

Présentation des détecteurs à base de CZT conçu par l'université de Montréal et du New Hampshire



MODÉLISATION DES SIGNAUX ET DU PARTAGE DE
CHARGE DANS LES DISPOSITIFS DE DÉTECTION À BASE
DE CZT PAR UNE MÉTHODE HYBRIDE DE SIMULATION
MONTE-CARLO/ ÉLÉMENTS FINIS



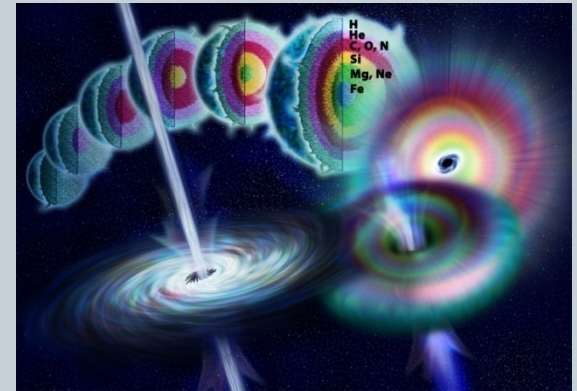
Mathieu Benoit
Université de Montréal



But du développement



- Concevoir un détecteur de rayonnement γ pour l'astronomie
 - Pouvoir d'arrêt important
 - large surface
 - Résolution submillimétrique
 - consommation électrique réduite
 - Poids réduit



Effondrement d'une étoile en trou noir
Credit: Nicole Rager Fuller/NSF

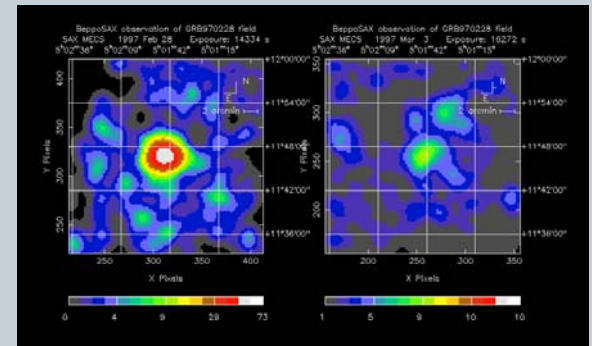


Image d'un Gamma-burst, prise par le satellite BeppoSAX

CdTe vs CdZnTe



CdTe

Numéro atomique : 48,52

Gap: 1.5 eV

$\epsilon_R = 11.00$

$E_{\text{pair}} = 4.43 \text{ eV}$

Résistivité $\rho = 10^9 \Omega \text{ cm}$

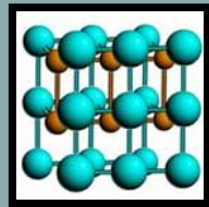
$\mu_e = 1100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

$\mu_h = 50-80 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

$\tau_e = 3 \times 10^{-6} \text{ s}$

$\tau_h = 2 \times 10^{-6} \text{ s}$

Structure cristalline: cubique,
CFC



Cd(1-X)Zn(x)Te

Numéro atomique : 48,30,52

Gap: 1.57 eV

$\epsilon_R = 10.90$

$E_{\text{pair}} = 4.64 \text{ eV}$

Résistivité $\rho = 3 \times 10^{10} \Omega \text{ cm}$

$\mu_e = 1000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

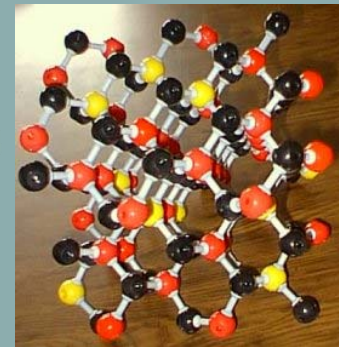
$\mu_h = 100 \text{ cm}^2/\text{Vs}$

$\tau_e = 3 \times 10^{-6} \text{ s}$

$\tau_h = 1 \times 10^{-6} \text{ s}$

Structure cristalline: cubique,
CFC

Zinc en rouge
Te en noir
Cd en jaune



Propriétés spectroscopique du CZT



- La radiation à détecter est le rayonnement γ
 - Effet photoélectrique $\propto Z^5/E^{3.5}$
 - Diffusion Compton
 - Création de paire (négligeable)

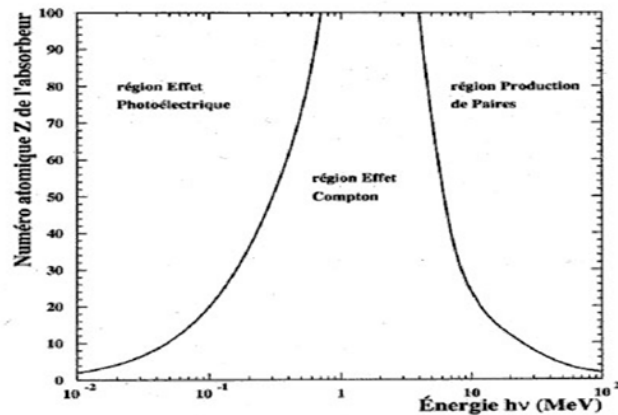


Figure 1-1 : Processus d'interaction photon-matière selon l'énergie du photon

Propriétés spectroscopique du CZT(suite)

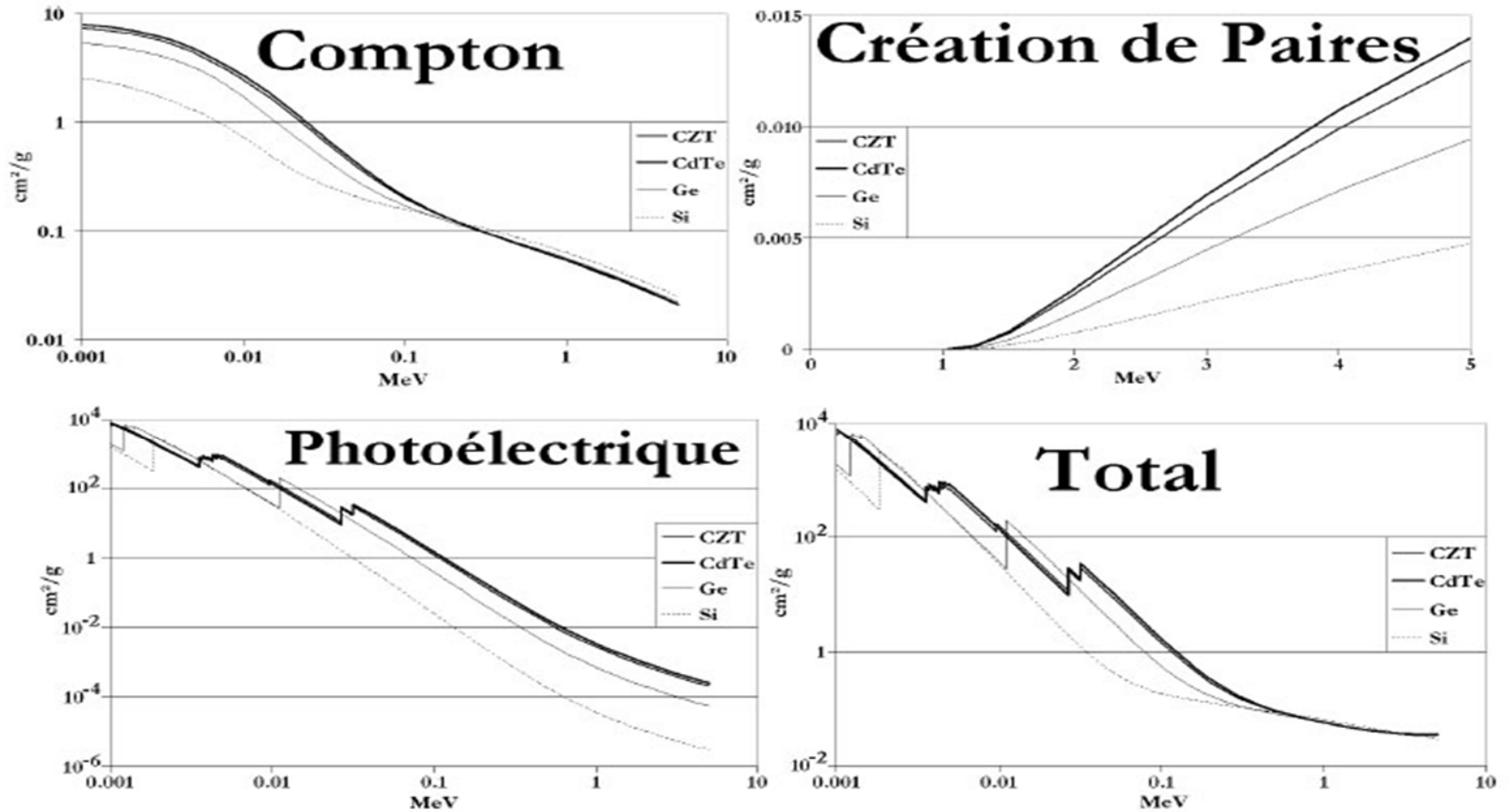
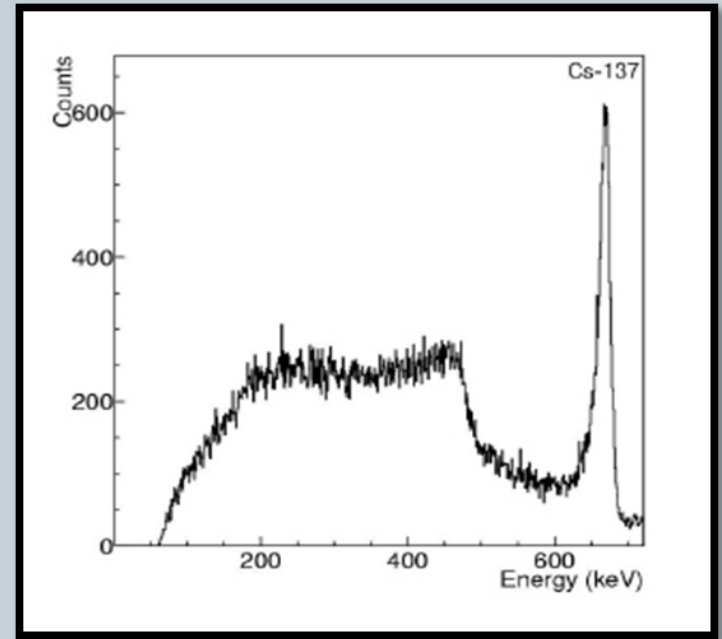


Figure 3-1 : Sections efficaces

Propriétés spectroscopique du CZT(suite)

- Déposition de l'énergie
 - Effet photo-électrique
 - L'ensemble de l'énergie est déposé localement
 - La gerbe crée un nuage de paires électron-trou
 - Compton
 - Une partie de l'énergie du γ est déposé localement
 - Le gamma diffusé part avec l'énergie restante
- Le nombre de paires déposées

$$N_{pair} = \frac{E_d}{E_{pair}}, E_{pair} = 4.64 eV$$



La technologie



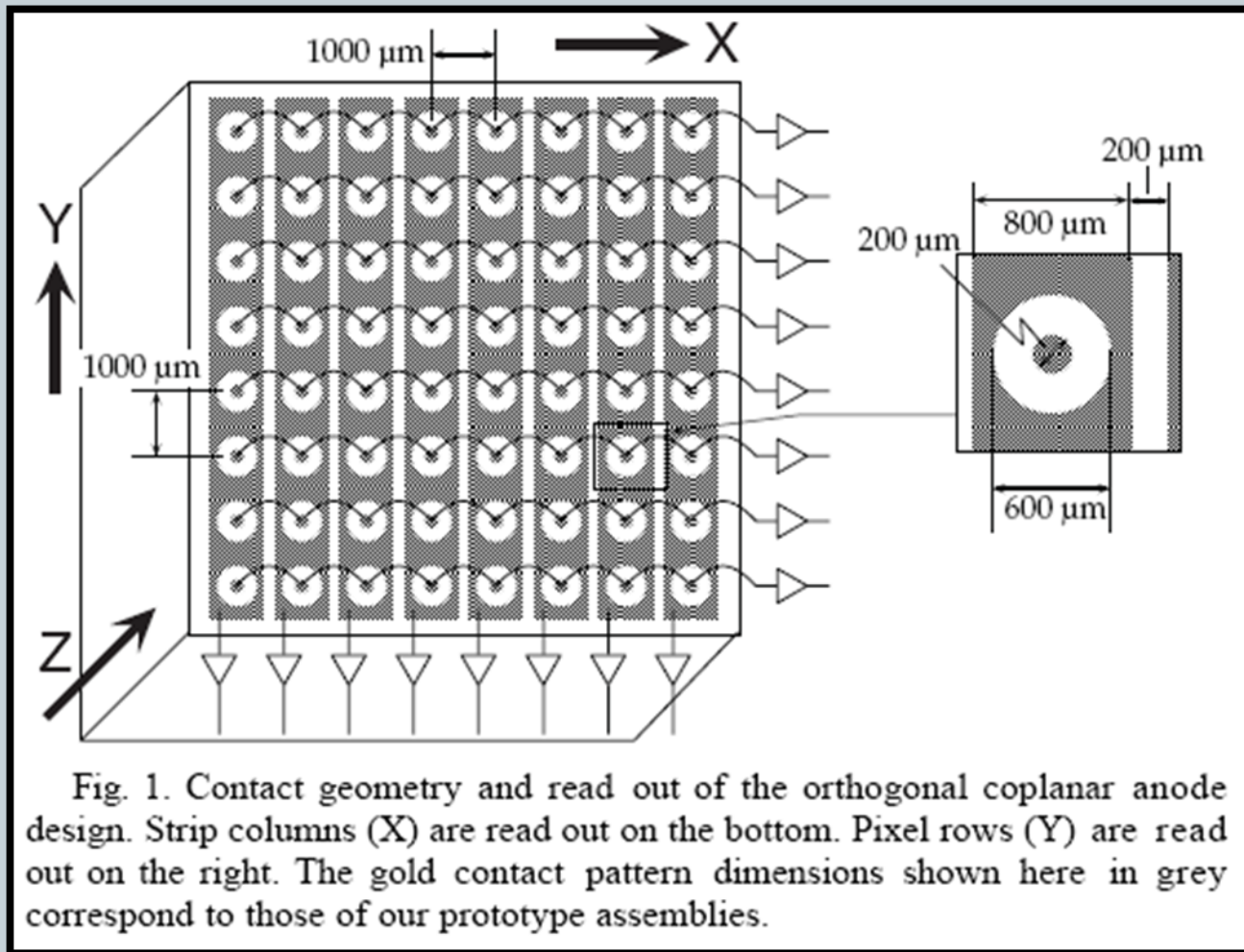
- Le matériau : $\text{Cd}_{(1-x)}\text{Zn}_{(x)}\text{Te}$
 - Haute résistivité ($\approx 10^{10} \Omega\text{cm}$)
 - Z élevé (48,30,52) , $\rho = 5.78 \text{ g/cm}^3$
 - Faible mobilité des trous (50-80 cm^2/Vs)
 - Taille des détecteurs limités
- Pour le spatial : Détecteur à bandes croisées
 - Moins de canaux de lectures
 - Faible mobilité des trous rends le concept de détecteur double face difficile à opérer
- Solution : Bandes coplanaires

Détecteur à bandes croisées coplanaires

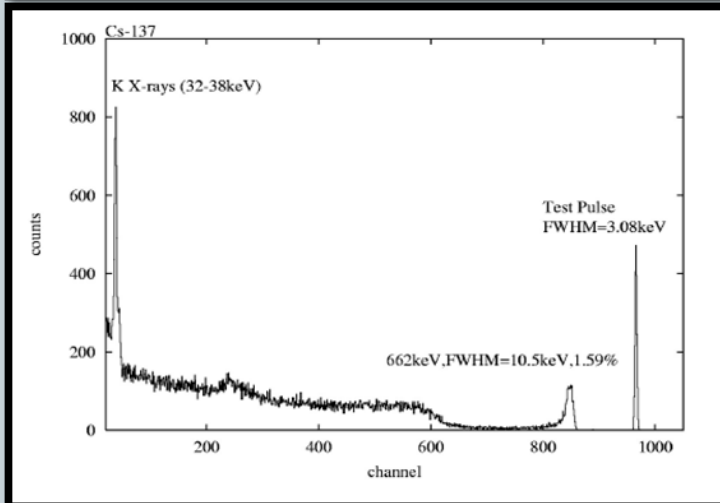
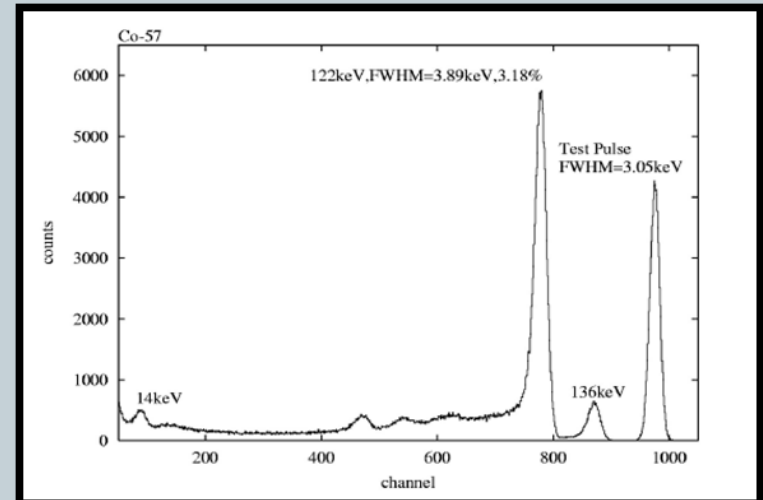
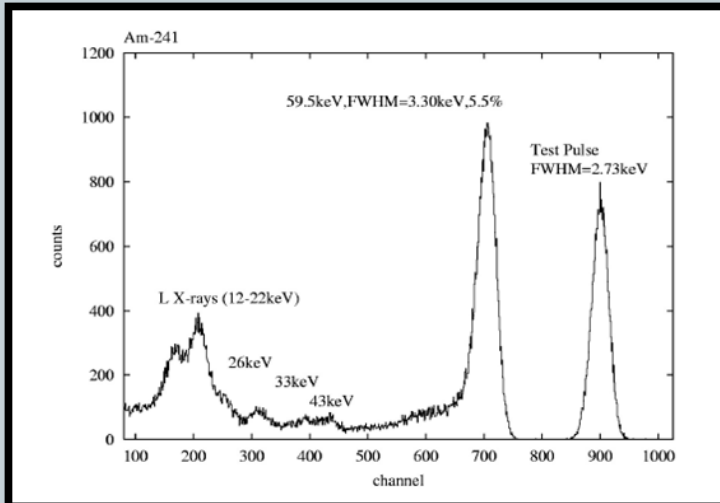


- Deux ensembles de « bandes » orthogonales sur la même face du cristal de CZT
- On doit adopter un design d'électrode spécial pour rendre cela possible
- Les deux bandes collectent les électrons, rapides ($\mu=1000\text{cm}^2/\text{Vs}$)
- Les deux bandes doivent se partager le signal pour pouvoir localiser un événement

Détecteur à bandes croisées coplanaires (2002)



Performances spectroscopiques



FWHM

Am-241 : 3.3 keV, 5.5% @ 59.5keV

Co-57 : 3.89 keV, 3.18% @ 122 keV

Cs-137 : 10.5 keV, 1.59% @ 662 keV

Positionnement



D. 3-d Imaging

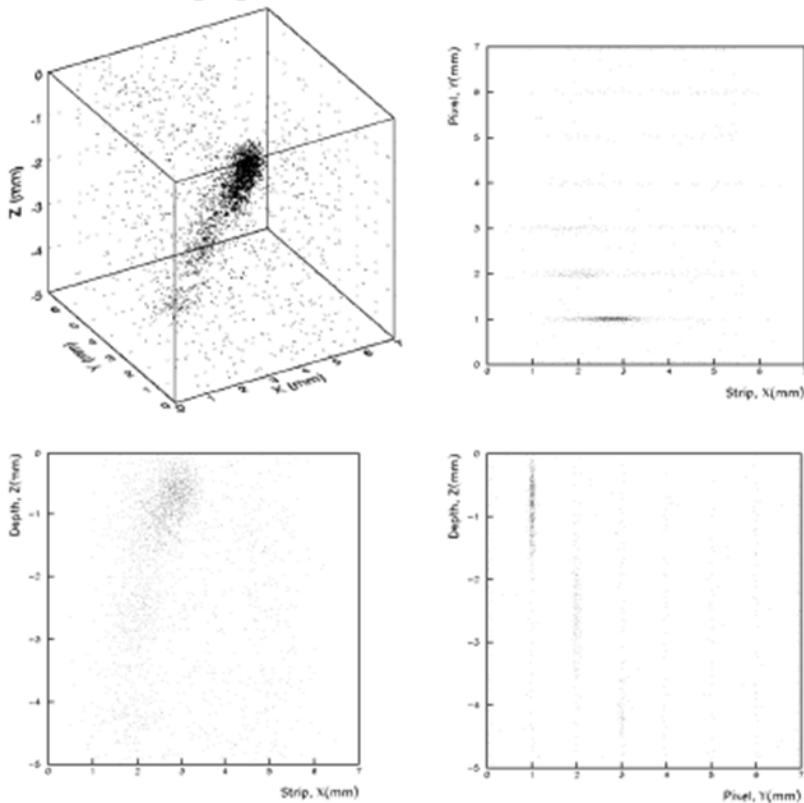


Fig. 11. Beam spot image, $\sim 25^\circ$ incidence. 3-d event locations (top left), projections (clockwise) xy, xz and yz. Note: cathode is at $Z=0$; sign of Z was inverted to facilitate the graphic illustration.

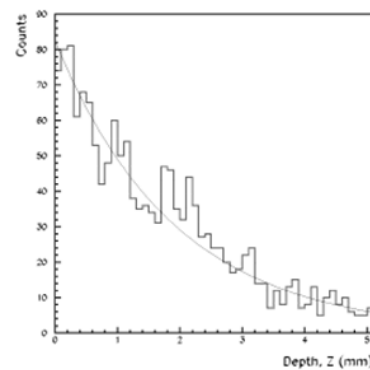


Fig. 10. Measurement of the attenuation length for 122 keV photons in CZT.

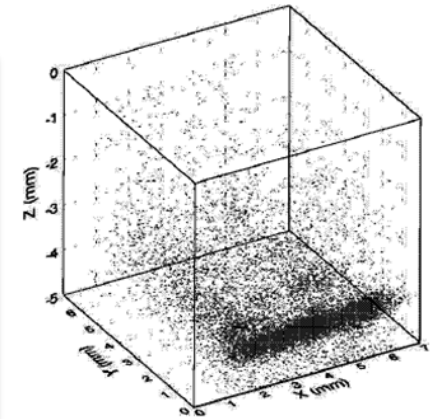


Fig. 9. Measurement of spatial resolution in Z . Illumination from the $Y=0$ side through a 0.4 mm wide slit at $Z=3.8$ mm.

Résolution spatiale à 1σ :

- 0.3 mm (X) 0.2mm(Y) @ 122 keV
- 0.4 mm (X) 0.2mm (Y) @ 60 keV
- 0.37 mm (Z) @ 122 keV avec *Cathode to maximum pixel ratio method*
- 0.86 mm (Z) @ 122 keV avec *Strip sum to maximum pixel ratio*

Simulation

Plusieurs géométries d'électrodes ont été testées pour tenter de trouver la géométrie donnant le meilleur partage de charge.

- Potentiel de pondération
- Transport
- CCE, partages de charge

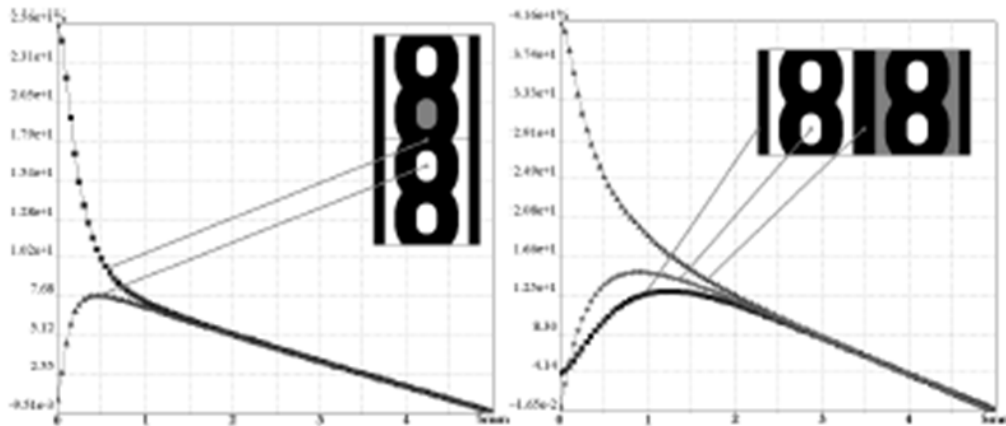
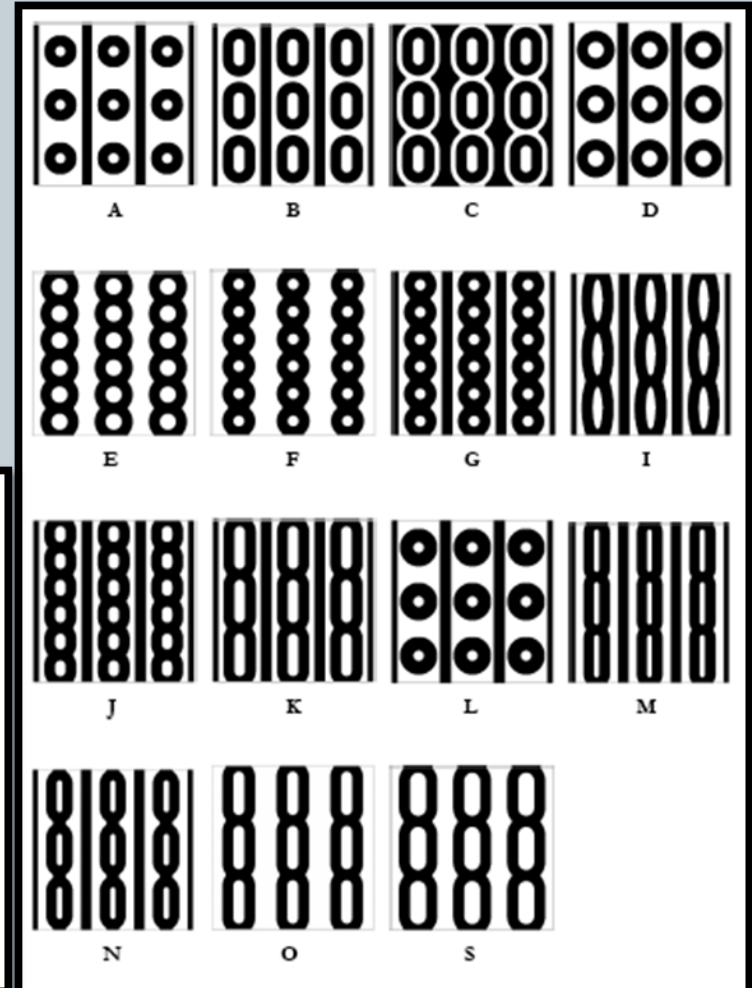


Figure 3-24 : Potentiels de pondération sur certains axes, modèle J



Détecteur à bandes croisées coplanaires (2004)

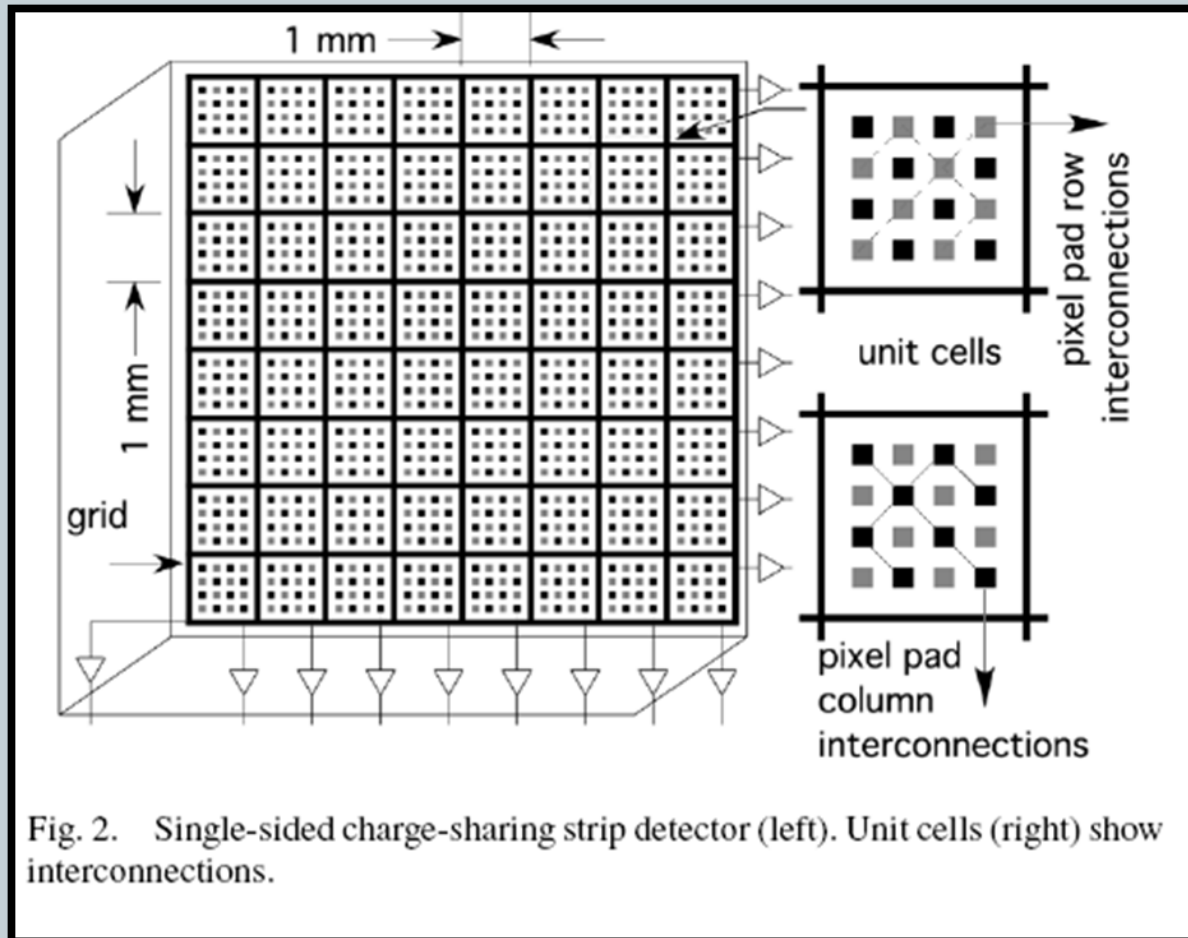
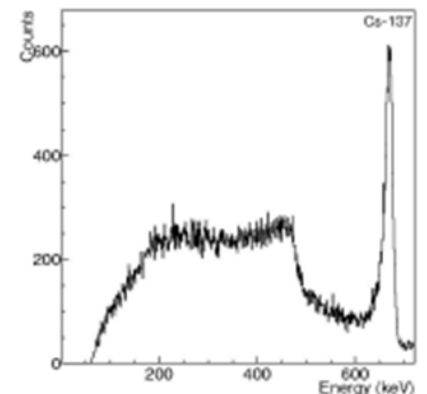
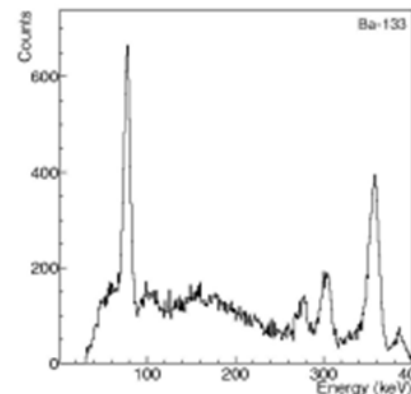
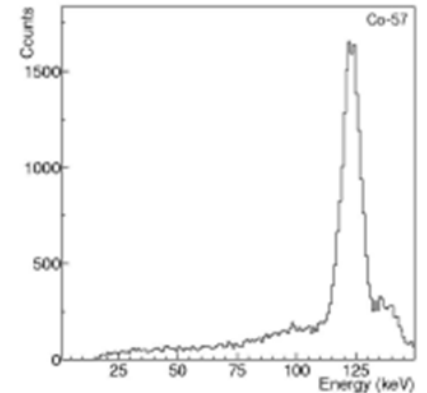
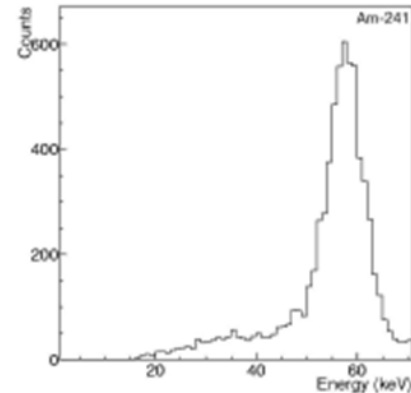
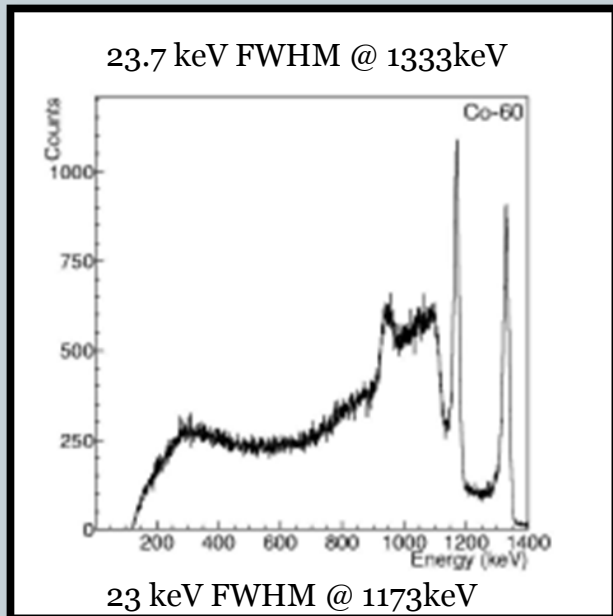


Fig. 2. Single-sided charge-sharing strip detector (left). Unit cells (right) show interconnections.

Performances spectroscopiques

Spectres de différentes sources
Pour une cellule unique



Positionnement



- Résolution sous 1.225 mm en X et Y

- Résolution sous 1mm en Z

- Bonne corrélation entre les deux méthodes de mesure de la profondeur de l'événement

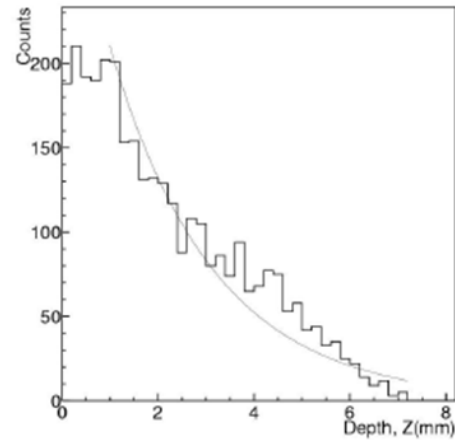


Fig. 5. Measurement of the attenuation length for 122 keV photons.

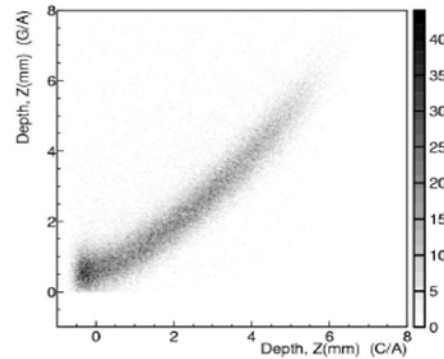


Fig. 4. Correlation of depth measurement using the cathode and grid signals for 662 keV photons.

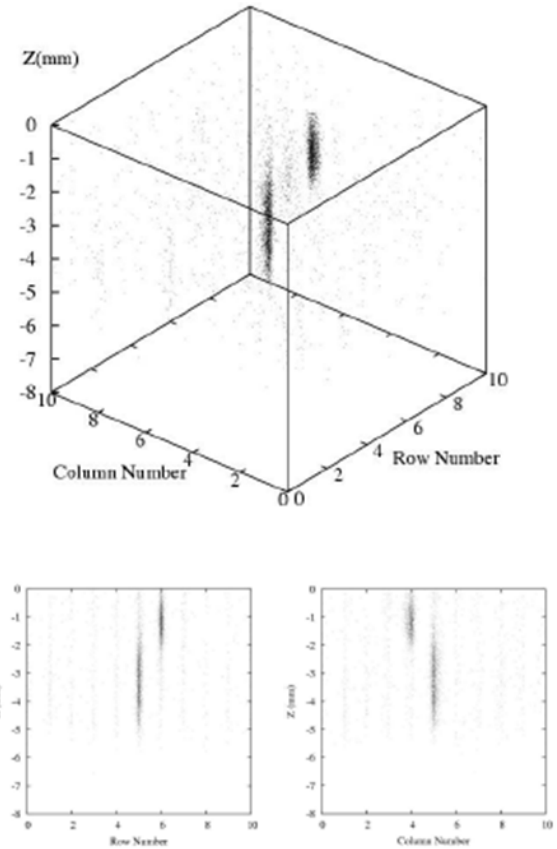
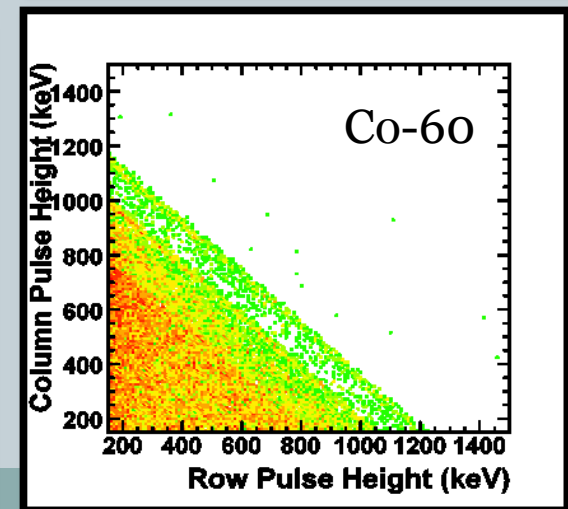
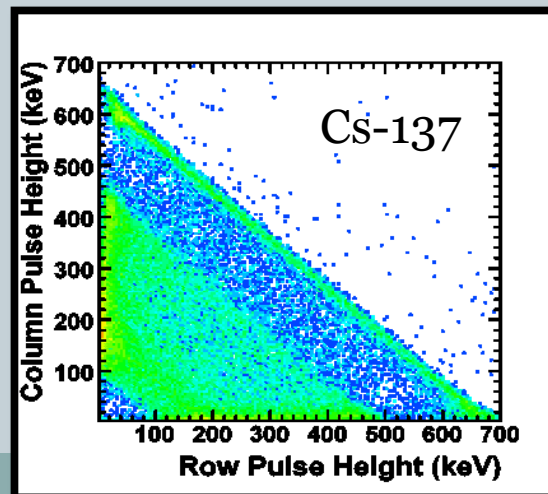
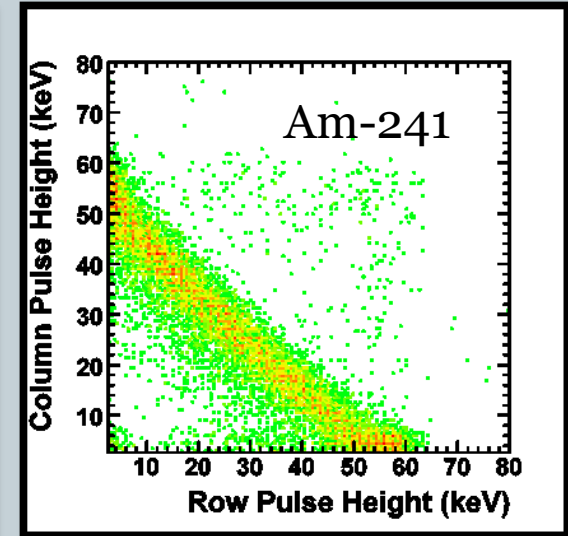
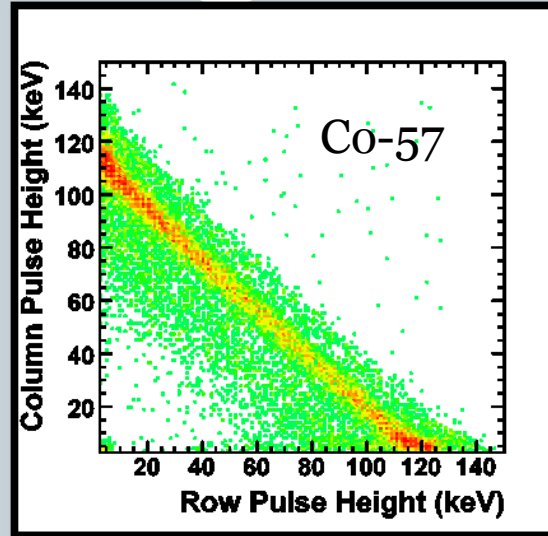


Fig. 6. 3-D event locations and projections on x-z and y-z plane. Cathode is at $Z=0$, sign of Z was inverted to facilitate the illustration.

Partage de charge

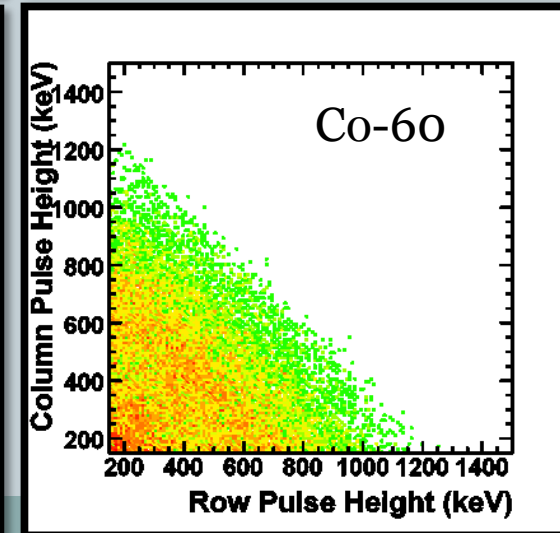
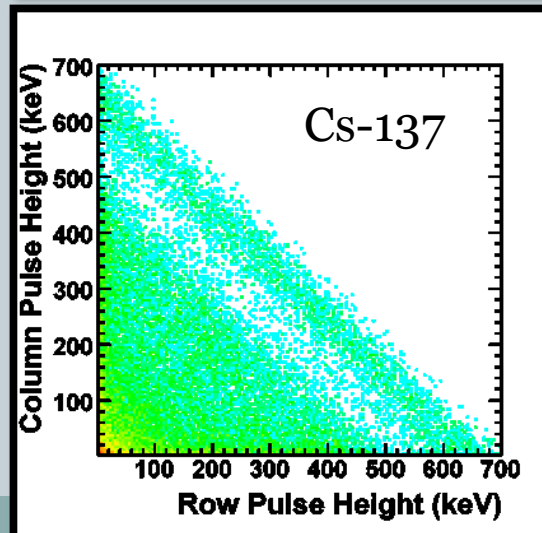
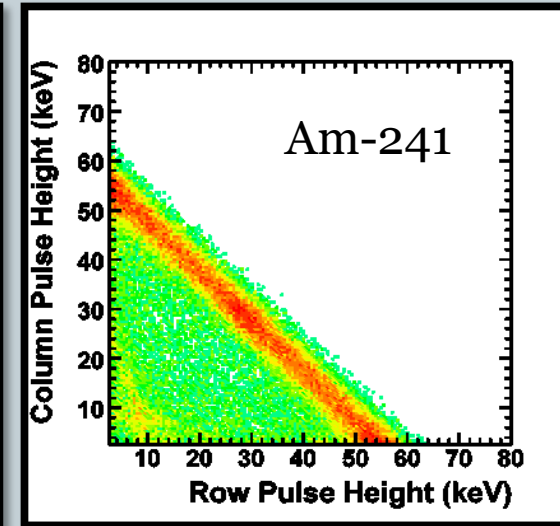
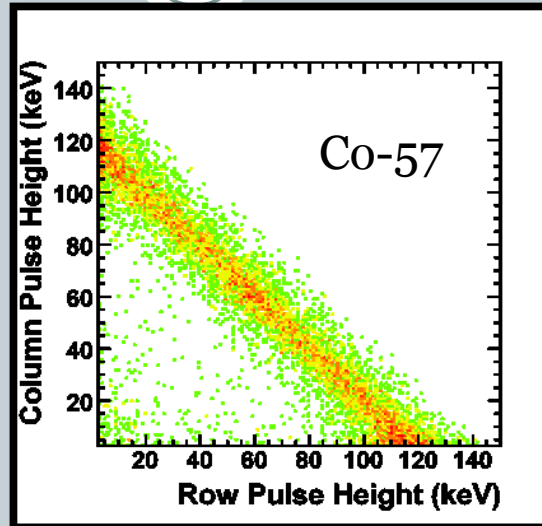
- L'efficacité de positionnement des événements est réduite par le manque de partage de charge (64% @ 122 keV)
- On doit augmenter ce partage entre les différents canaux dans le prototype suivant



Simulation



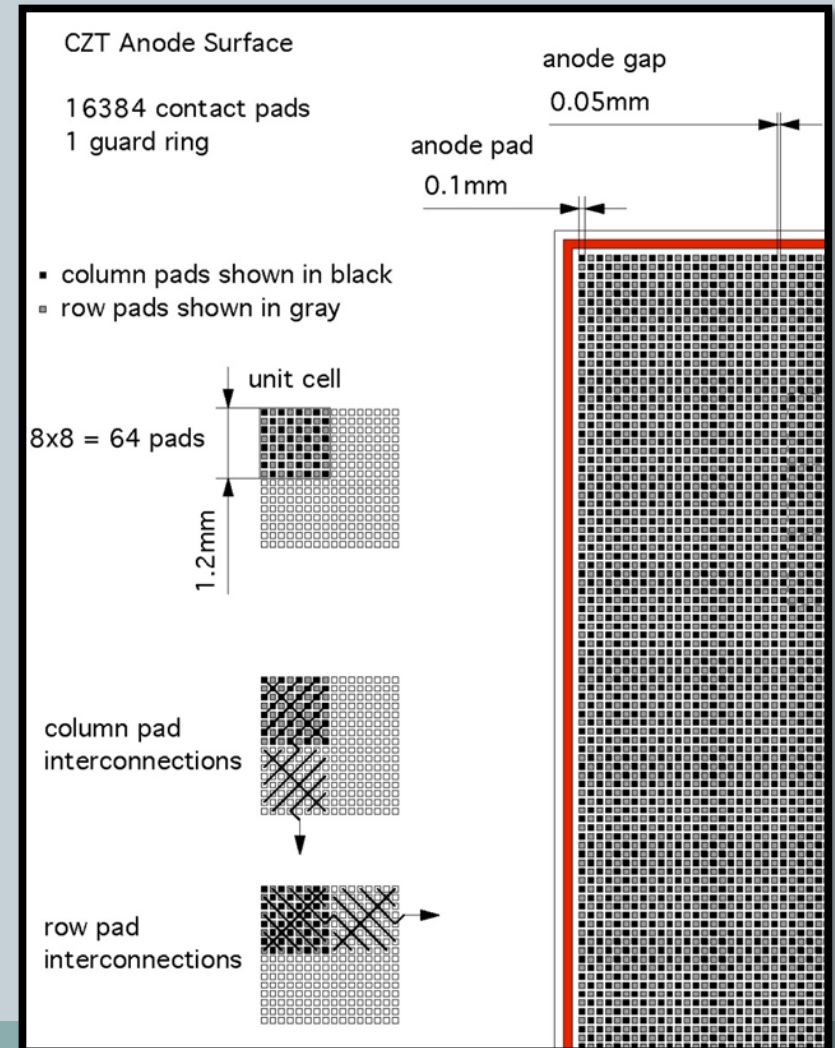
- Un logiciel de simulation a été construit pour reproduire le fonctionnement du détecteur
- On reproduit le partage observé
- Bonne corrélation entre les données simulées et expérimentales



Prochain prototype (20??)



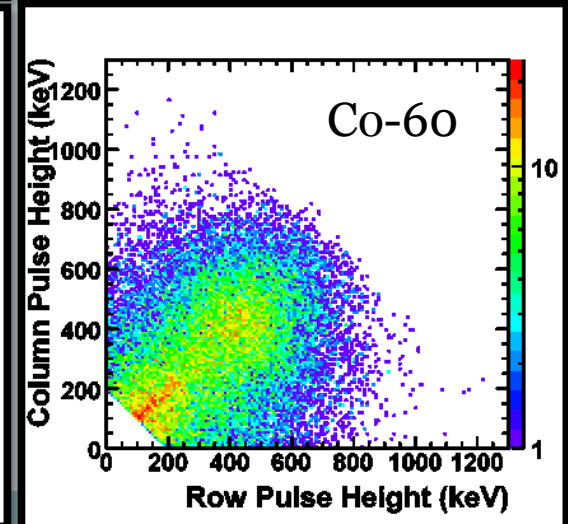
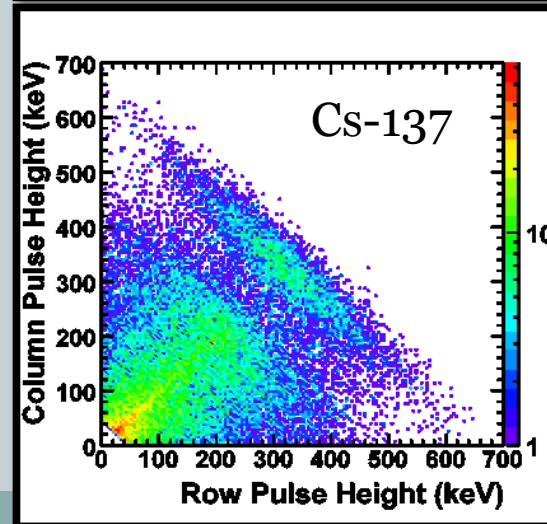
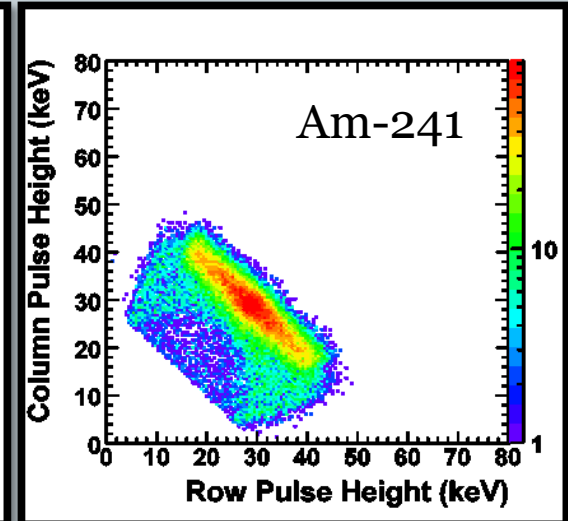
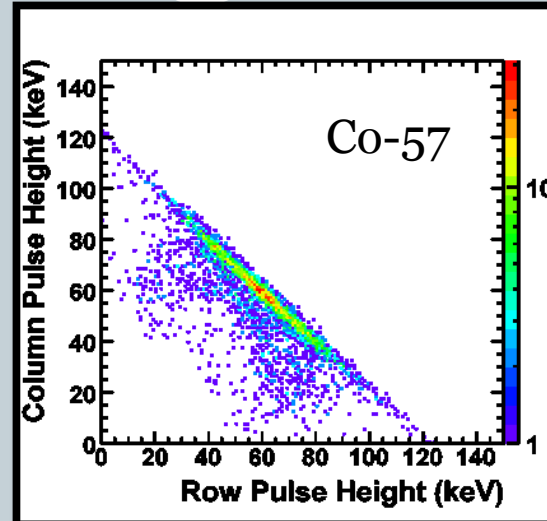
- Un pas de pixel plus petit (≈ 150 microns)
- Même résolution spatiale
- Plus de pixels par cellule
- Amélioration du bruit (électronique)



Simulation



- La simulation prédit une augmentation suffisante du portage
- La simulation permet de déterminer la plus grande taille de pixel possible pour conserver un bon partage
- Le prototype est en cours de production



(demi)-Conclusion



- Plusieurs géométries d'électrodes ont été étudiées grâce à des prototypes et des générations de logiciels de simulation (synergie)
- Notre détecteur actuel offre déjà une bonne résolution en position, mauvaise efficacité
- Le prochain prototype doit avoir une efficacité $> 80\%$
- Les résultats sur le nouveau prototype seront disponibles bientôt

Sécurité nationale



- Les détecteurs à pixels servent à la fabrication de dispositifs d'imagerie au rayons X (inspection des containers, des véhicules)
- Les spectromètres servent à fabriquer des dispositifs de surveillance du matériel nucléaire, et font de très discrets outils d'inspection (Irak, Corée du Nord)

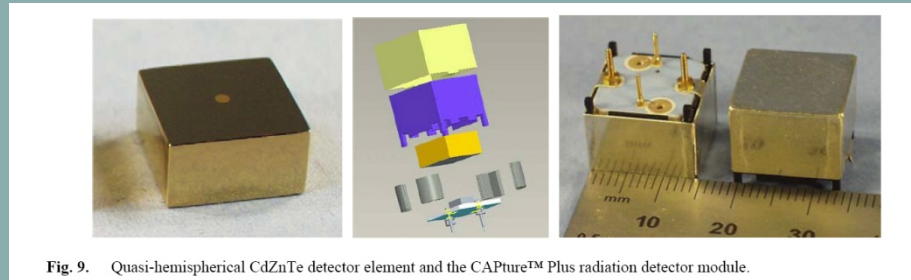


Fig. 9. Quasi-hemispherical CdZnTe detector element and the CAPture™ Plus radiation detector module.

Sécurité nationale

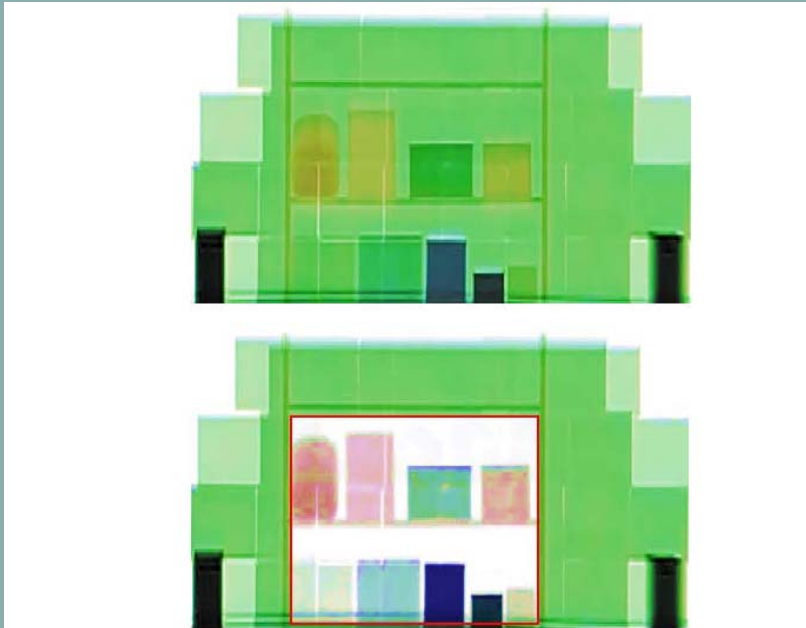


Fig. 6. Demonstration of background removal tool. Upper image – objects of different composition hidden behind a concrete wall. Lower image – concrete wall background removed to reveal true composition of the objects.

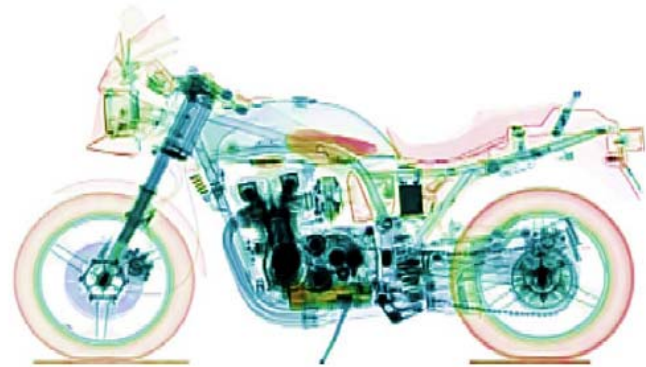


Fig. 3. Final color image of the motorbike combining density and composition information. Oil near the bottom of the engine as well as some simulated fuel in the tank can be clearly identified.

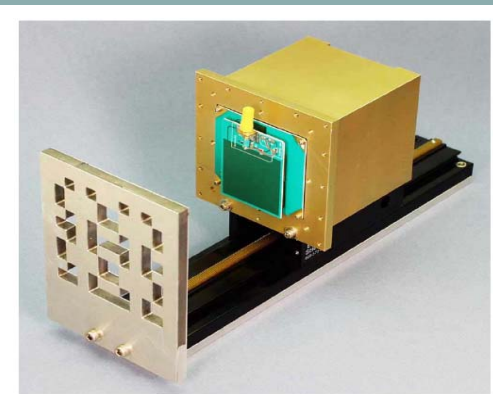


Figure 2. Phase I Demonstration System. 10 cm x 14 cm x 17 cm (W x H x L). Coded mask at left, ASIC readout system at right, CZT detector array on face of ASIC readout system.

Imagerie médicale



- SPECT scan : **Single photon emission computed tomography**
- PET scan : **Positron emission tomography**
- **Rayons X**
- **Avantages:**
 - Meilleure résolution
 - Pas de refroidissement
 - Compact, numérique

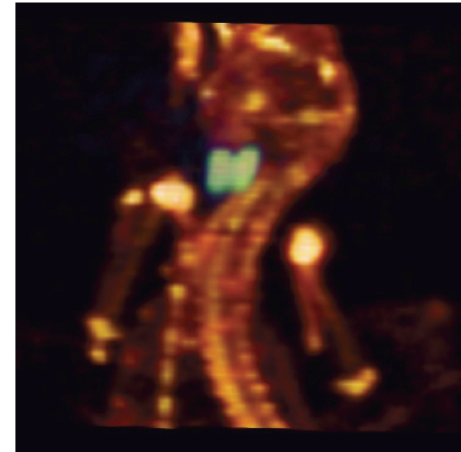


Fig. 10 Animal Study: ^{99m}Tc -MDP and ^{123}I co-injected and imaged with eV-CZT FLEX system. The red fluorescent displays the MDP in the bone and the green fluorescent color map shows the thyroid uptake of the ^{123}I .

Imagerie médicale

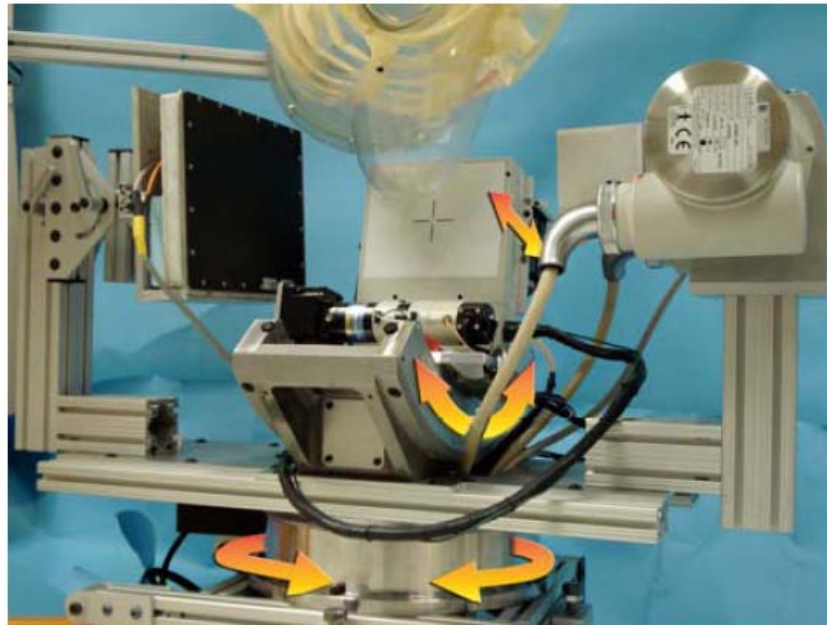


Fig 1: Photograph of the prototype dual-modality dedicated breast imaging tomographic system. The SPECT system (center) is placed orthogonally to the CmT tube (right) and digital flat-panel detector (left). The arrows illustrate system motions. Note that the pendant breast is in a common FOV of each system.

Imagerie médicale

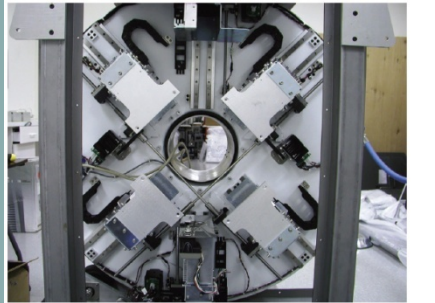


Fig. 15. Open panel view of the front part of the Triumph gantry, picture shows the 4 CZT gamma cameras placed across the plane, with slots available for the installation of CT x-ray tube (bottom) and detector (top).



Fig. 1. Triumph™ tri-modality imaging system depicted in a research laboratory environment.

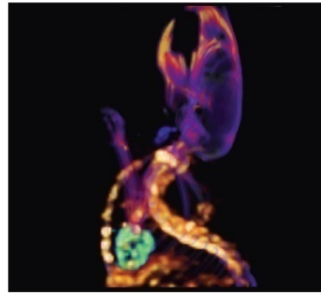


Fig. 14. Tri-Isotope animal experiments: ^{99m}Tc -MDP, ^{123}I and ^{201}Tl co-injected and simultaneously imaged with eV-CZT FLEX. SPECT image was followed by a CT acquisition and the reconstructed images were co-registered and co-displayed. Red fluorescent: ^{99m}Tc -MDP in the bone; Green fluorescent: ^{201}Tl in the heart; Dark blue fluorescent: ^{123}I in the thyroid; Rainbow color: CT at the bone threshold.

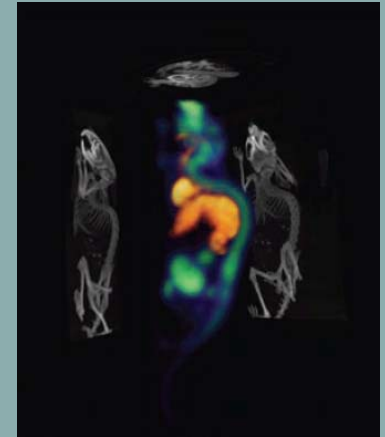


Fig.10. High resolution CT image obtained using the CT Zoom capability. The image on the right is a normal mouse paw, on the left is an arthritic mouse paw.

Modélisation des signaux et du partage de charge dans les dispositifs de détection à base de CZT par une méthode hybride de simulation Monte-Carlo/ Éléments finis



PRÉSENTATION DES DÉTECTEURS À BASE DE CZT
CONÇU PAR L'UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL ET DU NEW
HAMPSHIRE



Mathieu Benoit
Université de Montréal



But de la simulation



- **Obtenir un modèle pour prédire :**
 - Le partage de charge entre les électrodes du détecteur
 - La résolution spatiale du détecteur
 - La résolution en énergie
- **Utiliser le modèle pour le design de futurs détecteurs**
 - Optimiser la géométrie des électrodes
 - Anneaux de gardes
 - Etc.

Étape de la simulation



- **Déposition d'énergie**
 - Interaction du photon γ avec la matière du détecteur
 - Création d'un nuage de porteurs
- **Transport des porteurs**
 - Transport dans le champ électrique externe
 - Effets du piégeage, dépiégeage
 - Répulsion électrostatique
 - Diffusion
- **Calcul du signal induit**
 - Théorème de Ramo

Déposition d'énergie



- 2 processus à simuler
 - Effet photo-électrique
 - Diffusion Compton

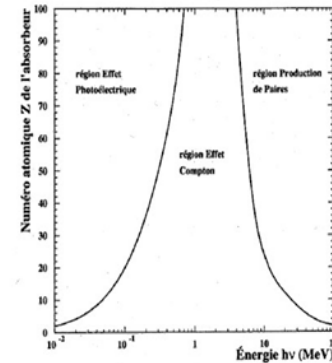


Figure 1-1 : Processus d'interaction photon-matière selon l'énergie du photon

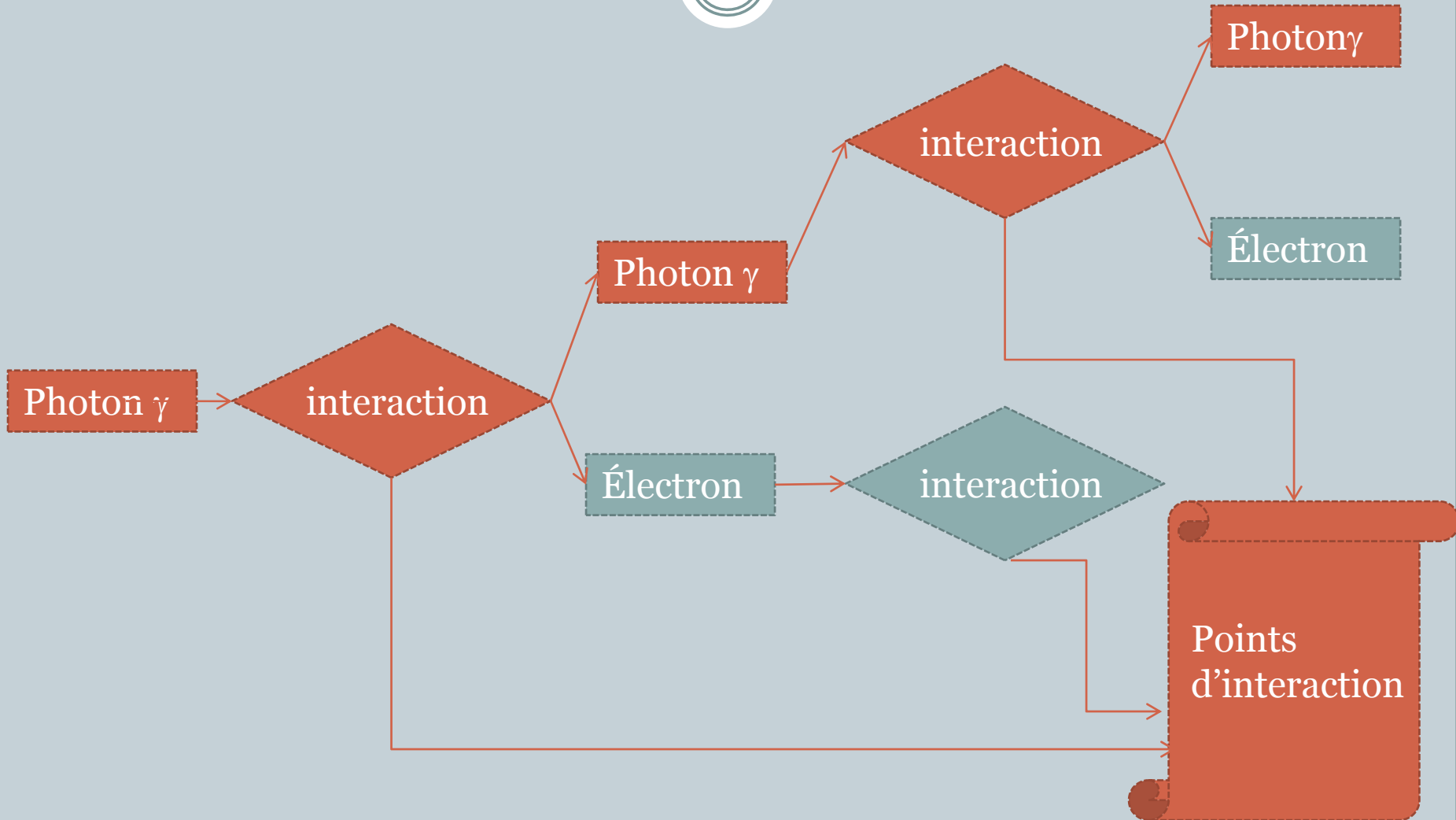
- Un premier module du logiciel utilise les bibliothèques GEANT4 pour simuler le processus de déposition d'énergie

GEANT4

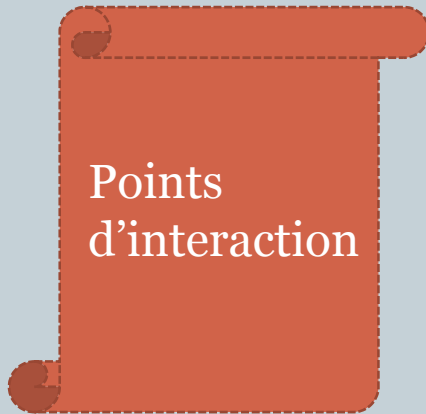


- **Structure classique d'un programme GEANT4**
 - On définit la géométrie, les matériaux
 - On définit la source (orientation, distribution angulaire, etc.)
 - On définit les particules à inclure dans la définition (électrons, photons γ)
 - On définit les processus physiques à simuler
 - ✦ Effet photoélectrique
 - ✦ Diffusion Compton
 - ✦ Diffusion des électrons
 - ✦ Ionisation
 - On définit un matériau actif (le CZT)

GEANT4



Distribution de porteurs



Interaction #1 : t x y z Énergie déposée
Interaction #2 : t x y z Énergie déposée
Interaction #3 : t x y z Énergie déposée
.....
Interaction #N : x y z Énergie déposée

- Les points d'interactions sont considérés comme des dépôts d'énergie locaux et ponctuels.
- Un posttraitement est nécessaire pour fusionner les points trop rapprochés (on désire que chaque point de dépôt d'énergie restant soit indépendant)
- On génère la distribution de porteurs en distribuant au hasard des porteurs témoins autour du point d'interaction selon une distribution gaussienne

Distribution de porteurs



- Le résultat de la déposition d'énergie est un ensemble de nuages de porteurs indépendants, de distribution gaussienne centré au point d'interaction
- Le paramètre σ de la distribution est déterminée par le libre parcours moyen de l'électron pour l'énergie de l'interaction

$$R_p = AE \left(1 - \frac{B}{1 + CE} \right)$$



PDG (Ed.), Particle Data Group: Review of particle properties, Vol. 56 of Part II, Rev Mod Phys, 1984.

Distribution de porteurs



- On choisit un nombre N de charges témoins
 - Selon la précision voulue
 - Plus N est grand plus la simulation est longue
- On représente les points d'interactions par des distributions de charges témoins, distribué aléatoirement selon la distribution citée précédemment
- Chaque point d'interaction devient un « objet » contenant un certain nombre de charges témoins
 - Indépendant des autres points
 - Le nombre de charges témoins dépend de l'énergie déposée

Transport



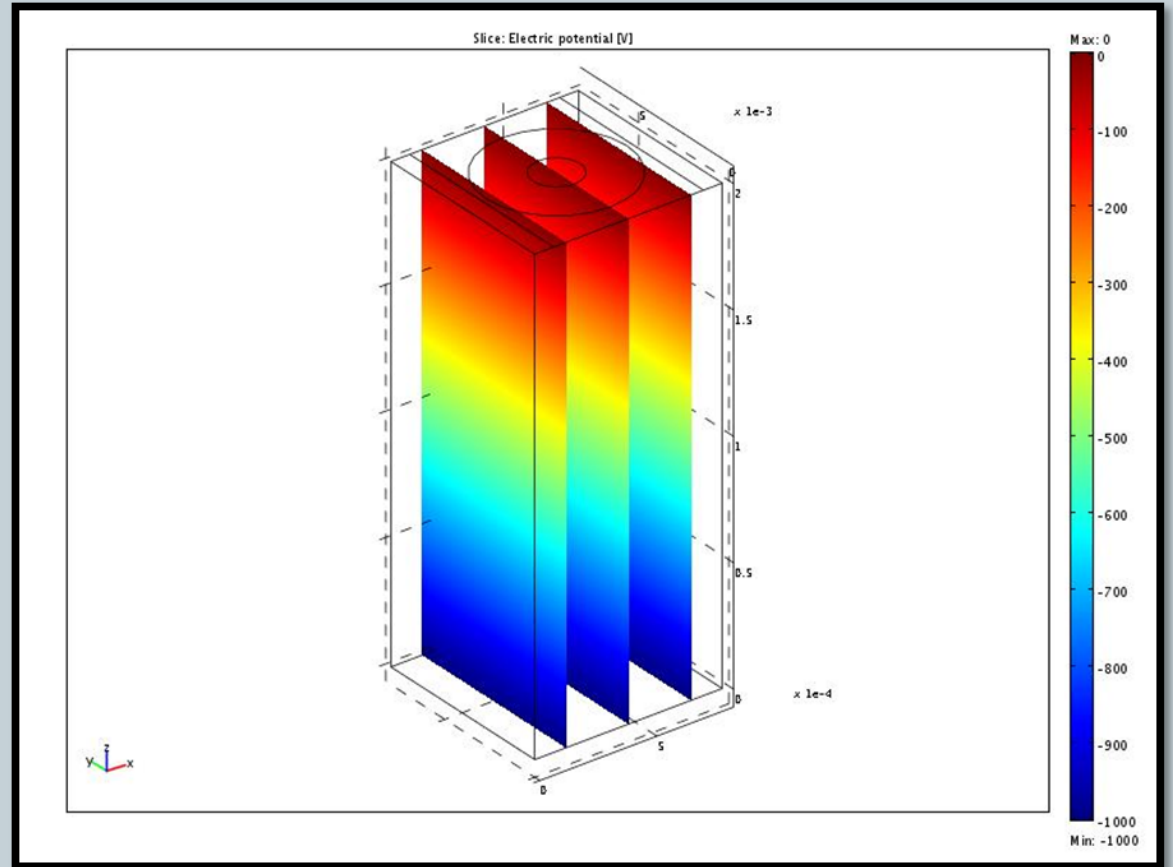
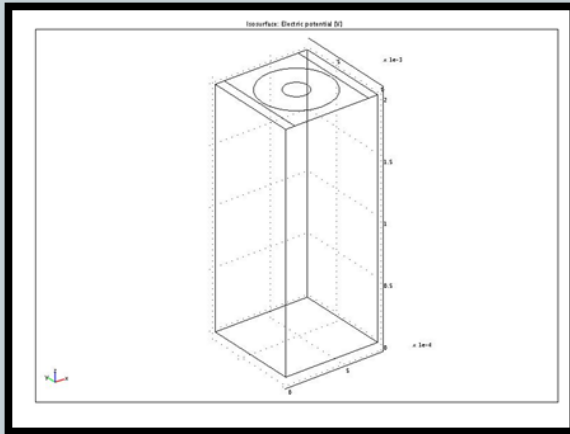
- Une fois la distribution initiale déterminée, on s'attarde au transport des charges
- Pour obtenir une représentation complète du processus de transport, on doit inclure :
 - Le transport dans le champ externe
 - La diffusion
 - La répulsion électrostatique
- On doit :
 - Obtenir une représentation du champ électrique
 - Discrétiser les processus

Transport (Champ externe)



- **Le champ électrique :**
 - Le champ électrique est obtenu à l'aide d'un logiciel (Comsol multiphysics) qui résout l'équation de Poisson (statique) par la méthode des éléments finis pour la géométrie voulue.
 - Pour simplifier, on suppose la solution périodique en X et Y (pas d'effets de bord)
 - On extrait la solution du logiciel dans une grille 3D à pas uniformes
 - Le logiciel obtient la solution à un point (x,y,z) quelconque de la géométrie par interpolation trilinéaire avec les points voisins

Transport (Champ externe)



Transport (Champ externe)



- Pour obtenir la trajectoire d'un porteur dans le champ, on doit résoudre l'équation suivante :

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \mu \vec{E}$$

- On doit Discrétiser le temps pour intégrer la trajectoire
 - Choix d'une méthode d'intégration
 - Minimisation de l'erreur sur l'intégration

Transport (Champ externe)



- Nous désirions une méthode qui soit rapide et précise
- Pas de temps (Δt) variable
 - Pas de temps perdu à intégrer des portions triviales de la trajectoire
- Un compromis : Runge-Kutta-Fehlberg ordre 5
 - Permet d'ajuster le pas de temps selon l'erreur
 - Méthode très robuste $\propto O(\Delta t^5)$

Transport (Champ externe)



- Runge-Kutta-Fehlberg, ordre 5 :

$$\Delta x_{ordre 5} = A * (K1 + K2 + K3 + K4 + K5) \Delta t$$

- Runge-Kutta-Fehlberg, ordre 4 :

$$\Delta x_{ordre 4} = B * (K1 + K2 + K3 + K4) \Delta t$$

- Erreur :

$$E = \frac{\Delta x_{ordre 5} - \Delta x_{ordre 4}}{\Delta x_{ordre 5}}$$

Transport (Champ externe)



- Pour ajuster le pas de temps en fonction de l'erreur, on utilise un thermostat simple, inspiré de la dynamique moléculaire
- Si l'erreur dépasse une certaine valeur cible, on diminue le pas en conséquence
- Si l'erreur est plus petite qu'une valeur cible, on augmente le pas de temps en conséquence
- Ainsi, l'erreur est « thermostatté » à la valeur cible voulu. Plus la cible est basse plus la simulation sera longue

Transport (Champ externe)



- **Certains compromis à faire**
 - Les charges témoins d'une même distribution devraient suivre la même « ligne de temps », pour pouvoir prendre en compte facilement les phénomènes collectifs (répulsion)
 - C'est l'erreur moyenne d'une distribution de porteurs et non l'erreur pour un porteur qui est considérée
 - Le pas de temps est ajusté pour l'ensemble des charges à l'intérieur d'une distribution

Transport (Diffusion)



- Le deuxième phénomène à prendre en compte est la diffusion
- La marche aléatoire est une méthode de simulation permettant de bien reproduire l'effet de la diffusion.
- Les charges témoins d'une distribution de charge sont déplacées aléatoirement à chaque pas de temps
- L'orientation de ce déplacement est isotropique
- La longueur du déplacement est déterminée aléatoirement selon une distribution gaussienne, dont le paramètre $\sigma^2=6D\Delta t$

Transport (Diffusion)



- Le pas du marcheur aléatoire est obtenu à partir de la solution de l'équation de diffusion, dans un champ uniforme :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \nabla^2 \rho$$

- Pour une distribution de porteur gaussienne, dont la forme :

$$\rho(r, t) = \frac{N}{8(\pi Dt)^{3/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)$$

- On utilise cette solution comme approximation de la situation présente dans la simulation

Transport (Répulsion)



- Pour cet algorithme nous avons voulu intégrer la simulation du processus de répulsion, souvent négligé ou traité de manière simpliste
- Comment calculer l'effet de la répulsion ?
 - Dynamique moléculaire
 - ✦ Très lent (temps de calcul $\propto N^2$)
 - ✦ Plus exact
 - Approximation
 - ✦ Gatti et al.
 - ✦ Autres

Transport (Répulsion)



- Gatti et al.

- On suppose que la répulsion est comme celle subie par une sphère chargée de densité uniforme
- On suppose que la répulsion et la diffusion sont des phénomènes découplés (ce qui est faux !!!)

$$\sigma^2_{total} = \sigma^2_{Repulsion} + \sigma^2_{Diffusion}$$

- On résout :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{E})$$

- On obtient

$$r(t) = \sqrt[3]{\frac{3\mu N e t}{4\pi \epsilon_0 \epsilon_r}}$$

Transport (Répulsion)



- Cherchons une méthode moins naïve :
 - L'équation à résoudre :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \nabla^2 \rho - \mu \vec{\nabla} \cdot (\rho \vec{E})$$

- Posons l'existence d'une solution de la forme :

$$\rho(r, t) = \frac{N}{(2\pi\sigma(t)^2)^{1/2}} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma(t)^2}\right)$$

- Le champ électrique d'une telle distribution peut-être trouvé par le théorème de Gauss (on exploite la symétrie sphérique)

Transport (Répulsion)



- En insérant les expressions pour E et ρ dans l'équation à résoudre....
- En multipliant par r^2 et en intégrant sur le volume...
- On obtient une expression de la forme suivante :

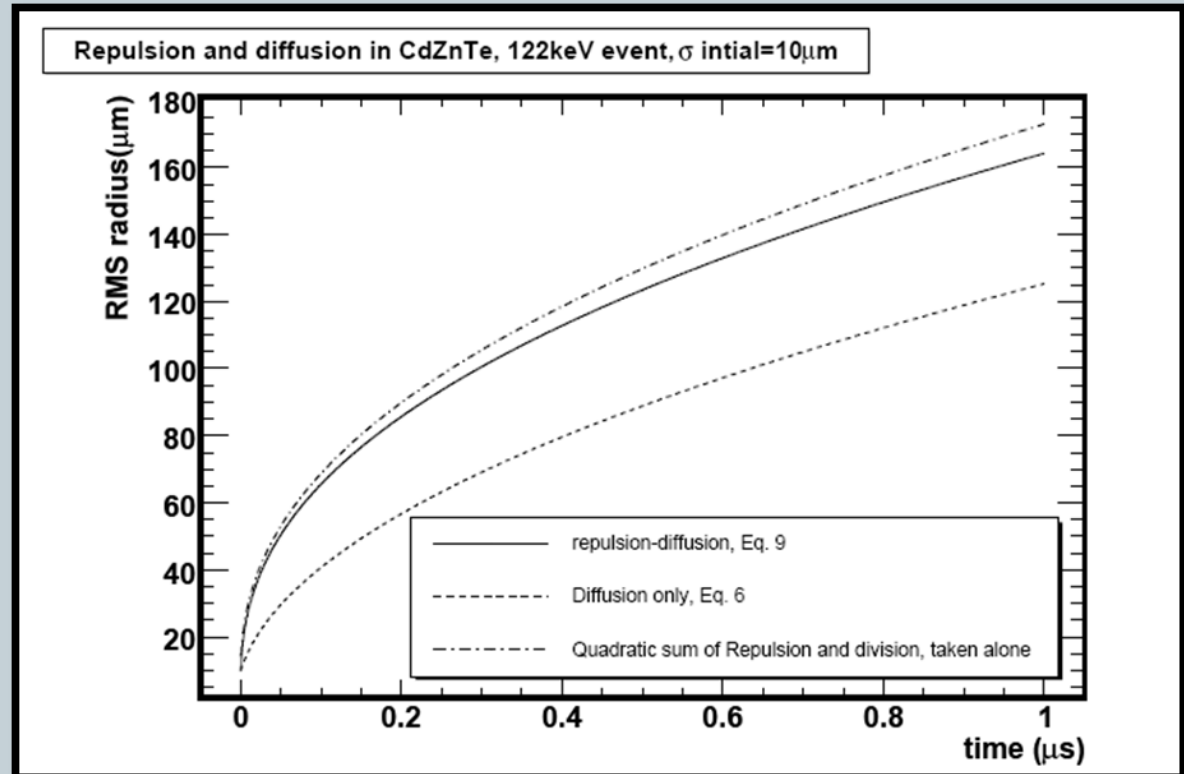
$$\frac{\partial \sigma(t)^2}{\partial t} = 2D + \frac{\mu N e}{12\pi^{3/2}\epsilon_0\epsilon_r\sigma(t)}$$

- On retrouve le cas pour diffusion seulement, plus une correction
- On peut traiter la répulsion comme une marche aléatoire!! (avec un coefficient de diffusion modifié)

Transport (Répulsion)



- On peut calculer a chaque pas d'intégration la taille d'une distribution, σ
- À partir de cela, on calcule le pas du marcheur aléatoire, selon une distribution gaussienne dont le paramètre est déterminé par le coefficient de diffusion corrigé



Transport (Répulsion)



- Poussons le raisonnement plus loin : posons une distribution initiale ellipsoïdale

$$\rho(r) = \frac{3Ne}{4\pi A(t)B(t)C(t)}$$

- On peut étendre le raisonnement de Gatti et al.
 - Séparer les contributions de la répulsion et de la diffusion
 - Sommer quadratiquement les phénomènes

Transport (Répulsion)



- On obtient, pour la partie répulsion seulement, la solution suivante :

$$\frac{\partial A(t)B(t)C(t)}{\partial t} = \frac{\partial V(t)}{\partial t} = \frac{3\mu Ne}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}$$

$$t_0 = \frac{A_0^3}{C_a} \frac{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}{3N\mu e} = \frac{4A_0B_0C_0\epsilon_0\epsilon_r\pi}{3\mu Ne}$$

$$A(t) = C_a \sqrt[3]{\frac{3\mu Ne(t+t_0)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}$$

$$B(t) = C_b \sqrt[3]{\frac{3\mu Ne(t+t_0)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}$$

$$C(t) = C_c \sqrt[3]{\frac{3\mu Ne(t+t_0)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}}$$

$$C_a C_b C_c = 1$$

$$C_a = \frac{A_0}{\sqrt[3]{A_0 B_0 C_0}}$$

$$C_b = \frac{B_0}{\sqrt[3]{A_0 B_0 C_0}}$$

$$C_c = \frac{C_0}{\sqrt[3]{A_0 B_0 C_0}}$$

- En assemblant le tout, on peut obtenir la solution

$$\frac{\partial(\sigma_x(t)^2)}{\partial t} = \frac{\sigma_x(t)eN\mu}{10\sqrt{5}\sigma_y(t)\sigma_z(t)\pi\epsilon_0\epsilon_r}$$

Transport (Répulsion)

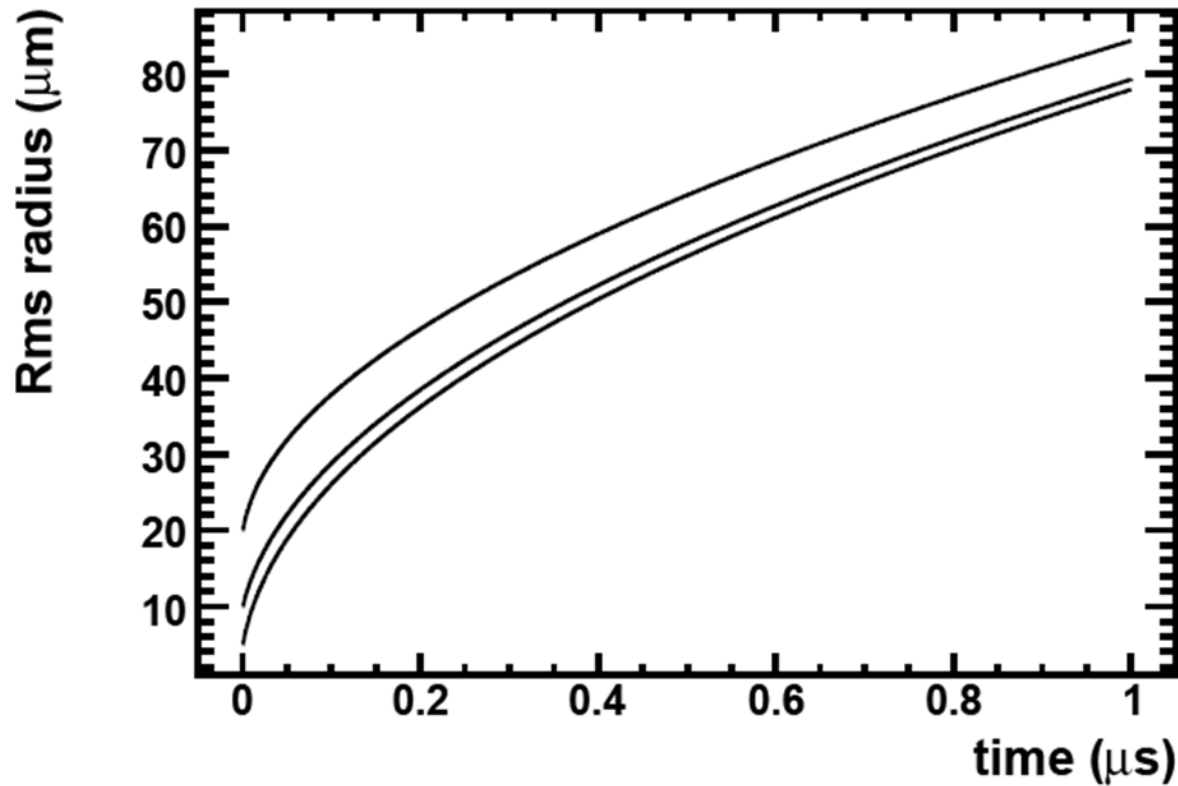


- En combinant cette solution avec la solution classique pour une distribution de charge ellipsoïdale gaussienne, on peut obtenir le vecteur coefficient de diffusion suivant :

$$\vec{D} = \left(D + \frac{\sigma_x e N \mu}{20\sqrt{5}\sigma_y\sigma_z\pi\epsilon_0\epsilon_r}, D + \frac{\sigma_y e N \mu}{20\sqrt{5}\sigma_x\sigma_z\pi\epsilon_0\epsilon_r}, D + \frac{\sigma_z e N \mu}{20\sqrt{5}\sigma_x\sigma_y\pi\epsilon_0\epsilon_r} \right)$$

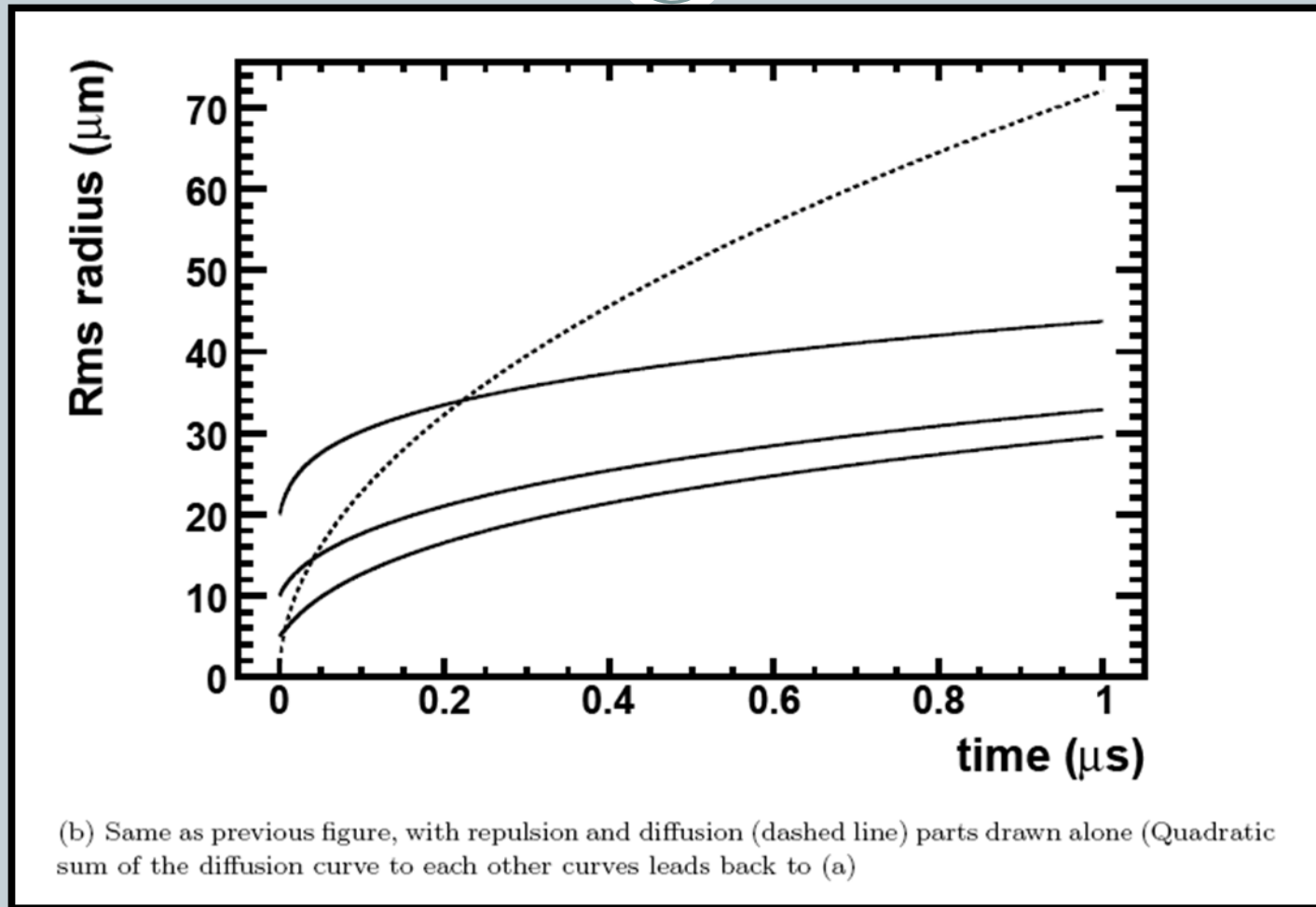
- On peut utiliser ce coefficient comme coefficient de la marche aléatoire pour y inclure l'effet de la répulsion

Transport (Répulsion)



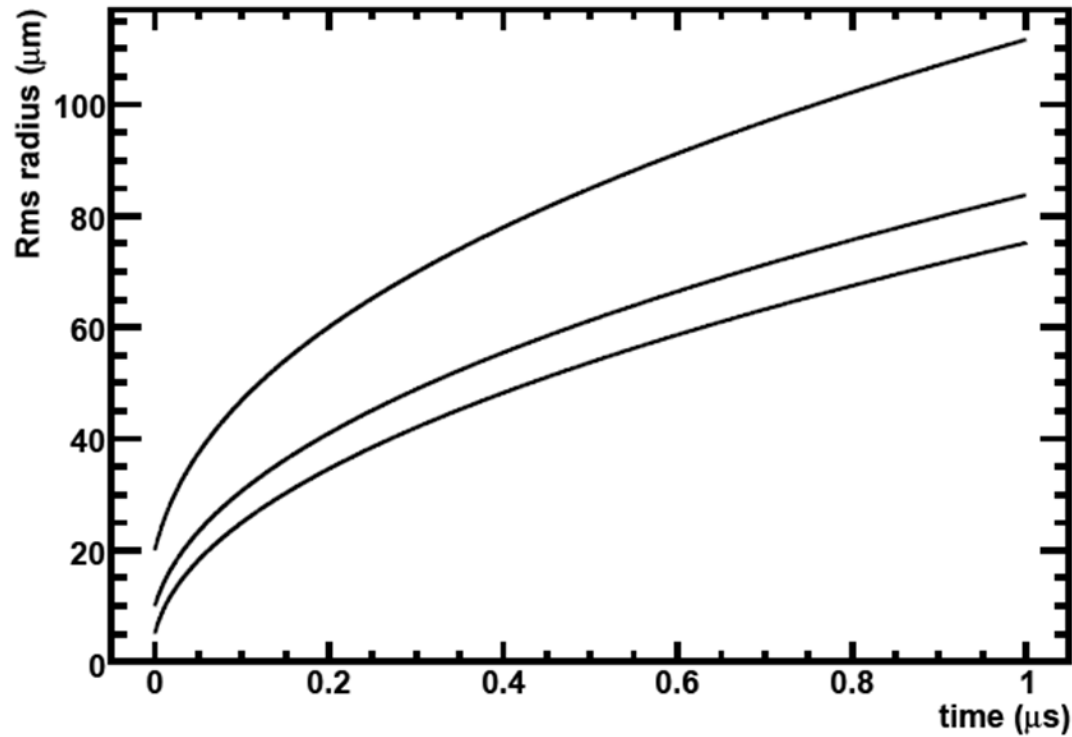
(a) RMS radius in x,y and z for repulsion-diffusion using (29) , with $E_{deposited}=122\text{keV}$, for $\sigma_x = 5\mu\text{m}$, $\sigma_y = 10\mu\text{m}$ and $\sigma_z = 20\mu\text{m}$ at $t=0$

Transport (Répulsion)



Couplage répulsion-diffusion

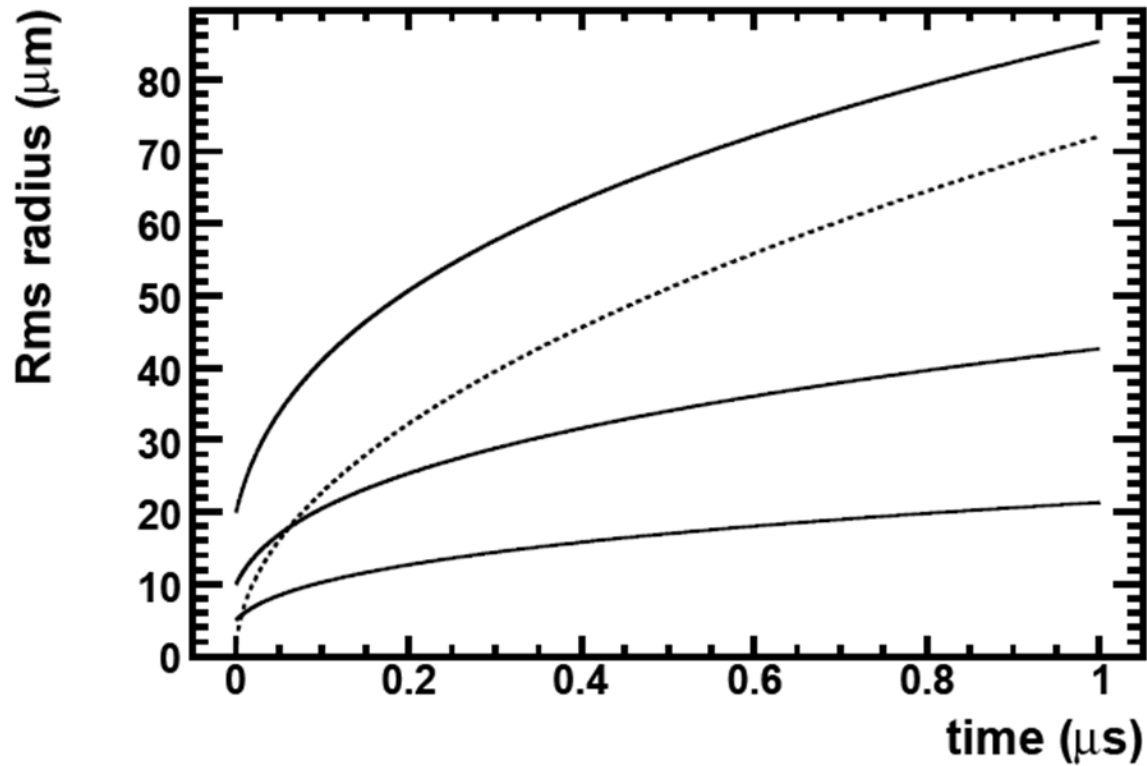
Transport (Répulsion)



(a) RMS radius in x,y and z for repulsion-diffusion using quadratic sum of (7) and (16),(17) (18), with $E_{deposited}=122\text{keV}$, for $\sigma_x = 5\mu\text{m}$, $\sigma_y = 10\mu\text{m}$ and $\sigma_z = 20\mu\text{m}$ at $t=0$

Sans couplage répulsion-diffusion

Transport (Répulsion)



(b) Same as previous figure, with repulsion and diffusion (dashed line) parts drawn alone

Fig. 3. Classic model of repulsion-diffusion in semiconductors

Sans couplage répulsion-diffusion

Piégeage-dépiégeage



- Le dernier processus à inclure dans les simulations est le phénomène du piégeage et du dépiégeage
- Chaque charge-témoin a une probabilité de tomber dans un type de piège (i)

$$P_i = \frac{\frac{1}{\tau_i}}{\sum 1/\tau_i}$$

- La charge tombe dans le piège après un temps t , déterminé aléatoirement selon :

$$P(t) = \frac{1}{\tau_i} \exp \frac{t}{\tau_i}$$

Piégeage-dépiégeage



- La charge sort du piège après un temps t , aussi déterminé aléatoirement selon :

$$P(t) = \frac{1}{\tau_i} \exp \frac{t}{\tau_i}$$

- On peut inclure un nombre arbitraire de pièges et les caractériser par leurs temps de piégeage et de dépiégeage
- A chaque pas de temps, on vérifie l'état de chaque charge témoin, et le change si nécessaire.
- Des corrections sont faites pour les charges piégeant ou dépiégeant trop tard

Charge induite



- La charge induite sur une électrode k par un ensemble de charges $i= 1,2,3,\dots$ en mouvement sur une trajectoire est calculé grâce au théorème de Ramo

$$Q_k = \sum_i q_i \phi_k(\vec{r}_{i\,final}) - \sum_i q_i \phi_k(\vec{r}_{i0})$$

- Le potentiel de pondération ϕ_k est calculé en maintenant l'électrode k à 1V et les autres à 0V et en résolvant l'équation de Poisson dans la géométrie

Charge induite



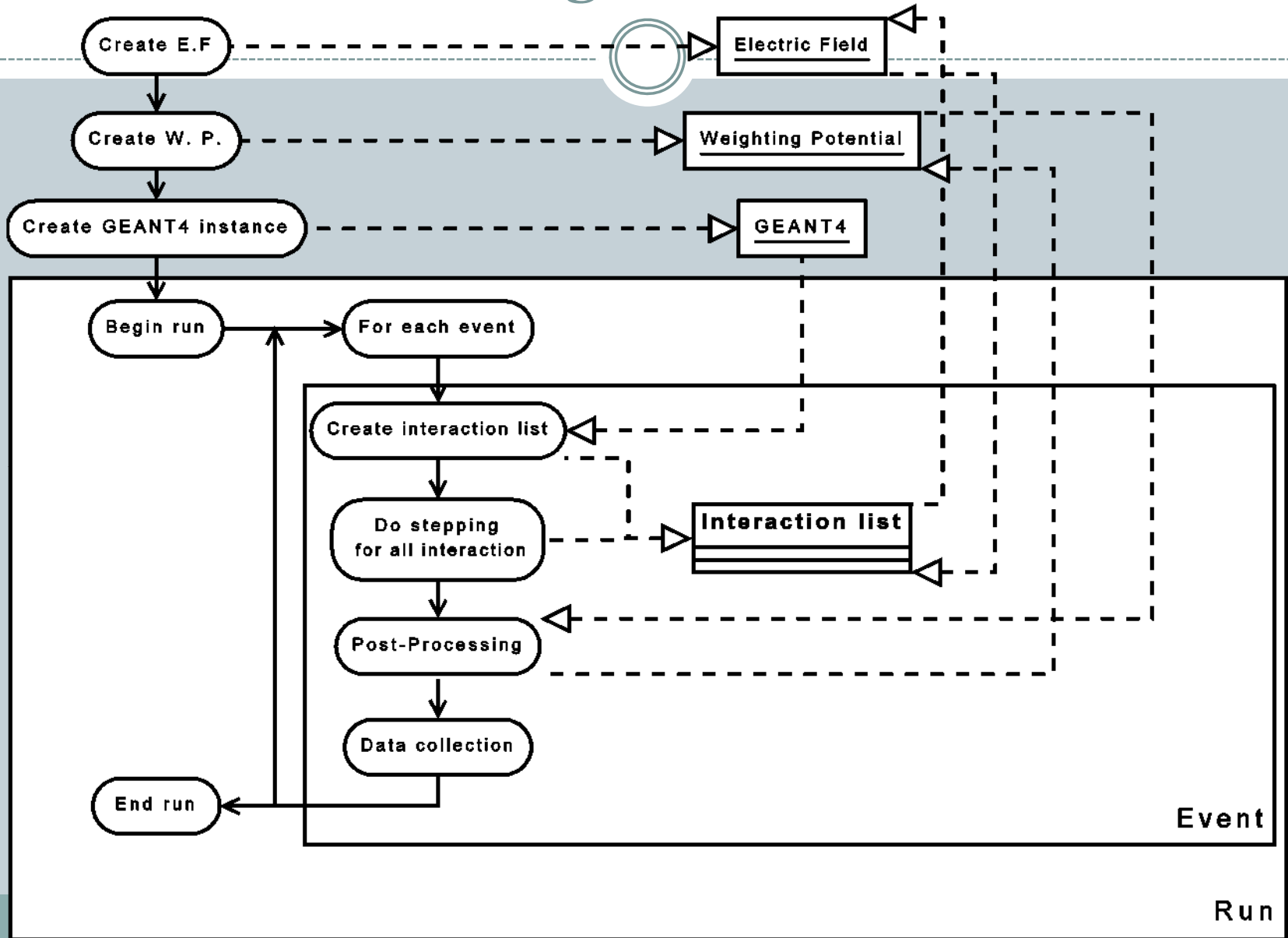
- On calcule le potentiel de pondération de la même manière que le champ électrique (Comsol multiphysics)
- On extrait la solution aux points d'une grille tridimensionnelle à pas fixe
- On retrouve le potentiel à un point quelconque par interpolation trilinéaire à partir de la valeur du potentiel des plus proches voisins du point contenus dans la grille
- Méthode rapide et efficace, indépendante du nombre de points extraits de la solution FEM

L'algorithme

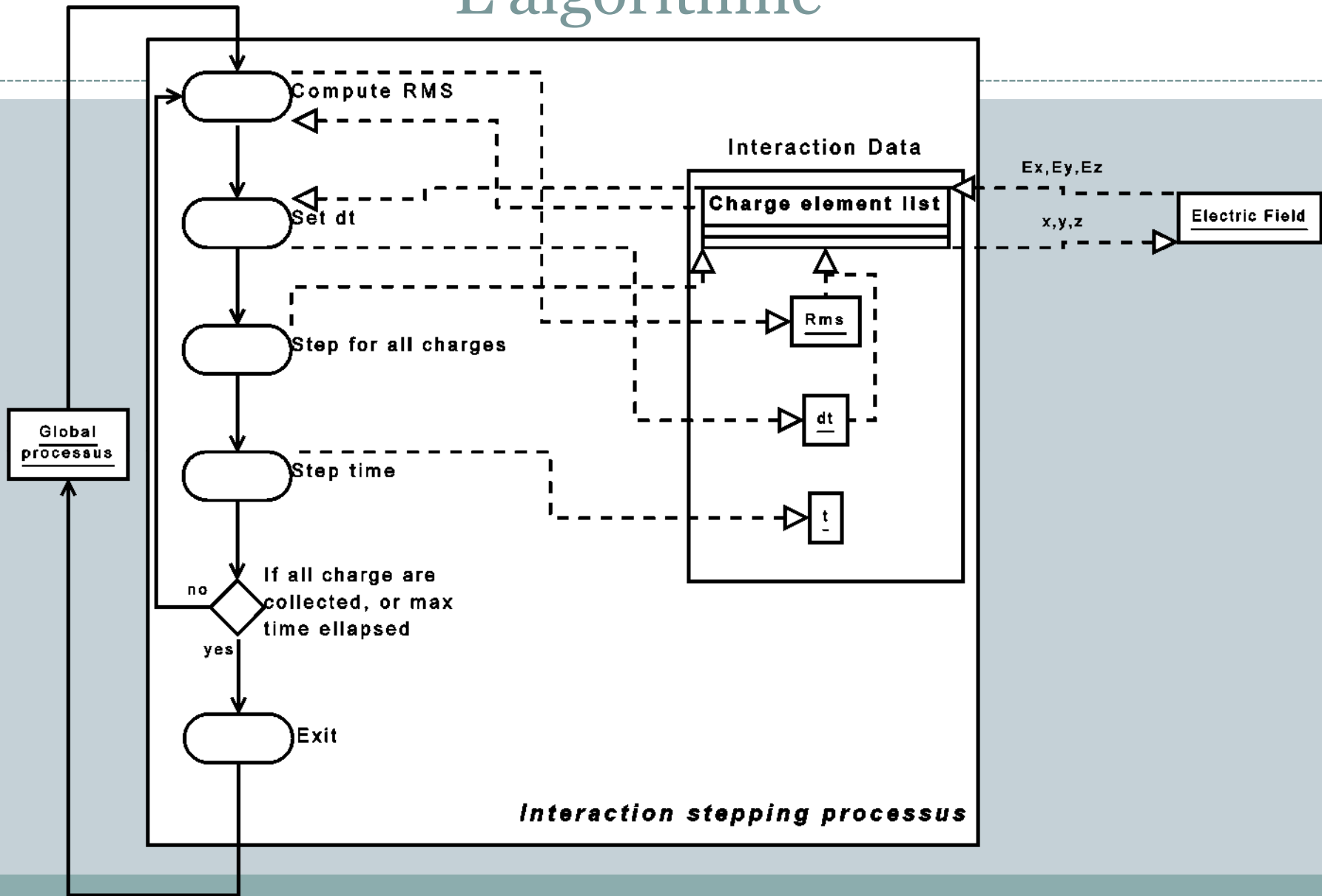


- L'algorithme final assemble les différents processus pour créer un évènement Monte-Carlo
- On peut répéter des milliers de fois le processus et accumuler des statistiques sur les événements
- On peut comparer les résultats avec les performances du détecteur dans des situations de mesure réelles

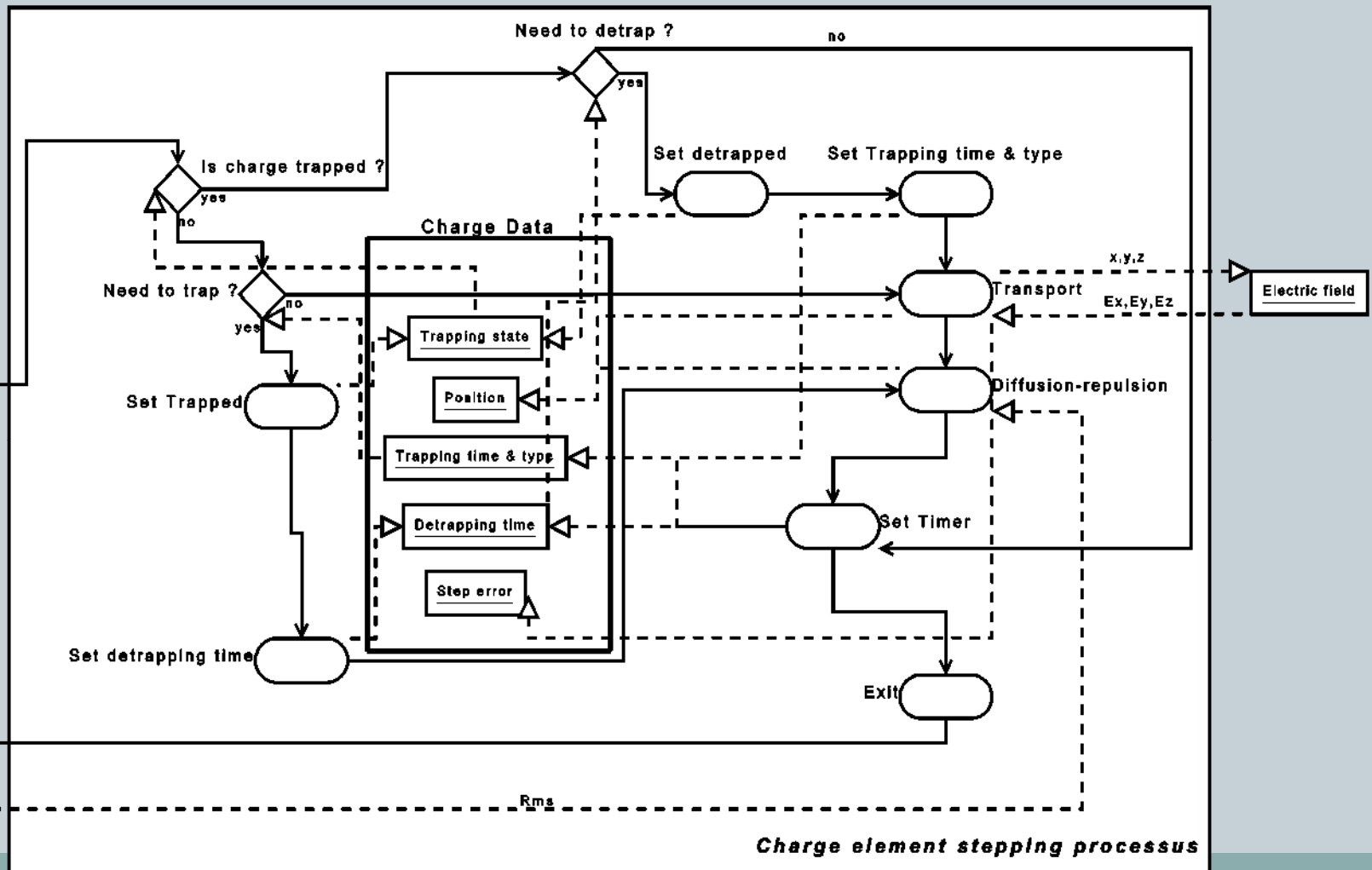
L'algorithme



L'algorithme



L'algorithme



Le résultat



- On obtient un algorithme pouvant simuler un grand nombre d'évènements
- Un algorithme pouvant accepter plusieurs sources de champ électrique et de potentiel de pondération
- Adaptable à plusieurs géométries
- Entièrement orienté objet
- Peut fonctionner pour plusieurs matériaux comme le Silicium ou le Germanium

Un exemple

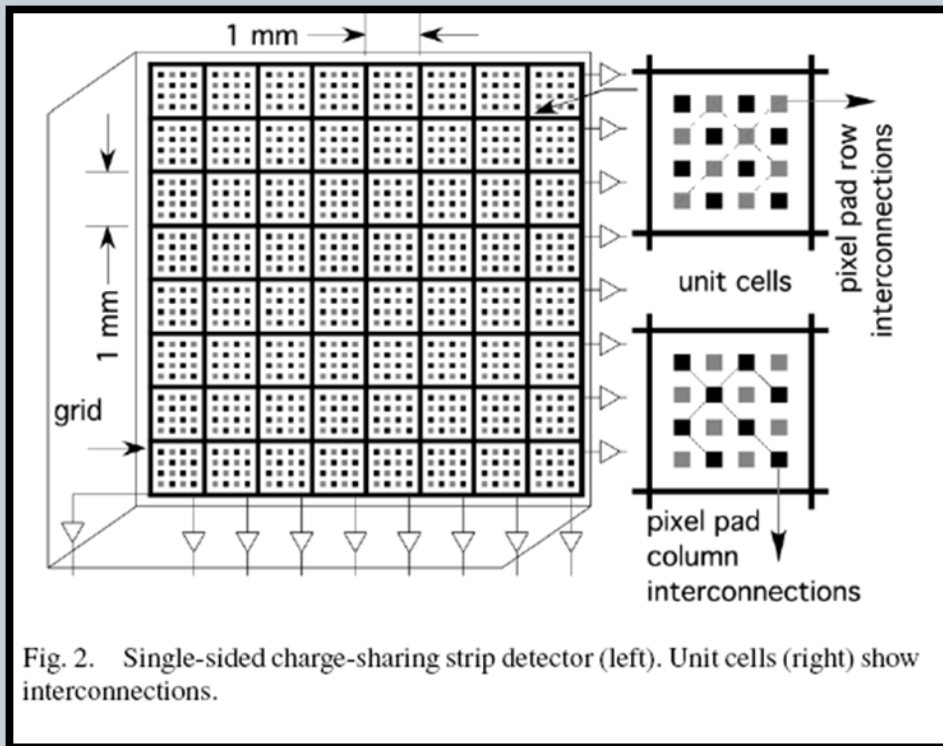
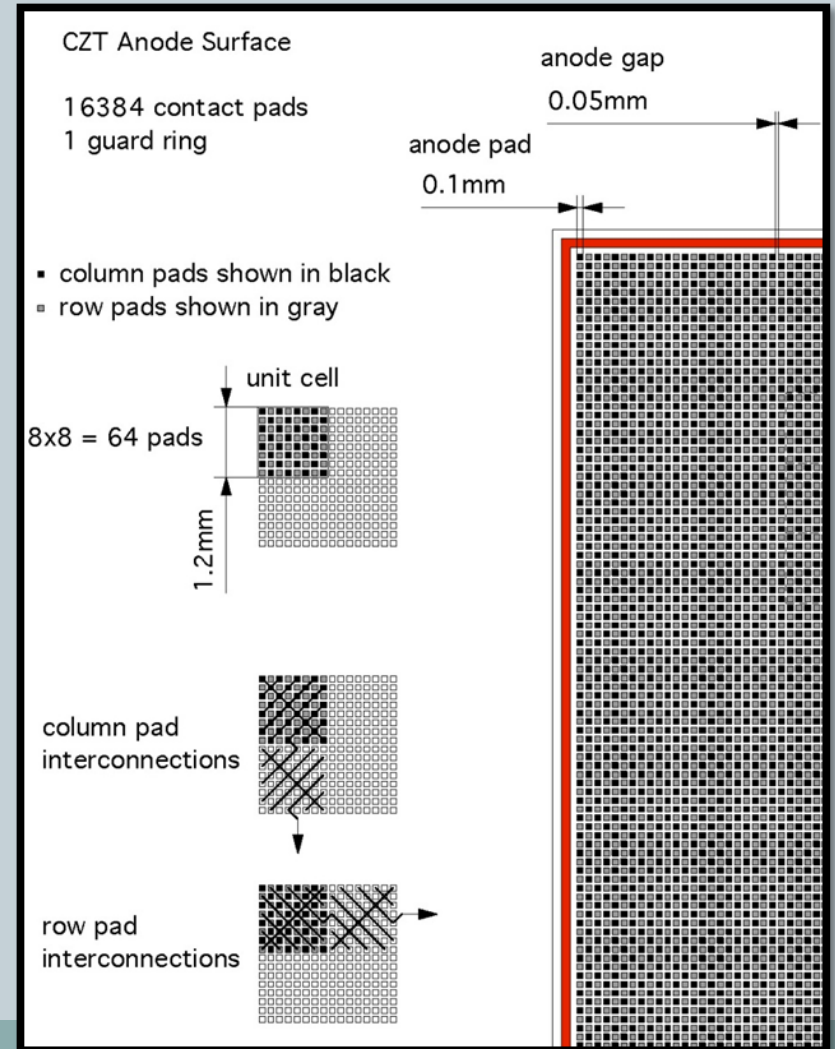
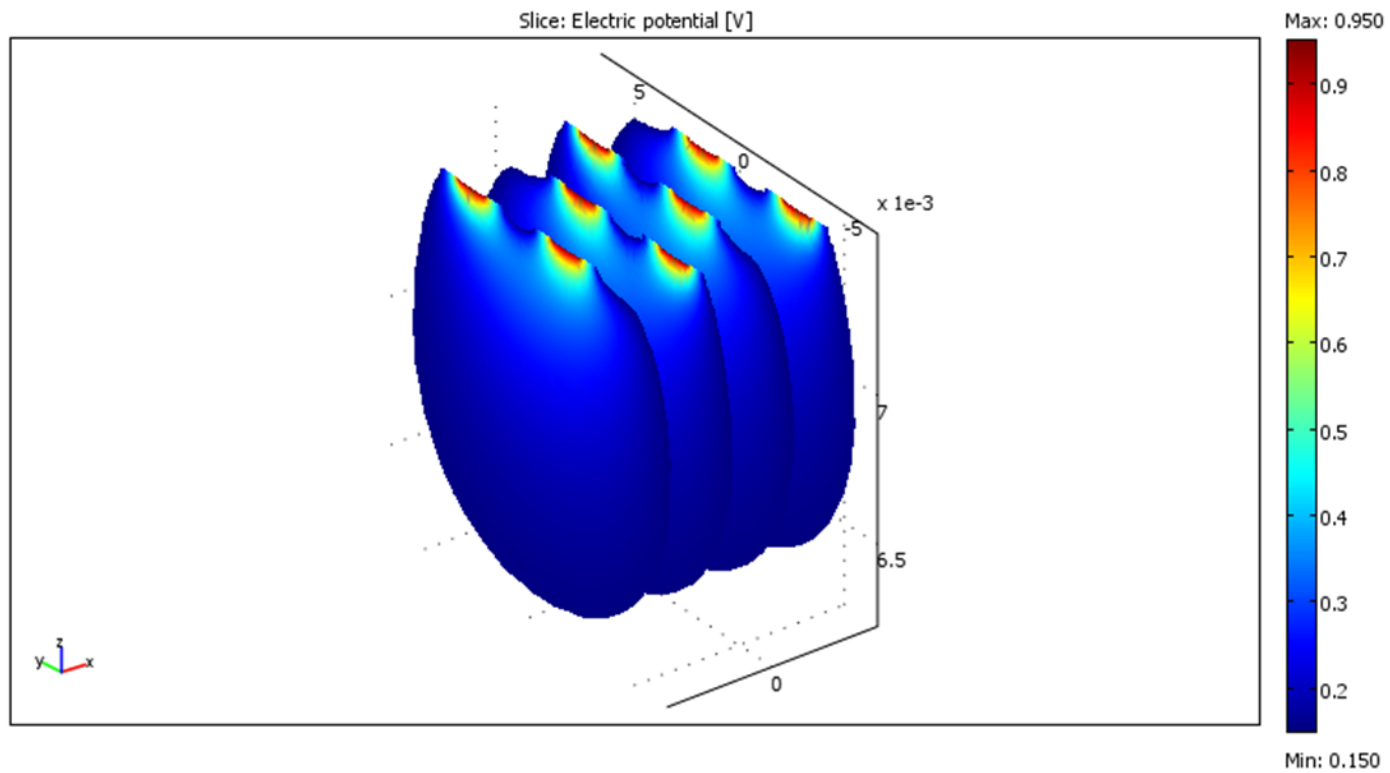


Fig. 2. Single-sided charge-sharing strip detector (left). Unit cells (right) show interconnections.



Potentiel de pondération



La simulation



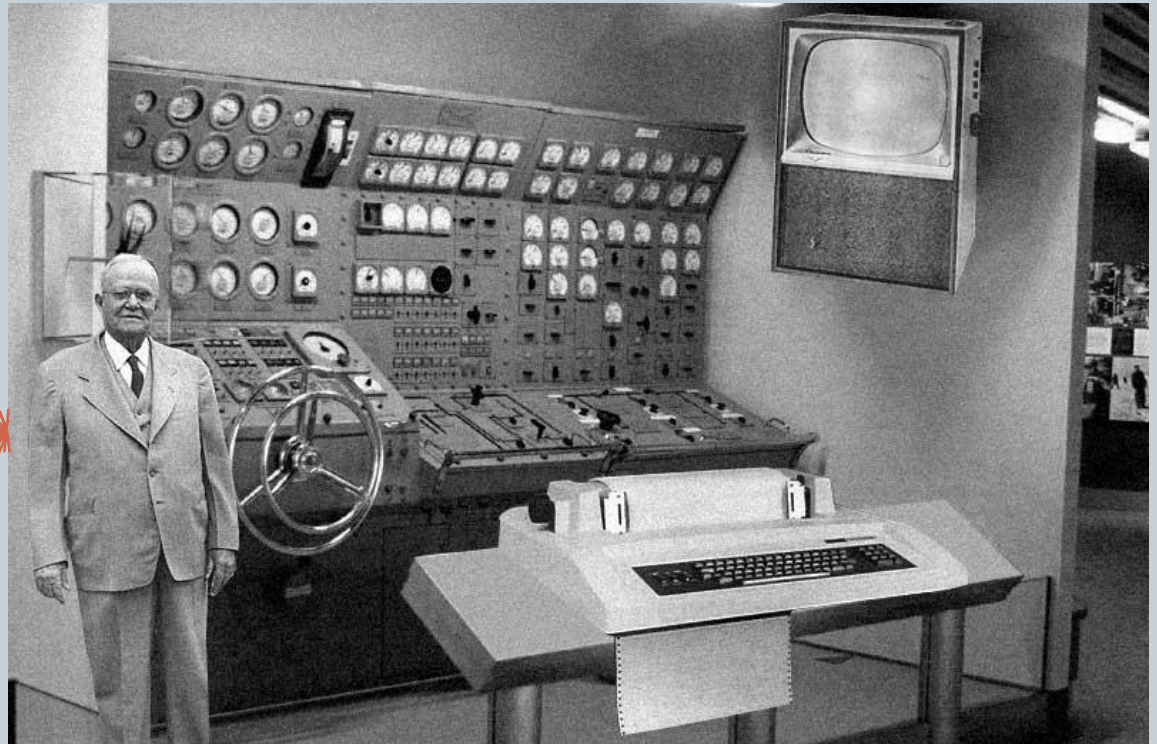
Géométrie et
physique
GEANT4

Potentiel de
Pondération

Champ
électrique

Constantes
physiques

Paramètres de
précision



Scientists from the RAND Corporation have created this model to illustrate how a "home computer" could look like in the year 2004. However the needed technology will not be economically feasible for the average home. Also the scientists readily admit that the computer will require not yet invented technology to actually work, but 50 years from now scientific progress is expected to solve these problems. With teletype interface and the Fortran language, the computer will be easy to use and only

La simulation



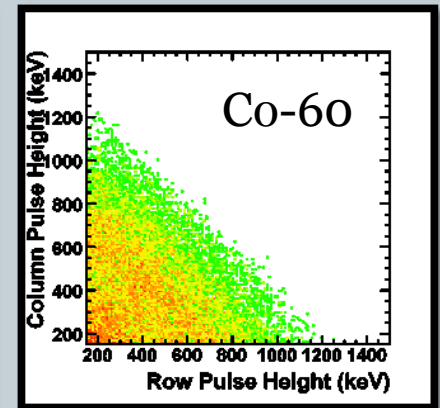
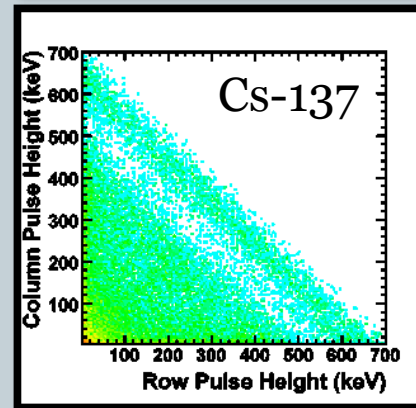
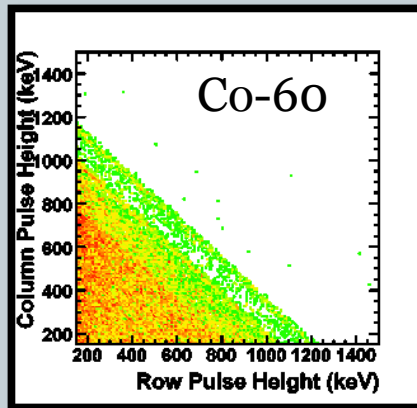
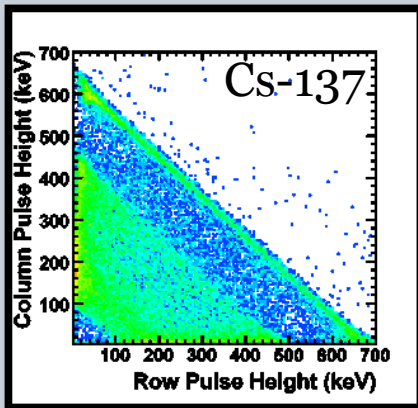
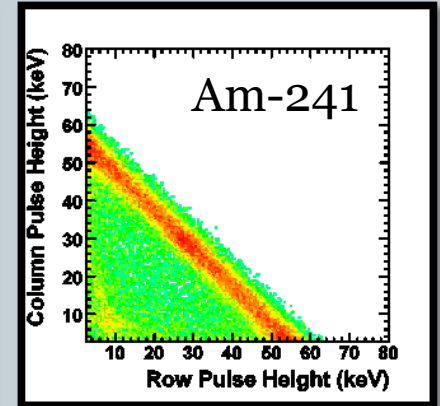
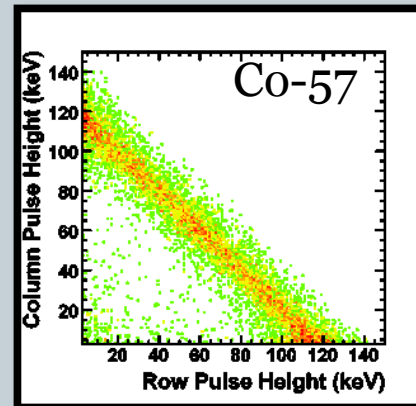
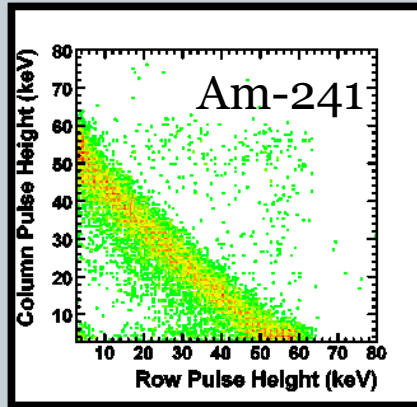
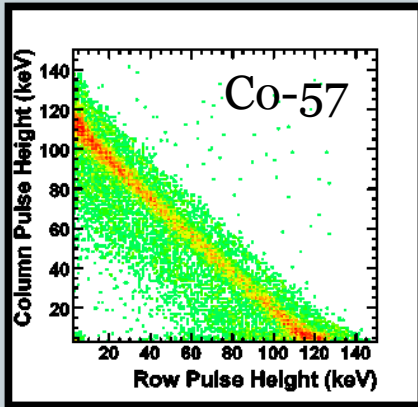
- On a simulé le passage de milliers de photons dans les détecteurs, et lu la charge induite dans chaque bande
- L'énergie des photons était distribuée pour reproduire le spectre de sources telles que le Co-57 ou l'Am-241
- On peut comparer les résultats du prototype 1 avec les résultats expérimentaux

La simulation

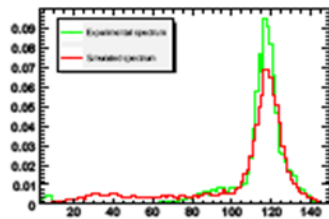


Mesure

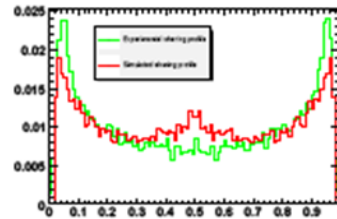
Simulation



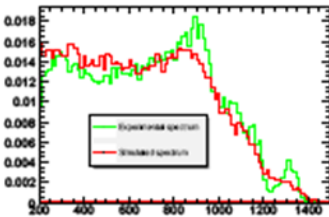
La simulation



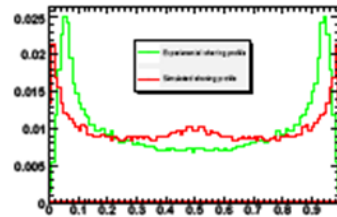
(a) Co57, simulated and experimental spectrum for 225 μ m model, correlation = 0.97



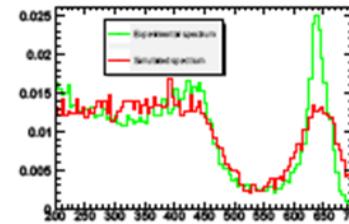
(b) Co57, simulated and experimental sharing profile for 225 μ m model, correlation=0.84



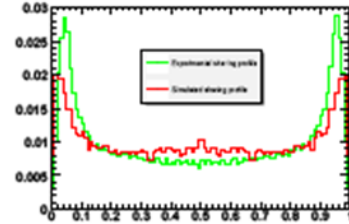
(c) Co60, simulated and experimental spectrum for 225 μ m model, correlation = 0.34



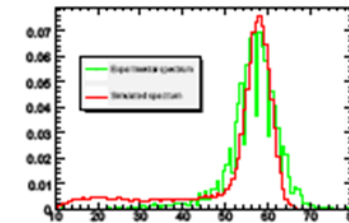
(d) Co60, simulated and experimental sharing profile for 225 μ m model, correlation=0.37



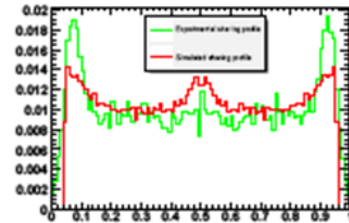
(e) Cs137, simulated and experimental spectrum for 225 μ m model, correlation = 0.985



(f) Cs137, simulated and experimental sharing profile for 225 μ m model, correlation=0.81



(g) Am241, simulated and experimental spectrum for 225 μ m model, correlation = 0.90



(h) Am241, simulated and experimental sharing profile for 225 μ m model, correlation=0.709

La simulation

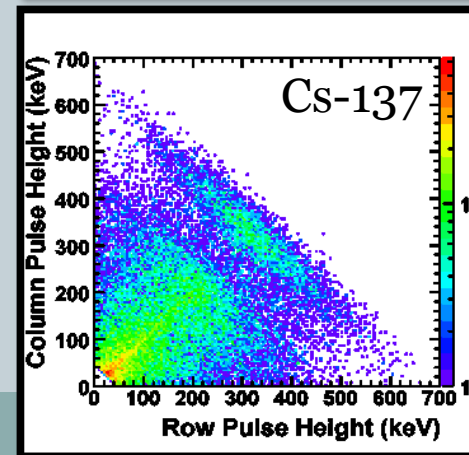
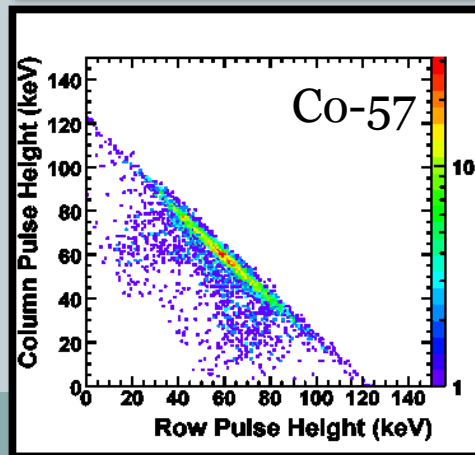
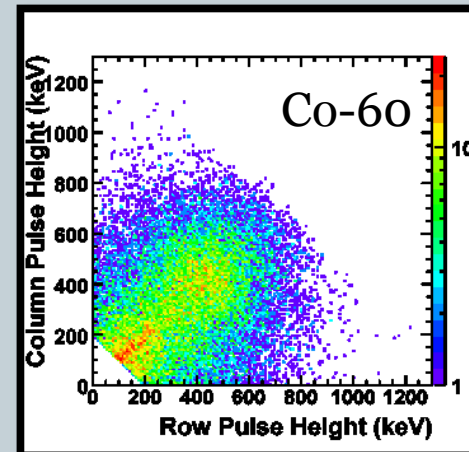
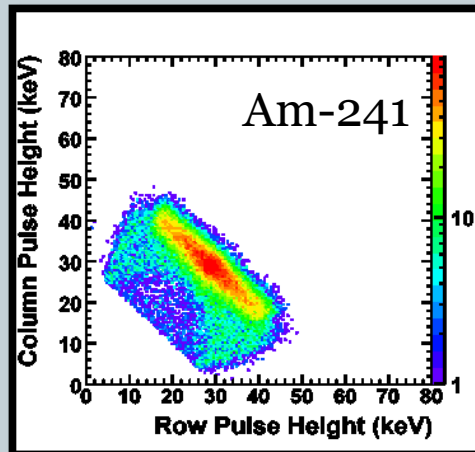


- Des réussites :
 - Bonnes prédictions du partage selon l'énergie pour une simulation non calibrée au détecteur mesuré
 - ✦ Mobilité, coefficient de diffusion, résistivité, sources, etc....
 - Résolution en énergie bien prédite
- Des points à améliorer :
 - On doit mieux reproduire la structure fine à toutes les énergies
 - De nombreuses corrections peuvent être faites à l'algorithme pour le rendre plus rapide et éliminer des sources d'erreur.

Les prédictions



- Même paramètres, mêmes simulations, prototype envisagé
- Seuls le champ électrique et le potentiel de pondération ont changé



Conclusion



- On a assemblé un code C++ , orienté objet, permettant la simulation par la méthode de Monte-Carlo du partage de charge dans un détecteur
- L'algorithme inclut le dépôt d'énergie (GEANT4), un champ électrique réaliste, l'effet de piégeage dépiégeage, la diffusion, la répulsion
- Peut-être adapté à plusieurs géométries d'électrode et plusieurs matériaux
- Structure intuitive, conçue pour évoluer et être transmise (à de nouveaux thésards!)

Bonne St-Jean-Baptiste !!



Fête nationale du Québec !