

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

Université de Blida 1
Département de Physique

MÈMOIRE

présentée pour obtenir Master

En Physique des Rayonnements

par

Khadidja BELHACEM

sous la direction du Mr. Ould Mohamed Mounir

**Conception et Modélisation des Détecteurs $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$
Par le Code Geant4**

soutenue le 14-07-2021

Devant :

Mr. Aidouni Ahmed Amine	Président	MCB	Université de Blida 1
Mr. Louas Mustapha	Examineur	MCB	Université de Blida 1
Mr. Ould Mohamed Mounir	Promoteur	MCB	Université de Blida 1

Remerciements

Je tiens en premier lieu à exprimer toute ma gratitude à mon encadreur Mr OULD MOHAMED Mounir Sidi Mohamed maître de conférences classe B à l'université de Blida 1, pour avoir accepté de diriger ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer mon travail. Merci à Mr Aidouni Ahmed Amine maître de conférences classe B à l'université de Blida 1, pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury. Je remercie également Mr Laous Mustapha maître de conférences classe B à l'université de Blida 1, d'avoir accepté de juger ce travail.

je remercie chaleureusement toute l'équipe pédagogique de spécialité notamment Mr Chikirine, Mr. Khelifi.

Je remercie spécialement Mme boukhalfa pour ces précieux conseils dont j'ai bénéficié.

Je remercie également tous mes collègues du master 2 : Mr.Braikia, Mme Kord et Mme. Hamaidi pour leurs aides, leurs encouragements pendant les 5 ans de mes études.

Merci à ma famille qui m'a encouragé tout au long de cette période.

Je voudrais remercier tous ceux qui ont participé de l'aboutissement de ce travail.

Résumé

Dans ce travail, on c'est amené l'étude de la fonction de réponse de deux détecteurs à scintillation de taille similaire : ($2'' \times 2''$) $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$. L'efficacité de détection des photons et la courbe de résolution en énergie ont été réalisés par le code Geant4 dans la gamme d'énergie gamma de 30 keV à 1500 keV. La comparaison des résultats de Geant4 avec celles de l'expérience et de MCNP-X montrent un bon accord permettant la validation du modèle de calcul Monte Carlo pour le détecteur $NaI(Tl)$ contrairement au détecteur $LaBr_3(Ce)$ dont les résultats obtenus par le code Geant4 est loin des résultats expérimentaux.

Mots-clés

Spectrométrie gamma, $NaI(Tl)$, $LaBr_3(Ce)$, Monte-Carlo, Geant4.

Abstract

This work relates to the study of the response function of two scintillation detectors with similar size : ($2'' \times 2''$) $NaI(Tl)$, $LaBr_3(Ce)$. The photon detection efficiency and energy resolution curve were measured for the $NaI(Tl)$ and $LaBr_3(Ce)$ detectors in the gamma energy range from 30 keV to 1500 keV. The comparison of the results of Geant4 with those of the experimental and of MCNP-X showed a good agreement allowing the validation of the computational model for the $NaI(Tl)$ detector against $LaBr_3(Ce)$ because of the restricted computational efficiency provided by Geant4.

Keywords

Gamma spectrometry, Geant4, Monte-Carlo, $NaI(Tl)$, $LaBr_3(Ce)$.

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Introduction Générale	1
1 Interaction Photon-Matière et Moyens de Mesures	3
1.1 Généralités sur la radioactivité	3
1.1.1 Définition	3
1.1.2 Types d'émissions radioactives	3
1.1.2.1 Émission des particules chargées	4
1.1.2.2 Émission des rayonnements électromagnétiques (Désexcitation γ)	5
1.1.2.3 Émission des neutrons	6
1.2 Interaction rayonnement-matière	6
1.2.1 Interaction photon-matière :	6
1.2.1.1 Effet photoélectrique	7
1.2.1.2 Diffusion Compton	8
1.2.1.3 Création de paire	9
1.2.1.4 Diffusion Rayleigh	11
1.2.1.5 Diffusion Thomson	11
1.2.2 Interaction électrons matière	11
1.3 Détection γ	12
1.3.1 Détecteurs à scintillation	12
1.3.1.1 Scintillateur	12
1.3.1.2 Matériaux de détecteur de scintillateur	13
1.3.1.3 Photomultiplicateur	14
1.3.1.4 Les caractéristique générales de détecteur	15
1.3.1.5 Chaîne de spectrométrie γ et ses différentes composantes	17

2 Outil de simulation Monte-Carlo	19
2.1 Modélisation par la méthode Monte Carlo	19
2.1.1 Transport de particules	19
2.2 Geant4	20
2.2.1 Utilisation de Geant4	22
2.2.2 Processus et modèles physiques dans Geant4	24
2.2.2.1 Modèles électromagnétiques	26
2.2.2.2 Modèles hadroniques	26
3 Résultats et Discussion	28
3.1 Interaction photon γ -scintillateur	28
3.1.1 Géométrie des détecteurs	28
3.1.2 Particules primaires et processus physiques	30
3.2 La résolution en fonction de l' énergie	31
3.3 Spectres d'énergie des rayons γ	33
Conclusion Générale	41
Bibliographie	42
A Annexe A Géométrie du détecteur NaI(Tl) avec Geant4	45

Table des figures

1.1	Désintégration bêta du Co[1].	5
1.2	Désintégration bêta du Cs[2].	5
1.3	Les trois principaux mécanismes d'interaction des photons avec la matière[3]	7
1.4	Illustration de l'effet photoélectrique[6]	8
1.5	Le mécanisme de la diffusion Compton[8]	9
1.6	Le mécanisme de création de paire[10]	10
1.7	Structure des bandes dans un scintillateur et principe de fonctionnement[11]	13
1.8	Illustration du fonctionnement d'un photomultiplicateur[12]	14
1.9	Compter les pertes selon le modèle paralysable et non paralysable [13]	16
1.10	Introduction à la mesure de résolution d'un détecteur[11]	17
1.11	Chaîne de spectrométrie gamma[14]	18
2.1	Structure générale du code Geant4, chaque case illustre une catégorie de classes[16].	23
2.2	Architecture minimale d'un code de simulation dans Geant4	25
2.3	Domaine d'application des modèles composant quelques physics liste de Geant4, pour les interactions d'un hadron avec la matière en fonction de son énergie incidente	27
3.1	Structure des détecteurs 2" x 2" (NaI(Tl) et LaBr ₃ (Ce)) considérés en simulation MC.	29
3.2	Visualisation en 3D de la géométrie du détecteur simulé par Geant4.	29
3.3	Visualisation par Geant4 de l'interaction d'un faisceau des photons avec : (a) NaI(Tl), (b) LaBr ₃ (Ce).	30
3.4	Diagramme des valeurs de la résolution en fonction de l'énergie gamma.[22] .	32
3.5	Spectre élargie du Césium-137	32
3.6	Spectre ¹³⁷ Cs, Expérimentale et MCNP-X et Geant4.	33
3.7	Rendement de spectre ⁶⁰ Co, Geant4 et MCNP-X pour le détecteur NaI(Tl).	34
3.8	Rendement de spectre ⁶⁰ Co, Geant4 et MCNP-X pour le détecteur LaBr ₃ (Ce).	35
3.9	Spectre ²⁴¹ Am obtenu par le code Geant4 pour les deux détecteurs : LaBr ₃ (Ce) et NaI(Tl).	36
3.10	Spectre ¹³³ Ba obtenu par le code Geant4 pour les deux détecteurs : NaI(TL) et LaBr ₃ (Ce).	37

3.11 Rendement de spectre ^{60}Co obtenu par le code Geant4 pour NaI(Tl) et $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	37
3.12 Les courbes d'efficacité Expérimentale et MCNP-X qui là été rapporter dans (Casanova et al.,2012) comparée à l'efficacité de Geant4 du détecteur NaI(Tl) .	39
3.13 Les courbes d'efficacité Expérimentale et MCNP-X qui là été rapporter dans (Casanova et al.,2012) comparée à l'efficacité de Geant4 du détecteur $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.	40

Liste des tableaux

3.1	Les densités des matériaux utilisés dans la simulation MC[21]	28
3.2	Les valeurs des coefficient a,b,c	31
3.3	Les caractéristiques des sources radioactives utilisés dans la simulation MC.	34
3.4	Les valeurs d'efficacités pour les deux détecteurs pour la source ^{60}Co	35
3.5	Les valeurs d'efficacités pour les deux détecteurs pour la source ^{241}Am	38
3.6	Les valeurs d'efficacités pour les deux détecteurs pour la source ^{133}Ba	38

Introduction Générale

La spectrométrie γ est l'une des techniques d'analyse les plus utilisées dans le domaine de la mesure nucléaire, c'est une technique qualitative et quantitative non destructive qui se base sur les interactions des rayons γ émis spontanément par les radioéléments contenants dans un échantillon à analysé avec un détecteur, ces interactions se traduisent par un dépôt d'énergie total ou partiel. A partir du spectre enregistré, il est possible de remonter à la nature et l'activité du radioélément présent dans le échantillon.

La qualité de mesure par cette technique dépend essentiellement du capacité du détecteur de détecter des raies peu intenses (efficacité) et de séparer des raies très proches en énergie (résolution). On distingue trois grandes familles de spectromètres gamma qui sont :

- Détecteur à scintillation.
- Détecteur à semi-conducteur.
- Détecteur à gaz.

Dans ce présent travail de mémoire nous intéressons particulièrement à l'étude de la réponse des détecteurs à scintillation aux rayons γ plus précisément le détecteur $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$ par la méthode Monte-Carlo.

Ce manuscrit est scindé en trois chapitres :

- Le premier chapitre est dédié à la présentation des différents mécanismes d'interactions des photons avec la matière et le principe de détection des rayonnements par les détecteurs à scintillation.
- Le second chapitre illustre le code de simulation Monte Carlo Geant4.
- Le troisième chapitre, contient les résultats de notre étude

Enfin notre manuscrit sera achevé par une conclusion générale qui résume notre travail et les perspectives.

Interaction Photon-Matière et Moyens de Mesures

Dans ce chapitre nous présentons en premier lieu les différents mécanismes d'interaction du rayonnement avec la matière. En second lieu nous focalisons sur les principes de la spectroscopie. Finalement la troisième partie sera consacrée à la description des détecteurs à scintillateur.

1.1 Généralités sur la radioactivité

1.1.1 Définition

La désintégration radioactive est le phénomène de la transformation spontanée d'un noyau atomique instable X en un autre noyau Y , en émettant un rayonnement nucléaire, avec un changement de l'un des trois valeurs : le nombre massique A , le nombre atomique Z , ou le niveau d'énergie nucléaire. Le noyau instable, peut avoir plusieurs transformations avant d'arriver à un noyau stable. On parle alors de chaîne de désintégration.

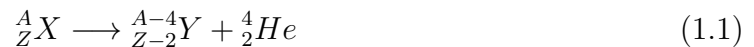
1.1.2 Types d'émissions radioactives

Les émissions radioactives peuvent donner lieu soit à :

- Des particules chargées (rayonnements α , β , ...etc.).
- Des rayonnements électromagnétiques (rayonnement γ , rayon X).
- Des neutrons

1.1.2.1 Émission des particules chargées

- La radioactivité alpha : La particule émise est un noyau d'hélium :



Cette radioactivité a été la première à être mise en évidence; elle n'a lieu que si le nombre atomique du noyau est supérieur au nombre magique 82. L'émission est suivie d'émission γ .

- La radioactivité bêta : La radioactivité bêta, concerne les noyaux instables riches en neutrons ou en protons. Le noyau émet un électron négatif, ou positif, et donne un noyau produit qui est un isobare du noyau initial. Cette radioactivité est possible quelle que soit la valeur du nombre atomique.

Radioactivité β^- :



Radioactivité β^+ :



$\bar{\nu}_e$ et ν_e sont un antineutrino et un neutrino, ont des masses et des charges nulles mais des spins égales à un demi. Après cette transformation le noyau se trouve quelque fois dans un état instable, il se désexcite en émettant un ou plusieurs γ selon :

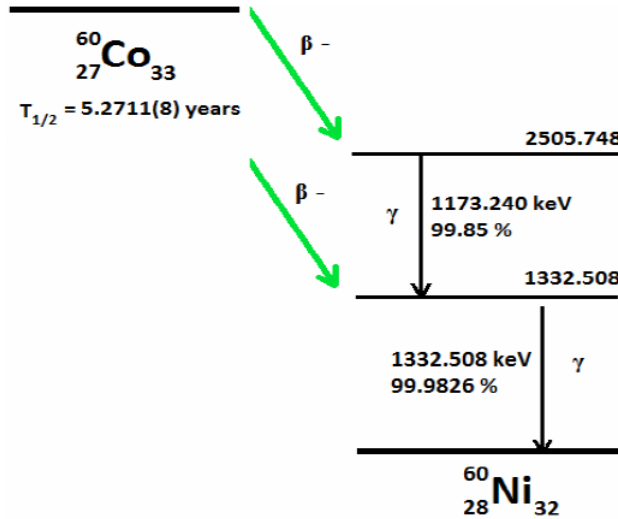


FIGURE 1.1 – Désintégration bêta du Co[1].

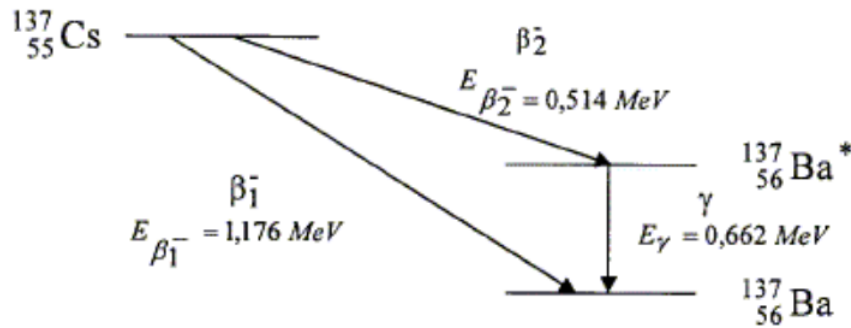


FIGURE 1.2 – Désintégration bêta du Cs[2].

1.1.2.2 Émission des rayonnements électromagnétiques (Désexcitation γ)

Le rayonnement γ est une onde électromagnétique énergétique d'origine nucléaire. Un noyau est excité lorsque de l'énergie est cédée au noyau stable ou lorsque le noyau a été formé à la suite d'une transmutation le laissant dans un état énergétique élevé. Cette énergie

d'excitation est réémise par le noyau qui revient à son état stable. La transition se fait généralement par émission d'un rayonnement électromagnétique, dont la longueur d'onde est liée au niveau d'excitation E par la relation :

$$\frac{hc}{\lambda} = h\nu = E \quad (1.5)$$

Dans une transition gamma le nombre des nucléons est conservé.

1.1.2.3 Émission des neutrons

le retour à l'état fondamental dans certains cas d'un noyau excité à lieu par l'émission d'un neutron. Cela peut être un retour partiel, si toute l'énergie d'excitation n'a pas comptée par le neutron. Dans ce cas, le retour est complété par l'émission d'un ou plusieurs γ .

1.2 Interaction rayonnement-matière

1.2.1 Interaction photon-matière :

Les photons présentent des propriétés d'ondes électromagnétiques et de corpuscules (sans charge électrique et sans masse). Bien qu'un grand nombre de mécanismes d'interaction possibles soient connus pour les rayons γ dans matière, seuls trois types principaux jouent un rôle important dans les mesures des rayonnements :

- Effet photoélectrique
- La diffusion Compton
- La production de paire

Tous ces processus conduisent au transfert partiel ou complet de l'énergie de photon en énergie cinétique d'électron. La Figure 1.3 montre les régions de chaque type d'interaction en fonction de l'énergie du photon incident et du numéro atomique de la cible.

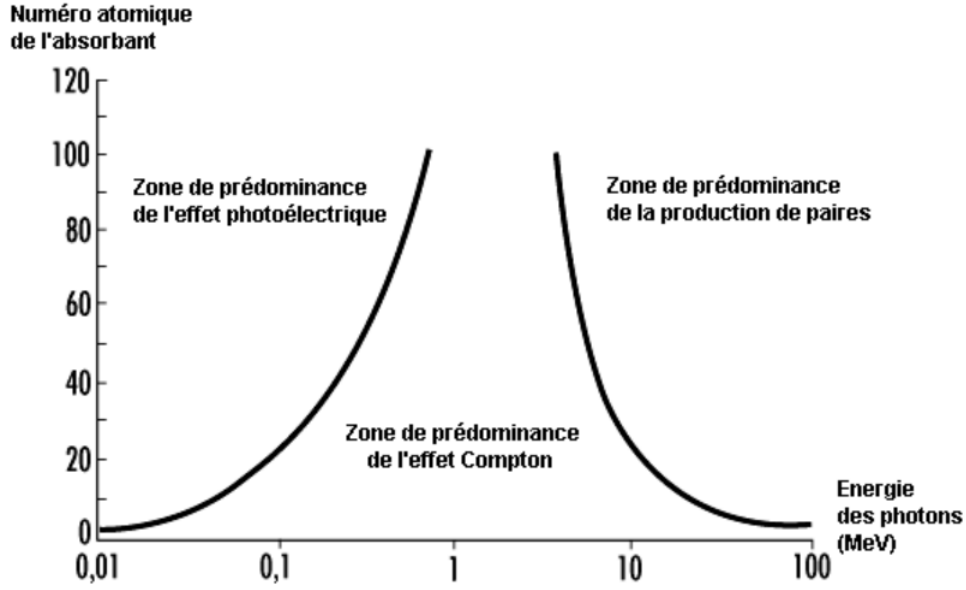


FIGURE 1.3 – Les trois principaux mécanismes d’interaction des photons avec la matière[3]

1.2.1.1 Effet photoélectrique

Cet effet résulte de l’interaction du photon avec l’un des électrons liés dans un atome. Dans ce mécanisme l’énergie du photon incident est absorbée totalement par l’électron libre et cause l’arrachement de ce dernier de son orbitale. L’énergie cinétique de l’électron éjecté est donnée par [4] :

$$E_{e^-} = h\nu - E_l \tag{1.6}$$

$h\nu$: L’énergie du photon incident ; E_l :L’énergie de liaison

Rappelons que la probabilité d’interaction d’un photon avec un atome est donnée par la relation suivante[5] :

$$\sigma_{ph} = \frac{8\pi r_0^2 Z^2}{3 (137)^4} 4\sqrt{2}(\alpha)^{\frac{-7}{2}} \text{ avec : } \alpha = \frac{E_\gamma}{E_0} \text{ et : } r_0 = \frac{e^2}{m_e c^2} \tag{1.7}$$

E_γ : énergie du photon incident ; E_0 :énergie d’électron au repos ; r_0 : rayon d’électron

(2.818 fm); Z : numéro atomique de la cible.

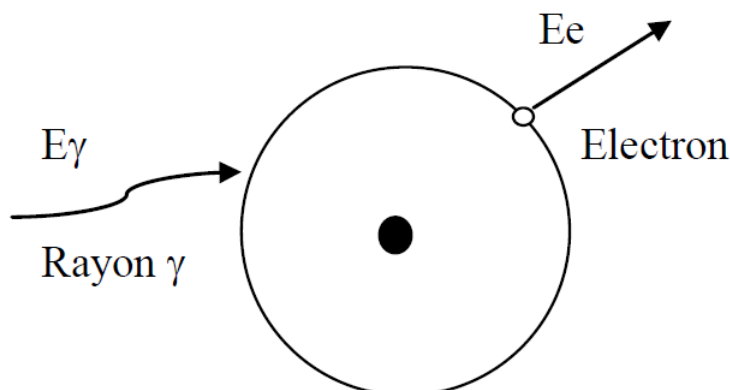


FIGURE 1.4 – Illustration de l'effet photoélectrique[6]

1.2.1.2 Diffusion Compton

Le photon incident est fait dévier par un angle θ en ce qui change sa direction originale. Le photon transfère une partie de son énergie à l'électron, qui est alors connu comme un électron de recul. Tous les angles de propagation sont possibles, l'énergie transférée à l'électron peut varier du zéro à une grande partie de l'énergie de photon. Les lois de conservation de l'énergie et de la quantité du mouvement nous permettent d'obtenir l'énergie de photon diffusé [7] :

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \alpha(1 + \cos\varphi)} \text{ avec : } \alpha = \frac{E_\gamma}{E_0} \quad (1.8)$$

L'énergie cinétique de l'électron diffusé est donnée par :

$$E_e = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\alpha(1 - \cos\varphi)}{1 + \alpha(1 - \cos\varphi)} \quad (1.9)$$

La section efficace différentielle par unité d'angle solide de cette diffusion a été déterminée en 1929 par Klein et Nishima [9] :

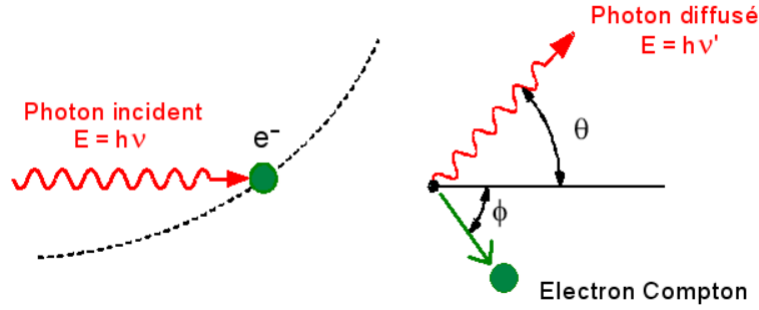


FIGURE 1.5 – Le mécanisme de la diffusion Compton[8]

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \frac{1}{2}r_0^2 \frac{1}{[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]^2} \left[\frac{1 + \cos\theta^2 + \alpha^2(1 - \cos\theta)^2}{1 + \alpha(1 + \cos\theta)} \right] \quad (1.10)$$

avec : $d\Omega = 2\sin\theta d\theta$

Par conséquent, la probabilité qu'un photon interagisse avec un atome est proportionnelle au nombre de charge Z du milieu. Pour une substance donnée, la probabilité d'une interaction photonique est proportionnelle à la densité électronique et le nombre de masse atomique A est à peu près proportionnel au numéro atomique Z . Ainsi, l'effet Compton, pour une énergie donnée, est à peu près proportionnel à la densité du matériau . La section efficace totale est obtenue par l'intégration de l'expression précédente [5] est :

$$\sigma_c = 2\pi r_0^2 Z^2 \frac{\alpha^2 + 2\alpha}{2\alpha^3} 2\ln(1 + 2\alpha) + \frac{\alpha^3 + 9\alpha^2 + 8\alpha + 3}{\alpha^2(1 + 2\alpha)} \quad (1.11)$$

1.2.1.3 Création de paire

Au contraire de l'absorption photoélectrique et la diffusion Compton, la production de paires c'est le résultat de l'interaction du photon avec le noyau de l'atome cible, la production de paires est produit si l'énergie de photon incident est plus grande que la masse au repos de l'électron $2m_e c^2 = 1.022 MeV$, dans ce procédé la résultante est la conversion d'un photon en une paire électron-positron qui signifie la γ -ray disparaît et une paire électron-

positron apparaît. Le positron se ralentit à moyen dans le milieu d'absorption et converger un électron puis deux photons d'annihilation sont produites libérant deux photons de 511 keV d'annihilation. L'énergie cinétique totale de l'électron-positron est :

$$E = E_{e^-} + E_{e^+} + 2E_0 \quad (1.12)$$

E_{e^-} et E_{e^+} sont les énergies cinétiques de l'électron et du positron, E_0 énergie d'électron au repos.

La section efficace pour la création de paire est[5] est :

$$cas1 : \sigma_{pair} = \alpha r_0^2 Z^2 \left[\frac{28}{9} \log\left(\frac{2E_\gamma}{E_0} - \frac{218}{27}\right) \right] \quad Si \quad 2E_0 < E_\gamma < \frac{E_0}{\alpha} Z^{\frac{-1}{3}} \quad (1.13)$$

$$cas2 : \sigma_{pair} = \alpha r_0^2 Z^2 \left[\frac{28}{9} \log(183Z^{\frac{-1}{3}}) - \frac{2}{27} \right] \quad Si \quad E_\gamma > \frac{E_0}{\alpha} Z^{\frac{-1}{3}} \quad (1.14)$$

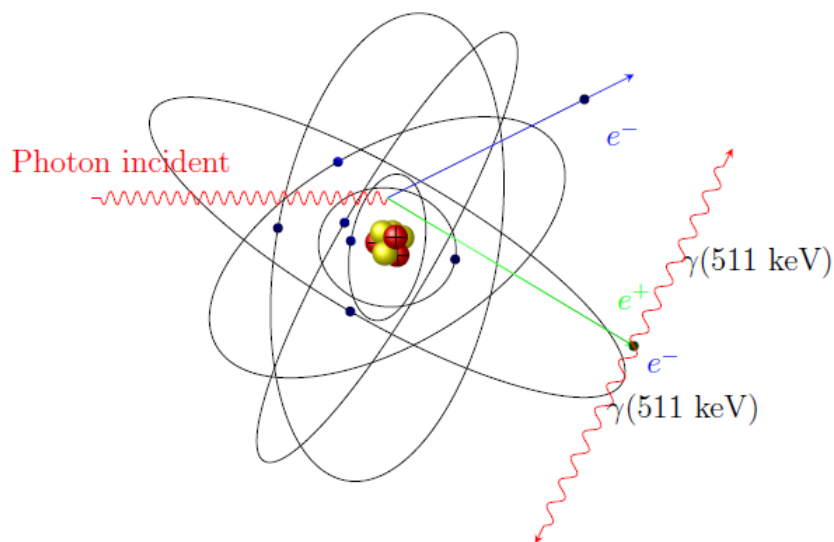


FIGURE 1.6 – Le mécanisme de création de paire[10]

L'interaction des photons avec la matière a comme section efficace la somme des trois

sections efficaces des différents processus, est donnée par :

$$\sigma_{totale} = \sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_{pair} \quad (1.15)$$

1.2.1.4 Diffusion Rayleigh

Ce phénomène consiste en un photon passant près d'un électron et le mettant en oscillation ce dernier réémet alors un photon de la même énergie que le photon incident en retombant dans un état stable. Il n'y a aucune absorption dans le milieu, le seul effet étant une diffusion du photon incident à un faible angle.

1.2.1.5 Diffusion Thomson

La diffusion Thomson est une diffusion élastique sur un électron non lié à un atome, elle concerne les photons de faible énergie. Donc, c'est l'atome dans son ensemble qui absorbe le recul et le transfert d'énergie et est alors négligeable, par conséquent le photon ne perd pas d'énergie, mais change de direction.

1.2.2 Interaction électrons matière

un électron est une molécule légère qui port une charge électrique élémentaire négative pour les négatons et positive pour les positons. Les électrons interagissent entre eux (ionisations, excitation) ou avec le noyau (rayonnement de freinage).

- Ionisation : l'ionisation indique l'élimination d'un électron atomique par un électron en mouvement. L'atome correspondant n'est donc plus neutre mais est chargé positivement puisqu'il a perdu un électron et s'appelle un ion.
- Excitation : un électron incident excite un électron atomique changer d'orbitale, ceci est suivi par la réarrangement des électrons associés à l'émission d'un photon X.
- Rayonnement de freinage : dans ce cas l'électron est ralenti par le champ électromagnétique

créée par le noyau et perd de l'énergie sous forme de rayon X. Ce phénomène n'est important que dans le cas d'électrons de forte énergie traversant une matière constituée d'atomes lourds.

1.3 Détection γ

1.3.1 Détecteurs à scintillation

Ces détecteurs contiennent un matériau de scintillation. Ce matériau de scintillation peut être solide, liquide ou gazeux et peut être organique ou inorganique. Le matériau de scintillement émet de la lumière à la suite d'une interaction avec les rayonnements ionisants. La quantité de lumière émise est proportionnelle à l'énergie des rayonnements ionisants absorbés dans le scintillateur. Certains des matériaux de scintillation inorganiques courants sont le sulfure de zinc (ZnS), l'iodure de lithium (LiI), l'iodure de sodium (NaI(Tl)). Le dernier matériau est le plus utilisé. Le détecteur à scintillation comprend deux parties : le scintillateur et le photomultiplicateur.

1.3.1.1 Scintillateur

La bande inférieure, appelée la bande de valence, représente les électrons qui sont principalement liés sur les sites du réseau, ainsi que la bande de conduction représente les électrons qui ont convenablement énergie pour être libre de migrer à travers le cristal. Il existe une bande intermédiaire énergies, appelées la bande interdite. Les électrons primaires produits par l'interaction des photons élève les électrons secondaires vers la bande de conduction, laissant des trous dans la bande de valence. Dans certains cas, l'énergie donnée à l'électron peut ne pas être suffisant pour l'élever à la bande de conduction. Si les électrons sont autorisés à se désexciter en retombant à la bande de valence, ils émettront un rayonnement électromagnétique. Il peut être détecté par un photomultiplicateur pour fournir le signal du

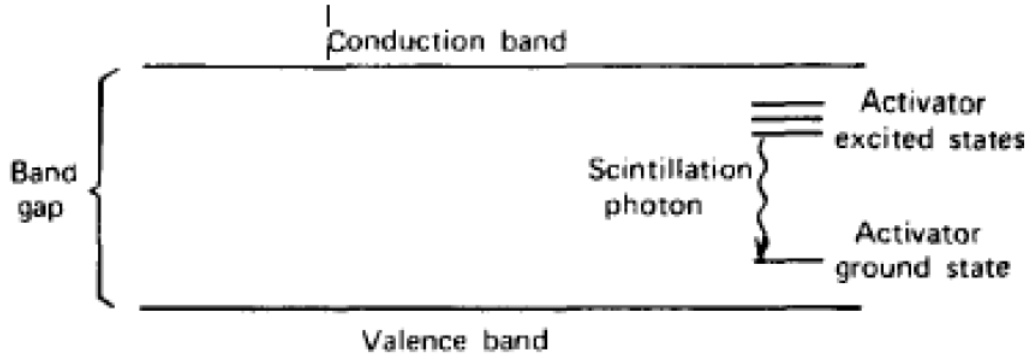


FIGURE 1.7 – Structure des bandes dans un scintillateur et principe de fonctionnement[11]

détecteur. C'est la base du détecteur à scintillation.

1.3.1.2 Matériaux de détecteur de scintillateur

- Iodure de sodium - $NaI(Tl)$: c'est le matériau scintillateur le plus couramment utilisé. Il est bon marché et facilement disponible. L'atome d'iode du NaI (TI) fournit un coefficient d'absorption des rayons gamma élevé et, par conséquent, une efficacité intrinsèque élevée. À faible énergie, la probabilité d'absorption complète est élevée. Parce que NaI(Tl) fournit le plus grand rendement lumineux de tous les scintillateurs inorganiques traditionnels utilisant des photomultiplicateurs standard, il a également la meilleure résolution d'énergie Malgré ses excellentes performances comparées pour d'autres matériaux, le NaI(TI) présente plusieurs inconvénients. Il est cassant, sensible aux gradients thermiques et aux chocs thermiques. A de faibles taux de comptage, ceci n'est pas nécessairement un problème, en ce que les impulsions dues à la phosphorescence peuvent être éliminées électroniquement, mais à un taux de comptage élevé, elles ont tendance à s'accumuler et à limiter les performances de taux de comptage élevés.
- $LaBr_3(Ce)$:il offre des avantages par rapport à $NaI(Tl)$. $LaBr_3(Ce)$ a un rendement lumineux élevé, excellente résolution énergétique et Temps de décroissance rapide avec capacités de taux de comptage élevé, excellente dureté aux radiations.

1.3.1.3 Photomultiplicateur

Le rôle du photomultiplicateur est de convertir des signaux lumineux typiquement de pas plus de quelques centaines de photons dans une impulsion de courant utilisable. Les processus qui ont lieu au sein du Photomultiplicateur sont :

- Le photon lumineux heurte la photocathode, la faisant émettre un photoélectron.
- Les photoélectrons sont focalisés électro-statiquement sur le premier d'une série d'étages multiplicateurs d'électrons, dynodes. Ceux-ci émettent plus d'électrons qu'ils n'en reçoivent, amplifiant ainsi le signal.
- Les électrons de la première dynode sont multipliés à la deuxième dynode, et encore à la troisième, tout le chemin le long de la chaîne.
- Le signal amplifié est ensuite collecté à l'anode et évanoui aux circuits de mesure.

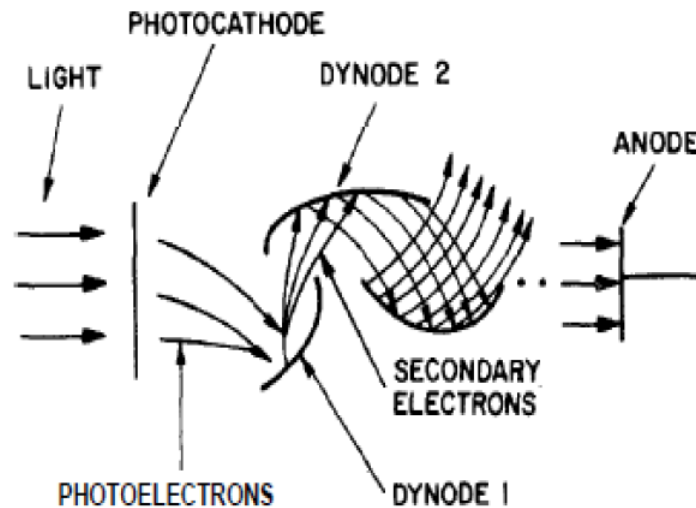


FIGURE 1.8 – Illustration du fonctionnement d'un photomultiplicateur[12]

1.3.1.4 Les caractéristique générales de détecteur

- L'efficacité de détecteur : l'efficacité du détecteur dépend de la nature et l'énergie du rayonnement incident elle est comprise entre 0 et 1. Il existe deux types :

L'efficacité intrinsèque :

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{le nombre des particules détectés}}{\text{le nombre des particules traversés le détecteur}} \quad (1.16)$$

L'efficacité extrinsèque :

$$\varepsilon_{ext} = \frac{\text{le nombre des particules détectés}}{\text{le nombre des particules émis par la source}} \quad (1.17)$$

- Les caractéristiques géométrique : la réponse de détecteur et le flux du rayonnement dépendent de l'angle solide qui dépend à son tour de la source (émet dans toutes les directions).
- Le temps mort : il représente le plus petit intervalle de temps qui doit séparer deux information reçues. Ce temps dépend des caractéristique du détecteur. Deux modèles permettent de rendre compte du phénomène :

1. Modèles non paralysable : un événement est pris en compte par la chaîne de mesure, rien n'est plus compte avant que ne s'écoule un temps égal à τ . Tout se passe comme si un temps de récupération, le temps mort, était nécessaire au système pour prendre en compte un nouvel événement. Pour ce modèle, le taux de comptage réel est de la forme [13] :

$$N_r = \frac{N_c}{1 - \tau N_c} \text{ ou } N_c = \frac{N_r}{1 + \tau N_r} \quad (1.18)$$

N_r représente le taux de comptage réel ou corrigé, N_c le taux de comptage mesure.

2. Modèles paralysable : tout événement entraîne un temps de récupération même s'il intervient pendant τ . Pour ce modèle, le taux de comptage réel est de la forme[13] :

$$N_c = N_r e^{-N_r \tau} \quad (1.19)$$

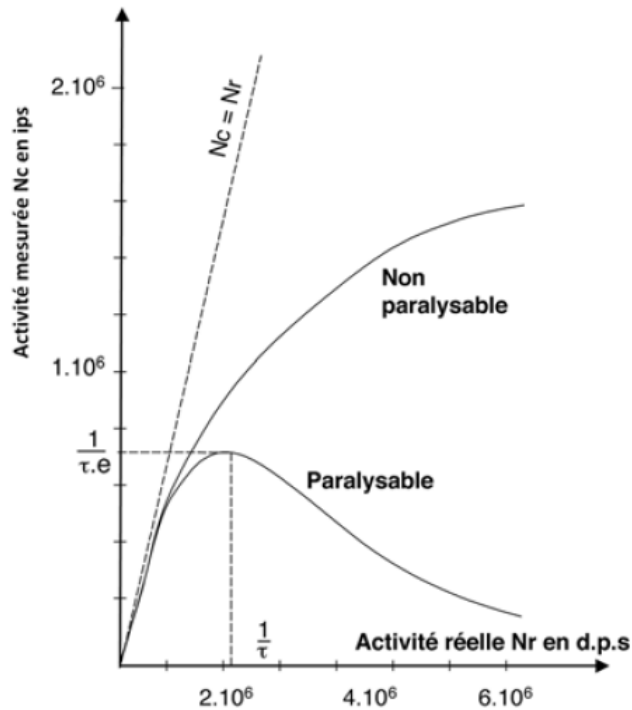


FIGURE 1.9 – Compter les pertes selon le modèle paralysable et non paralysable [13]

- La résolution en énergie : Elle caractérise la qualité du détecteur à séparer deux régions proches dans la surface active du détecteur. La résolution en énergie (R) du détecteur est définie comme la largeur à mi-hauteur du pic (Full Width at Half Maximum- FWHM) divisée par la position du cancroïde du pic E_0 (voir la Figure1.10), la formule[6] est :

$$R = \frac{FWHM}{E_0} \times 100 \quad (1.20)$$

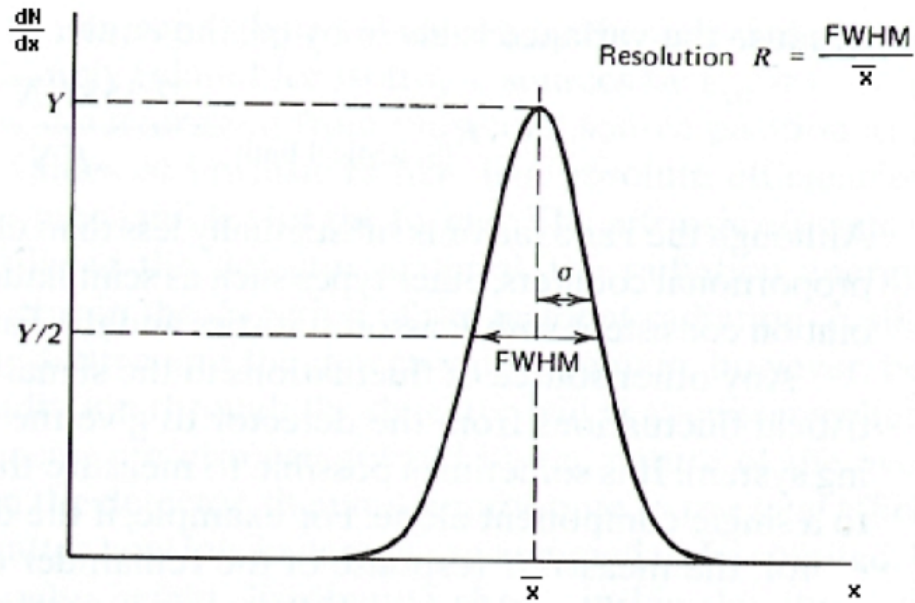


FIGURE 1.10 – Introduction à la mesure de résolution d'un détecteur[11]

1.3.1.5 Chaîne de spectrométrie γ et ses différentes composantes

Pour réaliser une spectroscopie γ nous avons besoin : les sources radioactives, le détecteur, l'électronique associée au détecteur et un système d'acquisition.

- Alimentation haute tension : les détecteurs de lumière nécessitent une source d'alimentation haute tension de l'ordre de plusieurs centaines de volts ou plus, et bien entendu cette tension doit être stable face aux fluctuations de puissance et aux variations de courant et de température .
- Préamplificateur : nous utilisons un préamplificateur au plus près du détecteur et avant un amplificateur à cause du signal très faible qui résulte de la détection et qui de l'ordre de micro-ampère qui peut être atténué facilement. Dans le signal électrique passe dans le préamplificateur, son amplitude sera multipliée par un facteur de 100.
- Amplificateur : le signal électrique doit passer par une deuxième étape d'amplification pour que le signal soit multiplié encore une deuxième fois par un facteur de 100 parce que le signal sortant du pré-amplificateur est encore faible.

- Analyseur multi-canaux : un analyseur multi-canal comprend un codeur numérique, une mémoire divisée en segments, aussi appelée canaux et un écran de visualisation, ces éléments permettent respectivement de convertir les tensions électriques en nombre, classer ces nombres dans les canaux de mémoire, et de visualiser le contenu de l'ensemble des canaux. Cette visualisation finale s'effectue grâce à un système incorporé ou bien en liaison avec un micro-ordinateur.

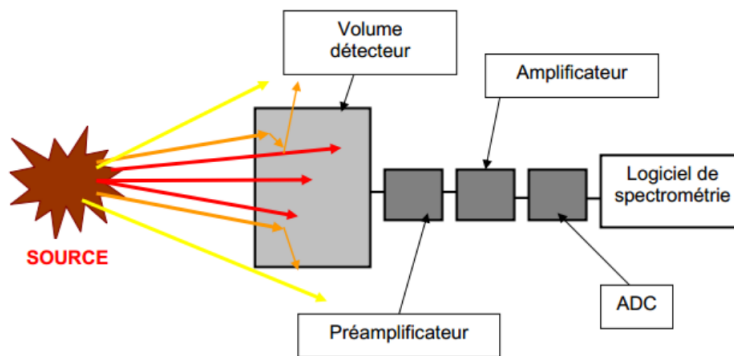


FIGURE 1.11 – Chaîne de spectrométrie gamma[14]

Outil de simulation Monte-Carlo

Ce chapitre présente le principe générale de la méthode Monte Carlo et le code Geant4.

2.1 Modélisation par la méthode Monte Carlo

On appelle Méthode de Monte Carlo toute méthode visant à calculer une valeur numérique en utilisant le tirage de nombres aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes (plus généralement stochastiques). Cette méthode est utilisée dans de nombreux domaines : en physique nucléaire, en finance, en statistiques, etc.

Les méthodes de Monte-Carlo, en référence aux jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo, ont été développées notamment sous l'impulsion de John Von Neumann et Stanislas Ulam, lors de la seconde guerre mondiale et des recherches sur la fabrication de la bombe atomique. La méthode Monte Carlo est basée essentiellement sur l'utilisation d'un générateur de nombre pseudo-aléatoire, ce dernier est un algorithme qui permet de générer mathématiquement, puis informatiquement une suite de nombres présentant certaines propriétés du hasard.

2.1.1 Transport de particules

Le suivi des particules dans la matière par la méthode de Monte Carlo consiste alors à générer un grand nombre de particules primaires par la source de manière séquentielle ou elles

sont émises une à une. Chacune de ces particules primaires (ou secondaires) est caractérisée par une position, une direction, un libre parcours moyen et une énergie. L'histoire d'une particule primaire (ou secondaire) est traitée d'une manière probabiliste avec des algorithmes qui calculent et donnent sa position, son énergie après interaction, son parcours entre deux interactions, le type d'interaction, l'énergie transférée, l'angle de déviation et les particules secondaires créées. Ces paramètres sont obtenus par un tirage aléatoire parmi les distributions de probabilités spatiales, les distributions de probabilités directionnelles ainsi que les distributions de probabilités d'interaction dans la matière contenues dans des tables de section efficaces.

2.2 Geant4

Geant4 (GEometry ANd Tracking) est une boîte à outils pour simuler le passage de particules à travers la matière. Il comprend une gamme complète de fonctionnalités comprenant le suivi, la géométrie, les modèles physiques et les hits. Les processus physiques proposés couvrent une gamme complète, y compris les processus électromagnétiques, et optiques, un large ensemble de particules, de matériaux et d'éléments à vie longue, sur une large gamme d'énergie incidente. Il a été conçu et construit pour exposer les modèles physiques utilisés, pour gérer des géométries complexes et pour permettre son adaptation facile pour une utilisation optimale dans différents ensembles d'applications. La boîte à outils est le résultat d'une collaboration mondiale de physiciens et d'ingénieurs en logiciel. Il a été créé en exploitant l'ingénierie logicielle et la technologie orientée objet et implémenté dans le langage de programmation C++. Le code est constitué en fait de plusieurs catégories de classes en langage C++ (17 catégories) dont chacune décrit une des parties nécessaire de la simulation :

- La catégorie Global : gère le système d'unité, les constantes numériques et les nombres aléatoires.
- La catégorie Rep. Graph : elle assure l'affichage à l'écran.

- La catégorie Material : regroupe toutes les classes nécessaires à l'utilisateur pour définir n'importe quel matériaux dans la simulation.
- La catégorie Intercoms : elle assure la communication entre les différentes catégories de Geant4.
- La catégorie Particls : gère les propriétés physiques des particules comme la masse par exemple.
- La catégorie Geometry : regroupe toutes les classes nécessaires à l'utilisateur pour créer une configuration bien précise. Parmi ces classes par exemple, la classe "G4Box" utilisée pour créer un parallélépipède.
- La catégorie Track : regroupe toutes les classes concernant les "track" (trajectoires des particules) et les "Step" (pas entre deux interactions successives d'une particule) des particules.
- La catégorie Processes : regroupe toutes les classes concernant les processus physiques décrivant les interactions des particules avec les matériaux.
- La catégorie Digits,Hits : sert à enregistrer des informations (grandeurs physiques) liées à des éléments de la géométrie pour simuler la réponse du détecteur.
- La catégorie Tracking : regroupe les classes utilisées par l'utilisateur pour accéder aux informations des classes de Track, comme par exemple l'énergie déposée au cours d'une trajectoire ou le nombre de particules secondaires produites tout au long d'un trajectoire.
- La catégorie Event : regroupe les classes utilisé par l'utilisateur pour la génération des particules primaires.
- La catégorie Run : un run est un ensemble d'événements simulés obtenus dans les mêmes conditions, c'est-à-dire que les paramètres d'entrée de la simulation ne varient pas au cours d'un run. Ce module gère des informations relatives à l'ensemble des événements d'un même run.

- La catégorie Visualisation : permet de visualiser la géométrie du détecteur, la trajectoire des particules, leurs interactions avec le détecteur.
- La catégorie Readout : elle est utilisée pour le découpage artificiel de la géométrie où l'on veut récupérer des informations.
- La catégorie Persistence : c'est une interface qui permet d'enregistrer et de retrouver un run, événements, grandeurs physiques ou une information géométrique via une base de données en vue d'une analyse séparée de la simulation.
- La catégorie Interfaces : gère l'interactivité entre l'utilisateur et Geant4 via des commandes qui peuvent être exécutées au début de chaque run.

2.2.1 Utilisation de Geant4

Lorsque nous faisons une simulation dans Geant4, l'utilisateur utilise trois fichiers contenant trois types d'informations fournis par lui-même :

1. Premier fichier : contient des informations sur la géométrie de la modélisation et les matériaux utilisés, par exemple on définit le SiO_2 :

```
G4Element* Si = new G4Element("Silicium" , "Si", z= 14, a= 28.085*g/mole);
```

```
G4Material* SiO2 = new G4Material("diOxydeSi", 2.65*g/cm3, ncomponents=3);
```

```
SiO2 -> AddElement(Si,0.33);
```

```
SiO2 -> AddElement(O,0.67);
```

2. Deuxième fichier : contient les informations sur les particules incidentes (types de ces particules, leurs énergies, leurs charges, la direction de faisceau, le nombre des particules émises). Par exemple, pour définir une source de α qui contient 700 particules, avec une énergie primaire de 1000 MeV et qui voyage dans la direction de l'axe des y, on écrit :

```
G4int nparticle = 1;
```

```
ParticleGun = new G4ParticleGun(nparticle);
```

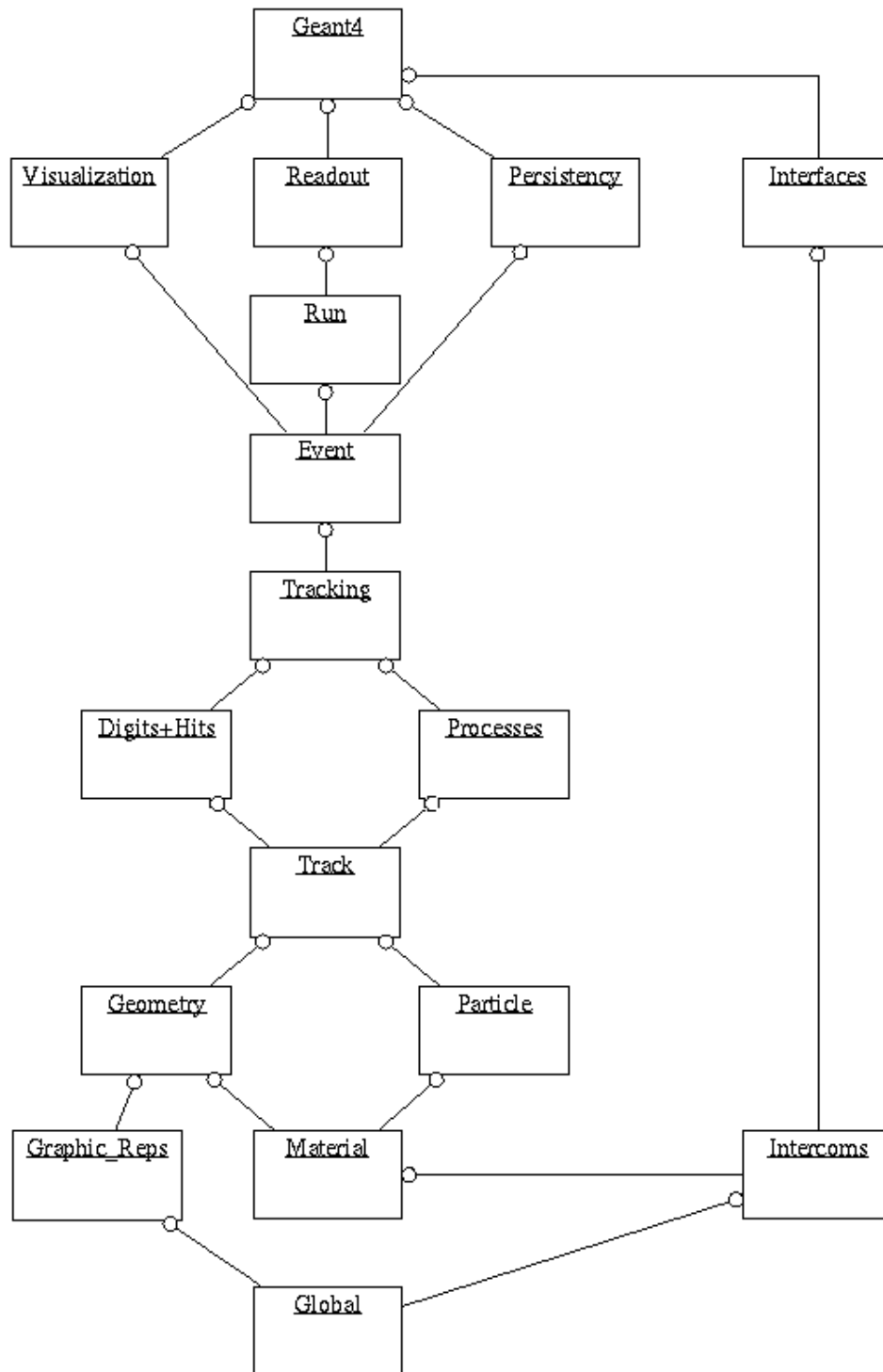


FIGURE 2.1 – Structure générale du code Geant4, chaque case illustre une catégorie de classes[16].


```

G4ParticleDefinition* particle= G4ParticleTable : :
GetParticleTable() -> FindParticle("alpha");
ParticleGun -> cSetParticleDefinition(particle);
ParticleGun -> SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(0.,0.,1.));
ParticleGun -> SetParticleEnergy(1000*MeV);
ParticleGun -> SetParticlePosition(G4ThreeVector(0.*cm, 11.*cm,0.*cm));

```

3. Troisième fichier : contient des informations sur toutes les particules utilisées dans la simulation, en tenant compte des particules secondaires qui peuvent être créées par des interactions de particules élémentaires. De plus, il contient tous les processus physiques pour chaque particule de la simulation.

Pour analyser les données des simulations sous Geant4, nous utilisons le programme ROOT [15] pour analyser les données. Ce dernier est un programme informatique gratuit écrit en C++. ROOT se compose de différentes catégories, qui couvrent divers domaines tels que la création de graphiques et de diagrammes aux dimensions 1, 2 et 3, la représentation des fonctions, le traitement d'images, les calculs statistiques, le stockage, etc.

La figure 2.2 représente la structure générale de la simulation Geant4 où les fichiers encadrés en rouge sont obligatoires et ceux en vert sont facultatifs.

2.2.2 Processus et modèles physiques dans Geant4

On sait que les processus physiques sont classés en fonction des interactions des particules de matière. Ces dernières peuvent être simulées grâce à l'utilisation d'un Geant4, qui est divisé en sept catégories : :electromagnetic, hadronic, decay, optical, photolepton-hadron, parameterization et transportation. Le modèle de Geant4 est un groupe de classes C++ dont les méthodes implémentent le détails du processus physique. Un ou plusieurs modèles peuvent être liés à un processus.

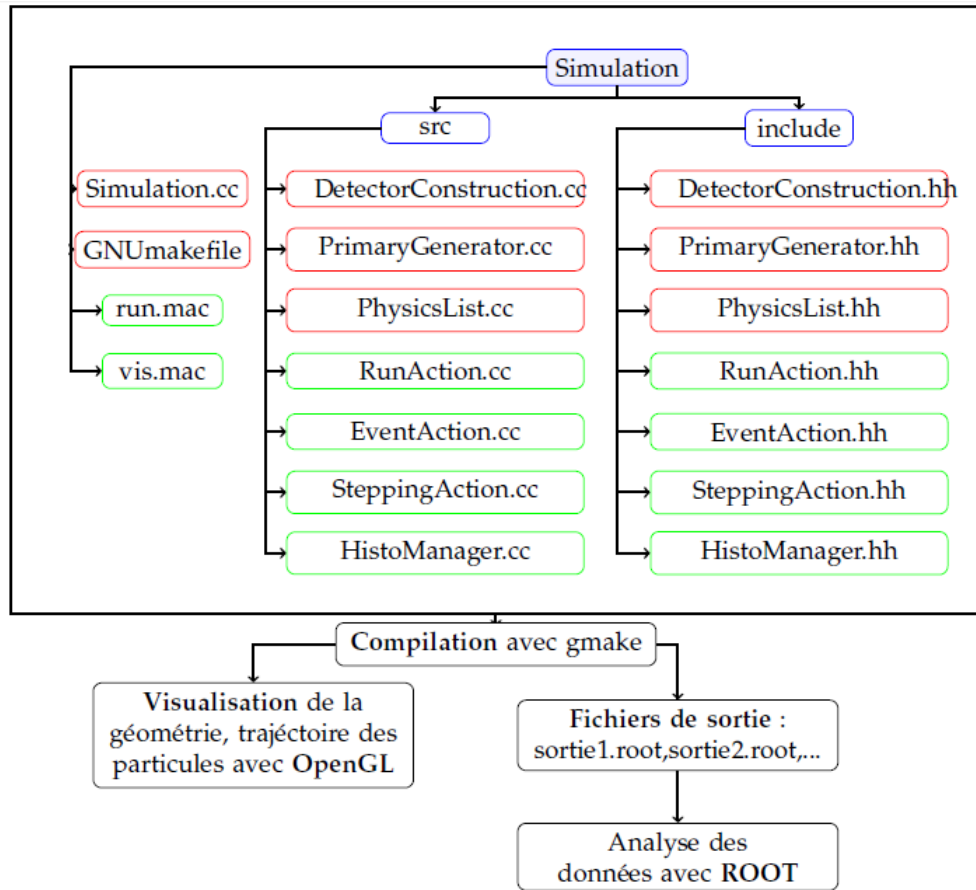


FIGURE 2.2 – Architecture minimale d’un code de simulation dans Geant4

2.2.2.1 Modèles électromagnétiques

- Modèles standard : Dans ce cas, les modèles standard Geant4 décrivent les interactions électromagnétiques Particules chargées et photon gamma. Ces modèles sont limités à une gamme d'énergie allant de 1 keV à 10 peV[17].
- Modèles Low Energy : Ces modèles décrivent les processus physiques électromagnétiques des photons, des électrons, des hadrons et des ions. Ils ont également été mis en œuvre dans Geant4 afin d'étendre la gamme correcte d'interactions de particules à des énergies inférieures à celles fournies dans les modèles Standard de Geant4. Les processus Low Energy comprennent l'effet photoélectrique, la diffusion Compton, la diffusion de Rayleigh, la conversion gamma, le rayonnement de freinage et l'ionisation. La fluorescence des atomes excités est également envisagée dans ces modèles. L'implémentation actuelle des processus Low Energy, dans la version 10.0 de Geant4, est valable pour les énergies jusqu'à 100 eV et ces modèles peuvent être utilisés jusqu'à 100 GeV. Les éléments de numéro atomique compris entre 1 et 99 sont, ici, pris en compte[18].

2.2.2.2 Modèles hadroniques

Ces modèles sont évalués pour des procédés hydrauliques purs valides de 0 MeV à 100 PeV. Les interactions hadroniques sont caractérisées par les énergies des hadrons entrants, il faut donc distinguer deux zones :

- Domaine des interactions à basse énergie (quelques GeV) qui sont traités par les modèles : cascades binaires (binary cascade), cascade intranucléaire de Bertini (Bertini Cascade) [19].
- Domaine des interaction à haute énergie (quelques GeV à centaines TeV) qui sont traités par les modèles : QGS (Quark Gluon String), Fritiof, LHEP). La Figure 2.3 [20] illustre un bref inventaire des modèles hadroniques.

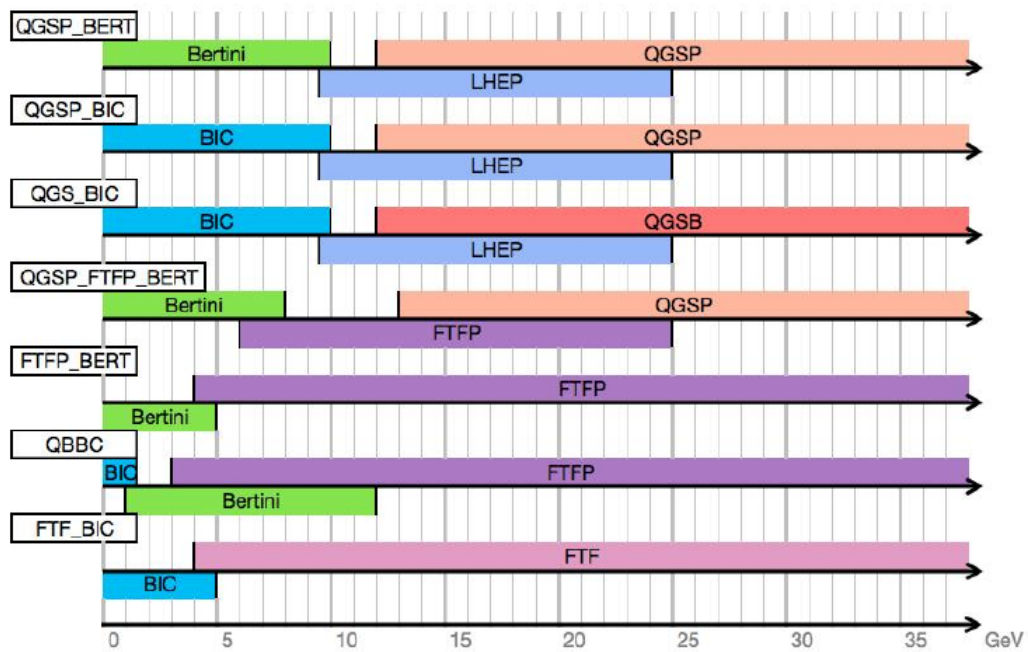


FIGURE 2.3 – Domaine d’application des modèles composant quelques physics liste de Geant4, pour les interactions d’un hadron avec la matière en fonction de son énergie incidente

Résultats et Discussion

Dans ce chapitre nous étudions numériquement l'efficacité et la résolution en énergie des deux détecteurs $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$, en utilisant le code Geant4 décrit dans le deuxième chapitre comme code de simulation Monte Carlo.

3.1 Interaction photon γ -scintillateur

3.1.1 Géométrie des détecteurs

Dans le cadre de notre étude, nous allons tout d'abord construire nos détecteurs à l'aide du Geant4 (voir Annexe 1), les dimensions géométriques en mm sont les mêmes que celles utilisées par [21]. Le tableau 3.1 donne les densités des matériaux qui composent nos détecteurs. La figure 3.1 [21] schématise les détecteurs $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$. La figure 3.2 représente une visualisation en 3D de la géométrie du détecteur $NaI(Tl)$ simulé par Geant4.

Matériaux	SiO ₂	Air	MgO	Al	LaBr ₃ (Ce)	NaI(Tl)
Densités($\frac{g}{cm^3}$)	0.94	1.22×10^{-3}	2.0	2.7	5.29	3.67

TABLE 3.1 – Les densités des matériaux utilisés dans la simulation MC[21]

En comparant entre la composition des deux détecteurs $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$, nous constatons que le détecteur $LaBr_3(Ce)$ ayant les mêmes matériaux de détecteur $NaI(Tl)$, mais le réflecteur MgO , utilisé dans le cas du $NaI(Tl)$, a été remplacé par l'air dans $LaBr_3(Ce)$ [22].

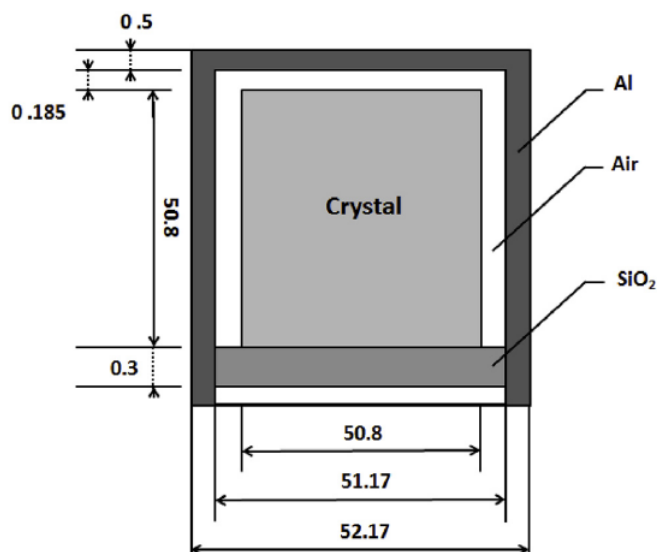


FIGURE 3.1 – Structure des détecteurs $2'' \times 2''$ ($NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$) considérés en simulation MC.

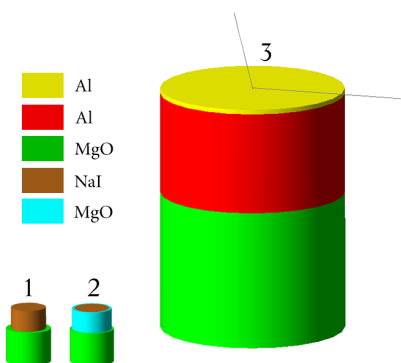


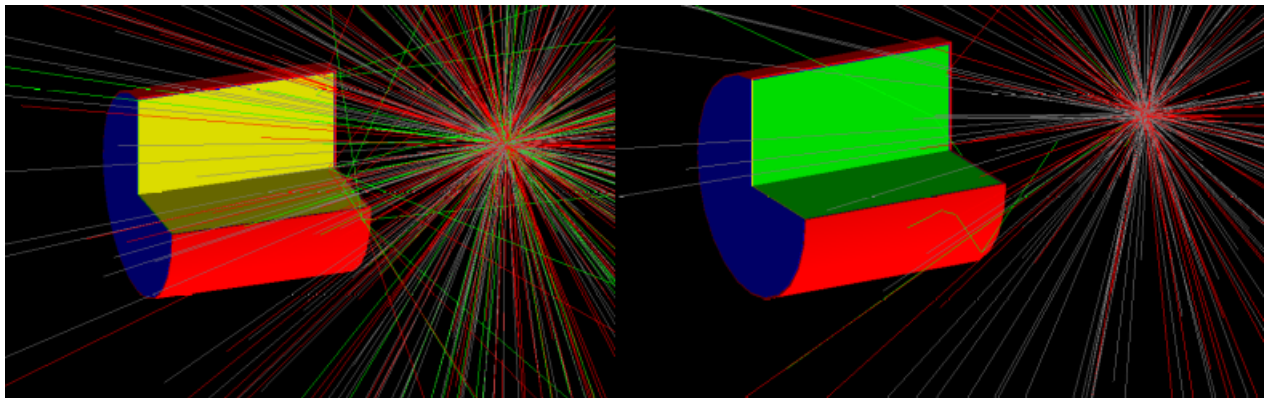
FIGURE 3.2 – Visualisation en 3D de la géométrie du détecteur simulé par Geant4.

3.1.2 Particules primaires et processus physiques

Afin d'étudier l'effet des photons sur les scintillateurs, nous bombardons chaque type de scintillateur $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$ par un faisceau de photons composé de 10^8 particules où la distance entre les sources utilisées et l'interface du détecteur a été fixée à 5 cm. Sachant que pour simuler une interaction particule-matière avec Geant4 ce dernier propose toute une gamme de processus physiques dans un intervalle d'énergie allant de 250 eV à quelques TeV, classés en sept catégories principales : électromagnétiques, hadroniques, transport, désintégration, optiques, photolepton-hadron, paramétrisation. Nous ne nous intéresserons ici qu'aux processus électromagnétiques et nous limiterons aux photons. Pour cela nous utilisons la PhysicList suivante :

```
RegisterPhysics (new EmStandardPhysics()) ;
```

La figure 3.3 montre une visualisation par Geant4 de l'interaction photons- $NaI(Tl)$ et photons- $LaBr_3(Ce)$, dans cette illustration chaque couleur représente un type de particule à titre d'exemple le rouge représente les électrons, le vert les rayons X ou bien γ .



(a)

(b)

FIGURE 3.3 – Visualisation par Geant4 de l'interaction d'un faisceau des photons avec : (a) $NaI(Tl)$, (b) $LaBr_3(Ce)$.

3.2 La résolution en fonction de l' énergie

Afin de vérifier la fiabilité de notre code, nous avons effectué en premier lieu un test simple. Où nous avons placé une source ponctuelle de Césium ^{137}Cs émettant des rayonnements γ d'énergie 662 keV. La figure montre le spectre de Césium ^{137}Cs , ou nous remarquons l'existence d'un pic autour de 662 keV.

Généralement les spectres expérimentaux ont une forme gaussienne, cependant le spectre décrit au-dessus ne représente pas la réalité physique, pour approcher la réalité nous devons pris en considération les valeurs de la largeur à mi-hauteur des pics gaussiens (*FWHM*). Ces derniers sont obtenu de l'expérience, dans notre travail nous avons exploité les données expérimentales de [22]. La figure 3.3 représente la résolution des deux détecteurs en fonction de l'énergie γ . Ces courbe ont été ajuster par l'équation suivante [22] :

$$FWHM(E) = a + bE + cE^2 \quad (3.1)$$

Avec : E L'énergie incidente des rayonnements γ en keV ; a, b et c sont les paramètres de l'équation. Afin d'obtenir ces coefficients, nous utilisons le fitting à l'aide du logiciel Mathematica.11.2[24]. Le tableau ci-dessous représente les valeurs des coefficients a, b et c :

détecteurs	$\text{NaI}(\text{Tl})$	$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$
a	-0.0010332	0.0040188
b	0.134457	0.025154
c	-0.0488621	-0.00814708

TABLE 3.2 – Les valeurs des coefficient a, b, c

Ces coefficients a, b, c sont introduit dans un programme fortran ce qui nous permet d'obtenir le spectre réel du ^{137}Cs (figure 3.5)

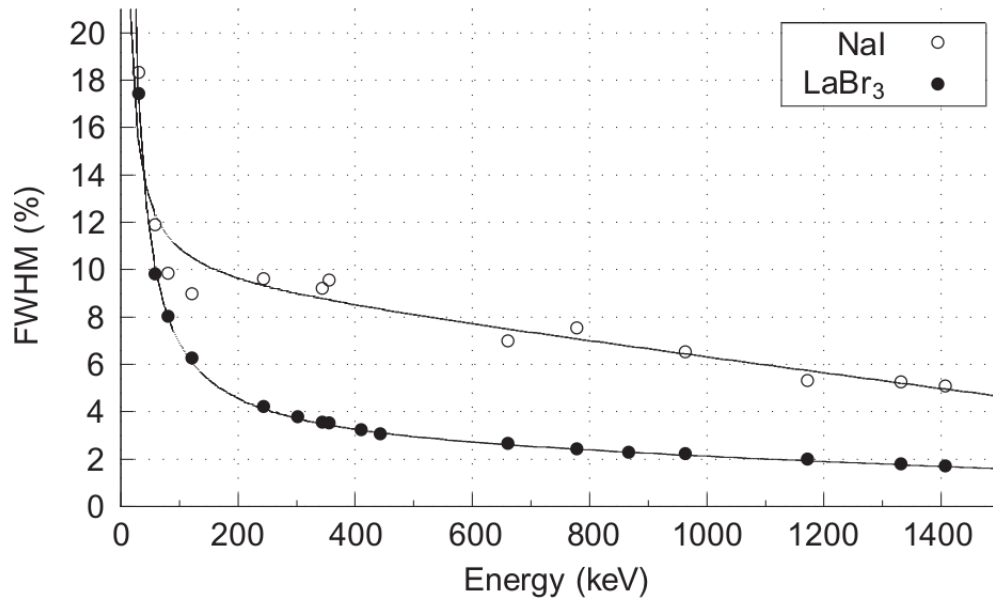


FIGURE 3.4 – Diagramme des valeurs de la résolution en fonction de l' énergie gamma.[22]

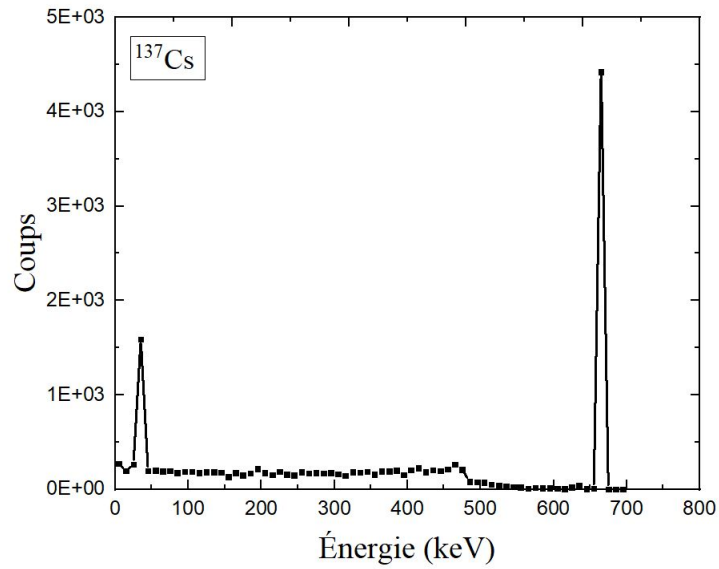


FIGURE 3.5 – Spectre élargie du Césium-137

3.3 Spectres d'énergie des rayons γ

Dans cette partie nous allons essayer de reproduire par simulation à l'aide de Geant4 les mesures expérimentales et théorique (MCNP-X) qui ont été rapporté dans les travaux de (casanova et al.,2012), pour cela nous utilisons une source ponctuelle ^{137}Cs situé à une distance de 5 cm du détecteur NaI(Tl) .

Sur la figure 3.6 nous avons tracé le spectre du ^{137}Cs obtenu par Geant4. Cette dernière montre que le code Geant4 approche mieux le spectre expérimentale en comparant avec celui obtenu par le code MCNP-X .

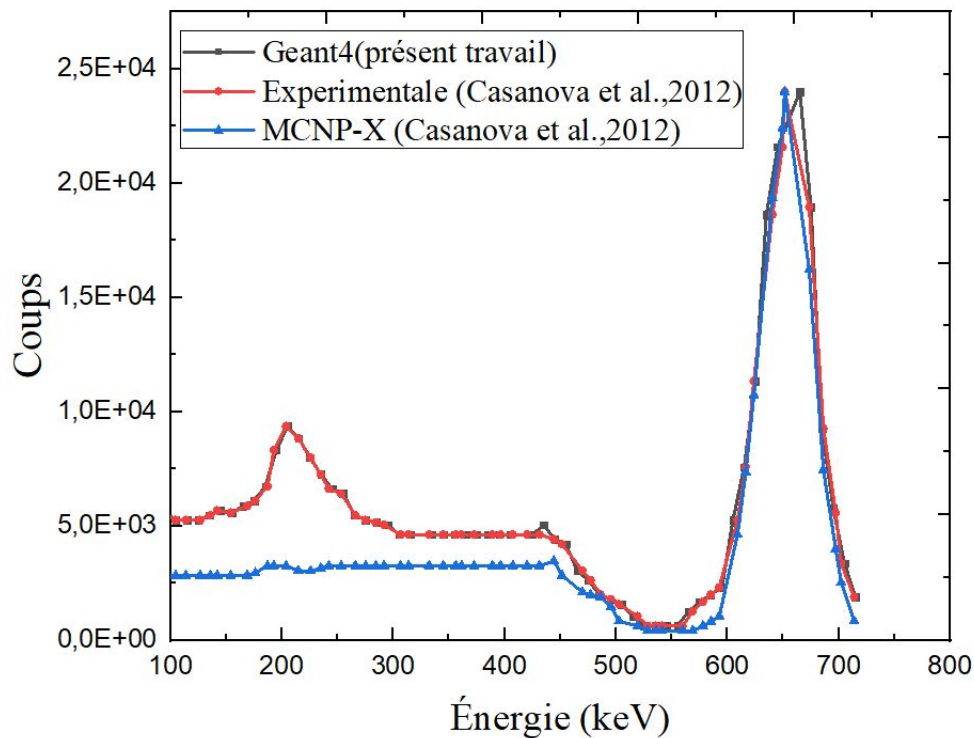


FIGURE 3.6 – Spectre ^{137}Cs , Expérimentale et MCNP-X et Geant4.

On peut donc conclure que la simulation par le code Geant4 prend en compte correctement chaque paramètre entrant dans le calcul, pas seulement les interactions physiques avec les différents matériaux qui constitue le détecteur $NaI(Tl)$, mais aussi les fluctuations électroniques telle que le bruit électronique, la variation du champ électrique.

Après la validation de notre code avec la source ^{137}Cs , nous allons maintenant voir la réponse de d'autres sources plus précisément ^{241}Am , ^{60}Co et ^{133}Ba . Ce choix de sources nous permet de balayer une large gamme d'énergie allant de 30 keV jusqu'à 1500 keV.

le tableau 3.3 donne les caractéristiques des sources radioactives utilisées dans notre étude.

Radioéléments	Activité (kBq)	Forme	Rayon (mm)	h(mm)
^{241}Am	3.2 ± 0.3	/	/	
^{133}Ba	1.0 ± 0.1	cylindrique	47	1
^{137}Cs	4.0 ± 0.4	cylindrique	0.5	1
^{60}Co	1.40 ± 0.14	cylindrique	1.0	1

TABLE 3.3 – Les caractéristiques des sources radioactives utilisés dans la simulation MC.

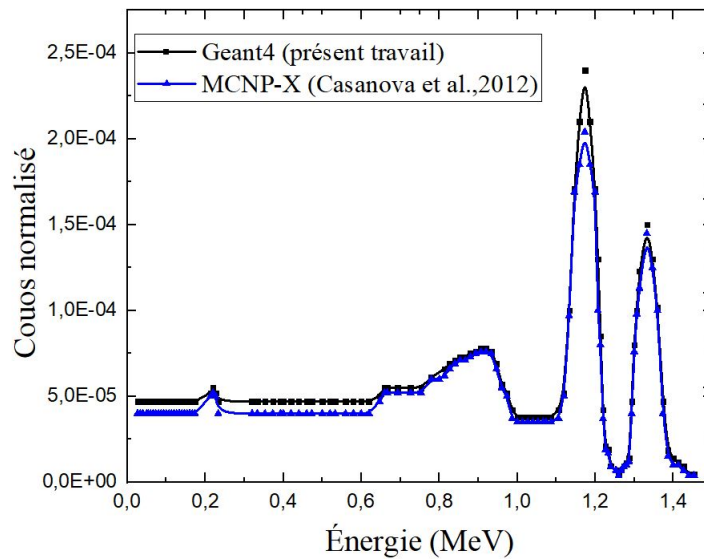
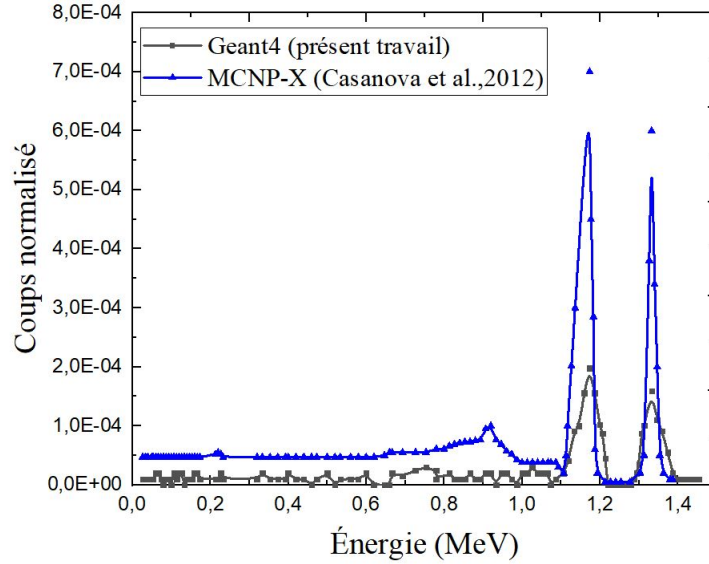


FIGURE 3.7 – Rendement de spectre ^{60}Co , Geant4 et MCNP-X pour le détecteur $NaI(Tl)$.


 FIGURE 3.8 – Rendement de spectre ^{60}Co , Geant4 et MCNP-X pour le détecteur $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

Les résultats obtenus pour la source ^{60}Co sont représentés dans les figures 3.7 et 3.8 pour les deux détecteurs $\text{NaI}(\text{Tl})$ et $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ respectivement. Ces deux figures montrent clairement que les deux codes simulent bien la réponse des détecteurs à cette source puisque nous remarquons l'existence de deux pics caractérisant ^{60}Co , le premier autour de 1173.2 keV et le second autour de 1332.5 keV. Afin de bien voir quel est le code qui approche mieux l'expérience on a calculé l'efficacité pour chaque détecteur nos résultats sont représentés sur le tableau suivant :

Efficacité (%)	Geant4	MCNP-X[22]	exp[22]
$\text{NaI}(\text{Tl})$	1.299	1.302	1.3
	1.199	1.141	1.2
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	0.198	2.149	2.1
	0.0897	1.897	2.0

 TABLE 3.4 – Les valeurs d'efficacités pour les deux détecteurs pour la source ^{60}Co .

Ce tableau montre clairement que les valeurs d'efficacités sont meilleures dans le cas du détecteur $NaI(Tl)$ puisque il détecte un grand nombre de particules contrairement au $LaBr_3(Ce)$.

Sur les figures 3.9 et 3.10 nous représentons les spectres de ^{241}Am et ^{133}Ba et cela pour les deux détecteurs. Nous remarquons que la hauteur de tous les pics des sources radioactive sont largement élevés dans le cas de $NaI(Tl)$ par rapport à $LaBr_3(Ce)$.

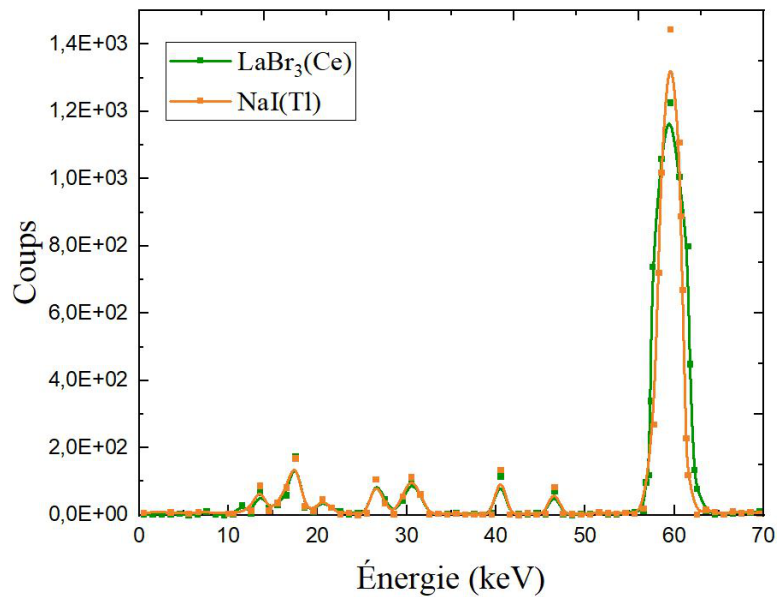


FIGURE 3.9 – Spectre ^{241}Am obtenu par le code Geant4 pour les deux détecteurs : $LaBr_3(Ce)$ et $NaI(Tl)$.

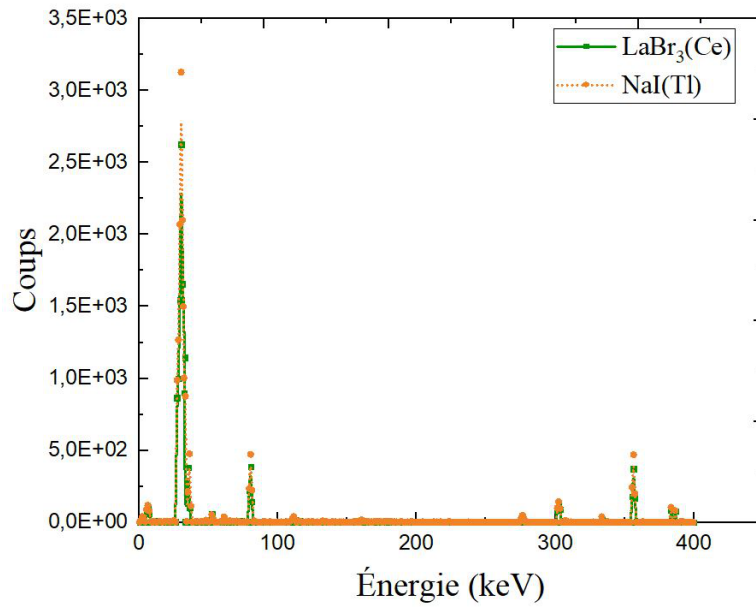


FIGURE 3.10 – Spectre ^{133}Ba obtenu par le code Geant4 pour les deux détecteurs : $\text{NaI}(\text{Tl})$ et $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

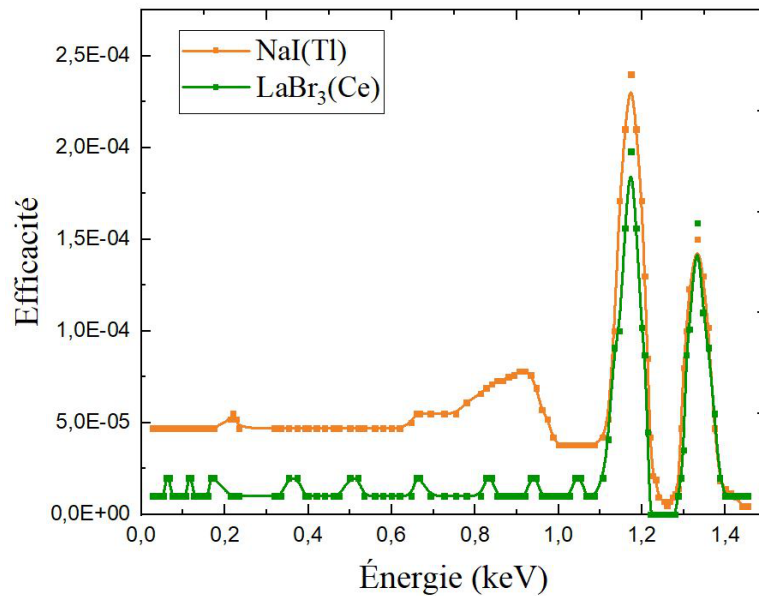


FIGURE 3.11 – Rendement de spectre ^{60}Co obtenu par le code Geant4 pour $\text{NaI}(\text{Tl})$ et $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$.

Les tableaux 3.5 et 3.6 affichent respectivement les résultats de l'efficacité des deux détecteurs et cela pour les sources ^{241}Am et ^{133}Ba .

Efficacité (%)	Geant4	MCNP-X[22]	exp[22]
$\text{NaI}(\text{Tl})$	2.59	2.57	2.5
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	0.041	3.090	3.0

TABLE 3.5 – Les valeurs d'efficacités pour les deux détecteurs pour la source ^{241}Am .

Efficacité (%)	Geant4	MCNP-X[22]	exp[22]
$\text{NaI}(\text{Tl})$	3.19	3.141	3.2
	1.499	1.506	1.5
$\text{LaBr}_3(\text{Ce})$	0.6	3.576	3.8
	0.372	2.013	2.0

TABLE 3.6 – Les valeurs d'efficacités pour les deux détecteurs pour la source ^{133}Ba .

Nous constatons clairement que les valeurs de l'efficacité pour le détecteur $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ obtenu par le code Geant4 sont très éloignées des valeurs expérimentales. Quant au détecteur $\text{NaI}(\text{Tl})$, on remarque qu'il y a une correspondance avec toutes les valeurs d'efficacité. Les figures 3.12 et 3.13 confirment que le code Geant4 simule bien la réponse du détecteur $\text{NaI}(\text{Tl})$ contrairement au détecteur $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$. On peut expliquer ça par le fait que les sections efficaces d'interaction photon- La ou bien photon- Br implémentées dans code Geant4 ne sont pas adéquates pour simuler cette interaction dans cette gamme d'énergie, Car la capacité des codes Monte-Carlo à fournir des résultats précis est liée au réalisme des données d'entrée, qui, pour le transport des particules, sont les sections efficaces d'interaction rayonnement-matière. Les sections efficaces sont reliées aux lois de probabilité d'interaction du rayonnement dans la matière. Au cours des simulations, l'histoire d'une particule se résume à une série de segments aussi appelés des pas. Les sections efficaces sont utilisées pour déterminer à chaque pas :

- La distance entre deux interactions, aussi appelée libre parcours.
- Le type de processus physique engendré au cours de l'interaction.

- L'énergie déposée, ainsi que les angles de déviation et d'éjection.
- La création éventuelle d'au moins une particule secondaire, ainsi que l'énergie et la direction associées.

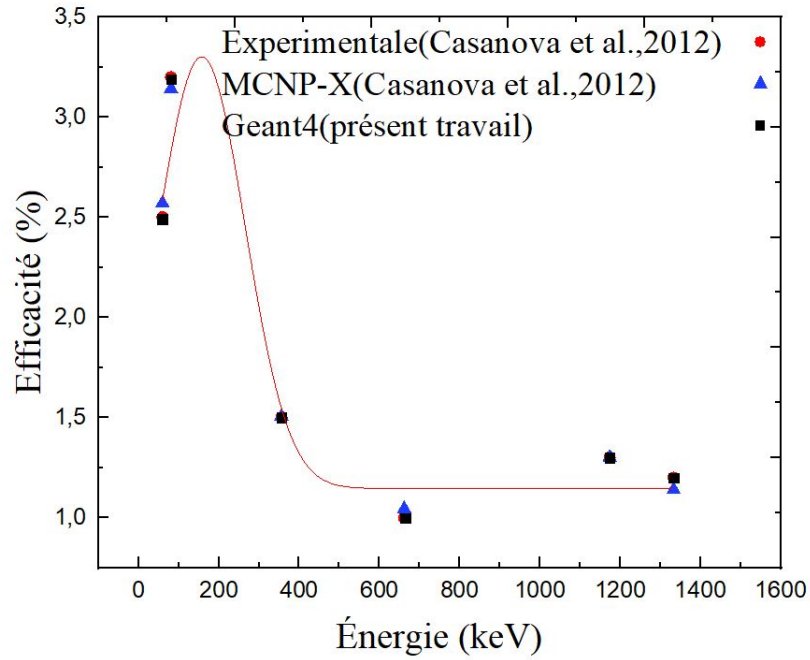


FIGURE 3.12 – Les courbes d'efficacité Expérimentale et MCNP-X qui là été rapporter dans (Casanova et al., 2012) comparée à l'efficacité de Geant4 du détecteur $NaI(Tl)$.

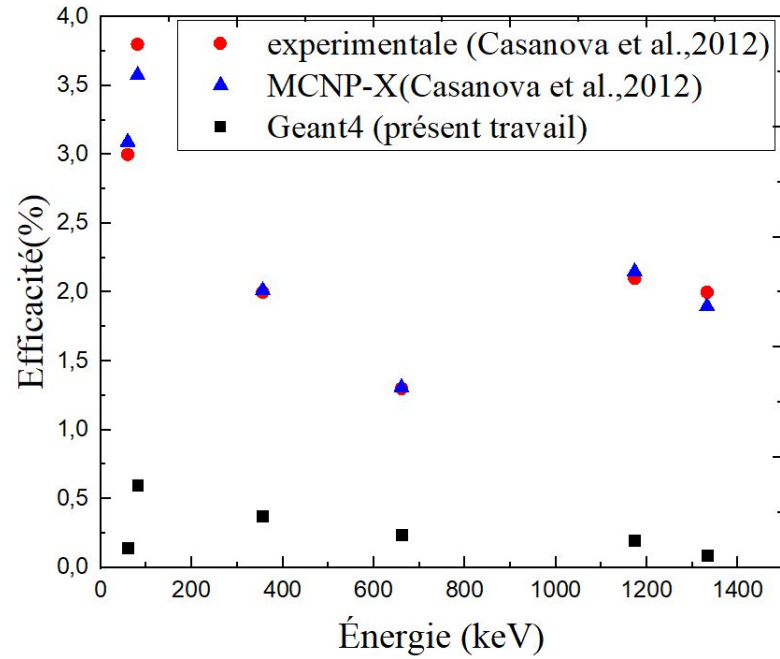


FIGURE 3.13 – Les courbes d'efficacité Expérimentale et MCNP-X qui là été rapporter dans (Casanova et al.,2012) comparée à l'efficacité de Geant4 du détecteur $LaBr_3(Ce)$.

Conclusion Générale

Les travaux de recherches effectués au cours de ce mémoire ont porté sur l'étude numérique de la réponse de deux détecteurs à scintillation de taille similaire ($2'' \times 2''$) : $NaI(Tl)$ et $LaBr_3(Ce)$ aux quartes sources radioactives. Nos calculs ont été réalisés au moyen du code de simulation Monte Carlo Geant4 (version 10.0).

Pour mener cette étude nous avons calculé l'efficacité de détection pour ces deux détecteurs dans la gamme d'énergie γ qui s'étale de 30 keV à 1500 keV.

Les résultats obtenus dans ce travail sont en bon accord avec les résultats trouvés expérimentalement et ceux trouvés par le code MCNP-X pour le détecteur $NaI(Tl)$, Contrairement à ceux de détecteurs $LaBr_3(Ce)$ ou pensons qu'il y'a un manque de données dans les valeurs des sections efficaces des interactions photon- La , photon- Br .

Bibliographie

- [1] M.R .Ioan,C.Postolache,V.Fugaru,S.Bercea,A.Celarel, Computational method for the determination of intense gamma-rays sources activity by using Geane4, P.O. Box MG-6, Romania 2 University of Bucharest, Doctoral School on Physics, Romania*Corresponding author : razvan.ioan@nipne.ro , (2017). page :5
- [2] <http://www.chimix.com/an9/sup9/imrt81.htm>.32 page :32
- [3] Benlakhdar Fatiha, Étude de l'effet de nanomatériaux sur l'absorption des rayonnements dans un tissu biologique, Thèse de doctorat,USTO-MB(2018). page :7
- [4] Claude.L.P.G Rancoite,Principles of radiation interaction in matter and detection,world scientific,715(2004). page :7
- [5] K. Siegbahn, Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy, North Holland Publishing Company ,(1965). page :10
- [6] Gordon.R. Gilmorew, Nuclear training services Ltd Warrington,UK,partical Gamma-ray spectrometry,(2008). page :16
- [7] S.O. Hustache, interaction rayonnement matière et les grandes familles de détecteurs, physique nucléaire instrumentale, école Joliot-Curie, (2001). page :8
- [8] http://www.nucleide.org/Gamma_spectro/interactions.htm
- [9] O. Klein and Y. Nishima., Z. Phys. 52, 853 (1929). page :8
- [10] M.S.M Ould Mohamed, étude des interactions des particules énergétique avec la matière par la méthode Monte Carlo. Thèse de doctorat, USTO-MB (2018). page :10
- [11] G.F.Knoll,Radiation Detection and measurement,John Wileyand sons,USA,(2000).page :17

-
- [12] photomultiplier, Handbook, 1980, psec.uchicago.edu/links/photmultiplier_Handbook.pdf. page :14
- [13] Y.Barbier G .Galy, Radiopharmaceutiques, Guide pratique du contrôle de qualité en Radiopharmacie, EDP Sciences, (2009). page :16
- [14] MEKIL Thomas, PARIS Tanguy, <http://physique.unice.fr/sem6/2013-2014/PagesWeb/PT/Spectrometrie/Chaine.html>.
- [15] <http://root.cern.ch/>. page :24
- [16] Agostinelli S, et al, GEANT4—a simulation toolkit. Nuclear instruments and methods in physics research section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 506, (2003). page :23
- [17] http://geant4.web.cern.ch/geant4/collaboration/working_groups/electromagnetic/. page :26
- [18] Abdul Fattah Mohamad Hadi, Simulation de l'imagerie à 3g avec un télescope Compton au xénon liquide. Thèse de doctorat, Université Nantes Angers Le Mans (2013). page :26
- [19] Bertini Hugo W. Intranuclear-cascade calculation of the secondary nucleon spectra from nucleon-nucleus interactions in the energy range 340 to 2900 MeV and comparisons with experiment. Physical Review, 1969, 188, no 4, p. 1711. page :26
- [20] ZAMBELLI Laura. Contraintes sur la prédiction des flux de neutrinos de T2K par les données de l'expérience de hadroproduction NA61/SHINE. Thèse de Doctorat, Université PARIS 7, (2013). page :26
- [21] Mouhti.I, Elanique. A, Messous.M. Y , Validation of a NaI (Tl) and LaBr3 (Ce) detector models via measurements and Monte Carlo simulations, Journal of radiation research and applied sciences, 11.4 , 335-339, (2018). page :28
- [22] Casanovas, R., Morant.J.J, Salvadó.M, Energy and resolution calibration of NaI(Tl) and LaBr3(Ce) scintillators and validation of an EGS5 Monte Carlo user code for efficiency calculations. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A : Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 675, 78–83. page :38
- [23] Mouhti. I, Elanique.A, Messous. M. Y, Monte Carlo modelling of a NaI(Tl) scintillator detectors using MCNP simulation code. Journal of Materials and Environmental Science, 8(12), 4560–4565, (2017). page :??

[24] <https://www.wolfram.com/mathematica/trial/>

Annexe A Géométrie du détecteur NaI(Tl) avec Geant4

```
// -----Geometry and materials-----
G4NistManager* nistMan = G4NistManager::Instance();
//G4Material* Air = nistMan->FindOrBuildMaterial("G4_AIR");
G4Material* Al = nistMan->FindOrBuildMaterial("G4_Al");
// G4Material* detMaterial = nistMan->FindOrBuildMaterial("G4_SODIUM_IODIDE");
G4Material* Vacuum= new G4Material("vacuum",1.,1.008*g/mole,1.e-25*g/cm3,kStateGas, 2.

//..... world.....

G4Box* world_box = new G4Box("world", 20*cm,20*cm,20*cm);
G4LogicalVolume* world_log = new G4LogicalVolume(world_box,Vacuum, "world");
G4VPPhysicalVolume* world_phys = new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(), world_log, "worl

//-----Le cylindre de SiO2-----
// Cylindre N1 : Diamètre = 25.585 mm et Hauteur= 0.3 mm
G4Tubs* SiO2_tube1 = new G4Tubs("SiO2-tube1", 0, 25.585*mm,0.15*mm, 0, 180*deg);
G4LogicalVolume* SiO2_log1 = new G4LogicalVolume(SiO2_tube1, NaI, "SiO2-tube1");
new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0,0,-25.55*mm), SiO2_log1, "SiO2-tube1", world_log

G4VisAttributes* SiO21Attributes = new G4VisAttributes(G4Colour::Green());
SiO21Attributes->SetForceSolid(true);
SiO2_log1->SetVisAttributes(SiO21Attributes);

//----- Les cylindre d'Aluminium -----
// Cylindre N1 : Diamètre externe =26.085 mm et Diamètre Interne =25.735 mm et Hauteu
G4Tubs* Al_tube1 = new G4Tubs("Al-tube1", 25.585*mm, 26.085*mm,25.735*mm, 0,180*deg);
G4LogicalVolume* Al_log1 = new G4LogicalVolume(Al_tube1, Al, "Al-log1");
new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0,0,0), Al_log1, "Al-phys1", world_log, false, 0);
```

```

G4VisAttributes* Al1Attributes = new G4VisAttributes(G4Colour::Red());
Al1Attributes->SetForceSolid(true);
Al_log1->SetVisAttributes(Al1Attributes);

// Cylindre N2 : Diamètre =26.085 et Hauteur= 0.5 mm
G4Tubs* Al_tube2 = new G4Tubs("Al-tube2", 0, 26.085*mm,0.25*mm, 0, 180*deg);
G4LogicalVolume* Al_log2 = new G4LogicalVolume(Al_tube2, Al, "Al-log2");
  new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0,0,25.835*mm), Al_log2, "Al_phys2", world_log, fa
//G4Colour white (1.0, 1.0, 1.0) ;
G4VisAttributes* Al2Attributes =new G4VisAttributes(G4Colour::Red());
Al2Attributes->SetForceSolid(true);
Al_log2->SetVisAttributes(Al2Attributes);

//----- Les cylindres de MgO -----
// Cylindre N1 : Diamètre =25.585 et Hauteur= 0.185 mm
G4Tubs* Mg0_tube1 = new G4Tubs("Mg0-tube1", 0, 25.585*mm,0.0925*mm, 0, 180*deg);
G4LogicalVolume* Mg0_log1 = new G4LogicalVolume(Mg0_tube1, Mg0, "Mg0-log1");
  new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0,0,25.4925*mm), Mg0_log1, "Mg0_phys1", world_log,

//G4Colour blue (0.0, 0.0, 1.0) ;
G4VisAttributes* Mg01Attributes =new G4VisAttributes(G4Colour::Blue());
Mg01Attributes->SetForceSolid(true);
Mg0_log1->SetVisAttributes(Mg01Attributes);

// Cylindre N2 : Diamètre =25.585*mm et Hauteur= 0.185*mm mm

G4Tubs* Mg0_tube2 = new G4Tubs("Mg0-tube2", 0, 25.585*mm,0.0925*mm, 0, 180*deg);
G4LogicalVolume* Mg0_log2 = new G4LogicalVolume(Mg0_tube2, Mg0, "Mg0-log2");
  new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0,0, -25.7925*mm), Mg0_log2, "Mg0_phys2", world_log

G4VisAttributes* Mg02Attributes =new G4VisAttributes(G4Colour::Blue());
Mg02Attributes->SetForceSolid(true);
Mg0_log2->SetVisAttributes(Mg02Attributes);

// Cylindre N3 : Diamètre externe =25.585 mm et Diamètre Interne =25.4 mm et Hauteur=
G4Tubs* Mg0_tube3 = new G4Tubs("Mg0-tube3", 25.4*mm, 25.585*mm,25.4*mm, 0, 180*deg);
G4LogicalVolume* Mg0_log3 = new G4LogicalVolume(Mg0_tube3, Mg0, "Mg0-log3");
  new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0, 0,0), Mg0_log3, "Mg0_phys3", world_log, false, 0

G4VisAttributes* Mg03Attributes = new G4VisAttributes(G4Colour::Blue());
Mg03Attributes->SetForceSolid(true);
Mg0_log3->SetVisAttributes(Mg03Attributes);

```

```
//-----Le cylindre deNaI-----  
// Cylindre N1 : Diamètre = 25.4 mm et Hauteur= 50.8 mm  
G4Tubs* NaI_tube1 = new G4Tubs("NaI-tube1", 0,25.4*mm,25.4*mm,0, 180*deg);  
G4LogicalVolume* NaI_log1 = new G4LogicalVolume(NaI_tube1, NaI, "NaI-tube1");  
new G4PVPlacement(0, G4ThreeVector(0, 0,0), NaI_log1, "NaI-tube1", world_log, false, 0  
  
G4VisAttributes* NaI1Attributes = new G4VisAttributes(G4Colour::Yellow());  
NaI1Attributes->SetForceSolid(true);  
NaI_log1->SetVisAttributes(NaI1Attributes);  
  
DetectorSD* detectorSD = new DetectorSD("DetectorSD");  
G4SDManager* sdMan = G4SDManager::GetSDMpointer();  
sdMan->AddNewDetector(detectorSD);  
NaI_log1->SetSensitiveDetector(detectorSD);
```