

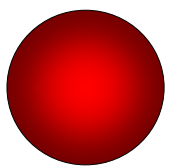
La formation du signal

Le principe

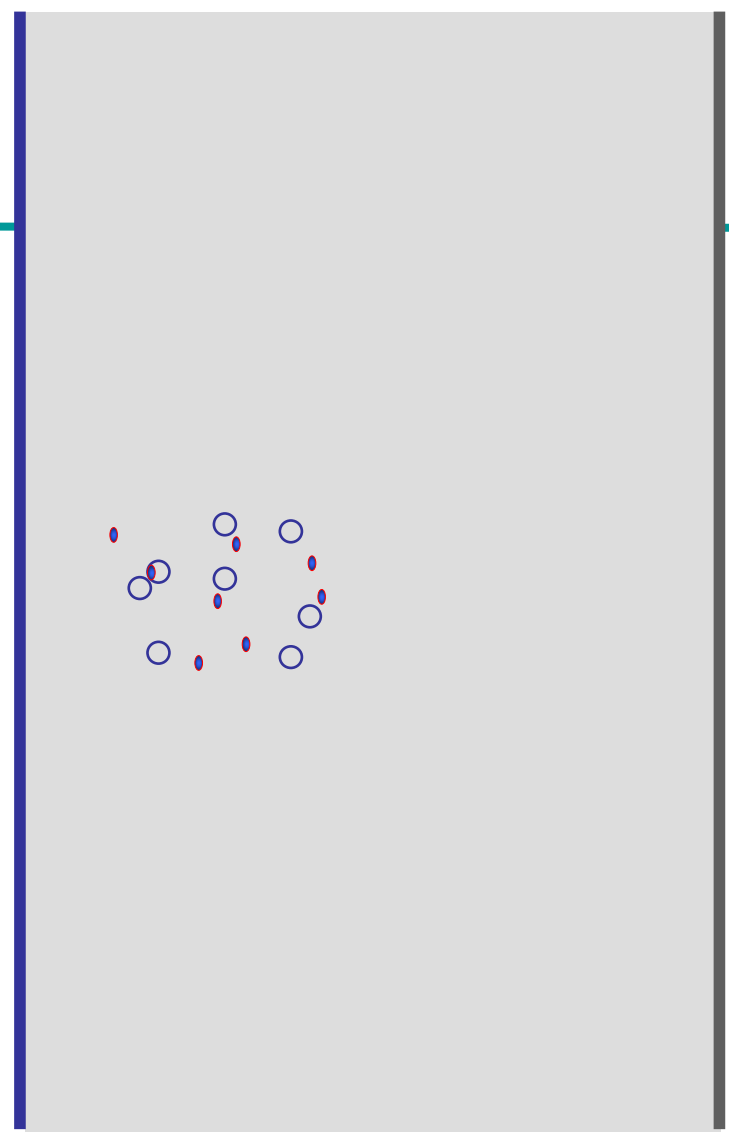
- Une particule chargée est ralentie dans le matériau et perd son énergie suivant différents processus (ionisation)
- Création de paires électron-trou dans le détecteur
- Séparation des paires sous l'action d'un champ électrique
- Migration des charges vers les électrodes : les électrons \rightarrow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

Création de paires

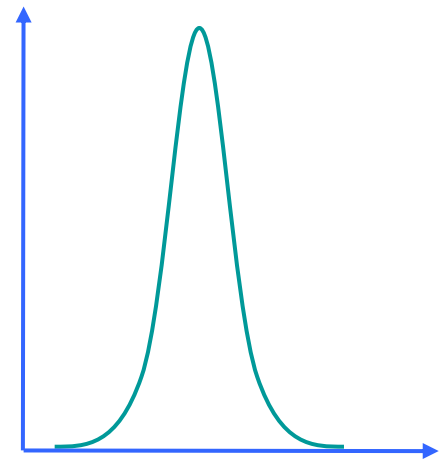
Collection des charges



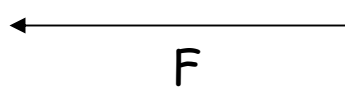
ionisation



+HT



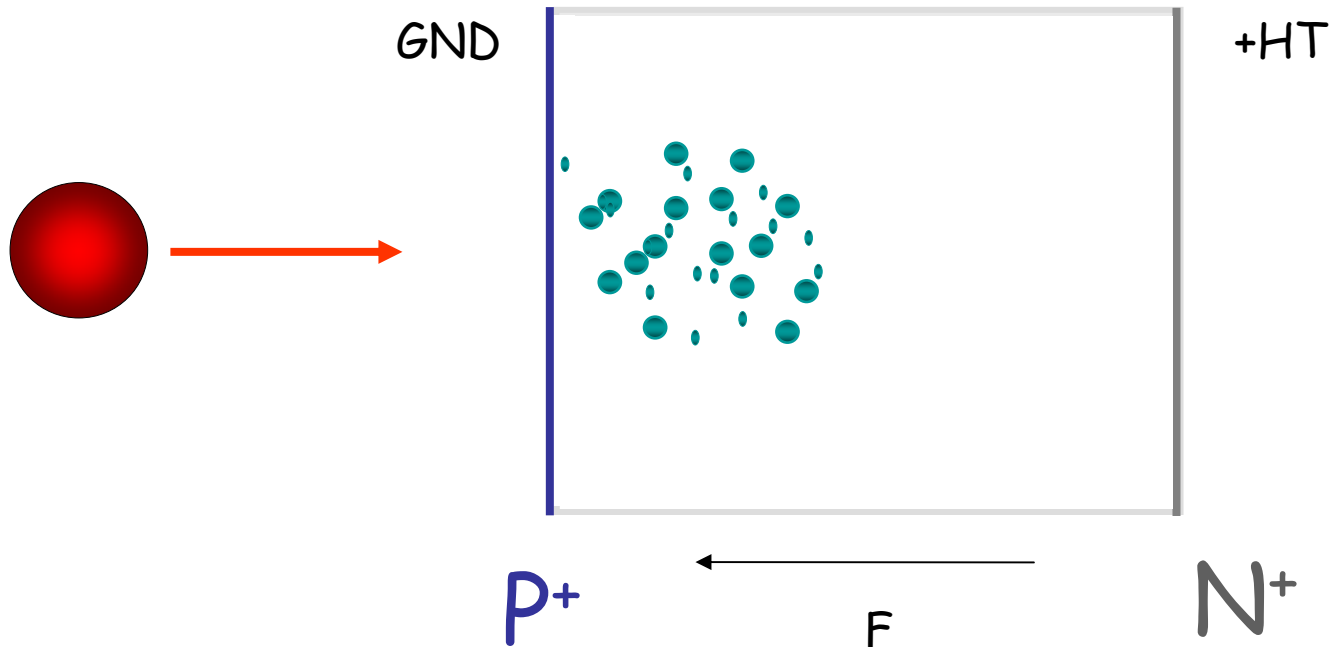
P^+



N^+

signal

Pourquoi la déplétion !



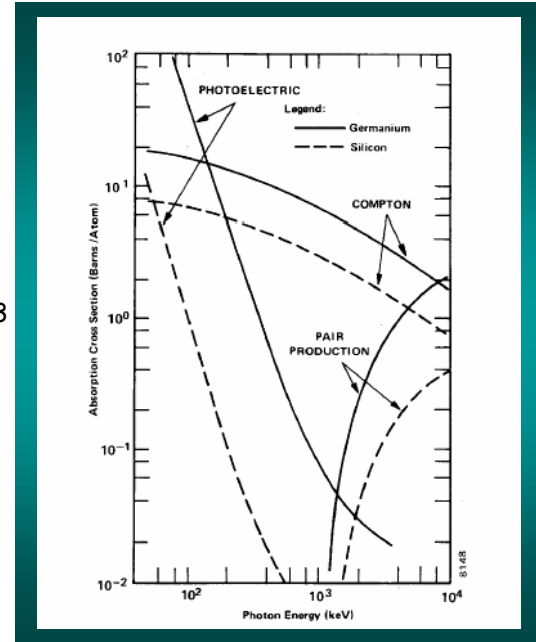
La nature du rayonnement

- Les particules chargées, ions lourds, ions légers
-> pouvoir d'arrêt dE/dx (Bethe-Bloch)
- Il faut adapter les épaisseurs de détecteurs aux parcours des ions (Si)
 - alpha de 5.5 MeV -> $\sim 27 \mu\text{m}$
 - ^{208}Pb de 1 GeV -> $\sim 60 \mu\text{m}$
 - ^{53}Cr de 747 MeV -> $\sim 180 \mu\text{m}$
 - proton de 5 MeV -> $\sim 216 \mu\text{m}$
 - ^{208}Pb de 6 GeV -> $\sim 330 \mu\text{m}$
 - Electron de 975 keV -> $\sim 1.7 \text{ mm}$
 - proton de 30 MeV -> 4.9 mm

La nature du rayonnement

- Les photons : X, γ
 - détection indirecte
 - Les effets dépendent du Z du matériau :
 - Absorption photoélectrique, $SE = cste.Z^{4.5}.E^{-3}$
 - Diffusion Compton, $SE = cste.Z.E^{-1}$
 - Création de paires, SE varie comme Z^2

➡ Ge (Z=32) plus efficace que Si (Z=14)



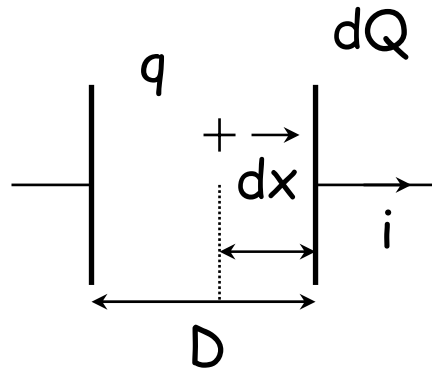
- Les détecteurs sont adaptés aux énergies des X et γ
 - Si(Li) refroidi pour des X jusqu'à 100 keV
 - Ge pour des γ jusqu'à 10 MeV

La collection des charges

- Cas le plus simple
- Cas général

La collection des charges (cas simple)

- 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 $i = q v/D$



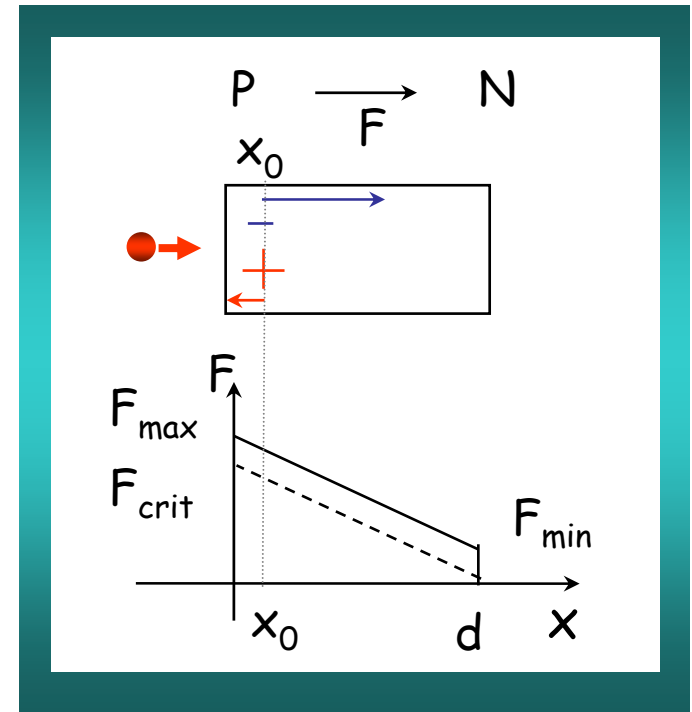
- c'est donc le mouvement des charges qui induit un signal plutôt que les charges collectées. (Ramo - 1939)
- Résultat valable en présence de zones de charge d'espace (Cavalleri - 1963)

Le signal

- 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

Pour une paire électron-trou

Faisceau entrant par la face avant (champ fort)



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

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

→ i_-

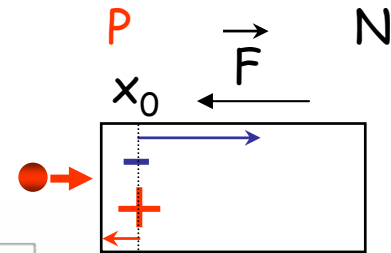
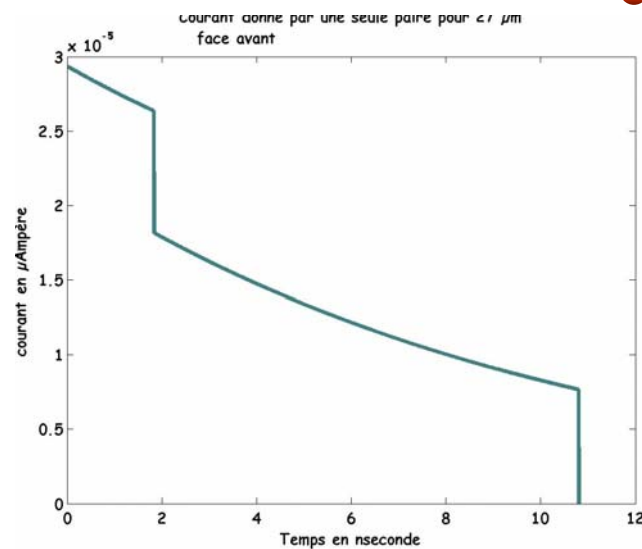
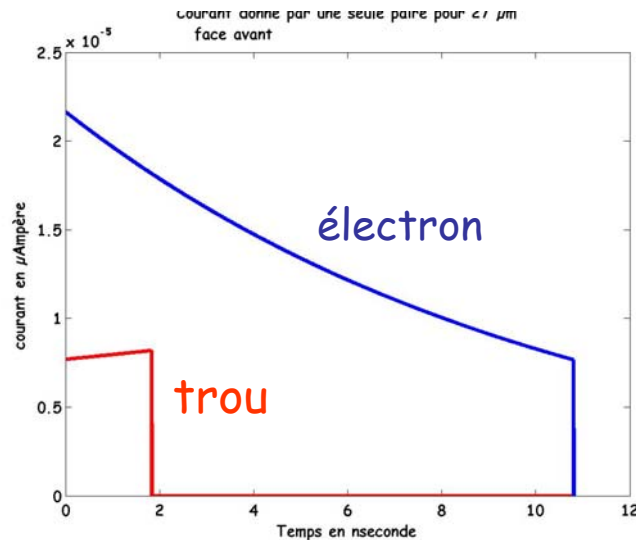
$$v_+ = \frac{dx}{dt} = \mu_+(x).F(x)$$

→ i_+

Le signal dû à une paire

(formalisme de base)

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)



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

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

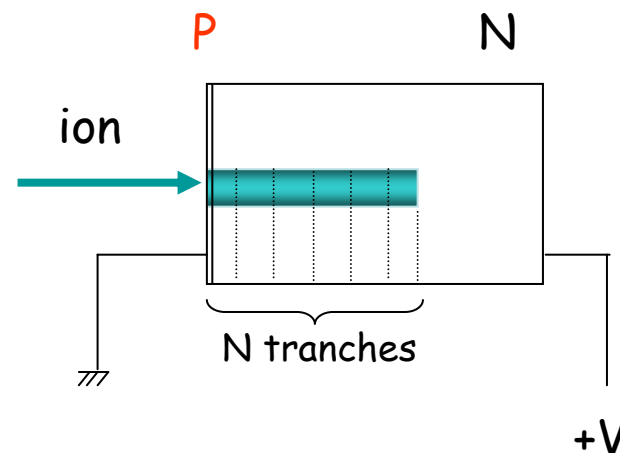
total : 10.8 ns
Remarque : temps de montée nul !

Tout le long du parcours

- On « découpe » le parcours de l'ion en N tranches équivalentes
- Dans chaque tranche on calcule :
 - Le nombre de paires électron-trou créées : $N_p = \Delta E / 3.6 \text{ (eV)}$.
 - 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 :

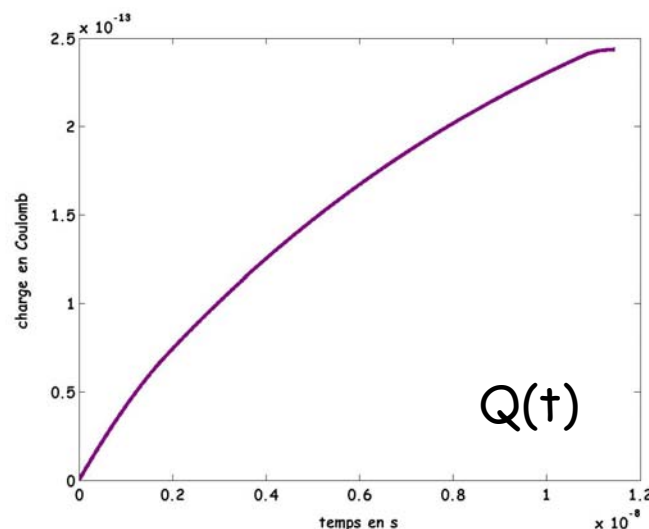
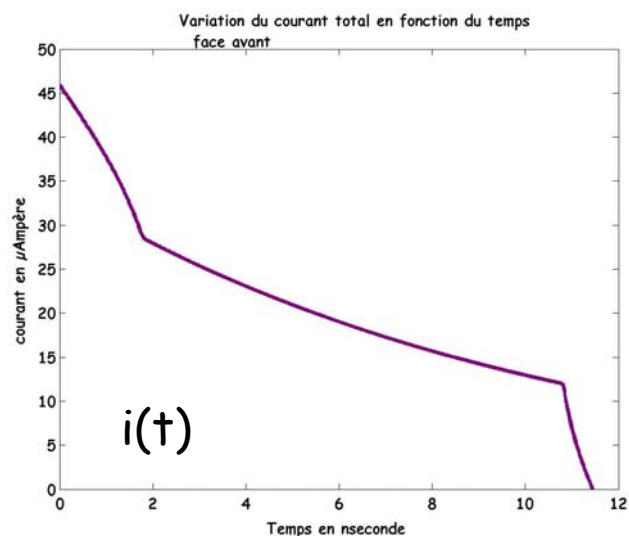
$$i_{\pm} = qv_{\pm}/d$$

- On somme les contributions



Le signal sur toute la trace

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



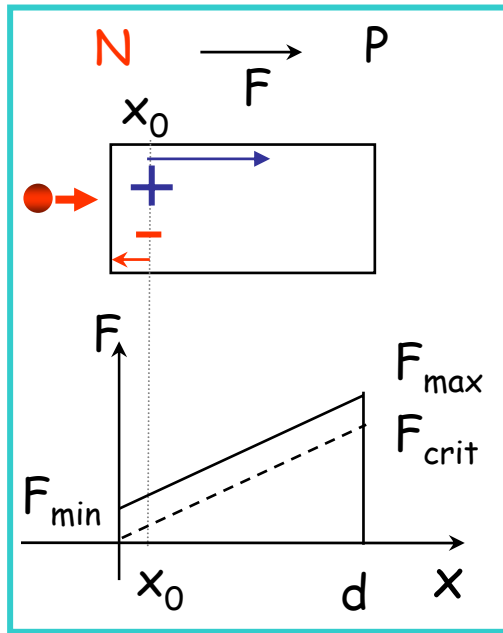
$F_{\min} = 11 \text{ kV/cm}$
 $F_{\max} = 32 \text{ kV/cm}$
 $F_{\text{crit}} = 21 \text{ kV/cm}$
Temps = 11.5 ns
 $i_{\max} = 46 \mu\text{A}$
 $Q_{\max} = 0.24 \text{ pC}$

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

Rmq : temps de collection = 11.5 ns

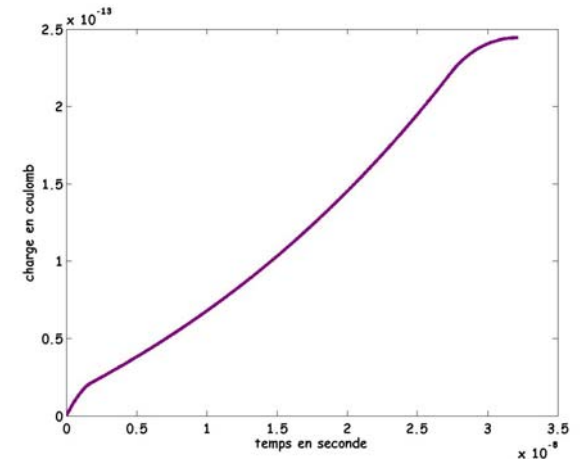
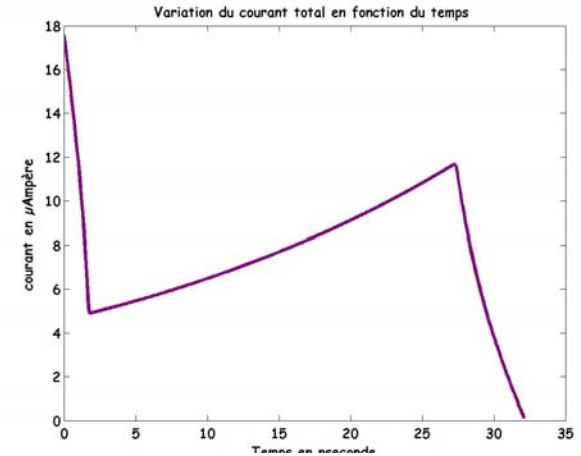
Et en face arrière?

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



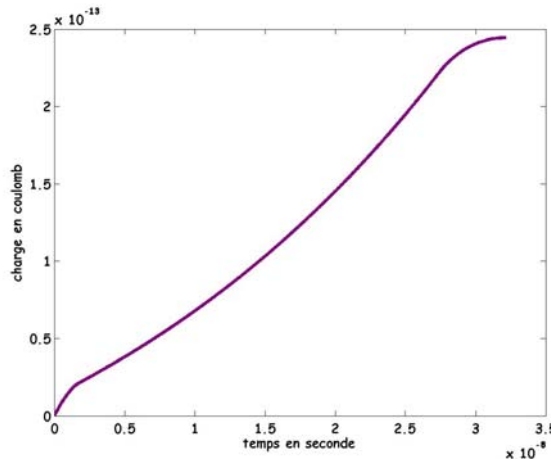
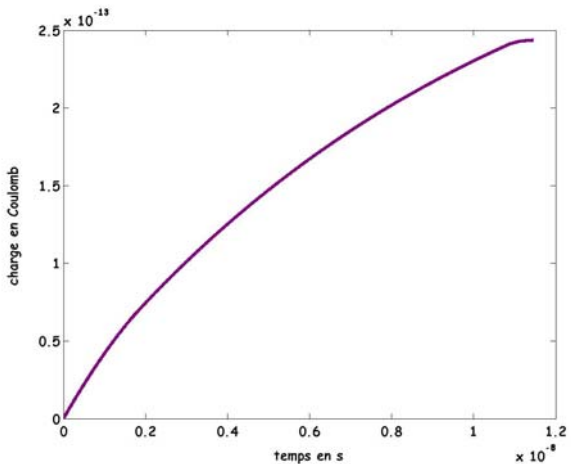
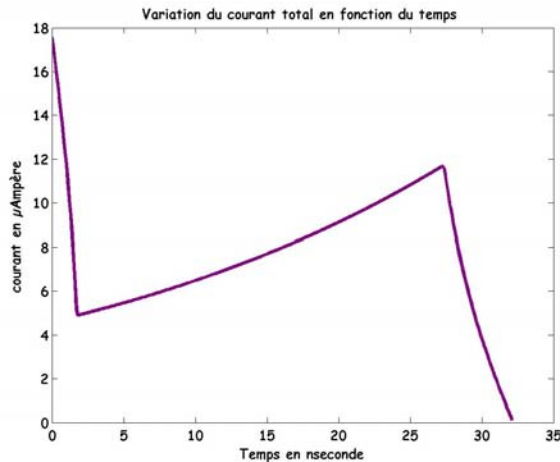
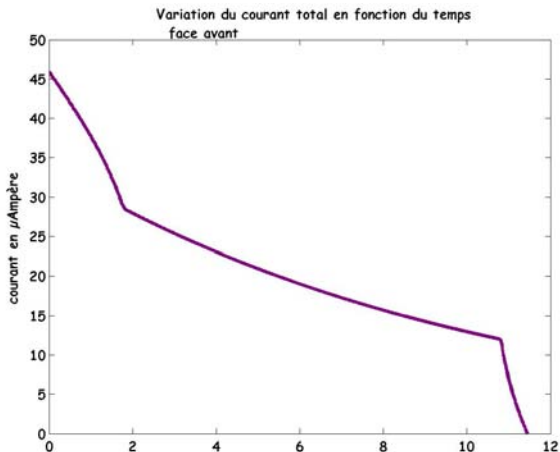
➡ La forme est différente

Rmq : temps de collection = 32 ns



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

Si on compare...



Reconnaissance de forme
?
Temps de collection

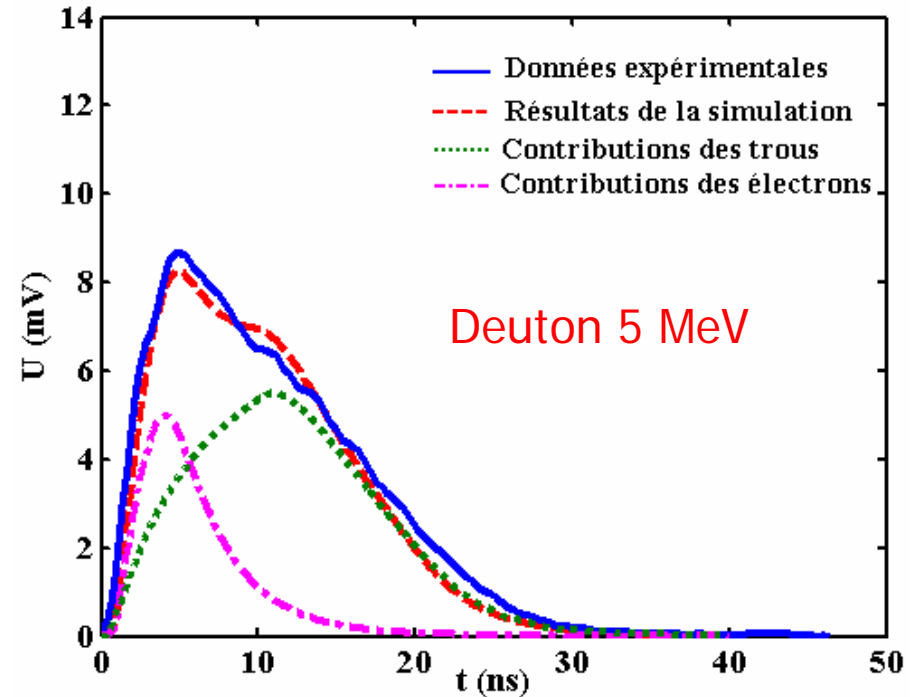
Face avant

Face arrière

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

Les ions légers

- Bon accord avec les simulations
- La densité d'ionisation est relativement faible
- Exemple :
 - un deuton de 5 MeV
 - parcours de 137 μm
 - $n \sim 10\,000\text{ e}/\mu\text{m}$

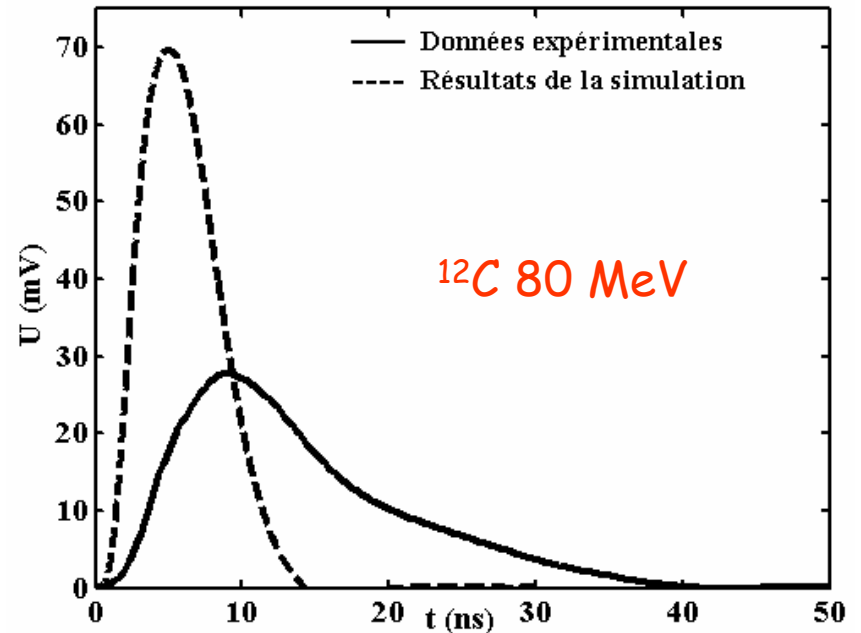


$e = 300\ \mu\text{m}$
 $S = 64\ \text{mm}^2$
 $U_{\text{pol}} = 90\ \text{V}$ ($U_{\text{depl}} = 25\ \text{V}$)
Face arrière.

Thèse H.Hamrita

Les ions lourds

- On ne peut pas utiliser le même formalisme pour les ions lourds
- Le signal est beaucoup plus long, l'amplitude plus faible
- Les modèles progressent



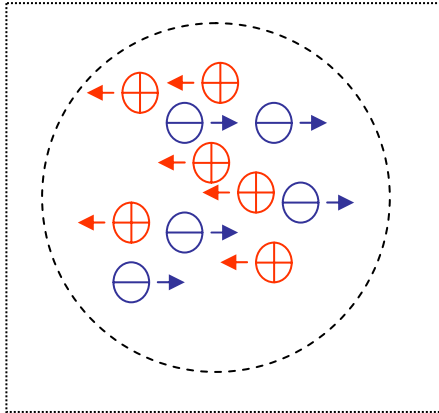
^{12}C à 80 MeV, $127 \mu\text{m}$, $n \sim 175\,000 \text{ e}/\mu\text{m}$
 $e = 300 \mu\text{m}$
 $S = 200 \text{ mm}^2$
 $U_{\text{pol}} = 190 \text{ V}$ ($U_{\text{depl}} = 125 \text{ V}$).
Face arrière

Thèse H.Hamrita

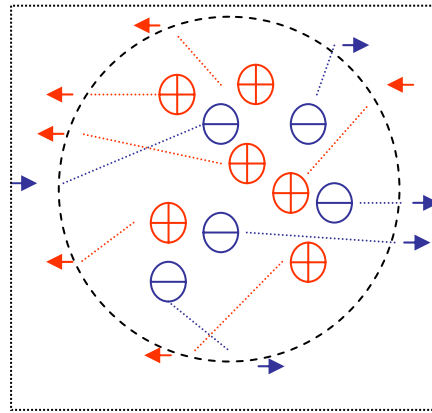
Ions lourds : l'effet « plasma »

- 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 »)

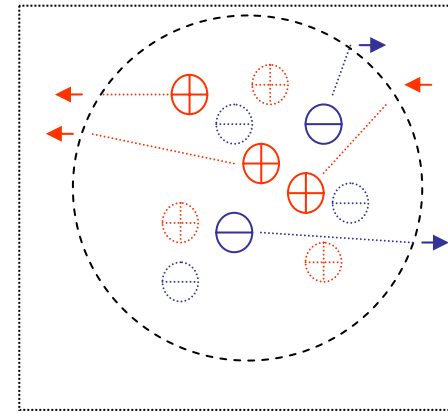
Ions lourds : l'effet « plasma »



migration
(pour les ions légers)



plasma
(écranage du
champ électrique)

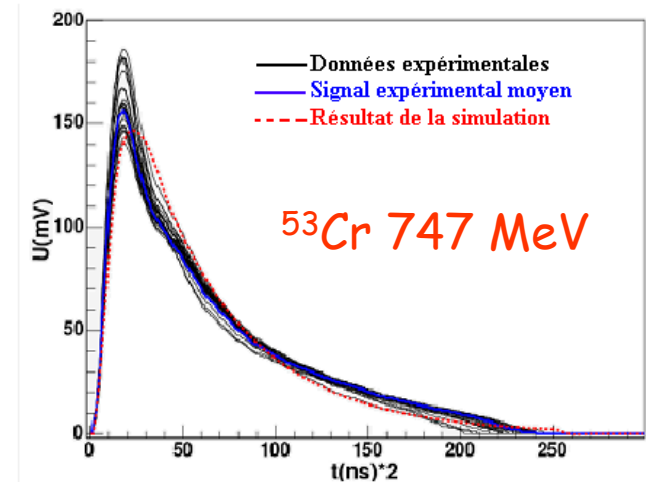


recombinaison des charges
(E mesurée $<$ E incidente)

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)

Un des derniers formalismes

- Les porteurs dans le « plasma » -> dipôles dans un milieu diélectrique.
- Ils induisent un champ électrique qui s'oppose au champ extérieur : le milieu se polarise
- La constante diélectrique dans la trace augmente $\epsilon' = \epsilon + cste$, le champ diminue par rapport à sa valeur initiale
- le champ finit par se restaurer
- Plus la densité de porteurs est grande, plus ils mettront du temps à se dissocier

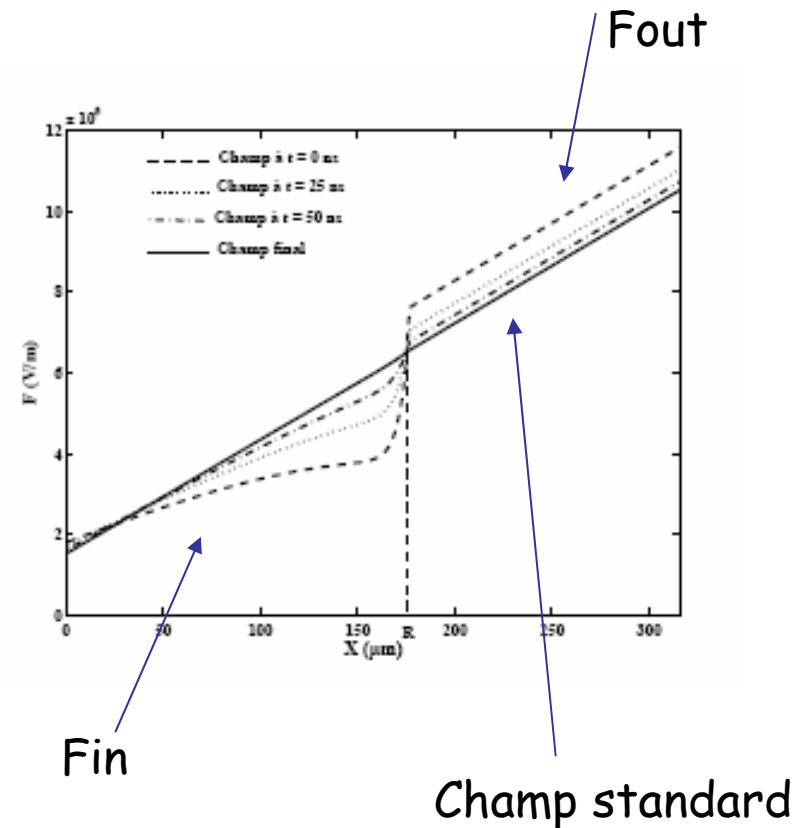
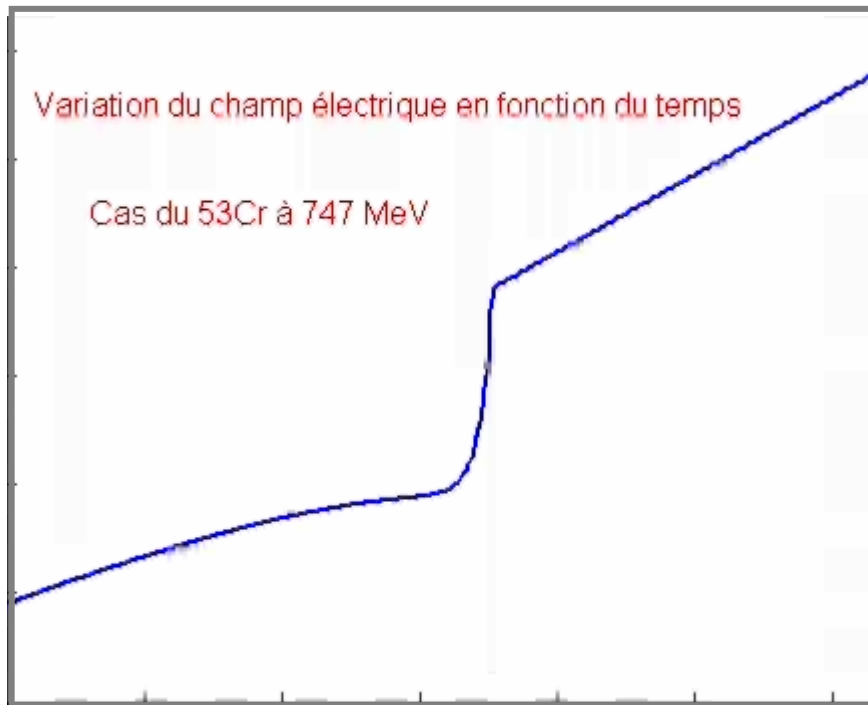


Parcours $\sim 180 \mu\text{m}$
 $n \sim 10^6 \text{ e}/\mu\text{m}$



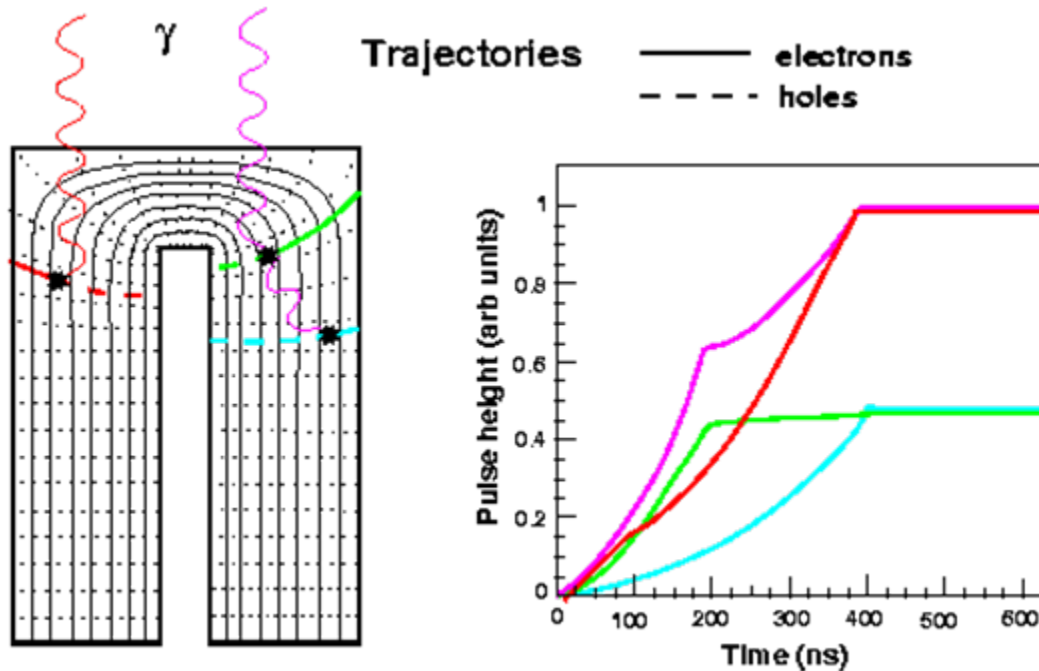
les temps de collection sont plus longs.

La variation du champ électrique



Les photons

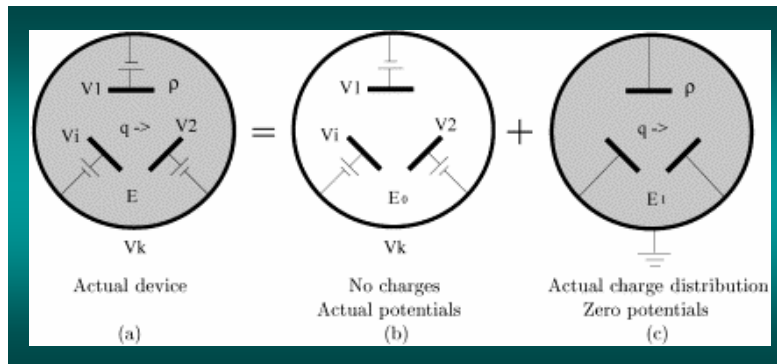
- La géométrie et le champ électrique sont plus complexes



EXOAM

La collection des charges (cas général)

- 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.

Les détecteurs Si à pistes

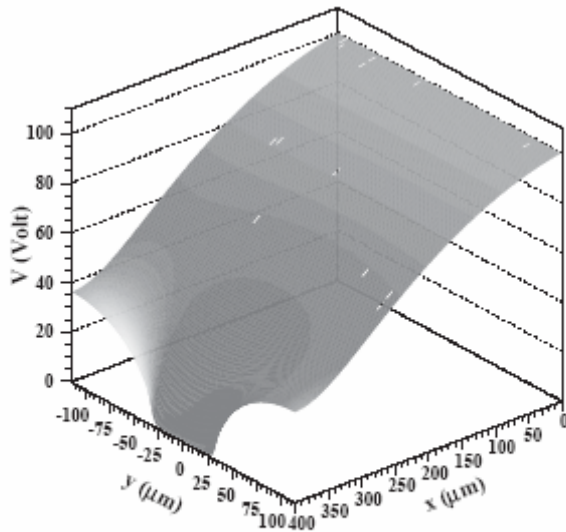


Fig. 17. Electric potential in an elementary cell of a SSD. The values of the geometrical parameters are: $d = 400 \mu\text{m}$, $p = 228 \mu\text{m}$, $w = 60 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$.

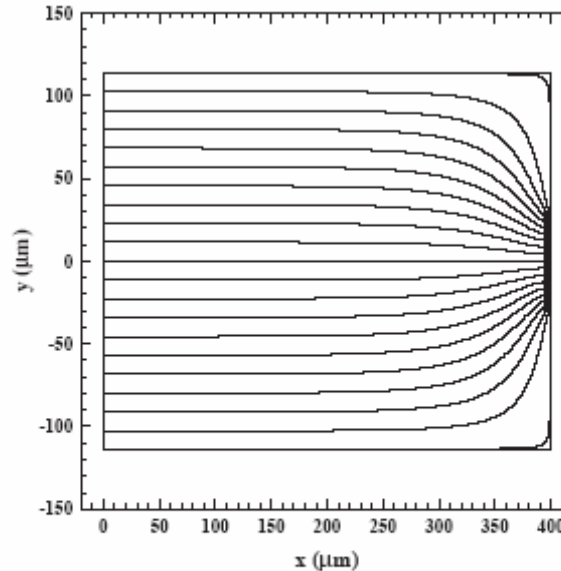


Fig. 18. Drift line in a silicon cell. The geometrical parameters are $d = 400 \mu\text{m}$, $p = 228 \mu\text{m}$, $w = 60 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$. The bias potential is $\phi_0 = 100 \text{V}$.

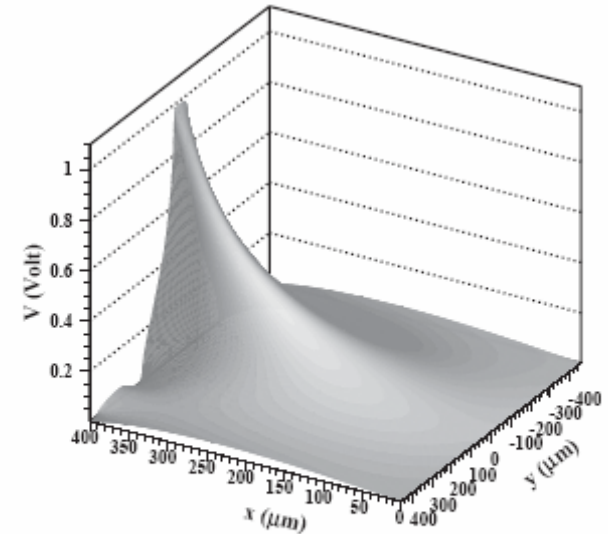


Fig. 19. Weighting potential of a strip. The cell used for computing the potential includes four neighbour strips. The geometrical parameters are $d = 400 \mu\text{m}$, $p = 228 \mu\text{m}$, $w = 60 \mu\text{m}$, $h = 5 \mu\text{m}$.

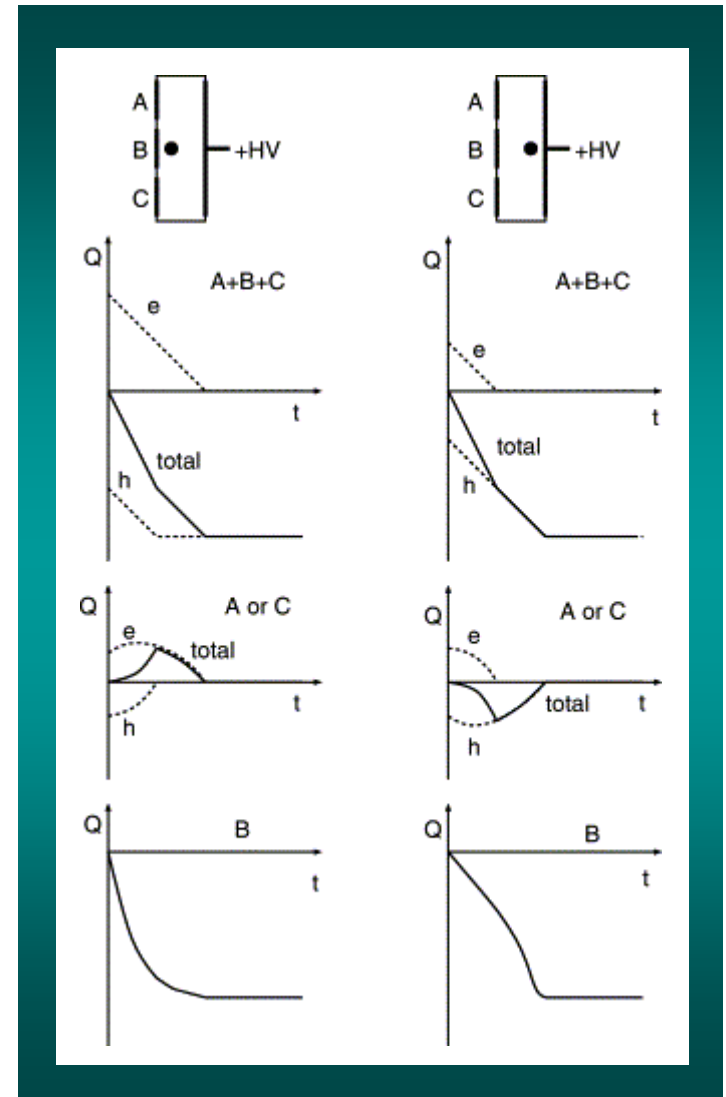
Exemple de potentiel,électrique, lignes de champ et weighting potential

NIMA 533 (2004) 322-343

Les détecteurs Ge planaires à pistes

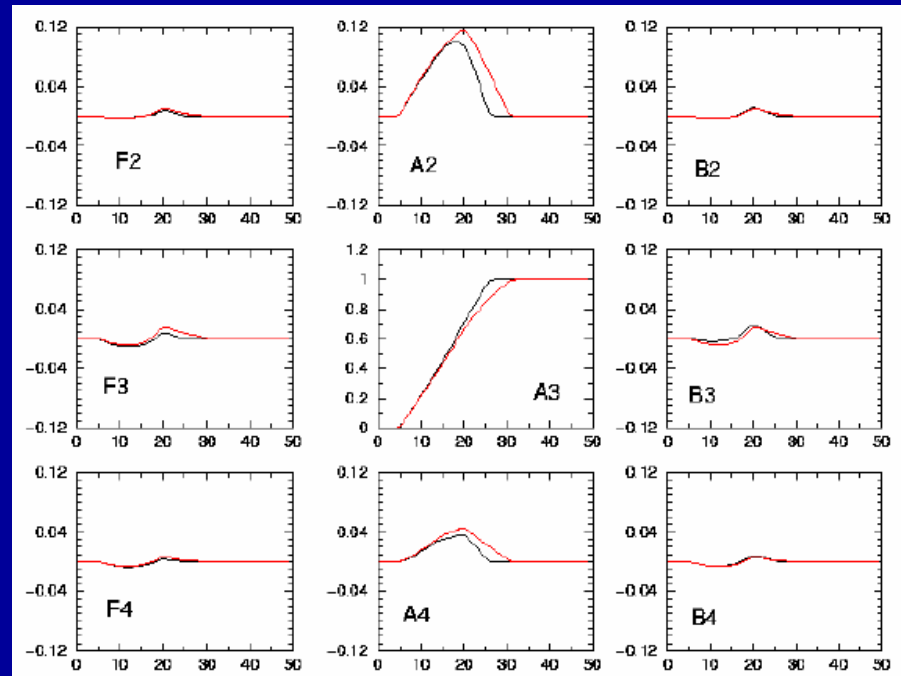
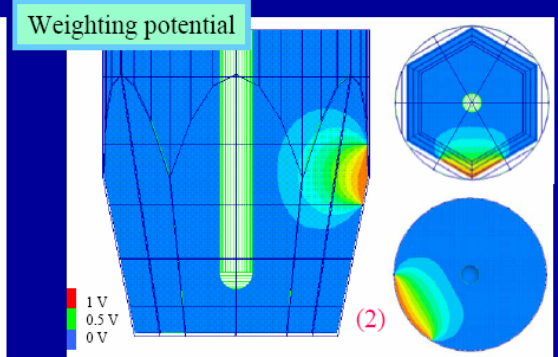
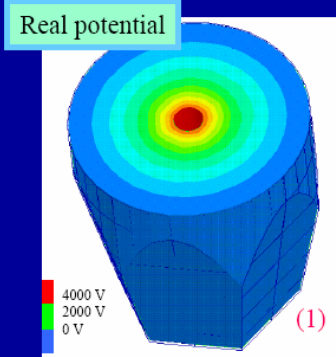
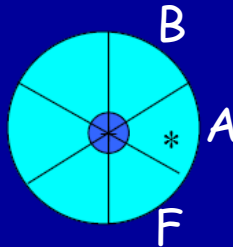
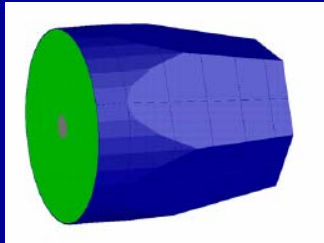
- Notion de charge miroir, induite sur les pistes voisines
- Phénomène transitoire
- Utilisé pour la localisation sur les segments

NIM A 525 (2004) 188-192



Les détecteurs Ge segmentés

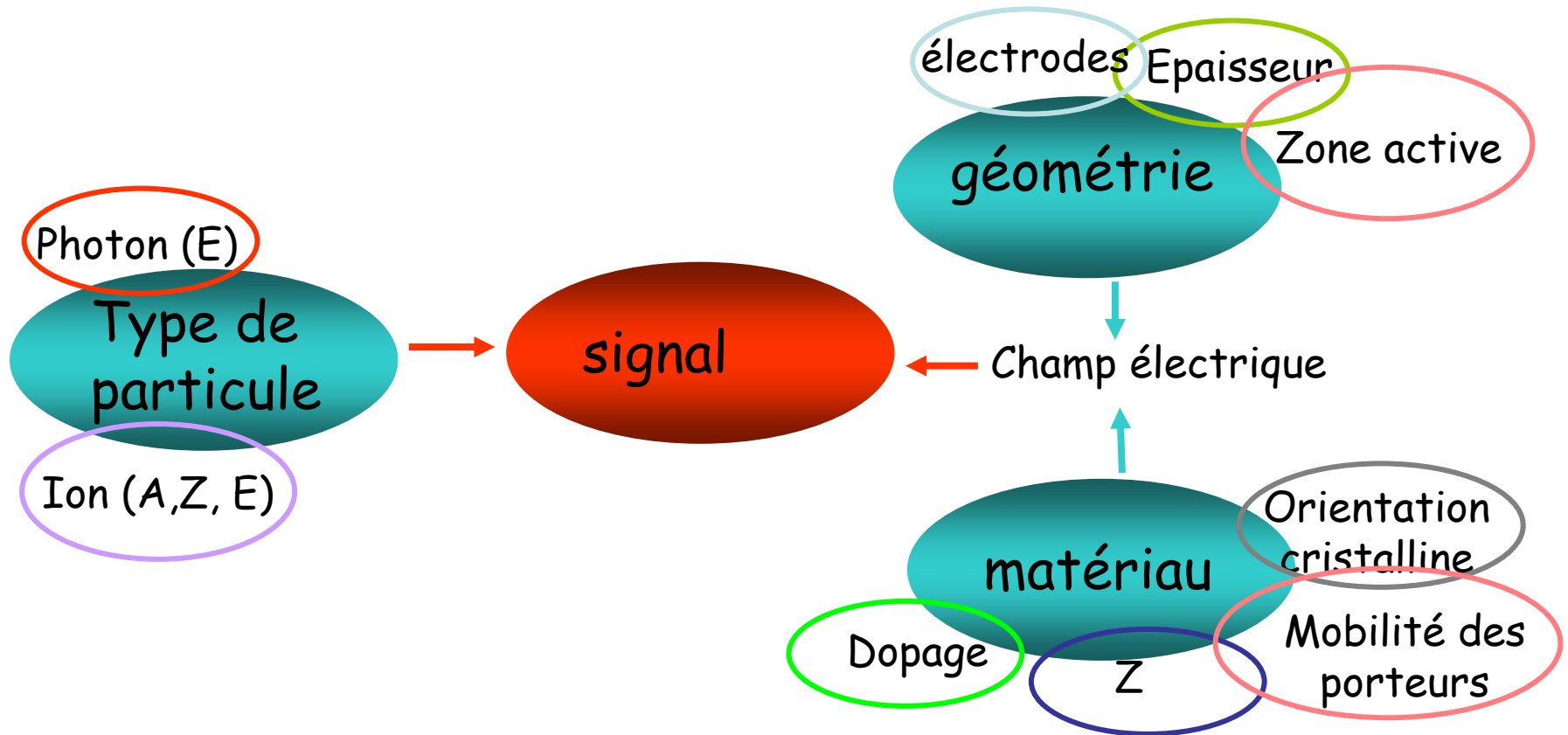
AGATA



Martina Descovich

Pour résumer

Les notions importantes dans la formation du signal

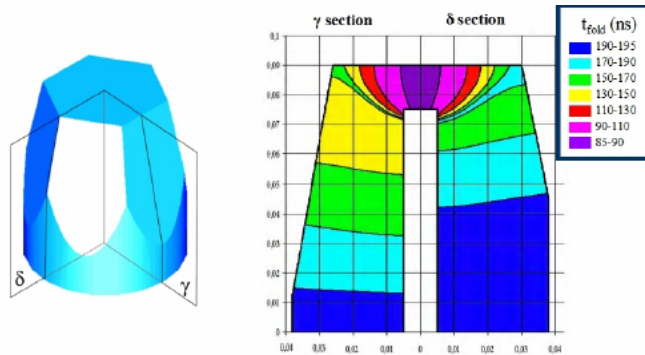


Le champ électrique en général

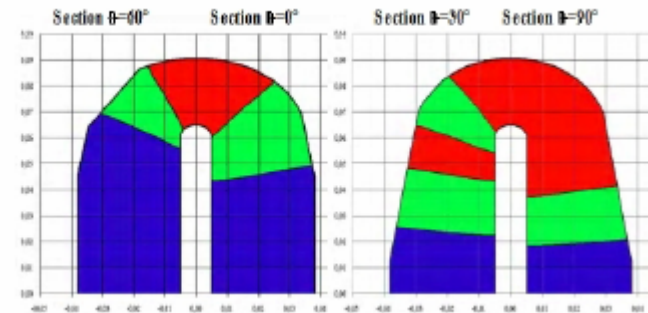
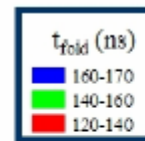
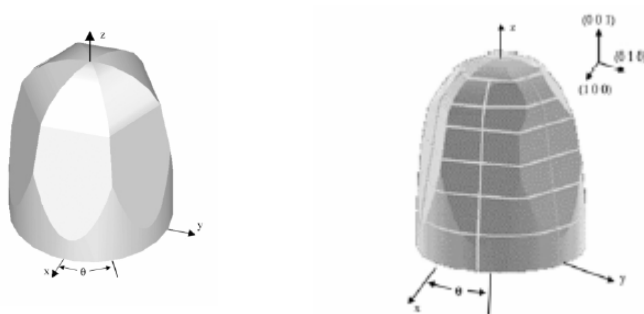
- Important pour les simulations à 1, 2, 3D
- Utilisé pour calculer les temps de collections et les signaux de courant et de charge (S_i et G_e)
- Utilise le formalisme électrostatique avec des logiciels dédiés ou développés (MATLAB, COMSOL MULTIPHYSIC (FEMLAB), MAXWELL, MGS, PS2D....)

Les autres paramètres

- la géométrie, la segmentation, les temps de collection,.....



AGATA, simulation des temps de collections

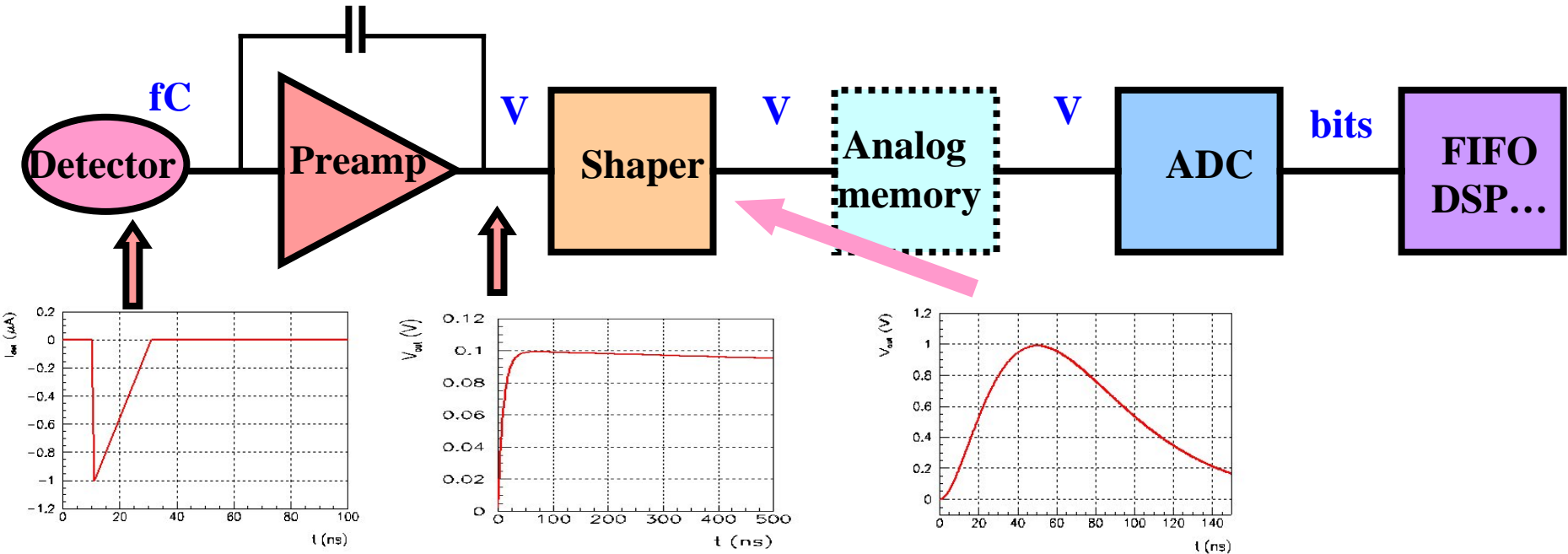


Nouvelle géométrie : correction des effets d'anisotropie et de temps de collection (Ripamonti et al., 2005)

La mesure en énergie

- Electronique
- Résolution en énergie

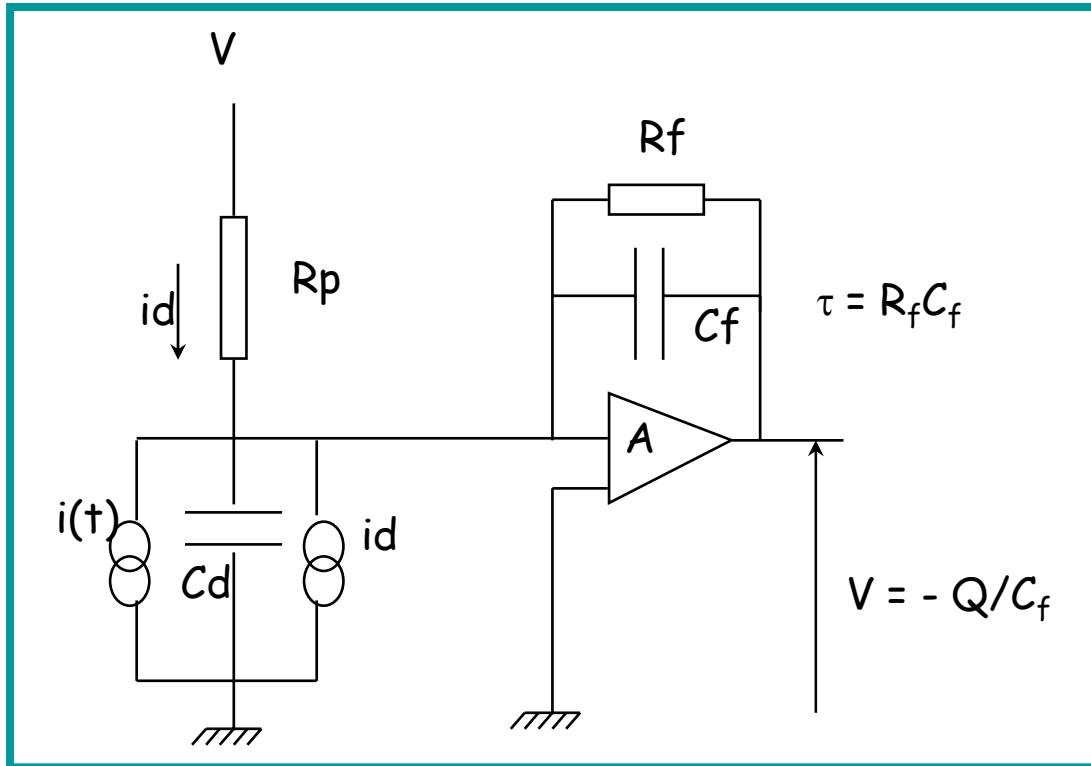
- Most front-ends follow a similar architecture



- Very small signals (fC) -> need **amplification**
- Measurement of **amplitude** and/or **time** (**ADCs, discris, TDCs**)
- **Several thousands to millions of channels**

Pas encore en physique nucléaire

Le préamplificateur de charge



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

La résolution en énergie

- 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) :

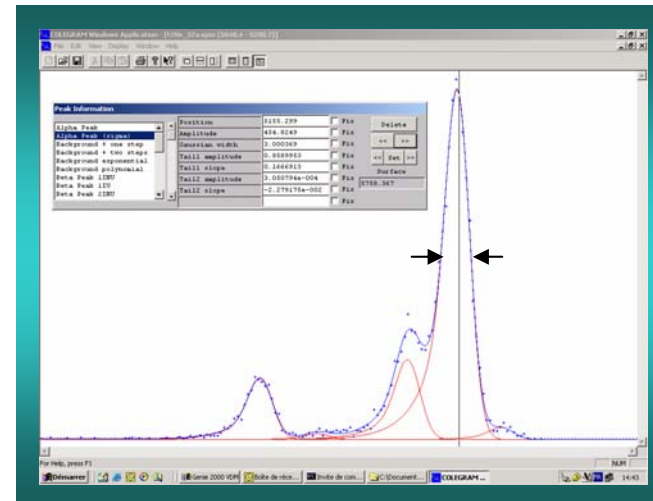
$$LMH = 2.35 \sigma$$

- Exemple :

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

LMH=7.8 keV


$\Delta E/E = 0.15\%$

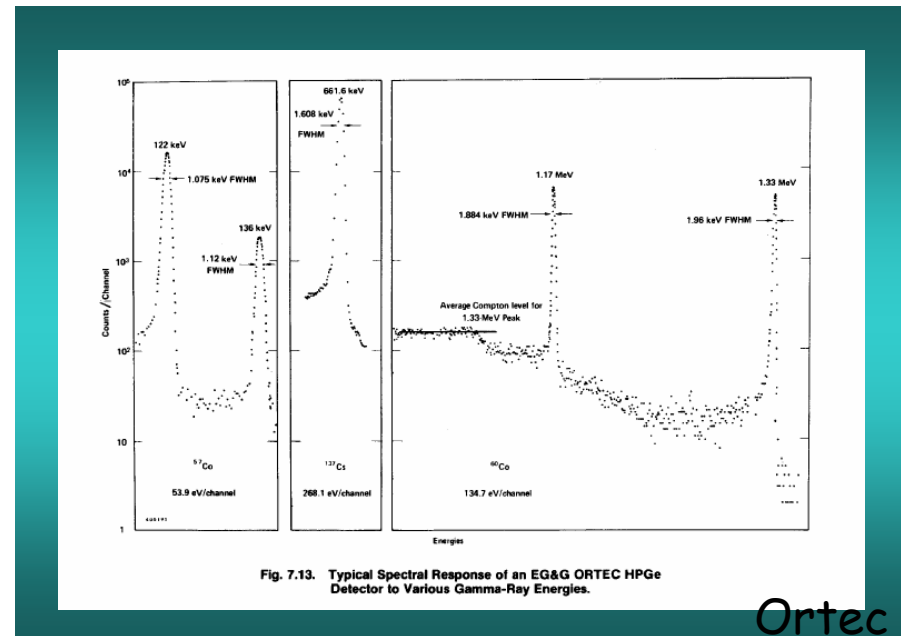


La distribution en énergie

- Élargissement dû à des fluctuations :
 - Statistique de création de paires : $N = E/\omega$, $\sigma = (F.N)^{1/2}$
 $LMH = 2.35(F.E.\omega)^{1/2}$ avec **F = facteur de Fano** ~ 0.1
 - Pour le Si : $LMH (keV) = 1.4 \sqrt{E(MeV)}$
 - Pour le Ge : $LMH (keV) = 1.3 \sqrt{E(MeV)}$
 - Pertes d'énergie dans la source de calibration, effets nucléaires, fenêtres d'entrée et de sortie, effets de canalisation, straggling en énergie, défaut d'ionisation (ions), matière, effet Döppler, ... (γ)
 - Bruit électronique : LMH évaluée en fonction du filtre et des bruits série et parallèle (via un générateur d'impulsions)
 - Courant
 - Résistance
 - Capacité...
- Résolution intrinsèque : $LMH^2_{dét} = LMH^2_{totale} - LMH^2_{bruit}$

La calibration

- Quelques sources étalons (les principales):  keV/canal
 - Alpha de quelques 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

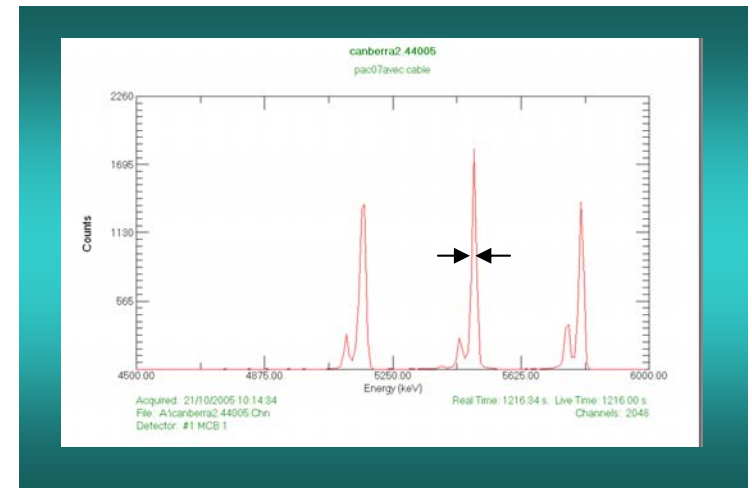


Ortec

La caractérisation des détecteurs Si

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

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



La caractérisation des détecteurs Ge

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

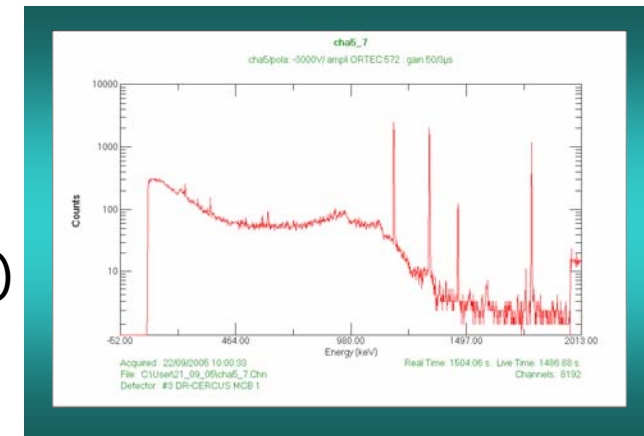
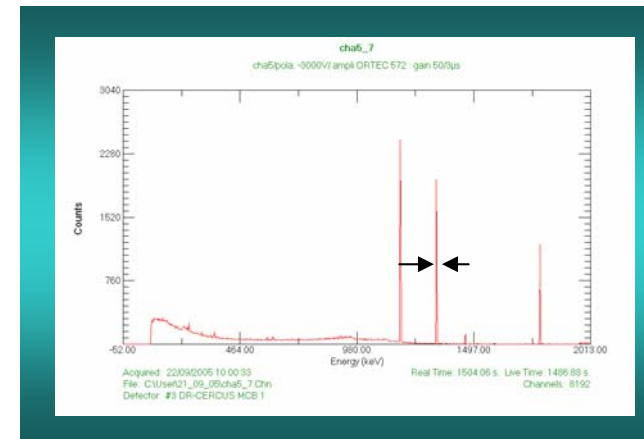
- $\varepsilon(\text{NaI}) = 1.2 \cdot 10^{-3}$
- $\varepsilon_{\text{rel}} = \varepsilon(\text{Ge})/\varepsilon(\text{NaI})$

- 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

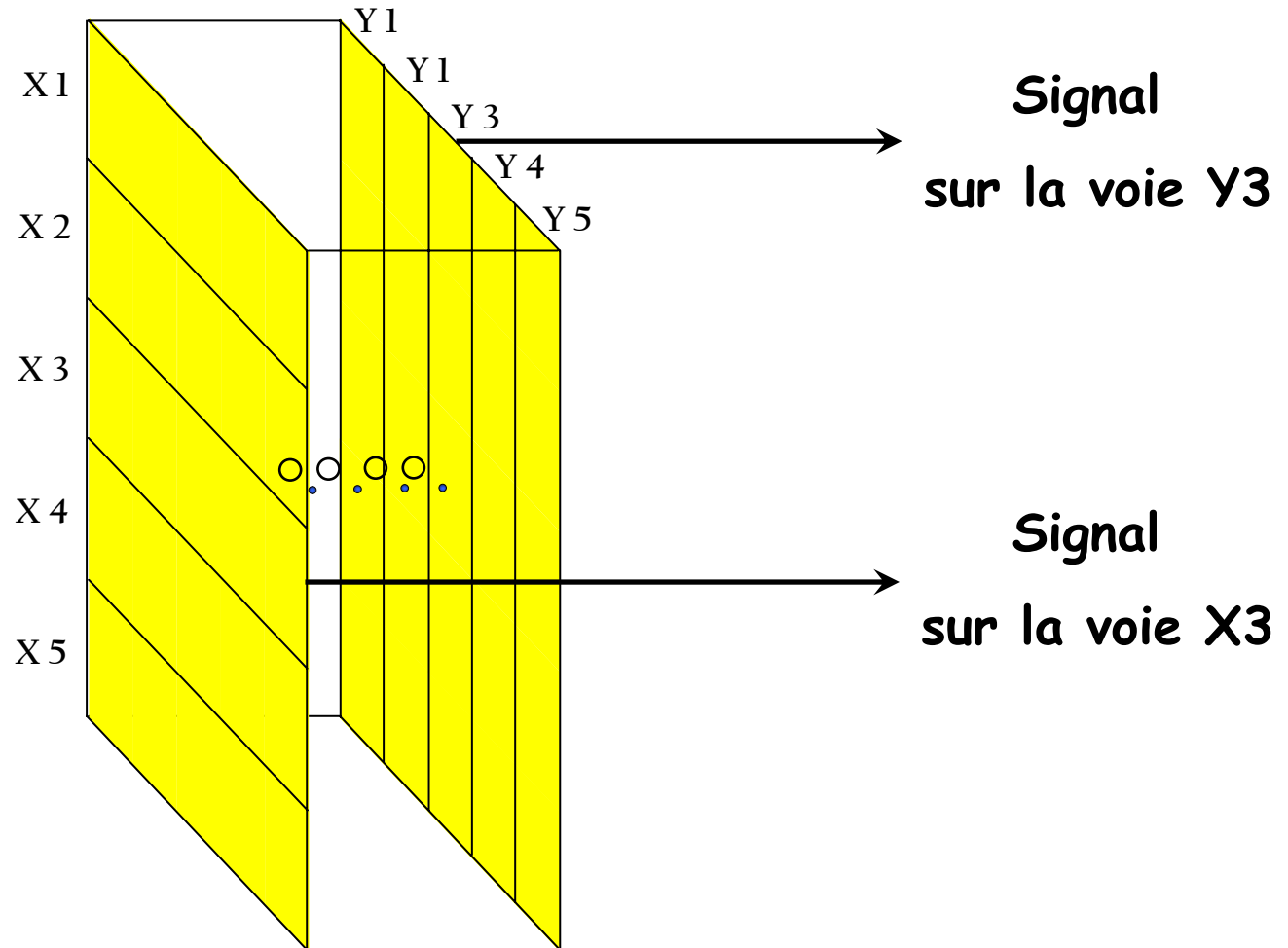


La mesure en position

Généralement segmentation des électrodes :

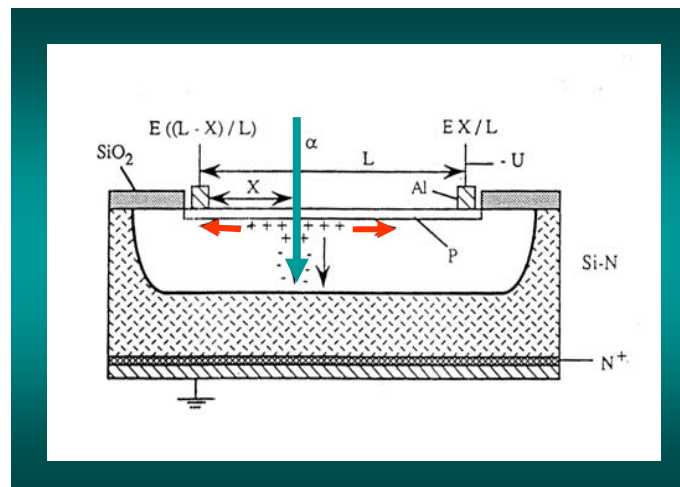
- Localisation et mesure de l'énergie
 - Pistes (localisation x, y)
 - Segments (pixels, pads)
 - Secteurs (r, θ)
- Tracking γ

Détecteur à piste double face



Détecteur à couches résistives

- Détecteurs à surface(s) résistive(s) -> barycentrage des signaux générés aux électrodes

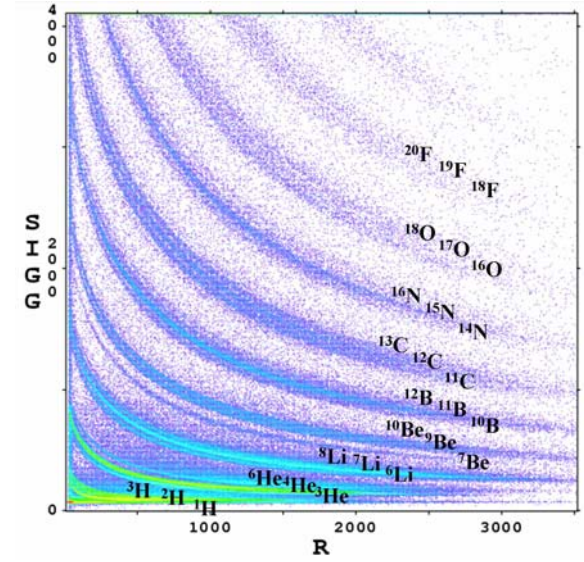
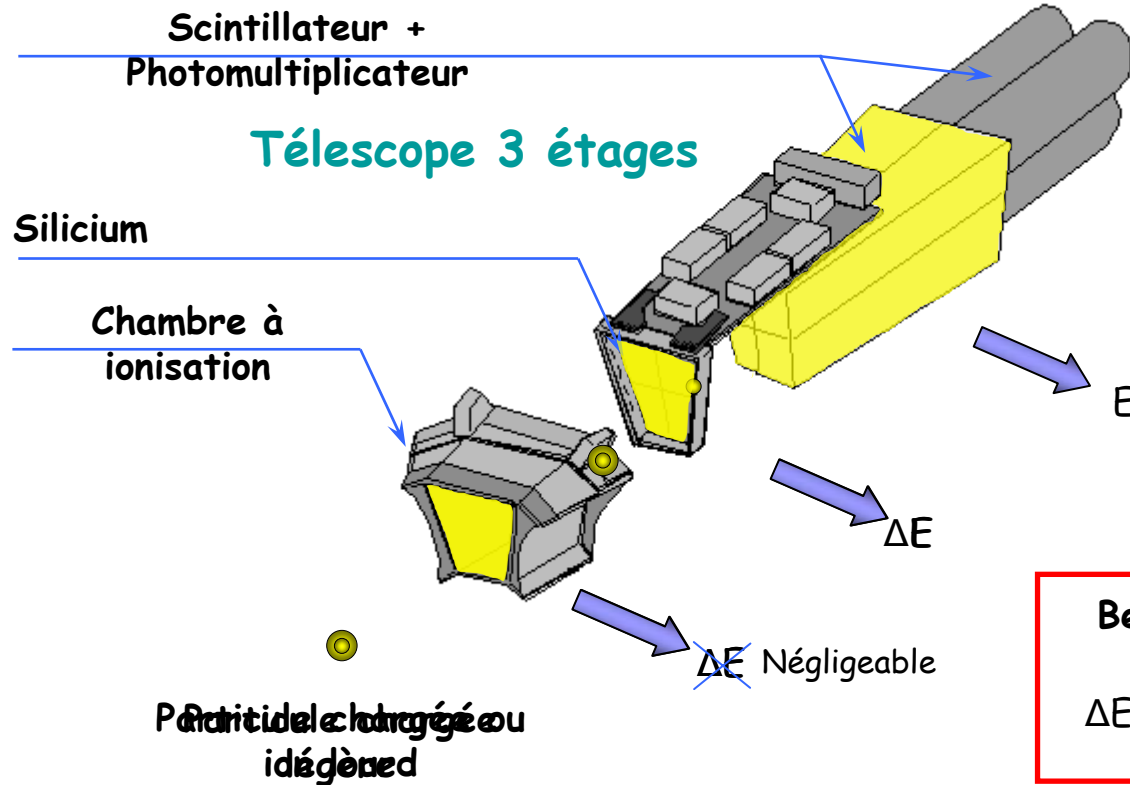


- résolution en énergie dégradée (bruit dû aux résistances de couche)

L'identification des ions

- Méthode E- Δ E (montage en télescope)
- Temps de vol
- La forme du signal

Méthode E- ΔE : identification (A,Z)



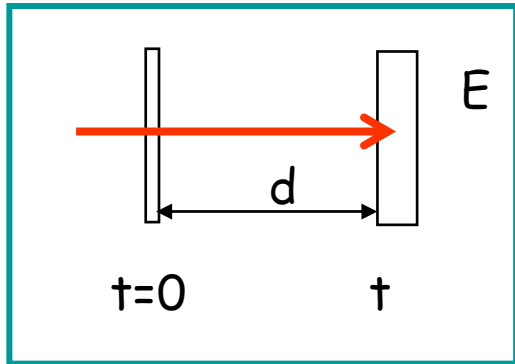
Bethe Bloch

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

- ΔE : mesure de l'énergie perdue dans le milieu par la particule
- E : mesure de l'énergie perdue dans le milieu par la particule
- A : masse atomique de la particule

(INDRA)

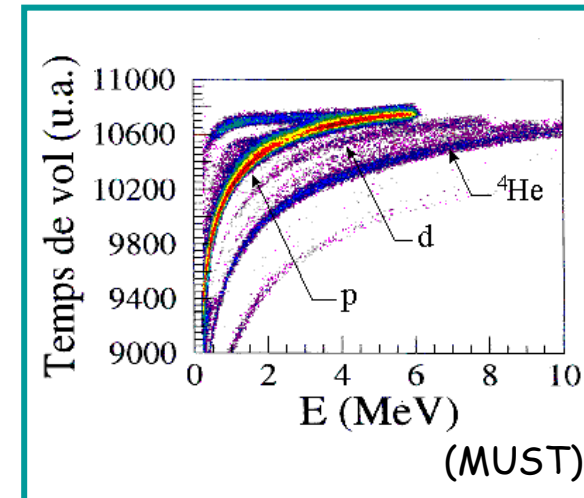
Le temps de vol : identification en A



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

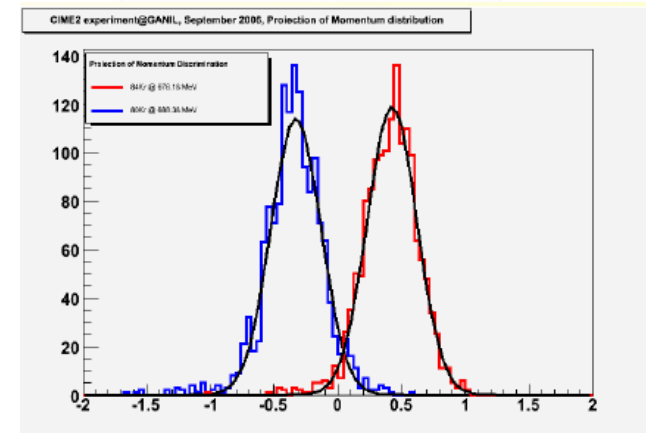
$$t = d \sqrt{\frac{A}{2E}}$$

- 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



La forme du signal : identification (A,Z) ?

- Numériser le signal de charge (Si et Ge) ou le signal de courant (Si)
- Construire une base de données
- Utiliser des algorithmes spécifiques (traitement du signal)
 - Energie vs temps de montée
 - Energie vs moment d'ordre 2
 - Moment d'ordre 2 vs moment d'ordre 3
 - Réseau de neurones
 - Filtrage optimal....



^{80}Kr - ^{84}Kr @680 MeV

L.Bardelli, FAZIA, 2007

Pour résumer

- Formation du signal
- L'énergie et la position
- Les méthodes d'identification