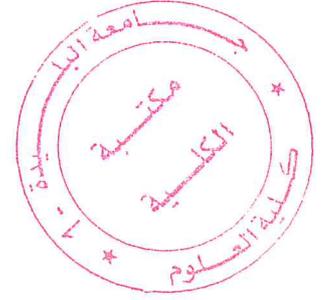


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة سعد دحلب البليدة 1
UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA 1



دائرة الفيزياء - كلية العلوم

Faculté des Sciences
Département de Physique



MEMOIRE
POUR L'OBTENTION DU DIPLÔME DE
MASTER EN PHYSIQUE
Option : Matière et Rayonnement
THÈME

**Correction des coïncidences de sommation pour une
source radioactive : Application à l'analyse du
 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ dans des échantillons de sol**

Présenté par :

DRARENI Zineb

Devant le jury composé de :

Mr. M.A.BENAMAR	Professeur	U.S.D.B1	Président
Mr. A.AZBOUCHE	Docteur chercheur principal	C.R.N.A	Encadreur
Mr. M.BELAMRI	Docteur chercheur principal	C.R.N.A	Examineur

Blida, Septembre 2017



Remerciements

Tout D'abord, je tiens à remercier notre DIEU le tout puissant de nous avoir donné le courage et la persévérance pour réaliser ce travail.

Je tiens à remercier infiniment mon promoteur Mr. A.AZBOUCHE pour avoir enrichi mes connaissances scientifiques. Je le remercie également pour la confiance et la disponibilité qu'il m'a accordée et le temps consacré pour discuter du contenu du sujet et de sa rédaction. Je le remercie vivement.

J'adresse mes sincères remerciements à Mr .M.A.BENAMER, Professeur et directeur du Laboratoire de Physique Fondamentale et Appliquée (FUNDAPL) à l'université de Blida 1, pour l'honneur qu'il m'a fait de présider le jury.

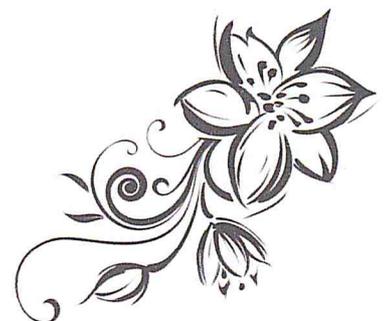
Je remercie Mr. M.BELAMRI, d'avoir accepté d'examiner ce travail et me faire l'honneur de participer au jury.

Je voudrais remercier particulièrement Mme. MELZI pour m'avoir guidé tout au long de mon stage et pour son apport inestimable dans un moment délicat de mon stage pratique.

Je tiens à exprimer, ma profonde gratitude à tous les enseignants du Département de Physique pour leur suivi durant la formation de Master. Leur compétences scientifiques nous ont été d'un grand apport pour l'aboutissement de notre Master.

Je voudrais à présent, exprimer mes remerciements les plus respectueux à mes très chers parents, Les étoiles de ma vie, pour leurs tendresses, leurs encouragements et leurs sacrifices.

Je remercie mes très chers amis avec qui j'ai partagé des moments inoubliables.



Dédicaces

La réalisation de ce travail n'aurait pas été possible sans le soutien, sans faille, moral, et affectif de mes très cher parents et grands-parents, je les remercie de m'avoir donné un environnement idéal et de m'avoir enseigné les valeurs essentielles : humilité, modestie, honnêteté et passion, merci d'avoir su me comprendre dans les moments les plus difficiles et de m'avoir toujours fait confiance. Sachez que je vous suis et serai toujours très reconnaissante.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont soutenu :

Mes chers frères Younes, Ismail, Amer et Hamza, mes sœurs Nadjet et Marwa, de leur aide, leur soutien, leur encouragements tout au long de mon parcours étudiant. Je remercie également mes oncles et mes tantes, Mes cousines, et cousins, qui m'ont tant aidé et assisté. Toute ma famille, et mes amis de ma promotion, et mes amis les plus proches.

DRARENI ZINEB



Table de matière

Remerciement	I
Dédicaces	II
Sommaire	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Résumé	VI
Abstract	VII
ملخص	VIII
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Généralités sur la radioactivité	
1. Radioactivité	3
1.1. Élément de la radioactivité	3
1.2. Différents types de rayonnement	3
1.2.1. Désintégration Alpha	3
1.2.2. Désintégration β^+ et capteur électronique	4
1.2.3. Désintégration β^-	4
1.2.4. Emission gamma	4
1.3. Loi de désintégration radioactive (décroissance)	5
1.3.1. Période radioactive (demi-vie)	5
1.3.2. Courbe de décroissance radioactive	5
1.3.3. Activité	6
1.4. Filiation radioactive	6
1.4.1. Equilibre de régime	7
1.4.2. Equilibre séculaire	7

1.5. Famille de l'uranium-238	8
-------------------------------------	---

Chapitre 2 :Interaction des photons gamma avec la matière

1. Interaction des photons gamma avec la matière	9
1.1. Diffusion Rayleigh	9
1.2. Effet photoélectrique	9
1.3. Diffusion Compton	10
1.4. Effet de création de paires	10
2. Atténuation des rayons gammas dans les matériaux	12

Chapitre 3 :Technique d'analyse par spectrométrie gamma

1. Technique de spectrométrie gamma:	14
2. Détecteur Ge (HP).....	14
2.1. Détecteur planaire	15
2.2. Détecteur coaxial	15
2.3. Détecteur puits	15
3. chaine de détection	15
3.1. Détecteur Ge(HP)	16
3.2. Préamplificateur	16
3.3. Amplificateurs.....	16
3.4. Convertisseur analogique-numérique	16
3.5. Analyseur multi canaux	17
4. Principales caractéristiques d'un détecteur	17
4.1.Résolution en énergie	17
4.2.L'efficacité de détecteur	18
4.3.Le temps mort	19
5. Principe de l'évaluation de l'activité d'un Radioélément.....	19
5.1.Calcul de l'activité.....	19
6. Coïncidence de sommation gamma-gamma	20
6.1. Définition des coïncidences de sommation γ - γ	20
6.2. Effet des sommations dues aux coïncidences	20
6.3. Principe de correction des coïncidences	20

6.4. Méthode de correction des coïncidences de sommation	21
--	----

Chapitre 4 :Matériels et méthodes

1. Préparation des échantillons	22
2. Matériels.....	23
3. Dispositif expérimentale de la technique spectrométrie gamma	23
3.1. Analyse qualitative	24
3.1.1. Etalonnage de la chaine de mesure : (spectrométrie gamma).....	24
3.1.1.1. Etalonnage en énergie :	24
3.1.1.2. Etalonnage en efficacité	26
3.2. Correction des coïncidences	29
3.2.2. Détermination des facteurs de correction de coïncidences de sommation :	30
3.3. Analyse quantitative	30
3.3.1. Mesure de l'activité spécifique	30
3.3.2. Calcul de l'activité de plomb-210en excès	32
4. Discussion les résultats	41
Conclusion générale	43
Références Bibliographiques	

Liste des figures

Figure I.1 : Radioactivité naturelle.

Figure I.2 : Courbe de décroissance radioactive.

Figure I.3 : la possibilité pour que l'élément B fils atteigne l'élément A père.

Figure I.4 : Chaîne radioactive naturelle de ^{238}U .

Figure II.1: Principales interaction des photons γ avec la matière.

Figure II.2 : Répartition des 3 effets élémentaires en fonction du numéro atomique du matériau et de l'énergie du photon incident.

Figure II.3 : Absorption des rayons X ou gamma par la matière.

Figure III.1 : Les différentes configurations géométriques des détecteurs germanium.

Figure III.2 : Schéma de principe de l'ensemble de détection.

Figure III.3 : Définition de la résolution pour un pic parfaitement gaussien.

Figure III.4 : Notion élémentaire d'angle solide.

Figure III.5 : Schéma de désexcitation à deux niveaux excités.

Figure IV.1 : Les étapes de préparation des échantillons de sols.

Figure IV.2 : Matériel utilisé pour la préparation des échantillons.

Figure IV.3 : La chaîne de spectrométrie gamma.

Figure IV.4 : Détecteur Ge(HP) et le porte échantillon (cylindrique).

Figure IV.5 : Droite d'étalonnage de la chaîne de mesure.

Figure IV.6 : Spectre Expérimentale d'une source d'Europium-152 (speked water).

Figure IV.7 : Etalonnage d'efficacité du détecteur.

Figure IV.8 : spectre d'un échantillon de sol.

Figure IV.9 : Schéma montrant les différentes origines des radioéléments dans le sol.

Liste des tableaux

Tableaux IV.1 : Numéros de canaux correspondant aux énergies gammas de spectre de la source d' ^{152}Eu .

Tableau IV.2 : Les valeurs des énergies et des efficacités d'Eu-152.

Tableau IV.3 : Valeur des efficacités mesurées et calculées et en fonction des énergies.

Tableau IV.4 : Les valeurs des énergies et les facteurs des coïncidences de sommation.

Tableaux IV.5 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (0,2 cm).

Tableaux IV.6 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (2,4 cm).

Tableaux IV.7 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (4,6 cm).

Tableaux IV.8 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (6,8 cm).

Tableaux IV.9 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (8,10 cm).

Tableaux IV.10 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (10,12 cm).

Tableaux IV.11 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (12,14 cm).

Tableaux IV.12 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (14,16 cm).

Tableaux IV.13 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (16,18 cm).

Tableaux IV.14 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (18,20 cm).

Tableaux IV.15 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (0,2 cm).

Tableaux IV.16 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(2,4 cm).

Tableaux IV.17 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(4,6 cm).

Tableaux IV.18 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(6,8 cm).

Tableaux IV.19 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(8,10 cm).

Tableaux IV.20 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(10,12 cm).

Tableaux IV.21 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(12,14 cm).

Tableaux IV.22 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(14,16 cm).

Tableaux IV.23 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(16,18 cm).

Tableaux IV.24 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(18,20 cm).

Résumé :

L'objectif de ce travail est de déterminer les facteurs dus aux coïncidences de sommation pour une source cylindrique aux énergies 351.93 keV (Pb-214) et 609.31 keV (Bi-214) afin de mesurer l'activité du plomb-210 en excès dans des échantillons de sols.

L'efficacité expérimentale du détecteur pour une source cylindrique a été mesurée à l'aide d'une source d'Eu-152 dans une matrice eau de densité de 1.05 g cm^{-3} ; l'efficacité réelle du a été déterminée par simulation Monte Carlo en utilisant le logiciel LABSOCS. Une fois les deux courbes des efficacités sont établies, les facteurs de coïncidences sont déterminés par le rapport de l'efficacité mesurée sur l'efficacité réelle.

Les facteurs de coïncidence trouvés ont été utilisés pour les calculs des activités du Bi-214 et du Pb-214 afin de déterminer le $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ dans le sol, ce dernier est un radiotracer très utilisé pour la quantification de mouvements des sols.

Les résultats obtenus après corrections des effets de coïncidence ont montré que les valeurs de l'activité du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$, corrigées par les facteurs de coïncidences sont différentes à celle mesurées sans corrections.

Mots clés : Effet de coïncidences, Efficacité du détecteur, Facteurs de coïncidences, Spectrométrie gamma, Activités du ^{214}Bi - ^{214}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ dans le sol.

Abstract:

The objective of this work is to determine coincidence summing effect factors for a cylindrical source at 351.93 keV (Pb-214) and 609.31 keV (Bi-214) energies in order to measure the excess lead-210 in soil samples.

The experimental efficiency of the detector for a cylindrical source was measured by using of Eu-152 source in water matrix with 1.05 g cm^{-3} ; the efficiency without coincidence, was determined by Monte Carlo simulation using the Labsocs software. Once the two efficiency curves are established, the coincidence factors are determined by the ratio of measured efficiency to actual efficiency.

The calculated coincidence factors were used for calculations of Bi-214 and Pb-214 activities to determine $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ in soil, which is a highly used radiotracer for quantification of soil motions.

The results obtained show that the values of the $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activity corrected by the coincidence factors are different from those measured without corrections.

Key words: Effect of coincidences, Detector efficiency, Coincidence factors, Gamma spectrometry, ^{214}Bi - ^{214}Pb , $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ activities in soil.

ملخص:

الهدف من هذه الدراسة هو تحديد العوامل المسببة في جمع المصادفات من مصدر أسطواني من الطاقة 351.93 KeV (الرصاص-214) و609.31 keV (بسموت-214) لقياس النشاط الزائد من الرصاص-210 في العينات المأخوذة من التربة.

وقد تم قياس كفاءة الكاشف التجريبية لمصدر أسطواني عن طريق مصدر اروييوم-152 المتواجد في ماء المصفوفة 1.05g cm⁻³، الفعالية الفعلية تم تحديدها من قبل محاكاة مونت كارلو باستخدام برنامج LABSOCS. و حالما يتم تأسيس اثنين من منحنيات الكفاءة ويتم تحديد العوامل المصادفة من قبل الكفاءة النسبية على الكفاءة الفعلية.

العوامل المصادفة التي وجدت استخدمت لحساب أنشطة الرصاص-214 والبسموت -214 لتحديد نشاط الرصاص-214 الزائد الموجود في التراب. وهذا الاخير المشع المستخدم في نطاق واسع لتقدير حجم حركات الأرض. اظهرت النتائج المتحصل عليها بعد تصحيح تأثيرات الصدف نستنتج أن قيم نشاط الرصاص-214 الزائد المصحح من قبل عوامل المصادفة مختلفة إلى أن تقاس دون تصحيح.

كلمات البحث: تأثير الصدف، كفاءة الكاشف، عوامل الصدف، جاما الطيف، أنشطة الرصاص-214، البسموت -214 والرصاص الزائد -214 في الأرض.

Introduction générale :

La radioactivité est un phénomène naturel qui existe depuis l'origine de l'univers, il y a des milliards d'années, lorsque les atomes se sont formés. Bâti sur le même modèle, tous les atomes n'ont pourtant pas les mêmes propriétés ; certains sont stables et restent indéfiniment identiques à eux-mêmes alors que d'autres sont instables. Pour acquérir une meilleure stabilité, ces derniers- appelés radionucléides- expulsent à un moment donné une quantité d'énergie, sous forme de rayonnement. On ne peut détecter les rayonnements qu'en utilisant des techniques appropriées pour chaque rayonnement. Pour les rayonnements gamma, la spectrométrie gamma est la technique la plus adéquate.

La spectrométrie gamma est née de la rencontre de deux grandes découvertes qui ont bouleversé notre quotidien. D'une part l'utilisation de la radioactivité au bien être de l'homme, d'autre part l'essor de l'industrie des semi-conducteurs qui a permis l'amélioration constante des performances des détecteurs. Dans cette technique, on tire profit des informations issues de l'analyse des pics et de l'étalonnage du détecteur en énergie et en efficacité.

Le présent travail porte sur l'étude de l'effet de coïncidence de sommation, il s'agit de l'interaction simultanée de plusieurs photons provenant de la source de rayonnement dans le détecteur. Ce phénomène conduit alors à une variation du nombre d'impulsions mesurées dans le pic d'absorption totale, qui est à l'origine d'une sous-estimation ou surestimation des efficacités de détection. Pour pallier ce problème qui fausse les mesures de l'activité des radioéléments présent dans l'échantillon analysé, on doit déterminer les facteurs de coïncidence pour apporter une correction sur l'activité. Une série de mesure des basses activités par la technique de spectrométrie gamma d'un ensemble d'échantillons du sol prélevés de la forêt de Fergoug sera effectuée pour réaliser notre étude.

Ce travail, subdivisé en quatre chapitres :

Le premier chapitre consacré des notions de base sur la radioactivité, l'équilibre de régime, Filiation radioactive, l'équilibre séculaire et la famille de l'uranium-238.

Le deuxième chapitre explique les différents types d'interaction des photons gammas avec la matière et l'atténuation des rayons gammas dans les matériaux.

L'analyse par spectrométrie gamma, avec suffisamment de précision, implique une bonne connaissance de la détection et de tous les constituants de la chaîne de mesure, principe de l'évaluation de l'activité d'un radioélément, coïncidence de sommation gamma-gamma, cela se trouve dans le troisième chapitre.

Le quatrième chapitre sera réservé à la description du dispositif expérimental utilisé, l'étalonnage en énergie et en efficacité du système de détection ainsi que la mesure des facteurs de correction des coïncidences de sommation. L'application de cette étude sur la distribution de quelques radioéléments dans des échantillons de sol pour déterminer l'activité de plomb-210 en excès.

Une conclusion de ce travail sera donnée à la fin de ce manuscrit.

Chapitre I : Généralités sur la radioactivité

Introduction :

Depuis plus d'un siècle, l'homme a découvert l'existence de la radioactivité.

1896 : Becquerel constate que certains sels d'uranium émettent des "Rayonnements uraniques" pouvant traverser la matière et pouvant impressionner des plaques photos placées dans l'obscurité.

Un peu plus tard, Pierre et Marie curie réussirent à séparer de la pechblende, ou uranite, un élément, le radium, dont le rayonnement résulte d'une transformation spontanée du noyau atomique instable d'un élément en noyaux d'un autre élément : c'est le phénomène de radioactivité.

1. Radioactivité :**1.1. Élément de la radioactivité :**

Un élément est dit radioactif lorsque son noyau est instable et qu'il relâche spontanément de l'énergie sous la forme de rayon alpha, beta et gamma afin de tendre vers la stabilisation. Ce phénomène est appelé la désintégration [1].

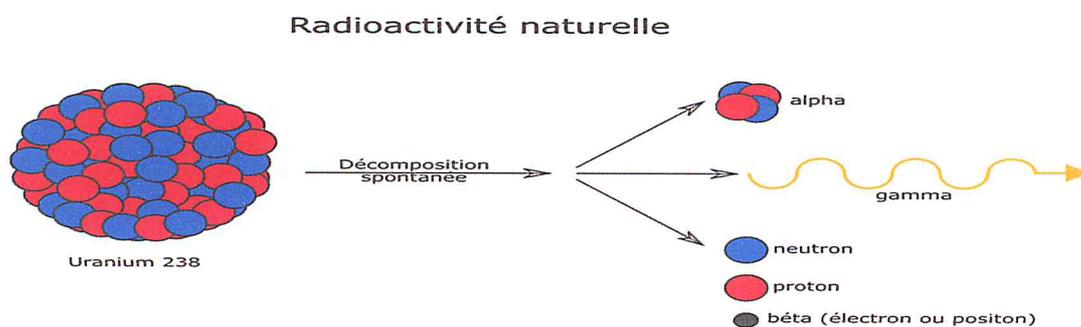
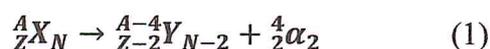


Figure I.1 : Radioactivité naturelle [clipart-radioactivité naturelle].

1.2. Différents types de rayonnement :**1.2.1. Désintégration Alpha :**

Correspondant à l'émission d'un noyau d'hélium (particule α) constitué de 2 protons et 2 neutrons. Elle concerne généralement les radionucléides lourds.

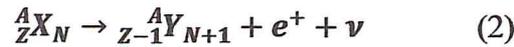
Le noyau expulse une particule alpha. La transformation s'écrit :



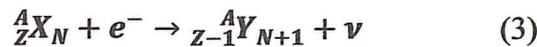
1.2.2. Désintégration β^+ et capteur électronique :

Le noyau expulse un positon (particule de charge e^+ et de même masse que l'électron). Un proton du noyau se transforme en neutron et l'émission du positon s'accompagne de l'émission d'un neutrino (particule de masse nulle) [2].

La transformation s'écrit :

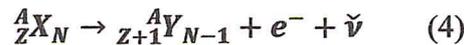


Le processus de désintégration β^+ apparaît presque toujours en compétition avec le processus de capture électronique dans lequel un e^- du cortège électronique entourant le noyau (en général, un e^- proche du noyau). Cette capture, tout comme le processus de désintégration β^+ , conduit à la transformation d'un proton du noyau en neutron. Elle s'écrit de la forme suivante:



1.2.3. Désintégration β^- :

Le noyau expulse un électron, c'est-à-dire qu'un neutron se transforme en proton, et l'émission s'accompagne de l'émission d'un anti-neutrino (particule de masse nulle). La réaction s'écrit :



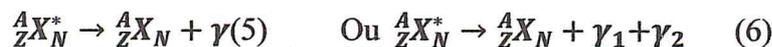
1.2.4. Emission gamma :

Au même titre que les atomes, les noyaux peuvent se trouver dans un état excité. La désintégration d'un noyau ${}^A_ZX_N^*$ vers son état fondamental A_ZX_N se fait de deux manières :

- Par émission gamma (γ) :

Par transition directe si l'énergie du photon γ émis est égale à l'énergie d'excitation du noyau.

Par cascade de rayonnements γ dont la somme des énergies est égale à l'énergie d'excitation.



- Par conversion interne, c'est-à-dire un transfert direct de l'énergie d'excitation à un électron du cortège électronique [3].

1.3. Loi de désintégration radioactive (décroissance) :

Dans un échantillon de matière radioactive constitué de noyaux radioactifs d'une espèce donnée, le nombre de noyaux va décroître au cours du temps [2].

Entre t et $t + dt$, les noyaux se sont désintégrés. La variation est proportionnelle au nombre $N(t)$ d'atomes à l'instant t sont [4] :

$$dN = \lambda N(t) dt \quad (I.1)$$

$N(t)$: le nombre des noyaux radioactifs présents à l'instant t

λ : constante radioactive du nucléide (s^{-1})

En écrivant cette loi de variation sous la forme $\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t)$. (I.2)

La solution de cette équation on différentielle donne la loi de décroissance radioactive

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (I.3)$$

N_0 : Le nombre des noyaux radioactifs présents à l'instant $t=0$

1.3.1. Période radioactive (demi-vie) :

La période de demi-vie est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes radioactifs initialement soient désintégrés (à partir [I.3])) :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} = \frac{N_0}{2} \quad (I.4) \rightarrow e^{-\lambda t} = \frac{1}{2} \quad (I.5)$$

Et donc : $T = \frac{\ln 2}{\lambda}$ (I.6) T : est la demi-vie.

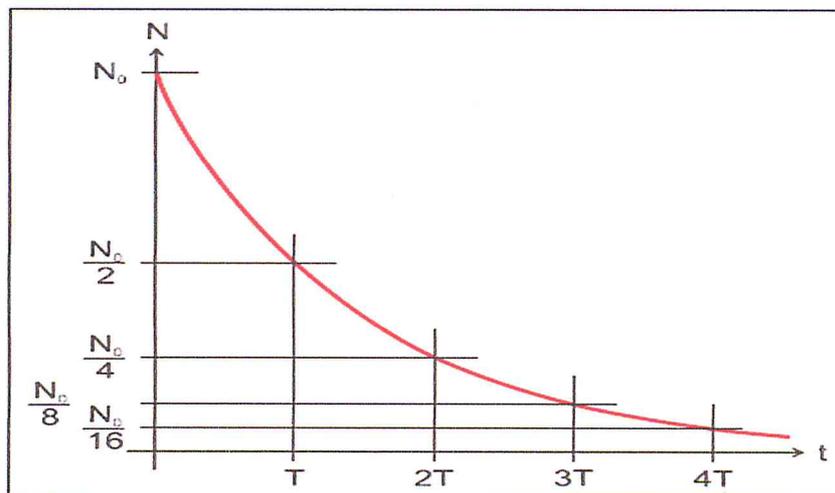
1.3.2. Courbe de décroissance radioactive :

Figure I.2 : Courbe de décroissance radioactive [5].

1.3.3. Activité :

L'activité A d'une source radioactive est le nombre de noyaux radioactifs se désintégrant par seconde. C'est aussi le nombre de particules ou de photons émis par unité de temps [5].

À partir de la loi de désintégration on obtient :

$$A = \frac{-dN}{dt} = \frac{-d}{dt}(N_0 e^{-\lambda t}) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad (I.7)$$

$$A = \lambda N \quad (I.8)$$

En posant $A_0 = \lambda N_0$ [I.9], On obtient :

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (I.10)$$

Unités utilisées :

Elle se mesure par le nombre de désintégrations nucléaires par seconde

Son unité SI est **Becquerel (Bq)** qui est égal à 1 désintégration/s

Ancienne unité = **curie(Ci)**, la radioactivité d'un gramme de radium (37milliards de désintégration par seconde) [6].

$$1Ci = 3.7 * 10^{10} Bq \quad (I.11)$$

1.4. Filiation radioactive :

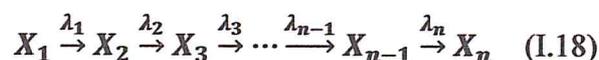
On appelle filiation radioactive, la série de désintégration en cascade que subissent certains noyaux. Chacune des désintégrations est caractérisée par sa propre constante de désintégration λ qui est liée à la période.

Dans la nature, les filiations radioactives concernant principalement trois éléments lourds dont le temps de vie est de l'ordre du milliard d'années : l'uranium-238, l'uranium -235 et le thorium -232.

Les descendants de ces trois noyaux, présents en très petites quantités dans les roches, contribuent à la radioactivité naturelle [7].

Le passage du noyau père au noyau fils est caractérisé par les équations d'évolution.

Dans le cas d'une filiation à n corps :



X_n : est l'isotope stable de la filiation radioactive.

L'évolution de la population des noyaux pères et des noyaux fils en fonction du temps est régie par les équations différentielles suivantes :

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (\text{I.12})$$

$$\frac{dN_i}{dt} = \lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i \quad (\text{I.13})$$

La solution générale est donnée par la relation de Bateman [8] :

$$N_n(t) = C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t} \quad (\text{I.14})$$

$$C_1 = \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_1)} \frac{\lambda_3}{(\lambda_3 - \lambda_1)} \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_1} \frac{\lambda_n}{\lambda_n - \lambda_1} = \prod_{i \neq 1} \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_1} \quad (\text{I.15})$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_2)} \frac{\lambda_3}{(\lambda_3 - \lambda_2)} \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_2} \frac{\lambda_n}{\lambda_n - \lambda_2} = \prod_{i \neq 2} \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_2} \quad (\text{I.16})$$

$$C_n = \frac{\lambda_1}{(\lambda_1 - \lambda_n)} \frac{\lambda_2}{(\lambda_2 - \lambda_n)} \dots \frac{\lambda_{n-1}}{\lambda_{n-1} - \lambda_n} = \prod_{i \neq n} \frac{\lambda_i}{\lambda_i - \lambda_n} \quad (\text{I.17})$$

1.4.1. Equilibre de régime :

Cet équilibre est à considérer lorsque la période du noyau père est légèrement supérieure à celle du noyau fils. Les activités des deux nucléides évoluent en restant dans un rapport constant.

L'activité du noyau fils est reliée à celle du père par [8] :

$$\frac{A_F}{A_P} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (\text{I.18})$$

1.4.2. Equilibre séculaire :

La décroissance du noyau-père (A) est négligeable devant celle du noyau-fils (B).

Si $\lambda_2 \gg \lambda_1$, c.-à-d. si $T_2 \ll T_1$ c.-à-d. si le noyau B se distingue beaucoup plus rapidement que sa «production» par le noyau-père A.

- L'activité du noyau-père sera quasi-constante pendant la croissance de l'activité du noyau-fils
- Dans les filiations, si les périodes des pères sont beaucoup plus grandes que celles des fils, avec le temps, il s'établit un équilibre tel que tous les descendants possèdent la même activité [9].

Ex : $T(^{210}\text{Pb}) = 22.3 \text{ans}$ et $T(^{214}\text{Bi}) = 26.8 \text{min}$

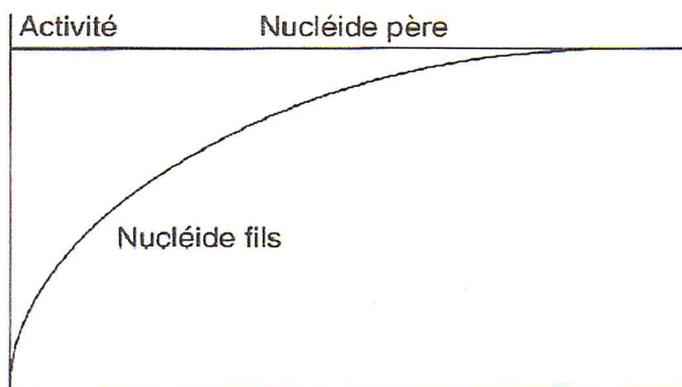


Figure I.3 : la possibilité pour que l'élément B fils atteigne l'élément A père [9].

1.5. Famille de l'uranium-238 :

Une famille radioactive, appelée encore filiation, désigne une série de désintégrations apparaissant par transformation spontanée d'un isotope instable, série qui permet d'arriver à un élément chimique dont le noyau stable.

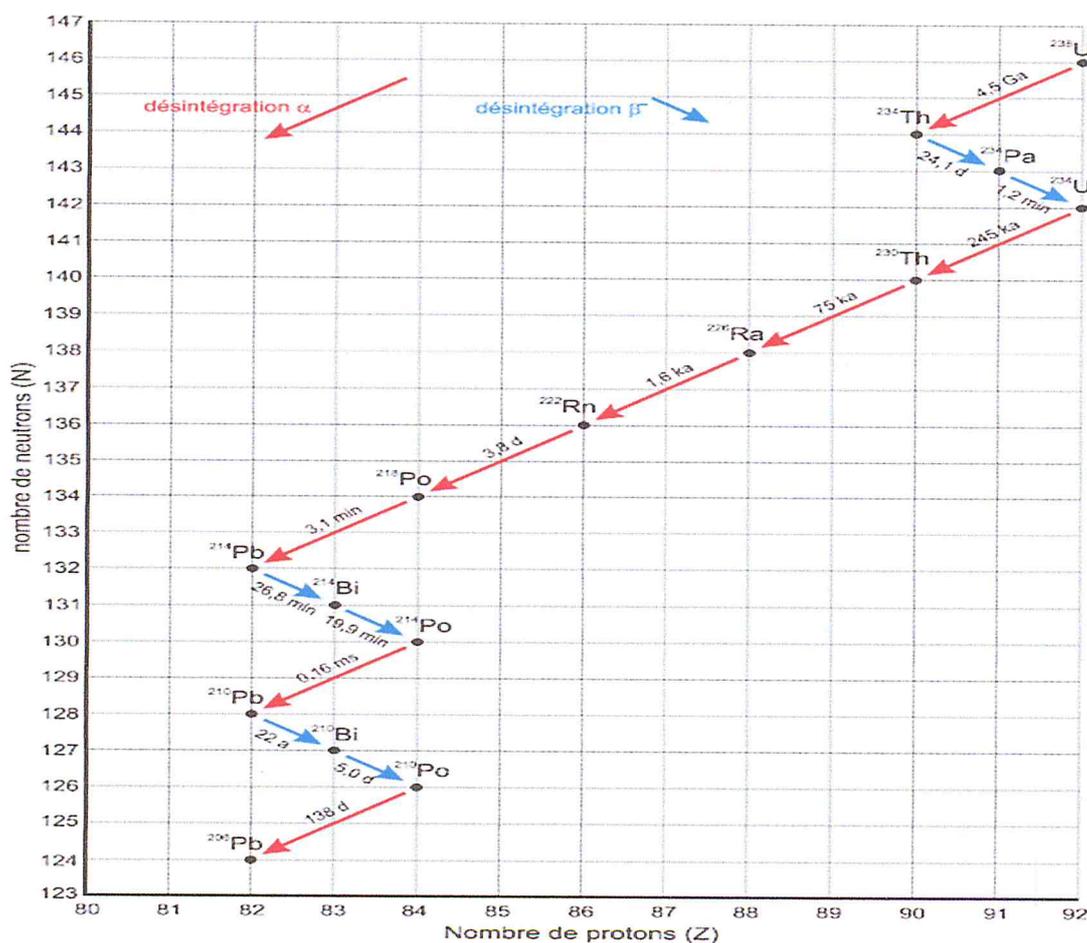


Figure I.4 : chaîne radioactive naturelle de ^{238}U [5].

Chapitre II : Interaction des photons gamma avec la matière

1. Interaction des photons gamma avec la matière :

Lorsqu'ils traversent la matière, les photons γ peuvent subir différents types d'interactions en fonction de leur énergie et du milieu en présence : l'effet photoélectrique, la création de paires électron-positron, la diffusion Compton (dit aussi inélastique ou incohérente), et la diffusion Rayleigh.

Parmi ces processus, seuls les trois premiers sont significatifs.

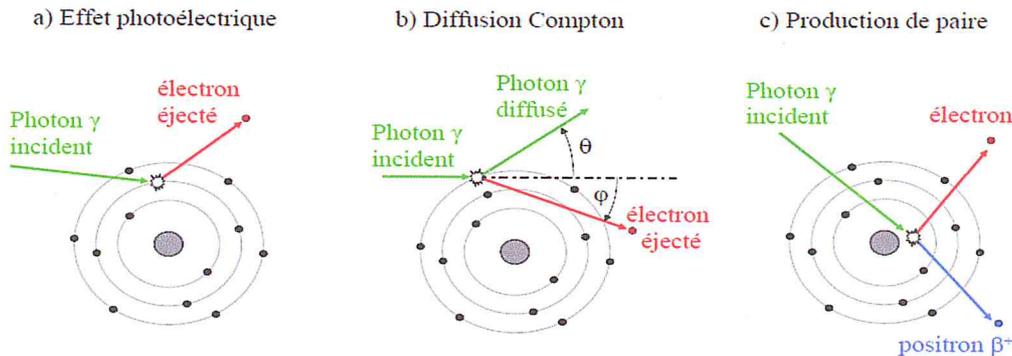


Figure II.1 : principales interactions des photons γ avec la matière [11].

1.1. Diffusion Rayleigh :

La diffusion de Rayleigh est une interaction avec le cortège électronique de l'atome. Elle consiste en la diffusion sans changement de longueur d'onde, le photon diffusé a donc une énergie égale à celle du photon incident. La diffusion Rayleigh se produit sur des électrons plus liés [10].

1.2. Effet photoélectrique :

Dans une collision photoélectrique, le photon incident cède totalement son énergie E_γ à un électron fortement lié de l'atome cible. Le photoélectron est éjecté avec une énergie cinétique.

$$E_e = E_\gamma - L_e \quad (\text{II.1})$$

L_e : L'énergie de liaison de l'électron dans l'atome.

Le niveau d'énergie vacant est alors rempli à partir de niveaux supérieurs via des transitions (émission x caractéristique) ou électrons d'Auger.

La section efficace de cette interaction dépend du numéro atomique de la cible (c'est-à-dire de la taille du nuage électronique) et de l'énergie du photon incident :

$$\sigma_{EP} = C \frac{Z^4}{E_\gamma^3} \quad (\text{II.2}) C : \text{constante.}$$

L'effet photoélectrique est prépondérant pour le rayon γ de basse énergie [11].

1.3. Diffusion Compton :

Il s'agit de l'interaction d'un photon d'énergie E_γ avec un électron libre ou peu lié (énergie de liaison $L_e \leq E_\gamma$).

L'interaction, bien qu'inélastique au sens strict, peut être décrite comme une collision élastique, où l'électron recule avec une énergie cinétique E_e et le photon gamma est diffusé avec une énergie E'_γ . Les deux grandeurs E'_γ et $E_e = E_\gamma - L_e$ peuvent se calculer par les relations de conservation :

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \quad (\text{II.3})$$

Où m_e est la masse au repos de l'électron ($m_e * C^2 = 511 \text{keV}$) et θ l'angle de diffusion du photon gamma, mesuré par rapport à sa direction d'incidence.

La probabilité pour un photon de subir une diffusion Compton augmente linéairement avec le nombre Z d'électrons disponible par atome cible [11].

1.4. Effet de création de paires :

Dans un champ électrique comme celui d'un noyau atomique, un photon gamma peut se matérialiser sous forme d'une paire électron-positon.

Cette conversion requiert que l'énergie E_γ de photon incident soit supérieure au seuil de $2m_e * C^2 = 1022 \text{keV}$. L'énergie résiduelle $E_\gamma - 1022 \text{keV}$ se retrouve sous forme d'énergie cinétique répartie entre les deux particules.

La section efficace de ce processus σ_{PP} augmente proportionnellement avec le carré du nombre atomique Z avec l'énergie E_γ du photon incident.

La figure suivante représente la répartition prépondérante des effets photo-électrique, Compton et Création de Paire en fonction du numéro atomique et l'énergie du photon incident [11].

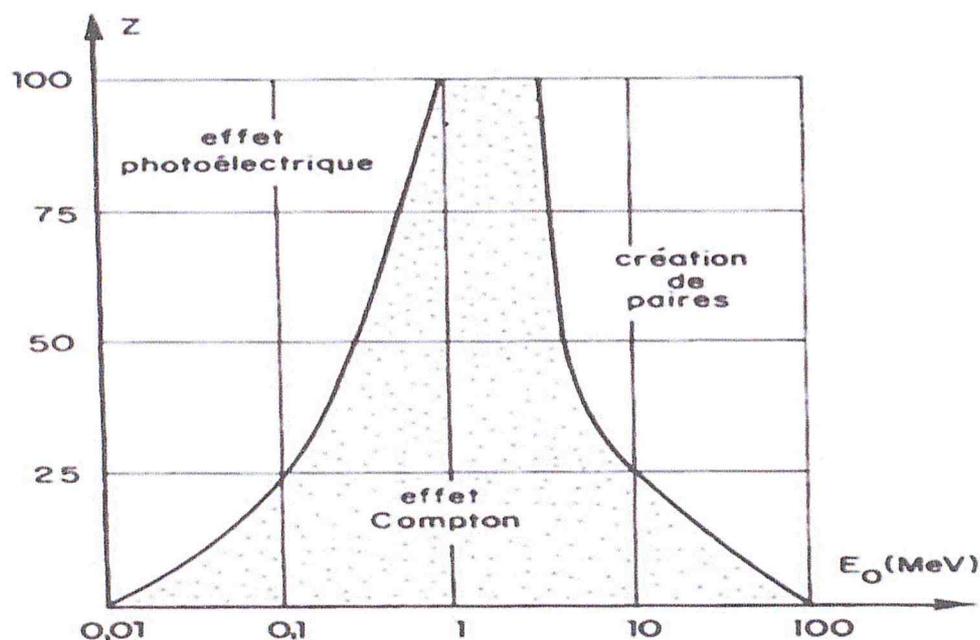


Figure II.2 : Répartition des 3 effets élémentaires en fonction du numéro atomique du matériau et de l'énergie du photon incident (Azbouche 2015).

La section efficace totale d'interaction σ_{tot} des photons avec la matière est la somme de toutes les sections efficaces des différents processus d'interaction. Elle est donnée par la relation suivante [12] :

$$\sigma_{tot} = \sigma_{Ra} + \sigma_{Co} + \sigma_{Ph} + \sigma_{pp} \quad (\text{II.4})$$

Où :

σ_{Ra} : Section efficace de diffusion Rayleigh.

σ_{Co} : Section efficace de diffusion Compton.

σ_{Ph} : Section efficace d'absorption photoélectrique.

σ_{pp} : Section efficace de création de paires.

2. Atténuation des rayons gammas dans les matériaux :

L'atténuation des photons s'exprime par le coefficient d'atténuation qui présente la fraction des photons incidents interagissant par unité de longueur [13].

Comme le montre la figure suivante, lorsqu'un faisceau homogène de rayons X ou gamma d'intensité I_0 traverse une épaisseur infiniment petite dx d'un matériau, il subit alors une diminution d'intensité dI qui est proportionnelle à l'intensité I_0 du faisceau incident et de l'épaisseur dx du corps absorbant. Ce qui s'exprime sous la forme de l'équation différentielle suivante [14] :

$$dI = -I_0 * \mu * dx \quad (\text{II.5})$$

Le signe indique une diminution d'intensité.

μ : Constante appelée coefficient d'absorption linéique du matériau.

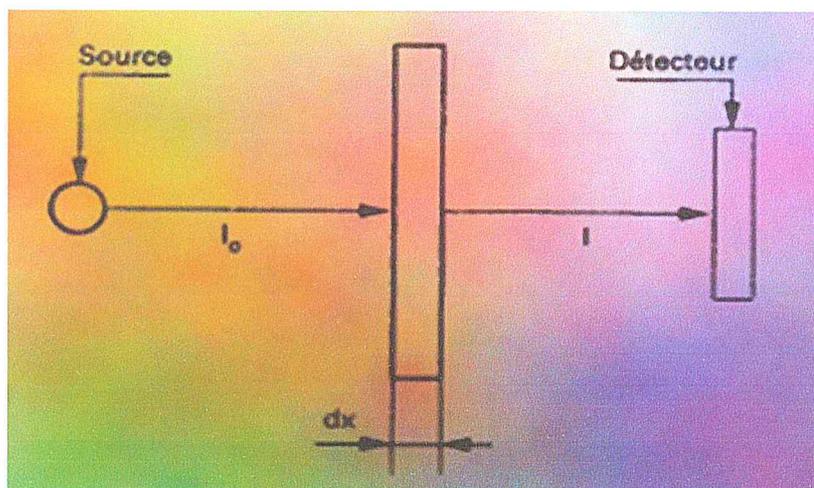


Figure II.3 : Absorption des rayons X ou gamma par la matière [14].

L'intensité I du rayonnement est obtenue par l'intégration de l'équation différentielle :

$$I = I_0 * e^{-(\mu x)} \quad (\text{II.6})$$

x : L'épaisseur traversée du matériau.

μ : Coefficient d'absorption linéaire donné par la relation :

$$\mu = n\sigma_{tot} \quad (\text{II.7})$$

Avec $n = N_A\rho/A$ [II.8], est le nombre d'atomes par unité de volume [12].

On définit le coefficient d'absorption massique par le rapport du coefficient d'absorption linéaire sur la densité du milieu :

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} = \frac{N_A}{A_M} (\sigma_{Ra} + \sigma_{Co} + \sigma_{Ph} + \sigma_{pp}) \quad (\text{II.8})$$

Où :

A_M : est la masse atomique de l'élément M.

Chapitre III : Technique d'analyse par spectrométrie gamma

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la désintégration des noyaux atomiques est suivie très souvent par l'émission de photons gamma qui les caractérisent. Leurs interactions avec le détecteur se traduisent par un dépôt d'énergie total ou partiel. À partir du spectre analysé, il est possible de remonter à l'activité du radioélément présent dans l'échantillon analysé. La performance d'un spectromètre est liée à sa capacité de détecter des raies peu intenses (efficacité) et de séparer des raies très proches en énergie (résolution) [15].

1. Technique de spectrométrie gamma:

La spectrométrie gamma à haute résolution est une technique non destructive, performante. Elle permet la détermination qualitative et quantitative des radionucléides émetteurs des rayonnements gamma dans un échantillon naturel ou artificiel. Les signatures des trois principaux processus d'interaction photon-matière (Photo-électrique, Compton et Création de Paire) sont observés dans les spectres de désexcitation gamma [16].

2. Détecteur Ge (HP):

Le germanium hyper pur est un semi-conducteur utilisé dans la spectrométrie gamma. Vu qu'il possède une bande interdite très étroite, ce qui permet de créer le plus grand nombre de porteurs de charge pour un dépôt d'énergie donné, minimisant ainsi la fluctuation statistique dans la mesure.

Par ailleurs, sa densité et son nombre atomique élevés en font le semi-conducteur le plus approprié pour la détection des rayonnements ionisants dans une plage d'énergie très large allant de la dizaine de keV à la dizaine de MeV [16].

Les détecteurs germanium existent sous trois configurations géométriques : planaire, coaxiale et puits figure(III.1) [17].

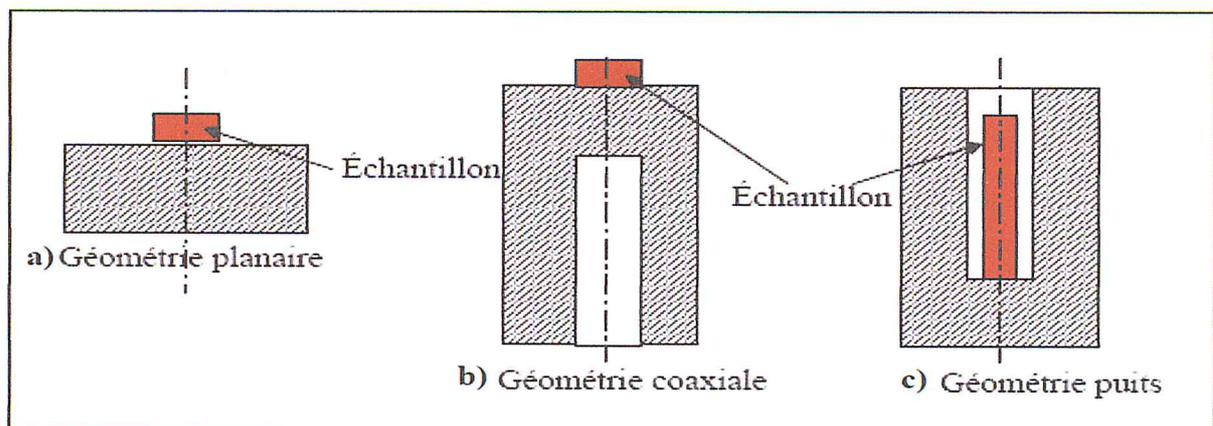


Figure III.1 : Les différentes configurations géométriques des détecteurs germanium [Azbouche2015].

2.1. Détecteur planaire :

La géométrie permet d'avoir une réponse du détecteur pour les gammas des faibles énergies. Cette configuration permet d'avoir la meilleure résolution. L'épaisseur du volume actif peut aller jusqu'à 1 ou 2 cm, ce qui donne un volume de 10 à 30 cm³, ce qui est relativement faible [17].

2.2. Détecteur coaxial :

La géométrie coaxiale permet de contourner ce problème. Le volume actif peut atteindre 750 cm³ par contre, la réponse en énergie est: de 3keV à 10MeV. En plus la résolution est moins bonne qu'avec la géométrie planaire pour des énergies égales [17].

2.3. Détecteur puits :

Avec la géométrie puits la réponse du détecteur est dans le même intervalle en énergie que la géométrie coaxiale. Mais du fait que l'on peut introduire un échantillon à l'intérieur du détecteur, cela améliore l'efficacité de détection. La résolution avec la géométrie puits à basse énergie est moins bonne qu'avec une géométrie coaxiale mais à haute énergie elle est meilleure [17].

3. Chaîne de détection :

L'ensemble de détection permet de mesurer un signal issu de l'interaction des rayonnements ionisants avec le cristal de germanium, de l'amplifier et de le mettre en forme en vue d'une analyse ultérieure. La chaîne d'acquisition est composée de cinq parties (figure III.2) : le détecteur (dont la partie sensible est un cristal de germanium), le préamplificateur, l'amplificateur, le convertisseur analogique-numérique (ADC) ainsi que l'analyseur multi-canaux (MCA) [15].

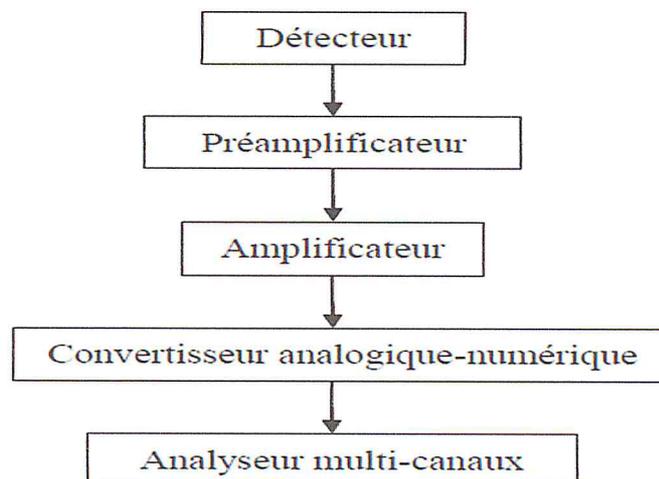


Figure III.2 : schéma de principe de l'ensemble de détection.

3.1. Détecteur Ge(HP) :

Les détecteurs à semi-conducteurs de photons utilisés dans la spectroscopie nucléaire fonctionnent dans la gamme d'énergie entre 3keV et 10 MeV. La détection se fait à l'aide d'un cristal semi-conducteur de germanium (hyper-pur). Une fraction des rayons gamma émis par l'échantillon placé devant la détecteur frappent celui-ci et transmettent leurs énergies à un électron dans le cristal de germanium [18].

3.2. Préamplificateur :

Dans une chaîne de spectroscopie, le préamplificateur a pour rôle de mise en forme du signal le faible signal provenant du détecteur afin de le transmettre par câble coaxial, sans perdre trop d'informations ou de distorsion, jusqu'à l'amplification linéaire. Le préamplificateur de charges doit être sensible à la charge libérée par le détecteur à semi-conducteur lors de la détection [19].

Pour le cas de Ge(HP), semi-conducteur généralement, l'élément principal de préamplificateur est le transistor de l'effet de champ qui est à l'intérieur de la capsule Germanium de semi-conducteur pour le refroidissement à fin d'avoir un très bon rapport signal S/B.

3.3. Amplificateurs :

Le signal en tension est ensuite traité par l'amplificateur principal où il est mis en forme gaussien et amplifié de manière à optimiser le rapport signal/bruit (s/b). La mise en forme du signal se fait avec une différenciation et une intégration qui résulte d'une impulsion courte par rapport au temps de descente du préamplificateur.

L'amplification doit répondre aux mêmes exigences que celles requises pour le préamplificateur en ce qui concerne le bruit, la linéarité et la stabilité [11].

3.4. Convertisseur analogique-numérique :

A la sortie de l'amplificateur, où un signal continu pour l'acquisition, il est préférable de travailler avec des grandeurs discrètes, (prendre un ensemble fini de valeurs). C'est pourquoi on utilise un convertisseur analogique-numérique (ADC), qui transforme l'amplitude du signal électrique fourni par l'amplificateur en un nombre qui est alors proportionnel à l'énergie déposée dans le cristal. La sortie de l'ADC est enregistrée dans une mémoire qui possède autant d'adresses que le maximum de numéro de canaux servant à découper le spectre final [15].

3.5. Analyseur multi canaux :

Les signaux produits par les rayons gamma sont accumulés dans la mémoire d'un analyseur multi-canal (MCA) pour former un spectre (nombre de rayons gamma détecté en fonction de leurs énergie) [18].

- Le logiciel de traitement et d'analyse du signal :

Le logiciel utilisé est le Génie 2000, logiciel commercialisé par la société Canberra.

4. Principales caractéristiques d'un détecteur

4.1. Résolution en énergie :

La résolution en énergie mesure la capacité d'un détecteur à séparer des raies très proches dans le spectre.

La résolution FWHM (Full Width at Half Maximum), δE (exprimée en keV) est la pleine largeur du pic mesurée à mi-hauteur (figure III.3) [20] :

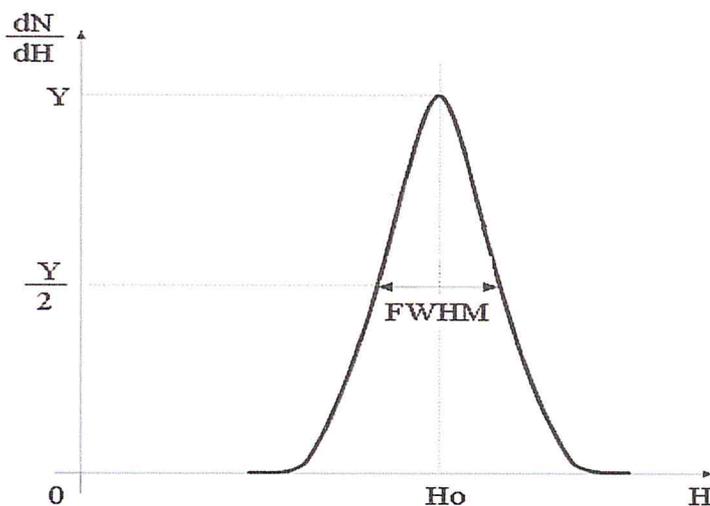


Figure III.3 : la résolution pour un pic parfaitement gaussien

Lorsqu'un rayonnement arrive au détecteur il interagit avec lui. La réponse de ce dernier donne un spectre de distribution gaussienne.

Expérimentalement, on peut déterminer la résolution du détecteur en pourcentage en divisant $FWHM$ par la valeur de l'énergie du rayonnement H_0 (ou E) [21] :

$$R(\%) = \frac{FWHM}{H_0} \quad (\text{III.1})$$

H_0 : la valeur moyenne de la position du pic.

4.2. Efficacité de détecteur :

Parmi tous les rayonnements émis par une source donnée, il y a seulement une fraction de ce nombre qui est enregistré par le système de mesure (détecteur + électronique associée) on trouve deux efficacités possible [21] :

- **Efficacité absolue :**

Le rendement d'un détecteur est le rapport des rayonnements mesurés sur les rayonnements émis par la source. L'efficacité est souvent exprimée en pourcentage du nombre de rayonnements incidents pour les compteurs de particules, on a [20] :

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\text{Nombre de rayonnements détectés}}{\text{Nombre de rayonnements émis}} \quad (\text{III.2})$$

- **Efficacité intrinsèque :**

Elle est définie par le nombre de rayonnements détectés sur le nombre de rayonnements ayant pénétré le détecteur, selon l'équation suivante [12] :

$$\varepsilon_{int} = \frac{\text{Nombre de rayonnements détectés}}{\text{Nombre de rayonnements pénétrant le détecteur}} \quad (\text{III.3})$$

L'efficacité absolue est reliée à l'efficacité intrinsèque par la relation suivante [20] :

$$\varepsilon_{abs} = \frac{\Omega}{4\pi} \varepsilon_{int} \quad (\text{III.4})$$

Où Ω est l'angle solide défini par la surface de détecteur vue de la source (figure III.4) [20].

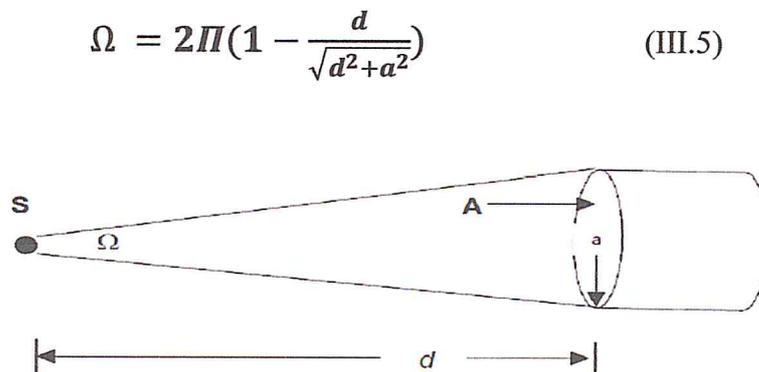


Figure III.4 : notion élémentaire d'angle solide.

4.3. Temps mort :

Une chaîne électronique d'acquisition possède un temps interne de traitement d'une impulsion. Si une seconde impulsion arrive dans un temps assez court après une première impulsion, elle ne pourra pas être traitée puisque la première l'est encore. Le temps de traitement d'une impulsion s'appelle le temps mort [17].

5. Principe de l'évaluation de l'activité d'un Radioélément :

Cette étape fait appel à la chaîne de mesure de spectrométrie gamma et elle réside dans l'acquisition, le dépouillement, l'analyse et le calcul de l'activité [22].

5.1. Calcul de l'activité :

Après avoir préparé l'échantillon à analyser, il est conditionné dans une géométrie proche voire identique à celle de l'étalon et placé vis-à-vis du détecteur et l'acquisition démarre [8]. Le calcul de l'activité se fait à partir de la formule (III.6).

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot \gamma \cdot m \cdot t_c} \quad (\text{III.6})$$

L'incertitude associée à l'activité massique est donnée par l'expression :

$$\Delta A = A \sqrt{\left(\frac{\sigma N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \gamma}{\gamma}\right)^2} \quad (\text{III.7})$$

6. Coïncidence de sommation gamma-gamma :**6.1. Définition des coïncidences de sommation γ - γ :**

Une coïncidence se produit quand deux photons ou plus de la cascade frappent le cristal et déposent leurs énergies partiellement ou totalement dans son volume. Le détecteur ne peut pas distinguer ces photons, mais donne une impulsion qui correspond à l'énergie entière qu'elles déposent. Ce phénomène est dit sommation de pic [24].

6.2. Effet des sommations dues aux coïncidences :

Les photons peuvent arriver simultanément au détecteur produisant ainsi un effet de sommation. γ - γ ou γ - α , il dépend essentiellement de deux paramètres [12] :

- L'efficacité de détection : elle est liée à la probabilité d'interaction d'un photon émis par la source avec le cristal du détecteur. Elle dépend de l'angle solide de détection et de l'énergie du photon [12].
- Le schéma de désintégration : la complexité des différentes voies de désexcitation jouent un rôle prépondérant dans l'effet de sommation due aux coïncidences qui est d'autant plus marqué que la probabilité d'émission de la raie considérée est grande [12].

6.3. Principe de correction des coïncidences :

En pratique, pour la mesure des faibles radioactivités environnementales, l'échantillon est positionné le plus proche possible du détecteur. Les faibles dimensions de l'échantillon et les grandes dimensions du détecteur contribuent à l'augmentation de l'angle solide. L'augmentation de ce dernier améliore la sensibilité du détecteur aux rayonnements X et γ de faible énergie, mais a comme conséquence l'apparition du phénomène de pic-somme (PS). Il s'agit de la détection simultanée de deux photons, voire plus, émis en cascade. Il concerne les niveaux excités qui ont une durée de vie inférieure à la résolution en temps du détecteur [8].

Le pic-somme se manifeste soit par une perte de comptage dans le pic d'absorption totale, ce qui amène à la sous-estimation de l'efficacité pour l'énergie correspondante, soit par l'apparition de nouveaux pics d'énergie égale à la somme des énergies détectées simultanément ou des pics de sommation qui s'ajoutent au fond continu du spectre [8].

6.4. Méthode de correction des coïncidences de sommation :

- **Approche analytique :**

Cette méthode basée sur l'utilisation des informations issues du pic de l'absorption totale, les efficacités de détection et les paramètres de décroissance radioactive tel que : le mode de désintégration du noyau père, les énergies des transitions gamma et leurs probabilités d'émissions. Dans cette méthode, le facteur de correction des coïncidences F_{TCS} , est donné par [25] :

$$F_{TCS} = \frac{1}{1 - \sum_{i=1}^{i=n} P_i \epsilon_i} \quad (\text{III.8})$$

Où :

n : Nombre de photons gammas en coïncidence avec le photon gamma considéré.

ε_i : Efficacité de détection pour le photon i .

P_i : Probabilité d'émission simultanément du $n^{\text{ième}}$ photon avec le gamma considéré.

Pour un schéma de décroissance simple, à deux ou trois niveaux, l'expression précédente donne des corrections analytiques qui font appel aux probabilités d'émission γ et aux efficacités de détection obtenues par étalonnage.

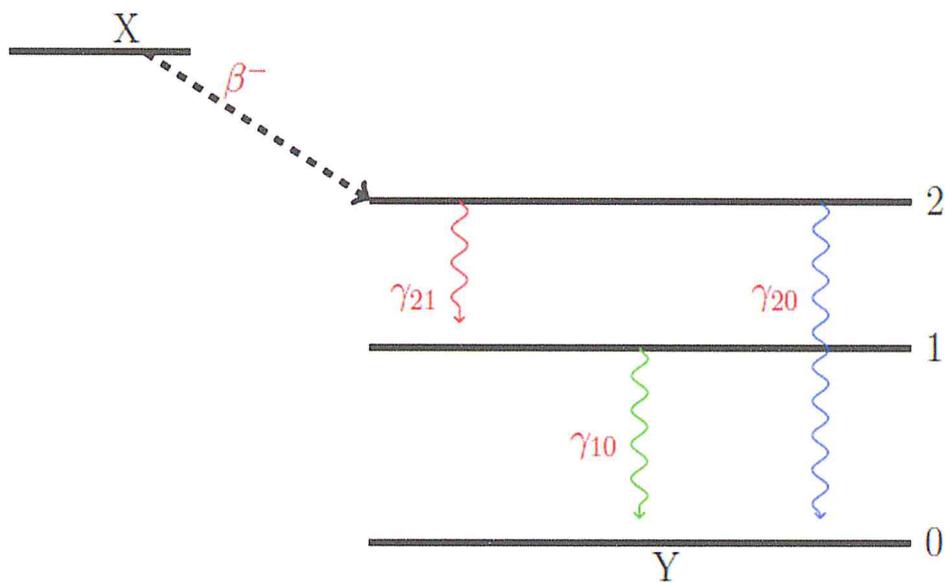


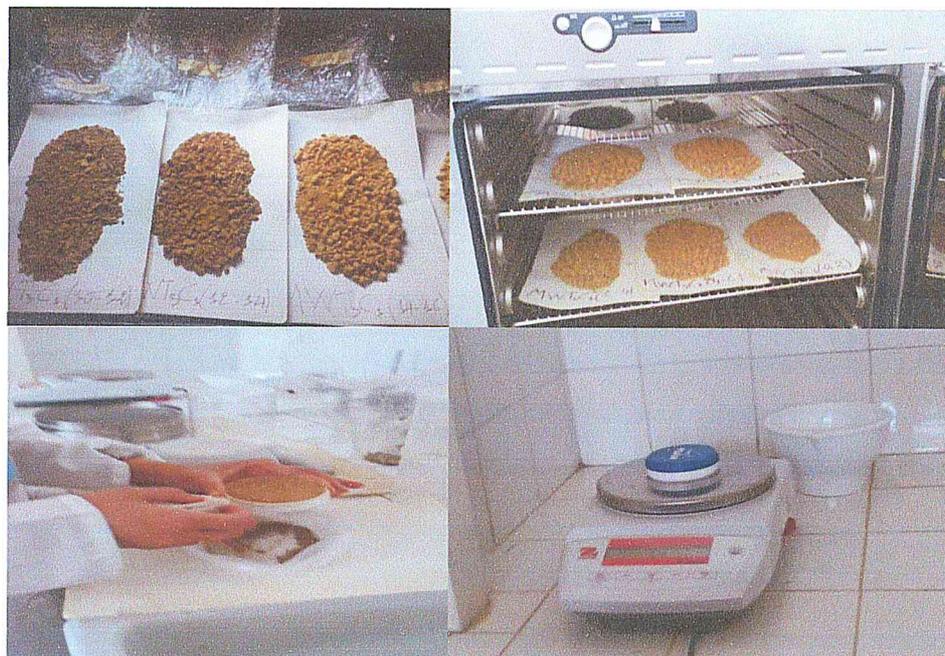
Figure III.5 : Schéma de désintégration à deux niveaux excités.

Chapitre IV : Matériels et méthode

1. Préparation des échantillons :

Les étapes de préparation des échantillons de sol, sont les suivantes :

- Séchage à l'air libre pendant 24h.
- Pesage des échantillons.
- Etuvage à 105°C et tamisage (2mm).
- Homogénéisation de la fraction fine (<2mm).
- On met nos échantillons dans des boîtes hermétiquement fermées pendant 35 jours pour établir l'équilibre séculaire.
- Conditionnement des échantillons dans le porte échantillon cylindrique.
- Pesage des échantillons après conditionnement.
- La boîte cylindrique est un récipient de grand volume pouvant contenir environ 79g de l'échantillon de sol. Cette boîte cylindrique sous cette forme qui entoure la surface du détecteur Germanium, sur lequel elle sera positionnée pour le comptage gamma.



FigureIV.1 :Les étapes de préparation des échantillons de sols.

2. Matériels :

Le matériel utilisé pour la préparation des échantillons est représenté sur la figure suivante : (Tamis de 2 mm, Becher, Mortier, Balance, Etuve, Porte échantillon cylindrique).



Figure IV.2 : Matériel utilisé pour la préparation des échantillons.

3. Dispositif expérimental de la technique spectrométrie gamma :

La chaîne de spectrométrie gamma utilisée dans cette étude est composée d'un détecteur à semi-conducteur de type Ge(HP), relié à un système DSA (Digital Spectrum Analyzer), Ce dernier permet d'amplifier, ajuster et traiter les impulsions délivrées par le détecteur. Les spectres sont visualisés sur un ordinateur et sont ensuite traités par un logiciel Génie-2000. La figure montre le dispositif expérimental utilisé dans cette étude.



Figure IV.3 : La chaîne de spectrométrie gamma.

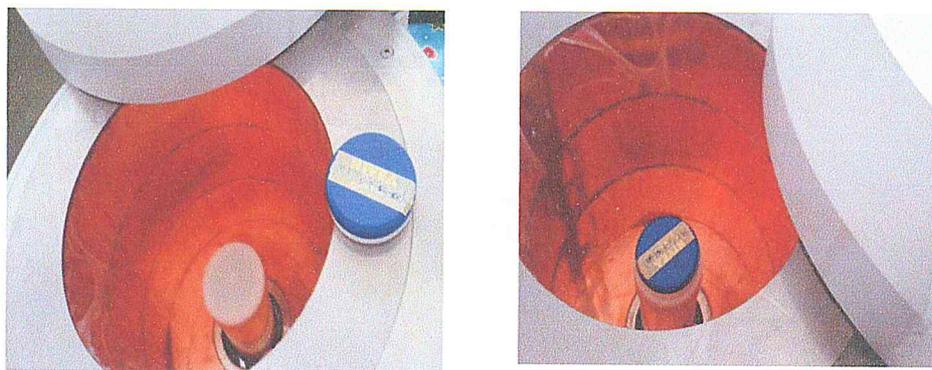


Figure IV.4 : Détecteur Ge(HP) et le porte échantillon (cylindrique).

3.1. Analyse qualitative :

3.1.1. Etalonnage de la chaîne de mesure : (spectrométrie gamma)

Avant de passer les échantillons de sol en mesure, la chaîne de spectrométrie est étalonnée en énergie et en efficacité.

3.1.1.1. Etalonnage en énergie :

La première étape du travail avant toutes les mesures, est la calibration en énergie de la chaîne de spectrométrie gamma. Cette calibration en énergie consiste à déterminer la droite de l'énergie en fonction du numéro du canal, Cette opération est effectuée à l'aide d'une source radioactive ponctuelle dont leurs énergies gammas sont bien connues.

La chaîne de spectrométrie utilisée a été étalonnée à l'aide d'une source de ^{125}Eu . Le spectre gamma a été collecté durant un temps de 100s. La droite de calibration donnant l'énergie en fonction du numéro de canal est sous la forme :

$$E = a * canal + b \text{(IV.1)}$$

Tableaux IV.1 : Numéros de canaux correspondant aux énergies gammas de spectre de la source d' ^{152}Eu .

Energie (keV)	Canal
121.78	329
244.66	660
344.31	929
411.13	1109
443.93	1198
778.85	2101
964.01	2601
1112.04	3001
1408.02	3799

La droite d'étalonnage est donnée dans la figure (IV.5) :

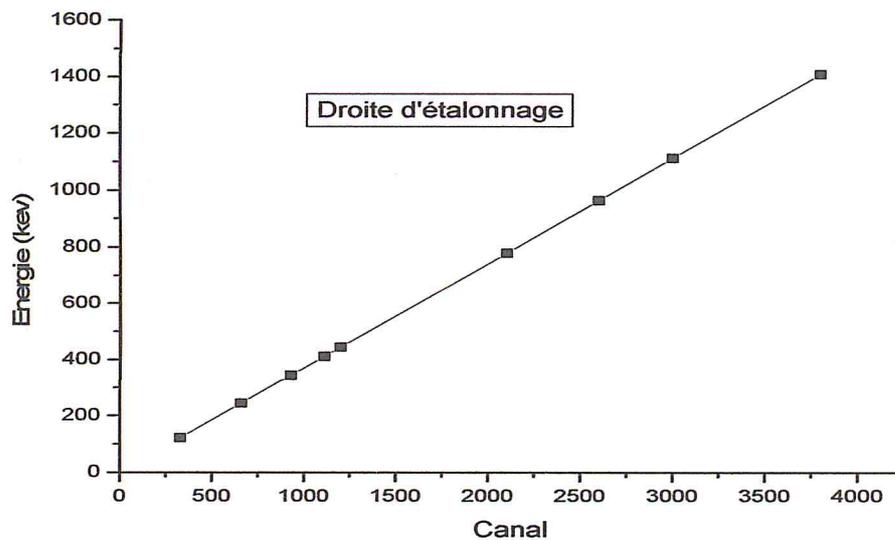


Figure IV.5 : Droite d'étalonnage de la chaîne de mesure.

La droite de l'étalonnage en énergie sous forme de $E = a * canal + b$ en déterminant la valeur a et b par méthode des moindres carrés, on trouve :

a (keV/canal)	B
0.37	0.05

3.1.1.2. Etalonnage en efficacité :

L'efficacité du détecteur est définie par le rapport du nombre de photons détectés sur le nombre de photons émis par la source, selon l'expression suivante :

$$\varepsilon = \frac{N}{\gamma * A * t_c} \quad (\text{IV.2})$$

ε : efficacité du détecteur.

t_c : Temps de collection.

A : Activité de la source à la date de mesure.

N : intensité du pic photoélectrique.

Activité au temps de collection est corrigée par le temps de décroissance de la source td depuis la date de fabrication.

L'activité au moment de mesure est donnée par la relation suivante :

$$A = A_0 * e^{-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} td} \quad (\text{IV.3})$$

L'erreur sur l'efficacité mesurée est calculée à partir de la loi de propagation des erreurs.

Elle est liée aux incertitudes sur les paramètres suivants :

La surface N du pic d'absorption total, l'activité A de la source, l'intensité gamma et le temps de comptage t_c .

L'incertitude sur la mesure de l'efficacité du détecteur est donnée par la relation suivante :

$$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon} = \left[\left(\frac{\Delta N}{N} \right)^2 + \left(\frac{\Delta A}{A} \right)^2 + \left(\frac{\Delta \gamma}{\gamma} \right)^2 + \left(\frac{\Delta t_c}{t_c} \right)^2 \right] \quad (\text{IV.4})$$

ΔN : Erreur sur l'intensité du pic d'absorption.

ΔA : Erreur sur l'activité de la source.

$\Delta \gamma$: Erreur sur le rapport d'embranchement.

Δt_c : Erreur sur le temps de collection.

- Source ^{152}Eu spiked water :

Pour effectuer l'étalonnage en efficacité nous avons utilisé un standard d'eau chargée des radionucléides (Am-241 , Co-60 , ^{152}Eu) de géométrie cylindrique (de diamètre de 7,5 cm et de hauteur 19,5mm) rempli à une masse $m=48.77\text{g}$.

L'activité de la source Eu-152 , Co-60 , Am-241 sont $49,9\text{Bq/kg}$, $50,9\text{Bq/kg}$, $40,2\text{Bq/kg}$ respectivement à la date de référence (1-1-2013). Le temps écoulé 1546 jours à la date égale à de mesure (27-3-2017). La demi-vie et la constante radioactive de :

- ^{152}Eu est $T_{1/2} = 13,2 \text{ an}$ et $\lambda = 1,4386 * 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$.
- ^{152}Co est $T_{1/2} = 5,26 \text{ an}$ et $\lambda = 3,6103 * 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$.
- ^{152}Am est $T_{1/2} = 433 \text{ an}$ et $\lambda = 0,0438 * 10^{-4} \text{ jour}^{-1}$.

Le tableau suivant représente les résultats obtenus de l'efficacité de détection d'une source d'Europium-152 de géométrie cylindrique.

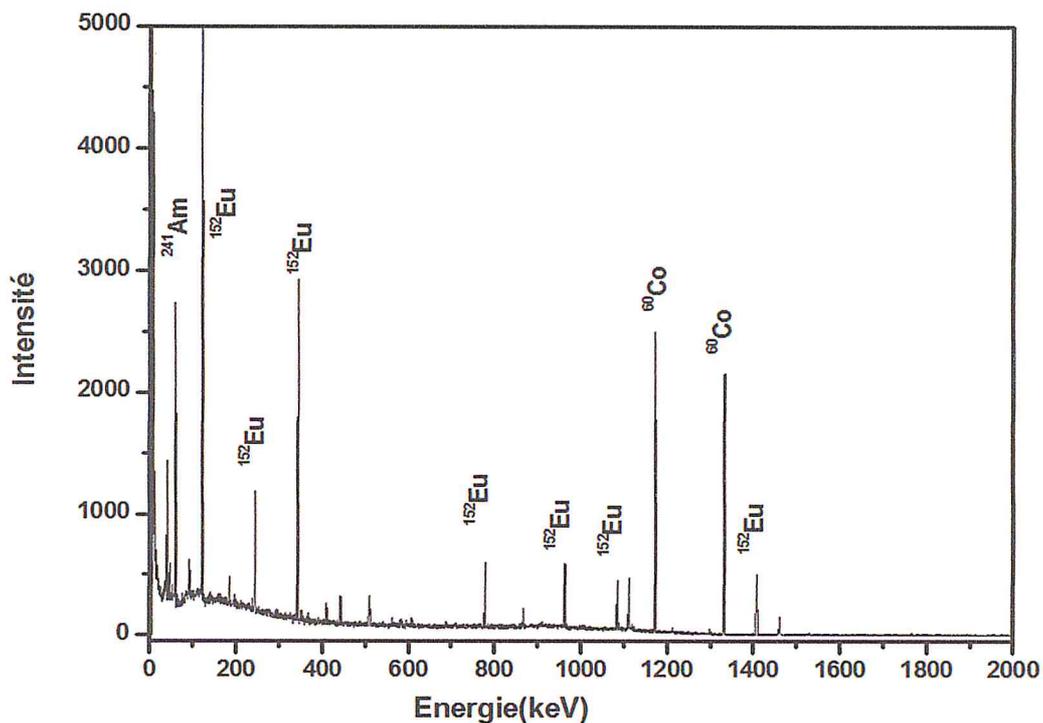


Figure IV.6 : Spectre Expérimentale d'une source d'Europium-152 (spiked water).

Tableau IV.2 : Les valeurs des énergies et des efficacités d'Eu-152.

Energie (keV)	Efficacité mesurée
59,56	0,112±4,22E-05
121,78	0,089±4,42E-05
344,37	0,051±1,96E-05
444,12	0,048±5,73E-05
779,06	0,028±1,33E-05
964,34	0,020±4,93E-06
1086,06	0,018±8,14E-06
1112,33	0,017±5,76E-06
1173,58	0,016±1,62E-06
1332,85	0,015±1,42E-06
1408,02	0,012±1,32E-06

Dans la figure [IV.7], nous donnons la courbe d'efficacité du détecteur en fonction des énergies de photons.

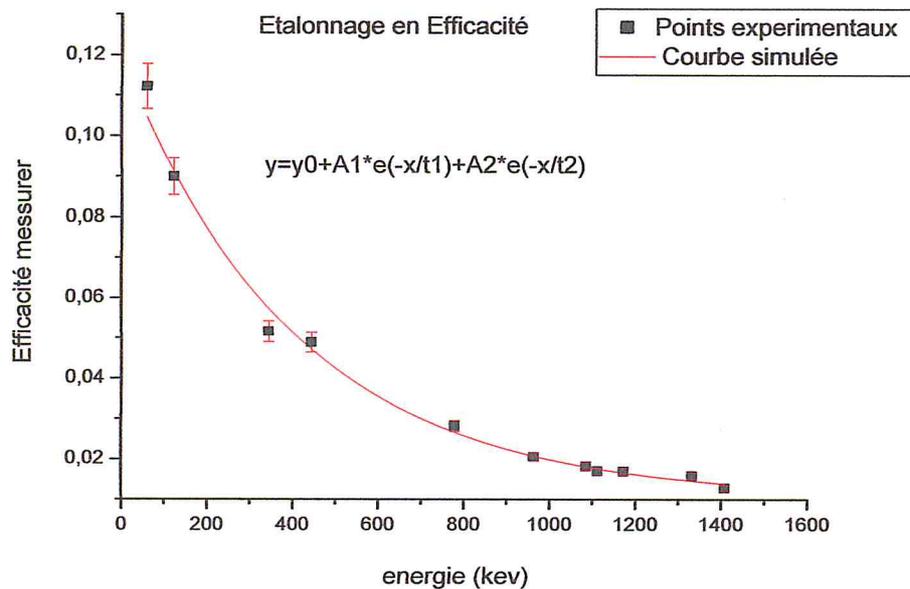


Figure IV.7 : Etalonnage en efficacité du détecteur.

Après avoir tracé la courbe expérimentale de l'efficacité du système de détection, nous remarquons que la tendance de la courbe (Figure IV.7) est exponentielle qui décroît en fonction de l'augmentation de l'énergie et elle est donnée par l'équation suivante :

$$y = y_0 + A_1 * e^{-x/t_1} + A_2 * e^{-x/t_2} \text{ (IV.5)}$$

Où x et y représentent respectivement l'énergie et l'efficacité mesurée.

Où :

Paramètre	Valeurs
y_0	0,00626
A_1	0,08766
t_1	554,34892
A_2	0,05628
t_2	82,53414

3.2. Correction des coïncidences :

Pour l'analyse par spectrométrie gamma, les facteurs de correction des coïncidences de sommation pour différentes raies gammas de la source 152-Eu, sont obtenus en simulant la courbe d'efficacité pour obtenir la courbe d'efficacité réelle. Les facteurs de coïncidence F_{TCS} seront déduits à partir du rapport entre les valeurs des efficacités mesurées sur les valeurs des efficacités de référence (simulées), selon la relation suivante :

$$F_{TCS} = \frac{\varepsilon_{mes}}{\varepsilon_{réelle}} \text{ (IV.6)}$$

Où :

ε_{mes} : Efficacité mesurée au laboratoire.

$\varepsilon_{réelle}$: Efficacité simulée au laboratoire (efficacité calculé).

Afin de calculer l'efficacité simulée, on utilise le logiciel L'ABSOCS, dans lequel on introduit toutes les informations concernant la géométrie du porte échantillon (diamètre, hauteur,.....) et on obtient une équation à travers laquelle on retrouve l'efficacité simulée.

L'équation est donnée par :

$$\ln(Eff) = 4,996e + 001 - 5,385e + 001 * \ln(E) + 2,163e + 001 * \ln(E)^2 - 4,175e + 000 * \ln(E)^3 + 3,871e - 001 * \ln(E)^4 - 1,393e - 002 * \ln(E)^5 \quad (IV.7)$$

Le tableau suivant représente les valeurs des efficacités mesurées et les efficacités simulées.

Tableau IV.3 : Valeur des efficacités mesurées et calculées et en fonction des énergies.

Elément	Energie (keV)	Efficacité mesurée	Efficacité réelle
Bi-214	609,3	0,0355	0,0367
Pb-214	352	0,0535	0,0631
Pb-210	46,5	0,1189	0,1753

3.2.2. Détermination des facteurs de correction de coïncidences de sommation :

D'après les résultats obtenus de l'étalonnage en efficacité (les efficacités mesurées) et les valeurs des efficacités simulées (réelles), d'après la relation [IV.5], on a déduit les facteurs de correction des coïncidences de sommation.

Les résultats des énergies et des facteurs de correction des coïncidences de sommation correspondants sont représentés sur le tableau suivant :

Tableau IV.4 : Les valeurs des énergies et les facteurs des coïncidences de sommation.

Elément	Energie (keV)	Facteur de correction des coïncidences
Bi-214	609,3	0,967
Pb-214	351.93	0,847

3.3. Analyse quantitative :

3.3.1. Mesure de l'activité spécifique :

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés aux radioéléments naturels Pb-214, Bi-214, Pb-210 représentés dans le spectre gamma suivant :

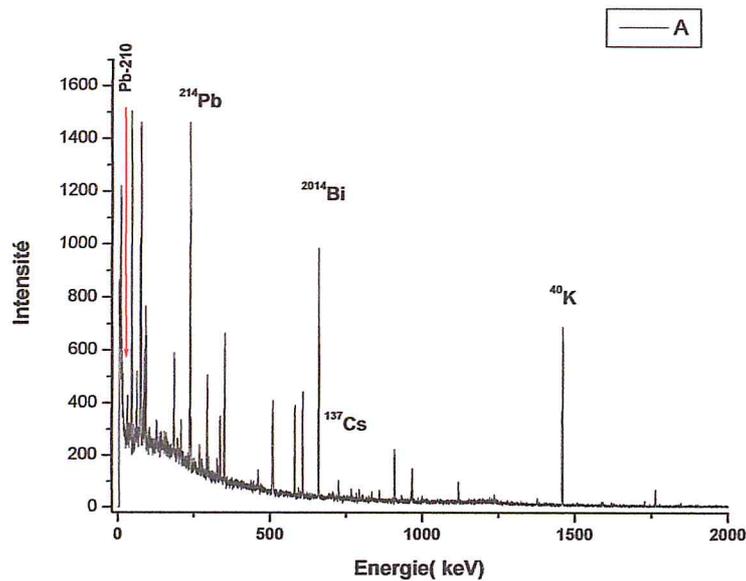


Figure [IV.8] : spectre d'un échantillon de sol.

L'activité spécifique des radioéléments a été déterminée en tenant compte des corrections des coïncidences de sommations. L'activité spécifique est donnée par la relation suivante :

$$A_s = \frac{N}{\varepsilon_{mes} \cdot \gamma \cdot m \cdot t_c \cdot F_{coi}} \quad (IV.8)$$

A_s : Activité spécifique de Pb-210 en (Bq/kg).

N : Intensité du pic photoélectrique.

ε : Efficacité pour la raie du ²¹⁰Pb.

γ : Rapport d'embrochement ou probabilité d'émission gamma.

t_c : Temps de comptage en seconde.

m : Masse de l'échantillon en (kg).

L'incertitude sur les valeurs des activités spécifiques est donnée par la relation suivante :

$$\sigma A_s = A_s \sqrt{\left(\frac{\sigma N}{N}\right)^2 + \left(\frac{\sigma m}{m}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\sigma \gamma}{\gamma}\right)^2} \quad (IV.9)$$

σ_N : L'erreur sur l'intensité.

σ_m : L'erreur sur la masse de l'échantillon.

σ_ϵ : L'erreur sur l'efficacité.

σ_γ : L'erreur sur le rapport d'embrochement.

3.3.2. Calcul de l'activité de plomb-210 en excès:

Le ^{210}Pb est le seul isotope de plomb qui joue un rôle important dans l'étude des équilibres, et ceci à cause de sa période radioactive relativement importante qui est de 21,4a [23].

C'est un émetteur β^- compagne d'un rayonnement gamma de désexcitation, il fait partie de la chaîne de décroissance de l'uranium 238, ce radioélément est un descendant du radon -222, élément fils du radium 226 qui s'échappe en permanence de la croûte terrestre sous la forme d'un gaz inerte. L'émission de ^{222}Rn dépend de la nature du sol, de la couverture végétale, de la teneur des sols en ^{226}Rn ou encore de leur humidité.

La présence du ^{210}Pb dans le sol provient de deux sources différentes (figure IV.9) :

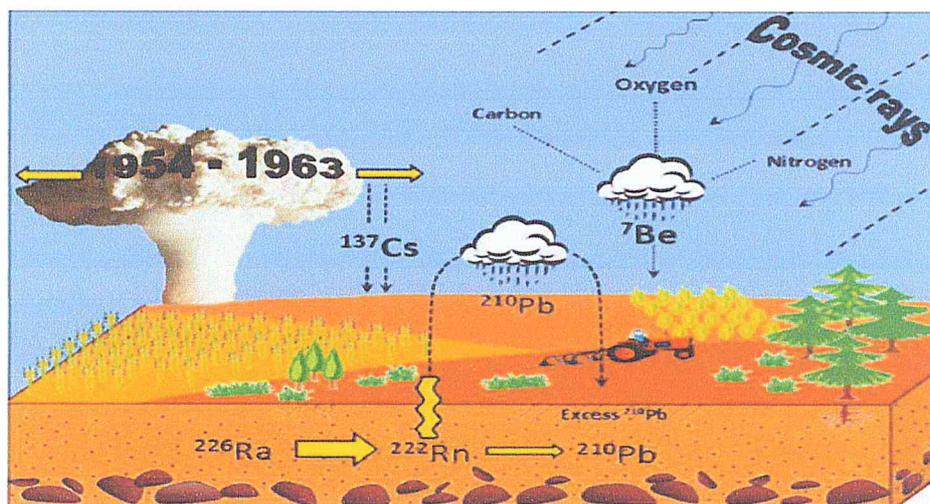


Figure IV.9 : Schéma montrant les différentes origines des radioéléments dans le sol

[Azbouche2015].

Le ^{210}Pb atmosphérique qui est appelé ^{210}Pb en excès ou $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ qui se dépose sur le sol, C'est une fraction du ^{210}Pb qui transite par les cours d'eau.

Le ^{210}Pb résultant de la décroissance radioactive in situ du ^{226}Ra qui est produit en permanence dans le sol que l'on appelle ^{210}Pb supporté ou $^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$.

L'activité de ^{210}Pb total (A_{tot}) que l'on mesure dans le sol est la somme de l'activité A_{ex} due au ^{210}Pb transportée par l'eau ($^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$), et à l'activité du ^{210}Pb produit par la décroissance in situ du ^{226}Ra contenu dans le sol ($^{210}\text{Pb}_{\text{sup}}$) A_{sup} :

$$A_{\text{tot}} = A_{\text{ex}} + A_{\text{sup}} \text{ (IV.10)}$$

A_{tot} : La somme de l'activité en excès et l'activité supporté.

A_{ex} : L'activité de plomb en excès.

A_{sup} : L'activité moyenne ($A_{\text{sup}} = \frac{A_{^{214}\text{Bi}} + A_{^{214}\text{Pb}}}{2}$).

L'activité du Pb-10 supporté (A_{sup}) est déterminée à partir de la moyenne des activités du Bi-214 et Pb-214 après l'équilibre séculaire :

$$A_{\text{sup}} = \frac{A_{^{214}\text{Bi}} + A_{^{214}\text{Pb}}}{2} \text{ (IV.11)}$$

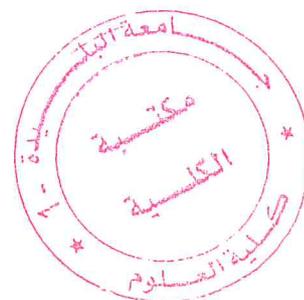
- Distribution des radioéléments dans la carotte N°2 :

Les tableaux suivants représentent les activités spécifiques mesurées et corrigées pour les échantillons de la deuxième carotte :

- Point MFT₁C₂ (0-2 cm) :

Tableaux IV.5 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (0-2 cm).

MFT ₁ C ₂ (0-2 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2020	0,47	0,0367	86400	0,07255	19,3	20
Pb-214	352,0	2790	0,36	0,0631	86400	0,07255	23,1	27,3
Pb-210	46,5	1090	0,04	0,1753	86400	0,07255	36,6	



- Point MFT₁C₂ (2-4 cm) :

Tableaux IV.6 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (2-4 cm).

MFT ₁ C ₂ (2-4 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2240	0,47	0,0367	86400	0,07955	19,5	20,2
Pb-214	352,0	2910	0,36	0,0631	86400	0,07955	22	26
Pb-210	46,5	1220	0,04	0,1753	86400	0,07955	37,3	

- Point MFT₁C₂(4-6 cm) :

Tableaux IV.7 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(4-6 cm).

MFT ₁ C ₂ (4-6 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2130	0,47	0,0367	86400	0,0755	19,6	20,3
Pb-214	352,0	2920	0,36	0,0631	86400	0,0755	23,3	27,5
Pb-210	46,5	1200	0,04	0,1753	86400	0,0755	38,7	

- Point MFT₁C₂(6-8 cm) :

Tableaux IV.8 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (6-8 cm).

MFT ₁ C ₂ (6-8 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	1970	0,47	0,0367	86400	0,0722	18,9	19,6
Pb-214	352,0	2630	0,36	0,0631	86400	0,0722	21,9	25,8
Pb-210	46,5	1100	0,04	0,1753	86400	0,0722	37,1	

• Point MFT₁C₂(8-10 cm) :

Tableaux IV.9 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (8-10 cm).

MFT ₁ C ₂ (8-10 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2170	0,47	0,0367	86400	0,0773	19,5	20,1
Pb-214	352,0	2710	0,36	0,0631	86400	0,0773	21,1	24,9
Pb-210	46,5	937	0,04	0,1753	86400	0,0773	29,5	

• Point MFT₁C₂(10-12 cm) :

Tableaux IV.10 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (10-12 cm).

MFT ₁ C ₂ (10-12cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2040	0,47	0,0367	86400	0,0770	18,4	19
Pb-214	352,0	2700	0,36	0,0631	86400	0,0770	21,1	24,9
Pb-210	46,5	972	0,04	0,1753	86400	0,0770	30,7	

• Point MFT₁C₂(12-14 cm) :

Tableaux IV.11 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (12-14 cm).

MFT ₁ C ₂ (12-14cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	1950	0,47	0,0367	86400	0,0758	17,8	18,5
Pb-214	352,0	2600	0,36	0,0631	86400	0,0758	20,6	24,3
Pb-210	46,5	1020	0,04	0,1753	86400	0,0758	32,8	

• Point MFT₁C₂(14-16 cm) :

Tableaux IV.12 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (14-16 cm).

MFT ₁ C ₂ (14-16 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2080	0,47	0,0367	86400	0,0791	18,3	18,9
Pb-214	352,0	2830	0,36	0,0631	86400	0,0791	21,5	25,4
Pb-210	46,5	925	0,04	0,1753	86400	0,0791	28,5	

• Point MFT₁C₂(16-18 cm) :

Tableaux IV.13 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (16-18 cm).

MFT ₁ C ₂ (16-18 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2050	0,47	0,0367	86400	0,0798	17,8	18,4
Pb-214	352,0	2600	0,36	0,0631	86400	0,0798	19,6	23,1
Pb-210	46,5	971	0,04	0,1753	86400	0,0798	29,6	

- Point MFT₁C₂(18-20 cm) :

Tableaux IV.14 : Activités spécifiques mesurée et corrigée en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (18-20 cm).

MFT ₁ C ₂ (18-20 cm)								
élément	Energie (keV)	Intensité (%)	Rapport (γ)	ε _{réel} (%)	t _c (s)	La masse (kg)	A _{mesurée} (Bq/kg)	A _{corrigée} (Bq/kg)
Bi-214	609,3	2020	0,47	0,0367	86400	0,0788	17,8	18,4
Pb-214	352,0	2630	0,36	0,0631	86400	0,0788	20	23,7
Pb-210	46,5	710	0,04	0,1753	86400	0,0788	21,9	

➤ Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux suivants :

Tableaux IV.15 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂ (0-2 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	20	23,6	12,9
Pb-214	352	27,3		
Pb-210	46,5	36,6		

Tableaux IV.16 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(2-4 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	20,2	23,1	14,2
Pb-214	352	26		
Pb-210	46,5	37,3		

Tableaux IV.17 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(4-6 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	20,3	23,9	14,8
Pb-214	352	27,5		
Pb-210	46,5	38,7		

Tableaux IV.18 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(6-8 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	19,6	22,7	14,4
Pb-214	352	25,8		
Pb-210	46,5	37,1		

Tableaux IV.19 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(8-10 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	20,1	22,5	6,99
Pb-214	352	24,9		
Pb-210	46,5	29,5		

Tableaux IV.20 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(10-12 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	19	22	8,78
Pb-214	352	24,9		
Pb-210	46,5	30,7		

Tableaux IV.21 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(12-14 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	18,5	21,4	11,3
Pb-214	352	24,3		
Pb-210	46,5	32,8		

Tableaux IV.22 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(14-16 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	18,9	22,1	6,33
Pb-214	352	25,4		
Pb-210	46,5	28,5		

Tableaux IV.23 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(16-18 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bq/kg)
Bi-214	609,3	18,4	20,8	8,84
Pb-214	352	23,1		
Pb-210	46,5	29,6		

Tableaux IV.24 : Les activités spécifiques corrigées en Bq/kg pour l'échantillon MFT₁C₂(18-20 cm).

Elément	Energie (keV)	Activité corrigée (Bq/kg)	Activité (Pb _{sup}) (Bq/kg)	Activité (Pb _{ex}) (Bp/kg)
Bi-214	609,3	18,4	21	0,887
Pb-214	352	23,7		
Pb-210	46,5	21,9		

4. Discussion des résultats :

Les activités spécifiques des différents échantillons de sols sont représentées dans le tableau IV.25 :

Tableau IV.25 : Activités de Bismuth-214, plomb-214 et plomb-210 pour tous les échantillons de sols.

Echantillons										
Elément	MFT ₁ C ₂ (0-2 cm)	MFT ₁ C ₂ (2-4 cm)	MFT ₁ C ₂ (4-6 cm)	MFT ₁ C ₂ (6-8 cm)	MFT ₁ C ₂ (8-10 cm)	MFT ₁ C ₂ (10-12cm)	MFT ₁ C ₂ (12-14cm)	MFT ₁ C ₂ (14-16cm)	MFT ₁ C ₂ (16-18cm)	MFT ₁ C ₂ (18-20cm)
	A _{corr} (²¹⁴ Bi)	20	20,2	20,3	19,6	20,1	19	18,5	18,9	18,4
A _{corr} (²¹⁴ Pb)	27,3	26	27,5	25,8	24,9	24,9	24,3	25,4	23,1	23,7
A _{tot}	36,6	37,3	38,7	37,1	29,5	30,7	32,8	28,5	29,6	21,9
A _{sup}	23,6	23,1	23,9	22,7	22,5	22	21,4	22,1	20,8	21
A _{ex}	12,9	14,2	14,8	14,4	6,99	8,78	11,3	6,33	8,84	0,887
Activités Spécifiques (Bq/kg)										

Selon les résultats obtenus, on remarque que tous les échantillons analysés contiennent des radioéléments naturels qui appartiennent à la série radioactive naturelle U-238 (Pb-214, Bi-214, Pb-210).

Les valeurs des activités spécifiques avec la correction des coïncidences de sommation sont plus grandes que les activités spécifiques mesurées. Et cela est lié au fait que les valeurs mesurées sont celles du pic de sommation.

L'équilibre séculaire est utilisée pour calculer l'activité du Pb-214 et Bi-214. On remarque que les activités mesurées des radioéléments, émettant plusieurs gammas ou des gammas en cascade, sont différentes à celles corrigées à cause des effets de sommations de coïncidences. L'activité mesurée est corrigée, à titre d'exemple, la correction de l'activité du premier échantillon MFT₁C₂ (0,2 cm) pour le Bi-214 donne une valeur : 20 Bq /kg quant à l'activité non corrigé est de 19.5Bq/kg.

L'activité du Bi-214 et Pb-214 subit une diminution en fonction de la profondeur. Dans le cas où la profondeur du sol prélevé est grande cette diminution serait plus importante.

Les valeurs de l'activité du plomb en excès et du plomb supporté ne suivent pas une tendance bien déterminée, varient entre 0,887Bq/kg et 14,8Bq/kg pour le plomb en excès, entre 20,8Bq/kg et 23,9Bq/kg pour le plomb supporté, et donc les valeurs de l'activité du plomb totale ont le même comportement (varie entre 21,9Bq/kg et 38,7Bq/kg) car l'activité totale égale la somme de plomb en excès et plomb supporté.

Pour obtenir le plomb 210 en excès, on doit déterminer la teneur en Pb-210 supporté contenu dans le sol à la base de l'équilibre séculaire et en corrigeant l'activité en tenant compte du facteur de coïncidence en se basant sur la relation suivante :

$$A_{ex} = A_{tot} - A_{sup} \text{ [IV.12]}$$

Conclusion générale

L'objectif de ce travail, était l'étude de l'influence de l'effet de coïncidence gamma-gamma, le calcul des facteurs dus aux coïncidences de sommation lors de la désexcitation par cascades des noyaux de Bi-214 et de Pb-214 et l'influences de ces facteurs sur les mesures des activités de ces radioéléments pour le calcul l'activité spécifique du Pb-210 en excès dans le sol pour une application environnementale.

La technique de spectrométrie gamma utilisée dans ce travail, est un outil important pour une analyse quantitative d'une bonne précision, notamment après corrections de coïncidence de sommation dues aux radioéléments qui se désintègrent en cascade.

La détermination des facteurs de coïncidences de sommation pour les énergies gammas des radioéléments Bi-214 et le Pb-214, ont été réalisées en utilisant le rapport de de d'efficacité, expérimentales sur l'efficacité simulée par logiciel de l'ABSOCs.

Cette mesure a été appliquée pour la détermination de la distribution des Pb-210 en excès dans le sol du bassin versant d'oued Fergoug pour l'étude de la quantification spatiale de l'érosion hydrique.

La correction des activités spécifiques en tenant compte des coïncidences, a permis de remarquer que les activités spécifiques mesurées des radioéléments émettant plusieurs gammas en cascade sont déterminé avec précision comme le cas du Bi-214 et le Pb-214 ce qui nous a conduit à une bonne évaluation de l'activité spécifique du $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ pour une étude environnementale fiable.

D'autres paramètres physiques de mesure influant qui doivent être pris en compte sur les mesures des activités des radioéléments dans les échantillons comme l'atténuation des rayons gammas dans l'échantillon qui présente une matrice dense.

Il est souhaitable de pousser les études pour traiter le phénomène d'atténuations des photons dans les échantillons de différentes matrices, notamment pour les radioéléments émetteurs gamma de faibles énergies dans des matrices sols.

Bibliographie

- [1]. http://envlit.ifremer.fr/index.php/region/basse_normandie/qualite/contaminants_chimiques/elements_radioactifs.
- [2]. PHY113, cours de radioactivité, 2009-2010.
- [3]. P. Bomper Leo, Technique de spectrométries gamma par le détecteur GeHP (Germanium Hyper pur), Cas D'échantillons du sol, 2012-2013.
- [4]. A. Serres, La radioactivité, 2009.
- [5]. Chapitre 11, Réactions nucléaires, radioactivité et fission.
- [6]. C. Tremblay, Formation en radioprotection Notes de cours (à l'intention des utilisateurs de matières radioactives), Mai 2015.
- [7]. <http://www.laradioactivite.com/site/pages/equilibreradioactif.htm>.
- [8]. S. Dziri, Etude expérimentales et simulation Monte Carlo en matrice des mesures gamma : Correction des effets de cascade et de matrice pour des mesures environnementales, Université de Strasbourg (2013).
- [9]. O. Caudrelier, Radioactivité cours, Centre de Préparation aux concours Paramédicaux.
- [10]. H. Métivier, Radioprotection et ingénierie nucléaire, EDP sciences (2006).
- [11]. 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, Le 18 décembre 2006.
- [12]. A. Azbouche, Développement d'une méthodologie d'analyse par spectrométrie gamma et par activation neutronique pour l'étude de la distribution des radio-traceurs et des terres rares dans le sol, le 17/09/2015.
- [13]. A. Nachab, Etude expérimentales et modélisations Monte Carlo de l'auto-absorption gamma et de la dosimétrie active par capteurs CMOS, le 13 décembre 2003.
- [14]. Contrôle non destructif Radiographie.
- [15]. F. Courtine, Etalonnage d'un spectromètre gamma en vue de la mesure de la radioactivité naturelle. Mesures expérimentales et modélisation par techniques de Monte-Carlo, Université Blaise Pascal, 2007.
- [16]. G. F Knoll, Radiation Detection and Measurement, 2010.
- [17]. R. Bouchama, Détermination de la radioactivité gamma d'un sol contaminé par une explosion nucléaire, le 27/10/2009.
- [18]. J. Ene-Parent, analyse par activation neutronique de la chapie de sécheuses, université de Montréal, 2000.

[19]. F.P.Hocquet, Amélioration d'un système portable de spectroscopie par fluorescence X, Univ. De liège, 2006.

[20]. W. Boukhenfouf, Concentration de l'uranium –Application aux fertilisants agricoles, le 05/10/2011.

[21]. C. Lakehal, Mesures qualitatives et quantitatives des éléments radioactifs naturels présents dans des échantillons de l'environnement par spectrométrie γ .

[22]. S.Fourati, Mesure de la radioactivité naturelle de la feuille de nefza (OUED BELIF), le 19juin2009.

[23]. T. EL Khoukhi, Etude des Déséquilibres Radioactifs dans les familles de l'uranium par la spectrométrie gamma à basse énergie & application à la datation en géologie, le 26Mai 1992.

[24]. L. ALGHEM HAMIDATOU, Implémentation validation de la méthode de standardisation de l'analyse par activation neutronique K_0 -NAA, le 14Juin2005.

[25]. C. Agrawal, Nondestructive assay of nuclear materials by gamma ray spectrometry, Thesis doctorate, Bhabha atomic research center Mumbai (2011).

