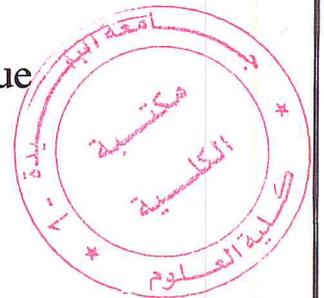


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Saad Dahlab Blida 1



Faculté des Sciences
Département de Physique
Laboratoire de Physique Théorique et Interactions Rayonnement matière.
LPTHIRM

Mémoire de fin d'étude
Pour l'obtention du diplôme de Master en Physique



Option : Physique des Rayonnements.

Thème :

Etude de l'auto-absorption des raies gamma dans différents types d'échantillons en masse.

Présenté par :

Djane Hamed Sara

Reguieg Sara

Soutenu le 08 Juillet 2018 devant le jury composé de :

Mr. M. Chekirine	Maître de conférences B	U. S. D.-Blida 1	Président
Mr. A. Diaf	Professeur	U. S. D.-Blida 1	Examineur
Mr. R. Khelifi	Professeur	U. S. B.-Blida 1	Rapporteur

Blida 2017/2018

A mon père

Qui n'a jamais cessés de m'encourager dans mes efforts.

Il a été d'un très grand soutien pour moi.

À mes frères

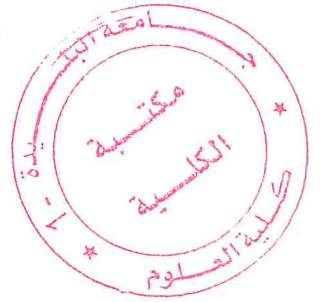
Mammaer et youcef

À ma sœur

Razika

A mon futur mari

Sofiane



A mes chers parents

Qui n'ont jamais cessés de m'encourager dans mes efforts.

Ils ont été d'un très grand soutien pour moi.

À mes frères

Rahim, Zaki,

A mon futur mari

Mohamed

Remercîments :

Nous désirons exprimer tout d'abord notre reconnaissance à Monsieur M. Chekirine Maitre de conférence classe B à la Faculté des Sciences de l'université de Blida 1, pour avoir accepté d'examiner ce travail et accepté de présider le jury d'examen et Monsieur A.Diaf professeur a la Faculté des Sciences de l'université de khemis Miliana pour avoir accepté d'examiner ce travail.

Avec toutes nos sincères reconnaissances, nous adressons nos vifs remerciements à notre encadreur Monsieur R.khelifi professeur à la Faculté des Sciences de l'université de Blida 1 pour la confiance qu'il a su nous accorder afin de réaliser ce projet et pour sa disponibilité et son amabilité.

Qu'il soit un honneur que d'éprouver tous nos sentiments de gratitude envers toute personne qui a contribué de près ou de loin à la réalisation de ce projet de fin d'étude et à son accomplissement dans des conditions favorables.

Le mémoire a parfois été un moment difficile pour nos proches. Un remerciement particulier et spécial pour nos parents pour leurs présence, leurs soutien et encouragements incessants Malgré certains moments difficiles ils ont restés disponibles et très compréhensives. On adresse nos chaleureux remerciements pour nos frères pour leur présence et soutiens infaillibles. On aimera leur témoigner notre gratitude pour ce qu'ils ont fait pour nous. Merci de nous avoir accompagnés dans cette expérience. A vous tous, sachez que on vous aime.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Interaction rayonnement – Matière	
1.1. Introduction	
1.2. Rayon gamma.....	3
1.3. Noyaux radioactifs.....	3
1.4. Interaction rayonnement matière.....	4
1.4.1. Effet photoélectrique.....	4
1.4.2. Effet Compton.....	5
1.4.3. Effet de matérialisation (la création de paire).....	6
1.4.4. Domaine de prépondérance de chacun des effets.....	7
1.5. Atténuation des rayonnements électromagnétique par la matière et sections efficaces.....	8
1.6. Auto-absorption.....	10
1.6.1. Méthodes de correction.	11
1.6.1.1. Méthode de transmission	11
1.6.1.2. Méthode Monte Carlo.....	11
1.7. Détection des photons.....	12
1.7.1. Détecteur semi-conducteur.....	12
1.7.2. Détecteur scintillateur.....	13
Chapitre 2 : Simulation	
2.1. Simulation Monte-Carlo.....	16

2.1.1.	Généralités sur la méthode Monte Carlo.....	16
2.1.2.	Incertitudes statistiques.....	17
2.1.3.	Transport des particules.....	18
2.1.4.	Modélisation de l'interaction photon-matière.....	18
2.2.	GEANT 4	19
2.2.1	Architecture.....	20
2.2.2	Géométrie.....	22
2.2.3	Génération des particules primaires.....	23
2.2.4	Particules et processus physiques.....	24
2.3.	X-COM	24
2.3.1.	Le programme XCOM.....	26
2.3.1.1.	Aperçu.....	26
2.3.1.2.	Le premier formulaire.....	26
2.3.1.3.	Éléments.....	27
2.3.1.4.	Composé.....	27
2.3.1.5.	Mélange.....	27
2.3.1.6.	Titre de sortie optionnel.....	28
2.3.1.7.	La liste d'énergie.....	28
2.3.1.8.	Unités de sortie.	29
2.3.1.9.	Le graphique.....	29
2.3.1.10.	La table de sortie.....	30

Chapitre 3: Matériels et méthodes.

Introduction.....	31
3.1. Méthode expérimental.	31
3.1.1. Matériels	31
3.1.1.1. Chaîne de détection.....	31
3.1.1.2. Calibration en énergie.....	33
3.1.1.3. Analyse spectral.....	34
3.1.2. Méthodes	35

3.1.2.1.	Atténuation et auto-absorption des rayons gamma.....	35
3.1.2.2.	Principe de la Méthode de transmission.....	36
3.1.2.3.	Calcul de Z_{eff}	37
3.2.	Simulation.....	38
3.2.1.	Géométrie Géant4.....	38
3.2.1.1.	G4DétertreConstruction.....	38
3.2.1.2.	Générations des particules primaires.....	40
3.2.1.3.	Extractions de données.....	41

Chapitre 4: Résultats et Discussions.

Introduction.....	43
4.1. Comparaison des coefficients d'atténuations expérimentales, entre X-COM et Géant4.....	43
4.2. Evaluation du coefficient d'auto absorption.....	47
4.3. Simulation Monte Carlo par Géant4.....	49
4.3.1. Influence de la densité sur l'auto absorption.....	49
4.3.2. Influence de Z_{eff} sur l'auto absorption.....	52
Conclusion général.....	56
Bibliographie.	57
Annexes.....	60

Liste des figures :

1.1	Classification des radiations électromagnétiques selon leur énergie, fréquence et longueur d'onde.....	3
1.2	Schéma de désintégration de l'euporium.....	4
1.3	Effet photoélectrique.....	5
1.4	Effet Compton.....	6
1.5	Effet de production de paire.....	7
1.6	Types d'interaction prépondérants suivant l'énergie du photon et le numéro atomique Z du milieu.....	8
1.7	Section efficace des processus d'interaction des γ dans le germanium.....	9
1.8	Atténuation des photons gamma dans le germanium.	10
1.9	Principe du semi-conducteur : structure des bandes et fonctionnement.....	13
1.10	Principe du scintillateur : structure des bandes et fonctionnement.	14
2.1	Organigramme de l'histoire d'une particule par la méthode Monte Carlo.....	17
2.2	Simulation Monte Carlo des interactions photons-matière.....	18
2.3	Architecture minimale d'un code de simulation dans GEANT4.....	21
2.4	Choix du type de matériau dans X-COM.....	26
2.5	La fenêtre dans laquelle on peut faire entrer des énergies supplémentaires.....	27
2.6	Formalisme dans X-COM.....	27
2.7	Tableau de sortie X-COM.....	28
2.8	Page de sortie X-COM.....	29
3.1	Schéma représentatif de la chaîne de spectrométrie gamma.....	31

3.2	La droite de la calibration en énergie.....	34
3.3	Source radioactive d' Eu^{152}	34
3.4	Schéma descriptive de la méthode de transmission.....	36
3.5	Dispositif expérimentale pour la méthode de transmission.	36
3.6	Produits syntétiques utilisé dans se travail.....	37
3.7	Définition d'un élément pour une simulation MC(Géant4).....	39
3.8	Définition d'un composé pour une simulation MC(Géant4).....	39
3.9	Définition de la géométrie et le contenue de l'échantillon pour une simulation MC(Géant4).....	40
3.10	Génération de particules pour une simulation MC(Géant4).....	41
3.11	La physique liste d'une simulation MC (Géant4).....	41
3.12	Extraction de résultats pour une simulation MC(Géant4).....	42
4.1	Coefficient d'atténuation de l'échantillon P1 ($\rho = 1\text{g/cm}^3$) par Exp, X-COME et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu	45
4.2	Coefficient d'atténuation de l'échantillon P4 ($\rho = 2.7\text{g/cm}^3$) par Exp, X-COME et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu	45
4.3	Coefficient d'atténuation de l'échantillon P7 ($\rho = 4.69\text{g/cm}^3$) par Exp, X-COME et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu	46
4.4	Coefficient d'atténuation de l'échantillon P8 ($\rho = 6.47\text{g/cm}^3$) par Exp, X-COME et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu	46
4.5	Coefficient d'atténuation de l'échantillon P10 ($\rho = 7.87\text{g/cm}^3$) par Exp, X-COME et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu	47
4.6	Facteur de correction d'auto absorption de différents échantillons par Exp, X- COME et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu	48
4.7	Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie et de la masse volumique.....	50

4.8	Variation du coefficient d'atténuation en fonction de ρ (composition chimique fixe H ₂ O) pour une énergie de 583Kev.....	51
4.9	Variation du coefficient d'auto absorption en fonction de la masse volumique ρ pour une composition chimique fixe (H ₂ O) pour différentes énergies.....	52
4.10	Variation du coefficient d'atténuation en fonction de Z_{eff} pour une énergie de 583Kev et une masse volumique $\rho = 3\text{g/cm}^3$	53
4.11	Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie et du numéro atomique.....	54
4.12	Variation du coefficient d'auto absorption en fonction de Z_{eff} pour différents énergies et un ρ fixe $\rho=3(\text{g/cm}^3)$	55
4.13	Coefficient d'auto absorption de l'eau $\rho = 1\text{g/cm}^3$ en fonction de l'énergie (121KeV à 2614.6KeV).....	55

Liste des tableaux :

1.1	Propriétés des matériaux semi-conducteurs.	13
1.2	Propriétés des principaux (ou nouveaux) scintillateurs inorganiques utilisés en spectrométrie gamma.	15
3.1	Energies de pourcentage les plus élevées correspondantes a l'Eu ¹⁵²	34
4.1	Coefficients d'atténuation linéique expérimental, par X-COM et par monte Carlo (Géant4) des échantillons en fonction de l'énergie.....	44
4.2	Coefficient d'auto absorption expérimental, en fonction de la densité de l'échantillon et de l'énergie des rayonnements gamma d' ¹⁵² Eu.....	47
4.3	Coefficient d'auto absorption code de calcul X-COM, en fonction de la densité de l'échantillon et de l'énergie des rayonnements gamma d' ¹⁵² Eu	48
4.4	Coefficient d'auto absorption Simulation Monte Carlo(Géant4), en fonction de la densité de l'échantillon et de l'énergie des rayonnements gamma d' ¹⁵² Eu.	48
4.5	Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie E en (keV) et la masse volumique ρ en (g/cm ³).....	50
4.6	Variation du coefficient d'auto absorption en fonction de l'énergie E en (keV) et la masse volumique ρ en (g/cm ³).....	51
4.7	Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie E en (keV) et Z_{eff} « $\rho=3(\text{g/cm}^3)$ ».....	52
4.8	Variation du coefficient d'auto absorption en fonction de l'énergie E en (keV) et de Z_{eff} « $\rho=3(\text{g/cm}^3)$ ».....	54

Glossaire :

Ψ	Angle d'éjection du l'électron Compton.
Θ	Angle de diffusion du photon.
BGO	Bismuth Gaz d'Oxygène
NaI(Tl)	Détecteur scintillateur (Iodure de sodium contenant une trace d'iodure de thallium).
X-COM	Code de calcul.
μ	Coefficient d'atténuation.
μ_m	Coefficient d'atténuation massique.
C_{auto}	Coefficient d'auto absorption.
h	Constante de Planck $6.6260693 \cdot 10^{-19}$ J.S.
λ	Constante de désintégration radioactive.
α	Constante de structure fine.
e^-	Electron.
E_{γ}	Energie du photon.
E_c	Energie cinétique.
E_l	Energie de liaison de l'électron.
E_{l,K}	Energie de liaison de l'électron de la couche K.
T_{e-}	Energie cinétique du l'électron.
T_{e+}	Energie cinétique du positron.
Eu	Europium.
F_{att}	Facteur d'auto absorption.
v	Fréquence d'onde en (Hz).
Géant4	GEometry And Tracking.
GeV	Giga électron volt.
γ	Photon gamma.
X	photon X.

e⁺	Positron (l'antiparticule de l'électron).
KeV	Kilo électron volt.
m_e	Masse de l'électron (m _e =9.1093826 10 ⁻³¹ Kg)
ρ	Masse volumique
M	Masse molaire du matériau
Mev	Méga électron volt.
N₀	Nombre de noyau initial.
N(t)	Nombre de noyau a l'instant (t).
N_a	Nombre d'Avogadro (N _a =6.0023 10 ²³ Atomes. Mole ⁻¹).
I₀	Nombre de photons incidents.
I	Nombre de photons transmit.
Z	Numéro atomique de la cible.
Pb	Plomb.
r_e	Rayon de Bohr.
σ_{pe}	Section efficace de l'effet photoélectrique.
σ_c	Section efficace de l'effet Compton.
σ_p	Section efficace de l'effet de matérialisation.
σ_{tot}	Section efficace totale.
C	Vitesse de la lumière (C=3.8 10 ⁸ S ⁻¹).

Résumé :

La spectrométrie gamma est une technique non destructive de mesure nucléaire, très utilisée pour identifier et qualifier les éléments radioactifs par la mesure de l'énergie et nombre de photons émis. Cependant, dans le cadre des échantillons en masse il est nécessaire de corriger les pertes de comptage dues à l'auto absorption de ces photons.

A cet effet, des coefficients d'atténuation ont été mesurés expérimentalement et calculée par le code X-COM et le code de simulation Géant4. Les résultats obtenus par les trois méthodes présentent une bonne concordance (La simulation par le code Géant 4 est donc validée pour ce type de mesure). Ainsi, les coefficients d'auto-absorption ont été déduits pour différents types d'échantillons. En application, ces coefficients ont été déterminés par simulation à l'aide de Geant4 pour la mesure de la radioactivité naturelle.

Abstract :

Gamma spectrometry is a non-destructive nuclear measurement technique, widely used to identify and qualify radioactive elements by measuring energy and the number of photons emitted. However, in the context of bulk samples it is necessary to correct the counting losses due to the self absorption of these photons.

For this purpose, attenuation coefficients have been measured experimentally and calculated by the X-COM code and the Géant4 simulation code. The obtained results by the three methods have good agreement (the simulation with the Giant Code 4 is validated for this type of measurement). Thus, the self-absorption coefficients were deduced for different types of samples. In application, these coefficients were determined by simulation using Geant4 for the measurement of natural radioactivity.

ملخص :

التصوير الطيفي غاما هو تقنية قياس نووي غير متلف ، تستخدم على نطاق واسع لتحديد وتأهيل العناصر المشعة من خلال قياس الطاقة وعدد الفوتونات المنبعثة. ومع ذلك ، في سياق العينات ذات الحجم الكبير من الضروري تصحيح العد بسبب امتصاص العينة لهذه الفوتونات..

X-COM ورمز محاكاة Géant4 لهذا الغرض، تم قياس معاملات التوهين تجريبياً وحسابها بواسطة رمز حساب النتائج التي تم الحصول عليها من خلال الطرق الثلاث متقاربة (تم التحقق من صحة المحاكاة لهذا النوع من القياس. وبالتالي، تم استنتاج معاملات الامتصاص الذاتي لأنواع مختلفة من العينات. في التطبيق ، تم تحديد هذه المعاملات عن طريق قياس النشاط الإشعاعي الطبيعي باستخدام المحاكاة Geant4

Introduction générale.

INTRODUCTION GÉNÉRALE.

Le présent travail a été préparé au niveau du Laboratoire de Physique Théorique et Interaction Rayonnement Matière (LPTHIRM), Département de Physique, Université Saad Dahlab Blida1 (USDB1). Il s'agit de l'utilisation des échantillons en masse en spectrométrie gamma qui est une des techniques multi-élémentaires qualitatives et quantitatives les plus fréquemment utilisées dans le domaine de la mesure nucléaire. Elle a l'avantage d'être performante et non destructive, applicable aux différents types d'échantillons. L'estimation précise de l'activité d'un échantillon nécessite de prendre en compte tous les phénomènes physiques d'interaction rayonnement-matière impactant directement le résultat de la mesure. L'étude de l'auto absorption des raies gamma dans différents types d'échantillons en masse est nécessaire pour la correction des pertes de comptage.

Pour cela, une chaîne de détection gamma avec un détecteur à scintillation (NaI(Tl)) a été utilisée pour la mesure des coefficients d'atténuation par la méthode de transmission. Le code X-COM a permis la validation de la mesure pour des produits synthétiques de composition élémentaire bien connue. La validation du code de simulation Monte Carlo (Geant4) pour ce type de mesure a été faite pour palier à la limite énergétique de la source d' ^{152}Eu . En application à la radioactivité naturelle, les coefficients d'auto-absorption ont été calculés en fonction de la densité et le Z_{eff} d'un échantillon en masse donné.

Le manuscrit est scindé en quatre chapitres. Le premier chapitre rappelle brièvement les différents processus d'interaction des photons avec la matière et l'atténuation des rayonnements électromagnétiques par la matière. Nous décrivons également les diverses méthodes de détection des rayonnements à base des détecteurs à semi-conducteurs et des détecteurs scintillateurs.

Le deuxième chapitre est consacré à la description des méthodes de simulation Monte Carlo et au transport des particules. Ces codes deviennent un outil essentiel en physique de l'interaction rayonnement-matière tant dans le domaine de l'instrumentation nucléaire que dans celui de la radioprotection et de la médecine nucléaire. La possibilité d'inclure une grande partie des processus physiques sous forme de modèles numériques de plus en plus sophistiqués les rendent à la fois plus précis, fiables et prédictifs. Ils permettent en outre de remonter aux grandeurs inaccessibles expérimentalement. L'accent est mis plus particulièrement sur le code utilisé dans ce travail : le code GEANT4 (GEometry ANd Tracking) produit du CERN. Nous avons également montré la méthode d'exécution du programme X-COM.

Le troisième chapitre est dédié à la description des méthodes et matériels utilisés dans ce travail, notamment la chaîne de détection, et le principe de la méthode de transmission. Nous représentons également les diverses étapes suivies pour la simulation.

INTRODUCTION GÉNÉRALE.

Le chapitre quatre concerne l'étude et l'évaluation expérimentales et la simulation de l'auto-absorption dans les différents échantillons. Ce paramètre présente la fraction absorbée que subissent les photons avant d'atteindre le détecteur. Ce phénomène dépend de l'énergie du photon incident, de la densité, et du numéro atomique de l'échantillon (Z_{eff}).

Des mesures expérimentales ont été réalisées et complétées par des calculs de modélisation X-COM, et Monte Carlo en utilisant Geant4. Le protocole expérimental et la simulation pour mesurer le coefficient d'auto-absorption sont reposés sur la technique de transmission.

Chapitre 1: Interaction Rayonnements- Matière.

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

1.1. introduction

D'une manière générale, on peut définir un rayonnement ou radiation comme un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'onde électromagnétique ou de particules. Les rayonnements ne peuvent être détectés et caractérisés qu'avec leur interaction avec la matière dans laquelle ils se propagent. Ils peuvent céder au milieu qu'ils traversent la totalité ou une partie de leur énergie au cours de ces interactions.

1.2 Rayon gamma :

On appelle rayon gamma la radiation électromagnétique émise lors d'une désintégration nucléaire d'un noyau radioactif.

On rappelle la relation liant l'énergie E exprimée en eV à la longueur d'onde λ du rayonnement exprimée en nm. La figure (1.1) illustre le spectre électromagnétique.

$$E_{\gamma}(eV) = h\nu = \frac{1240}{\lambda(nm)} \quad (1.1)$$

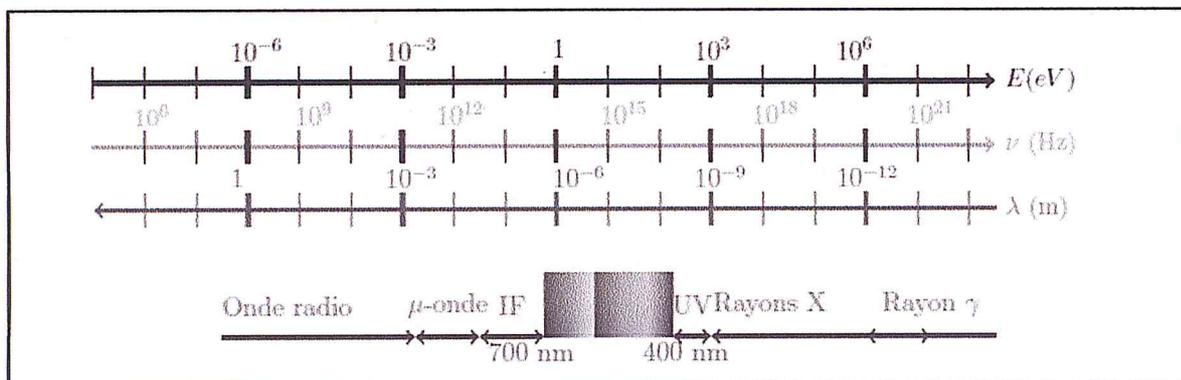


Figure (1.1) : Classification des radiations électromagnétiques selon leur énergie, fréquence et longueur d'onde.

1.3. Noyaux radioactifs :

Un noyau n'est stable que si l'assemblage des Z protons et N neutrons qui le constitue sont liés. Dans le cas contraire, il est instable. Le noyau va spontanément se transformer en d'autres noyaux afin de revenir vers un état plus stable. Cette transformation s'accompagne de l'émission de rayonnement. [1]

La désexcitation d'un noyau suite par l'émission d'un rayonnement gamma peut être représenté par la relation :



CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

Avec X représente l'état fondamental du noyau ou un état excité d'énergie inférieur à celle de X*

Le retour à l'état fondamental s'effectue dans certains cas en passant par plusieurs états excités intermédiaires, il en résulte l'émission de plusieurs rayonnements.

Exemple : voir figure (1.2). [2]

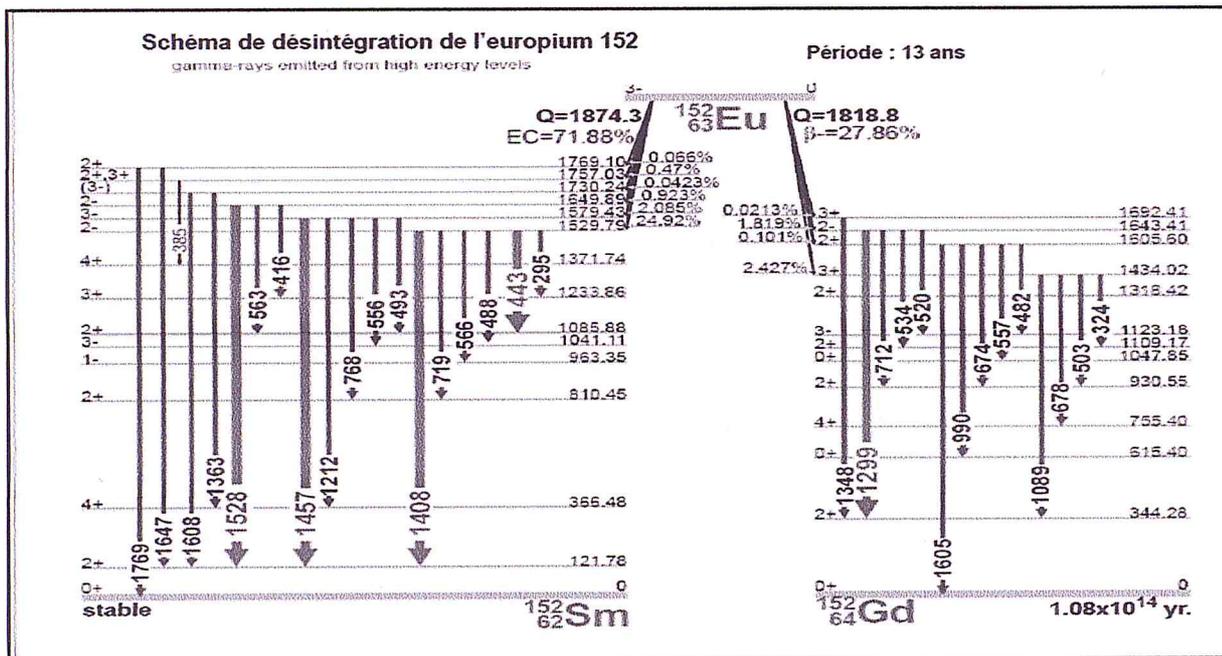


Figure (1.2): Schéma de désintégration de l'euporium.

1.4. Interaction Rayonnement-Matière :

L'interaction des photons avec le milieu dépend de : l'énergie du photon incident, la densité et la composition chimique du milieu. Lorsque les rayonnements électromagnétiques pénètrent dans la matière (Rayons X ou γ), plusieurs types d'interactions peuvent avoir lieu. Les photons incidents peuvent être absorbés par les atomes cibles : c'est l'effet photoélectrique, comme ils peuvent être déviés de leur trajectoire incidente avec modification de leur énergie : c'est la diffusion Compton. D'autres interactions moins importantes peuvent également se produire : être dévié sans modification de l'énergie, c'est la diffusion Rayleigh. Pour des photons très énergétiques (quelques MeV), il peut y avoir le processus de création de paires électron-positron (e^- , e^+).

1.4.1. Effet photoélectrique :

L'effet photoélectrique est le transfert totale de l'énergie du photon incident à un électron du cortège électronique de l'atome cible ; celui-ci est alors expulsé de son atome avec une certaine énergie cinétique. Voir figure (1.3).

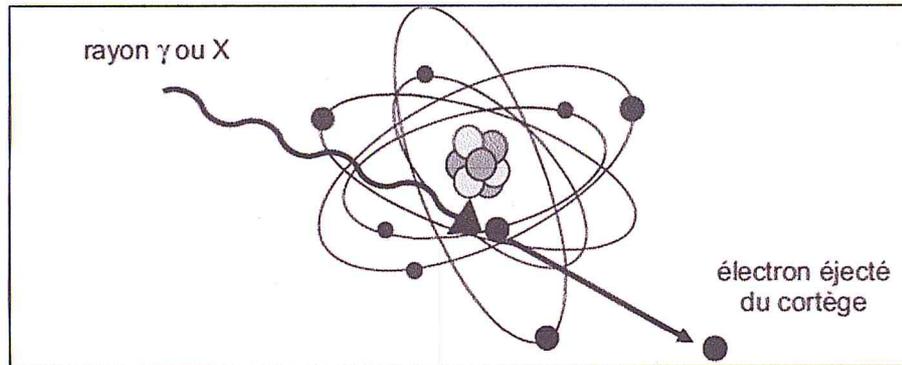


Figure (1.3): Effet photoélectrique.

La valeur de l'énergie cinétique E_c est donnée par la relation suivante :

$$E_c = E_\gamma - E_L \quad (1.3)$$

Avec E_γ est l'énergie du rayonnement électromagnétique incident et E_L est l'énergie de liaison de l'électron atomique à sa couche électronique. [1]

La section efficace de l'effet photoélectrique dépend du nombre atomique Z et de l'énergie du photon incident E_γ suivant la loi :

$$\sigma_{pe} \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^m} \quad (1.4)$$

Avec $1 \leq m \leq 3.5$ ($m=3.5$ à basse énergie et $m=1$ pour $E_\gamma > 0.5$ Mev) et $4 \leq n \leq 5$ ($n=4.5$ en moyenne et $n=5$ pour $E_\gamma > E_{L,K}$). Dans ce dernier cas l'effet photoélectrique se produit à 80% sur cette couche. [4]

La lacune produit par l'ionisation de l'électron d'une couche électronique interne est complété soit par une réorganisation des électrons de l'atome ionisée (effet Auger), soit par une transition radiative (fluorescence).

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

1.4.2. Effet Compton :

L'effet Compton est le transfert partiel de l'énergie (E_γ) du photon incident à un électron de la couche externe de l'atome cible. Il est suivi par la diffusion d'un photon d'énergie $E_{\gamma'}$, tel que $E_{\gamma'} < E_\gamma$, selon un angle θ ($0 \leq \theta \leq \pi$) par rapport à la direction du photon incident, et l'éjection d'un électron (dit électron Compton) selon un angle φ ($0 \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2}$) avec une énergie cinétique E_e . Voir figure (1.4).

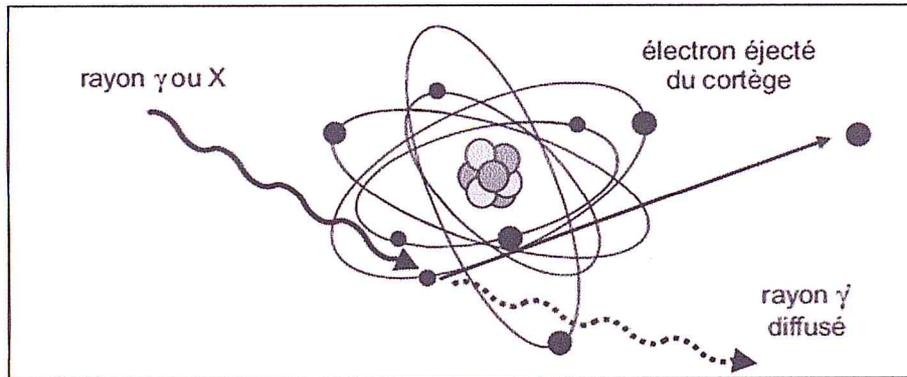


Figure (1.4): Effet Compton.

La conservation de l'énergie totale et de l'impulsion donne :

$$E_{\gamma'} = \frac{E_\gamma}{1 + \varepsilon(1 - \cos\theta)} \quad (1.5)$$

Et
$$E_e = E_\gamma - E_{\gamma'} = \frac{\varepsilon(1 - \cos\theta)}{1 + \varepsilon(1 - \cos\theta)} E_\gamma \quad (1.6)$$

Avec $\varepsilon = \frac{E_\gamma}{E_0}$

E_0 Est l'énergie de l'électron au repos. [4, 5]

La section efficace différentielle de cet effet est donnée par la formule de Klein et Nishina :

$$\frac{d\sigma_c}{d\Omega} = \frac{r_e^2}{2} \frac{1}{[1 + \alpha(1 - \cos\theta)]^2} \left[1 + \cos^2\theta + \frac{\alpha^2(1 - \cos\theta)}{1 + \alpha(1 - \cos\theta)} \right] \quad (1.7)$$

α Étant la constante de structure fine, et r_e le rayon classique de Bohr. [3]

L'effet Compton est prépondérant pour les Z faibles, et des photons d'énergie comprise entre 0.2 MeV et quelque MeV ($\sigma_c \propto Z$).

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

1.4.3. Effet de matérialisation (la création de paire) :

La création de paire est un processus qui se produit dans le champ Coulombien du noyau. Si l'énergie E_γ du rayonnement incident est suffisante ($E_\gamma \geq 2E_0, E_0 = 0.511 \text{ Mev}$), ce dernier va disparaître et donne naissance à un positron et un électron (Figure 1.5). Il est à noter que la création de paire peut aussi se produire dans le champ coulombien d'un électron même si la probabilité est faible. Dans ce cas, le seuil de l'énergie E_γ est de $4E_0$.

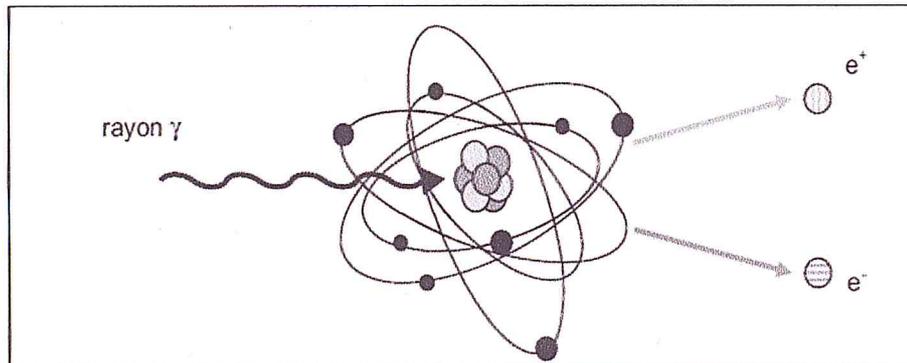


Figure (1.5): Effet de production de paire.

Si on se contente d'étudier les matérialisations qui se produisent dans le champ du noyau, la loi de conservation de l'énergie s'écrit :

$$E_\gamma = 2m_e c^2 + T_{e^-} + T_{e^+} \quad (1.8)$$

La section efficace de l'effet de matérialisation augmente lorsque l'énergie augmente, contrairement à l'effet photoélectrique et Compton. Elle varie également selon le numéro atomique Z de la cible :

$$\sigma_{cp} \propto Z^2 \quad (1.9)$$

1.4.4. Domaine de prépondérance de chacun des effets :

La probabilité d'occurrence de l'un des trois effets est fonction de l'énergie du rayonnement électromagnétique considéré et de la nature de la matière dans laquelle ce rayonnement se propage.

La figure (1.6) représente les domaines de l'occurrence des trois modes d'interaction des photons avec la matière en fonction du numéro atomique Z et de l'énergie des photons.

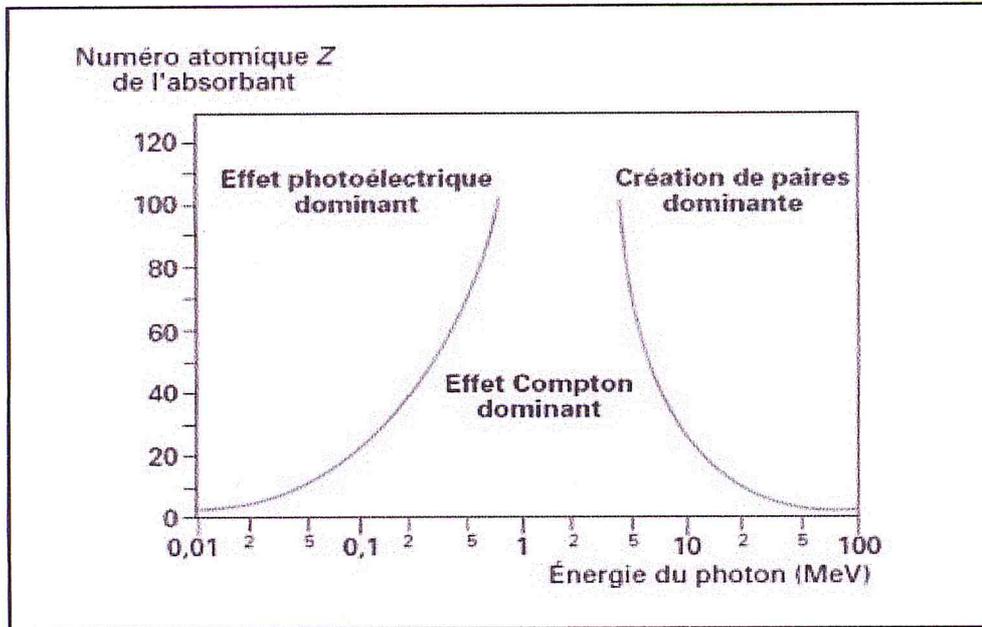


Figure (1.6): Types d'interaction prépondérants suivant l'énergie du photon et le numéro atomique Z du milieu [6].

Les lignes de séparation représentent les couples de valeurs de Z et de l'énergie pour lesquelles deux effets sont égaux. [7]

1.5. Atténuation des rayonnements électromagnétique par la matière et sections efficace :

L'atténuation est la diminution de l'intensité d'un faisceau de photons lorsqu'il traverse un milieu.

L'atténuation du faisceau incident résulte de l'absorption des photons par effet photoélectrique, effet Compton, et si l'énergie des photons est suffisante, par création de paire. Elle s'exprime par le coefficient d'atténuation μ qui présente la fraction des photons incidents interagissant par unité de longueur. Donc, pour N_0 photons incidents, le nombre N de photon qui traversent une épaisseur x de matériau sans interagir est donnée par une loi exponentielle décroissante (de Beer-Lambert):

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x} \quad (1.10)$$

Ce coefficient tient compte des sections efficaces des trois processus d'interaction photon-matière.

La probabilité qu'un photon interagisse avec la matière peut être décrite en termes de section efficace d'interaction.

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

Si on appelle σ_{tot} la section efficace totale d'interaction, et si on désigne par σ_{pe} , σ_c , σ_p les sections efficaces de l'effet photoélectrique, l'effet Compton et de la création de paire respectivement, relations (1.4) (1.7) (1.9), on pose :

$$\sigma_{tot} = \sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_{cp} \quad (1.11)$$

La figure (1.7) représente la section efficace des processus d'interaction des photons γ dans le germanium, pour des énergies incidentes allant de 1 KeV à 1 GeV. Cette figure montre que, dans le germanium, l'effet photoélectrique est prépondérant pour des photons d'énergie incidente inférieure à 150 KeV. Entre 150 KeV et 8.5 MeV, la diffusion Compton devient le processus d'interaction le plus probable puis, pour des énergies supérieures, la création de paires dans le champ coulombien du noyau est le processus prépondérant. En sommant ces effets, la section efficace totale est obtenue et permet de montrer que les trois processus précédemment décrit sont bien les principaux acteurs de l'interaction γ /matière.

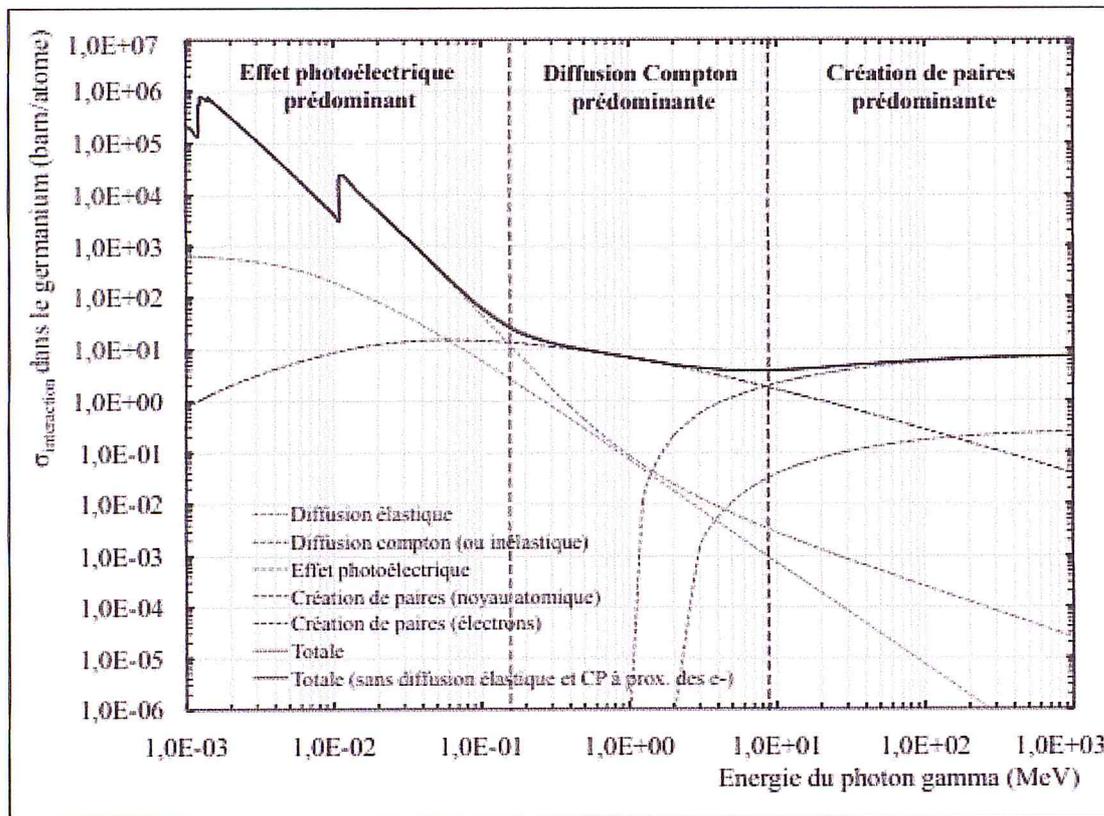


Figure (1.7): Section efficace des processus d'interaction des γ dans le germanium. [8]

Le coefficient d'atténuation est défini par :

$$\mu = \frac{\sigma_{tot} N_a \rho}{M} \quad (1.12)$$

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

N_a Est le nombre d'Avogadro ($N_a = 6.0023 \cdot 10^{23} \text{ Atomes.Mol}^{-1}$), ρ et M sont respectivement la densité et la masse molaire du matériau traversé. [7]

Le coefficient d'atténuation massique est défini par le rapport (figure 1.8) :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.13)$$

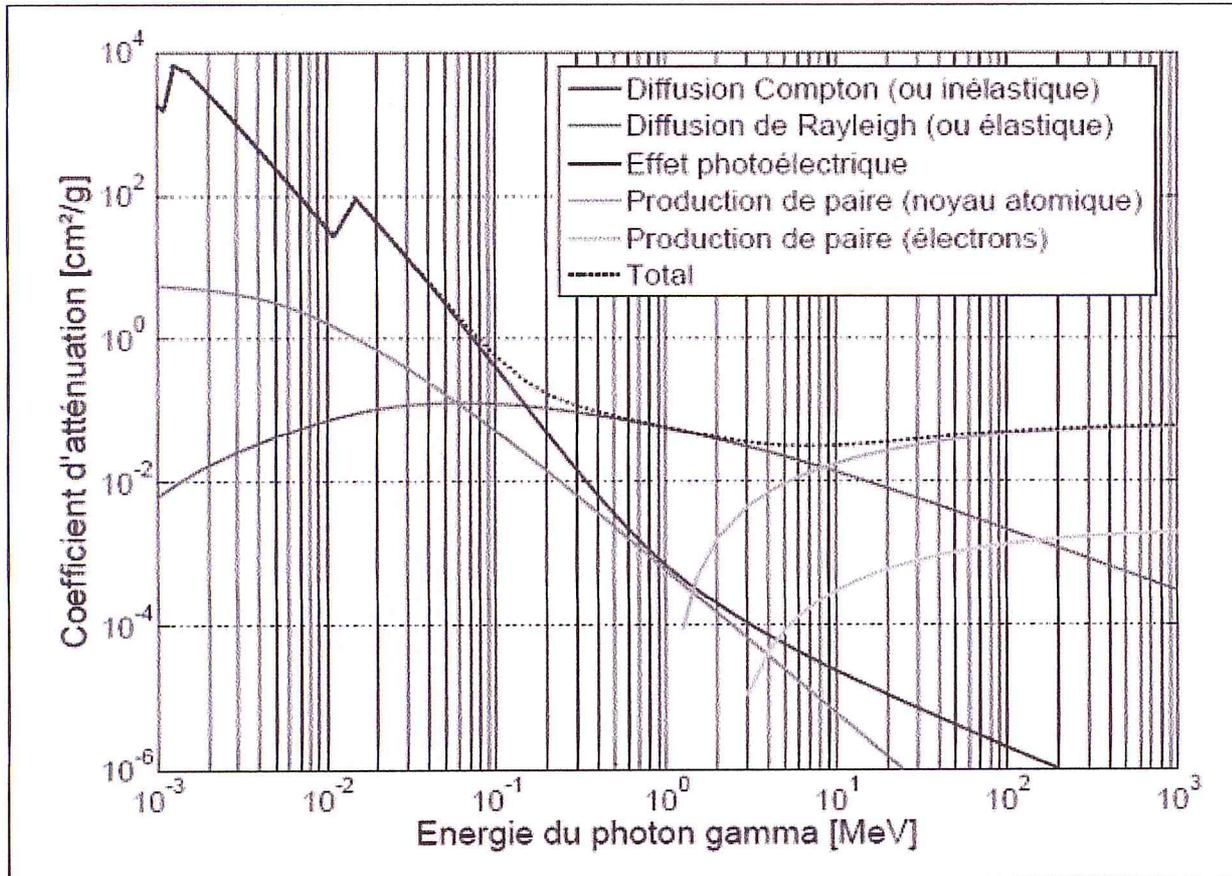


Figure (1.8): Atténuation des photons gamma dans le germanium. [8]

1.6. Auto-absorption :

L'auto-absorption est un facteur déterminant en spectrométrie γ . Il se manifeste par des pertes d'impulsions et la sous-estimation de l'efficacité pour un rayonnement γ d'une énergie donnée. Il dépend de l'énergie incidente, de la densité de l'échantillon, de son volume et du nombre atomique Z du milieu (matrice) [9]. Il concerne les échantillons qui ont des propriétés différentes de celles de l'étalon. Afin de prendre en considération les pertes causées par ce phénomène, il est nécessaire de corriger la surface du pic d'absorption totale. L'auto-absorption concerne les photons qui n'atteignent pas le détecteur à cause de leur atténuation.

1.6.1. Méthodes de correction :

Plusieurs études ont été proposées pour la correction des effets de l'auto-absorption. La méthode théorique développée par Appleby et al. [40] consiste à calculer le coefficient de correction en utilisant les facteurs d'atténuation. Il s'agit du rapport du facteur d'atténuation d'un photon dans l'étalon à celui de l'échantillon. Cette méthode nécessite la connaissance du coefficient d'atténuation linéique des échantillons mesurés. D'autres méthodes expérimentales [11, 12] ou simulations Monte Carlo sont aussi développées afin de corriger l'auto-absorption.

1.6.1.1 Méthode de transmission :

Cette méthode a été développée par Cutshall et al. [13]. L'auto-absorption est l'atténuation qu'exerce un volume de matière sur sa propre émission de photon. Le facteur d'auto-absorption F_{att} lors de la mesure d'un étalon ou d'un échantillon, comparé à une mesure analogue sans matière, ne dépend que des aspects géométriques de détection.

L'utilisation de cette méthode nécessite la validité de deux hypothèses : la première est que le volume de la source soit homogène en ses éléments, sa densité ρ et sa concentration en activité. La deuxième hypothèse est que le parcours des photons soit normal à l'échantillon et au détecteur. L'exactitude de l'hypothèse d'homogénéité dépend de la préparation de l'étalon ou de l'échantillon.

L'atténuation dans l'échantillon F_{att} est définie [13] par :

$$F_{att} = \frac{\frac{I}{I_0} - 1}{\ln\left(\frac{I}{I_0}\right)} = \frac{1 - e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot x}}{\mu_m \cdot \rho \cdot x} \quad (1.14)$$

On définit le facteur de correction de l'auto-absorption C_{auto} comme étant le rapport du facteur d'auto-absorption de l'étalon à celui de l'échantillon.

$$C_{auto} = \frac{F_{att_{\text{échant}}}}{F_{att_{\text{étalon}}}} = \frac{\left(\frac{1 - e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot x}}{\mu_m \cdot \rho \cdot x}\right)_{\text{échant}}}{\left(\frac{1 - e^{-\mu_m \cdot \rho \cdot x}}{\mu_m \cdot \rho \cdot x}\right)_{\text{étalon}}} \quad (1.15)$$

1.6.1.2. Méthodes Monte Carlo:

On fait appel aux méthodes Monte Carlo (MCNPX, GEANT4, PENELOPE, EGS4, ...) qui consistent à modéliser séparément les échantillons et/ou les étalons dont les densités et les

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

compositions chimiques sont différentes. En considérant une géométrie de référence et en supposant que la simulation est correcte, le rapport entre les efficacités de référence (étalon) sur les efficacités à même énergie de l'échantillon fournit les coefficients d'auto-absorption.

$$C_{auto} = \frac{\varepsilon_{\text{étalon}}}{\varepsilon_{\text{échant}}} \quad (1.16)$$

La non connaissance de la composition chimique de l'échantillon rend l'utilisation de cette méthode quasi-impossible ou son utilisation approximative, surtout en dessous de 100 KeV.

1.7. Détection des photons :

Le principe de la détection d'un photon gamma repose sur la mesure de l'énergie qu'il a cédée (partiellement ou totalement) au matériau sensible via un des mécanismes d'ionisation. Cette section présente les deux principaux types de détecteurs utilisés en spectrométrie gamma dans le domaine d'énergie de quelque KeV à 10 MeV : les scintillateurs et les semi-conducteurs. Un aperçu général est également donné de la chaîne électronique permettant de traiter le signal, de l'impulsion électrique générée dans la partie sensible à l'acquisition du spectre gamma.

1.7.1. Détecteur à semi-conducteur

Les détecteurs à semi-conducteurs sont des détecteurs d'ionisation mais la particule détectée, au lieu de créer des paires ions-électrons dans la zone active, crée des paires électrons-trous dans le cristal. On utilise beaucoup des détecteurs à base de silicium pour détecter des ions lourds. L'intérêt des détecteurs semi-conducteurs est d'être compact et de ne nécessiter qu'environ 3 eV pour créer une paire électron-trou alors qu'il faut environ 30 eV dans une chambre d'ionisation et 300 eV dans cristal de BGO. La résolution est donc bien meilleure (les fluctuations statistiques sont plus faibles). Toutefois les chocs nucléaires en fin de parcours de la particule que l'on détecte sont moins bien gérés dans les détecteurs semi-conducteurs que dans les chambres d'ionisation. Ce sont des détecteurs chers, surtout s'ils sont gros. Ils doivent fonctionner et être conservés à la température de l'azote liquide pour diminuer le bruit de fond.

Le gap du germanium (0,66 eV à 300 K) est plus faible que celui du silicium (1,2 eV).

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

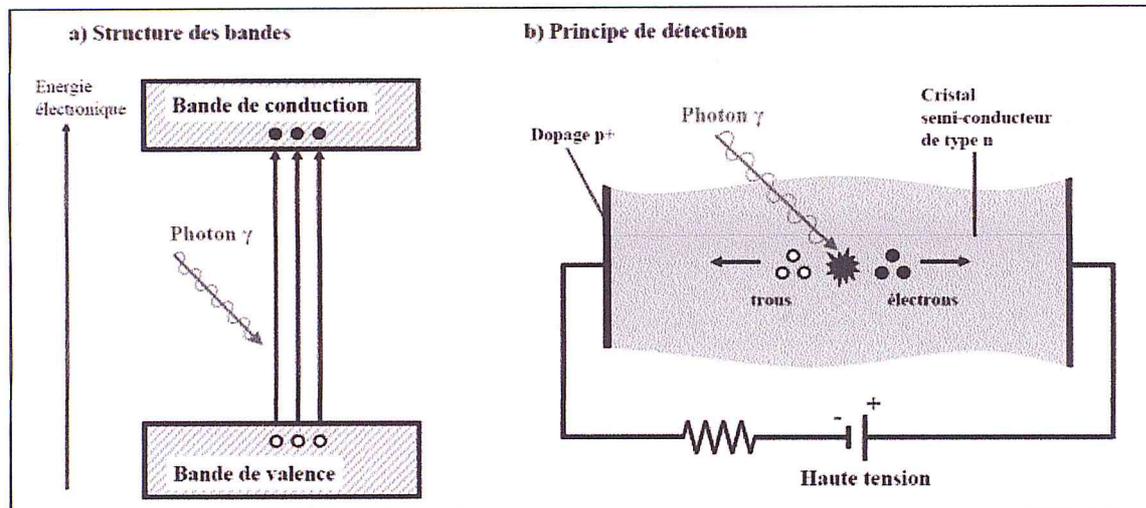


Figure (1.9): Principe du semi-conducteur : structure des bandes et fonctionnement. [14]

Matériau	Si	Ge	AsGa	CdTe	HgI ₂
Nombre atomique Z	14	32	31,33	48.52	80.53
Masse volumique ρ (g/cm ³)	2,33	5,32	5,328	6.06	6.3
Longueur d'atténuation $x_{1/2}$ (cm) à 662 keV	3,83	1,83	1,82	1.50	1.20
Énergie de la bande interdite E_g (eV)	1,12	0,66	1,424	1.56	2.13
Énergie par électron-trou W_{eh}	3,61	2,98	4,8	4.43	4.22
Masse effective des électrons m_e^*/m_e	0,26	0,12	0,067	0.11	0.002
Masse effective des trous m_h^*/m_e	0,36	0,21	0,45	0.40	0.6
Mobilité des électrons μ_s (cm ² /V/s)	1500	3900	8500	1050	15000
Mobilité des trous μ_h (cm ² /V/s)	450	1900	400	100	8000

Tab (1.1): Propriétés des matériaux semi-conducteurs. [15]

Toutes les valeurs indiquées correspondent à la température ambiante (300°K), à l'exception du germanium pour lequel T=80°K.

1.7.2. Détecteur scintillateur :

La scintillation est un phénomène de fluorescence consistant en l'émission prompt ou retardée de photons visibles (infrarouges ou ultraviolets) dans un matériau excité par un photon gamma ou une particule énergétique. Les matériaux scintillateurs sont généralement séparés en deux catégories :

- les scintillateurs organiques (sous forme cristalline, plastique ou en solution liquide)
- et les scintillateurs inorganiques utilisés [16] (cristaux comme le NaI, Ge, CsF₂, BGO...). Les

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

scintillateurs inorganiques sont des cristaux dopés. Ainsi l'iodure de sodium est dopé au thallium et on note cela NaI(Tl). C'est un cristal scintillateur très utilisé en détection gamma si l'on souhaite une résolution moyenne. [7]

Les premiers, caractérisés par une réponse très rapide, sont généralement utilisés pour la spectrométrie gamma et la détection de neutrons tandis que les seconds, possédant un rendement lumineux élevé et une meilleure efficacité (densité et nombre atomique Z élevés), sont préférés pour la spectroscopie gamma. [16]

Les scintillateurs organiques peuvent être utilisés de diverses manières sous forme d'un grand volume liquide, de blocs ou en feuilles minces. Ces dernières sont intéressantes pour faire du temps de vol car

La réponse du scintillateur au passage d'une particule est très rapide. Le temps de réponse est de l'ordre de la ns et la décroissance est rapide, typiquement une centaine de ns ce qui permet des taux de comptage élevés. Par contre ils sont moins sensibles. Alors qu'il faut environ 25 eV pour créer un photon dans un NaI(Tl) il faut de l'ordre de 100 eV dans un scintillateur plastique. Pour un cristal de BGO c'est environ 300 eV. [7]

Tout comme pour les semi-conducteurs, la théorie des bandes des solides cristallins peut être utilisée pour expliquer la scintillation des cristaux inorganiques (Figure 1.10). L'absorption d'un photon gamma génère un électron primaire très énergétique et une vacance dans une couche profonde de la structure électronique. La présence dans le cristal d'une espèce dite luminescente introduit des niveaux d'énergie dans la bande interdite qui permettent la désexcitation par l'émission de photons visibles ou ultraviolets. [16]

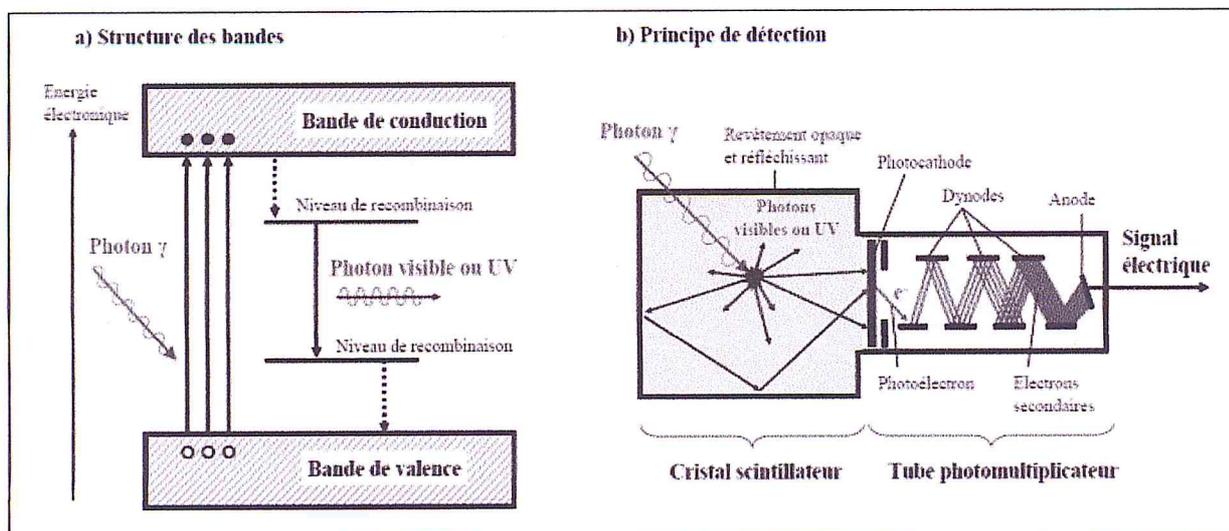


Figure (1.10): Principe du scintillateur : structure des bandes et fonctionnement. [16]

CHAPITRE 1 : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE.

Pour constituer un système de détection, le cristal scintillateur doit être couplé à un dispositif sensible permettant de collecter les photons de scintillation. Ce dispositif, généralement un tube photomultiplicateur (Figure 1.10) ou une photodiode, doit avoir une excellente sensibilité dans la plage de longueurs d'onde d'émission du scintillateur.

Un photomultiplicateur permet de convertir des photons, lorsqu'ils touchent la photocathode, en électrons. La photocathode est généralement constituée d'une couche mince d'alliage alcalin. Elle émet facilement des électrons lorsqu'elle est bombardée par des photons suffisamment énergétiques ce qui est le cas de la lumière émise par les scintillateurs. Derrière la photocathode se trouvent une série d'électrodes, les dynodes, portées à des potentiels électriques croissants. Les électrons générés sur la photocathode sont accélérés et focalisés sur la première dynode qui multiplie le nombre d'électrons et ainsi de suite avec les dynodes suivantes, comme il est représenté dans la figure (1.10). Les photomultiplicateurs ont entre 10 et 14 dynodes qui permettent d'obtenir un signal pouvant atteindre jusqu'à 10^{17} fois le signal initial. L'ensemble de ces électrodes est sous vide, dans une enceinte fermée, et constitue le photomultiplicateur. [7]

Le cristal scintillateur doit être recouvert d'un revêtement réfléchissant les photons de scintillation et empêchant l'entrée de lumière extérieure.

Matériau	NaI :Tl	CsI :Tl	BGO	LaCs :Ce
Dopage				10%Ce
Nombre atomique effectif Z_{eff}	51	54	75	59,5
Masse volumique $\rho(g/cm^3)$	3,67	4,51	7,13	3,86
Longueur d'atténuation $x_{1/2}$ (cm) à 662 keV	2,5	2,0	1,0	2,4
Pic d'émission λ_{max} (nm)	415	550	505	350430
Indice de réfraction $n(\lambda_{max})$	1,85	1,79	2,15	1,9
Rendement lumineux (ph/MeV)	38000	64800	8200	50000
Résolution intrinsèque $\Delta E/E$	Oui	Légère	Non	Oui
Mobilité des trous $\mu_h(cm^2/V/s)$	5,9%	3,8%	11,3%	1,4%

Tableau (1.2): Propriétés des principaux (ou nouveaux) scintillateurs inorganiques utilisés en spectrométrie gamma. [15]

Chapitre 2 :

Simulation.

2.1. Simulation Monte-Carlo :

Les méthodes de Monte-Carlo sont des méthodes statistiques basées sur le tirage de nombres aléatoires suivant des lois de probabilités qui décrivent les processus physiques étudiés. Le caractère aléatoire de ces méthodes est à l'origine de leur nom, par analogie avec les jeux de hasard dont la capitale de la Principauté de Monaco était le centre à l'époque du projet Manhattan. C'est durant ce projet, pendant la Seconde Guerre Mondiale, que cette méthode fût appliquée par Von Neumann, Ulam et Fermi pour étudier la diffusion des neutrons sur un matériau fissible. [17]

Elle a été développée dans les années quarante par Nicholas Métropolies et Stanislas Ulam [18]. Elle repose sur la loi des grands nombres qui consiste à répéter un grand nombre de fois une expérience, de manière indépendante. L'approximation ainsi obtenue est proche de la vraie valeur de l'espérance du phénomène étudié.

Plusieurs méthodes d'échantillonnage sont proposées : méthode directe, méthode de rejet, et méthode de la distribution discrète. [19]

La simplicité de la méthode Monte Carlo constitue son avantage majeur. Elle permet contrairement aux méthodes analytiques d'apprécier les effets des différents paramètres, et ainsi de déterminer des structures optimisées. Du point de vue applications, la méthode Monte Carlo est utilisée dans différents domaines aussi variés que la physique, la chimie et la biologie.

2.1.1. Généralités sur la méthode Monte Carlo :

L'histoire d'une particule commence à sa naissance et continue jusqu'à sa mort en tenant compte des particules secondaires générées dans un milieu atténuateur. La particule est considérée morte lorsque son énergie est en dessous d'un seuil établi. Elle est captée par un noyau ou elle se trouve en dehors de la zone d'intérêt (zone de rejection). Le déroulement de la méthode Monte Carlo peut être décomposé en trois étapes:

1. Construction d'un processus statistique appelé jeu,
 1. Attribution d'une valeur numérique à une certaine réalisation dite score,
2. Calcul de la moyenne de ces scores et un écart-type afin d'estimer la précision obtenue sur la moyenne.

Le jeu consiste en la réalisation d'une trajectoire, et à chaque fois que la particule traverse la surface, le score est de 1. Ainsi, on pourra calculer la moyenne du nombre de particules ayant traversé la surface d'un détecteur. La figure (2.1) représente l'organigramme d'un tirage Monte Carlo. Prenant l'exemple d'un photon, son histoire commence depuis sa naissance (source externe,...). Le parcours et le type de la cible avec lequel a lieu l'interaction sont tirés au hasard et ensuite la nature de l'interaction à son tour est tirée au hasard en fonction de sa propre section efficace.

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

Comme exemple d'application, supposons qu'on génère un nombre N de photons et qu'un nombre n de ces photons s'échappe du système considéré. On peut donc estimer la probabilité avec laquelle les photons s'échappent. Deux cas se présentent : soit le photon continue son parcours dans le système, soit il s'échappe. On assigne la probabilité $s_i = 1$ si le photon s'échappe sinon $s_i = 0$.

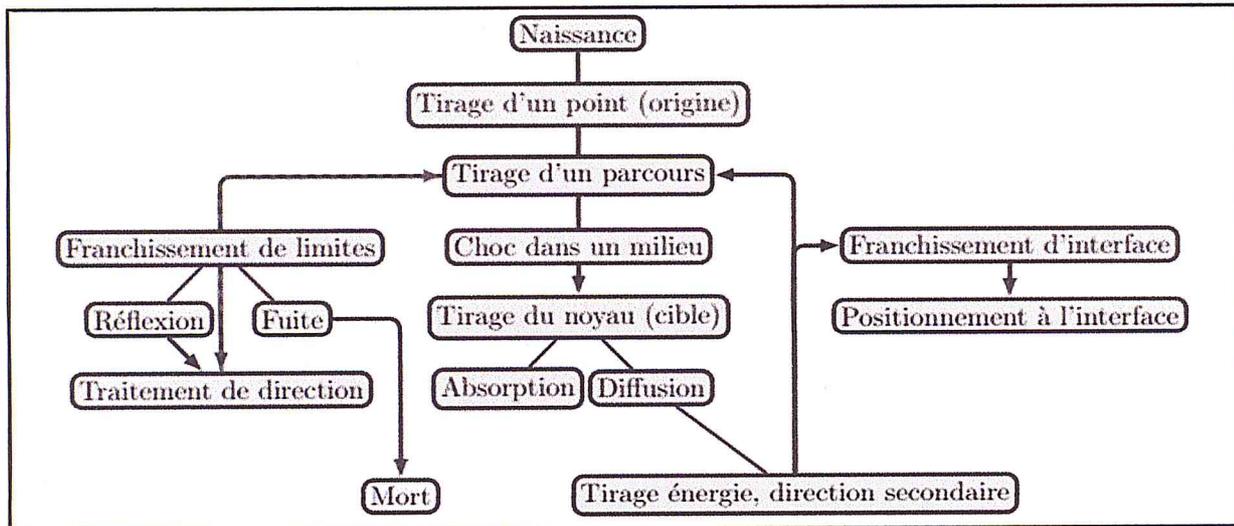


Figure (2.1): Organigramme de l'histoire d'une particule par la méthode Monte Carlo. [20]

2.1.2. Incertitudes statistiques :

A chaque mesure est associée une incertitude. Pour une interprétation correcte des résultats, il faut tenir compte des imprécisions. Deux sources d'incertitudes sont à prendre en considération [21]

– **Catégorie A** : ce sont les incertitudes dites statistiques, elles proviennent des déviations aléatoires et sont différentes à chaque nouveau calcul.

– **Catégorie B** : ce sont les incertitudes dites systématiques, elles sont liées aux paramètres de la simulation (choix de section efficace...).

En pratique, les incertitudes statistiques sont généralement données par le code Monte Carlo. En revanche, les incertitudes systématiques nécessitent en général un gros travail d'analyse des différents éléments du calcul [22]

2.1.3. Transport des particules :

Dans ce travail on s'est focalisé essentiellement sur l'interaction photon-matière. En effet, les photons peuvent traverser un milieu sans interagir ou perdre la totalité de leur énergie par l'effet photoélectrique et/ou par création de paire. Dans les deux cas on enregistre la mort de ces photons. Le suivi des événements se fait pas à pas et par ordre chronologique :

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

Échantillonnage du libre parcours moyen, échantillonnage des sections efficaces différentielles

et totales, la nature de l'interaction, la direction et la perte d'énergie suite à l'interaction, processus qui recommence avec les particules générées.

2.1.4. Modélisation de l'interaction photon-matière :

La modélisation d'une interaction photon-matière est illustrée dans la figure (2.2) Le photon interagit par différents processus dans le détecteur dont la masse volumique est ρ et a la masse molaire.

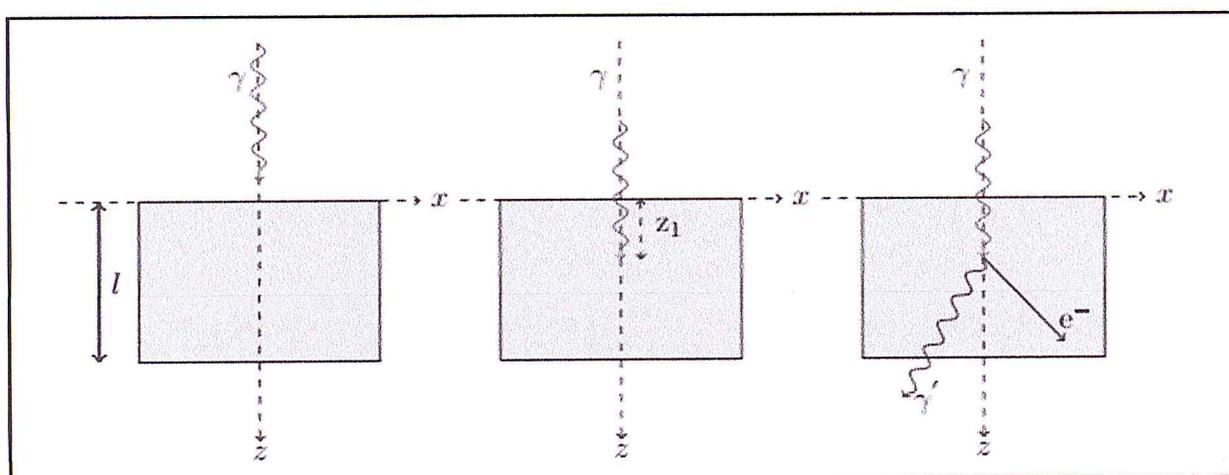


Figure (2.2): Simulation Monte Carlo des interactions photons-matière.

Chacune des interactions est caractérisée par une section efficace σ_i :

- diffusion Rayleigh (σ_r)
- effet photoélectrique (σ_{pe})
- diffusion Compton (σ_c)
- création de paire (σ_{pair})

Le choix du processus d'interaction des photons avec le détecteur se fait par un tirage aléatoire d'un nombre distribué d'une manière uniforme entre 0 et 1 par la méthode ci-dessus. Si la distance z_1 parcourue par le photon tirée aléatoirement est supérieure à l'épaisseur du détecteur (l) (Figure 2.2), le photon n'interagit pas et est considéré comme mort ou en fuite et son parcours n'est pas suivi. Cependant, si cette distance est inférieure à l'épaisseur du détecteur, le photon interagit, ce qui permet de suivre le parcours de celui-ci jusqu'à sa mort (absorption). C'est dans ce cas de figure

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

que le choix de l'interaction se fait selon les conditions suivantes : la section efficace totale σ_{tot} est la somme des sections efficaces des différents processus d'interaction.

$$\sigma_{tot} = \sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_r + \sigma_{cp} \quad (2-1)$$

Supposant que X est le nombre tiré aléatoirement entre [0, 1].

Si $0 \leq X < \sigma_{pe}/\sigma_{tot}$ \Rightarrow effet photoélectrique

Si $\sigma_{pe}/\sigma_{tot} \leq X < \frac{\sigma_{pe} + \sigma_c}{\sigma_{tot}}$ \Rightarrow diffusion Compton

Si $\frac{\sigma_{pe} + \sigma_c}{\sigma_{tot}} \leq X < \frac{\sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_r}{\sigma_{tot}}$ \Rightarrow diffusion Rayleigh

Si $\frac{\sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_r}{\sigma_{tot}} \leq X < \frac{\sigma_{pe} + \sigma_c + \sigma_r + \sigma_{cp}}{\sigma_{tot}}$ \Rightarrow création de paire, si l'énergie du photon $\geq 1,022$ MeV.

[39]

2.2. GEANT 4 :

GEANT4 (GEometry ANd Tracking) est une "boîte à outils" disponible dans le domaine public et téléchargeable [<http://geant4.web.cern.ch/geant4>], destinée à la simulation du transport des particules dans la matière. GEANT4 a été développé, sous l'égide du Centre Européen de Recherche Nucléaire (CERN) 1993 [24], par plus d'une centaine de physiciens et d'informaticiens pour mettre à disposition de communautés d'utilisateurs diverses (physiques des particules, physique nucléaire, sciences cosmologiques et spatiales, médecine nucléaire,...) un simulateur complet, précis et robuste. Très tôt, les choix de développement de ce nouveau logiciel se sont orientés vers les nouvelles technologies informatiques orientées objet et l'utilisation du langage C++, permettant d'intégrer ou de modifier des modules plus aisément sans perturber l'architecture de base du code, d'implémenter des modèles physiques de façon transparente et ouverte à l'utilisateur, et de faciliter l'évolution et la maintenance du code, donc d'assurer sa pérennité.

GEANT4 inclut également un ensemble complet de modèles physiques décrivant le comportement de nombreuses particules dans la matière sur une très large gamme d'énergies. Ces modèles ont été rassemblés à partir des données et de l'expertise acquises pendant de nombreuses années par les physiciens du monde entier, et bénéficient de l'expérience apportée par le développement de la version antérieure du logiciel, GEANT3 basé sur FORTRAN [23]. Depuis la diffusion de la première version stable de GEANT4 (GEANT4.0) en décembre 1998, la collaboration GEANT4 continue son développement et son amélioration, en étroite collaboration avec les utilisateurs, et fournit maintenance, support aux utilisateurs (système de report des bugs, forums utilisateurs, foire aux questions sur le site de GEANT4), documentation associée au logiciel et exemples d'utilisation. [23]

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

L'objectif est d'effectuer les simulations des différentes expériences de plus en plus complexes à réaliser en physique subatomique. Il permet de simuler la fonction de réponse du détecteur en se basant sur les différents types d'interactions.

Des études approfondies peuvent être réalisées sur toute expérience en tenant compte de la géométrie du dispositif expérimental, des matériaux utilisés, de la génération des particules primaires et secondaires et leur suivi pas à pas dans le milieu étudié.

2.2.1. Architecture :

GEANT4 est composé d'un ensemble de classes C++ que l'utilisateur peut utiliser selon ses besoins afin d'implémenter les classes qui seront appelées par le programme principal, *main*. La Figure (2.3) montre l'architecture minimale que doit posséder un programme GEANT4 pour fonctionner correctement.

Le programme principal fait appel à tour de rôle à plusieurs classes, dont chacune possède un rôle précis et correspond à l'une des étapes d'une simulation:

- la géométrie du système à simuler est décrite dans la classe **MyDetectorConstruction** : la description inclut la construction de la géométrie en termes de volumes, de matériaux remplissant chacun des volumes, et de propriétés des volumes (propriétés électromagnétiques, optiques, sensibilité, visualisation...);
- la génération des particules primaires est implémentée dans la classe **MyPrimaryGenerator** : Il s'agit de donner toutes les informations nécessaires à cette génération (type de particule émise, position, énergie et direction d'émission de la particule, ...);
- la description des particules, des processus et modèles physiques affectés à chaque particule participant à la simulation s'effectue dans la classe **MyPhysicsList**.

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

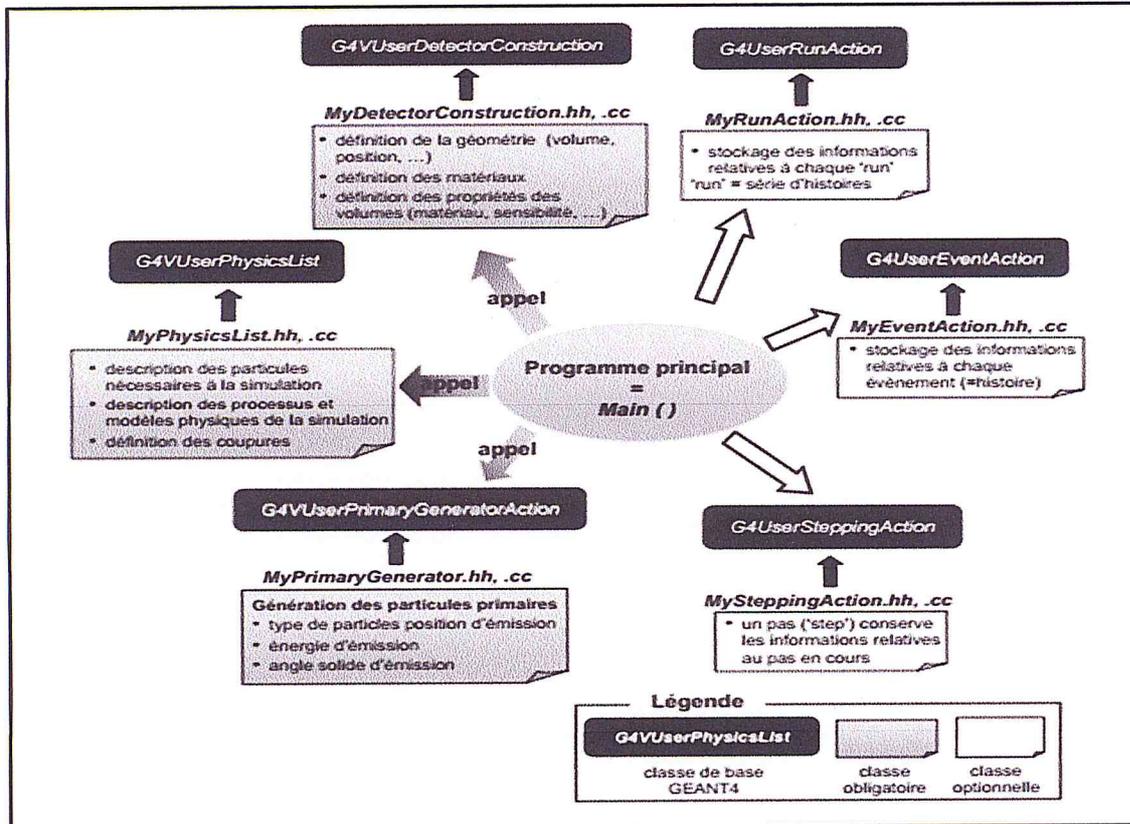


Figure (2.3): Architecture minimale d'un code de simulation dans GEANT4 : l'utilisateur implémente ses propres classes à partir des classes de base disponibles dans GEANT4 (en noir) ; 3 classes doivent être obligatoirement définies (en gris).

GEANT4 est un ensemble d'une multitude de modules [25]. Chacun de ces modules a un rôle particulier à jouer.

– **Run:** collection de l'ensemble des événements qui sont soumis aux mêmes conditions de détection. A l'intérieur d'un Run, l'utilisateur ne peut modifier ni la géométrie, ni les processus physiques. Au début de chaque Run, les sections efficaces sont calculées à partir des matériaux requis.

– **Event:** contient les particules primaires générées qui sont stockées dans une pile. Lorsque la pile se vide, on parle de la fin de l'évènement. L'utilisateur a ainsi accès aux listes des vertex, des particules primaires, à l'ensemble des trajectoires, de coups,...

– **Track:** suivi ou trace de la particule dynamique dans son environnement. A un instant donné, la trace est caractérisée par une position et des quantités physiques. Elle est perdue si la particule sort de l'environnement "World".

– **Step:** considéré comme unité de base de la simulation (pas), cette classe est associée à G4Step.

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

Chaque pas est représenté par deux points, un pré et un post-step. Dans un pas on collecte les informations relatives aux processus physiques (énergies, temps, volume,...). A l'interface de deux matériaux, le post-step appartient au volume suivant.

Cette dernière caractéristique permet de simuler des processus tels que la réfraction. Pour réaliser une simulation, il faut définir la géométrie du détecteur et les processus physiques mis en jeu. [25]

2.2.2. Géométrie :

La construction d'une géométrie dans GEANT4 répond à deux règles : les volumes doivent être imbriqués les uns dans les autres, comme des poupées russes, en respectant une certaine hiérarchie de volumes, et aucun volume ne doit se superposer à un autre.

L'utilisateur construit d'abord un volume père, le *World*, dans lequel il va insérer d'autres volumes, ces autres volumes pouvant à leur tour contenir d'autres volumes "fils". De nombreuses classes, décrivant des volumes géométriques plus ou moins complexes, sont disponibles dans GEANT4 : des formes simples (boîte, sphère, cylindre, trapèze, ...), des solides plus complexes définis par leur surfaces pouvant être des plans, des surfaces de second ordre ou des surfaces B-splines.

On peut également effectuer des opérations booléennes sur les volumes (union, intersection, soustraction) afin de créer de nouveaux volumes.

La création d'un volume dans GEANT4 passe par plusieurs étapes, dont chacune correspond à la spécification de caractéristiques précises :

(1) on crée d'abord un *volume solide* : on choisit ici sa forme géométrique et ses dimensions,

(2) on crée ensuite le *volume logique* associé : c'est à ce niveau que l'on spécifie certaines propriétés, telles que le matériau qui remplit le volume solide, les propriétés optiques et électromagnétiques du volume solide, sa sensibilité (volume dans lequel on souhaite connaître en détails les interactions qui ont eu lieu) et ses options de visualisation (visibilité, couleur, transparence, ...),

(3) enfin, on crée le *volume physique* associé : celui-ci permet de déplacer le volume (translation, rotation), de le positionner par rapport au référentiel associé au volume "père" et de le dupliquer suivant des schémas plus ou moins complexes pour créer une structure répétitive. [25]

Pour la définition des matériaux, plusieurs classes à la disposition de l'utilisateur (G4Element, G4Isotope, G4Material) permettent de définir des matériaux allant de structures simples à des structures plus compliquées :

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

- pour définir un élément simple, on fournit 4 paramètres : son nom, sa densité, sa masse molaire et son numéro atomique,
- une molécule est définie à partir des éléments qui la composent, en spécifiant leur type et leur nombre,
- un mélange, ou composé, est défini à partir des éléments qui le composent, en spécifiant leur fraction de masse.

2.2.3. Génération des particules primaires :

GEANT4 met à disposition de l'utilisateur soit des classes abstraites de générateurs de particules lui permettant de créer son propre générateur, soit des classes concrètes, c'est-à-dire des générateurs de particules primaires déjà implémentés que l'utilisateur peut utiliser directement en donnant certains paramètres :

- le type de particules émises : il peut s'agir de particules élémentaires (photons, électrons, positrons), d'ions (alpha, ...) ou de noyaux,
- la position du (ou des) vertex d'émission,
- l'énergie ou l'impulsion de la particule émise,
- l'angle solide d'émission des particules,
- le nombre de particules émises lors du run.

-G4VUserPrimaryGeneratorAction:

Pour générer des particules avec GEANT4, les paramètres à déclarer sont la nature de la particule émise, la position initiale, la taille de la source (ponctuelle ou étendue), le type d'émission (isotrope ou directionnelle) de la source ainsi que les énergies émises.

-G4VUserPhysicsList:

L'utilisateur doit au préalable définir le processus physique à étudier, les énergies de coupures et la nature des particules. Il existe une centaine de particules. Elles sont classées en plusieurs catégories :

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

les leptons, les mésons, les baryons, les bosons, les particules à vie courte et les noyaux alpha. Dans ce travail, on s'est limité aux processus d'interaction concernant les photons.

2.2.4. Particules et processus physiques :

Plus de 100 particules sont définies dans GEANT4 : c'est à l'utilisateur de choisir les particules impliquées dans sa simulation et de faire appel à elles. GEANT4 contient une grande variété de modèles physiques couvrant la physique des photons, des électrons, des muons, des hadrons et des ions de 250 eV à quelques PeV.

Les processus physiques sont classés en 7 grandes catégories : (1) processus électromagnétiques, (2) processus hadroniques, (3) décroissance de particules, (4) transport, (5) processus optiques, (6) processus pour les leptons et hadrons et (7) paramétrisation. Les deux premières catégories sont elles-mêmes subdivisées à cause de l'abondance et de la complexité des modèles physiques qu'elles rassemblent.

Les processus électromagnétiques dans GEANT4 gèrent les interactions électromagnétiques des leptons, des photons, des hadrons et des ions. Deux types de processus ont été implémentés : les processus standards et les processus bas énergie.

Les processus standards modélisent les interactions des photons, des électrons, des positrons et des hadrons chargés sur une gamme d'énergie allant de 10 KeV à 100 GeV. Les processus standards disponibles sont : l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la création de paires pour les photons. [26]

Pour les processus basse énergie, le calcul des sections efficaces totales et la génération des états finaux sont basés sur un ensemble de bibliothèques de bases de données (EADL (Evaluated Atomic Data Library) [27], EEDL (Evaluated Electron Data Library) [28] et EPDL97 (Evaluated Photon Data Library). [29]

2.3. X-COM :

Des données sur la diffusion et l'absorption des photons (rayons X, rayons gamma) sont nécessaires pour de nombreuses applications scientifiques, techniques et médicales. Le nombre de matériaux pour lesquels des sections efficaces de photons sont nécessaires est important et en augmentation constante. Des tableaux disponibles [30, 33] pour de nombreux éléments (mais pas tous). Certaines tables contiennent également des données pour un nombre limité de composés et de mélanges [30-33]. De plus, les sections efficaces sont souvent nécessaires à des énergies de photons autres que celles incluses dans les tableaux.

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

Les sections efficaces de photons pour les composés peuvent bien sûr être obtenues de manière assez précise (sauf aux énergies proches des bords d'absorption) en tant que sommes pondérées des sections efficaces pour les constituants atomiques.

Une approche alternative pratique consiste à générer les sections efficaces et les coefficients d'atténuation pour les composés et les mélanges selon les besoins. Cette partie décrit un programme Web appelé XCOM qui effectue cette tâche rapidement pour tout élément, composé ou mélange, à des énergies comprises entre 1 KeV et 100 GeV.

XCOM fournit deux formes de sortie: (a) des tables qui correspondent étroitement au format des tables existantes dans la littérature; (b) affichage graphique des données tabulaires.

Le programme fournit des sections efficaces totales et des coefficients d'atténuation ainsi que des sections efficaces partielles pour les processus suivants: diffusion incohérente, diffusion cohérente, absorption photoélectrique et production de paires dans le domaine du noyau atomique et dans le domaine des électrons atomiques. Pour les composés, les quantités tabulées sont des coefficients d'interaction de masse partielle et totale, qui sont égaux au produit des sections efficaces correspondantes multiplié par le nombre de molécules cibles par unité de masse du matériau. Les inverses de ces coefficients d'interaction sont les trajets libres moyens entre les diffusions, entre les événements d'absorption photo-électriques, ou entre les événements de production de paires. La somme des coefficients d'interaction pour les processus individuels est égale au coefficient d'atténuation total. Les coefficients d'atténuation totale sans la contribution de la diffusion cohérente sont également donnés, car ils sont souvent utilisés dans les calculs de transport de rayons gamma.

Les coefficients d'interaction et les coefficients d'atténuation totale pour les composés ou les mélanges sont obtenus en tant que sommes des quantités correspondantes pour les constituants atomiques. Les facteurs de pondération, c'est-à-dire les fractions en poids des constituants, sont calculés par XCOM à partir de la formule chimique saisie par l'utilisateur. Pour les mélanges, cependant, l'utilisateur doit fournir les fractions en poids des divers composants.

Certaines limitations doivent être notées. Les sections efficaces des éléments de la base de données XCOM concernent des atomes neutres isolés et ne prennent pas en compte les effets moléculaires et à l'état solide qui modifient les sections efficaces, en particulier au voisinage des bords d'absorption. Enfin, XCOM ne calcule pas les coefficients d'absorption d'énergie qui représentent la conversion de l'énergie des photons en énergie cinétique des électrons Compton, photo et paire secondaires.

2.3.1. le programme XCOM :

2.3.1.1. Aperçu :

Il y a deux façons d'utiliser la base de données XCOM. La version textuelle génère un tableau de texte de base des données. L'autre version offre à l'utilisateur plus d'options et de fonctionnalités (par exemple, téléchargement de fichiers, graphiques et tableaux graphiques). Le reste de l'information contenue dans ce document convient aux deux voies de production.

Il y a deux formulaires à remplir pour récupérer les données. La première forme produit la deuxième forme appropriée. La première forme concerne les informations générales (type de matériau: élément, composé ou mélange) Figure (2.4) ($Z \leq 100$). La seconde est plus spécifique (valeurs énergétiques et options graphiques).

The screenshot shows the XCOM web interface. At the top left is the NIST logo (National Institute of Standards and Technology, Physical Measurement Laboratory). At the top center is the XCOM logo. Below the logos is the title 'Element/Compound/Mixture Selection'. A paragraph of text explains that the database provides photon cross-section data for single elements, compounds, or mixtures. Below this is a 'Help' link. The main form is titled 'Identify material by:' and contains three radio buttons: 'Element', 'Compound' (which is selected), and 'Mixture'. Below this is a section titled 'Method of entering additional energies: (optional)' with two radio buttons: 'Enter additional energies by hand' (selected) and 'Additional energies from file (Note: Your browser must be file-upload compatible)'. At the bottom of the form are two buttons: 'Submit Information' and 'Reset'. A small XCOM logo is visible in the bottom left corner of the page frame.

Figure (2.4): Choix du type de matériau dans X-COM.

2.3.1.2. Le premier formulaire :

Le matériau pour lequel des sections transversales doivent être calculées peut être désigné en tant qu'élément, composé ou mélange. Le programme calcule les valeurs pour les énergies standard, mais l'utilisateur peut également entrer des énergies supplémentaires. Cela peut être fait en entrant manuellement les valeurs ou en utilisant le téléchargement de fichiers (note: votre navigateur doit être compatible avec le téléchargement de fichiers).

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

Formula for compound (e.g. H₂O for water): MgSO₄

Optional output title: xcom

Graph options:

- Total Attenuation with Coherent Scattering
- Total Attenuation without Coherent Scattering
- Coherent Scattering
- Incoherent Scattering
- Photoelectric Absorption
- Pair Production in Nuclear Field
- Pair Production in Electron Field
- None

Additional energies in MeV: (optional) (up to 100 allowed)

Note: Energies must be between 0.001 - 100000 MeV (1 keV - 100 GeV) (only 4 significant figures will be used). One energy per line. Blank lines will be ignored.

0.778
0.964
1.112
1.108

Include the standard grid

Energy Range:

Minimum: 0.001 MeV

Maximum: 100000 MeV

Figure (2.5): La fenêtre dans laquelle on peut faire entrer des énergies supplémentaires.

2.3.1.3. Éléments :

Les éléments peuvent être sélectionnés par leur numéro atomique ou par leur symbole chimique. Seuls les éléments 1 à 100 sont disponibles.

2.3.1.4. Composés :

Les formules chimiques des composés doivent être indiquées en notation chimique standard, avec majuscules et minuscules appropriées. Cependant, en raison des limitations matérielles, les indices doivent être écrits en ligne. Par exemple, la formule du tungstate de calcium doit être saisie en tant que CaWO₄. Les parenthèses, les espaces et les points ne peuvent pas être utilisés. Par exemple, la formule pour le phosphate de calcium doit être entrée comme Ca₃P₂O₈ (et non comme Ca₃(PO₄)₂) voir figure (2.6).

Les substances constituées de molécules ayant une seule espèce d'atomes peuvent être désignées comme des éléments ou des composés. Par exemple, l'azote moléculaire pourrait être traité comme un "élément" avec le symbole N, ou comme un "composé" de formule N₂.

Formula for compound (e.g. H₂O for water): MgSO₄

Optional output title: xcom

Figure (2.6): Formalisme dans X-COM.

2.3.1.5. Mélange :

L'utilisateur doit spécifier le symbole ou la formule chimique du mélange, ainsi que la fraction en poids pour chaque composant. Le programme utilise ensuite ces données d'entrée pour

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

calculer les fractions en poids des constituants atomiques individuels, ainsi que la somme de ces fractions.

2.3.1.6. Titre de sortie optionnel :

Ce titre, qui peut inclure des blancs incorporés, apparaîtra en haut de la page de sortie. Voir figure (2.6).

2.3.1.7. La liste d'énergie :

Les utilisateurs peuvent

- 1) limiter la sortie au réseau d'énergie standard,
- 2) ajouter les énergies de leur choix à la grille standard,
- 3) limiter la sortie à l'ensemble des énergies qu'ils ont choisies.

Dans le cas 2), les énergies supplémentaires sont fusionnées dans le réseau d'énergie standard en fonction de l'amplitude. Ils sont également indiqués par une couleur différente dans la table de sortie pour les distinguer des valeurs de grille standard, (voir figure 2.7). Dans le cas 3), les énergies seront triées numériquement et les doublons seront supprimés.

	1.000E-01	1.613E-02	1.374E-01	3.319E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.867E-01	1.706E-01
	1.210E-01	1.128E-02	1.323E-01	1.808E-02	0.000E+00	0.000E+00	1.616E-01	1.504E-01
	1.500E-01	7.494E-03	1.257E-01	9.142E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.423E-01	1.348E-01
	2.000E-01	4.304E-03	1.160E-01	3.701E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.240E-01	1.197E-01
	3.000E-01	1.947E-03	1.014E-01	1.073E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.044E-01	1.025E-01
	3.440E-01	1.486E-03	9.644E-02	7.180E-04	0.000E+00	0.000E+00	9.865E-02	9.716E-02
	4.000E-01	1.103E-03	9.105E-02	4.665E-04	0.000E+00	0.000E+00	9.262E-02	9.152E-02
	5.000E-01	7.081E-04	8.325E-02	2.536E-04	0.000E+00	0.000E+00	8.421E-02	8.350E-02
	6.000E-01	4.927E-04	7.707E-02	1.587E-04	0.000E+00	0.000E+00	7.772E-02	7.723E-02
	7.780E-01	2.935E-04	6.863E-02	8.528E-05	0.000E+00	0.000E+00	6.901E-02	6.871E-02
	8.000E-01	2.777E-04	6.775E-02	8.042E-05	0.000E+00	0.000E+00	6.811E-02	6.783E-02
	9.640E-01	1.914E-04	6.204E-02	5.473E-05	0.000E+00	0.000E+00	6.229E-02	6.209E-02
	1.000E+00	1.778E-04	6.094E-02	5.002E-05	0.000E+00	0.000E+00	6.117E-02	6.099E-02
	1.022E+00	1.702E-04	6.029E-02	4.726E-05	0.000E+00	0.000E+00	6.051E-02	6.034E-02
	1.112E+00	1.438E-04	5.782E-02	3.925E-05	3.172E-06	0.000E+00	5.800E-02	5.786E-02
	1.250E+00	1.139E-04	5.450E-02	3.202E-05	3.590E-05	0.000E+00	5.468E-02	5.457E-02
	1.408E+00	8.979E-05	5.124E-02	2.593E-05	1.223E-04	0.000E+00	5.147E-02	5.138E-02
	1.500E+00	7.912E-05	4.954E-02	2.316E-05	1.937E-04	0.000E+00	4.984E-02	4.976E-02
	2.000E+00	4.451E-05	4.228E-02	1.441E-05	7.605E-04	0.000E+00	4.310E-02	4.305E-02

Figure (2.7): Tableau de sortie X-COM.

CHAPITRE 2 : SIMULATION.

Si des énergies supplémentaires sont entrées par l'utilisateur, cela peut être fait à partir du clavier ou d'un fichier d'entrée déjà préparé. Ce fichier (stocké dans un répertoire quelconque sur une disquette ou un disque dur) doit contenir une liste d'énergies, avec des éléments séparés par Return ou Enter. Attention: Pas plus de 75 énergies peuvent être ajoutées pour un seul élément. Encore moins peut être inacceptable s'il y a plusieurs constituants. La grille standard seule peut contenir trop d'énergies s'il y a beaucoup de constituants.

2.3.1.8. Unités de sortie :

Pour les éléments, l'utilisateur dispose de trois choix:

- 1) toutes les quantités en cm^2 / g ;
- 2) toutes les quantités dans les granges / atome, où 1 grange = 10^{-24} cm^2 ;
- 3) les coefficients d'interaction partielle dans les granges / atome et les coefficients d'atténuation totale en cm^2 / g . Pour les composés et mélanges, toutes les quantités sont en cm^2 / g .

Zoom in on energy range: (must be between 0.001 - 100000 MeV)

Note: If all data are not displayed in the graph, modify the energy range to view graphed data in the region of interest. Energy range must cover at least one factor of ten (e.g., 100 to 1000 MeV).

Minimum: MeV Maximum: MeV

Constituents (Atomic Number : Fraction by Weight)

Z=11 : 0.393374
Z=17 : 0.606626

To download data in spreadsheet (array) form, choose a delimiter and use the checkboxes in the table heading. After downloading, save the output by using your browser's Save As feature.

Delimiter:

space
 { (vertical bar)
 tab
 newline

Edge	(required) Photon Energy	Scattering		Photoelectric Absorption	Pair Production		Total Attenuation	
		Coherent	Incoherent		In Nuclear Field	In Electron Field	With Coherent Scattering	Without Coherent Scattering
		MeV	cm^2/g		cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g	cm^2/g
	1.000E-03	2.595E+00	1.019E-02	1.972E-03	0.000E+00	0.000E+00	1.975E-03	1.972E-03
	1.035E-03	2.580E+00	1.073E-02	1.799E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.802E-03	1.799E+03
	1.072E-03	2.565E+00	1.130E-02	1.642E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.644E+03	1.642E+03
11 K	1.072E-03	2.565E+00	1.130E-02	3.960E+03	0.000E+00	0.000E+00	3.962E-03	3.960E+03
	1.500E-03	2.394E+00	1.810E-02	1.847E+03	0.000E+00	0.000E+00	1.850E-03	1.847E+03
	2.000E-03	2.181E+00	2.606E-02	8.702E-02	0.000E+00	0.000E+00	8.724E-02	8.702E-02

Figure (2.8): Page de sortie X-COM.

2.3.1.9. Le graphique :

Les données peuvent être affichées plus rapidement si le graphique n'est pas utilisé, et plus de courbes prennent plus de temps à représenter que moins. Un zoom avant est possible en redéfinissant la plage d'énergie. Cependant, la plage d'énergie minimale (zoom maximum) est d'un ordre de grandeur (par exemple de 0,01 à 0,1). Les boutons sur la droite peuvent être utilisés pour changer la taille de l'image, ce qui peut être utile pour l'impression. Les valeurs données sont pour la largeur de l'image en pixels.

2.3.1.10. La table de sortie :

Les nombres atomiques et les fractions en poids des constituants atomiques sont donnés au-dessus du tableau.

Les données pour les énergies immédiatement au-dessous et au-dessus de chaque bord sont données sur deux lignes. Il est à noter que le réseau d'énergie standard comprend automatiquement au moins une autre énergie entre deux arêtes d'absorption successives. Pour les matériaux de numéro atomique $Z \leq 10$, il n'y a pas de bords d'absorption au-dessus de l'énergie minimale, 1 keV. Voir figure (2.7)

Chapitre 3 :

Matériels et

Méthodes.

CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES.

Introduction :

Ce chapitre est consacré à la description du matériel utilisé dans notre travail (spectromètre gamma ou chaîne de mesure, le logiciel de spectrométrie utilisé) d'une part, et d'autre part à la présentation de la méthode d'analyse. Cette partie est nécessaire à la compréhension de toutes les étapes respectées pendant l'expérience.

3.1. Méthode expérimental :

3.1.1. Matériels :

3.1.1.1. Chaîne de détection :

Le but de cette chaîne est de relier l'énergie à un signal électrique.

❖ Description du système d'acquisition :

La chaîne d'acquisition est composée de plusieurs parties. Voir Figure (3.1) : Un détecteur NaI(Tl), un préamplificateur pour la minimisation du bruit, un amplificateur, un convertisseur analogique-numérique (ADC), un analyseur multicanaux (MCA).

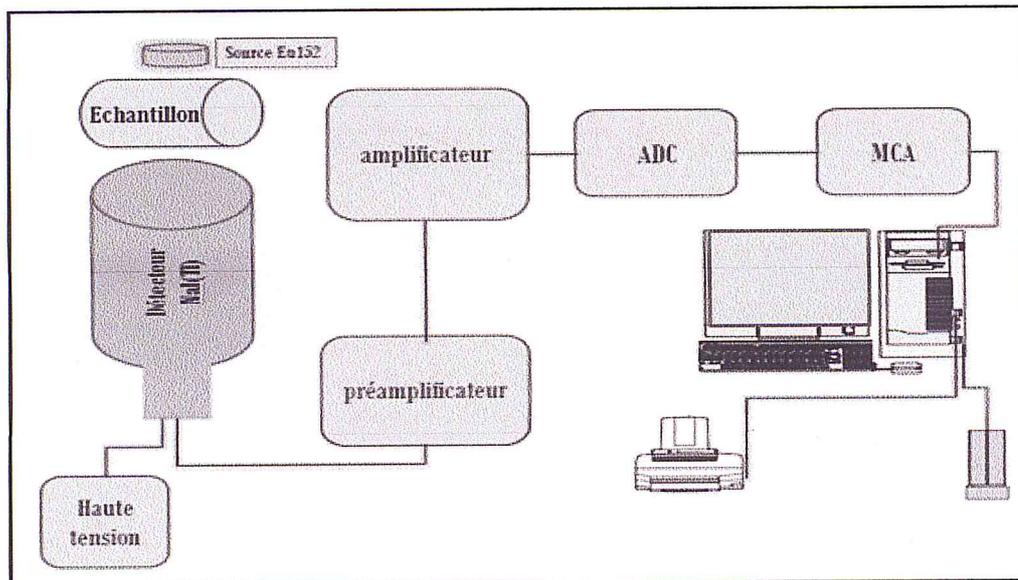


Figure (3.1): Schéma représentatif de la chaîne de spectrométrie gamma.

- **NaI(Tl) :**

Cristal d'iodure de sodium contenant une trace d'iodure de thallium comme activateur- ils produisent des électrons à travers le cristal par l'un des trois processus suivants: l'effet photoélectrique,

CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES.

la diffusion Compton et la production de paires électrons - trous. Ces électrons ou ces particules chargées qui traversent le cristal perdent leur énergie par excitation des atomes du cristal. Le cristal de NaI (Tl) (phosphorescent) va donc scintiller sur le passage d'une particule chargée. Le nombre de photons qu'il émet est proportionnel à l'énergie perdue dans le cristal par les particules chargées. Une fraction constante de ces photons sont collectées sur la cathode photosensible d'un photomultiplicateur. Les photoélectrons émis par cette cathode sont amplifiés dans le photomultiplicateur. Il apparaît, ainsi, une impulsion de courant à l'anode du photomultiplicateur. [16]

- **Alimentation haute Tension :**

L'alimentation haute tension est un élément indispensable, elle doit remplir les conditions

suivantes:

- Etre réglable pour les tensions imposées par le détecteur.
- Avoir un bruit très faible.

- **Préamplificateur:**

Le signal à l'entrée n'est pas proportionnel à l'énergie déposée dans le cristal, mais son intégrale est égale à la charge collectée qui dépend de l'énergie déposée. Le rôle principal du préamplificateur n'est pas d'amplifier le signal issu du détecteur mais de préparer le travail pour un amplificateur disposé plus loin dans la chaîne de mesure. On dispose le préamplificateur au plus près du détecteur pour:

- Réduire le bruit.
- Récupérer le maximum de signal.

- **Amplificateur:**

Qui sert à la mise en forme du signal et à son amplification : le but est de minimiser le bruit et d'obtenir un signal gaussien.

- **Convertisseur analogique-numérique:**

À la sortie de l'amplificateur on a un signal continu, le convertisseur transforme l'amplitude du signal en un nombre qui est proportionnelle à l'énergie déposée dans le cristal.

- **L'analyseur multicanaux :**

Il collecte, classe et enregistre les informations dans différents canaux : chaque canal correspond à une énergie. Cela permet d'obtenir un histogramme en temps réel dans lequel l'énergie déposée dans le cristal est reliée au numéro de canal et le nombre de coups dans un canal donné est proportionnelle aux nombres de photons ayant déposé la même énergie dans le cristal.

CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES.

Une visualisation du spectre s'effectue grâce à un système incorporé ou bien en liaison avec un micro-ordinateur.

3.1.1.2. Calibration en énergie :

Le logiciel Gamma Vision est utilisé pour le traitement et l'analyse du signal. Il permet d'avoir un spectre avec le numéro de canal en abscisse et le nombre de coups dans le canal correspondant. Ce spectre correspond à un histogramme représentant le nombre de photons mesurés en fonction de leur énergie. Un étalonnage en énergie est donc nécessaire à l'identification des éléments radioactifs, en établissant une relation linéaire entre le numéro de canal et l'énergie déposée dans le cristal (Relation 3.1), on obtient une droite de calibration (Voir figure 3.2). Pour cela on utilise une source test qui émet à des énergies connues. Nous avons utilisé une source d'Europium¹⁵² (Figure 3.3) possédant 6 pics d'énergies présentés dans le tableau (3.1). On sélectionne les pics et on leur affecte leur valeur en énergie correspondante. On obtient ainsi le spectre d'un ensemble de pics distribués en énergie se rajoutant sur un bruit de fond très faible. Les pics obtenus représentent l'énergie des photons incidents et permettent d'identifier le radioélément qui émet des rayonnements gamma. [39]

$$E(\text{keV}) = A_0 + A_1C + A_2C_2 + A_3C_3 + \dots$$

(3.1)

Où A_0 , A_1 , A_2 et A_3 sont les coefficients à déterminer et C le canal de l'AMC. Pour augmenter l'ordre du polynôme, un plus grand nombre de points d'étalonnage sont nécessaires.

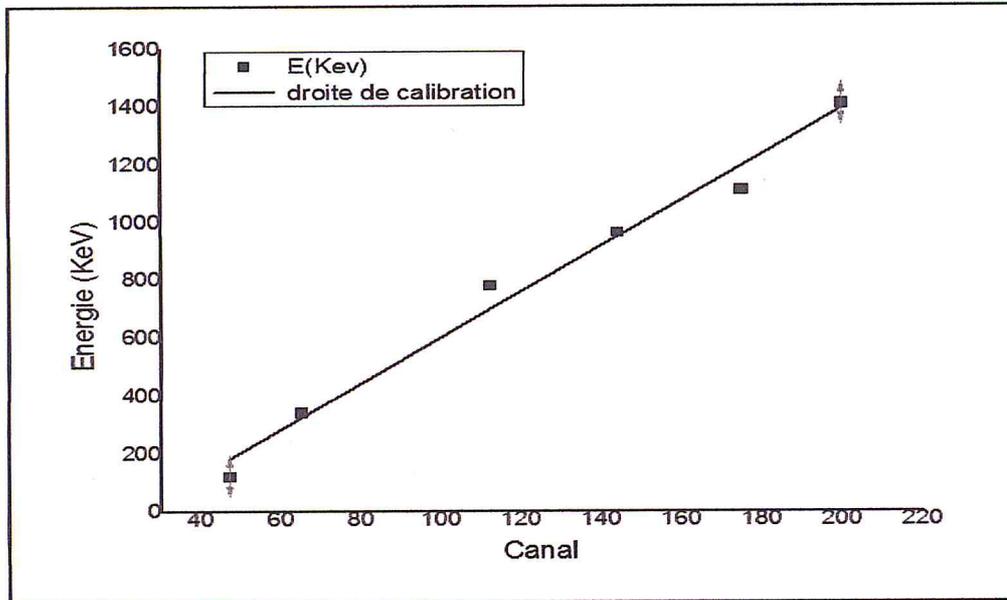


Figure (3.2): Droite de calibration en énergie.

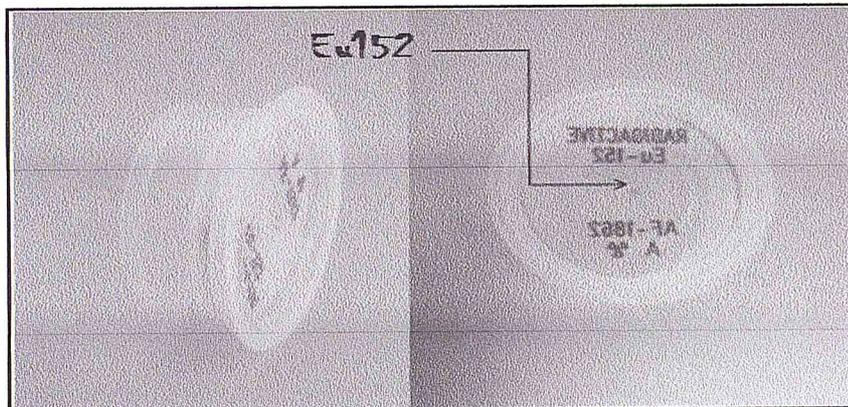


Figure (3.3): Source radioactive d' ^{152}Eu .

3.1.1.3. Analyse spectrale :

On réalise l'acquisition du spectre d' ^{152}Eu en gardant la calibration faite au préalable. Les énergies correspondantes en fonction de leurs proportions sont déterminées à l'aide de la table de radioactivité, on a pour les pourcentages les plus élevés:

E (KeV)	I ₀ (%)
121.78	28.58
344.27	26.54
778.90	12.94
964.07	14.60

CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES.

1112.07	13.64
1408.00	21.00

Tableau (3.1): Energies de pourcentage les plus élevées correspondantes a l' ^{152}Eu .

Nous pouvons observer l'ensemble des pics correspondants sur le spectre suivant pour une acquisition d'une durée de 8h.

Les raies significatives aux énergies correspondant au pic d'absorption total des gammas due à l'effet photoélectrique, On observe un plateau due aux effets Compton, causé par l'interaction de particules gamma avec un électron du détecteur.

3.1.2. Méthodes :

3.1.2.1. Atténuation et auto-absorption des rayons gamma :

Le facteur d'auto-absorption dépend de certains paramètres tels que la géométrie de l'échantillon, le coefficient d'atténuation linéaire μ et la densité du milieu traversé ; Lorsqu'un faisceau mono énergétique de photon d'intensité I_0 pénètre dans la matière (figure 3.4), on a une diminution progressive de l'intensité de ce faisceau dans le milieu traversé. Cette diminution de photons incidents ou atténuation est caractérisé par un coefficient d'atténuation qui dépend de l'énergie du photon E_γ et des caractéristiques du matériau traversé. L'atténuation d'un flux de rayons gamma traversant un trajet de longueur X et donné par la loi :

$$I(X) = I_0 e^{-\mu X} \quad (3.2)$$

La partie exponentielle désigne la fraction de photons qui n'ont pas interagi dans le milieu, on parle de facteur de transmission.

Le calcul de l'erreur sur l'atténuation a été fait selon la relation suivante : (voir annexe A)

$$\sigma_\mu = \sqrt{\frac{1}{X^2} \left(\frac{1}{I_0} + \frac{1}{I} \right)} \quad (3.3)$$

Pour la plupart des analyses environnementales, la valeur de μ n'est pas connue et devrait être estimée par des mesures [34] ou en utilisant une composition d'échantillon et densité supposée. Pour une évaluation réaliste du facteur d'auto-absorption et de la correction d'auto-absorption on utilise les relations (1.14) et (1.15) respectivement.

CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES.

3.1.2.2. Principe de la Méthode de transmission :

Comme il est mentionné dans le chapitre (1), section (1.5.1.1), nous avons utilisé la méthode proposée par Cutshall [13] que nous avons adaptée à notre dispositif expérimental. Les coefficients d'atténuation linéiques ont été déterminés expérimentalement en positionnant une source d' ^{152}Eu (voir annexe B) en amont de l'échantillon (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10), (Figure 3.6) alignées horizontalement avec le détecteur (Figure 3.4) à l'aide de collimateurs. La source d'Eu 152 est couramment utilisée car elles couvrent une large gamme d'énergie (121 KeV à 1408 KeV). Un flacon vide (air) de géométrie cylindrique d'une épaisseur équivalente soit à la hauteur du flacon, soit à son diamètre (notre cas) noté X, est placé entre la source et le détecteur. L'intensité I enregistré par le détecteur permet de déterminer le facteur d'atténuation linéique de l'échantillon $\mu_{\text{échant}}$ (cm⁻¹) selon la relation (3.2).

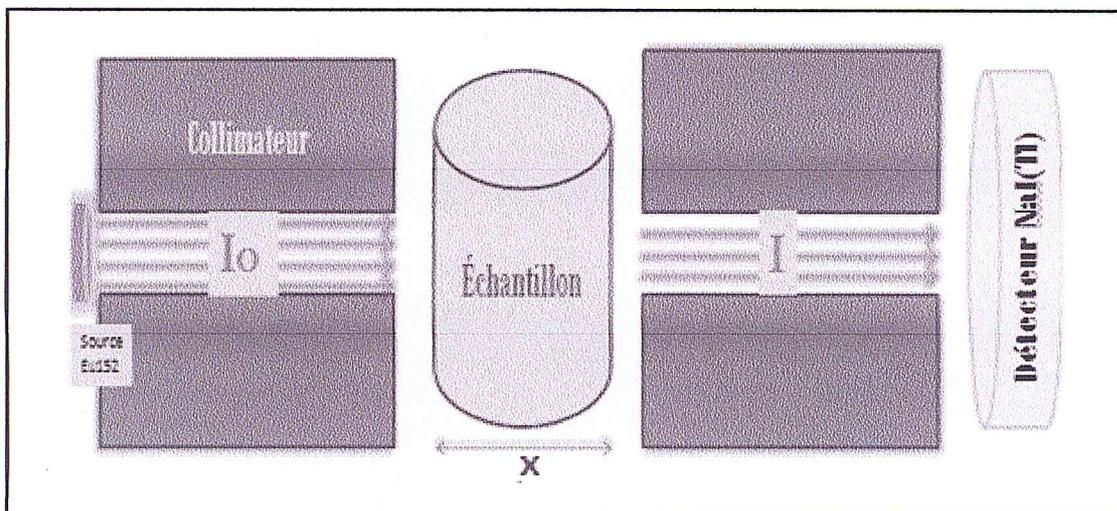


Figure (3.4): schéma descriptive de la méthode de transmission.

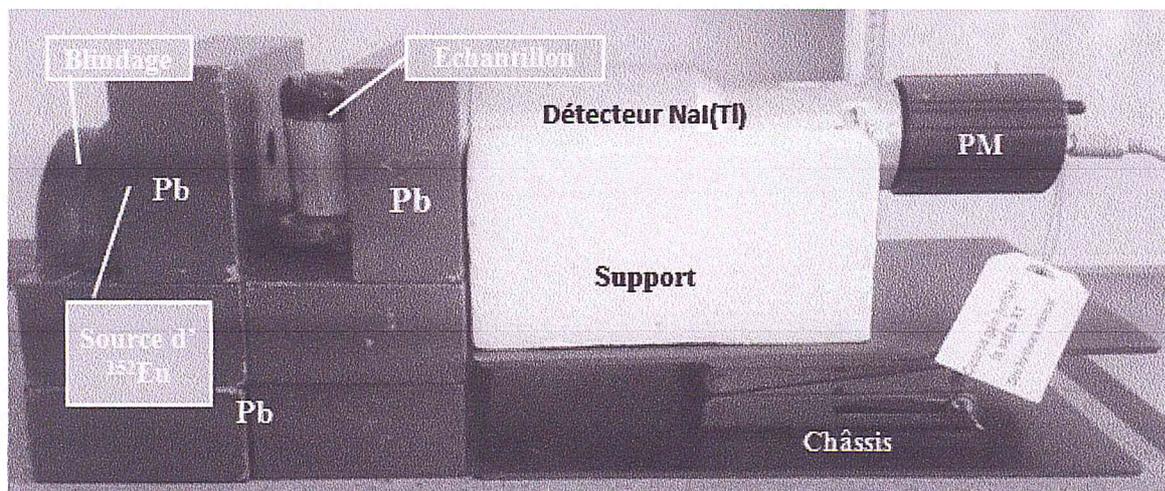
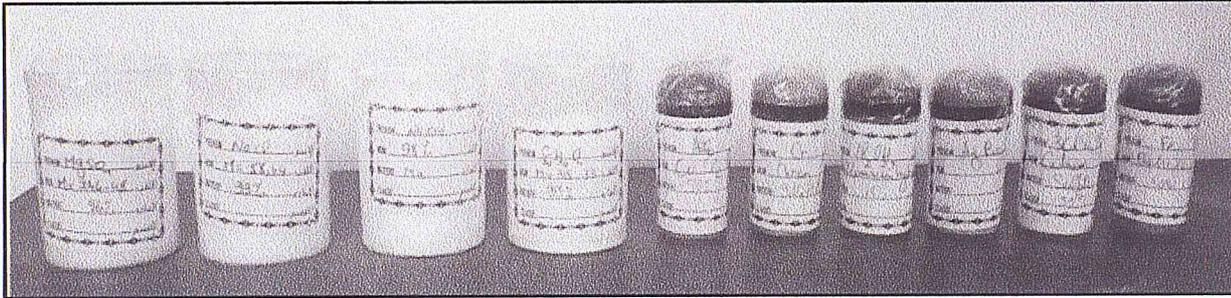


Figure (3.5): Dispositif expérimentale pour la méthode de transmission.

$$\mu_{\text{échant}} = \frac{1}{X} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) \quad (3.4)$$

La correction de l'auto absorption en utilisant la relation (1.15) qui définit le facteur de correction de l'auto-absorption C_{auto} comme étant le rapport du facteur d'auto-absorption de l'étalon à celui de l'échantillon voir chapitre 1. [13]



Figure(3.6): produits syntétiques utilisé dans ce travail.

3.1.2.3. Calcule de Z_{eff} :

La notion du Z effectif (Z_{eff}) est très utilisée dans les applications médicales pour estimer les atténuations dans les différents tissus. Pour expliquer la perte de comptage due à la composition chimique des échantillons, on revient sur les définitions du Z_{eff} . Pour des matrices composées d'un seul élément (carbone, oxygène, ...) les trois processus d'interaction, à savoir l'effet photo électrique, Compton et création de paire peuvent être exprimés en fonction de l'énergie du photon E et du nombre atomique Z de l'élément. Cependant pour les matrices des échantillons mesurés, la composition chimique est hétérogène. Elle est en général composée de plusieurs éléments avec différentes proportions, comme rapporté dans la communication de R.C. Murty [35] dans la revue Nature. La formule général utilisé pour le calcule de Z_{eff} est:

$$Z_{\text{eff}} = (\alpha_i \cdot Z_i^{n-1})^{\frac{1}{n-1}} \quad (3.5)$$

Avec $n = 4$ à 5 pour l'effet photoélectrique, $n = 1$ et 2 pour l'effet Compton et la création de paire respectivement. La notion de Z_{eff} n'est théoriquement pas démontrée [36]. Cependant, à faible énergie, l'effet photo électrique prédomine et la notion de Z_{eff} permet d'expliquer les variations d'efficacité obtenues pour les énergies inférieures à 100 KeV mesurées ou simulées dans un échantillon dont la composition chimique est différente de celle de l'étalon. Dans ce travail, la formule utilisée pour le calcul de Z_{eff} [22, 37, 38] est :

$$Z_{\text{eff}} = (\sum_i a_i \cdot Z_i^{3.5})^{\frac{1}{3.5}} \quad (3.6)$$

Avec

$$\alpha_i = \frac{\left(\frac{w_i Z_i}{A_i}\right)}{\left(\sum_i \frac{w_i Z_i}{A_i}\right)} \quad (3.7)$$

Où w_i est la fraction en masse de l'élément i dans la matrice, Z_i est le nombre atomique et A_i son nombre de masse. (Voir annexe C).

3.2. Simulation :

Les principaux objectifs de la présente étude devaient utiliser des simulations Monte-Carlo « Geant4 » (voir section 3.1.3.1) pour la mesure des coefficients d'atténuation linéiques dans plusieurs échantillons composés (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10) de haute pureté de chez FLUKA fournisseur (voir annexe D), en utilisant un détecteur à scintillation et tester la validité de Geant4 par comparaison avec l'expérience et les valeurs théoriques acquises par la base de données XCOM (chapitre 2, section 2.3). Le code Geant4 a été appliqué pour estimer les coefficients d'atténuation des photons dans différents produits synthétiques en masse, pour les énergies 121.78, 344, 778.9, 964, 1112 et 1408Kev puis comparées à des mesures expérimentales en fonction de leur déviation relative et la théorie, données obtenues par le programme XCOM. Les résultats sont présentés dans le chapitre 4 section « 4.1 ».

Après validation de Monte Carlo (Géant4) pour ce genre de mesure, une application pour la radioactivité naturelle a été faite en terme d'exemple pour voir l'influence de la masse volumique et du Z_{eff} de la matrice sur F_{att} .

Pour cela, une simulation Monte Carlo a été faite sur un échantillon d'eau de composition chimique fixe, de masse volumique qui varie de 0.1 à 10g/cm³. Puis on a simulé pour une masse volumique fixe $\rho = 3\text{g/cm}^3$ pour des Z_{eff} variant entre 1 et 30.

Les résultats obtenus sont présentés dans le chapitre 4, section « 4.2 » et « 4.3 »

3.2.1. Géométrie Géant4:

3.2.1.1. G4DétectionConstruction :

La simulation de l'échantillon se fait en définissant sa géométrie et son matériau composite. Trois classes sont dédiées à la nature des matériaux : G4isotope, G4élément, G4matériau.

La définition d'un élément se fait par la définition de son nom, son numéro atomique Z , et sa masse molaire A . (Voir figure 3.7)

CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES.

```
//  
// define Elements  
//  
G4Element* H = new G4Element("Hydrogen", symbol="H", z= 1, a= 1.01*g/mole);  
G4Element* C = new G4Element("Carbon", symbol="C", z= 6, a= 12.01*g/mole);  
G4Element* N = new G4Element("Nitrogen", symbol="N", z= 7, a= 14.01*g/mole);  
G4Element* O = new G4Element("Oxygen", symbol="O", z= 8, a= 16.00*g/mole);  
G4Element* Na = new G4Element("Sodium", symbol="Na", z=11, a= 22.99*g/mole);  
G4Element* Ar = new G4Element("Argon", symbol="Ar", z=18, a= 39.95*g/mole);  
G4Element* I = new G4Element("Iodine", symbol="I", z=53, a= 126.90*g/mole);  
G4Element* Xe = new G4Element("Xenon", symbol="Xe", z=54, a= 131.29*g/mole);  
G4Element* Cl =new G4Element("clor", symbol="Cl", z=17, a=35*g/mole);  
G4Element* Mg =new G4Element("Magnésium", "Mg", z=12, a=24*g/mole);  
G4Element* S =new G4Element("Sulfur", "S", z=16, a=32*g/mole);  
G4Element* Ag =new G4Element("Argent", "Ag", z=47, a=107*g/mole);  
G4Element* Br =new G4Element("Brome", "Br", a=35, a=79*g/mole);  
G4Element* P =new G4Element("p", "P", z=15, a=30*g/mole);  
G4Element* Si =new G4Element("Silisium", "Si", z=14, a=28*g/mole);  
G4Element* Al =new G4Element("Aluminium", "Al", z=13, a=26.98*g/mole);  
G4Element* Cr = new G4Element("Chrome", "Cr", z=25, a= 51.996*g/mole);  
G4Element* Fe = new G4Element("Iron", "Fe", z=26, a= 55.845*g/mole);  
G4Element* Cd =new G4Element("Cd", "Cd", z=48, a=112.4*g/mole);  
G4Element* Zn =new G4Element("zinc", "Zn", z=30, a=65.4*g/mole);  
G4Element* Cu =new G4Element("cuivre", "Cu", z=29, a=63.5*g/mole);  
G4Element* Pb =new G4Element("Pb","Pb", z=82, a=207.2*g/mole);  
G4Element* As =new G4Element("Arsenic", "As", z=33, a=74.9*g/mole);  
G4Element* B =new G4Element("Bore", "B", z=5, a=10.811*g/mole);  
G4Element* Ne =new G4Element("Neon", "Ne", z=10, a=20.18*g/mole);  
G4Element* Ca =new G4Element("Calsium", "Ca", z=20, a=40.078*g/mole);
```

Figure (3.7) : Définition d'un élément pour une simulation MC(Géant4).

Si le matériau est un composé sa définition est faite par l'ensemble d'éléments qui le composent plus sa densité, si non en précisant son nom, son numéro atomique Z, sa masse molaire a, et sa densité. (Voir figure 3.8)

```
G4Material* chrom =new G4Material("chrom", density=7.19*g/cm3, ncomponents=7);  
chrom->AddElement(Cr, fractionmass=0.99);  
chrom->AddElement(Al, fractionmass=0.002);  
chrom->AddElement(Fe, fractionmass=0.003);  
chrom->AddElement(P, fractionmass=0.0001);  
chrom->AddElement(Si, fractionmass=0.001);  
chrom->AddElement(S, fractionmass=0.00025);  
chrom->AddElement(C, fractionmass=0.0002);  
  
new G4Material("Aluminium", z=13, a=26.98*g/mole, density= 2.700*g/cm3);
```

Figure (3.8) : Définition d'un composé pour une simulation MC(Géant4).

Les dimensions et la forme de l'échantillon sont représenté par des volumes, GEANT4 considère trois sortes de volume : solide, logique, et physique. (Voir figure 3.9)

CHAPITRE 3 : MATÉRIELS ET MÉTHODES.

```
// World
//
fSolidWorld = new G4Box("World", //its name
                      fWorldSizeX/2, fWorldSizeYZ/2, fWorldSizeYZ/2); //its size

fLogicWorld = new G4LogicalVolume(fSolidWorld, //its solid
                                 fWorldMaterial, //its material
                                 "World"); //its name

fPhysiWorld = new G4PVPlacement(0, //no rotation
                                G4ThreeVector(0.,0.,0.), //at (0,0,0)
                                fLogicWorld, //its logical volume
                                "World", //its name
                                0, //its mother volume
                                false, //no boolean operation
                                0); //copy number

// Absorber
//
fSolidAbsorber = new G4Box("Absorber",
                          fAbsorberThickness/2, fAbsorberThickness/2, fAbsorberThickness/2);

fLogicAbsorber = new G4LogicalVolume(fSolidAbsorber, //its solid
                                    fAbsorberMaterial, //its material
                                    "Absorber"); //its name

fPhysiAbsorber = new G4PVPlacement(0, //no rotation
                                   G4ThreeVector(0,0.,0.), //its position
                                   fLogicAbsorber, //its logical volume
                                   "Absorber", //its name
                                   fLogicWorld, //its mother
                                   false, //no boolean operat
                                   0); //copy number
```

Figure (3.9): Définition de la géométrie et le contenu de l'échantillon pour une simulation MC(Géant4).

Volume solide : sert à définir la géométrie du volume.

Volume logique : sert à préciser les propriétés du matériau.

Volume physique : Quant au volume physique, il établit une certaine hiérarchie, en plaçant les différents volumes dans un volume figé (World).

3.2.1.2. Génération des particules primaire :

Pour se travail il ya deux volets pour généré des particules :

G4PrimaryGeneratorAction : sert à déclarer la nature de la particule incidente, sa direction, et son énergie. (Voir figure 3.10)

```
void PrimaryGeneratorAction::SetDefaultKinematic()
{
    // default particle kinematic
    //
    G4ParticleTable* particleTable = G4ParticleTable::GetParticleTable();
    G4ParticleDefinition* particle
        = particleTable->FindParticle("gamma");
    fParticleGun->SetParticleDefinition(particle);
    fParticleGun->SetParticleMomentumDirection(G4ThreeVector(1.,0.,0.));
    fParticleGun->SetParticleEnergy(344.*keV);
    G4double x0 = -4.*(fDetector->GetWorldSizeX());
    fParticleGun->SetParticlePosition(G4ThreeVector(x0, 0.0, 0.0));
}
```

Figure (3.10) : Génération de particules pour une simulation MC(Géant4).

G4Physicslist : L'utilisateur doit au préalable définir le processus physique à étudier, et la nature des particules. Dans ce travail, on s'est limité aux processus d'interaction concernant les photons. (Voir figure 3.11)

```
void PhysListEmStandardSSM::ConstructProcess()
{
    // Add standard EM Processes

    auto particleIterator=GetParticleIterator();
    particleIterator->reset();
    while( (*particleIterator)() ){
        G4ParticleDefinition* particle = particleIterator->value();
        G4ProcessManager* pmanager = particle->GetProcessManager();
        G4String particleName = particle->GetParticleName();

        if (particleName == "gamma") {
            // gamma
            pmanager->AddDiscreteProcess(new G4PhotoElectricEffect);
            pmanager->AddDiscreteProcess(new G4ComptonScattering);
            pmanager->AddDiscreteProcess(new G4GammaConversion);
        }
    }
}
```

Figure (3.11): Physique liste d'une simulation MC (Géant4).

3.2.1.3. Extractions de données :

L'extraction de données fournies par la simulation se fait en utilisant G4RunAction qui contrôle le début et la fin d'un run. On peut mettre l'ouverture d'un fichier de sortie ou un histogramme pour une analyse ultérieure (Root, ...). (Voir figure 3.12)

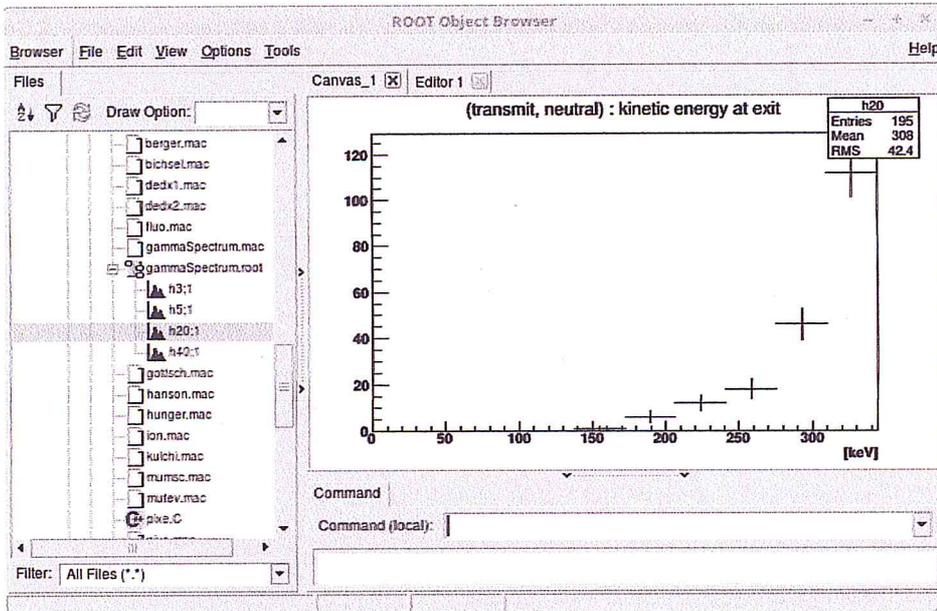


Figure (3.12): Extraction de résultats pour une simulation MC(Géant4).

Chapitre 4 :

Résultats et

Discussions

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

Introduction :

Dix différents composés chimiques ont été exposés aux rayonnements gamma d'une source d' ^{152}Eu (Voir annexe B). L'intensité I des photons transmis est obtenue expérimentalement et par simulation Monte Carlo, le coefficient d'atténuation est calculé en utilisant la relation de Beer-Lambert.

L'auto absorption concerne les photons qui n'atteignent pas le détecteur à cause de leur atténuation dans la matrice elle-même, [39]. Dans ce chapitre, on mettra l'accent sur la correction de l'auto absorption et l'influence de la masse volumique et du numéro atomique de la matrice analysé (Z_{eff}).

4.1. Comparaison des coefficients d'atténuations expérimental, par X-COM et Monte Carlo:

Les résultats des coefficients d'atténuation des produits (P1 à P10) de l'expérience et de la simulation MC(Géant4) sont donnés avec les résultats obtenus par X-COM dans le tableau (4.1), avec l'erreur sur l'expérience et Géant4.

Il est remarquable que les coefficients d'atténuation mesuré par expérience et Géant4 et calculé par X-COM sont très proche pour toutes les énergies de ^{125}Eu dans les différents produits synthétiques. (Voir annexe D)

La différence du coefficient d'atténuation pour les produits P7 et P8 entre l'expérience et X-COM pour l'énergie (121KeV) est due à la résonance de la section efficace d'absorption total σ_{pe} .

Pour les produits P7 et P8 le nombre de photons transmis obtenu par la simulation est nul (atténuation total) pour l'énergie 121.78 KeV figure (4.3) et (4.4).

Produit	L'énergie du photon (kev)	μ (cm^{-1})			Différence relative (%)	
		X-Com	Géant4	Expérimental	X-Com-Expérimental	Géant4-Expérimental
P1	122	0.120	0.200 ± 0.009	0.107 ± 0.007	-0.108 (10.8)	0.465 (46.5)
	344	0.087	0.110 ± 0.007	0.082 ± 0.050	-0.057 (5.7)	0.254 (25.4)
	779	0.061	0.090 ± 0.004	0.061 ± 0.014	0	0.322 (32.3)
	964	0.056	0.073 ± 0.006	0.052 ± 0.011	0.070 (7)	0.287 (28.7)
	1112	0.052	0.058 ± 0.006	0.051 ± 0.014	0.019 (109)	0.120 (12)
	1408	0.046	0.054 ± 0.010	0.038 ± 0.014	0.170 (17)	0.296 (29.6)
P2	122	0.336	0.340 ± 0.013	0.310 ± 0.013	0.077 (7.7)	0.088 (8.8)
	344	0.214	0.240 ± 0.003	0.200 ± 0.016	0.120 (12)	0.166 (16.6)
	779	0.150	0.230 ± 0.010	0.140 ± 0.016	0.530 (53)	0.391 (39.1)
	964	0.135	0.220 ± 0.009	0.129 ± 0.014	-0.044 (4.4)	0.413 (41.3)
	1112	0.127	0.110 ± 0.007	0.118 ± 0.016	-0.070 (7)	-0.072 (7.2)

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

	1408	0.112	0.107±0.006	0.100±0.016	0.107 (10.7)	-0.065 (6.5)
P3	122	0.392	0.430±0.017	0.341±0.014	-0.130 (13)	0.206 (20.6)
	344	0.265	0.230±0.009	0.237±0.018	-0.106 (10.6)	-0.030 (3)
	779	0.179	0.210±0.009	0.161±0.017	0.170 (17)	0.233 (23.3)
	964	0.161	0.150±0.008	0.150±0.018	-0.068 (6.8)	0
	1112	0.150	0.140±0.007	0.134±0.017	-0.106 (10.6)	0.042 (4.2)
	1408	0.134	0.140±0.007	0.089±0.016	-0.358 (35.8)	0.364 (36.4)
P4	122	0.410	0.430±0.017	0.390±0.017	0.048 (4.8)	0.093 (9.3)
	344	0.260	0.210±0.009	0.250±0.019	-0.038 (3.8)	-0.190 (19)
	779	0.180	0.210±0.009	0.190±0.018	0.055 (5.5)	0.095 (9.5)
	964	0.170	0.210±0.009	0.180±0.019	0.058 (5.8)	0.142 (14.2)
	1112	0.150	0.140±0.007	0.140±0.017	0.066 (6.6)	0
	1408	0.140	0.120±0.007	0.130±0.017	0.071 (7.1)	-0.083 (8.3)
P5	122	0.437	0.370±0.015	0.380±0.016	-0.130 (13)	-0.027 (2.7)
	344	0.295	0.340±0.013	0.280±0.020	-0.050 (5)	0.176 (17.6)
	779	0.200	0.210±0.009	0.180±0.018	-0.100 (10)	0.142 (14.2)
	964	0.180	0.180±0.008	0.168±0.019	-0.066 (6.6)	0.066 (6.6)
	1112	0.170	0.140±0.007	0.150±0.018	-0.117 (11.7)	-0.071 (7.1)
	1408	0.150	0.120±0.007	0.100±0.016	-0.333 (33.3)	0.166 (16.6)
P6	122	0.704	0.720±0.042	0.630±0.035	-0.105 (10.5)	0.125 (12.5)
	344	0.330	0.280±0.011	0.280±0.020	0.151 (15.1)	0
	779	0.225	0.230±0.009	0.200±0.018	-0.111 (11.1)	0.130 (13)
	964	0.200	0.180±0.008	0.188±0.019	-0.100 (10)	-0.044 (4.4)
	1112	0.189	0.170±0.008	0.175±0.019	-0.100 (10)	-0.029 (2.9)
	1408	0.160	0.160±0.008	0.100±0.016	-0.375 (37.5)	0.375 (37.5)
P7	122	4.320	--	1.800±1.500	-0.583 (58.3)	--
	344	0.620	0.660±0.035	0.570±0.049	-0.080 (8)	0.136 (13.6)
	779	0.318	0.300±0.012	0.285±0.024	-0.103 (10.3)	-0.050 (5)
	964	0.278	0.240±0.010	0.260±0.024	-0.064 (6.4)	-0.083 (8.3)
	1112	0.250	0.228±0.009	0.230±0.022	-0.080 (8)	-0.008 (0.8)
	1408	0.220	0.170±0.003	0.190±0.020	-0.136 (13.6)	-0.117 (11.7)
P8	122	4.410	--	1.810±1.550	-0.589 (58.9)	--
	344	0.760	0.790±0.052	0.570±0.048	-0.250 (25)	0.278 (27.8)
	779	0.435	0.350±0.014	0.400±0.033	-0.080 (8)	-0.142 (14.2)
	964	0.380	0.340±0.013	0.340±0.030	-0.040 (4)	0
	1112	0.350	0.320±0.017	0.300±0.027	-0.142 (14.2)	-0.062 (6.2)
	1408	0.310	0.270±0.011	0.290±0.027	-0.064 (6.4)	-0.074 (7.4)
P9	122	1.600	1.400±0.371	1.350±0.35	-0.156 (15.6)	-0.035(3.5)
	344	0.719	0.720±0.016	0.690±0.071	0.040 (4)	0.041 (4.1)
	779	0.480	0.600±0.011	0.420±0.035	-0.125 (12.5)	0.300 (30)
	964	0.430	0.400±0.006	0.397±0.035	-0.076 (7.6)	0.007 (0.7)
	1112	0.400	0.380±0.005	0.380±0.034	-0.050 (5)	0
	1408	0.350	0.270±0.004	0.317±0.029	-0.094 (9.4)	-0.174 (17.4)
P10	122	2.000	2.100±3.61	1.800±1.500	-0.100 (10)	0.142 (14.2)
	344	0.800	0.770±0.049	0.770±0.092	-0.037 (3.7)	0
	779	0.530	0.660±0.035	0.450±0.039	-0.150 (15)	0.318 (31.8)
	964	0.480	0.620±0.031	0.430±0.039	-0.104 (10.4)	0.306 (30.6)
	1112	0.440	0.400±0.016	0.410±0.037	-0.068 (6.8)	-0.025 (2.5)
	1408	0.390	0.300±0.012	0.376±0.034	0.035 (3.5)	-0.253 (25.3)

Tableau (4.1): Coefficients d'atténuation linéique expérimental, par X-COM et par monte Carlo (Géant4) des échantillons en fonction de l'énergie.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

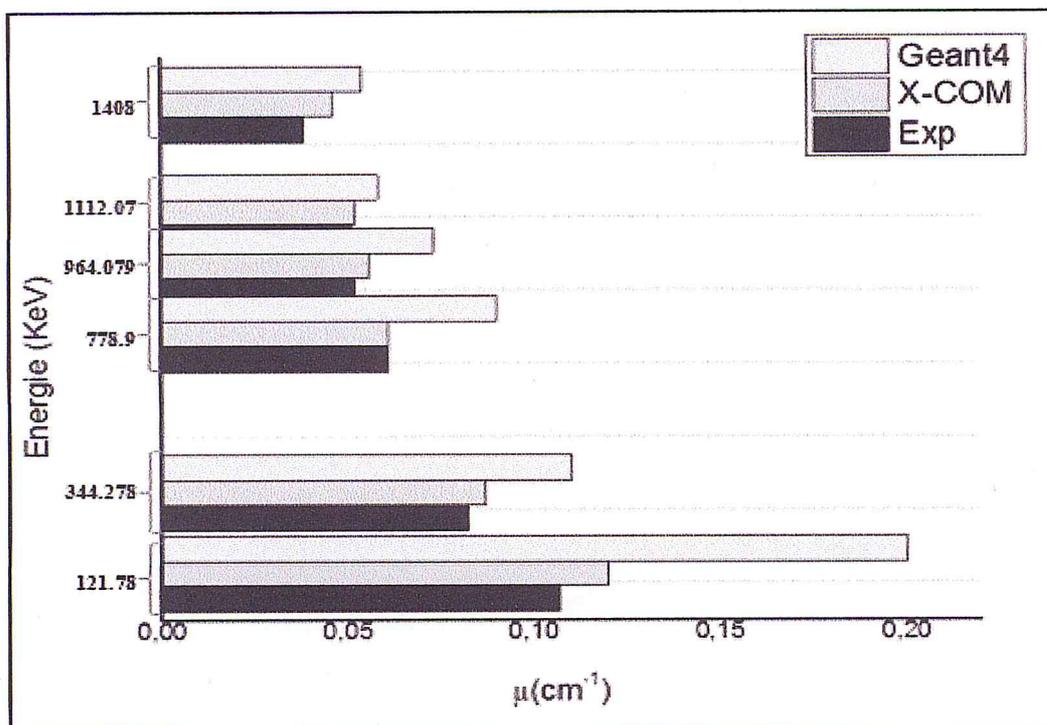


Figure (4.1) : Coefficient d'atténuation de l'échantillons P1 ($\rho = 1\text{g/cm}^3$) par Exp, X-COME et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d'¹⁵²Eu.

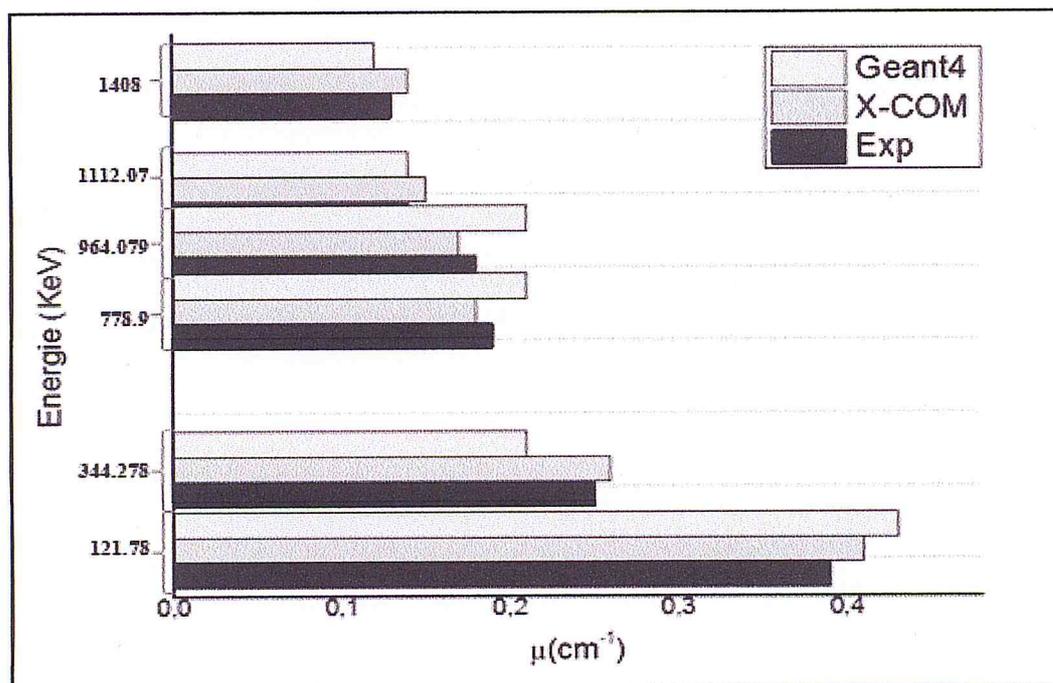


Figure (4.2) : Coefficient d'atténuation de l'échantillons P4 ($\rho = 2.7\text{g/cm}^3$) par Exp, X-COM et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d'¹⁵²Eu.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

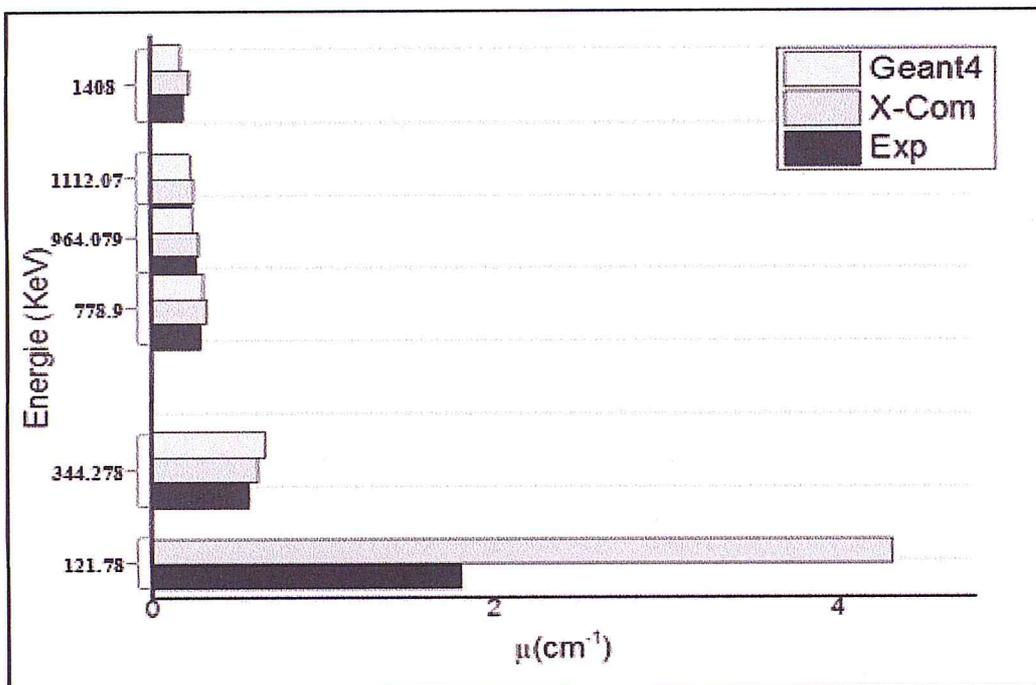


Figure (4.3) : Coefficient d'atténuation de l'échantillon P7 ($\rho = 4.69 \text{ g/cm}^3$) par Exp, X-COM et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu .

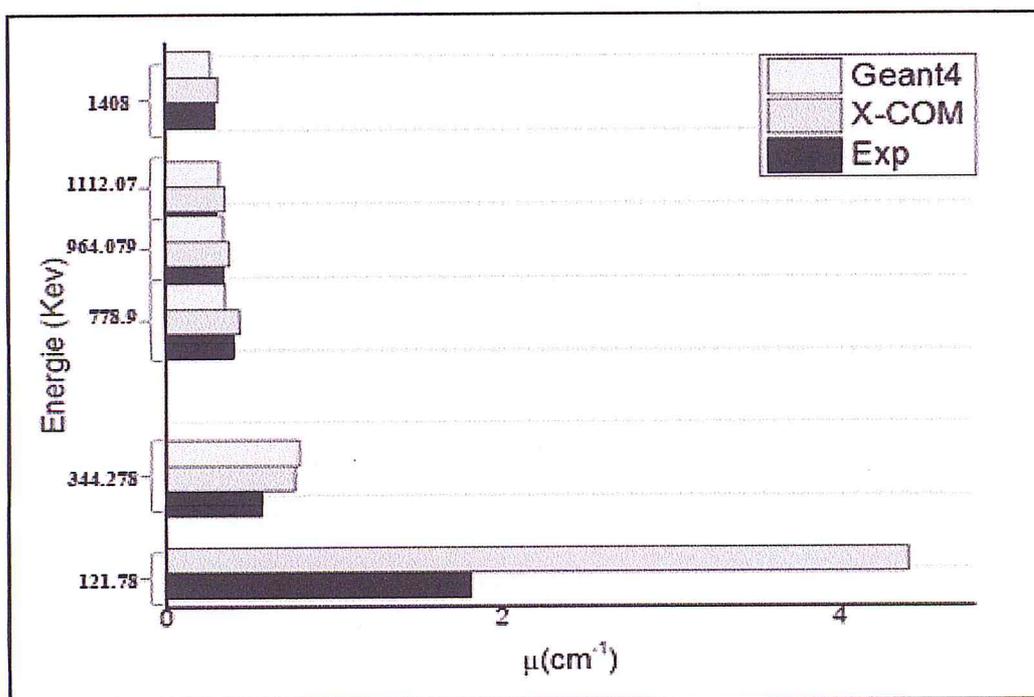


Figure (4.4) : Coefficient d'atténuation de l'échantillon P8 ($\rho = 6.47 \text{ g/cm}^3$) par Exp, X-COM et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu .

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

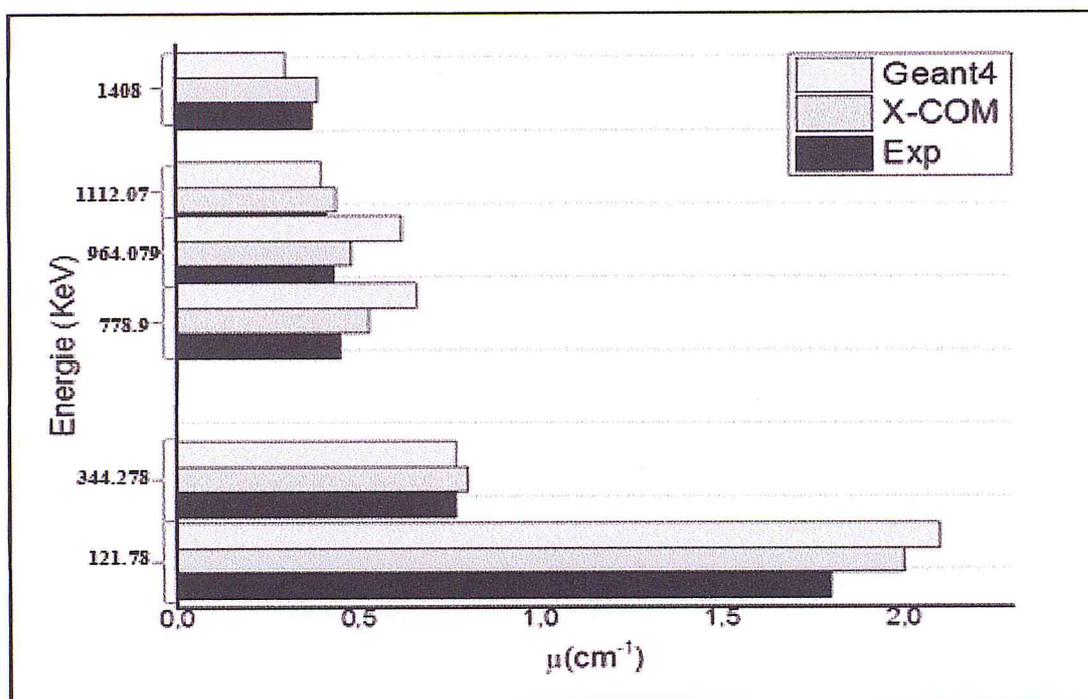


Figure (4.5) : Coefficient d'atténuation de l'échantillon P10 ($\rho = 7.87 \text{ g/cm}^3$) par Exp, X-COM et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu .

4.2. Evaluation du coefficient d'auto absorption:

A présent nous allons déterminer ce coefficient d'auto-absorption expérimentalement, par X-COM et par simulation code Monte-Carlo(Géant4). Il a été calculé à partir du rapport $F_{\text{attéchant}}/F_{\text{attéchant}}$ (mesure du coefficient d'atténuation) relation (1.15) chapitre 1.

Les résultats trouver son présentés dans les tableaux (4.2), (4.3), (4.4).

Energies ^{152}Eu	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
121.78	0.72	0.43	0.40	0.36	0.37	0.24	0.09	0.09	0.11	0.09
344.278	0.78	0.56	0.51	0.49	0.46	0.46	0.26	0.26	0.22	0.20
778.9	0.82	0.66	0.62	0.57	0.59	0.56	0.46	0.36	0.34	0.32
964.079	0.85	0.68	0.64	0.59	0.60	0.58	0.48	0.40	0.36	0.34
1112.07	0.85	0.70	0.67	0.66	0.62	0.60	0.52	0.44	0.37	0.35
1408	0.89	0.74	0.76	0.68	0.73	0.73	0.57	0.45	0.42	0.37

Tableau (4.2) : Coefficient d'auto absorption expérimental, en fonction de la densité de l'échantillon et de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu .

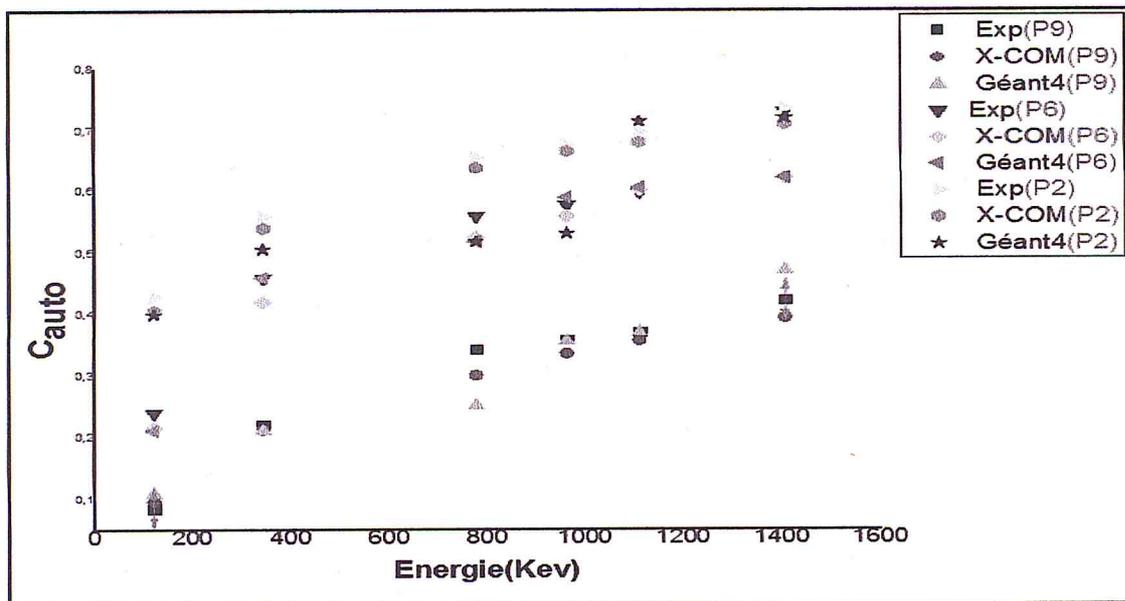
CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

Energies ^{152}Eu	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
121.78	0.69	0.41	0.36	0.35	0.33	0.22	0.04	0.03	0.10	0.08
344.278	0.76	0.54	0.48	0.48	0.44	0.42	0.24	0.20	0.21	0.19
778.9	0.83	0.64	0.59	0.59	0.56	0.53	0.42	0.33	0.30	0.28
964.079	0.84	0.67	0.62	0.60	0.59	0.56	0.46	0.37	0.34	0.30
1112.07	0.85	0.68	0.64	0.64	0.64	0.60	0.58	0.39	0.36	0.33
1408	0.86	0.71	0.68	0.66	0.64	0.62	0.53	0.43	0.39	0.36

Tableau (4.3) : Coefficient d'auto absorption code de calcul X-COM, en fonction de la densité de l'échantillon et de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu .

Energies ^{152}Eu	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
121.78	0.56	0.40	0.34	0.34	0.38	0.21	--	--	0.11	0.07
344.278	0.71	0.51	0.52	0.55	0.40	0.46	0.23	0.19	0.21	0.20
778.9	0.76	0.52	0.55	0.55	0.55	0.52	0.44	0.39	0.25	0.23
964.079	0.80	0.53	0.64	0.55	0.59	0.59	0.51	0.40	0.36	0.24
1112.07	0.83	0.71	0.66	0.66	0.66	0.61	0.52	0.42	0.37	0.36
1408	0.84	0.72	0.66	0.69	0.69	0.62	0.61	0.47	0.47	0.44

Tableau (4.4) : Coefficient d'auto absorption Simulation Monte Carlo(Géant4), en fonction de la densité de l'échantillon et de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu .



CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

Figure (4.6) : Facteur de correction d'auto absorption de différents échantillons par Exp, X-COM et Géant4 en fonction de l'énergie des rayonnements gamma d' ^{152}Eu .

Les résultats de l'expérience ont été comparés avec ceux obtenus par X-COM et par simulation Monte-Carlo(Géant4). La figure (4.6), ($C_{\text{auto}}=f(E)$) montrent cette comparaison. Les méthodes de mesure et calcul (Exp, Géant4, X-COM) présentent une bonne concordance entre les valeurs.

Dans cette étude, il a été montré que la modélisation par la méthode Monte Carlo(Géant4) est bien fiable pour la simulation du transport des photons (monte Carlo est donc validé pour se genre de mesure).

La caractérisation précise du système de détection, la nature de la source, et les 'interactions γ -matière, nous ont permient d'évaluer le coefficient d'auto-absorption pour corriger et améliorer les analyses quantitatives des échantillons denses par spectrométrie γ .

4.3. Simulation Monte Carlo par Géant4:

Afin de mettre en évidence l'influence de la masse volumique ρ et le Z_{eff} sur l'auto absorption. Des simulations Monte-Carlo (Géant4) ont été réalisées en utilisant la méthode de transmission section (1.5.1.1), pour des énergies gamma par la quantification de la radioactivité naturelle (583.1, 1120.3, 1460.8, 1764.5et 2614.6Kev). Voir annexe B

4.3.1. L'influence de la densité sur l'auto absorption :

En utilisant le code Monte-Carlo (Géant4) on a pu modéliser des masses volumiques arbitraires allant de 0,01 à 10 g.cm⁻³ sur un échantillon d'eau ($Z_{\text{eff}}=3.33$, composition chimique fixe). Les énergies considérées dans les simulations sont celles de la radioactivité naturelle. Les tableaux (4.5), (4.6) résumant les résultats des simulations, coefficient d'atténuation et coefficient de correction de l'auto absorption respectivement. La courbes (4.7) représentent les coefficients d'atténuations en fonction de la masse volumique et l'énergie ρ ($\mu = f(\rho, E)$) et la courbe (4.8) représentent les coefficients d'atténuations en fonction de la masse volumique ρ ($\mu = f(\rho)$) pour l'énergie (583.1Kev), et la courbe (4.9) représente les coefficients de correction en fonction de la masse volumique et de l'energie ($C_{\text{auto}} = f(\rho, E)$).

Les coefficients d'atténuations sont importants pour les masses volumiques élevées et les faibles énergies, et d' décroissent avec la décroissance de ρ .

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

Les coefficients de corrections de l'auto absorption sont importants pour les faibles ρ et d'écrouissent avec l'augmentation de la masse volumique.

ρ (g/cm ³)	0.01	0.5	1	3	6	8	10
583.1 (Kev)	0.00044 ± 0.0055	0.055 ± 0.015	0.100 ± 0.007	0.210 ± 0.009	0.300 ± 0.012	0.760 ± 0.047	0.900 ± 0.074
1120.3 (Kev)	0.00038 ± 0.0055	0.034 ± 0.015	0.058 ± 0.006	0.200 ± 0.009	0.233 ± 0.001	0.665 ± 0.035	0.770 ± 0.050
1460.8 (Kev)	0.00030 ± 0.0055	0.027 ± 0.006	0.054 ± 0.006	0.200 ± 0.009	0.226 ± 0.001	0.648 ± 0.034	0.720 ± 0.042
1764.5 (Kev)	0.00010 ± 0.0055	0.025 ± 0.006	0.044 ± 0.006	0.100 ± 0.007	0.214 ± 0.009	0.642 ± 0.033	0.700 ± 0.040
2614.6 (Kev)	0.00002 ± 0.0055	0.016 ± 0.006	0.036 ± 0.006	0.053 ± 0.006	0.197 ± 0.009	0.620 ± 0.031	0.680 ± 0.037

Tableau (4.5) : Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie E en (keV) et la masse volumique ρ en (g/cm³).

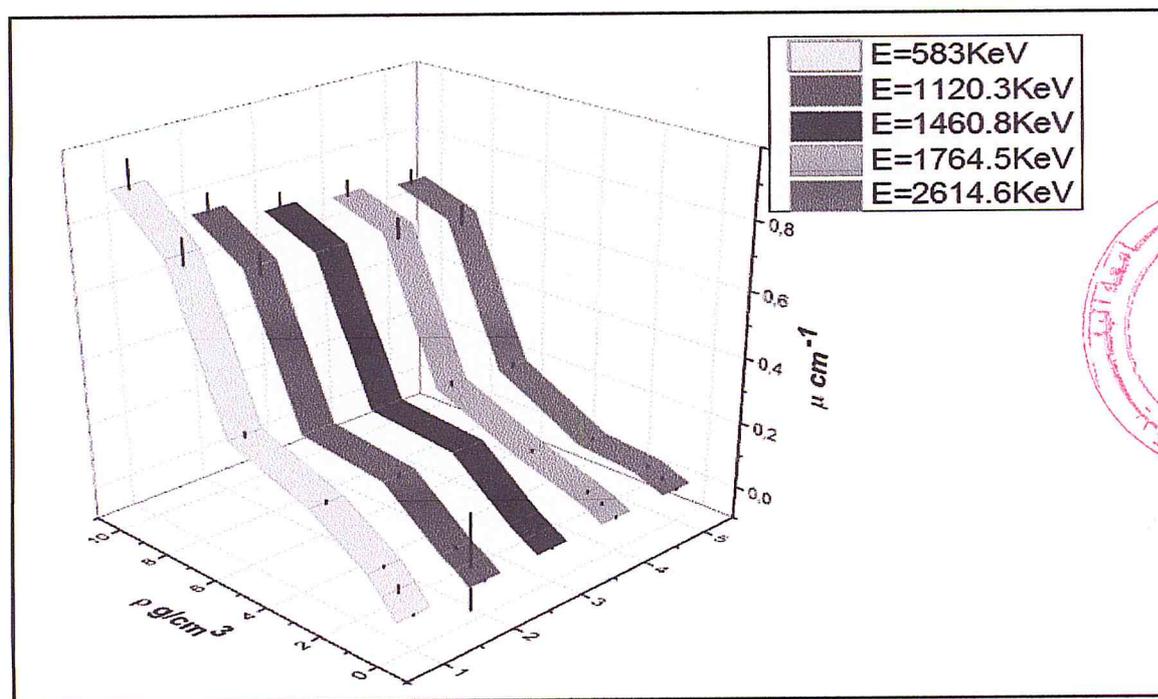


Figure (4.7) : Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie et de la masse volumique.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

On constate dans la Figure (4.8) que le coefficient d'atténuation pour une énergie donnée et composition chimique fixe augmente avec l'augmentation de la masse volumique ρ .

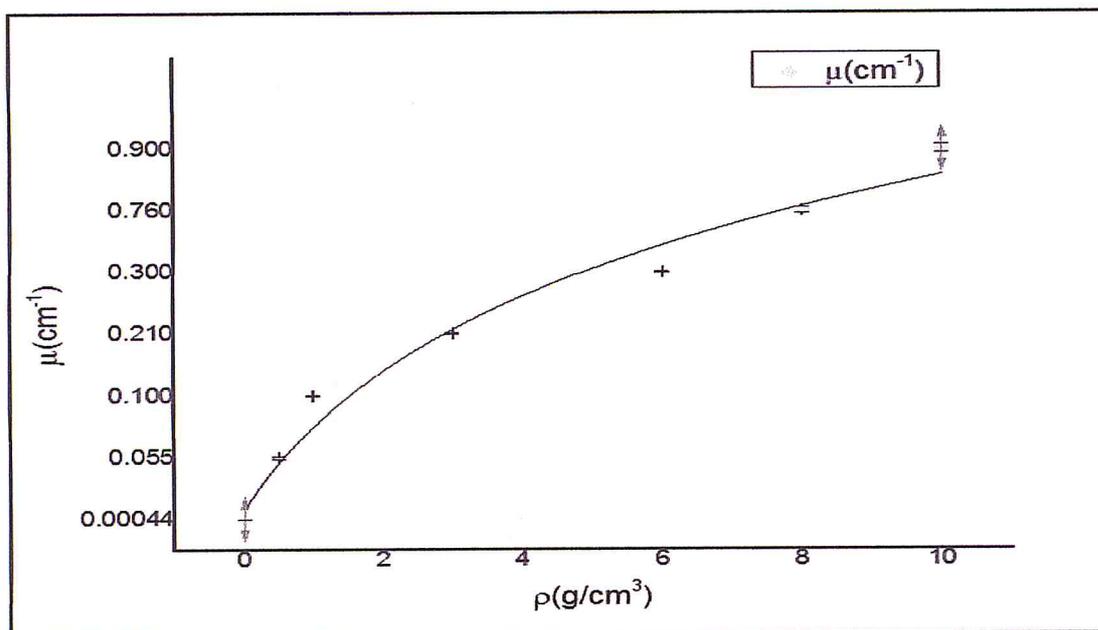


Figure (4.8) : Variation du coefficient d'atténuation en fonction de ρ (composition chimique fixe H₂O) pour une énergie de 583Kev.

ρ (g/cm ³)	0.01	0.5	1	3	6	8	10
583.1 (Kev)	0.998	0.840	0.735	0.545	0.440	0.201	0.170
1120.3 (Kev)	0.998	0.897	0.833	0.560	0.515	0.228	0.200
1460.8 (Kev)	0.999	0.917	0.843	0.560	0.524	0.234	0.212
1764.5 (Kev)	0.999	0.923	0.880	0.735	0.540	0.236	0.220
2614.6 (Kev)	0.999	0.950	0.891	0.846	0.564	0.244	0.223

Tableau (4.6) : Variation du coefficient d'auto absorption en fonction de l'énergie E en (keV) et la masse volumique ρ en (g/cm³).

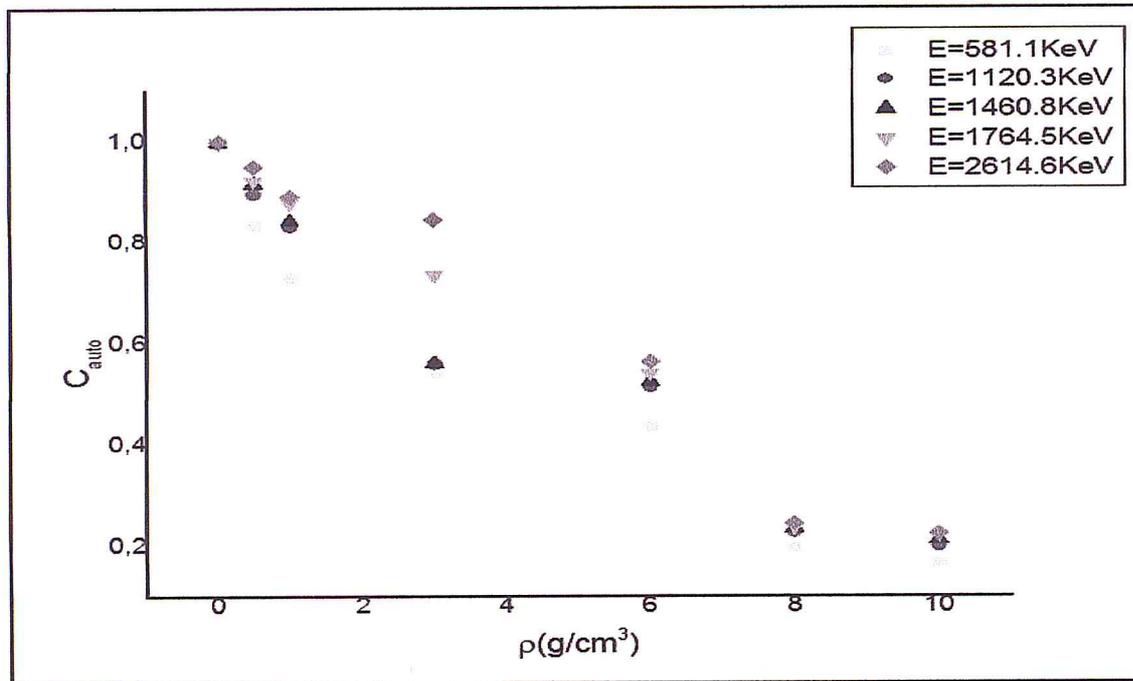


Figure (4.9) : Représente la variation du coefficient d'auto absorption en fonction de la masse volumique ρ pour une composition chimique fixe (H_2O) pour différentes énergies.

On remarque dans la figure (4.9) que pour les masses volumiques intermédiaires le coefficient d'auto absorption est plus important pour les énergies élevés, dans les cas $0.01 \leq \rho \leq 0.5g/cm^3$ et $\rho \geq 7g/cm^3$ la correction de l'auto absorption est pratiquement la même pour toute les énergies.

4.3.2. L'influence de Z_{eff} sur l'auto absorption :

Comme évoqué dans le chapitre 1, un matériau hétérogène (échantillon) peut être assimilé à un élément : fictif, avec un nombre atomique fictif Z_{eff} . Dans cette optique, des simulations d'un échantillon de masse volumique $\rho = 3g/cm^3$ ont été effectuées. En faisant varier le nombre atomique Z de la matrice (1 à 30), on a obtenu les tableaux (4.7) et (4.8) des coefficients d'atténuation et des coefficients d'auto absorptions respectivement, et les courbes de la figures (4.10) ($\mu = f(Z_{eff})$), et la figure (4.12) ($C_{auto} = f(Z_{eff}, E)$), La courbes (4.11) représentent les coefficients d'atténuations en fonction Du numéro atomique et l'énergie ρ ($\mu = f(Z_{eff}, E)$).

Z_{eff}	1	5	10	15	20	25	30
583.1 (Kev)	0.0570 ± 0.0062	0.214 ± 0.009	0.215 ± 0.009	0.225 ± 0.009	0.229 ± 0.010	0.238 ± 0.010	0.245 ± 0.010

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

1120.3 (Kev)	0.0557 ±0.0062	0.211 ±0.009	0.213 ±0.009	0.213 ±0.009	0.216 ±0.009	0.221 ±0.009	0.225 ±0.010
1460.8 (Kev)	0.0550 ±0.0062	0.155 ±0.008	0.156 ±0.008	0.160 ±0.008	0.212 ±0.009	0.218 ±0.009	0.223 ±0.009
1764.5 (Kev)	0.0547 ±0.0061	0.100 ±0.007	0.106 ±0.007	0.110 ±0.007	0.185 ±0.008	0.217 ±0.009	0.223 ±0.009
2614.6 (Kev)	0.0338 ±0.006	0.100 ±0.007	0.106 ±0.007	0.106 ±0.007	0.161 ±0.008	0.210 ±0.009	0.221 ±0.009

Tableau (4.7) : Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie E en (keV) et Z_{eff}
« $\rho=3(\text{g}/\text{cm}^3)$ ».

On constate que le coefficient d'atténuation pour une énergie et masse volumique fixe augmentent avec l'augmentation de Z_{eff} , pour $Z_{\text{eff}} > 15$ μ devient stable. Voir figure (4.10).

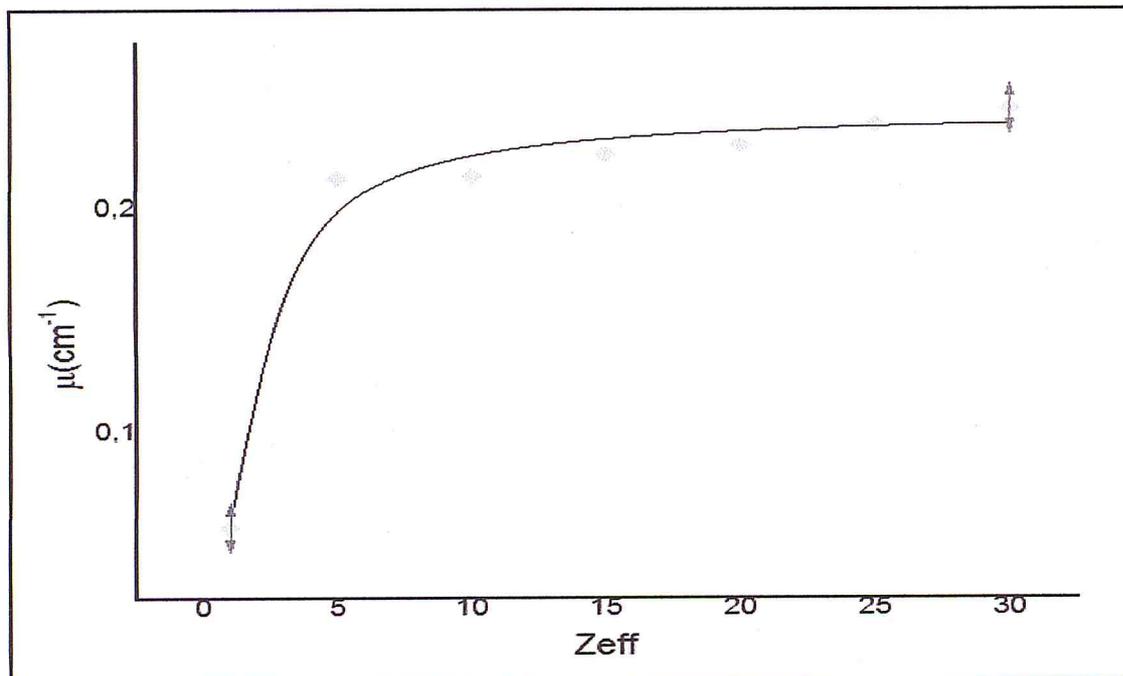


Figure (4.10) : Variation du coefficient d'atténuation en fonction de Z_{eff} pour une énergie de 583Kev
Et une masse volumique $\rho = 3\text{g}/\text{cm}^3$.

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

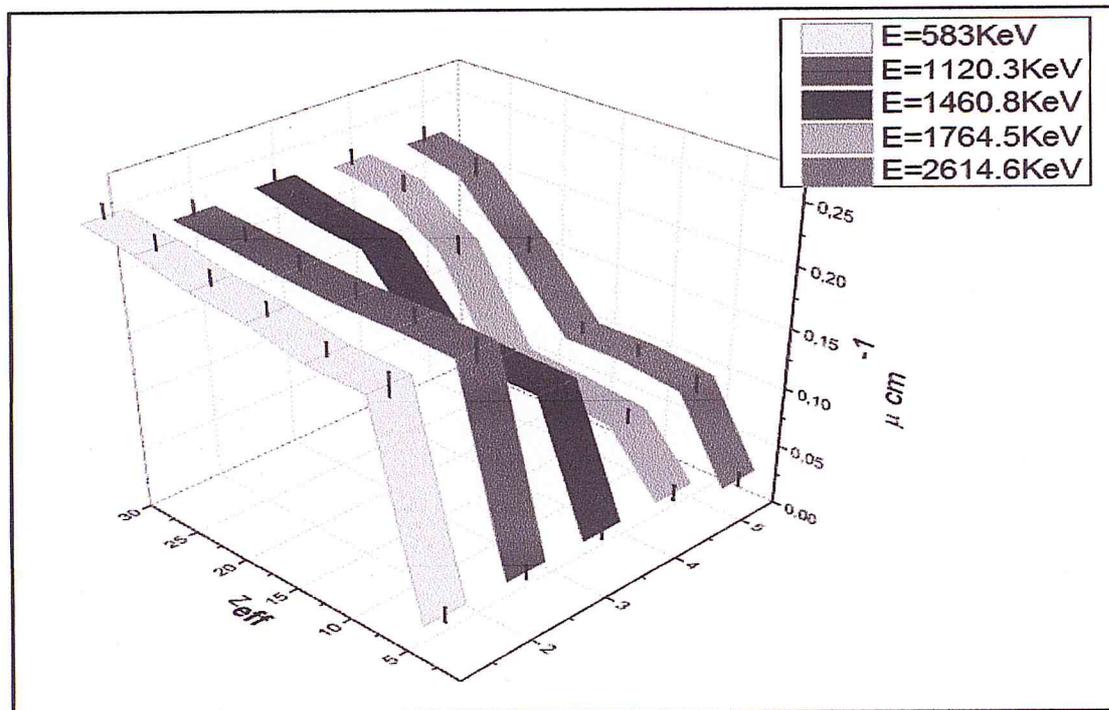


Figure (4.11): Variation du coefficient d'atténuation en fonction de l'énergie et du numéro atomique.

Z_{eff}	1	5	10	15	20	25	30
583.1 (Kev)	0.836	0.540	0.538	0.525	0.520	0.510	0.500
1120.3 (Kev)	0.840	0.544	0.541	0.541	0.537	0.531	0.525
1460.8 (Kev)	0.841	0.630	0.628	0.622	0.543	0.535	0.528
1764.5 (Kev)	0.842	0.735	0.723	0.714	0.582	0.536	0.528
2614.6 (Kev)	0.900	0.735	0.723	0.723	0.620	0.546	0.531

Tableau (4.8) : Variation du coefficient d'auto absorption en fonction de l'énergie E en (keV) et de $Z_{eff} \ll \rho=3(g/cm^3) \gg$.

On observe que pour les Z_{eff} intermédiaires le coefficient d'auto absorption est plus important pour les énergies élevés, pour $Z_{eff} \ll$ et $Z_{eff} \gg$ la correction de l'auto absorption est pratiquement la même pour toutes les énergies les résultats sont représenté dans la figure (4.12).

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

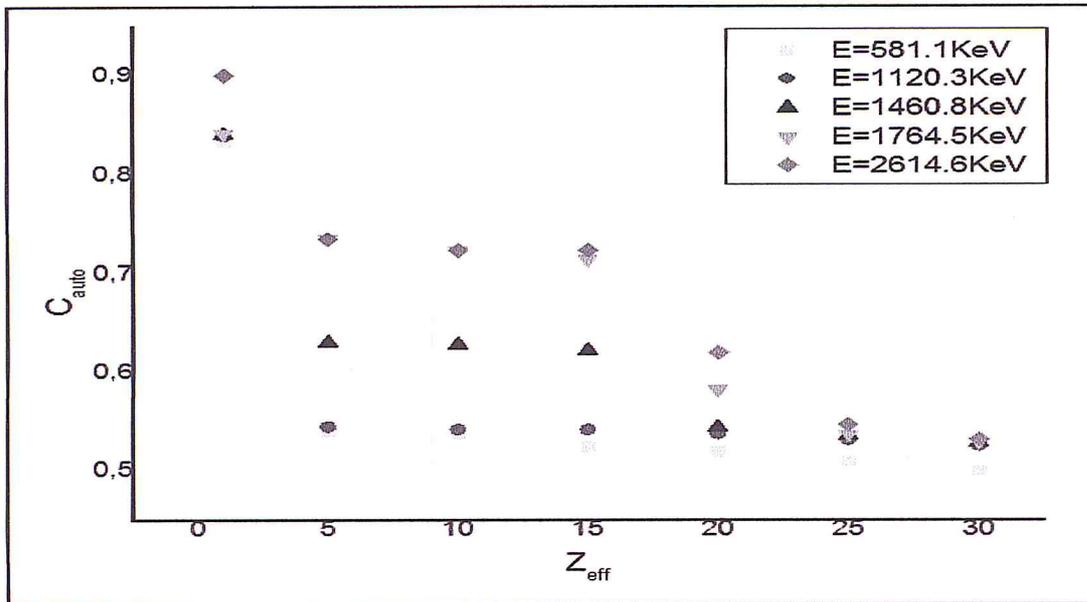


Figure (4.12) : Représente la variation du coefficient d'auto absorption en fonction de Z_{eff} pour différents énergies et un ρ fixe $\rho=3(\text{g}/\text{cm}^3)$.

Afin de récapituler la simulation Monte Carlo du présent travail nous avons tracer une courbe (4.13) du coefficient d'auto absorption C_{auto} en fonction des énergies de ^{152}Eu (121, 344, 778.9, 964.07, 1112.07 et 1408 KeV), et les énergies de la radioactivité naturelle (583.1, 1120.3, 1460.8, 1764.5 et 2614.6 KeV) pour avoir une large gamme d'énergie.

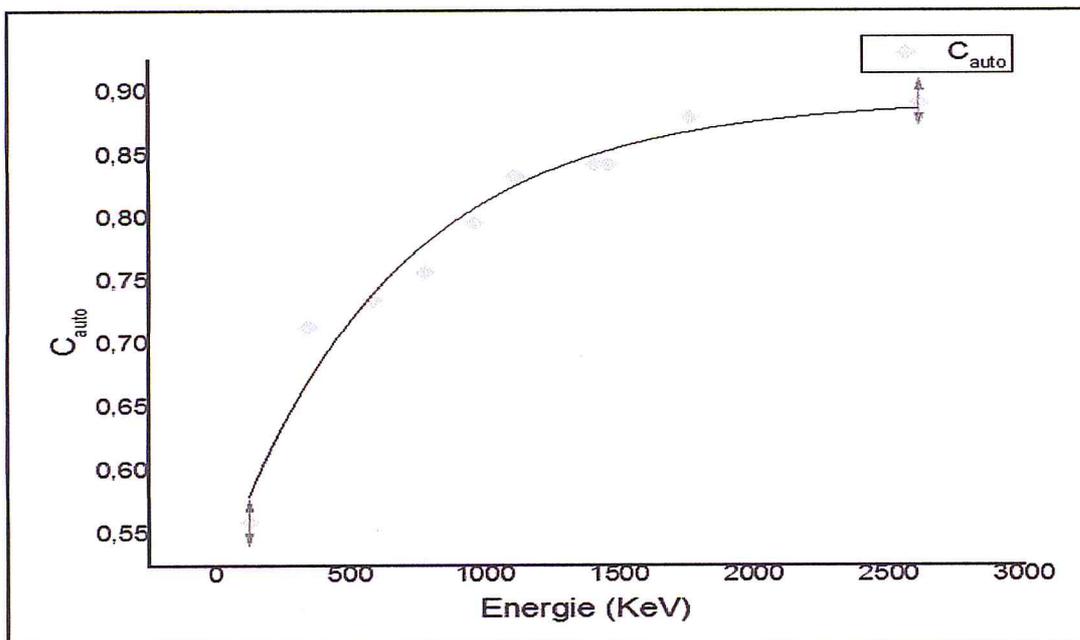


Figure (4.13): Coefficient d'auto absorption de l' eau $\rho = 1\text{g}/\text{cm}^3$ en fonction de l' énergie (121KeV à 2614.6KeV).

CHAPITRE 4 : RÉSULTATS ET DISCUSSIONS.

On remarque dans la figure (4.13) que le coefficient d'auto absorption pour une composition chimique et masse volumique fixe augmente avec l'augmentation de l'énergie.

Conclusion générale.

CONCLUSION GÉNÉRALE.

Ce travail a porté principalement sur la recherche et le développement en spectrométrie gamma, dont l'objective concerne l'étude de l'évaluation de l'auto absorption des rayonnements gamma dans différents types d'échantillons. Cette étude a été effectuée au niveau de laboratoire LPHIRM de l'Université Saad Dahlab Blida 1.

Dans la première partie nous avons mesurés les coefficients d'atténuations pour plusieurs échantillons volumineux (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10) par spectrométrie gamma en utilisant un détecteur NaI(Tl) et une source d' ^{152}Eu (121.78 KeV à 1408 KeV) par la méthode de transmission, les résultats obtenus expérimentalement sont en bon accord avec les résultats calculés par X-COM. Nous avons donc validés notre dispositif expérimental par le code de calcul X-COM.

Nous avons mesurés par simulation Monte Carlo(Géant4) les coefficients d'atténuations pour ces échantillons, une bonne concordance des résultats entre l'expérience et la simulation est obtenue, alors Géant4 est validé pour ce genre de mesure par spectrométrie gamma.

Nous avons calculé l'auto absorption de ces échantillons pour les trois méthodes à savoir (mesure expérimental, X-com et Géant4) de mesure, et nous avons obtenu des résultats satisfaisants.

Une application aux mesures de l'évaluation de l'auto absorption des rayonnements gamma a été réalisé en utilisant la simulation Monte Carlo (Géant4) pour des énergies de radionucléides naturelle (la radioactivité naturelle).

Il ressort de cette étude que la simulation à l'aide du code de simulation Monte Carlo (Geant4) peut constituer un outil performant pour effectuer des mesures de l'auto absorption pour différents types d'échantillons et pour toutes les énergies.

Cette technique nous a permis de calculer le coefficient d'auto absorption (cas $Z_{\text{eff}}=3.33$, $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$) en fonction de l'énergie (121.78 KeV à 2614.6Kev) sans recourir aux mesures coûteuses en terme de temps et de matériels.

Bibliographie :

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] H. Métivier, C. Jimonet. *Personnes compétente en radioprotection*. EDP Science, 2009.
- [2] <https://www.orau.org/ptp/ptp%20library/library/doe/bnl/nuclidedata/MIREu152.htm>
- [3] D. Blanc, G. Portal, J. Barthe et M. Buxerolle. *Les rayonnements ionisants : détection, spectrométrie, dosimétrie*. Masson, 1997.
- [4] H. Métivier. *Radioprotection et ingénierie nucléaire*. EDP Science, 2006.
- [5] G. Knoll. *Radiation detection and measurement*. Wiley & Son, Ltd, 1999.
- [6] C. Bourgeois. *Interaction particule-matière. Théorie. Technique de l'ingénieur. Science fondamentales*, 1998.
- [7] C. Ngo, C. Le Sech. *Physique nucléaire : Des quarks aux applications*. Dunod, 2010.
- [8] M.J. Berger, J.H. Hubbell, S.M. Seltzer, J. Chang, J.S. Coursey, R. Sukumar, D.S. Zucker, and K. Olsen Xcom : Photon cross sections database - nist standard reference database 8 (xgam).
- [9] JP. Bolivar, M. Garcia-Léon et R. Garcia-Tenorio. *On self-attenuation corrections in gamma-ray spectrometry*. *Applied radiation and isotopes*.
- [10] K. Richardson. N et P.J Nolan. *Self-absorption correction for well-type germanium detector*. *Nuclear Instruments Methods B*.
- [11] P. Bouisset, O. Lefèvre, X. Cagnat, G. Kerlau, A. Ugron et D. Calmet. *Direct gamma-X spectrometry measurement of ¹²⁹I in environmental samples using experimental self-absorption corrections*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*,
- [12] A. Nachab. *Etude expérimentales et modélisations monte Carlo de l'auto-absorption gamma et de la dosimétrie active par capteur cmos*. Ph.D. thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France., 2003.
- [13] N.H. Cutshall, I.L. Larsen et C.R. Olsen. *Direct analysis of ²¹⁰Pb in sediment samples: self-absorption corrections*. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*.
- [14] B. Pirard THESE_B_PIRARD *Etude et validation d'un spectromètre gamma pour la mesure de la composition chimique des surfaces planétaires : Application à une mission vers Mercure*. Par Université Toulouse III - Paul Sabatier 2010
- [15] C. E. Fichtel, et J. I. Trombka, *Gamma-Ray Astrophysics : New Insight into the Universe*. Rapport technique, NASA-RP-1386; NAS 1.61: 1386 (1997).

BIBLIOGRAPHIE.

- [16] G. Lutz, « Semiconductor Radiation Detectors », Springer, Berlin (2001).
- [17] N. Metropolis. The beginning of the Monte Carlo method. Los Alamos Science 1987.
- [18] N. Metropolis, S. Ulam. The Monte Carlo method. Journal of the American Statistical Association, 1949.
- [19] Ch. Morel, La simulation Monte Carlo en médecine nucléaire. Médecine Nucléaire, 2007.
- [20] A. Nachab. Etude expérimentales et modélisations monte carlo de l'auto-absorption gamma et de la dosimétrie active par capteur cmos. Ph.D. thesis, Université Louis Pasteur, Strasbourg, France., 2003.
- [21] IEC BIPM, ISO IFCC et I. IUPAC. OIML. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. International Organization for Standardization, Geneva. ISBN, 2008.
- [22] K. Meynard. Polymérisation radio-induite : Calcul de dose et modélisation dans le cas d'irradiations prolongées de sources non scellées. Ph.D. thesis, Université de Toulouse III- Paul Sabatier, Toulouse, France., 2009.
- [23] GEANT4, A simulation toolkit, Introduction to Geant4, Release 10.4, Geant4 Collaboration, Rev1.0: Dec 8th, 2017.
- [24] S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, M. Asai, D. Axen, S. Banerjee, G. Barrand et al. GEANT4-a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2003.
- [25] GEANT4 Collaboration. User's guide for application developers, version 4.9.3. 2008.
- [26] J. Allison, the GEANT4 Collaboration (2002). GEANT4 – a simulation toolkit, submitted to Elsevier Science.
- [27] S.T. Perkins, et al. (1997). Tables and graphs of atomic sub-shell and relaxation data derived from the LLNL Evaluated Atomic Data Library (EADL), Z=1 – 100, UCRL-50400.
- [28] S.T. Perkins, et al. (1997). Tables and graphs of electron-interaction cross sections from 10 eV to 100 GeV derived from the LLNL Evaluated Electron Data Library (EEDL).
- [29] D. Cullen, et al. (1997). EPDL97: the Evaluated Photon Data Library, 97 versions, UCRL-50400.

BIBLIOGRAPHIE.

- [30] J.H. Hubbell, and M.J. Berger, Sections 4.1 and 4.2 in Jaeger, R.G. (ed.): Engineering Compendium on Radiation Shielding (IAEA, Vienna), Vol. 1, Ch. 4, pp. 167-202, Springer, Berlin (1968).
- [31] J.H. Hubbell, Photon Cross Sections, Attenuation Coefficients and Energy Absorption Coefficients from 10 keV to 100 GeV, Natl. Stand. Ref. Data, 1969.
- [32] W.J. Veigle, Photon Cross Sections from 0.1 keV to 1 MeV for Elements Z=1 to Z=94, Atomic Data 5, 1973.
- [33] B.L. Henke, Lee, P., Tanaka, T.J., Shimabukuro, R.L. and Fujikawa, B.K., Low Energy X-ray Interaction Coefficients: Photoabsorption, Scattering and Reflection, Atomic Data and Nuclear Data Tables, 1982.
- [34] M.O. Oregun, K. M. Decker, C. G. Saunderson, Determination of self-absorption corrections by computation in routine gamma-ray spectrometry for typical environmental samples, Radioactivity and Radiochemistry, 1993.
- [35] RC. Murty. Effective atomic numbers of heterogeneous materials. Nature, 1965.
- [36] DJ. Hawkes et D.F. Jackson. An accurate parametrisation of the x-ray attenuation coefficient. Physics in medicine and biology, 1980.
- [37] E. Pantelis, A.K. Karlis, M. Kozicki, P. Papagiannis, L. Sakelliou et J.M. Rosiak. Polymer gel water equivalence and relative energy response with emphasis on low photon energy dosimetry in brachytherapy. Physics in medicine and biology, 2004.
- [38] A.K. Jones, D.E. Hintenlang et W.E. Bolch. Tissue-equivalent materials for construction of tomographic dosimetry phantoms in pediatric radiology. Medical physics, 2003.
- [39] S. Dziri, A. Nachab, A. Nourreddine et A. Sellam. Composition and density effects on self absorption for photons below 100 keV in γ -ray spectrometry. Nuclear Instruments Measurements B, vol. submitted, waiting for answer, 2013.
- [40] Appleby. K, Richardson. N et P.J Nolan. Self-absorption correction for well-type germanium detector. Nuclear Instruments Methods B, vol. 71, pages 228–233, 1992.

Annexes.

Annexe A: Calcule d'erreure.

$$\sigma_{\mu} = \sqrt{\left(\frac{1}{x}\right)^2 \left(\sigma\left(\ln\frac{I_0}{I}\right)\right)^2 + \left(\frac{\ln\frac{I_0}{I}}{x^2}\right)^2 \sigma_x^2}$$

$$\sigma_{\mu} = \sqrt{\frac{1}{x^2} \frac{\left(\frac{1}{I}\right)^2 \sigma_{I_0}^2 + \left(\frac{I_0}{I^2}\right)^2 \sigma_I^2}{\left(\frac{I_0}{I}\right)^2}}$$

$$\sigma_{\mu} = \sqrt{\frac{1}{x^2} \frac{\frac{1}{I^2} I_0 + \frac{I_0^2}{I^4} I}{\left(\frac{I_0}{I}\right)^2}}$$

$$\sigma_{\mu} = \sqrt{\frac{1}{x^2} \left(\frac{1}{I_0} + \frac{1}{I}\right)}$$

Avec :

$$\sigma_x = 0$$

$$\sigma_I = \sqrt{I}$$

$$\sigma_{I_0} = \sqrt{I_0}$$

ANNEXES.

Annexe B :

Tableau B.1 : les principales raies gamma de la source d' ^{152}Eu .

Nucléide	Demi-vie $T_{\frac{1}{2}}$ (ans)	Energie E_{γ} (Kev)	I_{γ} (%)
^{152}Eu	13.53	121.7824	2 8.37
		244.6989	7.53
		344.2811	26.57
		411.126	2.238
		443.965	3.125
		778.903	12.97
		867.390	4.214
		964.055	14.63
		1085.842	10.13
		1089.767	1.731
		1112.087	13.54
		1212.970	1.412
		1299.152	1.626
		1408.022	20.85

Tableau B.2 : Les raies gamma de la radioactivité naturelle.

E(kev)	Radionuclide	I(%)	Origine
583.1	^{208}Tl	30.6	^{232}Th
1120.3	^{214}Bi	14.907	^{238}U
1460.8	^{40}K	10.66	Primordiale
1764.5	^{214}Bi	4.891	^{238}U
2614.6	^{208}Tl	35.85	$^{208}\text{Pb}(n,p)$

Annexe C : Exemple de calcul de Z_{eff} .

Le Z_{eff} d'un composé :

$$Z_{eff} = \left(\sum_i a_i Z_i^{3.5} \right)^{\frac{1}{3.5}}$$

$$a_i = \frac{\frac{w_i Z_i}{A_i}}{\sum_j \frac{w_j Z_j}{A_j}} \quad \text{Avec :} \quad b_i = \frac{w_i Z_i}{A_i}$$

Avec :

W_i : est la fraction de l'élément dans un composé.

Z : est le numéro atomique de l'élément.

A : est le nombre de masse de l'élément.

Exemple d'application pour le Al_2O_3 (P5) :

P5 (99.843 de $Al_2(O_3)$, 0.002% de SO_4 , 0.005 % de Fe et 0.15% de Na)

$$b_{Al_2O_3} = \frac{w_{Al_2O_3} \langle Z \rangle_{Al_2O_3}}{\langle A \rangle_{Al_2O_3}} = \frac{99.843 \cdot 10}{20.3} = 49.18 \quad \text{Avec} \quad \langle Z \rangle_{Al_2O_3} = \frac{13 \cdot 2 + 8 \cdot 3}{5} = 10$$

$$\langle A \rangle_{Al_2O_3} = \frac{26.98 \cdot 2 + 26 \cdot 3}{5} = 20.3$$

$$b_{SO_4} = \frac{w_{SO_4} \langle Z \rangle_{SO_4}}{\langle A \rangle_{SO_4}} = \frac{0.002 \cdot 9.6}{19.212} = 0.000999 \quad \text{Avec} \quad \langle Z \rangle_{SO_4} = \frac{16 \cdot 1 + 8 \cdot 4}{5} = 9.6$$

$$\langle A \rangle_{SO_4} = \frac{32.06 \cdot 1 + 16 \cdot 3}{5} = 19.212$$

$$b_{Na} = \frac{w_{Na} Z_{Na}}{A_{Na}} = \frac{0.15 \cdot 11}{22} = 0.075$$

$$b_{Fe} = \frac{w_{Fe} Z_{Fe}}{A_{Fe}} = \frac{0.005 \cdot 26}{55.845} = 0.0023$$

$$a_{Al_2O_3} = 0.998$$

$$a_{SO_4} = 2.02E - 5$$

$$a_{Na} = 0.0015$$

$$a_{Fe} = 4.669E - 5$$

$$Z_{eff} = (0.998 \cdot 10^{3.5} + 2.02 \cdot 10^{-5} \cdot 9.6^{3.5} + 0.0015 \cdot 11^{3.5} + 4.669 \cdot 10^{-5} \cdot 26^{3.5})^{\frac{1}{3.5}} = 10$$

ANNEXES.

Annexe D : Tableau composition chimique des produits synthétiques (P 1 à 10) en pourcentage (%).

Composant	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
H ₂ O	100	--	--	--	--	--	0.005	--	--	0.05
SO ₄	--	--	50	--	0.002	0.005	--	--	--	--
CuCl ₂	--	--	--	--	--	98	--	--	--	--
Al ₂ O ₃	--	--	--	--	99.843	--	--	--	--	--
AgBr	--	--	--	--	--	--	--	100	--	--
H ₂ S(SO ₄)	--	--	--	--	--	--	0.2	--	--	--
HCl	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.5
NH ₄	--	--	--	--	--	--	0.002	--	--	--
NO ₃	--	--	--	--	--	--	0.002	--	--	--
Pb	--	--	--	--	--	0.05	0.005	--	--	0.002
Cd	--	--	--	--	--	--	99	--	--	--
Fe	--	--	--	--	0.005	0.01	0.0005	--	0.3	99
Zn	--	--	--	--	--	0.01	0.005	--	--	0.01
Cu	--	--	--	--	--	--	0.001	--	--	0.02
Ni	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.05
Mn	--	--	--	--	--	--	--	--	--	0.05
Cl	--	50	--	--	--	--	0.001	--	--	0.001
S	--	--	--	--	--	--	--	--	0.025	0.01
As	--	--	--	--	--	--	0.0002	--	--	0.0005
Al	--	--	--	100	--	--	--	--	0.2	--
P	--	--	--	--	--	--	--	--	0.01	--
Si	--	--	--	--	--	--	--	--	0.1	--
C	--	--	--	--	--	--	--	--	0.02	--
Na	--	50	--	--	0.15	--	--	--	--	--
Mg	--	--	50	--	--	--	--	--	--	--
Cr	--	--	--	--	--	--	--	--	99	--
$\rho(gcm^{-1})$	1	2.1	2.65	2.7	2.95	3.386	4.69	6.47	7.19	7.87
Z_{eff}	3	14	10	13	10	22	48	41	24	26