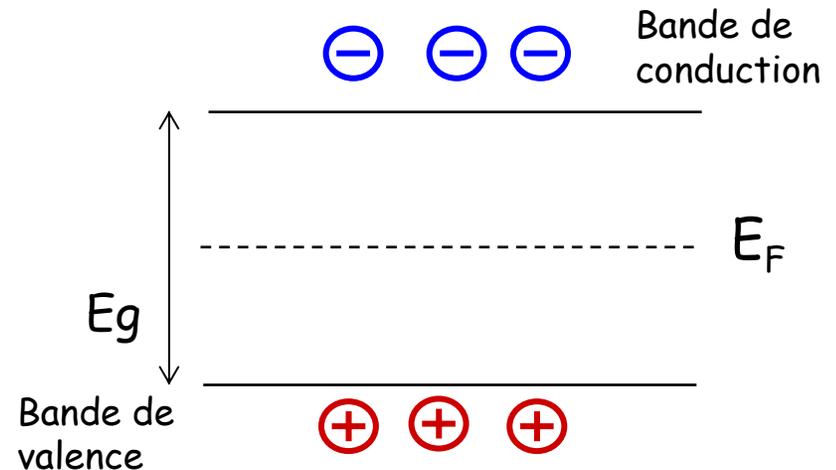
- À 0 K, le SC est isolant
- T : un certain nombre de porteurs libres est créé
 - n électrons (provenant de BV par excitation thermique)
 - p trous (présents dans BV)
- Des relations donnant les concentrations de porteurs
 - $n=p=n_i$ autant de trous dans BV que d'électrons dans BC
 - $n_i^2=np$ (loi d'action de masse)
 - n_i proportionnel à $\exp(-E_g/kT)$



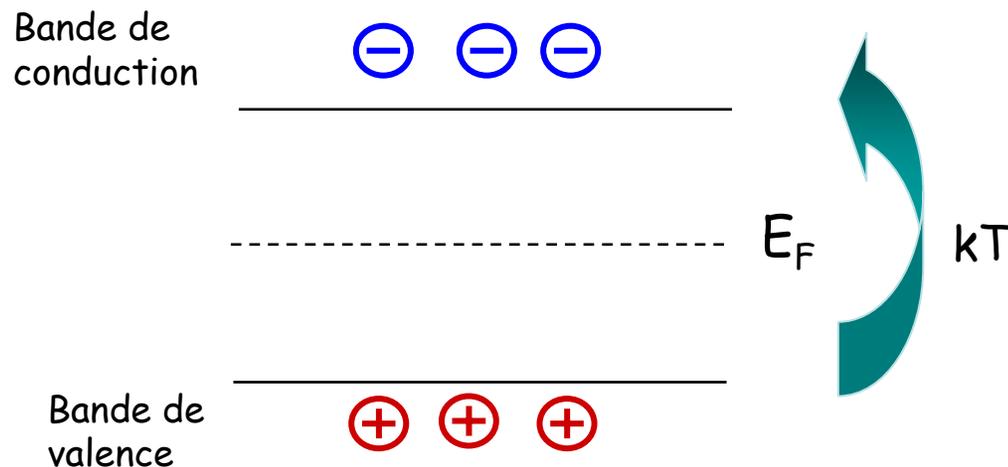
à 300K, $kT \sim 0.025$ eV

Si : $n_i = 10^{10}$ cm⁻³

Ge : $n_i = 2 \cdot 10^{13}$ cm⁻³

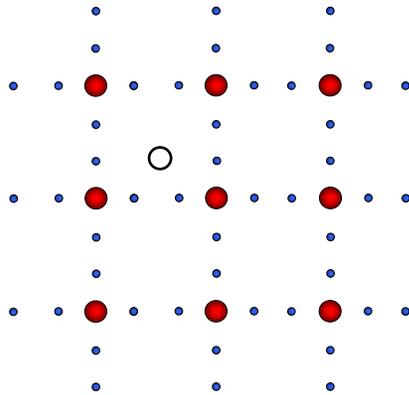


- La position du niveau de Fermi définit les propriétés électroniques du semi-conducteur.
- Pour un semi-conducteur intrinsèque, le niveau de Fermi se situe au milieu de la bande interdite



- Par introduction d'impuretés en substitution de type P ou N dans le réseau (en général par diffusion)
 - Par irradiation avec des neutrons : dopage par transmutation neutronique (NTD : neutron transmutational doping)
 - Par purification du SC, en laissant les impuretés existantes du bon type : impuretés résiduelles (Ge)
-  la conduction est modifiée, des charges libres supplémentaires (électrons ou trous) sont introduites.

Silicium dopé type P

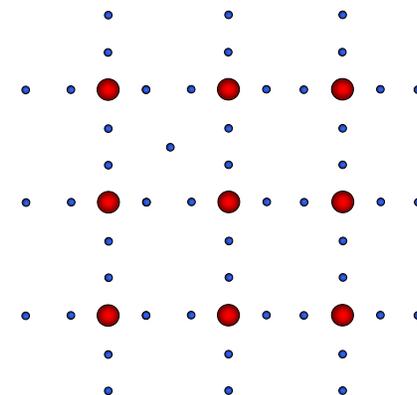


L'atome de bore
→ 3 électrons de
valence

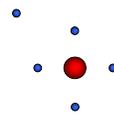


Les trous sont les
porteurs majoritaires.

Silicium dopé type N



L'atome de phosphore
→ 5 électrons de
valence

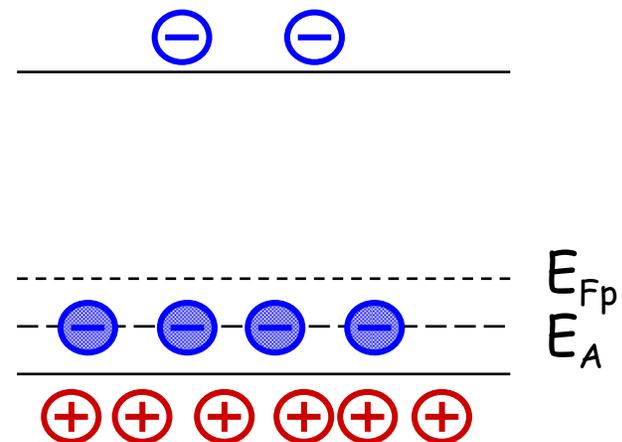
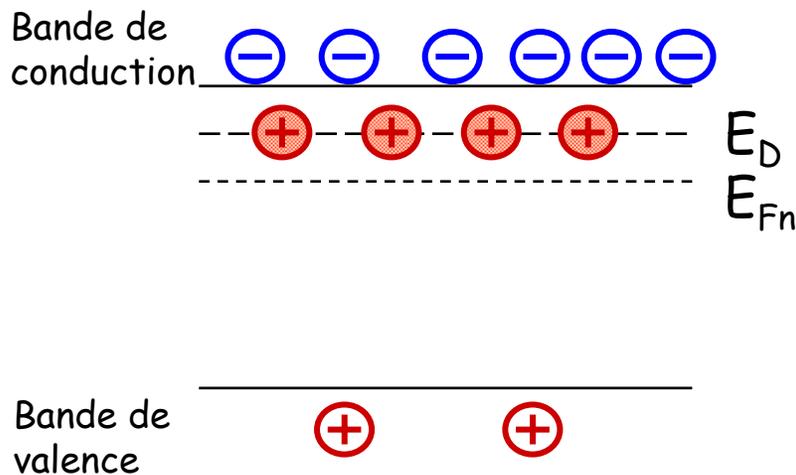


Les électrons sont les
porteurs majoritaires.

- $^{30}\text{Si} + n \longrightarrow ^{31}\text{Si} \xrightarrow{\beta^-} ^{31}\text{P}$
- On transforme l'isotope ^{30}Si (3% dans le silicium) en ^{31}P , dopant du Si de type N
- Process :
 - Cristal FZ non dopé
 - Irradiation neutrons
 - Décroissance de l'activité
 - Recuit et caractérisation (durée de vie des porteurs, nombre de dopants...)

- Dopage N
- N_D atomes ($5 e^-$), $n \sim N_D$
- pentavalent (colonne V)
- P - As - Sb
- Donneurs
- $E_D = E_C - 0,045 eV$
- Dopants ionisés fixes (P^+)

- Dopage P
- N_A atomes ($3 e^-$), $p \sim N_A$
- trivalent (colonne III)
- B - Ga - Al - In
- Accepteurs
- $E_A = E_V + 0,045 eV$
- Dopants ionisés fixes (B^-)



- Aptitude des porteurs à se déplacer dans le réseau cristallin

- $v = \mu \cdot F$

- Valeurs de mobilité

μ_- : mobilité des électrons

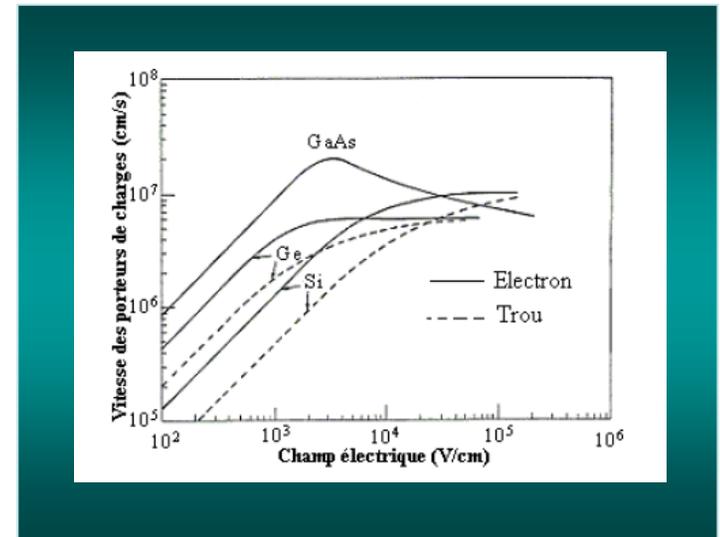
μ_+ : mobilité des trous

Si : $\mu_- \sim 1350 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

$\mu_+ \sim 480 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

Ge : $\mu_- \sim 3900 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$

$\mu_+ \sim 1900 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$ (@300K)



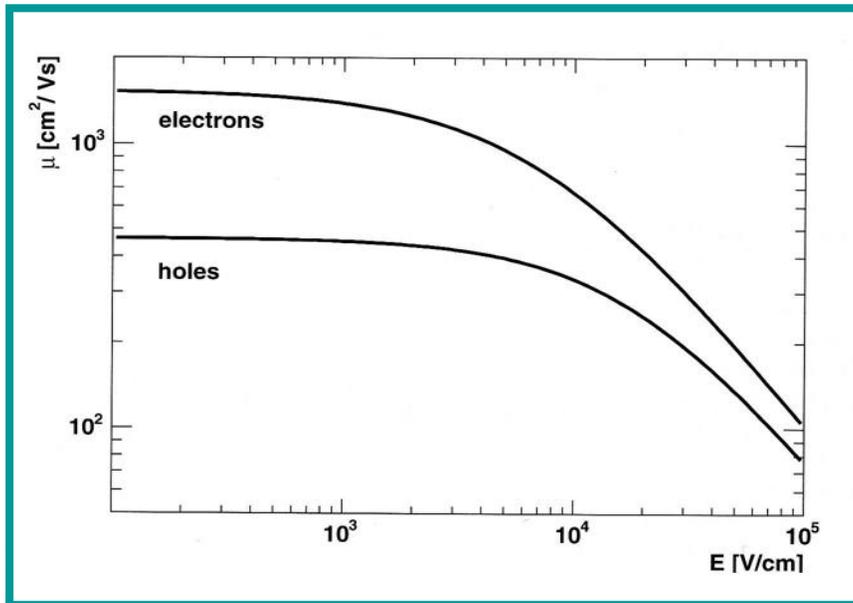
- La mobilité dépend de:

- La temperature :

$Ge : \mu_- \sim 3.6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V.s}, \mu_+ \sim 4.2 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V.s} (@77\text{K})$

- Du dopage, de l'orientation cristalline

- Du champ électrique F



$$\mu(x) = \frac{\mu_{-/+}}{\left[1 + \left(\frac{\mu_{-/+} F(x)}{v_s}\right)^m\right]^{\frac{1}{m}}}$$

$m=2$ pour les électrons

$m=1$ pour les trous

v_s : vitesse de saturation

Si : $\sim 10^7 \text{ cm/s}$

Ge: $\sim 6 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$

- La résistivité dépend du dopage : N_A et N_D

- Pour du Si type N :
$$\rho \approx \frac{1}{N_D \cdot q \cdot \mu_-}$$

- Pour du Si type P :
$$\rho \approx \frac{1}{N_A \cdot q \cdot \mu_+}$$



300K, la résistivité intrinsèque :

Si : $\rho_i \sim 200 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm}$

Ge : $\rho_i \sim 47 \text{ }\Omega \cdot \text{cm}$

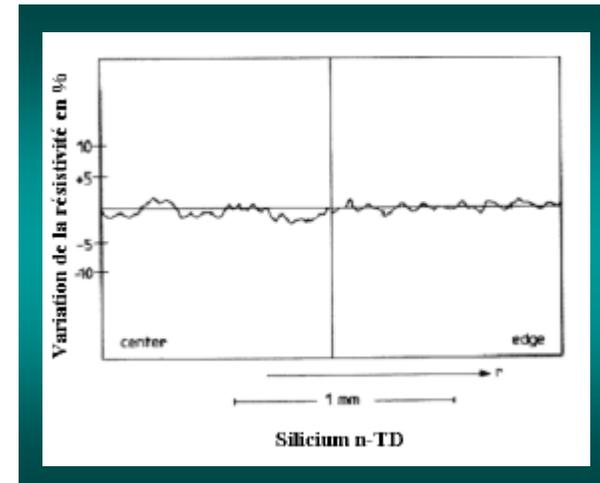
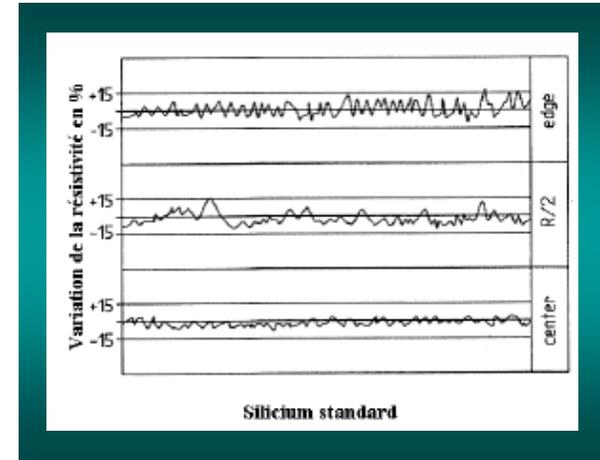
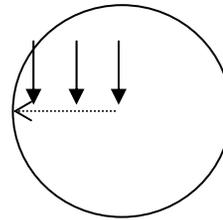
- En général, les résistivités pour la détection sont fortes

Si N : $\rho > 5000$ jusqu'à $15000 \Omega.cm$

Si P : $\rho \sim 1000 \Omega.cm$

- Pour le Ge on s'exprime en concentration de dopants résiduels : $|N_A - N_D| \sim 10^{10} cm^{-3}$

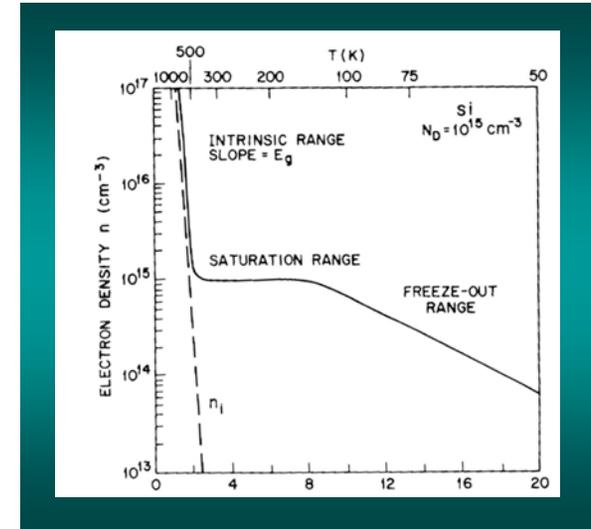
- Le matériau NTD offre un résistivité radiale plus homogène que pour du matériau FZ



➔ $\pm 5\%$ (30% pour un cristal FZ),
mais la résistivité est plus faible
($\sim 2500 \Omega \cdot \text{cm}$)

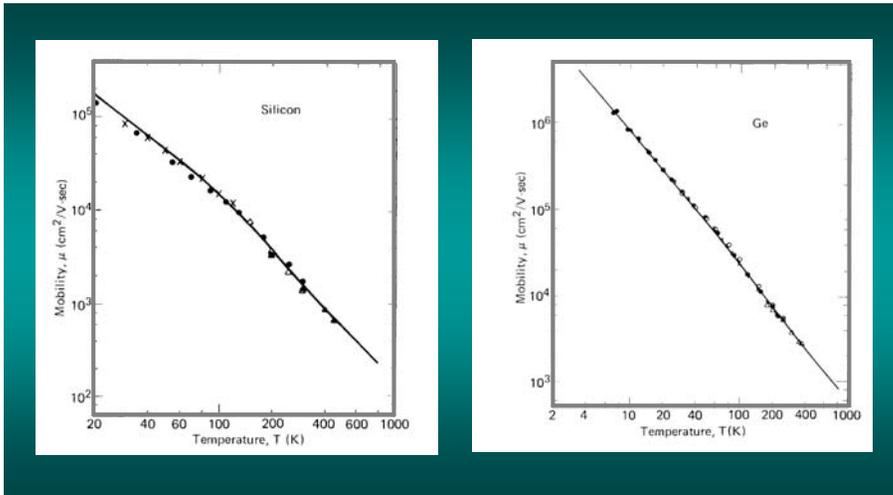
- Sur la concentration des porteurs

$n \nearrow$ quand $T \nearrow$



Pour $N_D \sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$

- Sur la mobilité μ

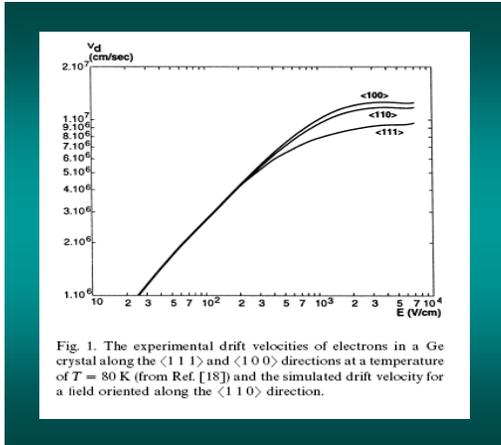


$\mu \nearrow$ quand $T \searrow$

Ex du Ge :

$$\mu_- \sim 3.6 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V.s}$$

$$\mu_+ \sim 4.2 \cdot 10^4 \text{ cm}^2 / \text{V.s} \text{ (à 77K)}$$



(NIM A 447 (2000) 350-360)

- Important pour le détecteur germanium
- Mobilité anisotrope des porteurs de charges
- Intervient dans le calcul de la forme du signal
- Effet de canalisation surtout dans le Si

- Énergie nécessaire pour créer une paire électron - trou : ω
 - Si : $\omega = 3.62 \text{ eV (300K)}$ et 3.76 eV (77K)
 - Ge : $\omega = 2.96 \text{ eV (77K)}$

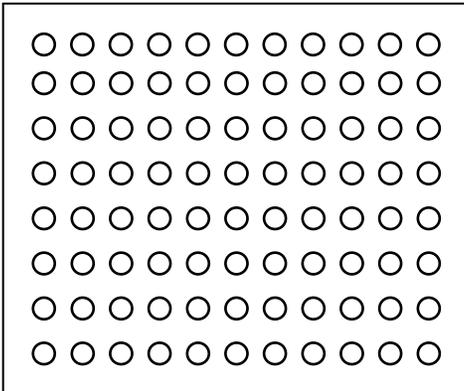
➡ $\omega > E_g$ (gap, énergie de bande interdite), elle tient compte des propriétés optiques, thermiques et de diffusion du cristal

- Rappel : @ 300K
 - Si : $E_g = 1,1 \text{ eV}$
 - Ge : $E_g = 0,66 \text{ eV}$

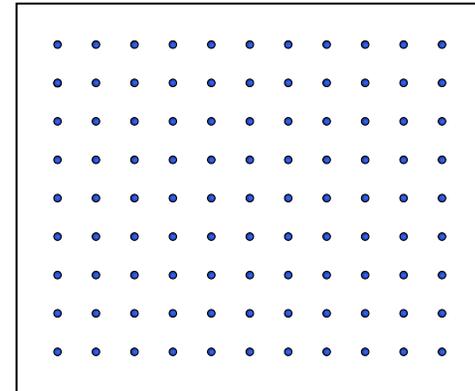
- Simplification : mise en contact de deux matériaux P et N
- Que se passe-t-il à l'équilibre thermodynamique ?
 - Différence de gradients de concentration de porteurs
 - Diffusion des porteurs vers une zone moins peuplée
 - Apparition d'une charge d'espace due aux dopants ionisés fixes
 - Établissement d'un champ électrique qui empêche toute diffusion

 Une zone désertée de porteurs libres apparaît, c'est la **zone déplétée**.

SC type P

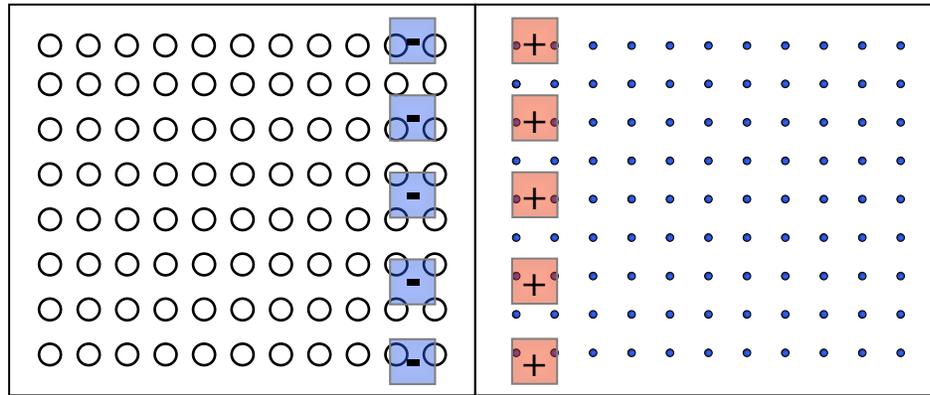


SC type N



SC type P

SC type N



Impuretés fixes

Zone déplétée

SC type P

Bande de conduction



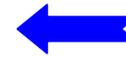
E_{Fp}
 E_A



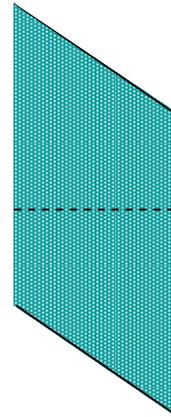
Bande de valence

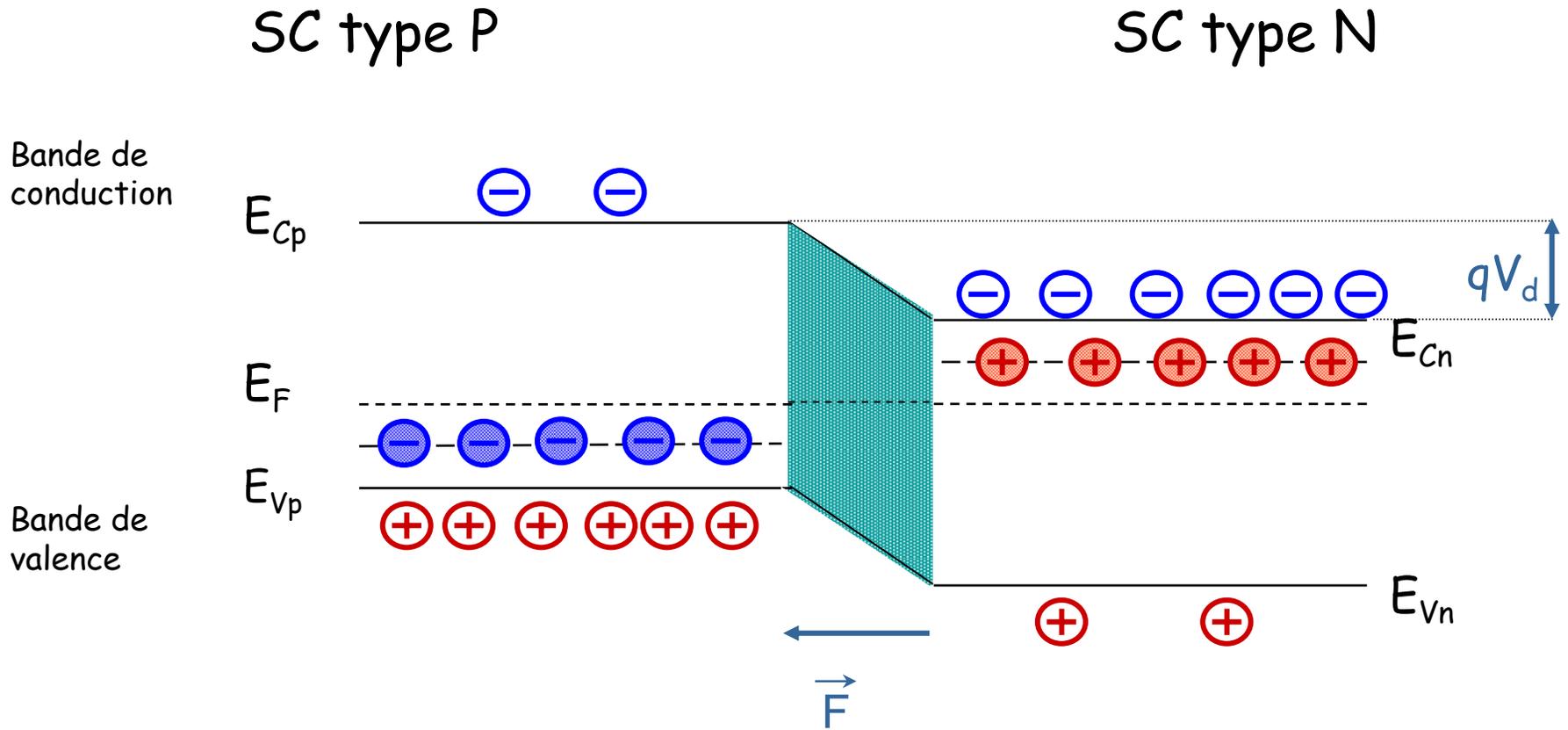


SC type N



E_D
 E_{Fn}





- Densité de charge d'espace : σ

$$x_p < x < 0 \quad \sigma(x) = -qN_A$$

$$0 < x < x_n \quad \sigma(x) = +qN_D$$

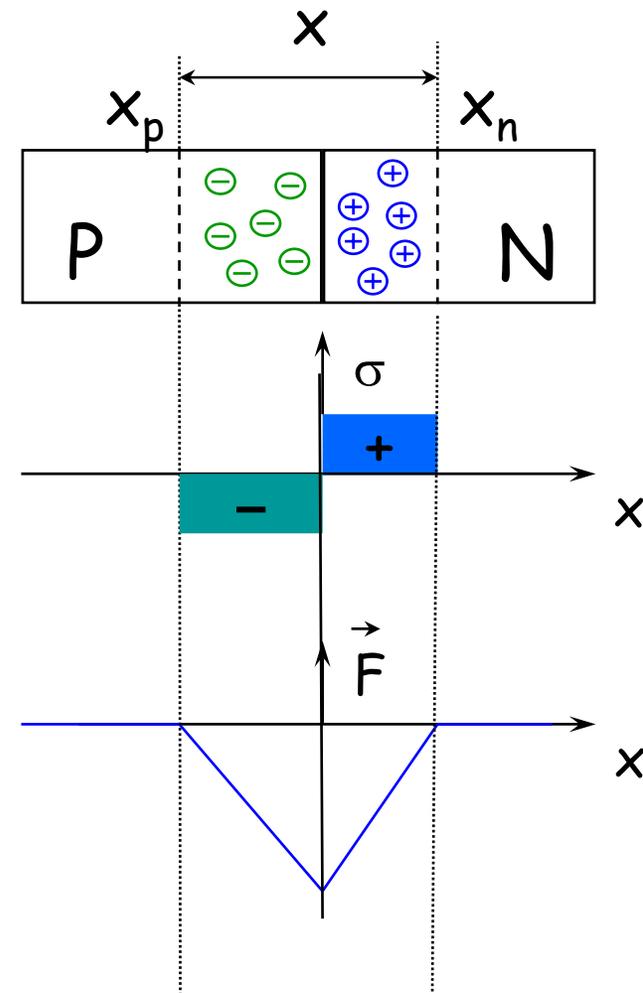
$$\text{ailleurs} \quad \sigma(x) = 0$$

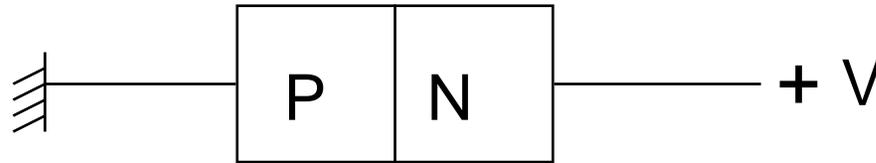
- Potentiel de diffusion V_d

- Équation de Poisson :
$$\frac{d^2 V}{dx^2} + \frac{\sigma(x)}{\varepsilon} = 0$$

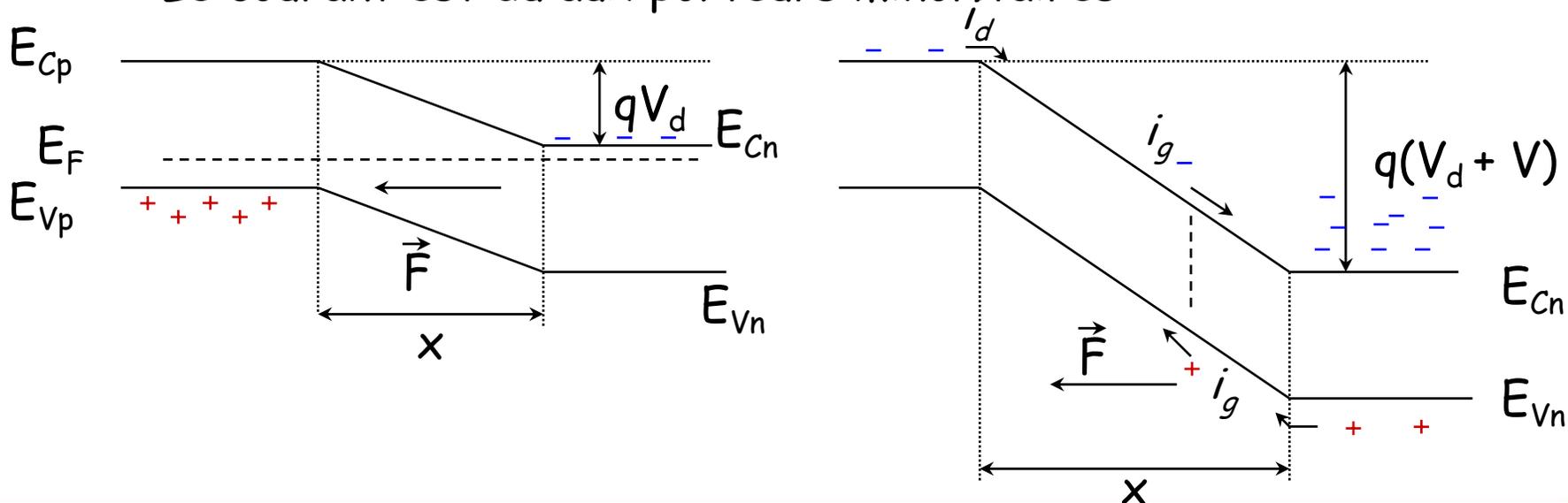
-> Electric field $F(x)$

- Largeur de déplétion : $x = x_p + x_n$

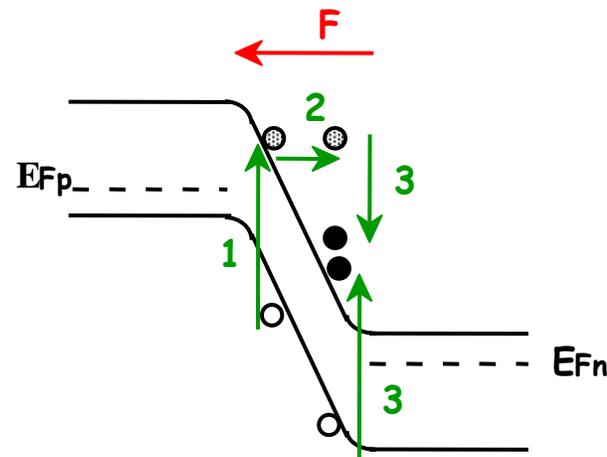
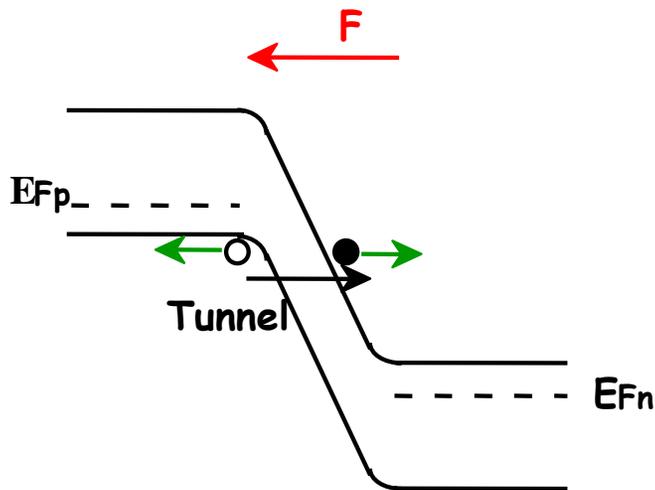
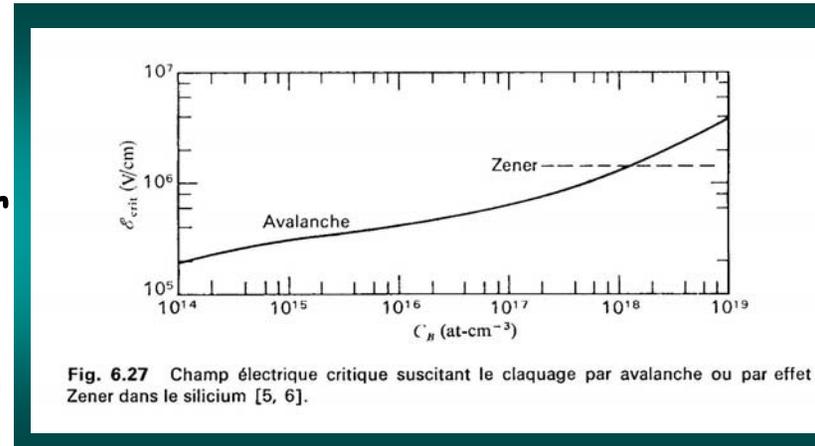




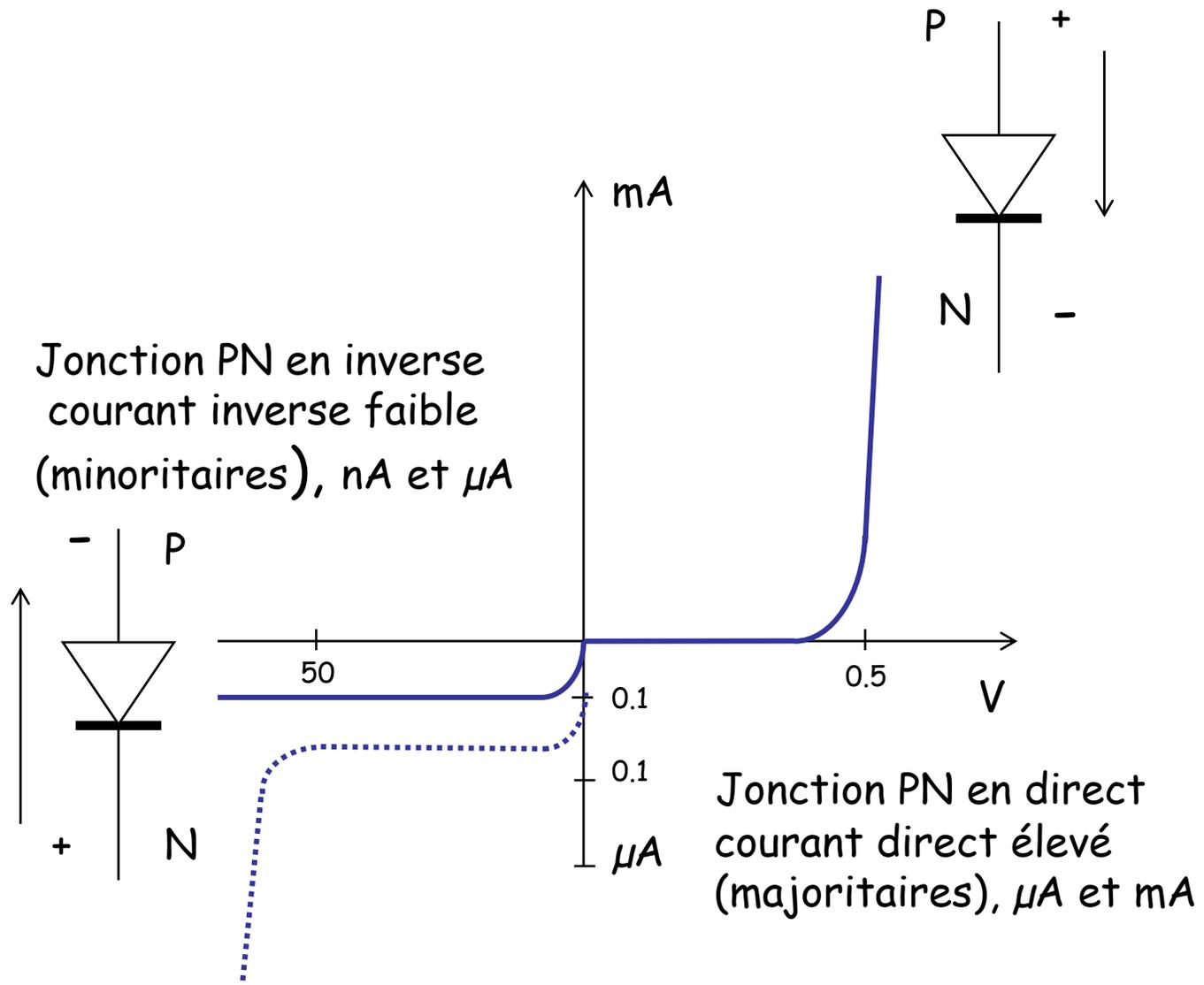
- La tension V se superpose au potentiel de diffusion V_d
- La barrière de potentiel augmente et devient infranchissable pour les porteurs majoritaires
- La zone de déplétion augmente
- Le courant est dû aux porteurs minoritaires



- Si la tension augmente, le champ augmente
- Au-delà de 10^5 V/cm, claquage Zener ou avalanche
- Dépend de la résistivité du matériau



Augmentation du courant inverse pouvant conduire à la dégradation de la jonction

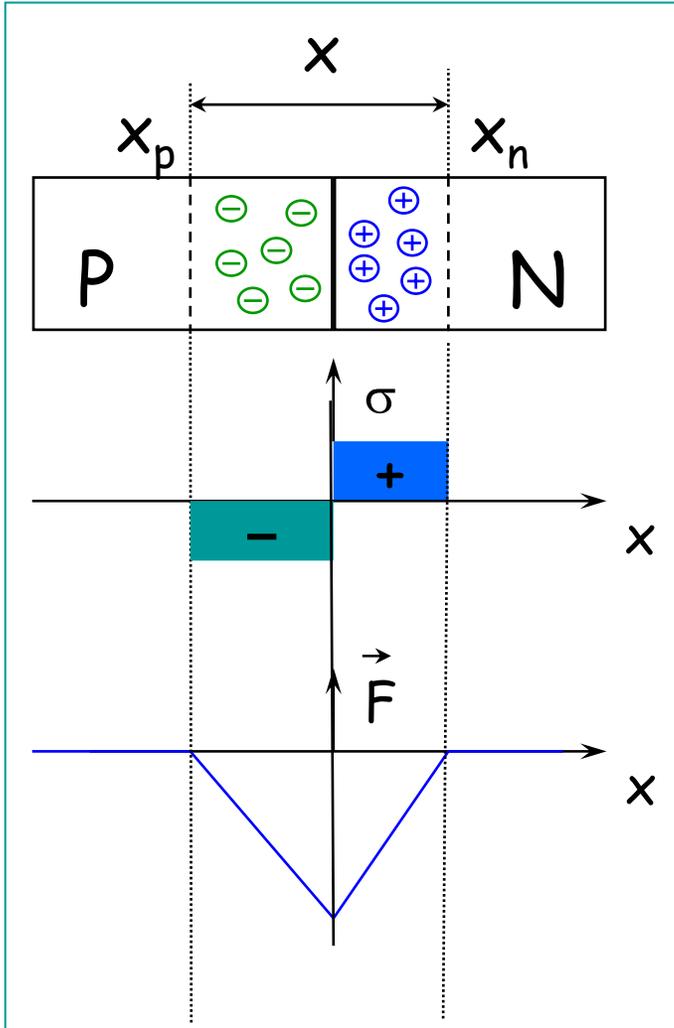


Propriétés	Si	Ge
Z	14	32
A	28	73
densité (g/cm ³)	2.33	5.32
E _g (eV)	1.12	0.74
Const. diélectr.	12	16
ε (F/cm)	1.06 10 ⁻¹²	1.5 10 ⁻¹²
μ ₋ (cm ² /V.s)	1350	3.6 10 ⁴
μ ₊ (cm ² /V.s)	480	4.2 10 ⁴
n _i (cm ⁻³)	1.45 10 ¹⁰	2.4 10 ¹³
ρ _i (Ω.cm)	2.3 10 ⁵	47
ω(eV)	3.6	2.96

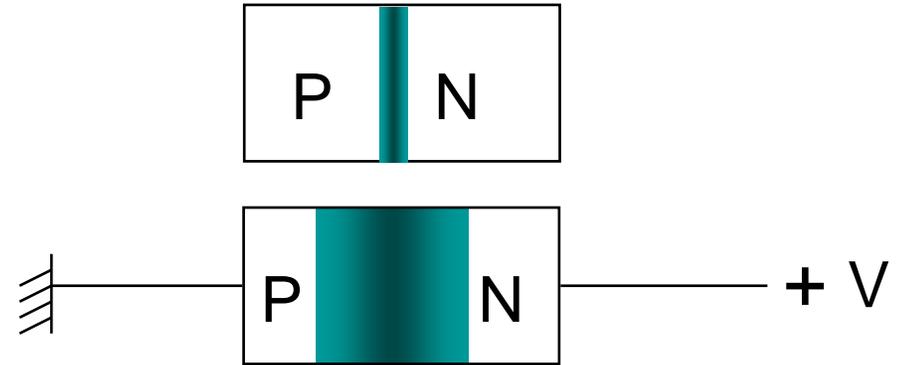
77 K

$kT \sim 0.0259 \text{ eV}$
 $\epsilon_0 = 8.86 \cdot 10^{-14} \text{ F/cm}$
 $v_s \sim 10^7 \text{ cm/s}$

Les détecteurs Si et Ge sont basés
essentiellement sur la jonction PN

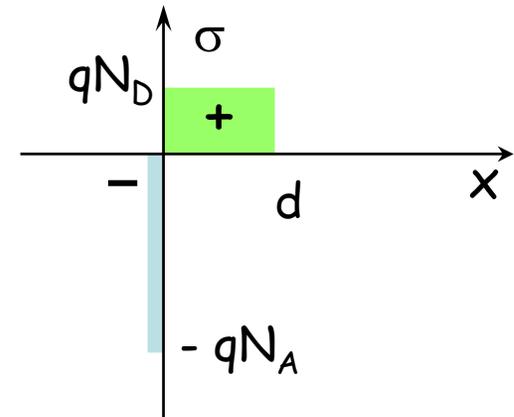
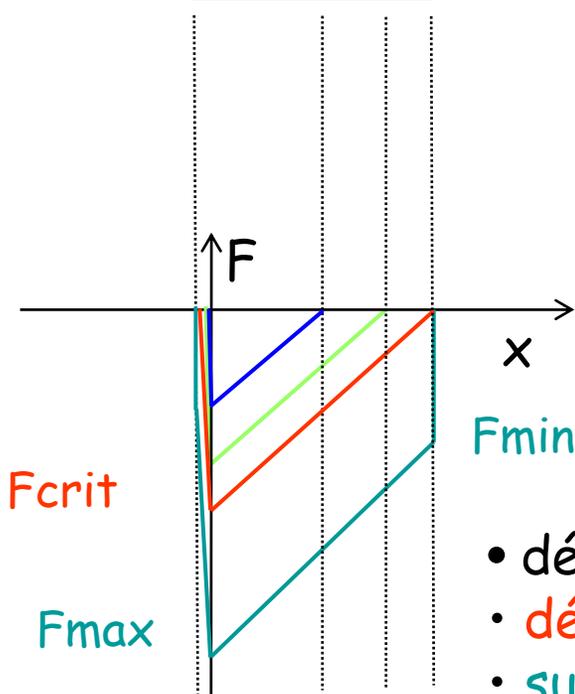
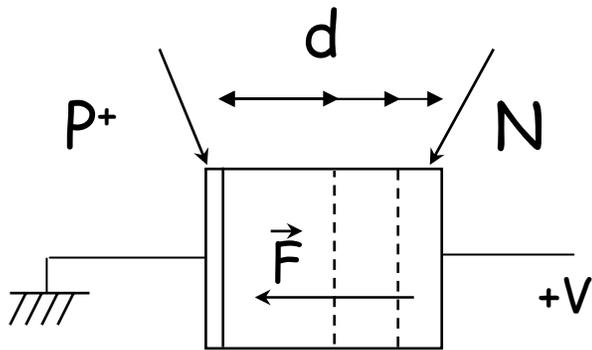


Quand une tension inverse est appliquée à la jonction, la zone de déplétion augmente.



- Une mince couche P et fortement dopée en contact avec un matériau de type N plus faiblement dopée.

-> $x_P = 0$ et $x_N = d$, avec d : épaisseur de la jonction (détecteur)



- déplétion partielle
- **déplétion complète (Fcrit)**
- **surdéplétion (Fmin, Fmax)**

$x_p = 0$ $x_N = d$, en géométrie planaire

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

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

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

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

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

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

Détecteurs silicium

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

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

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

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

- Passivé et implanté (planar)
- Barrière de surface
- Compensé au lithium

-> surtout pour les particules
chargées, parfois pour des
photons



➡ Matériau de départ

wafer Si (N) de forte résistivité ($> 3000 \Omega \cdot \text{cm}$)



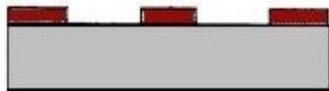
➡ Oxydation à $\sim 1000^\circ\text{C}$ (200 nm)

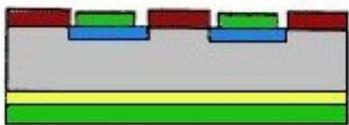
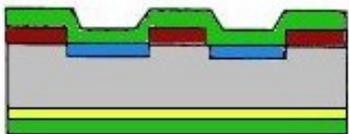
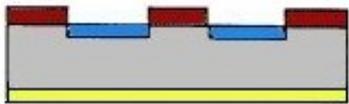
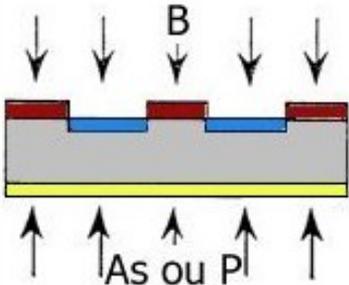
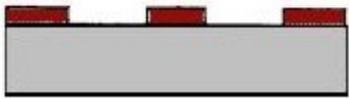
Opérations en salle blanches : nettoyage, croissance de l'oxyde SiO_2 et passivation des surfaces



➡ Photolithographie de l'oxyde

- ➡ Dépôt de résine photosensible
- ➡ masquage
- ➡ Insolation
- ➡ Etching





➤ Implantation (~50nm)

- Bore ($15 \text{ keV} - 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$) $\rightarrow \text{P}^+ \rightarrow$ jonction
- Phosphore ($30 \text{ keV} - 2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$) ou As (30 à $170 \text{ keV} - \sim 10^{16} \text{ cm}^{-2}$) $\rightarrow \text{N}^+ \rightarrow$ ohmique

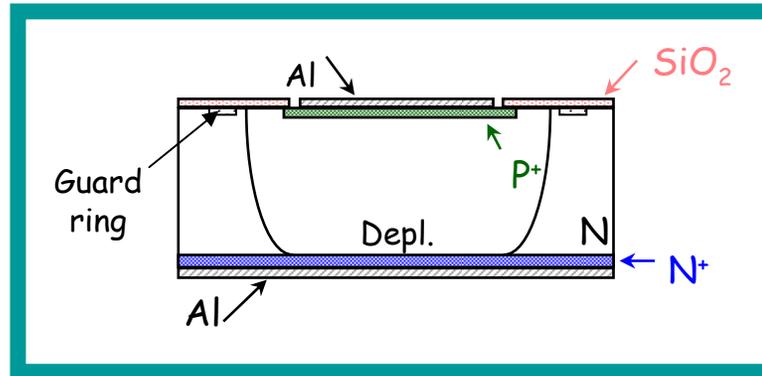
➤ Recuit sous flux de N_2 (800 à 900°C)

➤ Évaporation d'Al sur les deux faces du wafer (~100 nm)

➤ Photolithographie de l'Al

➤ Passivation (si nécessaire)

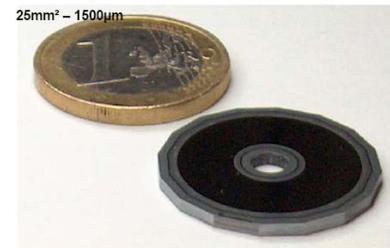


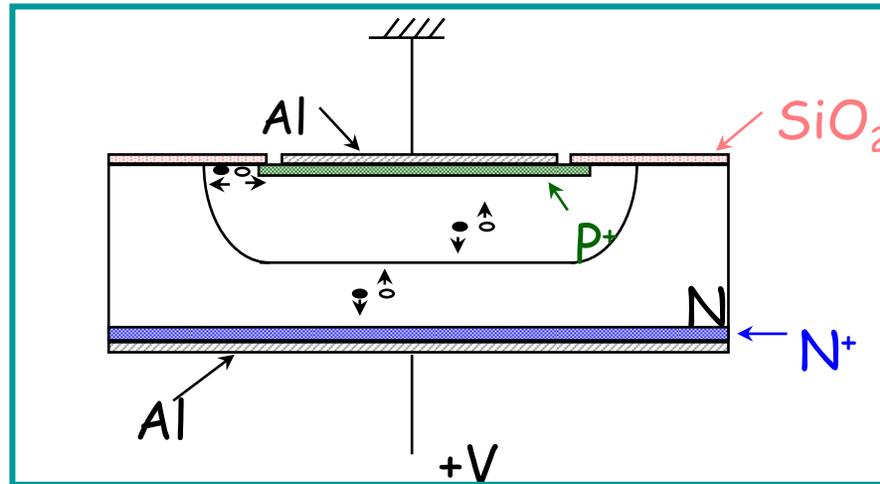


- En principe :

- Fenêtre d'entrée : Si(P⁺) + aluminium (jonction)
- Fenêtre de sortie : Si(N⁺) + aluminium (contact ohmique)
- Structure de garde (1 ou plusieurs anneaux de garde) qui limite les injections de courants provenant des bords
- Passivation des zones non actives

- Essentiellement fabriqués par des industriels (CANBERRA, MICRON, ORTEC...)
- Fabrication sur wafers de 4, 5 et 6 " de diamètre
- Épaisseur de 40 à 2000 μm (dépend des fournisseurs)

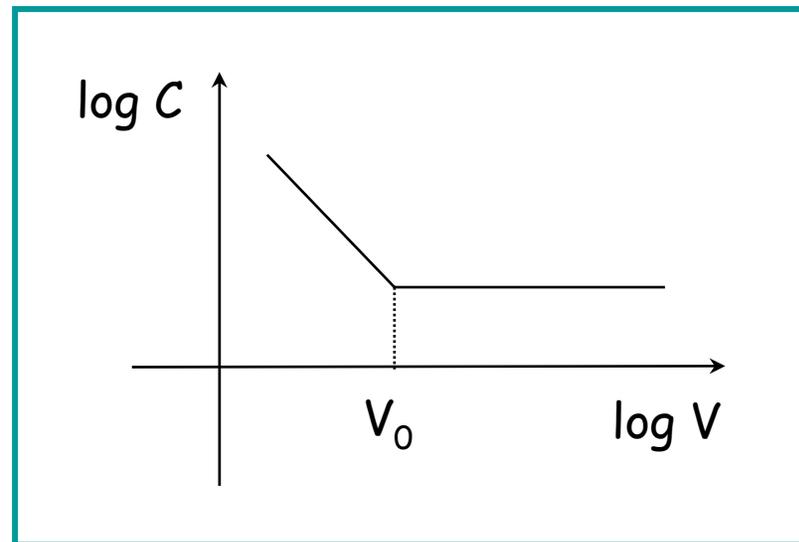




3 contributions :

- Génération en volume de porteurs créés dans la zone de déplétion. Dépend de la tension et de la durée de vie des porteurs minoritaires.
- Diffusion des porteurs en dehors de la zone de déplétion. Dépend du dopage.
- Effets de surface. Dépend essentiellement du process.

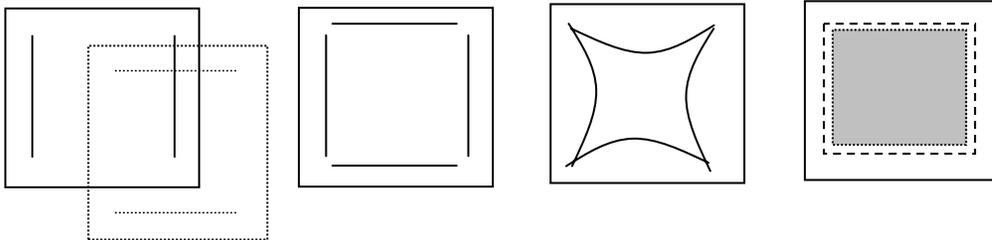
- En cas d'urgence, il est possible de connaître quelques spécifications du détecteur.
- Mesure de la capacité \rightarrow tension de déplétion



- Fait par division de charge résistive : position sensitive detectors (PSD), ou détecteurs de position
- Ou en divisant les surfaces en plusieurs segments : détecteurs à pistes ou strip detectors

- Les couches résistives sont faites par implantation (une ou deux faces)
- les électrodes sont déposées de part et d'autre des surfaces actives
- division résistive : le signal sur chaque électrode est proportionnel à la distance entre l'interaction et l'électrode

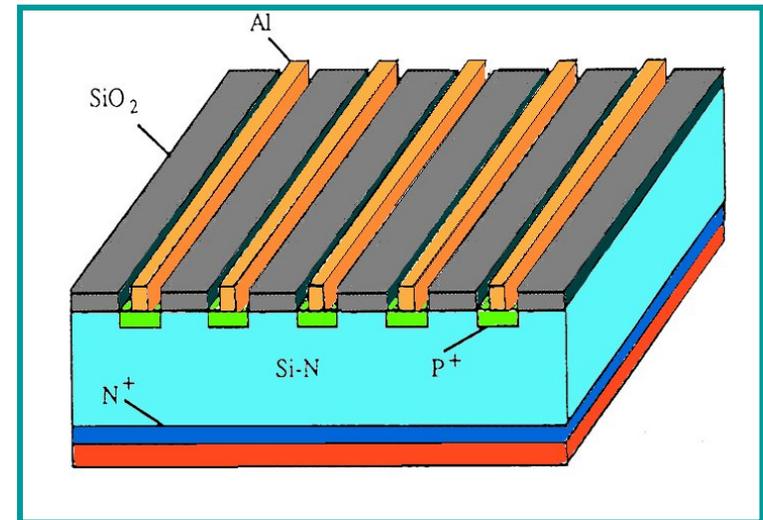
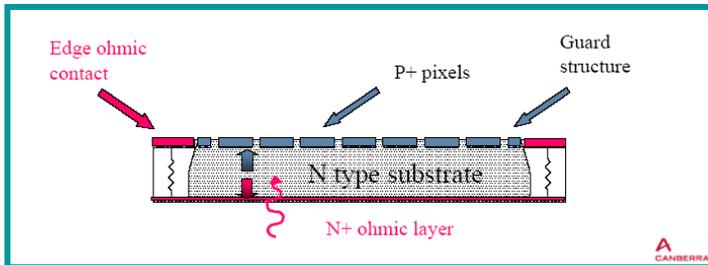
 position de l'ion incident



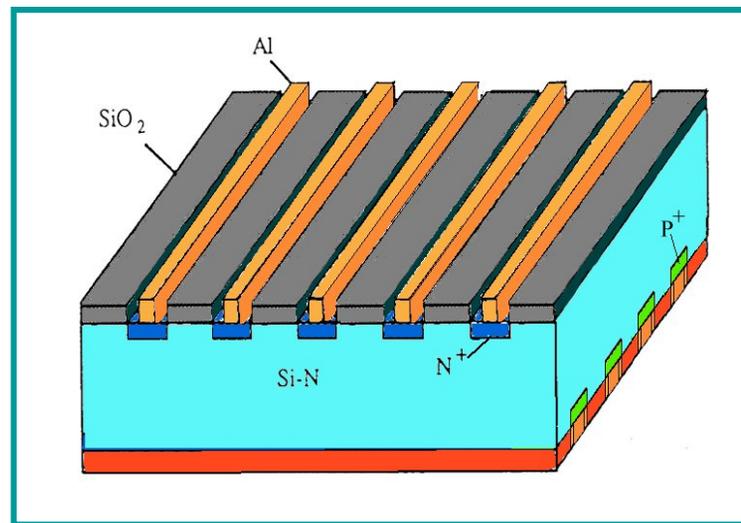
- 2 à 4 électrodes
- un signal par électrode
- combinaisons des signaux

Technologies utilisées pour les détecteurs 1D ou 2D.

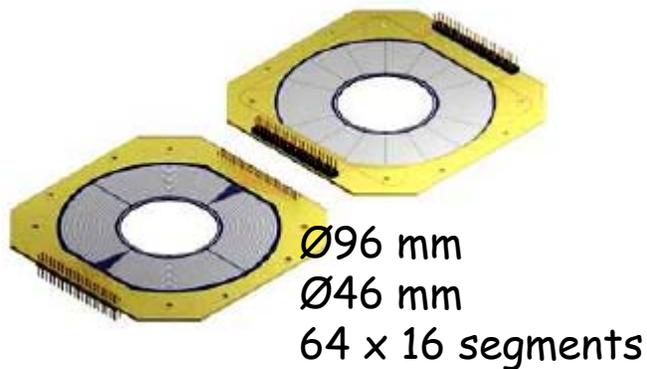
- Segmentation sur la face jonction : localisation à une dimension
- Single-sided detector
- les pistes ont leur propre électronique de lecture
- les pistes sont isolées par des interpistes passivées (SiO_2)



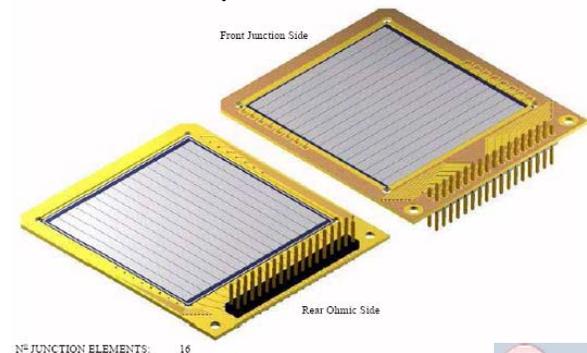
- la segmentation se fait sur les deux faces (90°) -> détecteurs à 2 dimensions
- Double-sided detectors
- les pistes N^+ sur la face N sont isolées par des implantations P^+ .



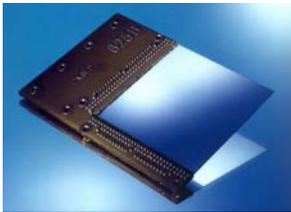
- différentes géométries existent (circulaires, annulaires, rectangulaires...)
- les coûts sont assez élevés notamment pour réaliser les masques



50x50 mm²
300 μm (16 x 16 pistes)



- taille des segments (pistes) : jusqu'à quelques mm
- compromis à faire entre le nombre de voies d'électronique et la résolution spatiale



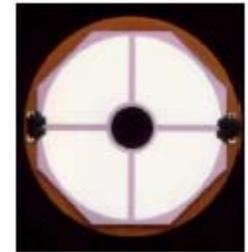
60x60 mm²
300 μm (60x60 pistes)



16 segments/ dia 20mm/ 1500μm

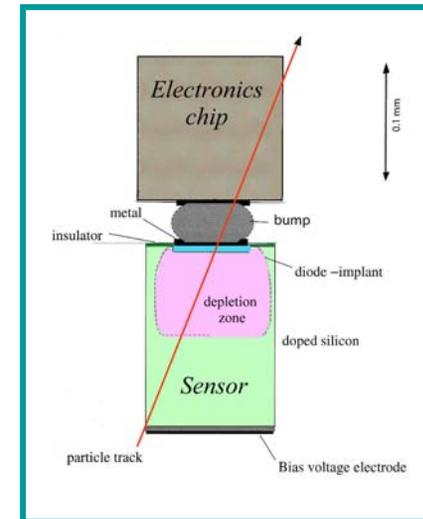
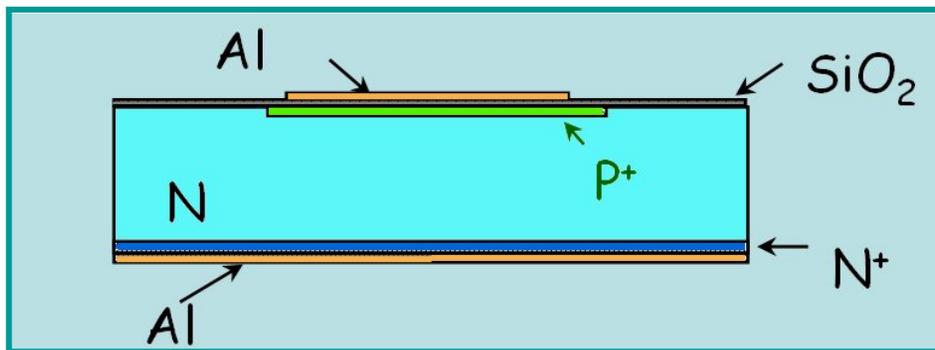


60x40 mm²
100 μm

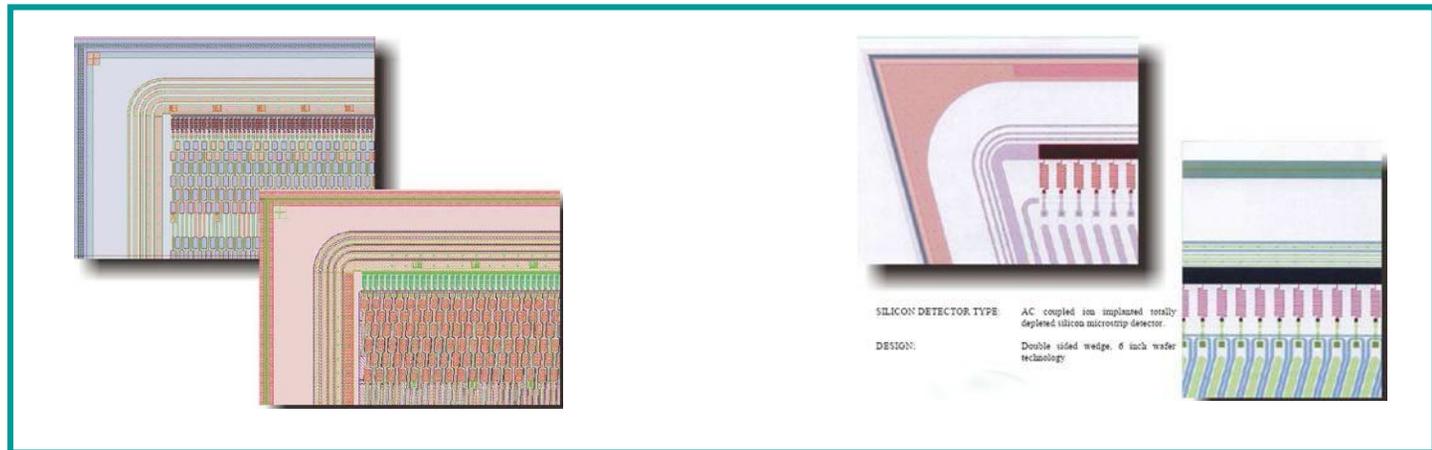


Ø35 mm
Ø10 mm
4 segments

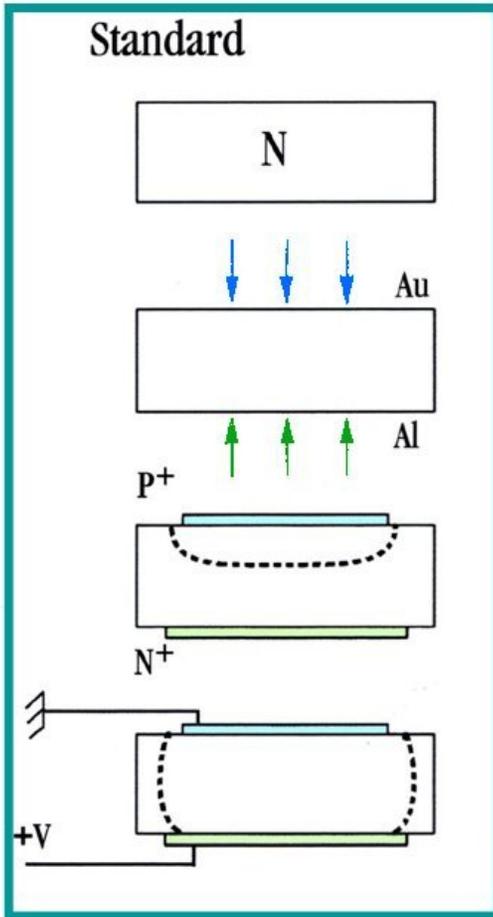
- Permet de la matière à la surface du détecteur
 - oxyde
 - Support mécanique et connectique
 - Cartes d'électronique de lecture



- Les composants peuvent être intégrés à la surface du détecteur (capacités and résistances)

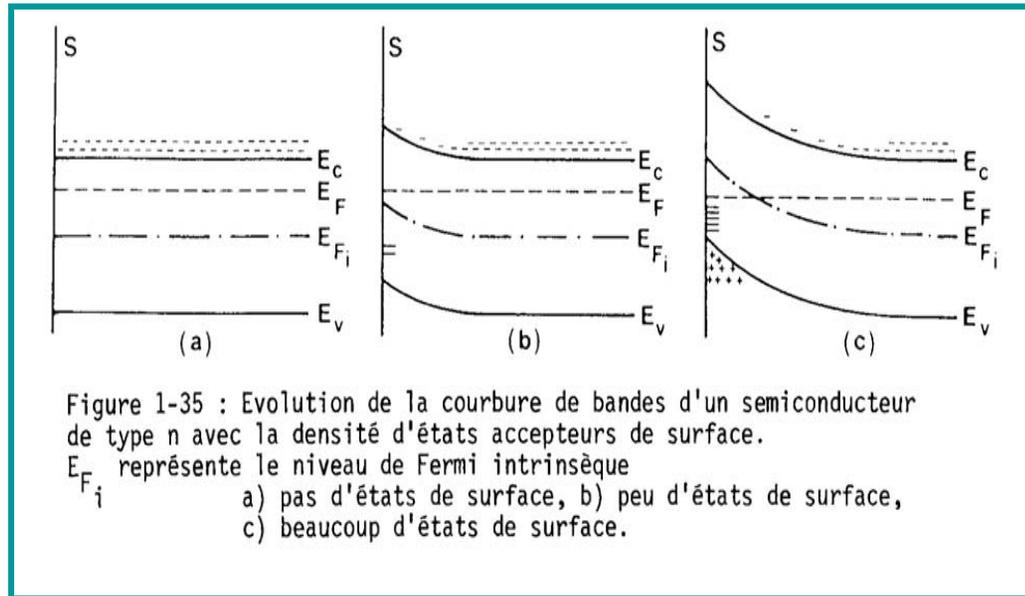


- Cela constitue des zones mortes pour les particules chargées en physique nucléaire



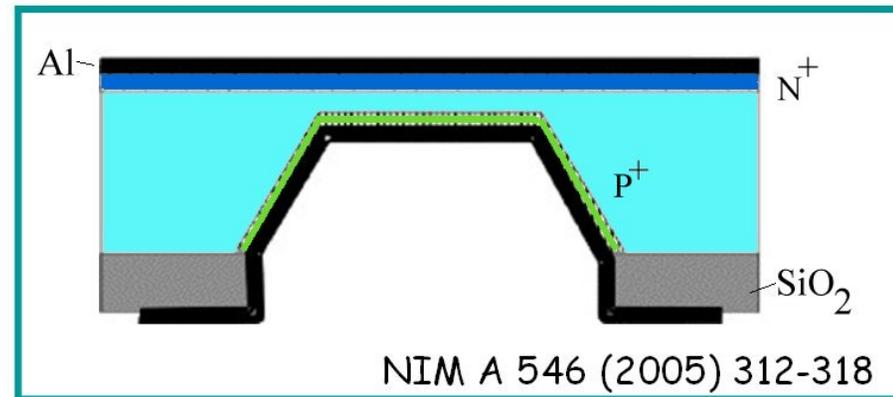
- ➡ Matériau de départ : Si (N) de haute résistivité ($> 3000 \Omega \cdot \text{cm}$)
- ➡ Contact Shottky : dépôt d' Au
- ➡ Contact ohmique : dépôt d' Al
- ➡ Connection : fil d' or ($\varnothing 50 \mu\text{m}$)





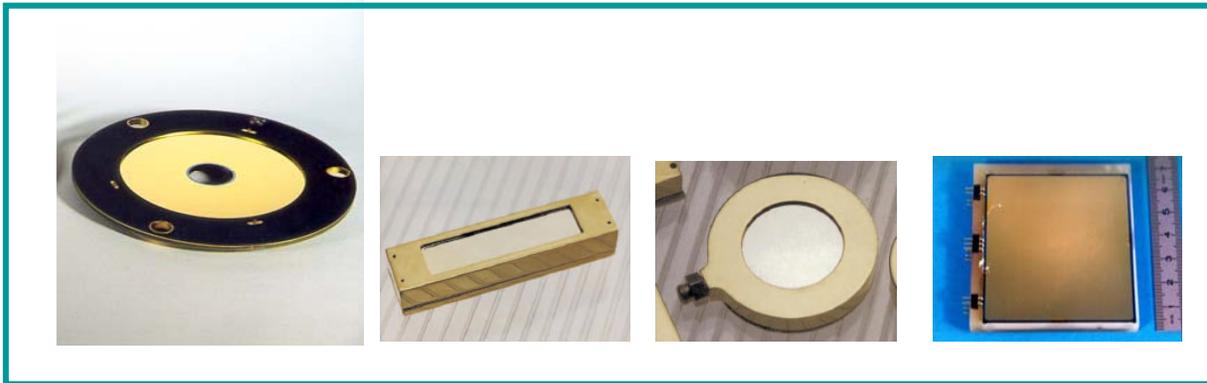
- Les états de surface sont de type P^+
- Procédé toujours utilisé en laboratoire (IPN) et chez ORTEC

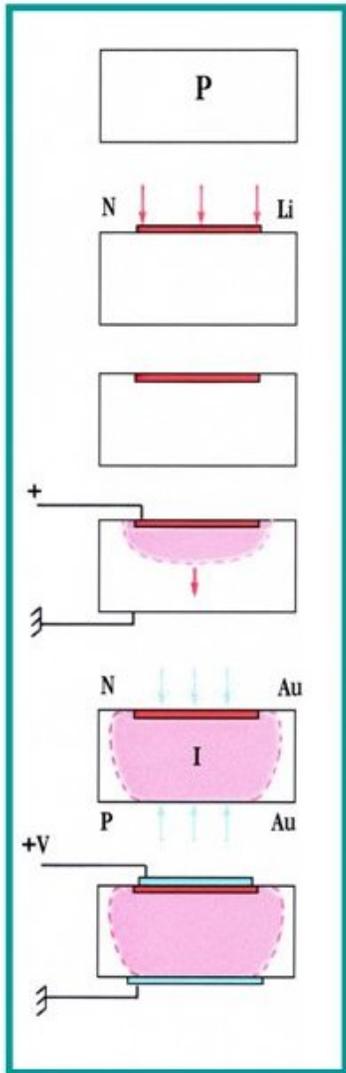
- Pour des épaisseurs inférieures à $300\ \mu\text{m}$
- L'amincissement se fait par
 1. Abrasion mécanique : procédé long et pas toujours fiable : l'homogénéité peut ne pas être satisfaisante.
 2. Etching anisotropique:
 - TMAH - 80°C - 14h
 - $\langle 100 \rangle$



➔ Application : détection et identification des ions lourds

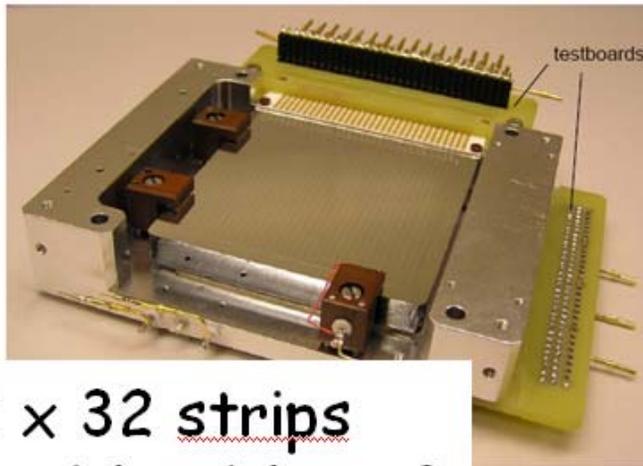
- Développé au début des années 60 ce procédé a été largement utilisé pour obtenir des épaisseurs de détection plus élevées que celles qu'offrent les jonctions
- Épaisseurs disponibles : 1 à 20 mm -> structure PIN
- Actuellement concurrencé par des jonctions de 1 à 2 mm



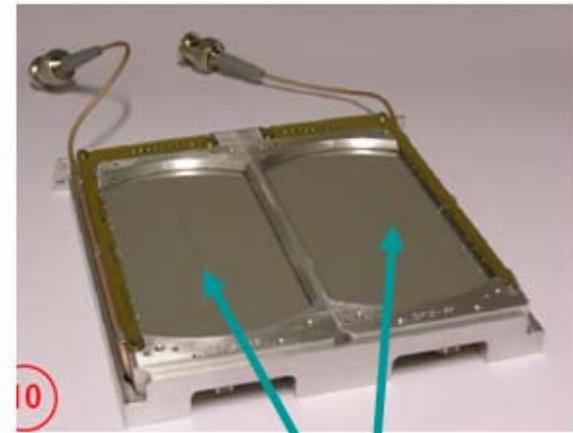


- ➔ Matériau de départ : Si (P, dopants Bore) de résistivité $\sim 1000 \Omega \cdot \text{cm}$
- ➔ Dépôt de Li
- ➔ Diffusion de Li⁺, atome petit et de type donneur (dopage N⁺) : réalisation d'une jonction NP que l'on polarise en inverse
- ➔ Migration du Li durant des jours, des mois @120°C : neutralisation des impuretés de B- par Li⁺. La zone tend à devenir neutre (I)
- ➔ Dépôt d'or :
 - Face avant : zone P⁺
 - Face arrière (Li, zone N⁺) : contact ohmique.

Ex : étapes de fabrication d'un détecteur Si(Li) segmenté

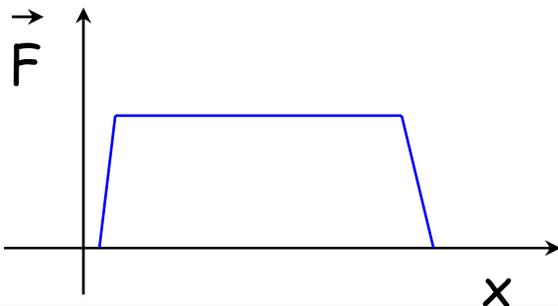
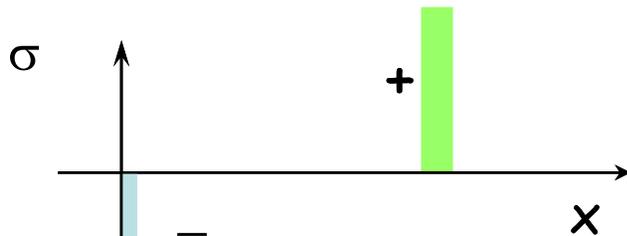
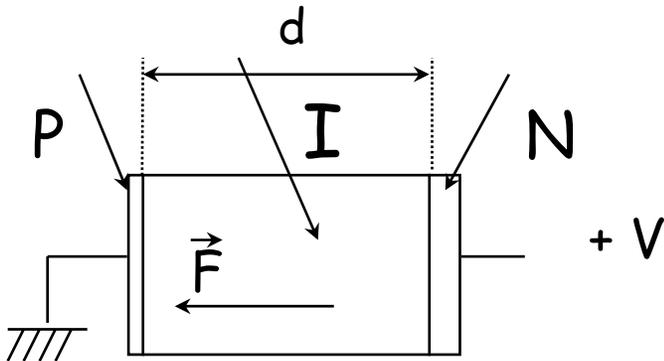


32 x 32 strips
10 mm, 64 x 64 mm²



8 pads
5 mm, 55 x 100 mm²

Forschungszentrum Jülich IKP



- pas de charge d'espace dans la zone I. Le champ électrique est constant : $F = V/d$

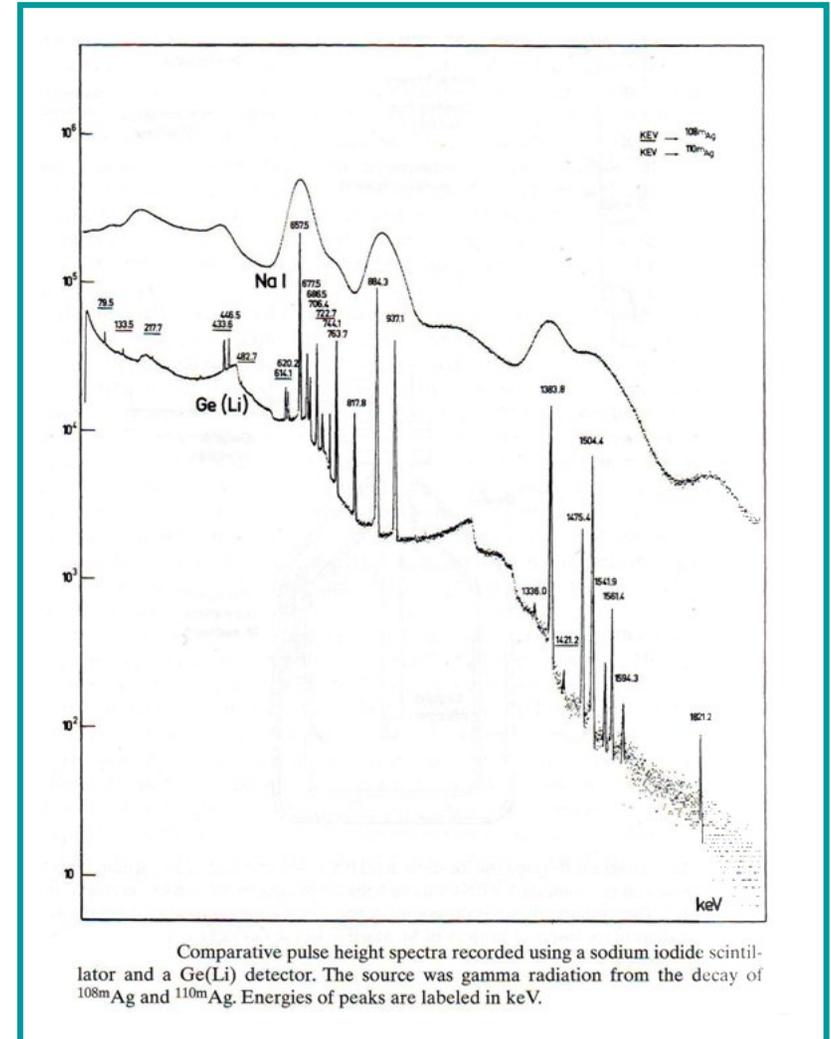
➡ détection des ions
(température ambiante)

➡ détection des électrons
et des X (77K)

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

1962 - 1983:

Les détecteurs Ge(Li) améliorent les résolutions en énergie d'un facteur 10 par rapport aux scintillateurs NaI (Tl)



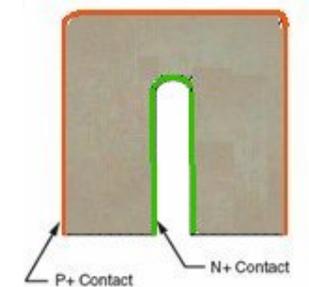
Depuis les années 80 :

- Des cristaux de Ge de plus en plus purs (HPGe, High Purity Germanium)
- Le procédé de compensation au lithium a été définitivement abandonné. On réalise maintenant des jonctions sur des cristaux de HPGe de plus en plus volumineux
- Ces détecteurs nécessitent un refroidissement lors de leur utilisation (LN2)

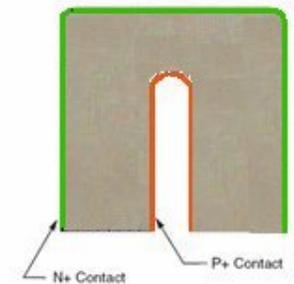
- des géométries planaires et cylindriques coaxiales sont utilisées en fonction des photons à détecter (volumes de détection)
- des cristaux de gros volumes et de haute pureté peuvent être produits
ex : 110mm de long, \varnothing 98 mm, 800 cm³, 4.4 kg,
|NA-ND| $\sim 10^9$ cm⁻³ (impuretés résiduelles)



- Contact P⁺ : implantation de Bore (épaisseur 0.3 μm)
- Contact N⁺ : diffusion de lithium (épaisseur : > 500 μm)
- Détecteurs de type P (plus volumineux mais plus sensible aux neutrons) ou de type N

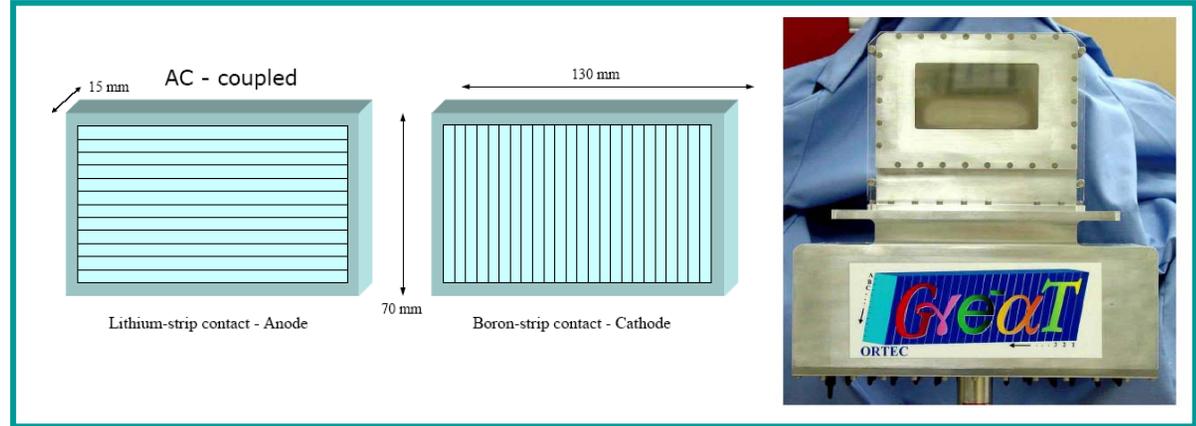


N type Ge

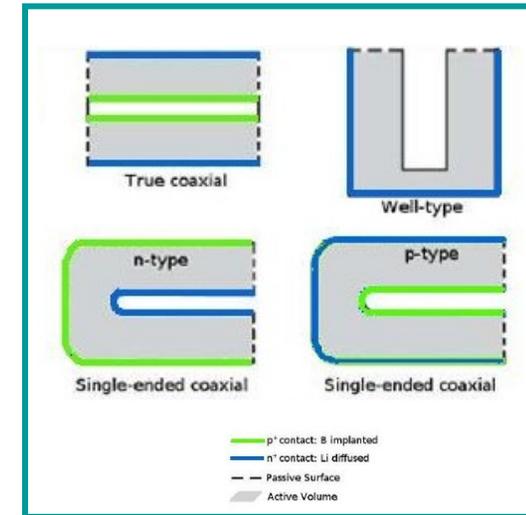


P type Ge

- Même structure et mêmes équations que pour le Si
- Détecteurs parfois segmentés : pistes ou pads de dimension de l'ordre du cm



- pour augmenter les volumes de détection
- essentiellement des détecteurs coaxiaux
- la surface (open-ended) doit être passivée

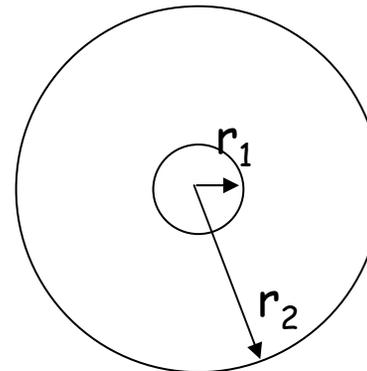


$$V_0 = \frac{q|N_A - N_D|}{2\varepsilon} \left[r_1^2 \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) - \frac{1}{2}(r_2^2 - r_1^2) \right]$$

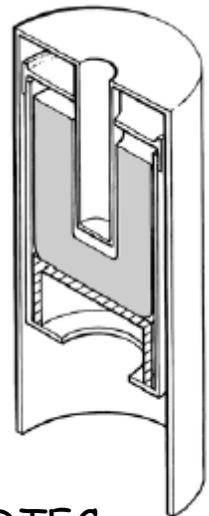
$$F(r) = \frac{qN_A}{2\varepsilon} r + \frac{V - \frac{qN_A}{4\varepsilon}(r_2^2 - r_1^2)}{r \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

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

r_1 : rayon intérieur
 r_2 : rayon extérieur



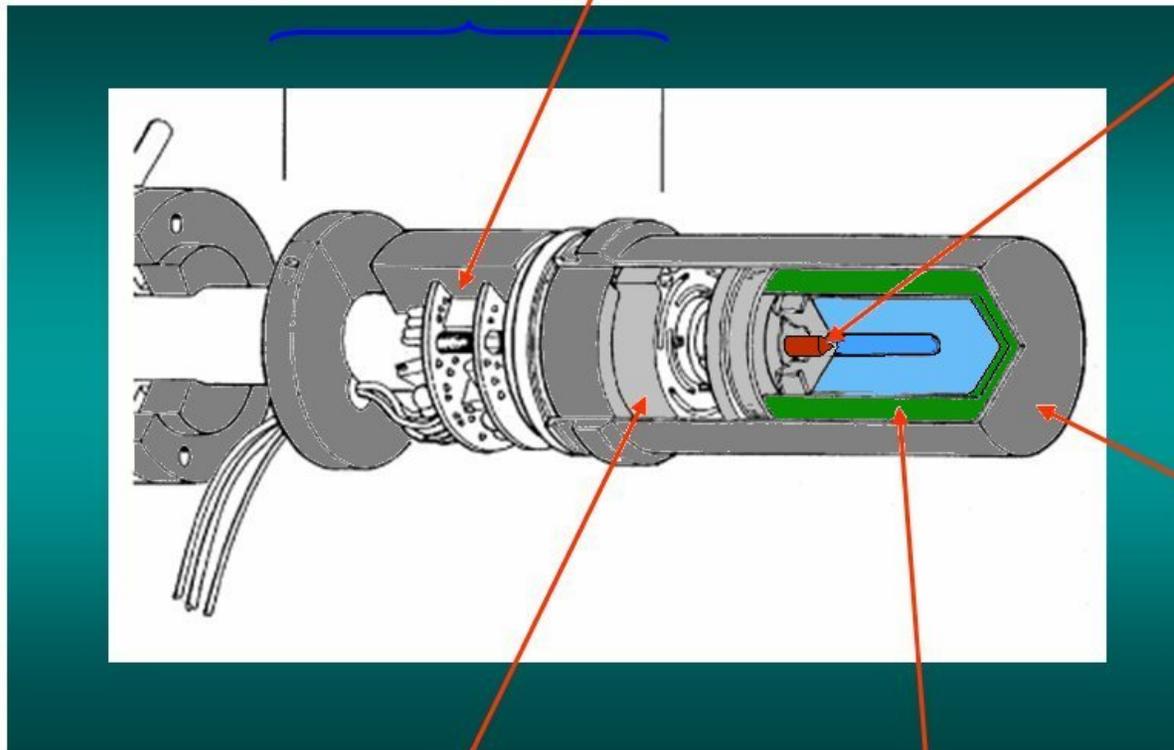
- Particularité : il fonctionne à basse température $< 90\text{K}$: azote liquide en général
- À température ambiante, la génération thermique est trop importante, le courant est élevé et le bruit statistique est trop fort.
- Nécessité d'avoir un cryostat, le cristal est sous vide
- Introduction de matière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



Détection des X et des gammas

ex : détecteur puits - ORTEC

Cap + « warm » electronics (preamp.)



Core contact

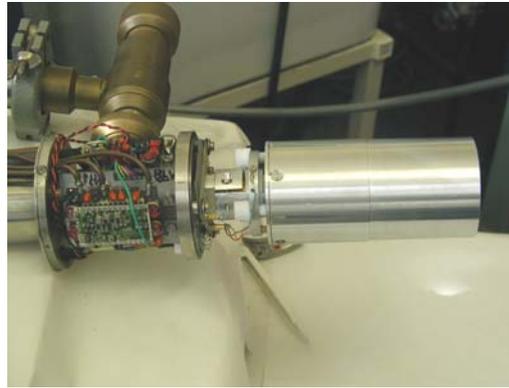
External can

Cap (assembly and thermal screen)

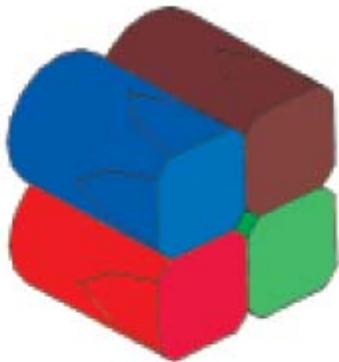
Cooled electronics (R, C, FET)



Détecteur : 50 mm de long et diametre 50 mm

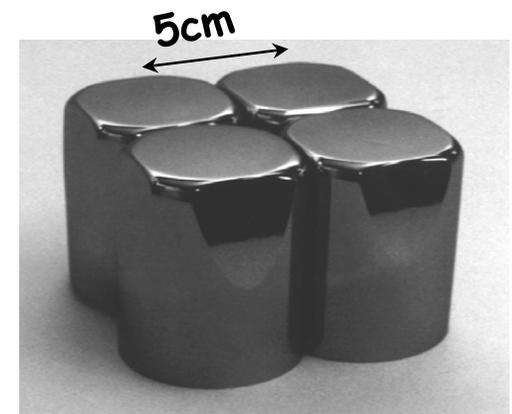


4 détecteurs dans le même cryostat

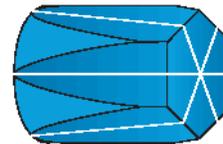
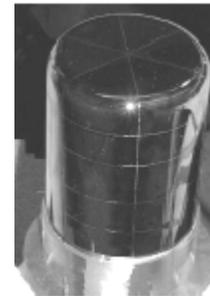
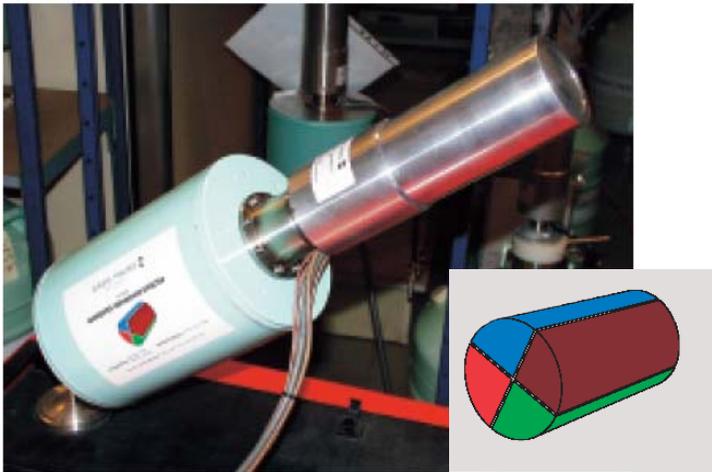


CLOVER EUROGAM

- Ø 50 mm, length 70 mm (EUROGAM type)
- Ø 50 mm, length 80 mm
- Ø 60 mm, length 90 mm (EXOGAM type)
- Ø 70 mm, length 40 mm (VEGA type)

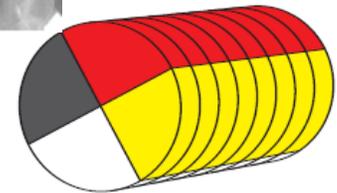


Pour la localisation des interactions



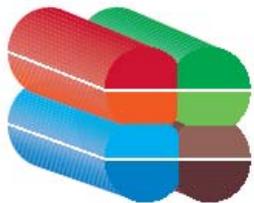
MINIBALL
Détecteur à 6 segments

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



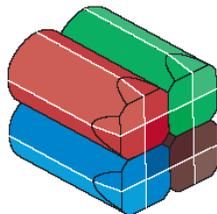
32 SEGMENTS MSU

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



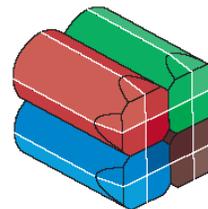
CLOVER DEUX SEGMENTS

Sur ^{60}Co	{	Résolution à mi-hauteur	: 4 x 2,25 keV
		ϵ_r	: 4 x 22%



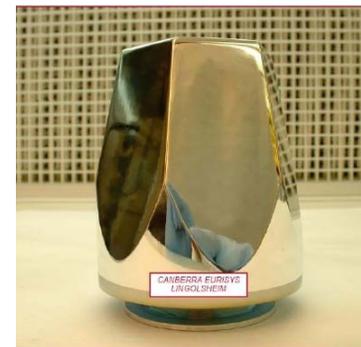
SUPER CLOVER QUADRUPLE SEGMENTS
Ensemble de 4 détecteurs de longueur 140 mm

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



Ensemble de 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 : $\geq 55\%$

Épaisseur de paroi : 0,7 mm

Distance Germanium - capsule : 0,7 mm.

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 (⁶⁰ 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 (¹³⁷ 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



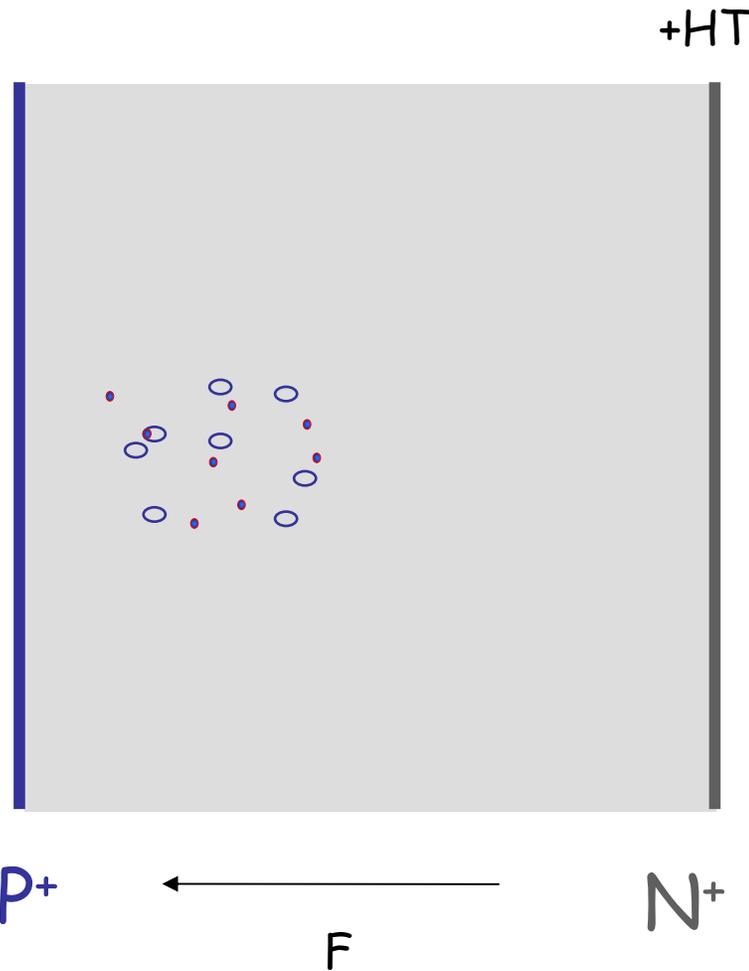
Formation du signal

- Une particule chargée est ralentie dans le matériau et perd son énergie suivant différents processus (ionisation)
- Création de paires électron-trou dans le détecteur
- Séparation des paires sous l'action d'un champ électrique
- Migration des charges vers les électrodes : les électrons \rightarrow N, les trous \rightarrow P
- Collection et formation du signal

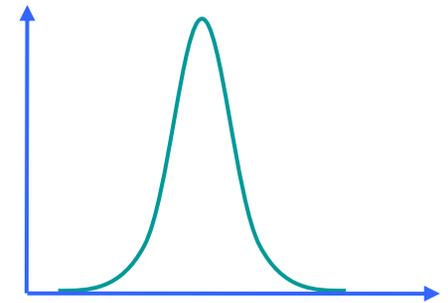
Création
de paires



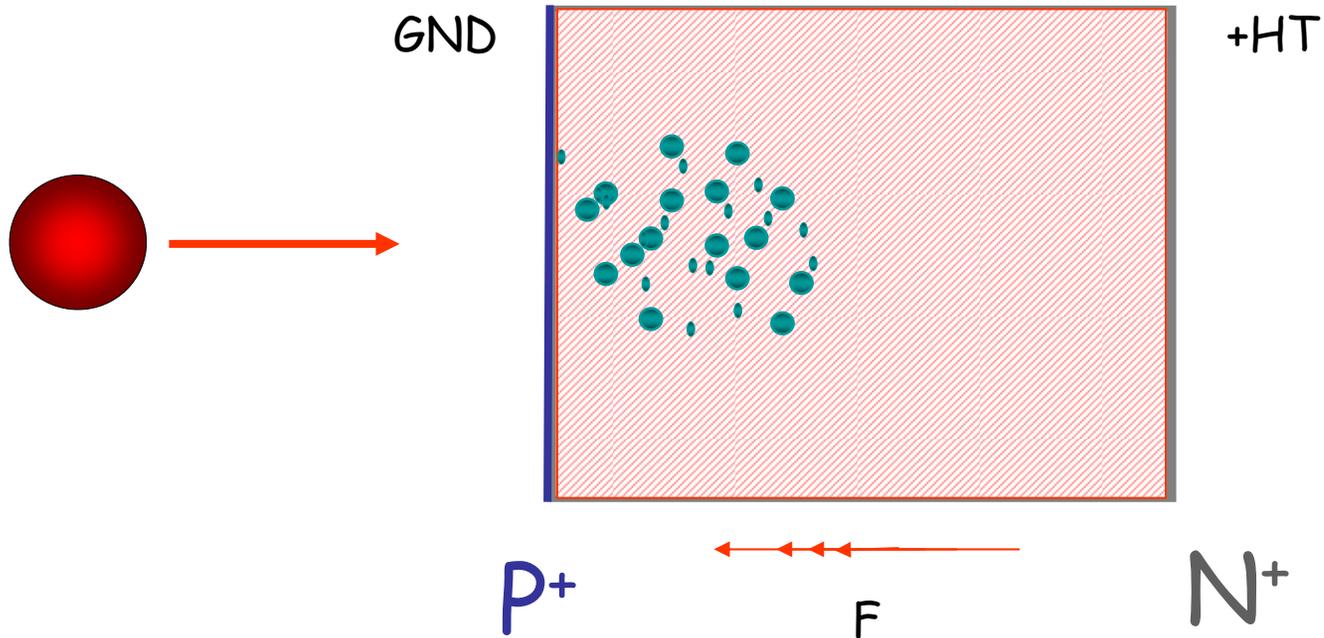
ionisation



Collection des
charges

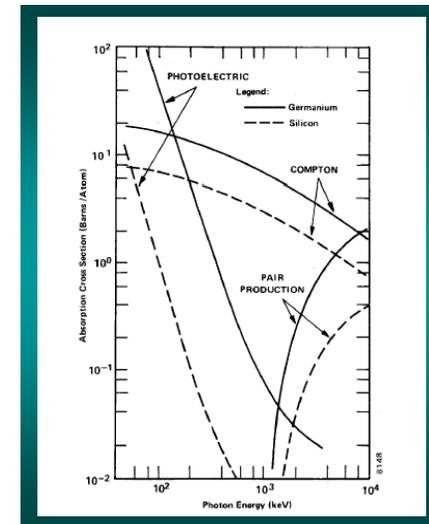


signal



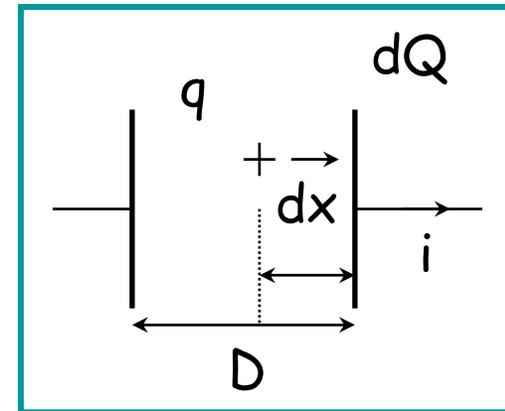
- Une particule chargée perd de son énergie via des collisions avec les atomes du réseau cristallin (ionisation). Le processus de perte d'énergie se retrouve dans la formule de Bethe-Bloch de pouvoir d'arrêt dE/dx
- Il faut adapter les épaisseurs de détecteurs aux parcours des ions (Si)
 - alpha @ 5.5 MeV \rightarrow $\sim 27 \mu\text{m}$
 - ^{208}Pb @ 1 GeV \rightarrow $\sim 60 \mu\text{m}$
 - ^{53}Cr @ 747 MeV \rightarrow $\sim 180 \mu\text{m}$
 - proton @ 5 MeV \rightarrow $\sim 216 \mu\text{m}$
 - ^{208}Pb @ 6 GeV \rightarrow $\sim 330 \mu\text{m}$
 - Electron @ 975 keV \rightarrow $\sim 1.7 \text{ mm}$
 - proton @ 30 MeV \rightarrow 4.9 mm

- La création de paires électron-trou se fait de façon indirecte
 - Les effets (section efficace) dépendent du Z du matériau :
 - Effet photoélectrique, (Z^4 to Z^5)
 - Diffusion Compton (Z)
 - Création de paires, (Z^2)
- ➔ **Ge ($Z=32$) plus efficace que Si ($Z=14$)**
- Les détecteurs sont adaptés aux énergies des X et des γ
 - Si(Li) refroidis pour des X jusqu'à 100 keV
 - Ge pour des γ jusqu'à 10 MeV



- le déplacement d'une charge q entre 2 électrodes parallèles distantes de D induit un signal sur ces électrodes $dQ = q dx/D$

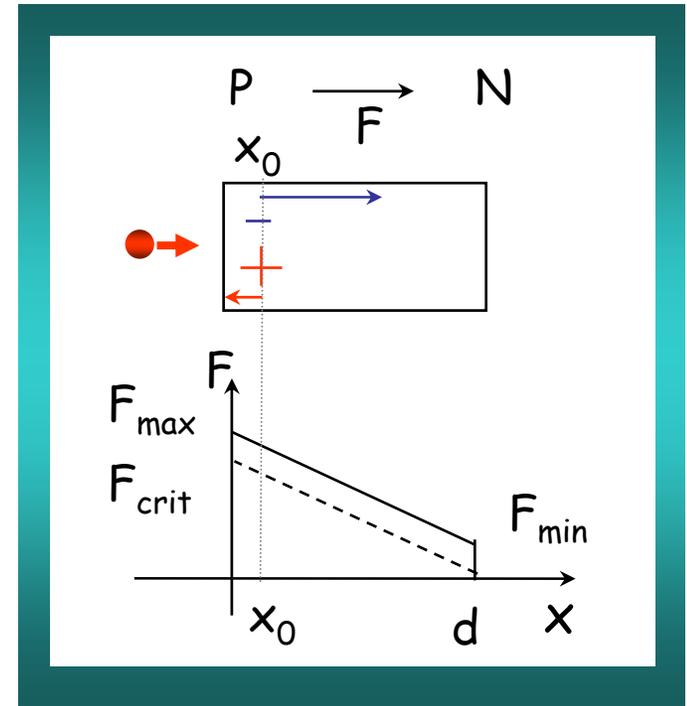
- et dans le circuit extérieur, un courant $i = q v/D$



- c'est donc le mouvement des charges qui induit un signal plutôt que les charges collectées. (Ramo - 1939)
- Résultat valable en présence de zones de charge d'espace (Cavalleri - 1963)

- Le mouvement des charges induit le signal $i = qv/D$
- Chaque porteur de charge induit un courant :
 - $i_- = -qv_-/D$ pour les électrons
 - $i_+ = qv_+/D$ pour les trous
- Le courant total est la somme de toutes les contributions
- En pratique :
 - On exprime le champ électrique en fonction du type de détecteur $F(x)$
 - On écrit l'équation du mouvement $x(t)$ à partir de $v = \mu F$
 - On calcule le courant $i(t)$ à partir de Ramo
 - Puis la charge $Q(t)$
 - On évalue le temps total de collection
- Base des simulations

Faisceau entrant par la face avant
(champ fort)

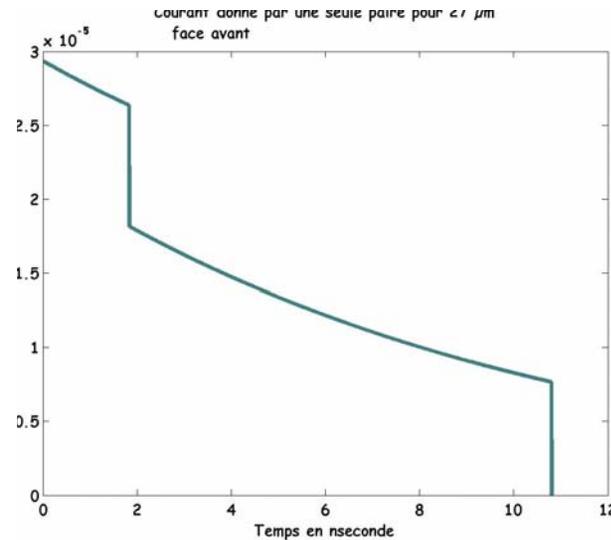
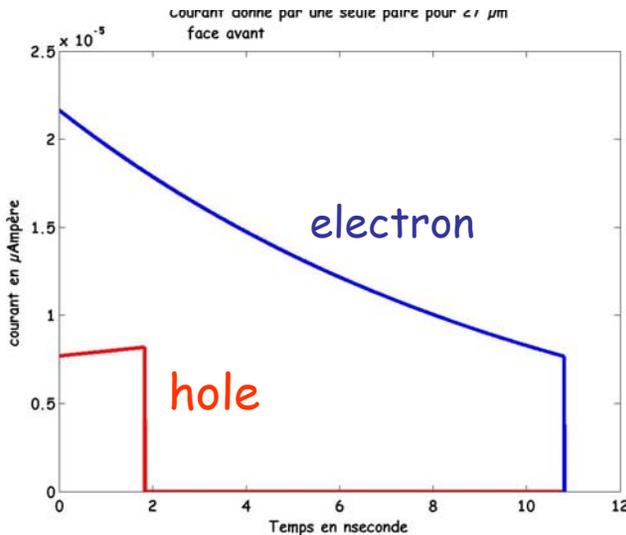
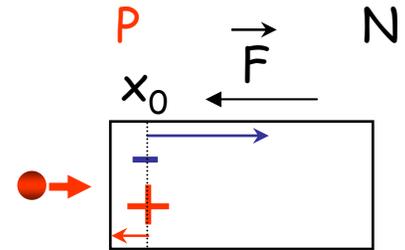


$$F(x) = \frac{-F_{\text{crit}}}{d}x + F_{\text{max}}$$

$$v_- = \frac{dx}{dt} = \mu_-(x).F(x) \longrightarrow i_-$$

$$v_+ = \frac{dx}{dt} = \mu_+(x).F(x) \longrightarrow i_+$$

- Signal for one pair created at $\sim 27 \mu\text{m}$ from front side (PN junction) (distance equivalent to the range of 5.5 MeV alpha)



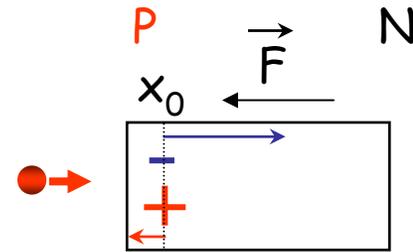
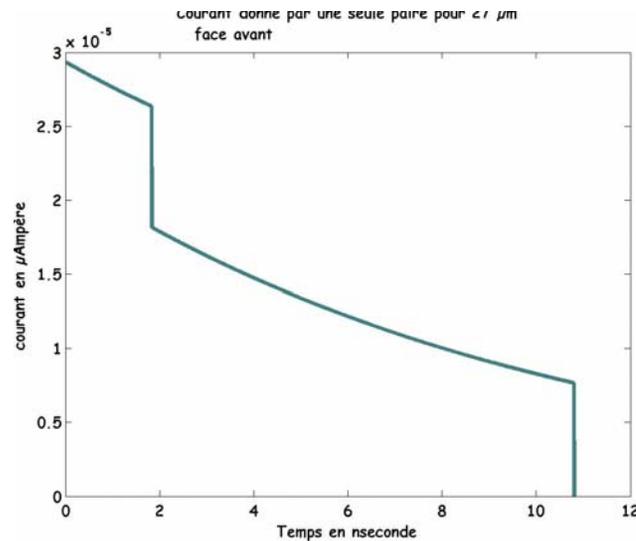
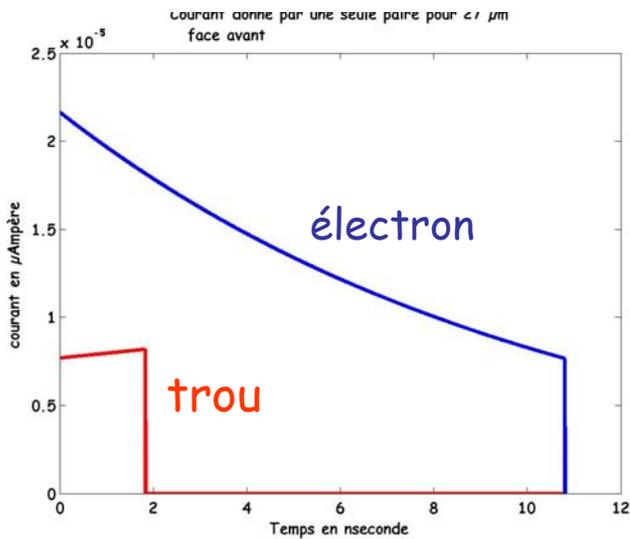
$\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$
 $e = 300 \mu\text{m}$
 $V_{\text{depl}} = 64 \text{V}$
 $V_{\text{pol}} = 2 \times V_{\text{depl}}$

Collection time :
 electron : 10.8 ns
 hole : 1.8 ns

total : 10.8 ns

No rise time !

Signal pour une paire créée à $\sim 27 \mu\text{m}$ de la face avant
(distance équivalente au parcours d'un alpha de 5.5 MeV)



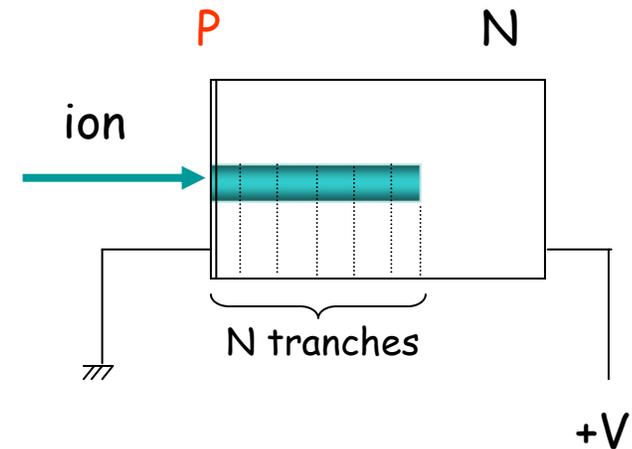
$\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$
 $e = 300 \mu\text{m}$
 $V_{\text{depl}} = 64\text{V}$
 $V_{\text{pol}} = 2 \times V_{\text{depl}}$

Temps de collection :
 électron : 10.8 ns
 trou : 1.8 ns

total : 10.8 ns
Remarque : temps de montée nul !

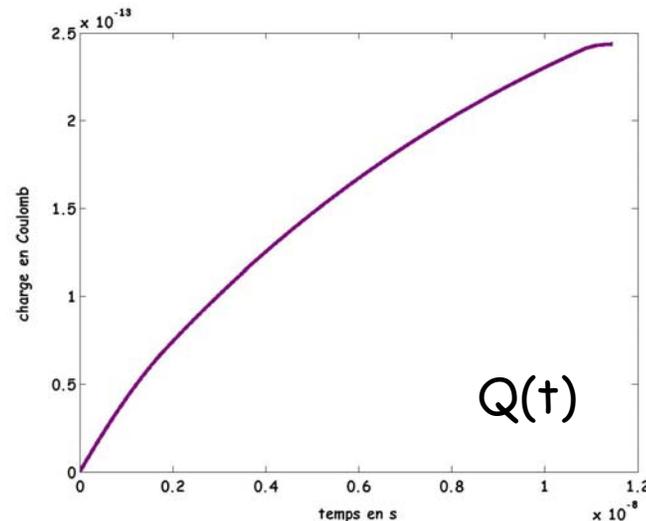
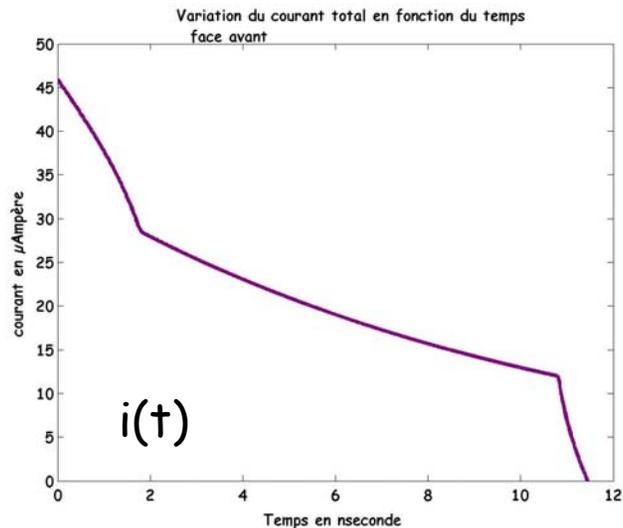
- On « découpe » le parcours de l'ion en N tranches équivalentes
- Dans chaque tranche on calcule :
 - Le nombre de paires électron-trou créées : $N_p = \Delta E / 3.6$ (eV).
 - La mobilité de chaque porteur de charge : μ_+ et μ_- (la mobilité dépend du champ électrique, mais aussi de l'orientation du cristal)
 - Le courant créé par le mouvement de chaque porteur de charge i_+ et i_- à partir du théorème de Ramo :

$$i_{\pm} = qv_{\pm}/d$$



- On somme les contributions

- Exemple : alpha de 5.5 MeV dans le silicium (en face avant)
- Parcours : $\sim 27 \mu\text{m}$ (SRIM)

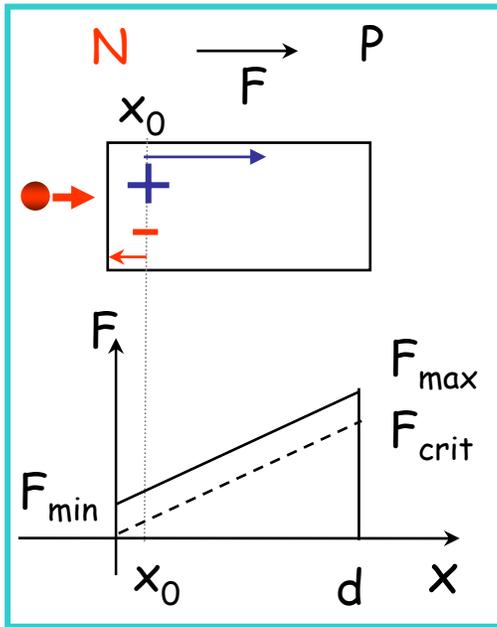


$F_{\min} = 11 \text{ kV/cm}$
 $F_{\max} = 32 \text{ kV/cm}$
 $F_{\text{crit}} = 21 \text{ kV/cm}$
 $\text{Temps} = 11.5 \text{ ns}$
 $i_{\max} = 46 \mu\text{A}$
 $Q_{\max} = 0.24 \text{ pC}$

$\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$
 $e = 300 \mu\text{m}$
 $V_{\text{pol}} = 64 \text{ V} = 2 \times V_{\text{depl}}$

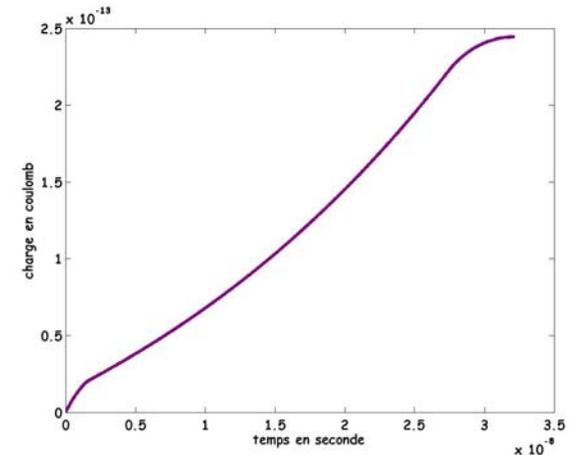
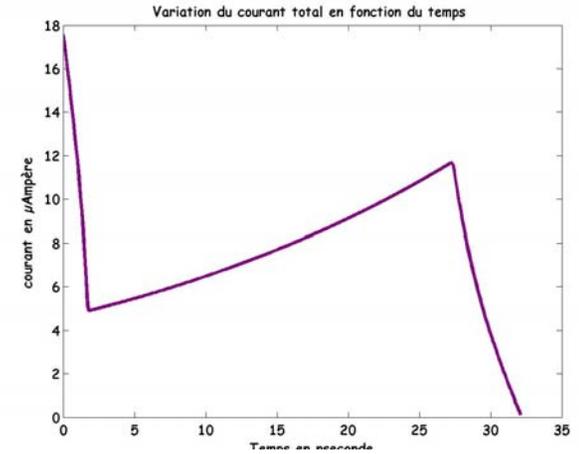
Rmq : temps de collection = 11.5 ns

Pour le même α de parcours $\sim 27 \mu\text{m}$

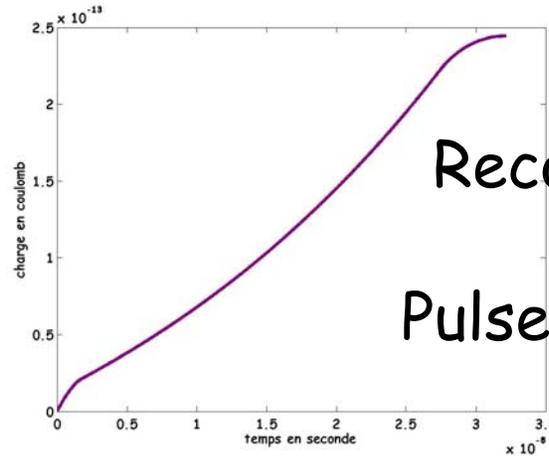
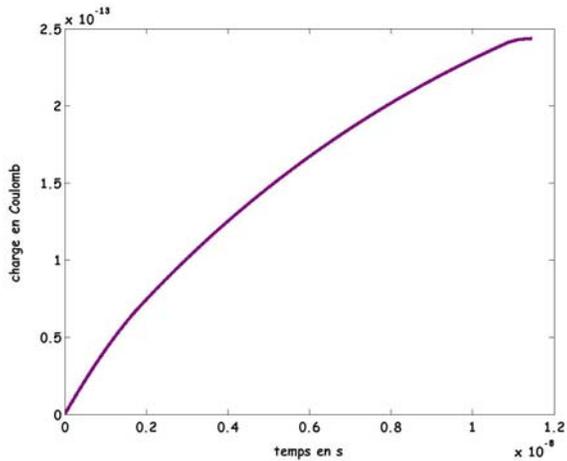
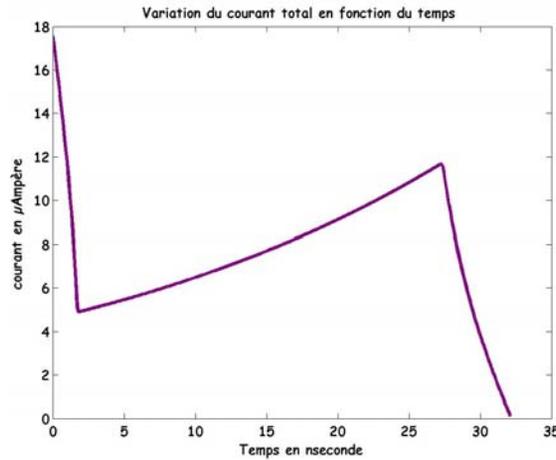
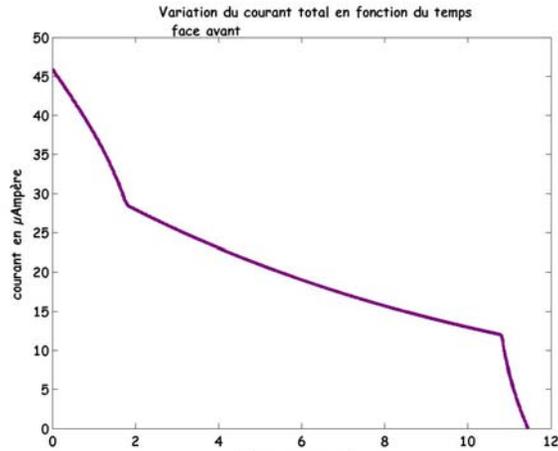


Rmq : temps de collection = 32 ns

➡ La forme et le temps sont différents !



$\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$
 $e = 300 \mu\text{m}$
 $V_{\text{pol}} = 64 \text{ V} = 2 \times V_{\text{depl}}$



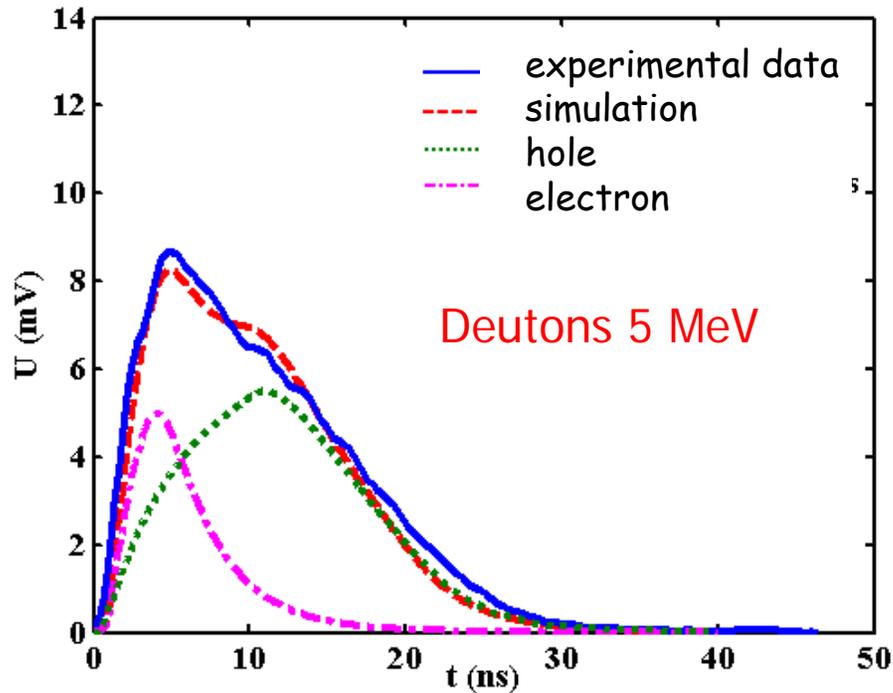
Reconnaissance de forme
Pulse shape analysis (PSA)?

Face avant

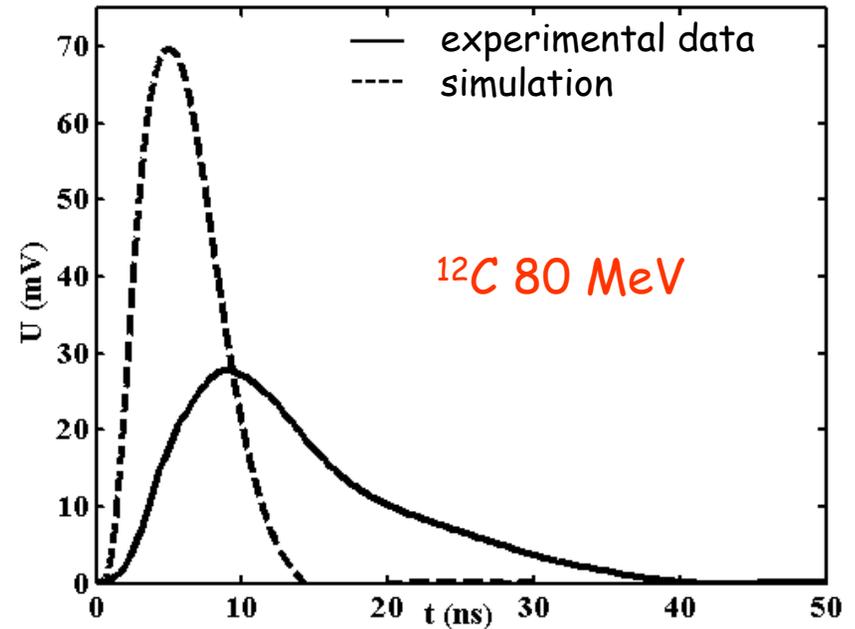
Face arrière

$\rho = 10 \text{ k}\Omega\cdot\text{cm}$
 $e = 300 \text{ }\mu\text{m}$
 $V_{\text{pol}} = 64\text{V} = 2 \times V_{\text{depl}}$

- Elaborer un modèle valable pour les ions légers et les ions lourds.
- Tenir compte des effets de densité d'ionisation qui deviennent importants pour les ions lourds (effet plasma)

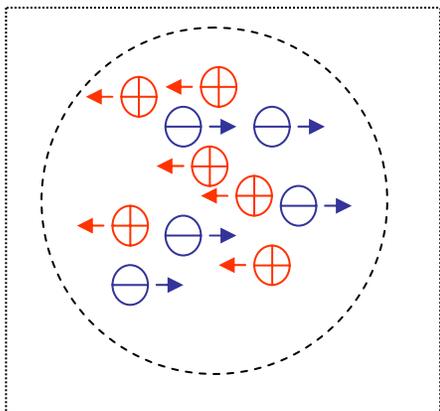


$e = 300 \mu\text{m}$
 $S = 64 \text{ mm}^2$
 $U_{\text{pol}} = 90 \text{ V}$ ($U_{\text{depl}} = 25 \text{ V}$)
 Back side

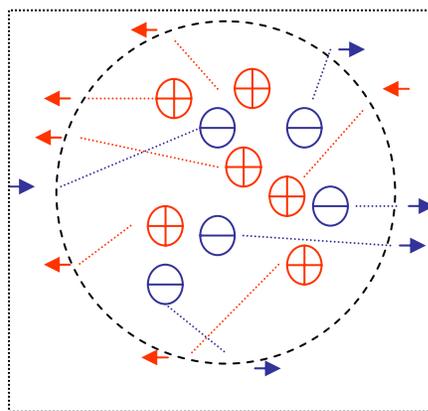


^{12}C @ 80 MeV, $127 \mu\text{m}$, $n \sim 175\,000 \text{ e}/\mu\text{m}$
 $e = 300 \mu\text{m}$
 $S = 200 \text{ mm}^2$
 $U_{\text{pol}} = 190 \text{ V}$ ($U_{\text{depl}} = 125 \text{ V}$).
 Back side

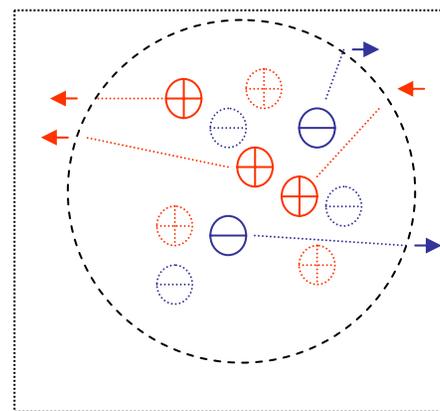
- La densité de charges créées par l'ionisation est liée à l'ion incident : plus l'ion est lourd, plus la densité est grande -> plasma
- Le temps de « plasma » : temps d'érosion du plasma, il dépend du champ électrique et de l'ion incident
- La quantité de charge mesurée peut se révéler inférieure à celle attendue (défaut d'ionisation ou PHD « pulse height defect »)



migration
(pour les ions légers)



plasma
(écranage du
champ électrique)

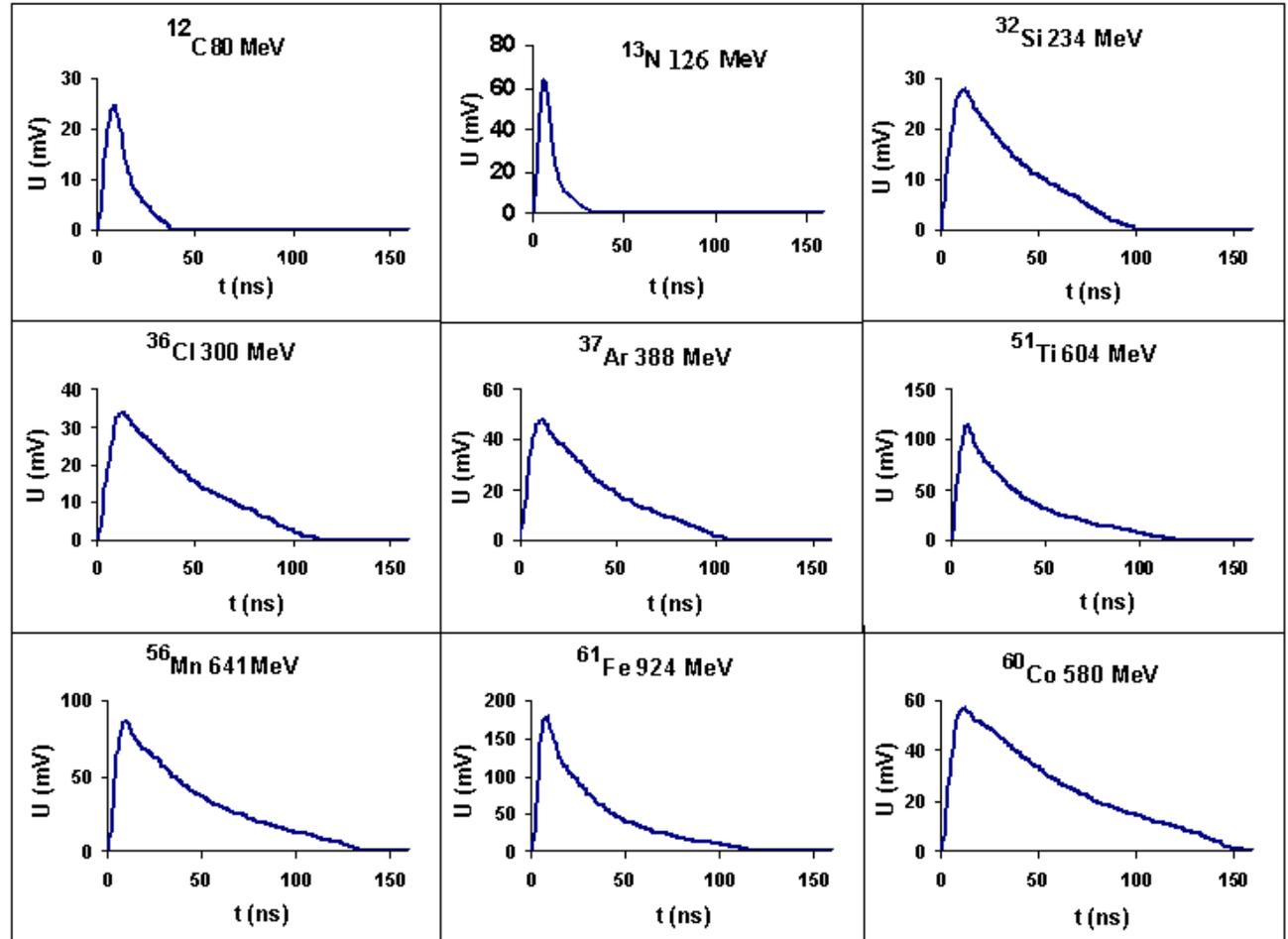


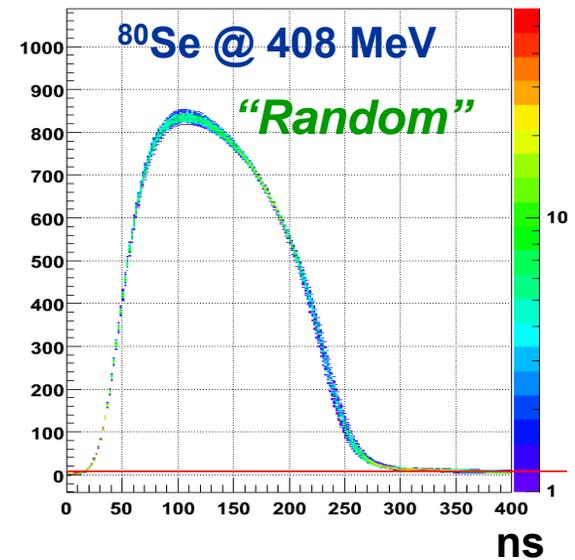
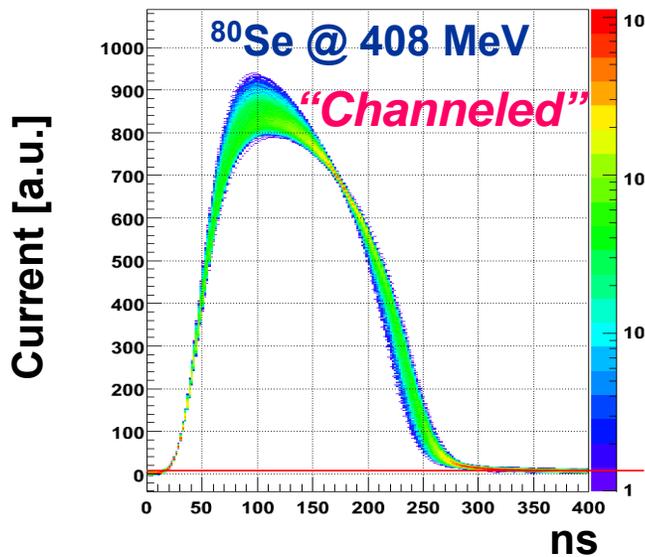
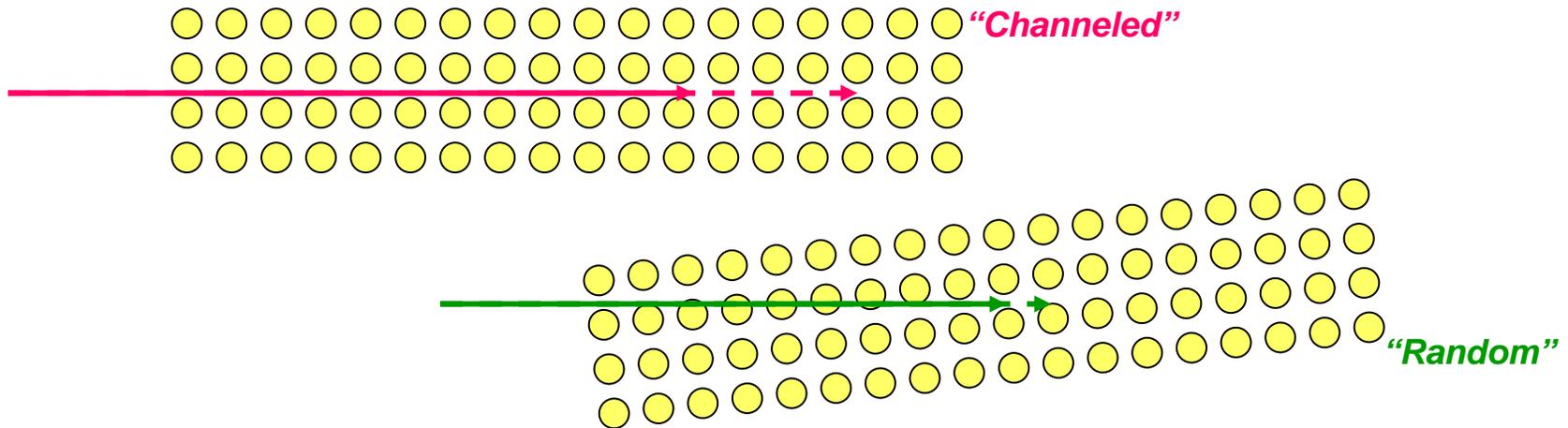
recombinaison des charges
(E mesurée $<$ E incidente)

La trace de l'ion dans le silicium est considérée comme un cylindre de rayon $\sim 1 \mu\text{m}$ et de longueur le parcours de l'ion (simulations)

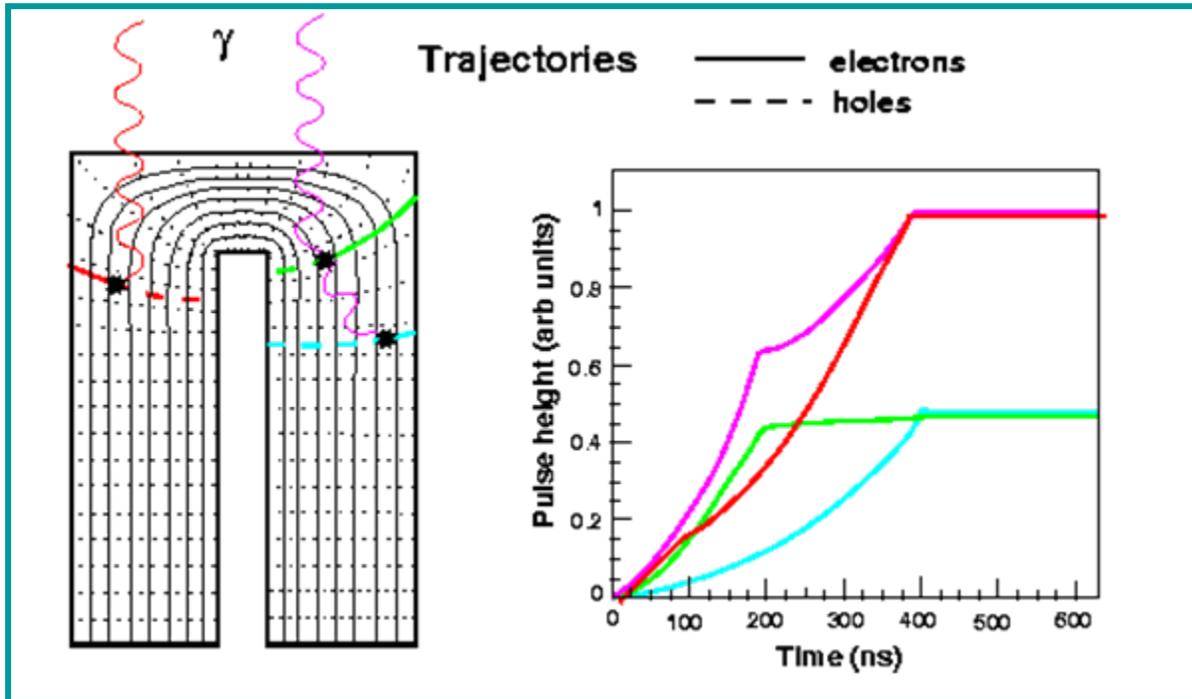


30 ions détectés
 $3 \leq Z \leq 28$
 $28 \leq E \leq 750 \text{ MeV}$
 $3 \leq E/A \leq 14 \text{ MeV}$



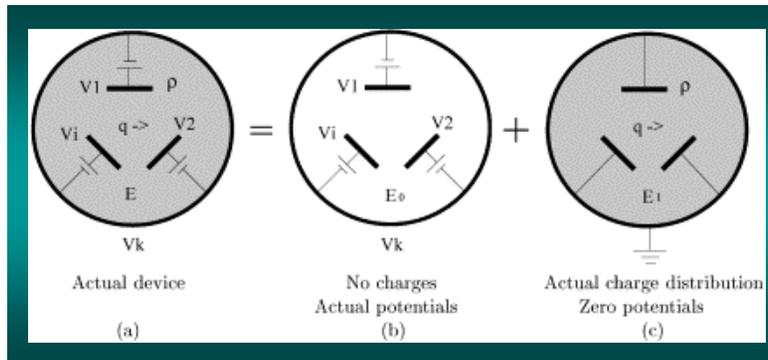


- La géométrie et le champ électrique sont plus complexes !



EXO GAM

- V_k électrodes
- Théorème de Shockley-Ramo : $i_k(t) = -q\vec{v} \cdot \vec{E}_k(\vec{d}(t))$
- Calcul du potentiel et du champ de pondération (*weighting potential et weighting field*) : artifice de calcul $\rightarrow E_k$: rend compte du couplage géométrique entre la charge à une position donnée d et l'électrode k



Z.He, NIM A 463 (2001) 250-267

- potentiel 1 sur l'électrode de lecture et 0 sur toutes les autres, en l'absence de charge.

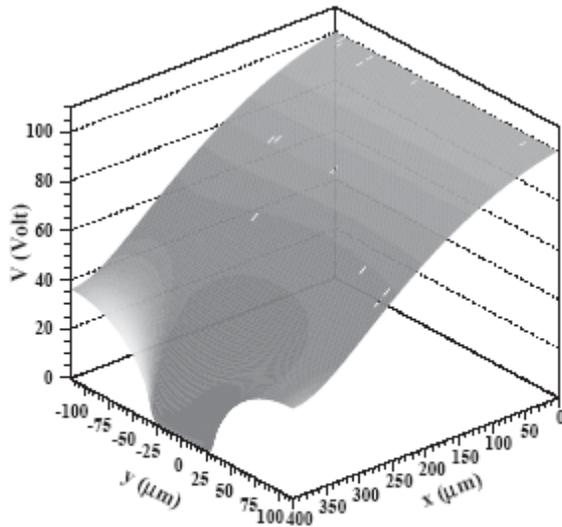


Fig. 17. Electric potential in an elementary cell of a SSD. The values of the geometrical parameters are: $d = 400 \mu\text{m}$, $p = 228 \mu\text{m}$, $w = 60 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$.

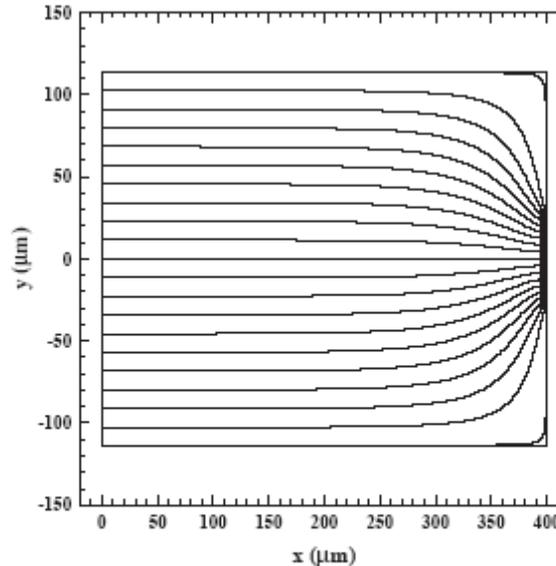


Fig. 18. Drift line in a silicon cell. The geometrical parameters are $d = 400 \mu\text{m}$, $p = 228 \mu\text{m}$, $w = 60 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$. The bias potential is $\phi_0 = 100 \text{V}$.

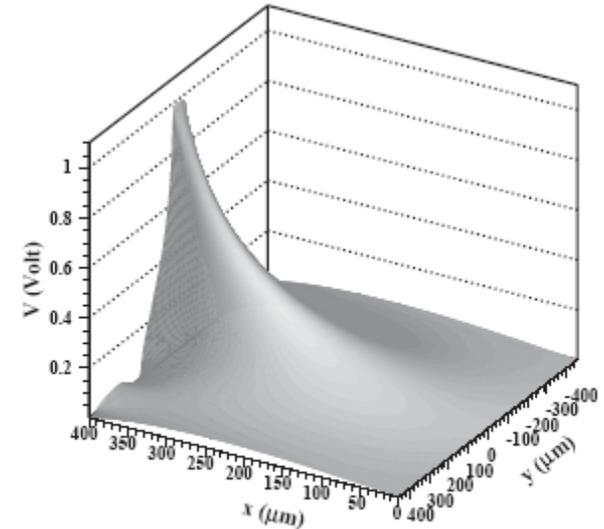


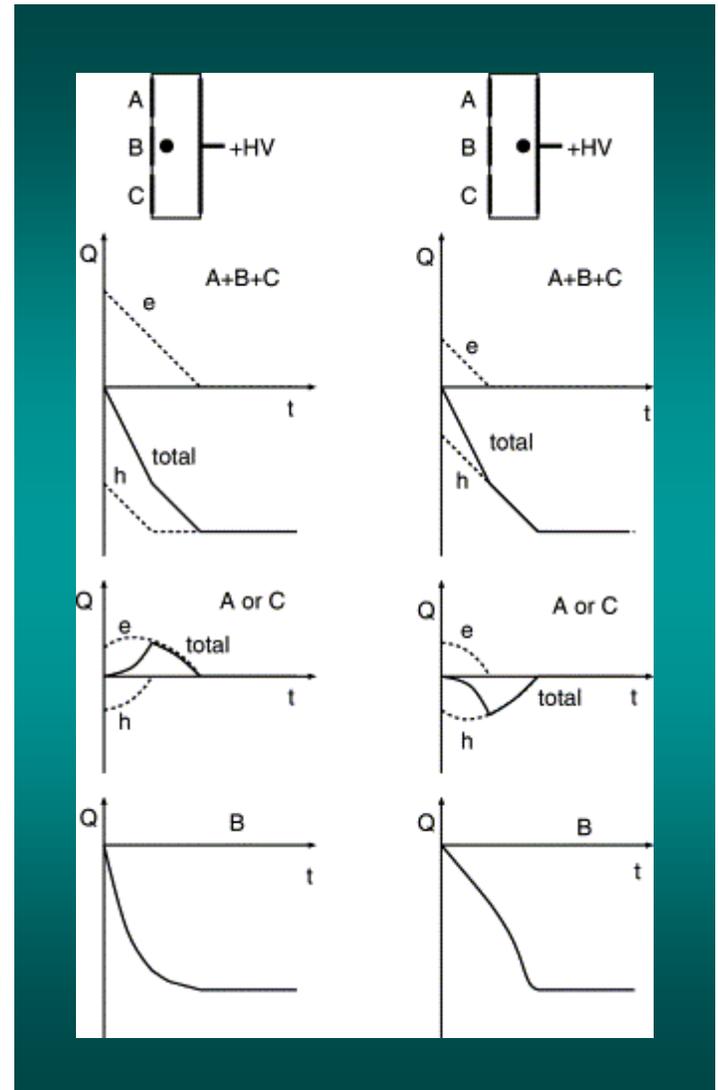
Fig. 19. Weighting potential of a strip. The cell used for computing the potential includes four neighbour strips. The geometrical parameters are $d = 400 \mu\text{m}$, $p = 228 \mu\text{m}$, $w = 60 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$.

Exemple de potentiel, électrique, lignes de champ et weighting potential

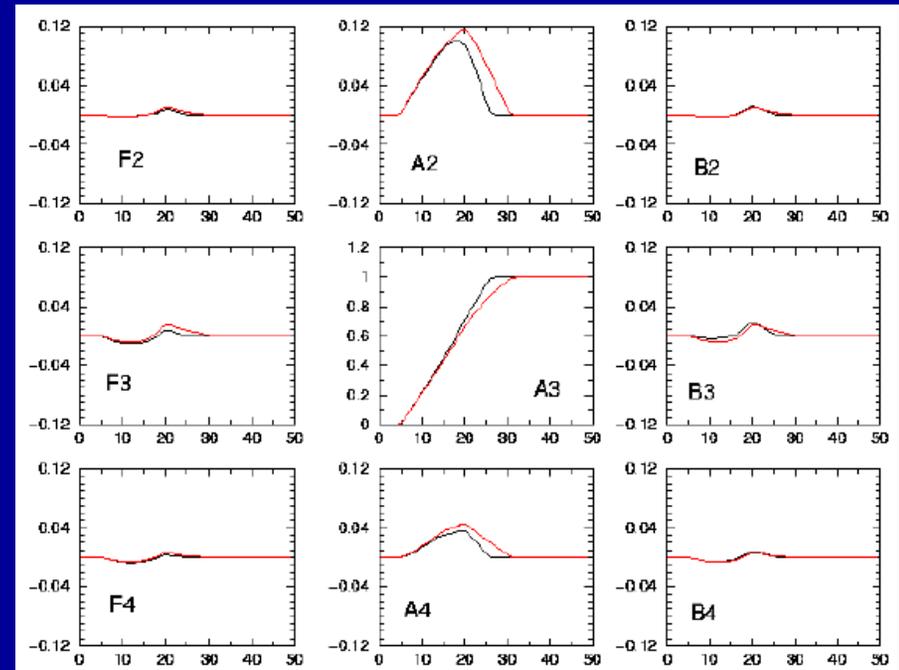
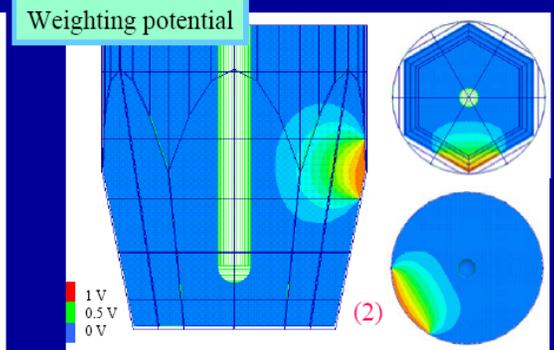
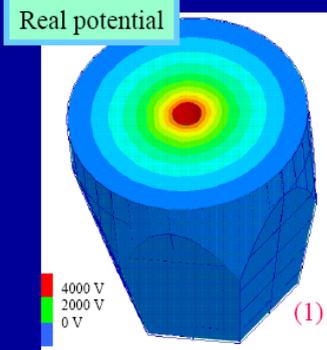
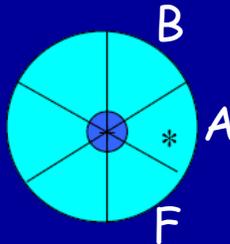
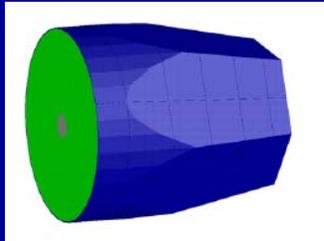
NIMA 533 (2004) 322-343

- Notion de charge miroir, induite sur les pistes voisines
- Phénomène transitoire
- Utilisé pour la localisation sur les segments

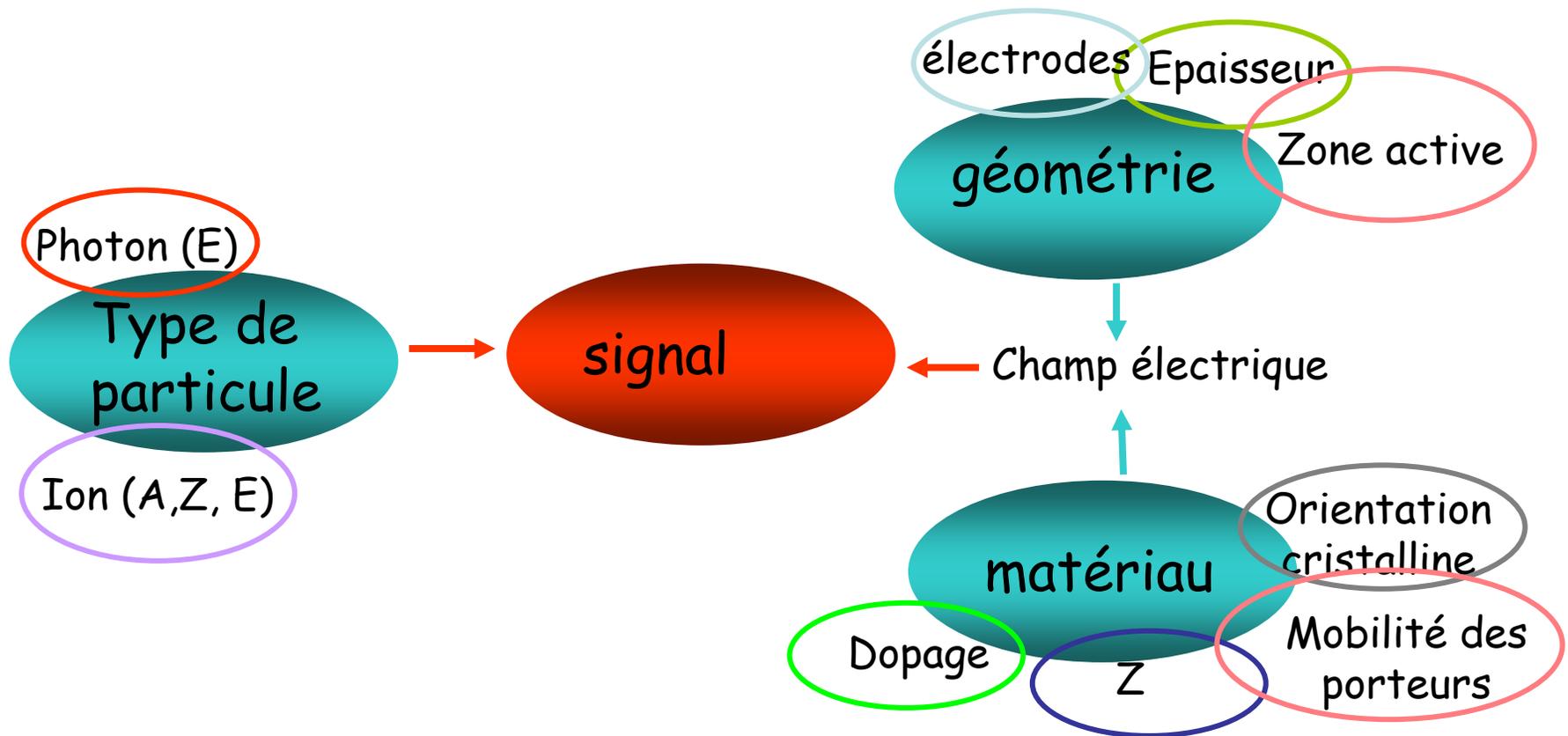
NIM A 525 (2004) 188-192



AGATA

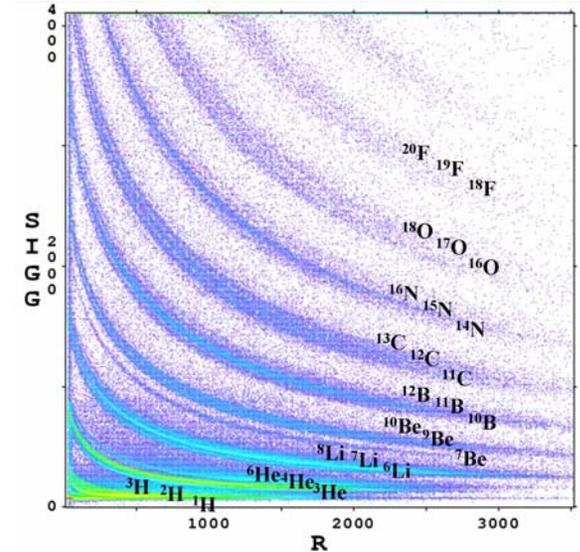
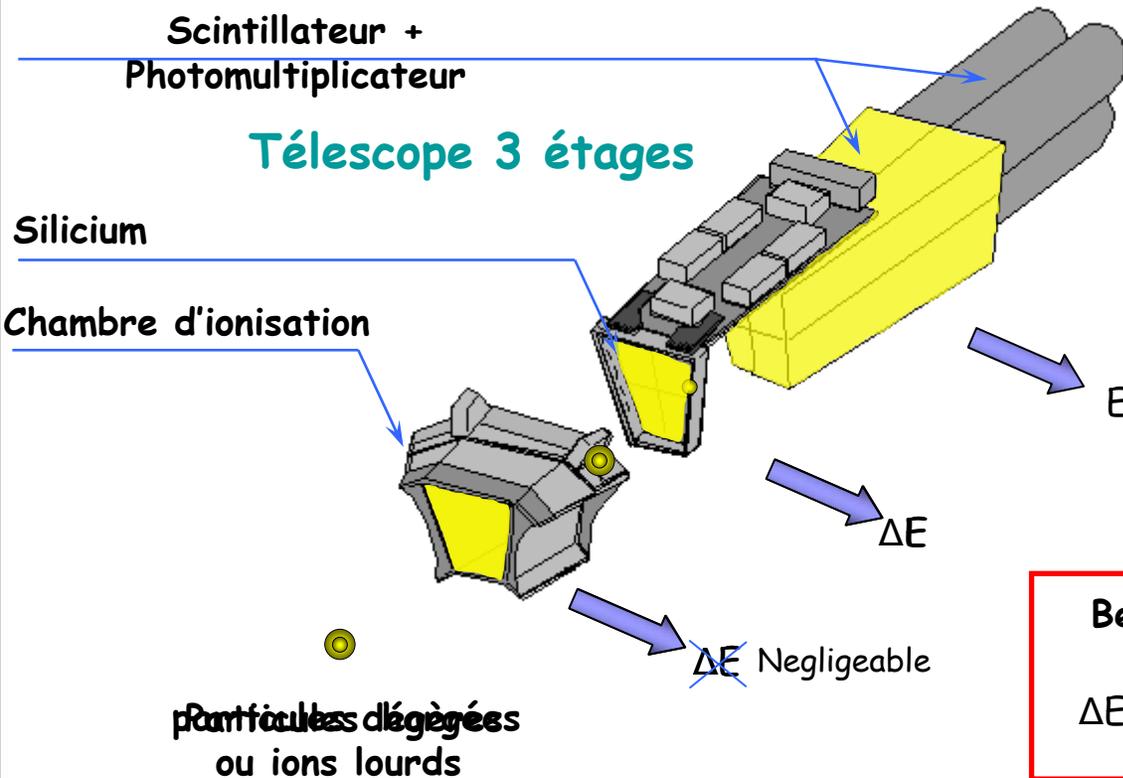


Les notions importantes dans la formation du signal



- $E-\Delta E$, montage en télescope
- temps de vol
- PSA

identification en A et Z



Bethe Bloch

$$\Delta E \approx \frac{AZ^2}{E}$$

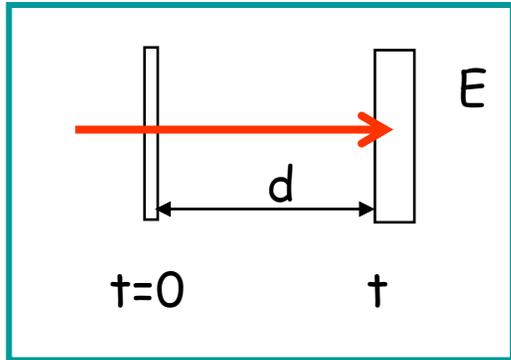
ΔE : perte d'énergie

E : énergie résiduelle déposée

A : masse de la particule

(INDRA)

Identification en masse

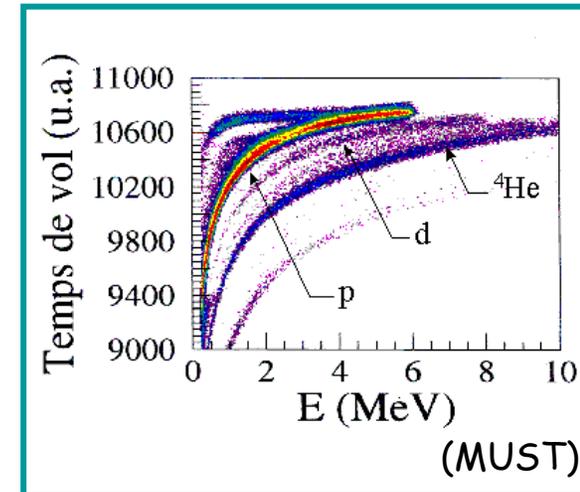


$$E = \frac{1}{2} A v^2 = \frac{1}{2} A \left(\frac{d}{t} \right)^2$$

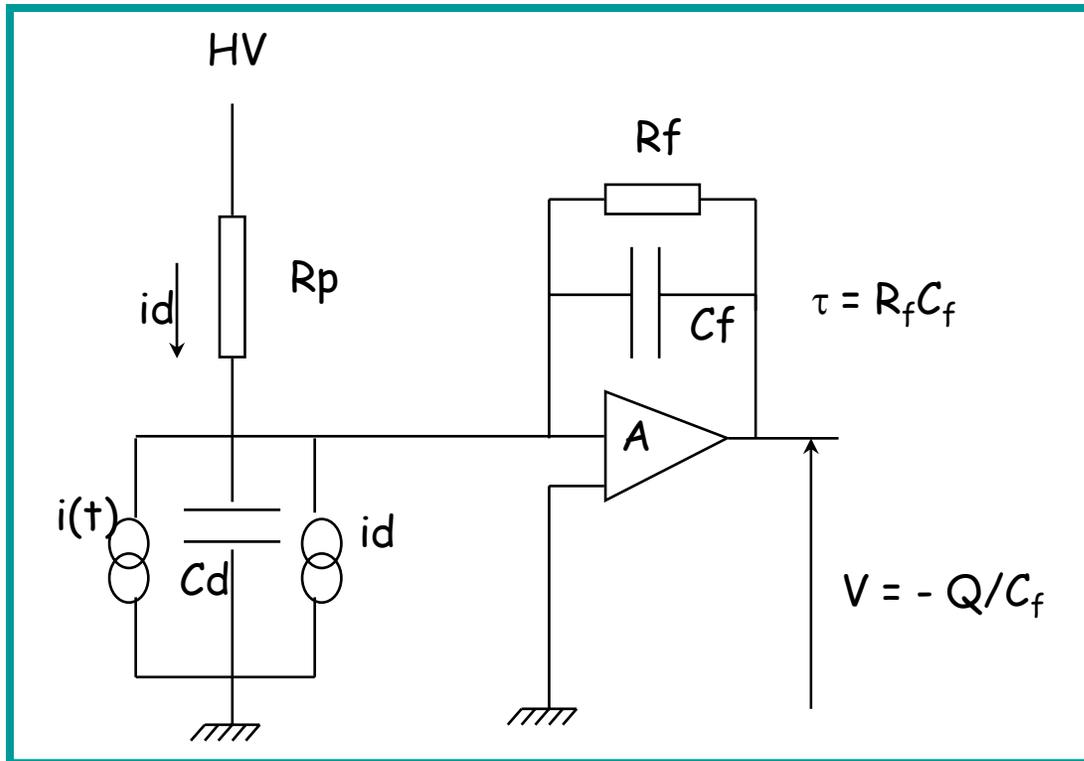
$$t = d \sqrt{\frac{A}{2E}}$$

Il faut

- mesurer une différence de temps t (entre un start et un stop)
- un détecteur qui arrête l'ion qui dépose son énergie E
- une distance suffisamment adaptée d



- tracking gamma (projet AGATA)
- identification des ions avec un seul étage de détection car le signal du détecteur porte les informations en Z et A des ions (vs télescopes) : projet FAZIA
- moins de voies d'électroniques.
- les détecteurs doivent avoir une résistivité très homogène.



Gain de conversion

$$\frac{V}{E} = \frac{q}{\omega C_f}$$

Si :

$$\frac{V}{E} = \frac{44.4}{C_f} \quad (\text{mV/MeV})$$

Le détecteur -> capacité et source de courant -> source de bruit

- En général la distribution est gaussienne
- Elle s'exprime par la largeur à mi-hauteur (LMH) de la distribution ou FWHM (Full width at half maximum) :

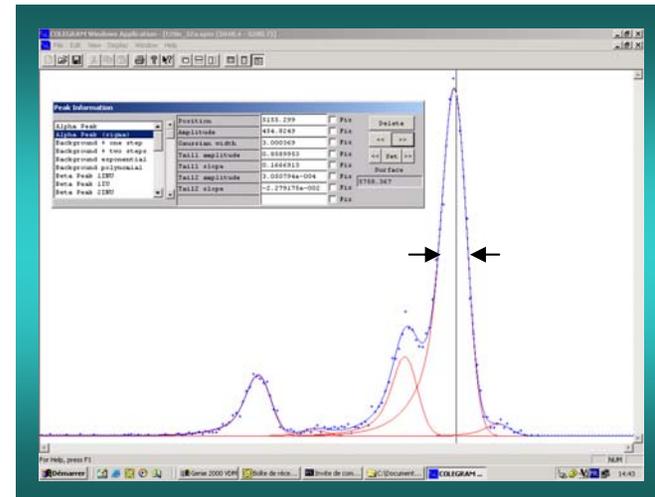
$$LMH = 2.35 \sigma$$

- Exemple :

Spectre du ^{238}Pu (5.155 MeV) dans un détecteur silicium (50 mm², 500 μm, -15°C)

LMH=7.8 keV

$\Delta E/E = 0.15\%$



- Facteurs qui affectent la résolution en énergie :
 - Statistique de création de paires :
 - $N = E/\omega$, $\sigma = (F.N)^{1/2}$, **F = facteur de Fano** ~ 0.1
 - Si : FWHM (keV) = $1.4 \sqrt{E(\text{MeV})}$
 - Ge : FWHM (keV) = $1.3 \sqrt{E(\text{MeV})}$
 - Pertes d'énergie dues aux :
 - Sources, cibles
 - Effets nucléaires
 - Fenêtres d'entrée et de sortie des détecteurs
 - Canalisation (orientation cristallographique)
 - Straggling en énergie
 - PHD.....
 - Bruit électronique dû aux :
 - Résistances, capacités, premier étage de préamplification

• Quelques sources étalons \Rightarrow keV/canal

- Alpha @ MeV :

- ^{239}Pu (5.155 MeV), ^{241}Am (5.486 MeV), ^{244}Cm (5.806 MeV)

- Électrons de conversion:

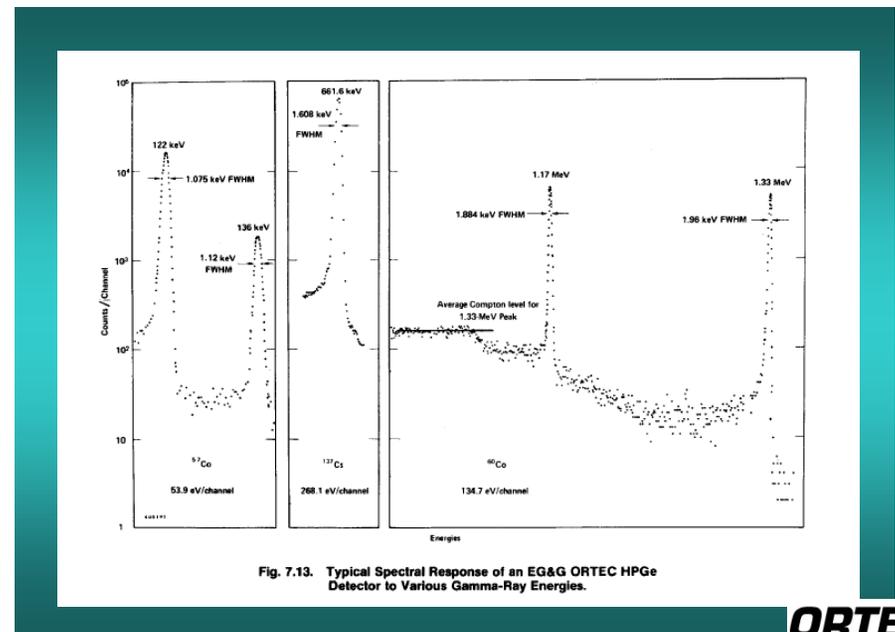
- ^{207}Bi : 975 keV

- X :

- ^{55}Fe : 5.9 keV
- ^{241}Am : 56 keV

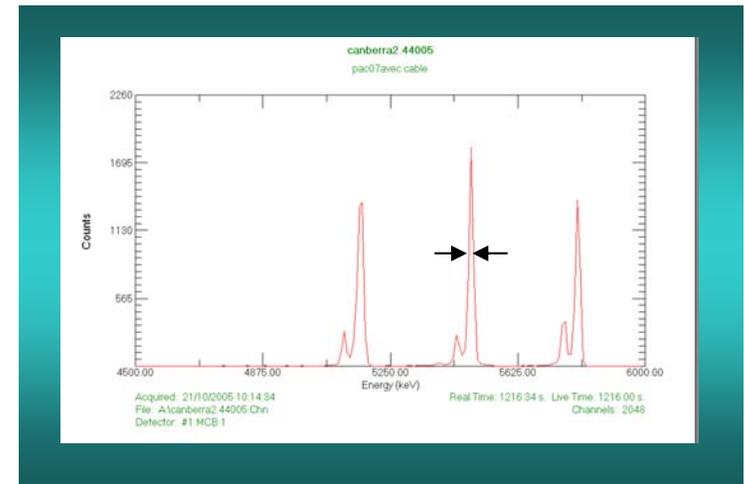
- Gamma:

- ^{60}Co : 1.332 MeV
- ^{57}Co : 122 keV
- ^{137}Cs : 662 keV



- Si et Si(Li) à température ambiante
- En général : i - V , C - V , FWHM (α @ 5.5 MeV, ^{241}Am et électrons de ^{208}Bi)

Spectre α :
 ^{238}Pu , ^{241}Am , ^{244}Cm ,
 (5.155, 5.486, 5.805 MeV)
 FWHM=15 keV,
 Si 200 mm², 300 μm
 $i = 90\text{nA}$
 $V_{\text{pol}} = 170\text{ V}$



- Efficacité relative à 1.33 MeV, liée au volume du détecteur (23g de Ge \rightarrow \sim 1% efficacité relative)

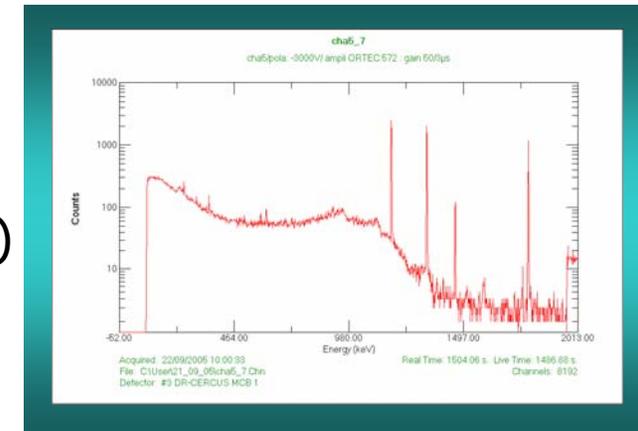
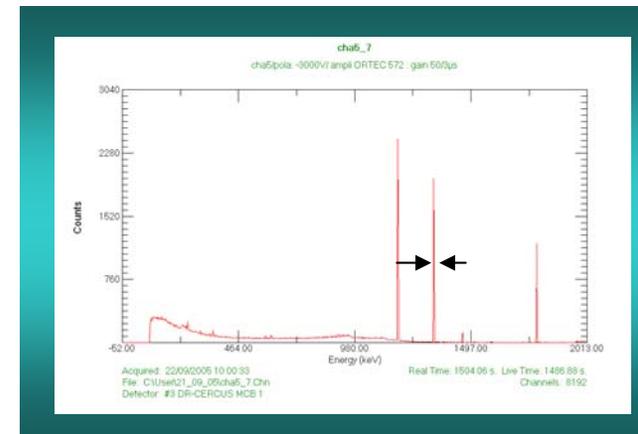
- $\varepsilon(\text{NaI}) = 1.2 \cdot 10^{-3}$
- $\varepsilon_{\text{rel}} = \varepsilon(\text{Ge})/\varepsilon(\text{NaI})$

- Résolution en énergie

Spectre ^{60}Co (1173 et 1332 keV),
LMH (1.332 MeV) = 1.9 keV
Détecteur Ge, type N, 20%
-3000 V

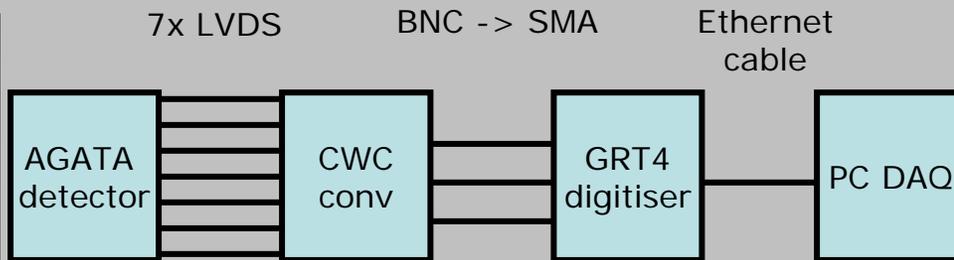
- Fournisseurs

- Rapport P/C (pour ^{60}Co , entre 1040 et 1096 keV)
- Forme de la distribution :
 - FW1/10M et FW1/50M par rapport à FWHM
 - Écart par rapport à une gaussienne



- La caractérisation des cristaux, scanning γ , temps de montée... -> base de données de signaux.

Matthew Dimmock - AGATA: Scanning status and analysis

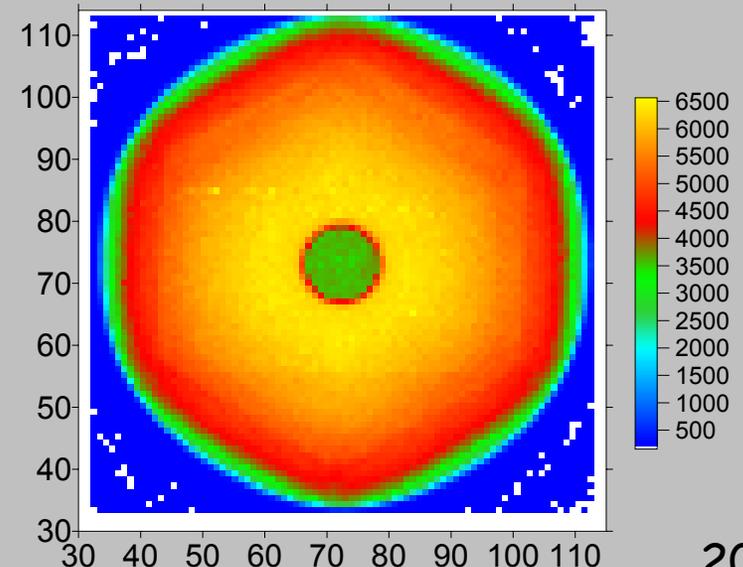


HV Ortec 659

+/-12V

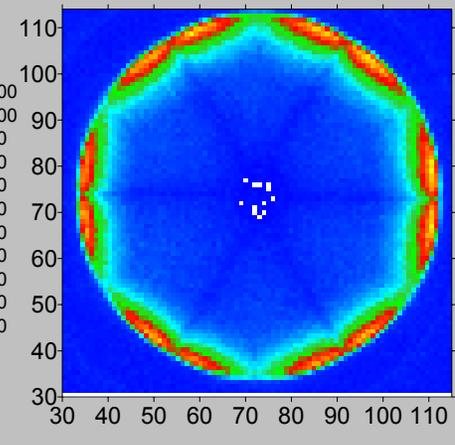
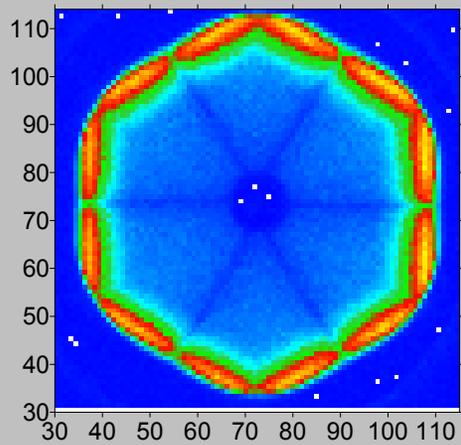
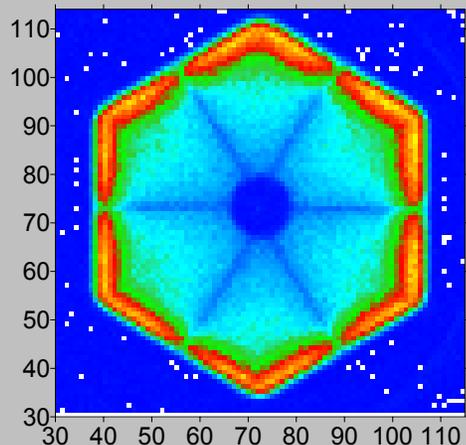
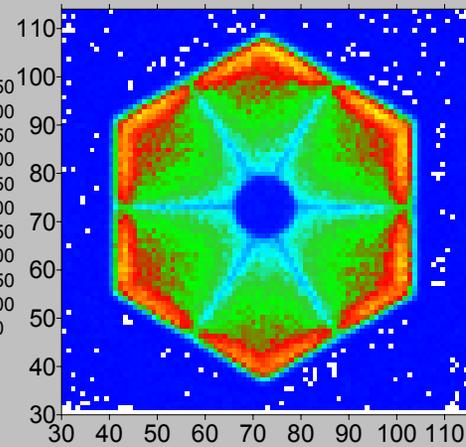
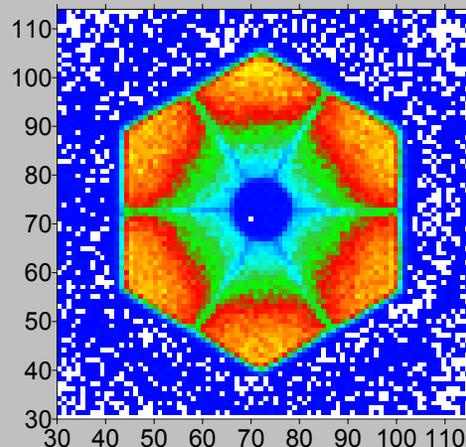
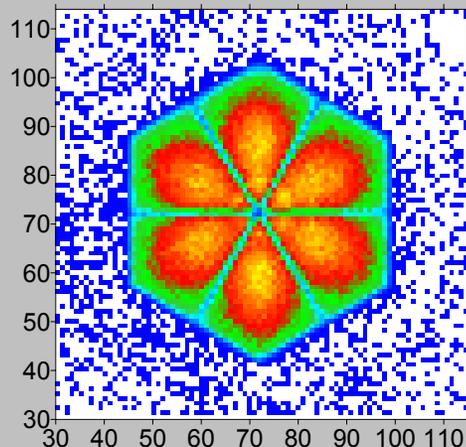
- **Max count rate = 720 cps**
- **Background = 40 cps**
- **600keV CFD threshold**
- **Accepted triggers = 120 cps**
- **180GB pre-sorted data**

- **920MBq Cs-137 source**
- **60 sec per position**
- **1mm steps**
- **1mm diameter collimator**



2007

Fold1, 662keV on core, ring gated



Matthew Dimmock - AGATA: Scanning status and analysis

2007

- Radiation Detection and Measurement, Knoll G.F.
- Semiconductor Radiation Detectors, Lutz G.
- Gamma- and X-ray spectrometry with semiconductor detectors, Debertin K. and Helmer R.G.
-
- Merci à J.Arianer, L.Bardelli, S.Barlini, B.Borderie, E.Chevallier, H.Hamrita, R.Kirsch, P.Lévêque, N. Le Neindre, D.Mathiot, G.Poggi, G.Voltolini, N.Willis