



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Physique
Option : Physique des Matériaux

THÈME :

Etude de la radioactivité naturelle dans certains matériaux de construction (brique rouge, sable, ciment noir) région de medjana, bordj-bouarrerdj, en Algérie .

Préparé par : HERRACHE NASSIMA

Soutenu le : 26/06/2023

Devant le jury :

Président : Dr Mechouma Farid

MAA

Université de BBA

Rapporteur : Dr Kebir Hadda

MCA

Université de BBA

Examineur : Dr Benkara Mohamed Nadjima

MCB

Université de BBA

Année Universitaire 2022-2023

Dédicace

En exprimant ma gratitude, je dédie cet humble travail à ceux qui ont été d'une grande aide,

et quoi que je dise, je ne pourrai jamais exprimer mon amour sincère pour eux :

À mes chers parents pour tout leur amour pour moi et mon cher père et mon modèle dans la vie pour

son soutien moral et matériel et ses encouragements tout au long de ma vie, ma chère mère qui a

illuminé mon chemin et m'a encouragé et soutenu tout au long de mes études.

A ma seule sœur : Nour El Houda

A mes frères : said. hichem. khalil et surtout walid

A mes amis sana. khawla et rayen

A toute ma famille

Nassima Ferrache

REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Allah le tout puissant de nous avoir donnée le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'études et que grâce à lui ce travail a été réalisé.

Je remercie les encadrants, Dr. kebiri hadda mon cadreur dans ce travail grâce aux conseils, orientations et soutiens qui m'ont été apportés tout au long de cette recherche.

J'exprime toute ma reconnaissance à Dr. mechouma farid, pour sa gentillesse fait l'honneur de présider le jury de ce mémoire.

Je remercie le professeur benkara nadjima

Mes sincères remerciements à toute ma famille, tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, vous avez toute ma gratitude et mes remerciements.

Liste des Figures

CHAPITRE I

Figure I.1 : La surface de la terre.

Figure I 2 : Origines de notre exposition à la radioactivité artificielle et naturelle.

Figure I. 3 : Chaîne de filitation de l'uranium.

Figure I.4 : Schéma de désintégration du ^{40}K .

Figure I.5 : La chaîne de désintégration naturelle pour ^{238}U

Figure I.6 : Chaîne de désintégration de ^{232}Th .

Figure I.7 : Valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil.

Figure I. 8 : Morceaux de scories (avec oxyde de cuivre).

CHAPITRE II

Figure II.1 : Désintégration radioactive des rayonnements alpha, bêta, gamma.

Figure II. 2 : Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements.

Figure II.3 : Classification des rayonnements.

Figure II.4: Effet photoélectrique.

Figure II.5 : Effet Compton.

Figure II.6 : Effet craion dr paire .

Figure II.7 : Les sites étudiées.

Figure II.8 : Le sable de Boussaâda.

Figure II.9 : Ciment Matine de Bordj Bou Arreridj.

Figure II.10 : Le brique rouge regions de medjana bordj-bouarreridj.

CHAPITRE III

Figure III.1 : Résolution du détecteur. Représentation d'un pic ayant une forme gaussienne avec une largeur à mi-hauteur (FWHM ou FW1/2M), une largeur à dixième-hauteur (FWTM ou FW1/10M) et une largeur à cinquantième-hauteur (FWFM ou FW1/50M).

Liste des Figures

Figure III.2 : Rapport Pic-au-Compton $P/C = A/B$. (a) Position sur le spectre de Co-60 de A et B (comptage sur une échelle logarithmique), et (b) la nature constante du continuum dans la région B (comptage sur une échelle linéaire).

Figure III.3 : Spectre de mesure au système de spectrométrie gamma à détecteur HPGe GC3018 (échelle LIN-LOG).

Figure III.4 : Pic Photoélectrique 1332.5 KeV typique bien défini à partir du spectre collecté.

Figure 23 : Courbe d'étalonnage en énergie pour le détecteur GC3018 (La pente égale à 0.5 KeV/Canal).

Figure III.5 : Courbe d'étalonnage en énergie pour le détecteur GC3018 (La pente égale à 0.5 KeV/Canal)

Figure III.6 : Valeurs expérimentales de l'efficacité d'absorption totale FEPE (échelle LOG-LOG).

Figure III.7 : Les trois l'échantillon A B et C

Figure III.8 : Schéma de la chaîne de spectrométrie gamma

Figure III.9 : Spectre A de ciment noir M'Sila .180000 s (50heurs)

Figure III.10 : Spectre de B le brique rouge de Medjana BBA. 180000 s (50heurs)

Figure III.11 : Spectre de C le sable de Boussaâda. 180000 s (50heurs)

Figure III.12 : Les activités spécifiques du ^{232}U dans les échantillons de sol

Figure III.13 : Les activités spécifiques du ^{232}Th dans les échantillons de sol

Figure III.14 : Les activités spécifiques du ^{40}K dans les échantillons de sol

Figure III.15 : Comparaison de la radioactivité des matériaux utilisés pour trois échantillons.



LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau I.1 : Autres radionucléides primordiaux d'origine naturelle avec leurs demi-vies.

CHAPITRE II

Tableau II.1 : les particules des émissions radioactives courantes.

CHAPITRE III

Tableau III.1 : Résolutions des détecteurs existants en marché.

Tableau III.2 : Valeurs mesurées et garantis de FWHM, FWTM et FWF. M.

Tableau III.3 : Données nucléaires des sources d'étalonnage.

Tableau III.4 : Valeurs mesurées et garantis de rapport Pic-au-Compton.

Tableau III.5 : Valeurs mesurées et garantis de l'efficacité relative.

Tableau III.6 : Résultats expérimentales de l'étalonnage de l'efficacité avec les cinq sources références pour les 4 distances source-détecteur.

Tableau III.7 : Coefficients des polynômes d'ajustements des fonctions des efficacités d'absorption totales pour les deux positions.

Tableau III.8 : Échantillon A ciment noir M'Sila.

Tableau III.9 : Échantillon B le brique rouge de Medjana BBA.

Tableau III.10 : Échantillon C le sable de Boussaâda.

Tableau III.11 : Tableau 16. Comparaison des activités du ^{238}U , ^{40}K , et ^{232}Th de dans les trois échantillons avec d'autres pays

Tableau III.12 : Activités spécifiques du ^{40}K , des familles de ^{238}U et du ^{232}Th dans les sols au niveau international en (Bq.kg⁻¹).



TABLE DES MATIERES

Introduction.

CHAPITRE I

LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE DES MATÉRIAUX DE CONSTRUCTION

- I.1. La radioactivité naturelle des matériaux de construction
 - I.1.1. Généralités sur la radioactivité et l'origine des rayonnements
- I.2 La radioactivité naturelle
 - I.2.1. La radioactivité cosmique
- I.3. Radioactivité artificielle
- I.4. Rayonnement tellurique
- I.5 Éléments radioactifs dans le sol
- I.6. Le potassium (40K) et les radionucléides primordiaux
 - I.6.1. Les deux modes de désintégrations du potassium-40
- I.7. L'uranium
 - I.7.1. Famille de l'uranium
- I.8. Le Thorium
 - I.8.1. Famille du thorium
- I.9. La radioactivité des roches
- I.10. Les cendres volantes issues de centrales thermiques
 - I.10.1. Les laitiers sidérurgiques
 - I.10.2. Les sulfates de calcium et le phosphogypse
 - I.10.3. Les scories phosphoriques

CHAPITRE II

INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE

- II.1. Introduction
 - II.2. La base de la radioactivité
 - II.3. Les types de rayonnements ionisants
 - II.3.1. Le rayonnement alpha (α)
 - II.3.2. Le rayonnement bêta (β)
 - II.3.3. Le rayonnement gamma (γ)
 - II.4. Les particules de neutrons
 - II.4.1. Des particules d'émissions radioactives courantes
 - II.5. Pénétration et rayonnement
 - II.6. Rayonnements non ionisants
 - II.7. Gamma interaction avec la matière.
 - II.7.1. Absorption d'énergie.
 - II.7.2. L'absorption photoélectrique.
 - II.7.3. La diffusion Compton.
 - II.7.4. Création de paire.
-



TABLE DES MATIERES

II.8. Les emplacements des zones de prélèvement d'échantillons

II.9. Le sable.

II.10. Le ciment.

II.11. Le brique rouge .

CHAPITRE III

CHAÎNE DE SPECTROMÉTRIE GAMMA ET SES DIFFÉRENTES COMPOSANTES

III.1. Introduction.

III.2. Paramètres de test.

III.2.1. Étalonnage en énergie des détecteurs HPGe.

III.2.2. Résolution.

III.2.3. Forme gaussienne du pic.

III.2.4. Rapport pic-au-compton.

III.2.5. Résolution et forme de pic.

III.2.6. Rapport pic-au-compton.

III.3. Matériel et méthodes.

III.3.1. Sources des rayons γ .

III.4. Efficacité relative.

III.4.1 Efficacité d'absorption totale fepe.

III.4.2. Étalonnage en énergie.

III.5. Le temps mort.

III.6. Le bruit de fond.

III.7. Mesure de la radioactivité des échantillons prélevés de l'environnement.

III.7.1. Résultats et discussion.

III.7.2. Préparation des échantillons.

III.9. Analyse et discussion.

Conclusion.

Références bibliographiques.

Annexes.



INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La radioactivité est omniprésente dans notre environnement. Sa teneur varie d'un milieu à un autre et d'une profondeur à une autre. Cette variation dépend des caractères pédologiques et géologiques du milieu considéré et parfois de l'influence des expériences et accidents nucléaires. L'écorce terrestre est en grande partie responsable de la formation et du support des éléments émetteurs de la radioactivité naturelle, en ce qui concerne les éléments telluriques. De ce fait, chaque individu, ou qu'il soit, est sous l'influence de ces radiations. Cette étude est axée sur la mesure du teneur de la radioactivité gamma du sol... Pour y parvenir, nous tenons compte de trois éléments majeurs responsables de la radioactivité du sol, à savoir le Potassium-40, la famille de l'uranium-238 et celle du Thorium-232.

La radioactivité artificielle est issue de la contamination par des radioéléments dont l'origine sont les essais d'armes nucléaires réalisées dans l'atmosphère durant les années soixante, et des radioéléments provenant de différentes activités nucléaires réalisées par l'être humain

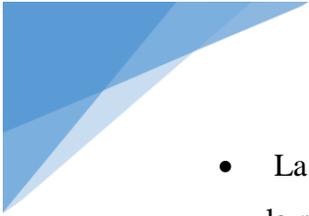
Cette thèse a pour but de déterminer qualitativement et quantitativement les radioéléments présents dans l'environnement et principalement les éléments naturels.

Afin d'effectuer cette étude, nous avons prélevé trois échantillons de l'Est algérien pour évaluer l'ordre de grandeur des activités spécifique de chaque famille radioactive.

- Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à une étude bibliographique sur les notions fondamentales de la radioactivité ainsi que les différents types de décroissances radioactives. On y trouve également les origines, naturelle et artificielle, des radioéléments dans l'environnement.

- Le second chapitre détaillera interaction rayonnements matière en commençant par l'interaction rayonnement-matière jusqu'à l'illustration.

- Enfin, le dernier chapitre porte sur les travaux expérimentaux réalisés où nous avons effectués un ensemble de mesures pouvant être regroupés en deux grandes parties :



INTRODUCTION GENERALE

- La détermination des différentes caractéristiques de la chaîne de mesure : le temps mort, la résolution en énergie et la linéarité intégrale et différentielle de la chaîne de mesure afin d'effectuer les mesures concernant la radioactivité dans les meilleures conditions.
- La mesure de la radioactivité de trois échantillons prélevés sur différents sites, suivie par l'analyse et la discussion de tous les résultats obtenus.

Chapitre I
La radioactivité naturelle des
matériaux de construction

I.1. Introduction

L'Algérie a une grande richesse minérale et astrologique, dont l'intérieur est abondant avec des matériaux naturels importants et divers, qui se trouvent généralement dans le sud de l'Algérie. Il contient de nombreuses richesses minérales, telles que (phosphate, zinc, uranium, bentonite, ciment gris et blanc, marbre, granit).

Dans ce chapitre, on a présenté brièvement la nature, les concepts et les types de radioactivité. Nous avons consacré une partie à l'étude de la radioactivité des roches, la concentration des éléments radioactifs, les types de roches, et aussi la composition minérale de chaque type de matériau de construction.

I.2. La radioactivité naturelle des matériaux de construction

La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables se désintègrent en dégageant de l'énergie sous forme de rayonnements divers, pour se transmuter en des noyaux atomiques plus stables. Les rayonnements ainsi émis sont appelés, selon le cas, des rayons α , des rayons β ou des rayons γ . ⁽¹⁾ Le noyau instable, peut avoir plusieurs transformations Successives avant d'arriver à un noyau stable. On parle alors de chaîne de désintégration. Une Émission radioactive ne peut être ni arrêtée ni accélérée ni ralenti par aucun procédé physique ou chimique, les noyaux radioactifs sont appelés" radioéléments ou radionucléides [1].

I.2.1. Généralités sur la radioactivité et l'origine des rayonnements

La radioactivité est un phénomène naturel lié à la structure de la matière. Tous les corps (gaz, liquides, solides) sont composés d'atomes. Certains d'entre eux sont instables et émettent des rayonnements. Il peut s'agir de :

- Substances radioactives naturelles (uranium, radium, radon...).
- Substances radioactives artificielles (californium, américium...).

Ces atomes instables (radionucléides) se transforment spontanément en perdant de l'énergie, et reviennent ainsi progressivement à un état stable. Ils émettent alors des particules ou des photons, dont le flux constitue un rayonnement porteur d'énergie, spécifique du radionucléide qui l'émet. Ces rayonnements sont dits ionisants car ils peuvent ioniser la matière en interagissant avec elle, c'est-à-dire lui enlever un ou plusieurs électrons. Ces ionisations provoquent des modifications physico-chimiques dans la matière susceptibles d'entraîner des effets néfastes sur la santé. Le pouvoir d'ionisation d'un radionucléide dépend de la nature des rayonnements qu'il émet (alpha, bêta, gamma, X, neutronique) et de l'énergie de chacune des émissions. On peut observer une ionisation de la matière à partir d'un seuil d'énergie de l'ordre de 10 électronvolts. Généralement, un radionucléide émet plusieurs types de rayonnements à la fois (alpha, bêta, gamma, X, neutronique)[2].

I.3. La radioactivité naturelle

La population mondiale est toujours exposée à des rayonnements ionisants présents dans l'environnement. 85% de cette exposition est due à la radioactivité naturelle [3] et chaque être humain est exposé approximativement à 3 mSv (0.3 rem) annuellement [4]. La radioactivité naturelle existe depuis la naissance de l'univers et est causée par des radioéléments à longues demi-vies, présents dans la croûte terrestre. Cette radioactivité est divisée en deux types : terrestre et extra-terrestre (cosmique).

I.3.1. La radioactivité cosmique

Le rayonnement cosmique, aussi appelé à l'origine « rayons cosmiques », se compose de particules de très haute énergie provenant de l'espace lointain (le cosmos) et de notre propre système solaire. Le terme « rayon » avait été retenu pour désigner ces particules, car on croyait qu'il s'agissait d'une forme de rayonnement électromagnétique, mais ce sont en fait des particules!

Pratiquement toutes les particules cosmiques primaires (environ 99 %) sont des nucléons (composants du noyau atomique), les autres étant des électrons libres (similaires aux particules bêta). La plupart des nucléons sont des protons (c.-à-d. des noyaux d'hydrogène) et des noyaux d'hélium (similaires aux particules alpha). Les nucléons d'autres éléments plus lourds que l'hydrogène et l'hélium entrent aussi dans la composition du rayonnement cosmique. Ces particules à nombre atomique élevé et à haute énergie sont appelées « ions lourds de haute énergie ». [5]

Lorsque des particules cosmiques primaires entrent en collision avec des particules d'une autre matière, par exemple un vaisseau spatial, la Station spatiale internationale ou des molécules dans notre atmosphère, elles peuvent fractionner des molécules et provoquer ainsi la formation de particules cosmiques secondaires. Par exemple, au moment de pénétrer dans l'atmosphère terrestre, les particules cosmiques primaires entrent en collision avec des molécules de gaz, principalement de l'oxygène et de l'azote, ce qui fait éclater les noyaux des

gaz en plus petits fragments (processus appelé « spallation »). Cet éclatement provoque une cascade de particules ionisées et de rayonnement électromagnétique, appelée « pluie cosmique », dans la direction vers laquelle les particules primaires se déplaçaient.

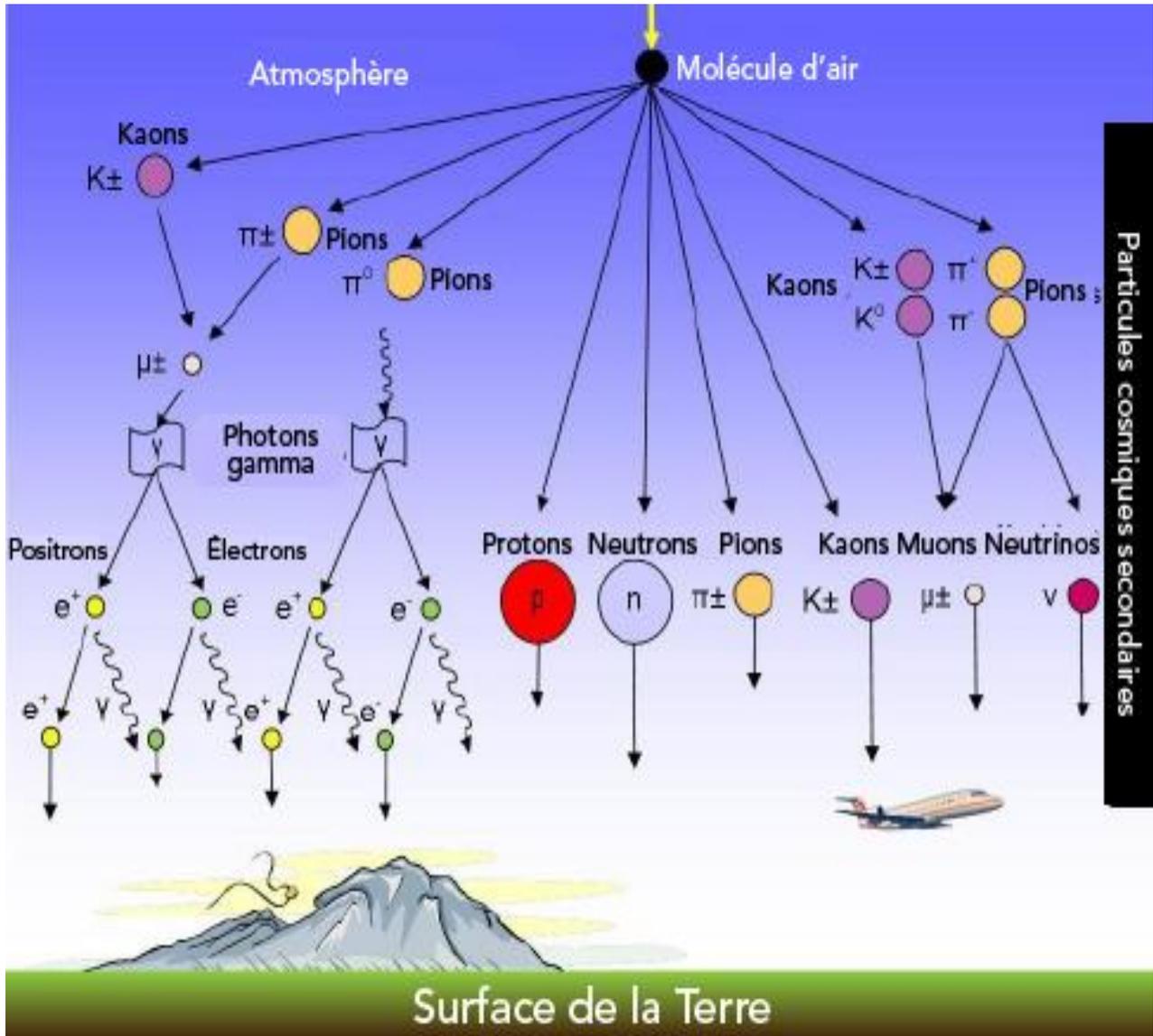
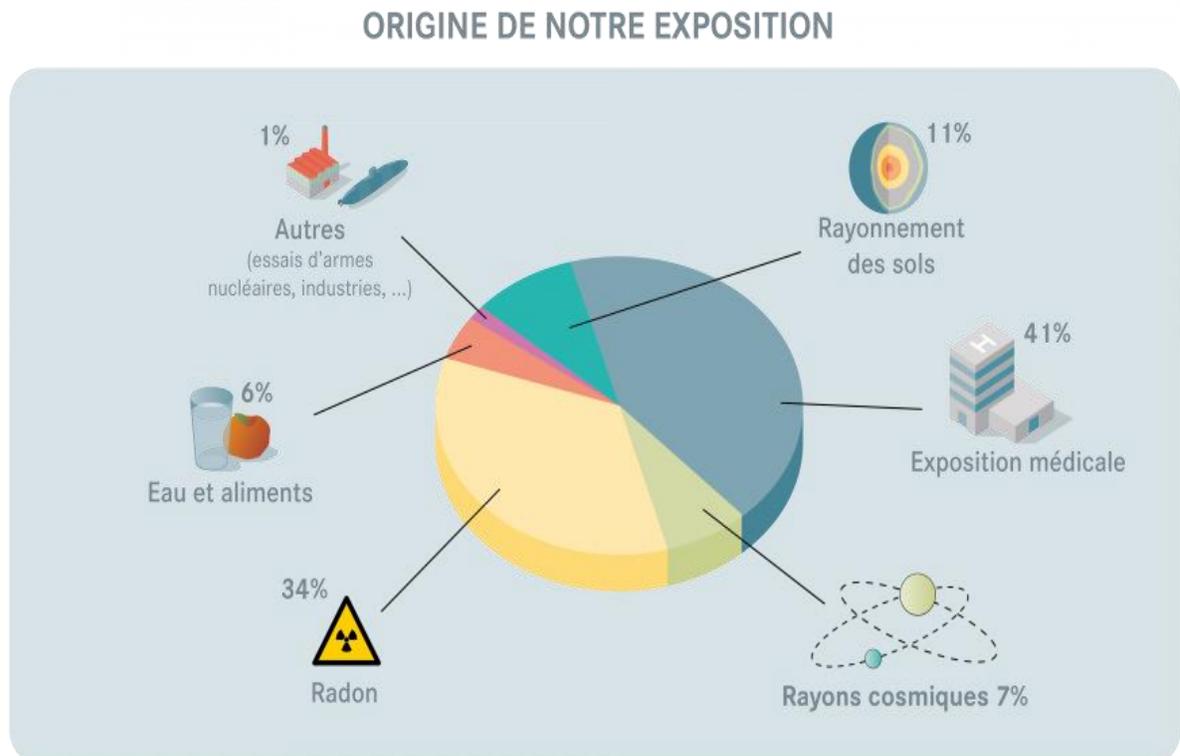


Figure I.1 : La surface de la terre

I.4. Radioactivité artificielle

La radioactivité artificielle est une radioactivité provoquée par des activités humaines au moyen d'un accélérateur de particules ou d'un réacteur nucléaire. Il est présent dans l'environnement depuis le début du 20^{ème} siècle, Elle comprend l'ensemble des phénomènes de transmutation des radio-isotopes créés artificiellement en bombardant des éléments stables (aluminium, béryllium, iode...etc.) avec divers faisceaux de particules (neutron, proton, particule α , deuton).



FigureI.2 : Origines de notre exposition à la radioactivité artificielle et naturelle.

En plus de la radioactivité naturelle à laquelle nous sommes exposés en permanence, s'ajoute également dans l'environnement la radioactivité produite par les activités humaines. Cette radioactivité, dite artificielle, possède les mêmes propriétés que la radioactivité naturelle.

Elle résulte principalement :

- des applications médicales, industrielles et de la recherche.
- des retombées des essais d'armes nucléaires.
- des rejets réglementés des installations nucléaires.

Les essais nucléaires militaires ont conduit à l'apparition de nombreux radionucléides dans l'environnement, essentiellement le ^{137}Cs [6].

Des accidents peuvent malheureusement se produire, Comme ceux de Fukushima (2011) et de Tchernobyl (1986), entraînant parfois l'exposition aigüe d'une ou de plusieurs personnes et pouvant aussi avoir un impact sanitaire sur la population et l'environnement à plus long terme.

I.5. Rayonnement tellurique

Il a pour origine les radionucléides émetteurs gamma présents dans les roches et les sols. Le ^{40}K et les descendants émetteurs gamma des séries de ^{238}U et du ^{232}Th sont les principaux isotopes responsables de l'irradiation externe d'origine tellurique des populations.

L'existence d'un élément chimique gazeux, le radon, dans les deux familles de l'uranium et du thorium contribue à réduire, du fait de son exhalation des sols et des roches, l'exposition tellurique imputable aux émetteurs gamma post émanation présents dans les deux familles

L'irradiation d'origine tellurique est en moyenne de 60 nGy h^{-1} . Elle peut varier entre 10 et 200 nGy h^{-1} en fonction des concentrations en ^{40}K et en radionucléides émetteurs gamma des familles de ^{238}U et du ^{232}Th présents dans les sols. Une autre cause de variation rapide est due au dépôt sur le sol, en cas de pluie, des descendants solides émetteurs gamma post-émanation, du ^{222}Rn notamment. La dose moyenne annuelle associée à l'irradiation naturelle d'origine tellurique est estimée à 74 pSv pour un individu séjournant 20 % de son temps à l'extérieur des bâtiments.

Parmi les 340 types d'atomes qui existent dans la nature, 70 ont des noyaux instables radioactifs (radionucléides). Il ne reste aujourd'hui qu'une vingtaine de ces radionucléides « primordiaux », ceux de période très courte par rapport à l'âge de la Terre ayant disparu. Ces radionucléides

naturels, qui constituent l'essentiel de la radioactivité de l'environnement, se retrouvent dans l'air, le sol, l'eau et les organismes vivants dont l'homme.

Il s'agit soit de radionucléides de période radioactive très longue présents sur Terre depuis sa formation (potassium 40, uranium 238, uranium 235, thorium 232), soit de radionucléides créés en permanence dans la haute atmosphère sous l'effet du rayonnement cosmique, qualifiés de radionucléides cosmo géniques (tritium, carbone 14, krypton 85, béryllium 7 et sodium 22). Si la plupart de ces radionucléides se désintègrent directement en éléments stables, non radioactifs, trois d'entre eux (238U, 235U et 232Th) ont plusieurs descendants radioactifs, qui constituent des familles ou chaînes de désintégration comportant chacune entre dix et quinze radionucléides différents. [7]

I.6. Éléments radioactifs dans le sol

Ces radionucléides lourds ont tendance à se désintégrer en éléments plus légers. Qui peuvent être soit radioactifs ou non radioactifs. Le potassium radioactif se désintègre directement en calcium ou en argon, tous les deux sont stables. Mais la désintégration de l'uranium et du thorium est beaucoup plus intéressante : ces éléments se désintègrent à travers une série d'éléments radioactifs (y compris le radon) jusqu'à atteindre le plomb stable. Les familles radioactives de l'uranium et du thorium, en plus du potassium radioactif représentent une bonne partie du rayonnement sur terre. Ils fournissent environ les trois quarts du rayonnement que les humains reçoivent de la nature. [10]

Tableau I.1 : Autres radionucléides primordiaux d'origine naturelle avec leurs demi-vies, [9]

Radionucléide	Demi-vie (année)	Rayonnement majeur	Concentration typique de l'activité crustale terrestre (Bq.kg-1)
⁴⁰ K	1,28.10 ⁹	β,γ	630
⁸⁷ Rb	4,75.10 ¹⁰	Gamma	70
¹⁴⁷ Sm	1,06.10 ¹¹	Alpha	0,7
¹⁷⁶ Lu	3,73.10 ¹⁰	β, γ	0,04
¹³⁸ La	1,05.10 ¹¹	β, γ	0,02
¹⁸⁷ Re	4,3.10 ¹⁰	Beta	1.10 ⁻³
¹⁴⁴ Nd	2,29.10 ¹⁵	Alpha	3.10 ⁻⁴
⁵⁰ V	1,4.10 ¹⁷	Gamma	2.10 ⁻⁵
¹¹⁵ In	6.10 ¹⁴	Beta	2.10 ⁻⁵
¹⁴² Ce	>5.10 ¹⁶	Beta	<1.10 ⁻⁵
¹⁵² Gd	1,8.10 ¹⁴	Alpha	7.10 ⁻⁶
¹¹³ Cd	9.10 ¹⁵	Beta	<2.10 ⁻⁶
¹²³ Te	1,24.10 ¹⁵	Rayons X	2.10 ⁻⁷
¹⁷⁴ Hf	2,0.10 ¹⁵	Alpha	2.10 ⁻⁷
¹⁹⁰ Pt	6,5.10 ¹¹	Alpha	7.10 ⁻⁶

I.7. Le potassium (40K) et les radionucléides primordiaux

Le Potassium-40 (40K) est un isotope radioactif naturel de l'élément potassium, qui représente environ 2,4% (par poids) de la croûte terrestre. Le 40K est un élément primordial : sa demi-vie est de 1,2489 x 10⁹ ans [1]. L'abondance atomique relative du 40K est de 0,0117% (celle du 39K est 93,26% et celle du 41K est 6,73%, et ces deux isotopes sont stables). [11]

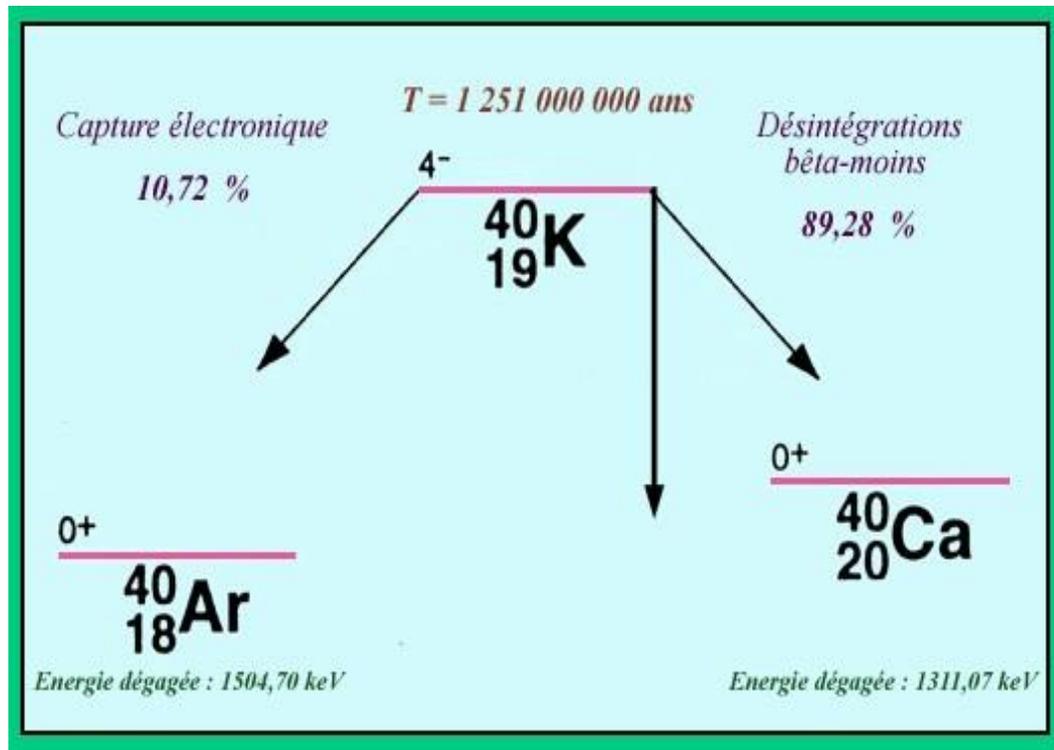


Figure I.4 : Schéma de désintégration du ^{40}K

I.7.1. Les deux modes de désintégrations du potassium-40

Le schéma de désintégration du potassium-40 est inhabituel. Sa masse se trouve supérieure à celle de ses deux voisins, au sein de la famille des atomes à 40 nucléons : l'argon-40 avec un proton de moins et le calcium-40 avec un proton de plus. Il possède deux voies de désintégrations au lieu d'une. La désintégration bêta-moins vers le calcium-40 est de loin la plus fréquente, les désintégrations vers l'argon-40 se faisant par capture électronique. Remarquable enfin est la très longue période de 1,251 milliard d'années. Lors d'une désintégration, un noyau change aussi sa rotation interne ou spin. Dans le cas du potassium-40, l'extrême lenteur des transformations s'explique par un saut de spin important, donc difficile. [11]

I.8. L'uranium

L'uranium est un élément chimique radioactif sous forme d'un métal blanc argenté dur, présent à l'état naturel en quantité significative sur Terre. Il est essentiellement composé de trois isotopes dont les proportions atomiques sont les suivantes : ^{234}U (0.0055 %), ^{235}U (0.72 %) et ^{238}U (99.275 %). Le nom d'uranium a été donné en l'honneur de la planète Uranus, lors de sa découverte en 1789 par le physicien allemand Martin Klaproth.

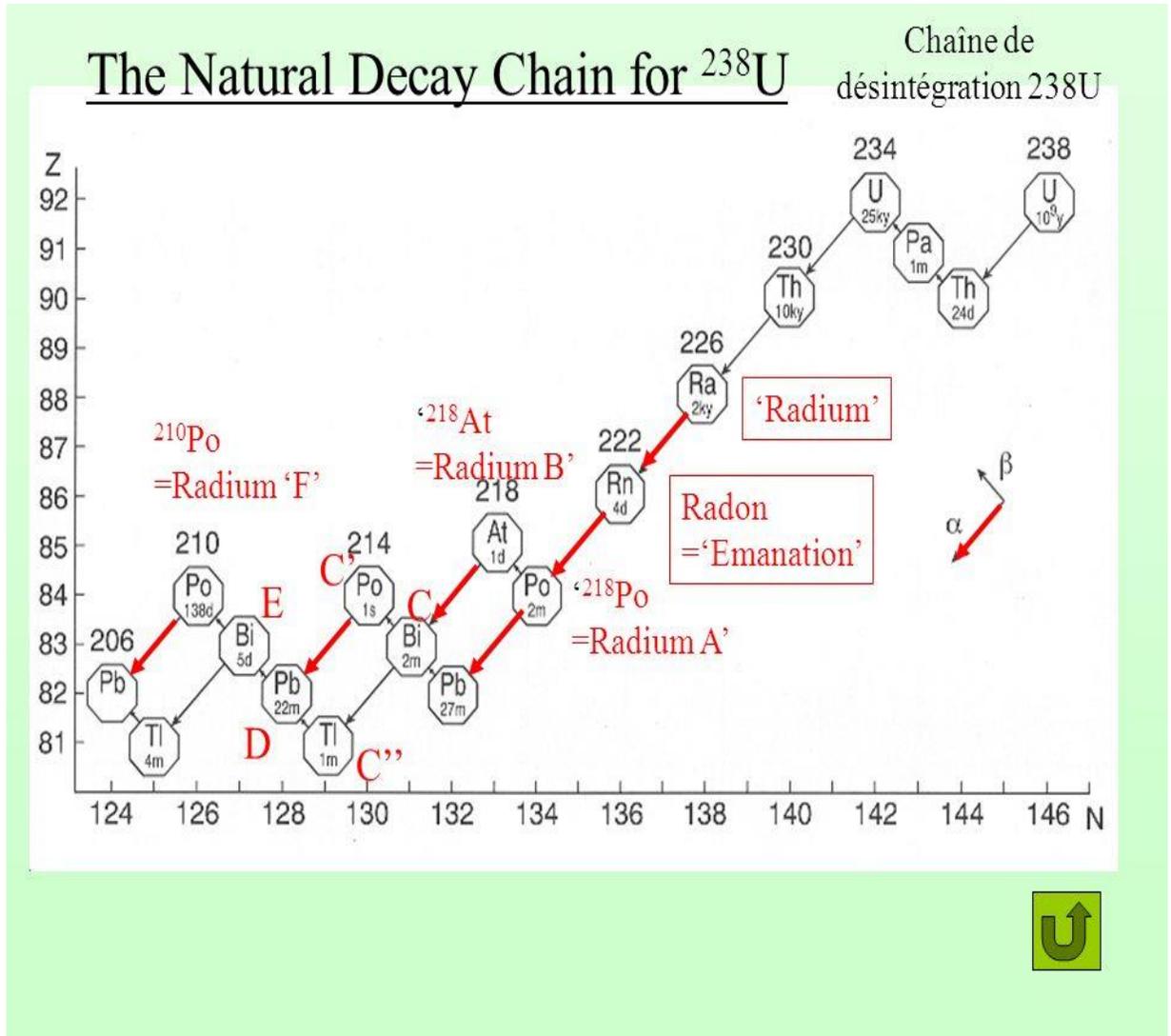


Figure I.5 : La chaîne de désintégration naturelle pour ^{238}U [12]

I.8.1. Famille de l'uranium

➤ Famille de l'uranium ^{238}U

L'uranium (^{238}U) a une demi-vie très longue (4.47×10^9 années) [12]. Sa décroissance jusqu'au ^{206}Pb stable est un processus qui s'étale sur 14 désintégrations (^{234}Th , $^{234\text{m}}\text{Pa}$, ^{234}U , ^{230}Th , ^{226}Ra , ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{214}Po , ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{210}Po) avec émission de 8 particules α et 6 particules β , suivi par émission de rayonnement γ (figure I.5)

➤ Famille de l'uranium ^{235}U

Une deuxième série de désintégration de l'uranium commençant par l' ^{235}U (demi-vie = $7.04 \cdot 10^8$ ans) [12] existe également, mais contribue peu à notre irradiation. Sa décroissance jusqu'au ^{207}Pb stable est un processus qui s'étale sur 12 désintégrations (^{231}Th , ^{231}Pa , ^{227}Ac , ^{227}Th , ^{223}Fr , ^{223}Ra , ^{219}Rn , ^{215}Po , ^{211}Pb , ^{211}Bi , ^{207}Tl) avec émission de 7 particules α et 5 particules β , suivi par émission de rayonnement γ (figure I.5). En spectrométrie γ , la mesure de la raie principale de l' ^{235}U (185.72 keV) coïncide avec celle du ^{226}Ra (186,21 keV) ce qui induit des problèmes d'interférences dans l'analyse des échantillons. [13]

I.9. Le Thorium

Le thorium est un métal gris découvert en 1828 par le chimiste suédois Berzelius. C'est le deuxième élément de la série des actinides. Certaines de ses propriétés le rapprochent, soit du titane, soit du cérium, soit du plutonium. Pratiquement 100% du thorium naturel est constitué de l'isotope ^{232}Th .

I.9.1. Famille du thorium

➤ Famille du thorium ^{232}Th (4n)

La demi-vie du ^{232}Th est très longue (4.47×10^9 années) [15]. Sa décroissance jusqu'au ^{206}Pb stable produit 10 nucléides radioactifs significatifs (^{228}Ra , ^{228}Ac , ^{228}Th , ^{224}Ra , ^{220}Rn , ^{216}Po , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{212}Po , ^{208}Tl), avec émission de 7 particules α et 5 particules β , suivi par émission de rayonnement γ (figure I.6)

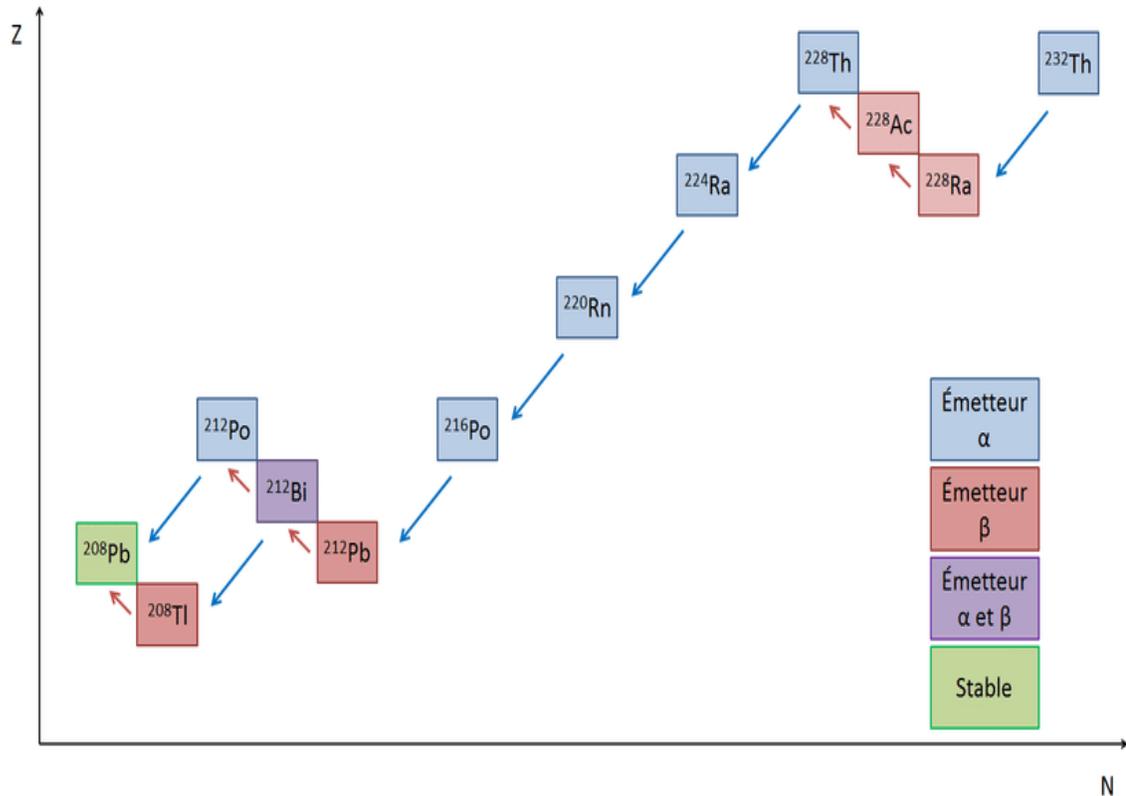


Figure I.6 : Chaîne de désintégration de ^{232}Th [14]

I.10. La radioactivité des roches

Rappelons que la radioactivité naturelle des sols et des roches est due à la présence des trois radioéléments naturels à longue durée de vie : ^{238}U , ^{232}Th , ^{40}K et de leurs produits dérivés comme le radium. Selon leur nature, les sols et les roches ont une radioactivité spécifique qui permet de les différencier. Ainsi, les argiles et certains sables résultant de la désagrégation des massifs primaires sont plus radioactifs que les craies et les calcaires.

L'uranium et le thorium des roches sédimentaires proviennent donc directement ou indirectement des roches magmatiques. Du fait de leur densité élevée ($U = 18,95$, $Th = 11,72$), ils se déposeront partiellement au pied de la roche-mère, ou pendant le transport, ou atteindront le bassin de sédimentation. Les éléments radioactifs, étant de ce fait fortement dispersés, les roches sédimentaires en contiendront moins que la roche-mère. Une roche sédimentaire, déjà pauvre en U et Th, désagrégée à son tour par l'érosion, donnera des sédiments encore moins riches en ces

éléments. Il en résulte que l'U et le Th des roches sédimentaires est, en général, à part quelques placers, à l'état diffus, et que l'on ne trouve pas de gisements uranifères ou thorifères à forte concentration dans ce type de roches. [15]

Les roches sédimentaires peuvent être classés sur la base du critère « radioactivité » en :

- **Roches à radioactivité élevée**

La plupart des argiles,

- Les schistes noirs,
- Les évaporites potassiques,
- Les phosphates,
- Certains sables et grès riches en minéraux accessoires à uranium et thorium,
- Les granites potassiques et les roches qui en découlent par érosion [15]

- **Roches à radioactivité moyenne**

- Les grès et les sables,
- Les gneiss [15]

- **Roches à radioactivité faible**

- Les calcaires et les dolomies,
- Les charbons en général, [15]
- Les évaporites sans potassium, l'halite et l'anhydrite,
- Les roches basiques et ultrabasiques

I.11. Les cendres volantes issues de centrales thermiques

Si les sulfates de calcium sont systématiquement utilisés dans la fabrication du ciment, le phosphogypse (sulfate de calcium issu de la neutralisation de l'acide phosphorique) est un constituant occasionnel dont l'utilisation reste liée à sa disponibilité à l'échelle locale.

Les cendres volantes sont utilisées pour de nombreuses applications, soit seules, soit mélangées à d'autres constituants. Elles peuvent rentrer dans la composition de ciments, de liants hydrauliques routiers, de bétons ainsi que dans de nombreux produits brevetés avec des utilisations diverses et notamment le remblaiement de tranchées (produits auto-compactant), le comblement de cavités ainsi que de produits auto-nivelant cf. partie II. Les ventes et la répartition des filières de valorisation de ces cendres. [16]

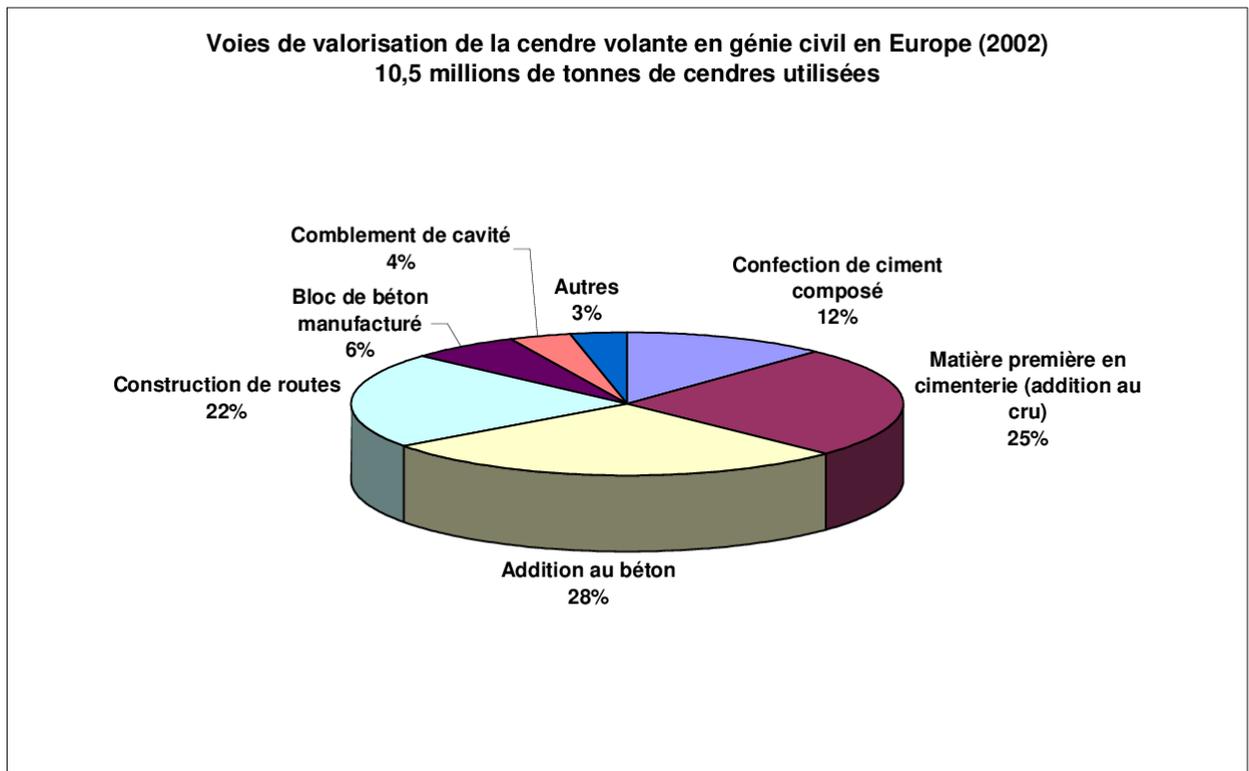


Figure I.7 : Valorisation des cendres volantes de chaudière à lit fluidisé circulant dans la filière du génie civil.

I.11.1. Les laitiers sidérurgiques

Les laitiers sidérurgiques sont les matières minérales co-générées lors des processus de fusion mis en œuvre par l'industrie du fer et de l'acier : la sidérurgie. La production de fonte sidérurgique congénère les laitiers de haut-fourneau (LHF), tandis que les opérations de transformation de la fonte en acier génèrent les laitiers d'aciérie de conversion (LAC). Les laitiers d'aciérie de four électrique (LAFE) sont eux les matériaux co-générés lors de la production d'acier par refonte de ferrailles en filière électrique. Parmi les différents types de laitiers générés, seuls les laitiers de haut-fourneau concentrent la radioactivité naturelle et sont concernés par le présent document. Le mode de génération des laitiers d'aciérie de convertisseur et des laitiers d'aciérie de four électrique ne permet pas une concentration de la radioactivité naturelle, et il n'apparaît pas pertinent de leur imposer une caractérisation radiologique obligatoire. Les laitiers générés au niveau des hauts-fourneaux (LHF) à 1500 °C sous forme liquide peuvent être solidifiés selon deux voies de refroidissement : selon un refroidissement rapide (trempe), qui génère des laitiers de haut-fourneau

granulés (ou vitrifiés, LHFg), ou selon un refroidissement plus lent, qui conduit à des laitiers de haut-fourneau cristallisés (LHFc). Ces deux formes de laitiers de haut-fourneau peuvent être utilisées pour la fabrication de produits de construction, leur composition chimique étant identique, ils disposent du même contenu radioactif naturel. Outre les laitiers sidérurgiques considérés comme de « fraîche production », il existe également des stocks historiques (LHFc, LAC, LAFe), qui sont actuellement parfois exploités pour rentrer dans la fabrication des matériaux et produits de construction.

I.11.2. Les sulfates de calcium et le phosphogypse

Si les sulfates de calcium sont systématiquement utilisés dans la fabrication du ciment, le phosphogypse (sulfate de calcium issu de la neutralisation de l'acide phosphorique) est un constituant occasionnel dont l'utilisation reste liée à sa disponibilité à l'échelle locale.

I.11.3. Les scories phosphoriques

- Les scories sont des coproduits issus de l'industrie sidérurgique. Leur utilisation, très répandue au siècle dernier comme engrais de fond, a progressivement diminué à cause du déclin de l'industrie métallurgique et du manque de disponibilité du produit sur le marché
- Les scories ont l'avantage d'être riches en potasse (K), et très riches en oxyde de calcium (CaO) possédant un pouvoir chaulant immédiat. Enfin, elles contiennent également de nombreux oligo-éléments tels que le Sélénium(Se), le Zinc (Zn), le Cuivre (Cu), le Molybdène (Mo), le Cobalt (Co) et le Bore (B).
- Ce sont donc d'excellents engrais de fond pour l'agriculture. Ils sont agronomiquement beaucoup plus intéressants que les engrais de fond standards (fabriqués à base de super 45 et de chlorure de potasse) car ils apportent beaucoup plus d'éléments fertilisants et n'acidifient pas les sols. Enfin, ils font partie des rares engrais apportant des oligo-éléments au sol, permettant ainsi de diminuer les carences pour les cultures, et d'améliorer les valeurs nutritionnelles pour les prairies [17]



Figure I.8 : morceaux de scories (avec oxyde de cuivre),

**CHAPITRE II
INTERACTION
RAYONNEMENTS
MATIÈRE**

II.1. Introduction

Le rayonnement est tout autour de nous, il est naturellement présent dans notre environnement, depuis la naissance de cette planète. Par conséquent, la vie a évolué dans un environnement qui a des niveaux élevés de rayonnements ionisants. Le rayonnement vient de l'espace extra-atmosphérique (cosmique), la terre (terrestre), et même au sein de notre propre corps. Il est présent dans l'air que nous respirons, la nourriture que nous mangeons, l'eau que nous buvons et dans les matériaux de construction utilisés pour construire nos maisons. Certains aliments comme les bananes et les noix du Brésil contiennent naturellement des niveaux élevés de rayonnement que d'autres aliments. Brique et la pierre des maisons ont des niveaux de rayonnement naturel plus élevés que les maisons faites d'autres matériaux de construction comme le bois et contient des niveaux élevés de rayonnement naturel que la plupart des foyers. Le rayonnement est la quantité d'énergie de libération sous forme de particules ou d'ondes électromagnétiques qui viennent des éléments radioactifs. Ces éléments vont tenter d'atteindre la stabilité en émettant des radiations.

II.2. La base de la radioactivité

Le nombre de protons dans le noyau d'un élément, X est le nombre de protons Z (également appelé le numéro atomique). La somme des protons et de neutrons (les nucléons) est le nombre de masse A , d'un atome. Atomes d'un élément ayant le même numéro atomique mais un nombre différent de neutrons (c. des nombres de masse) sont appelés isotopes. Les isotopes sont désignés par leur symbole chimique et leur nombre de masse comme suit : AX . Les isotopes ont des propriétés chimiques identiques mais différentes des propriétés physiques. Atomes dont le nombre identique de protons et de neutrons sont appelés nucléides. Les noyaux atomiques de certains isotopes ont un excès d'énergie, sont instables et se désintègrent pour former des noyaux plus stables d'un autre isotope. Ce processus est accompagné par l'émission de particules ou d'énergie, appelées les radiations nucléaires. Nucléides avec cette fonction sont appelés radionucléides, et le processus est appelé la désintégration nucléaire ou la désintégration [17]

II.3. Les types de rayonnements ionisants

Il existe trois types de rayonnements ionisants de nature et d'intensités différentes : alpha, bêta et gamma (figure II.1)

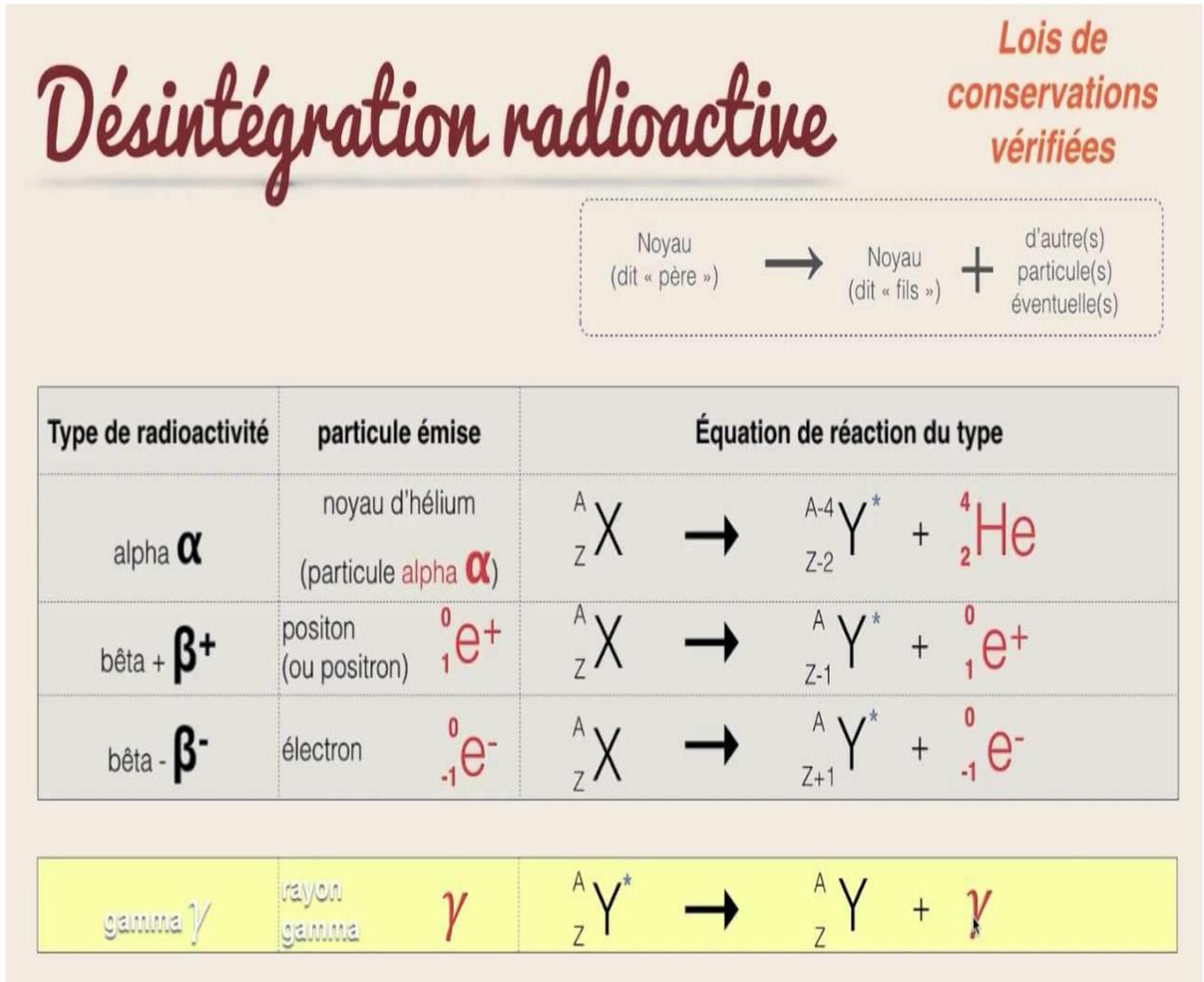


Figure II.1 : Désintégration radioactive des rayonnements alpha, bêta, gamma.

II.3.1. Le rayonnement alpha (α)

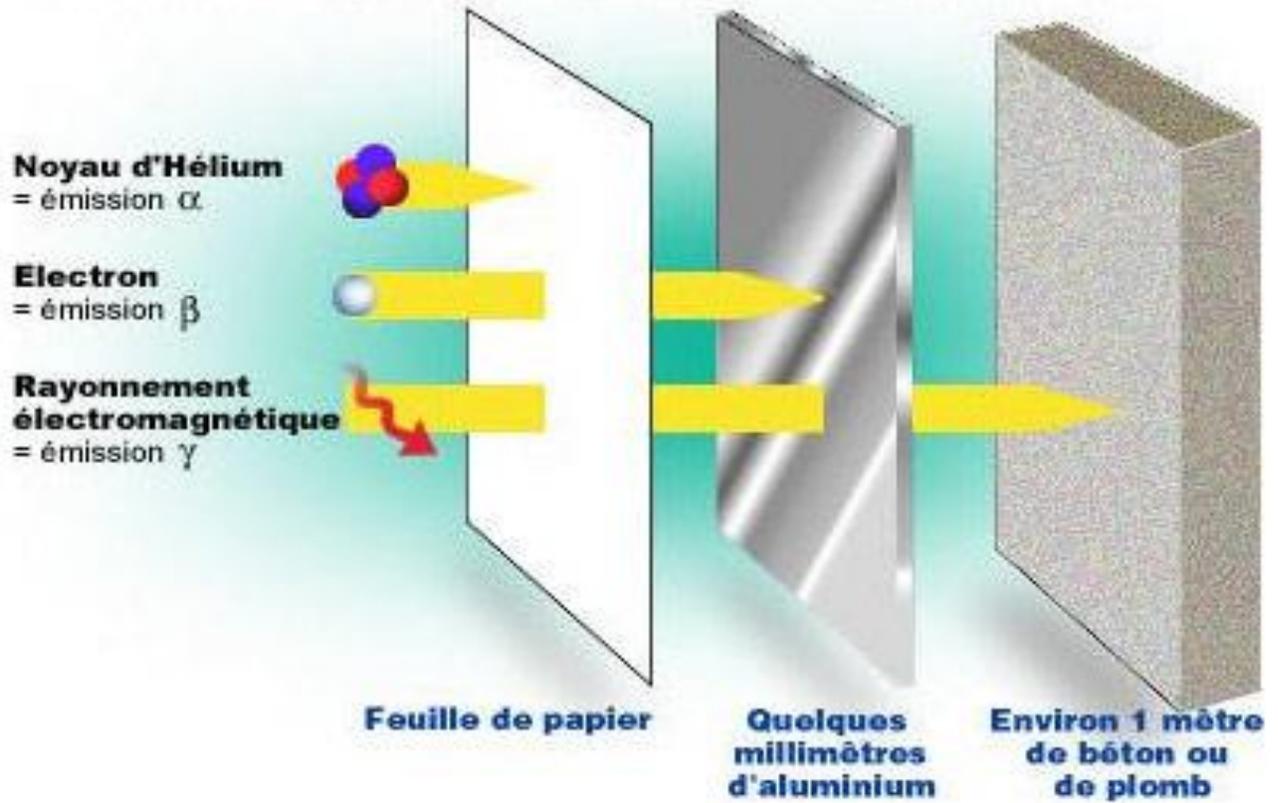
Il est libéré par des atomes trop lourds. Elle équivaut à l'émission de la particule alpha, noyau d'hélium composé de deux protons et de deux neutrons. Sa trajectoire dans les airs ne mesure que quelques centimètres. Avec un simple drapeau en papier, elle pourrait être arrêtée.

II.3.2. Le rayonnement bêta (β)

Il correspond à deux types de transformations qui peuvent se produire dans un radionucléide : soit un proton se transforme en neutron et le noyau émet un électron avec une charge négative nette (bêta moins), ou un neutron se transforme en proton et le noyau émet un électron avec une charge positive nette (bêta plus). La distance parcourue par les particules en suspension dans l'air n'est que de quelques mètres. Elles pourraient être arrêtées par une feuille d'aluminium.

II.3.3. Le rayonnement gamma (γ)

Les noyaux stimulés émettent un rayonnement gamma. Il s'agit d'un rayonnement électromagnétique du même type que la lumière ou les rayons X, mais beaucoup plus intense. Le rayonnement gamma est beaucoup plus invasif que les autres types de rayonnement. Ils peuvent parcourir des centaines de mètres dans les airs en fonction de leur niveau d'énergie. Pour les arrêter, une épaisse couche de béton ou de plomb est nécessaire. La figure 2 montre le pouvoir de pénétration des trois types de rayonnement : alpha, bêta et gamma [18]

Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements**FigureII.2.** Le pouvoir de pénétration des différents rayonnements

II.4. Les particules de neutrons

L'émission de neutrons est extrêmement rare parce que les neutrons ne sont pas libres dans le noyau et sont fortement liés aux protons [3]. Elle ne se produit que lorsqu'un noyau provient d'une désintégration biologique et chimique. Le neutron a une grande masse, pas de charge électrique, et la capacité d'interagir avec ou être absorbé par le noyau d'un atome. Il a le potentiel de pénétrer la matière plus profondément que d'autres particules chargées. [19]

II.4.1. Des particules d'émissions radioactives courantes

Différents rayonnements ont des propriétés différentes, telles que résumées ci-dessous :

Tableau II.1 : les particules des émissions radioactives courantes.[20]

Radiation	Type de Radiation	Masse (AMU)	Charge	Matière de blindage
Alpha	Particule	4	+2	Papier, peau, vêtement
Beta	Particule	1/1836	±1	Plastique, verre, métal léger
Gamma	Onde Électromagnétique	0	0	métal dense, concrète, Terre
Neutrons	Particule	1	0	Eau, concrète, polyéthylène, huile

II.5. Pénétration et rayonnement

En plus d'avoir la capacité d'ioniser une substance, le rayonnement peut aussi la pénétrer. La quantité qu'ils émettent dépend des différents types de rayonnements ionisants et de leur force. Il est difficile pour les particules alpha de pénétrer en raison de leur haute puissance ionisante. La raison pour laquelle les particules dans la gamme alpha ont une gamme étroite de puissance de pénétration est parce qu'elles peuvent ioniser tout ce qu'elles entrent en contact avec en premier. [21]

Il est également possible d'appliquer la relation inverse entre la puissance ionisante et pénétrante au rayonnement bêta et gamma. Alors que les particules bêta peuvent pénétrer jusqu'à une fraction d'une cuillère à café de solide, liquide, et plusieurs pieds dans l'air, les particules alpha peuvent être arrêtés avec un morceau de papier ou une couche de vêtements.[22] Les rayons gamma, qui sont électriquement neutres et ont un faible potentiel ionisant, ne sont pas ralentis par des collisions de matériaux et ne peuvent être arrêtés que par des métaux denses comme le plomb. Il est également possible d'appliquer la relation inverse entre la puissance ionisante et pénétrante au rayonnement bêta et gamma. Alors que les particules bêta peuvent pénétrer jusqu'à une fraction d'une cuillère à café de solide, liquide, et de nombreux pieds dans l'air, les particules alpha peuvent être arrêtés avec un morceau de papier ou une couche de vêtements. Les rayons gamma, qui sont électriquement neutres et ont peu de potentiel ionisant, ne peuvent être arrêtés par une collision avec des matériaux et ne peuvent être arrêtés que par des métaux lourds comme le plomb. [23]

II.6. Rayonnements non ionisants

Contrairement aux rayonnements ionisants, l'énergie des rayonnements non ionisants est, par définition, insuffisante pour troubler l'édifice électronique d'un atome [24]

On peut classer les rayonnements selon leur façon de produire des ionisations dans la matière en utilisant leur propre pouvoir d'ionisation :

- a. **Radiations directement ionisantes** : comme les électrons, particules α , positrons, protons, deutons...
- b. **Radiations indirectement ionisantes** : comme les neutrons, rayons X, rayons γ . [25]

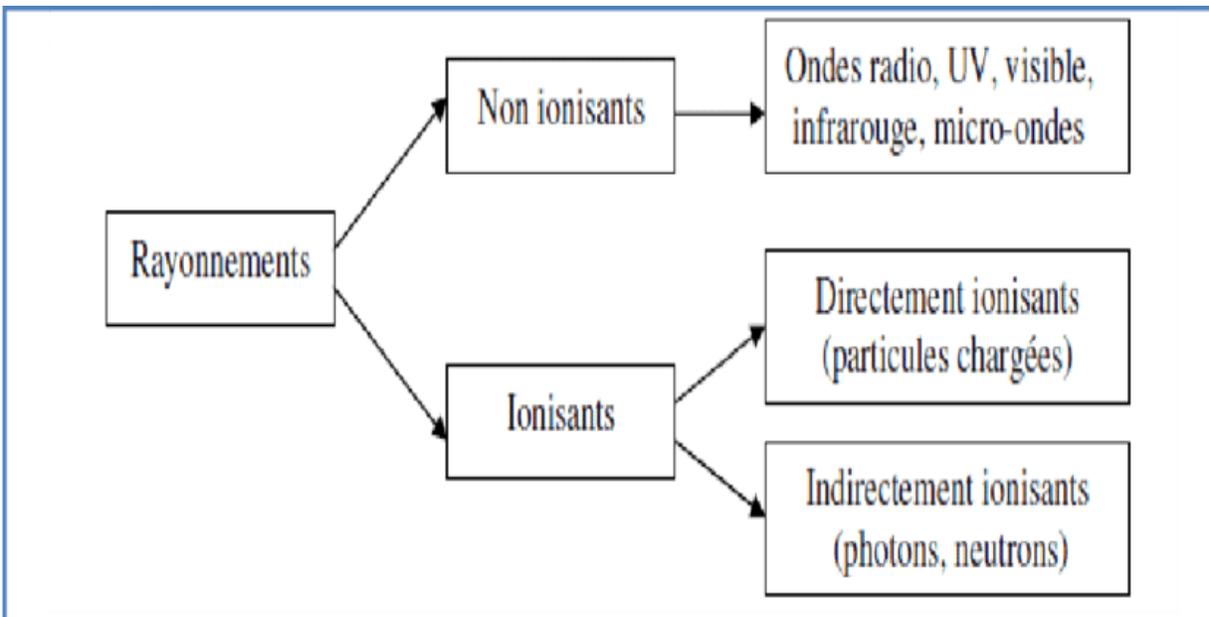


Figure II.3 : Classification des rayonnements.

II.7. Gamma interaction avec la matière

II.7.1. Absorption d'énergie

Le transfert d'énergie des particules ou des photons libérés dans un environnement absorbant. Ces mécanismes conduisent à l'ionisation et à l'excitation des atomes ou des molécules dans l'absorbant. Finalement, l'énergie transférée se dissipe sous forme de chaleur.

L'ionisation est le retrait d'un électron d'une molécule ou de l'orbite d'un atome, conduisant à la production d'un ion chargé positivement. Le rayonnement doit transférer suffisamment d'énergie à l'électron pour surmonter sa force d'attraction afin de provoquer une ionisation. La dissociation d'une molécule peut résulter de l'émission d'un électron à partir de la molécule. L'excitation consiste à ajouter de l'énergie à un électron orbital en déplaçant un atome ou une molécule de son état initial à un état excité [26]

II.7.2. L'absorption photoélectrique

Lorsque les photons de rayons gamma interagissent avec les électrons dans un atome, l'électron est éjecté de sa coquille à l'énergie cinétique T_e

$$T_e = E_\gamma - E_b \quad (\text{II.1})$$

Où E_b l'énergie de liaison de l'électron dans la coquille, E_γ est l'énergie de rayons gamma. Le poste laissé vacant par l'électron excité peut être rempli par plus d'électrons d'énergie qui conduit à l'émission

de rayons X caractéristique, ou l'excitation d'électrons excitent autre atome qui peut désexciter par redistribution de l'énergie d'excitation entre le reste d'électrons dans les atomes.

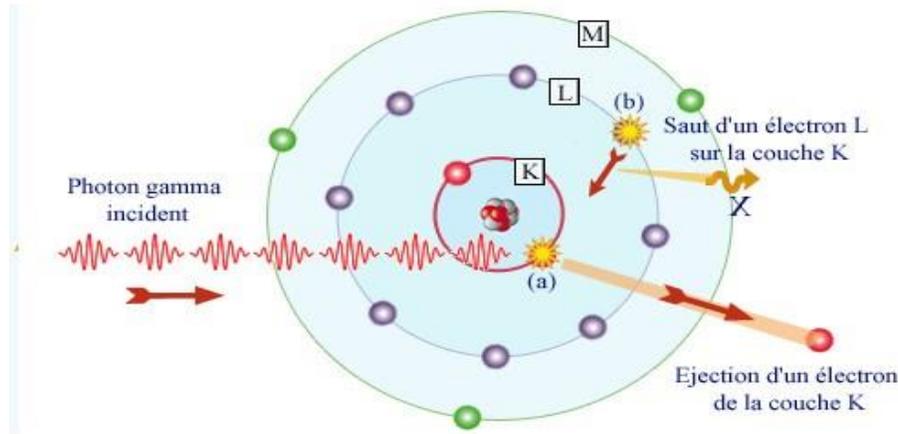


Figure II.4 : Effet photoélectrique.

II.7.3. La diffusion Compton

Le photon incident cède une partie de son énergie à un électron des couches périphériques de l'atome, qui est éjecté. Il apparaît un nouveau photon diffusé avec une énergie inférieure à son énergie incidente $h\nu_0$ avec $\nu_0 < \nu$. L'électron dit de recul est éjecté avec une énergie cinétique E_{cin} complémentaire de l'énergie du photon diffusé ($h\nu = h\nu_0 + E_{cin}$ et un angle Φ). Cet électron de recul peut provoquer des ionisations ultérieures. L'angle de diffusion de l'électron de recul peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\Delta \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi) \quad (\text{II.1})$$

Où $\Delta \lambda$ est la différence de longueur d'onde entre le photon incident et le photon diffusé, m_e la masse de l'électron [27]

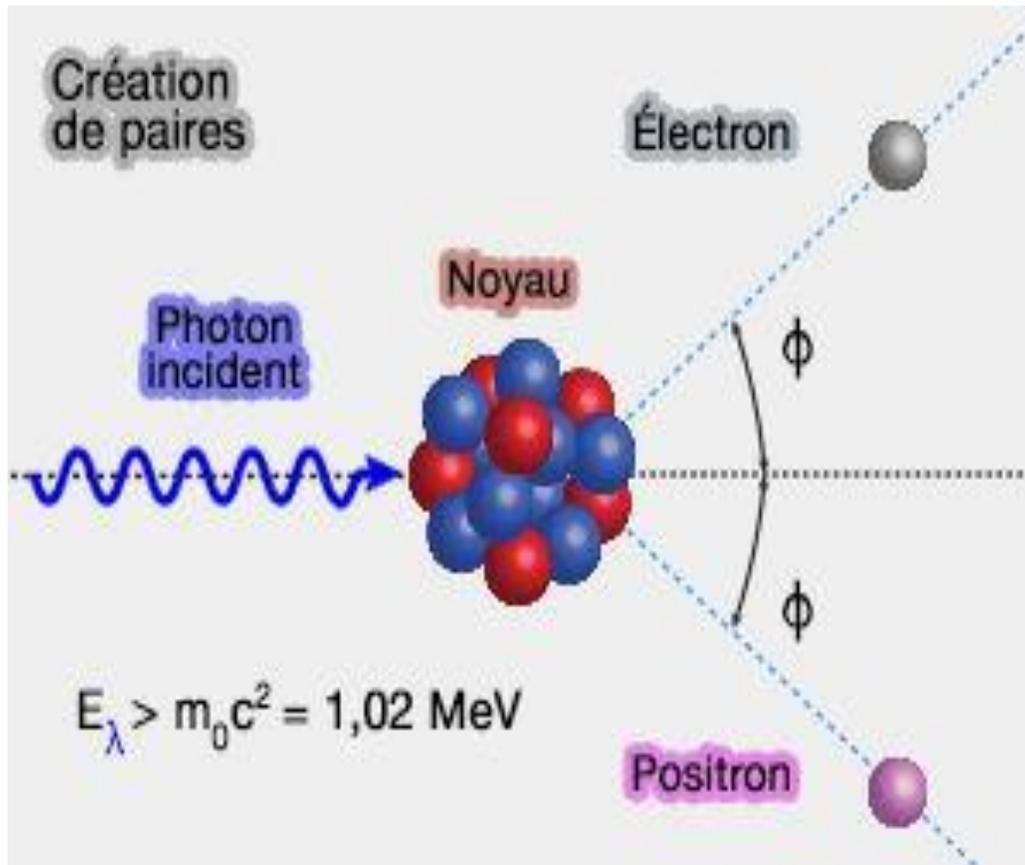


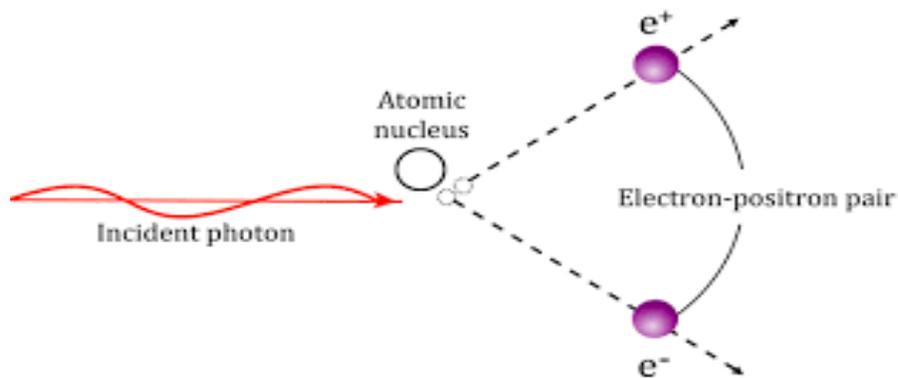
Figure II.5 : Effet Compton.

II.7.4. Production des paires

Dans le champ électrique intense qui règne au voisinage du noyau, le photon incident disparaît, son énergie se matérialisant sous forme d'un électron et d'un positon. Une énergie supérieure à 1,022 MeV, correspondante à leurs masses, est dépensée pour créer l'électron et le positon. L'excédent d'énergie se répartit, sous forme d'énergie cinétique, entre les deux particules.

$$E_c = h\nu + 2m_e$$

L'électron et le positon sont ensuite ralentis dans la matière par suite de collisions. Lorsqu'il est suffisamment lent, le positon rencontre un électron du milieu et les deux particules s'annihilent en émettant deux photons de 0,51 MeV

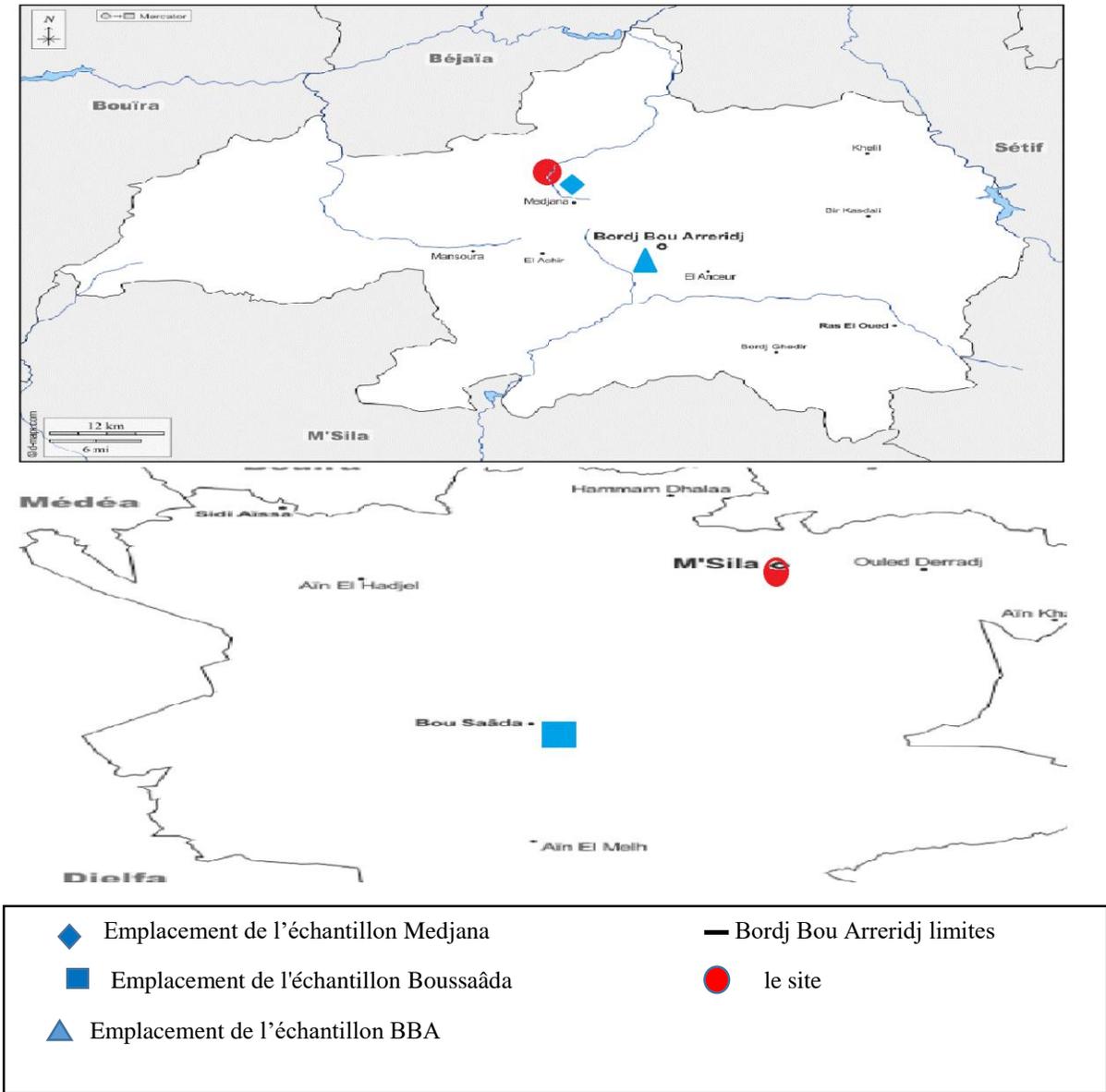


FigureII.6 : Pair production processus.

II.8. Les emplacements des zones de prélèvement d'échantillons

L'Algérie possède de grandes richesses minérales et astronomiques, et son intérieur regorge de matériaux naturels importants et diversifiés, que l'on trouve généralement dans le sud algérien. Il contient de nombreuses ressources minérales telles que (phosphate, zinc, uranium, bentonite, ciment gris et blanc, briques, sable, marbre et granit).

Nous avons consacré une partie à l'étude de la radioactivité des roches, de la concentration des éléments radioactifs et des types de roches pour chaque type de matériau de construction comme le ciment, la brique et le sable.



FigureII.7 : Les sites étudiées

II.9. Le sable

Le sable est l'un des principaux matériaux de construction (il entre notamment dans la composition du béton). D'une façon générale, c'est une roche sédimentaire meuble, constituée principalement de quartz avec de faibles proportions de mica, de feldspath et de magnétite, provenant de la désagrégation de roches sous l'action de divers agents d'érosion (vent, eaux courantes, gel). Sa couleur est d'autant plus claire que la teneur en silice est élevée. Les échantillons de sable utilisés pour la mesure de la radioactivité naturelle diffèrent selon l'origine de leur provenance [28]



Figure II.8 : le sable de Boussaâda.

II.10. Le ciment

Le ciment est un matériau mou et collant qui, si de l'eau y est ajoutée, se transforme en une pâte de ciment molle, puis après un certain temps, il se transforme en un matériau solide et acquiert une résistance avec le temps, surtout s'il est placé dans l'eau (et pour cette raison on l'appelle ciment hydraulique).

Il se compose principalement d'oxyde de calcium (CaO), de dioxyde de silicium (SiO_2), d'oxyde d'aluminium (Al_2O_3) et d'oxyde de fer (Fe_2O_3), auxquels du soufre calcique est ajouté après combustion. Le ciment est fabriqué à partir d'un mélange de 75 % de calcaire et de 25 % d'argile. Du minerai de fer ou du sable peuvent être ajoutés si l'argile contient un faible pourcentage d'oxyde de fer ou d'oxyde de silicium [29]



Figure II.9 : Ciment Matine de Bordj Bou Arreridj.

II.11. Les briques rouges

Les briques sont en général des parallélépipèdes ou autres polyèdres de Moyenne dimension en pâte argileuse, presque toujours durcies par la cuisson, qui sont employées comme matériaux pierreux de construction. Selon la Commission Européenne, les argiles ont toujours une concentration en radionucléides ^{238}U et ^{232}Th de l'ordre de 35 Bq.kg^{-1} . Puisque la température de fabrication des briques dans les fours est comprise entre 1000 et 1200 C, donc entre 40 et 100 % des Po sont volatilisés lors de ce processus. L'échantillon de brique rouge utilisé pour la mesure de la radioactivité est fabriqué par la Briqueterie El Khetmine. En effet, la fabrication des briques passe par les étapes qui se résument comme suit.

D'abord, le stockage de la matière première qui constitue une étape très importante. Elle permet à l'eau interstitielle contenue dans les argiles de s'échapper ce qui améliore leurs propriétés. Puis, le dosage de différentes proportions des argiles et de dégraissant à l'aide des doseurs distributeurs. Arrivent ensuite le concassage primaire qui vise à réduire la taille de mottes suivi d'une sélection des impuretés (carbonates, grès, plastique, racines...). Passant après par le concassage secondaire dit broyage de préparation, produisant ainsi un matériau relativement grossier. L'étape ultérieure, est le tamisage qui se fait à l'aide d'une grille afin d'éliminer les éléments de grande taille. Une homogénéisation et une humidification faites à l'aide d'un malaxeur, en ajoutant une petite quantité d'eau dont le but est de préparer une pâte pour le stockage intermédiaire. Le façonnage. Un stockage intermédiaire permet l'uniformité de l'humidité du mélange et l'humidité voulue. L'ajout puis un broyage fin permettant d'obtenir la granulométrie voulue. L'ajout d'une quantité d'eau (de façonnage) pour avoir l'humidité demandée. Le mélange obtenu subit un malaxage avant son passage à travers la mouleuse pour son façonnage. Le procédé de façonnage utilisé est celui par extrusion sous vide. On obtient, ainsi un produit cru, possédant le format désiré. Le séchage consiste à éliminer l'eau de façonnage. A la sortie du séchoir, le produit doit posséder une certaine rigidité pour minimiser le taux de casse lors de leur empilage sur le wagonnet du four. Les briques séchées entrent dans le four à la température de cuisson qui est de 800 à 900 C. Le temps et la température constituent deux paramètres importants car ils influent directement la production. A la sortie du four, le produit fini subit une opération de tirage et emballage [30]



FigureII.10 : La brique rouge de Medjana BBA

**CHAPITRE III
CHAÎNE DE
SPECTROMÉTRIE GAMMA
ET SES DIFFÉRENTES
COMPOSANTES**

III.1. Introduction

Ce travail met en évidence l'importance de ces spécifications de performance, quel est la valeur attendue (garantie) et le résultat du processus de vérification pour un détecteur coaxial HPGe utilisé dans ce travail.

III.2. Paramètres de test

III.2.1. Étalonnage en énergie des détecteurs HPGe

Dans les expériences de spectroscopie de rayons γ , l'étalonnage en énergie des détecteurs HPGe est très essentiel. Pour effectuer un fiable étalonnage en énergie des détecteurs HPGe, un ensemble de sources standards radioactives pouvant émettre de nombreux rayons γ avec des énergies précisément connues sont utilisées, telles que Eu-152, Ba-133, Co-60 et Cs-137. Cependant, lorsque les rayons γ à haute énergie (par exemple, $E \geq 3500 \text{ KeV}$) nécessitent une analyse, ces régions d'énergie ne peuvent pas être calibrées par les sources susmentionnées car aucune d'entre elles ne peut produire les rayons γ intenses requis avec des énergies supérieures à 3500 KeV [9 – 10]. De plus, les quelques sources standards radioactives pouvant émettre des rayons γ avec des énergies supérieures à 1500 KeV ont des durées de vie courtes [11] : Ga-66 (833,5 – 4806 eV, 13 rayons γ au total, $T_{1/2} = 9,49 \text{ h}$), 10 rayons γ avoir des énergies supérieures à 1500 KeV : ^{24}Na (1368,6 et 2754 KeV, $T_{1/2} = 14,997 \text{ h}$) : ^{56}Co (846,8 – 3548,1 KeV, 14 rayons γ au total, $T_{1/2} = 77,236 \text{ d}$), 9 rayons γ ont des énergies supérieures à 1500 KeV [31]

En supposant qu'un détecteur HPGe est calibré par la source Eu-152, ce détecteur pourrait mesurer exclusivement les rayons γ avec des énergies jusqu'à environ 1500 KeV puisque l'énergie mesurée n'est valable que dans cette région d'étalonnage. Dans la région d'extrapolation, l'énergie mesurée dérivée du coefficient d'étalonnage peut s'écarter considérablement de la valeur réelle. [32]

III.2.2. Résolution

L'IUPAC définit la résolution en spectroscopie optique comme la différence minimale de nombre d'onde, de longueur d'onde ou de fréquence (donc on parle de l'énergie) entre deux lignes dans un spectre qui peut être distinguée. Le pouvoir de résolution, R, est donné par le nombre d'onde de transition, la longueur d'onde ou la fréquence (ou l'énergie), divisé par la résolution [32]

Une bonne résolution est appréciée pour deux raisons :

CHAPITRE III CHAÎNE DE SPECTROMÉTRIE GAMMA ET SES DIFFÉRENTES COMPOSANTES

- La première raison est que les rayons gamma qui sont proches en termes d'énergie peuvent être mesurés séparément. Lorsque les centroïdes des pics de bonne forme sont espacés de $3 \times \text{FWHM}$ (largeur à mi-hauteur), les pics individuels sont clairement séparés. Au niveau à cinquantième-hauteur et avec des aires égales dans chaque pic, il y a un chevauchement négligeable, car avec une forme gaussienne la FWHM (largeur cinquantième-hauteur) égale à $2,376 \times \text{FWHM}$. Si les pics de surfaces égales n'étaient séparés que de $1 \times \text{FWHM}$, ils peuvent alors être facilement identifiés visuellement comme un multiplet.
- Une deuxième raison de rechercher une haute résolution est moins critique et concerne les spectres contenant de petits pics sur un bruit de fond incertain. Avec une bonne résolution, un pic contenant peu de comptages concentrera ces comptages dans quelques canaux seulement, et ces canaux se démarqueront plus distinctement au-dessus du continuum de bruit de fond, permettant une détection et une mesure plus fiables. Ce point est normalement la raison de préférer les détecteurs HPGe aux détecteurs NaI(Tl) pour les mesures des basses activités, même si NaI(Tl) est susceptible d'avoir une plus grande efficacité de comptage.

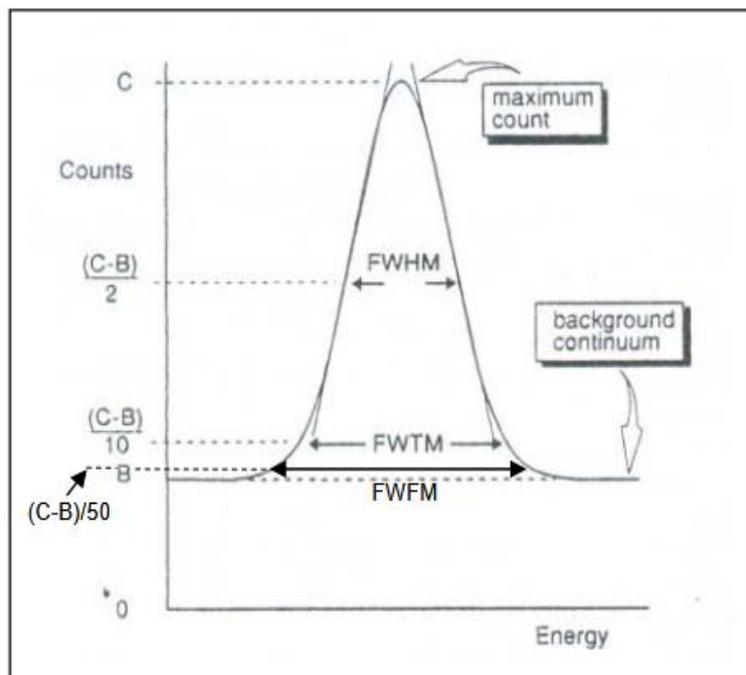


Figure III.1 : Résolution du détecteur. Représentation d'un pic ayant une forme gaussienne avec une largeur à mi-hauteur (FWHM ou FW1/2M), une largeur à dixième-hauteur (FWTM ou FW1/10M) et une largeur à cinquantième-hauteur (FWFM ou FW1/50M).

Pour déterminer la résolution du détecteur, on place la source sur une distance de « End-Cap » du détecteur et on accumule un spectre dans l'analyseur multicanal (MCA) de sorte que

CHAPITRE III CHAÎNE DE SPECTROMÉTRIE GAMMA ET SES DIFFÉRENTES COMPOSANTES

le pic de référence (pic 1332,5 KeV de Co-60 pour le détecteur coaxial) ait au moins 10 000 coups dans le canal de pic ayant le comptage maximal pour minimiser l'erreur de comptage statistique. Les logiciels commerciaux modernes fourniront la valeur de résolution en KeV lorsque le pic est marqué.

La figure 1 indique comment le FWHM, le FWTM et le FWFM peuvent être déterminés dans un pic gaussien acquis dans le spectre du détecteur *HPGe*.

Tableau III.1 : Résolutions des détecteurs existants en marché [33]

Detector Type	Photon Energie (KeV)		
	5.9	122	1332.5
Coaxial p-type	–	0.8 – 1.4	1.7 – 2.5
Coaxial n-type	0.66 – 1.2	0.8 – 1.4	1.7 – 2.7
Short n-type	0.3 – 0.5	0.6 – 0.72	–
Well	–	– 1.4	1.9 – 2.3
Planar	0.14 – 0.4	0.48 – 0.72	–
Ultra-low energy	0.14 – 0.16	0.48 – 0.72	–
Si(Li)	0.16 – 0.25	–	–

Tableau **III.1** indiquant la valeur de résolution (en KeV) pour différents types de détecteurs disponibles dans le marché. Dans la plupart des cas, la résolution est mesurée sur la ligne de pic de la source standard en fonction de la gamme d'énergie du détecteur. Pour la gamme de hautes énergies (jusqu'à 10 MeV) on utilise généralement la ligne de pic 1332.5 KeV de Co-60 comme spécification de performance tandis que pour le détecteur de gamme des basses énergies (jusqu'à 1 MeV) on utilise, de préférence, *Co-57* (122 KeV) ou *Fe-55* (5,9 KeV) comme indicateur.

III.2.3. Forme gaussienne du pic

La forme gaussienne du pic est déterminée en calculant le rapport de FWTM sur FWHM et le rapport de FWFM sur FWHM pour vérifier s'il y a un élargissement du pic dans le temps. La valeur théorique du rapport FWTM/FWHM est de 1,823. Dans la pratique une valeur de ce rapport $\leq 1,9$ doit être acceptable. Alors que la valeur théorique du rapport FWFM/FWHM est de 2,376. Pour le pic gaussien devrait être $\leq 2,5$ en pratique [13]. Généralement, FWFM/FWHM n'est pas garanti par les fabricants car la valeur FWFM est très influencée par le continuum Compton (Bruit de fond).

CHAPITRE III CHAÎNE DE SPECTROMÉTRIE GAMMA ET SES DIFFÉRENTES COMPOSANTES

III.2.4. Rapport pic-au-compton

La mesure du rapport Pic-au-Compton est basée sur le même pic ayant l'énergie 1332,5 KeV de Co-60 utilisé pour la mesure de la résolution. Ce rapport, tel que décrit dans la norme ANSI/IEEE [34], est le nombre des coups dans le plus grand canal du pic 1332,5 KeV au nombre moyen de coups dans les canaux représentant le gamma des énergies entre 1040 et 1096 keV, qui fait partie de la région Compton associée au pic de 1332,5 KeV. Cette valeur de rapport est analogue à un rapport Signal/Bruit. Pour ce faire, on accumule le spectre jusqu'à ce qu'il y ait plusieurs milliers de coups dans le canal de pic considéré, puis on calcule le rapport en fonction des informations du spectre.

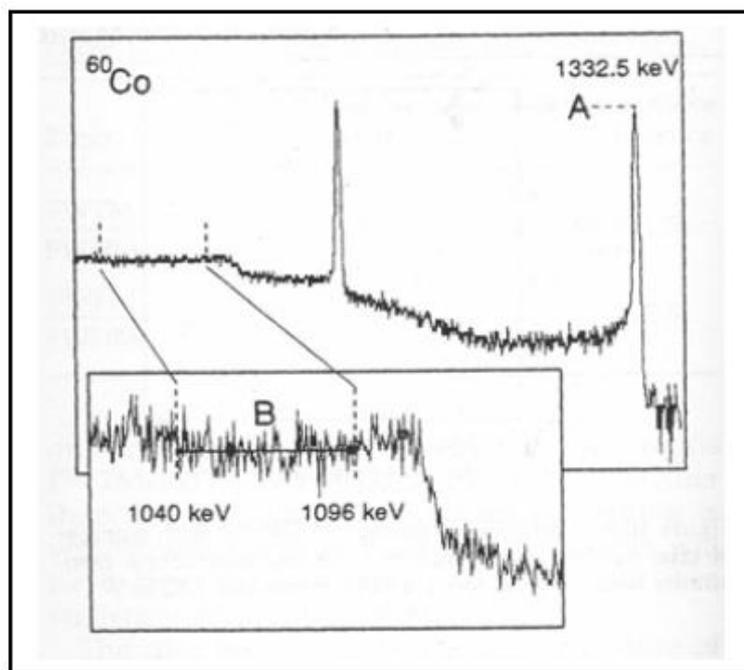


Figure III.2 : Rapport Pic-au-Compton $P/C = A/B$. (a) Position sur le spectre de Co-60 de A et B (comptage sur une échelle logarithmique), et (b) la nature constante du continuum dans la région B (comptage sur une échelle linéaire).

- On comprendra que, plus la résolution est bonne plus le pic est étroit, plus la valeur des comptages de canaux de pic de 1332,5 KeV est élevée et plus le rapport Pic-au-Compton est élevé. De même, plus l'efficacité d'absorption totale est grande, plus il y a un comptage élevé dans le pic et plus la valeur des comptages de canaux de pic de 1332,5 KeV est élevée. Plus le détecteur est grand, plus la probabilité d'absorption totale du rayon gamma (capturant toute l'énergie gamma par n'importe quel processus) est grande et aura donc plus de comptage dans les pics et moins dans le continuum Compton, augmentant le rapport Pic-au-Compton. D'où un pic photoélectrique plus grand et un

CHAPITRE III CHAÎNE DE SPECTROMÉTRIE GAMMA ET SES DIFFÉRENTES COMPOSANTES

continuum Compton bas, c'est-à-dire un rapport pic à Compton plus élevé. Les valeurs du rapport Pic-au-Compton pour 1332,5 KeV vont d'environ 40 :1 pour un petit détecteur à efficacité relative de 10% à plus de 90 :1 pour certains détecteurs grands [34].

III.2.5. Résolution et forme de pic

La figure 4 ci-dessous montre le spectre en temps réel collecté en comptant une source de ^{60}Co à une distance de 25 cm au-dessus de « End-Cap » du détecteur coaxial *HPGe*. Le pic photoélectrique 1332.5 KeV est mentionné par l'étiquette de son énergie tandis que le continuum représente la région de 1040 keV à 1096 keV. Toutes les données intéressées ont été accumulées et le calcul a été effectué sur la base des spécifications de performance.

Tableau III.2 : Valeurs mesurées et garantis de FWHM, FWTM et FWFM.

Paramètre	Valeur Calculée	Valeur garantie ou théorique	Bias relative (%)
FWHM (KeV)	1.801	1.800	0.06
FWTM (KeV)	3.257	3.280	0.69
FWFM (KeV)	4.300	4.276	-0.57
FWTM/FWHM	1.808	1.823	-0.80
FWFM/FWHM	2.387	2.376	0.48

III.2.6. Rapport pic-au-compton

Tableau III.4 : Valeurs mesurées et garantis de rapport Pic-au-Compton.

Comptage au canal maximum du pic 1332.5 KeV	10760
Comptage total entre 1040 et 1096 KeV	20304
Nombre des canaux	112
Comptage moyen	181.286
Rapport Pic-au-Compton mesuré	59.4:1
Rapport Pic-au-Compton garanti	61:1
Bias relative (%)	3.55

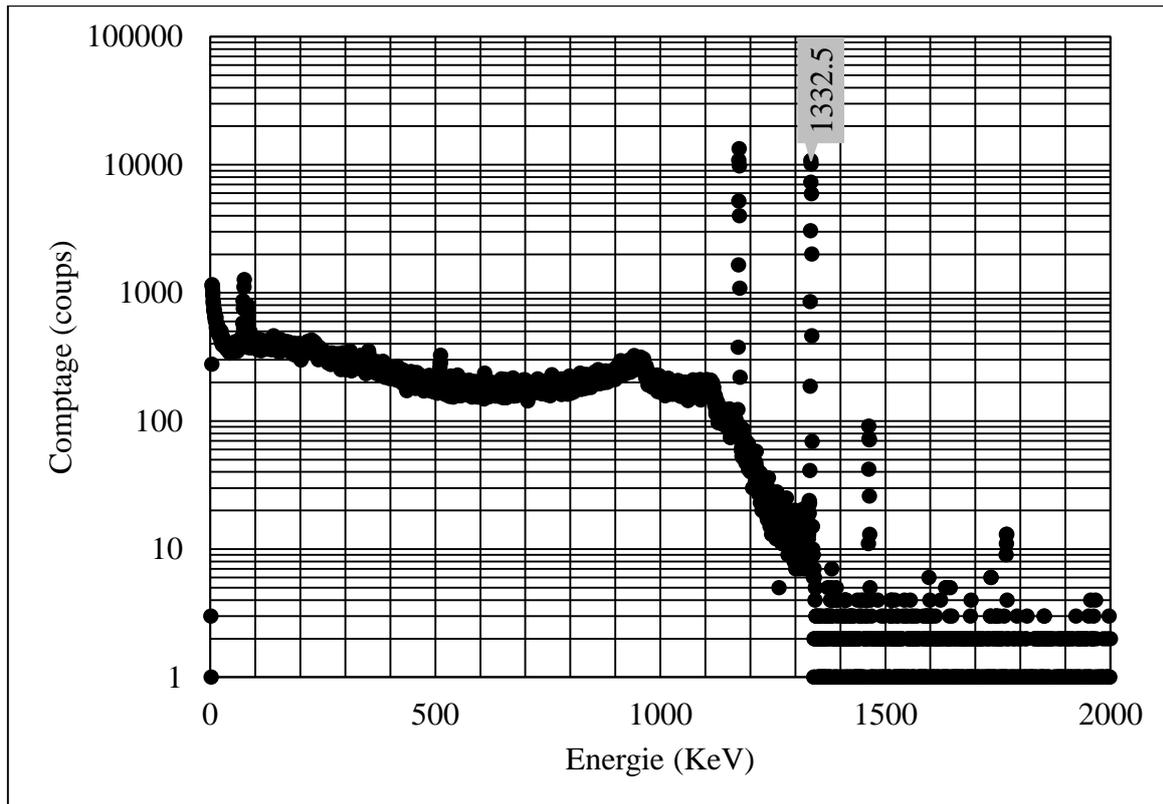


Figure III.3 : Spectre de mesure au système de spectrométrie gamma à détecteur HPGe GC3018 (échelle LIN-LOG).

Au cours d'une analyse de spectre, l'ajustement de courbe est une technique standard dans laquelle les paramètres d'une fonction d'ajustement sont modifiés pour décrire au mieux les données. Les pics photoélectriques pour les détecteurs HPGe sont bien décrits par une distribution gaussienne ou normale. La courbe présentée dans la figure 4 est un exemple typique d'ajustement gaussien

III.3. Matériel et méthodes

III.3.1. Sources des rayons γ

L'efficacité d'absorption totale FEPE a été étalonnée dans le domaine énergétique de 53 à 1408 KeV en utilisant un ensemble des sources de référence ponctuelles, à savoir : ^{241}Am , ^{133}Ba , ^{60}Co , ^{137}Cs et ^{152}Eu . Les sources ont été fournies par LEA-CERCA, France. Les caractéristiques des sources utilisées dans le cadre de l'étalonnage du détecteur GC3018 sont regroupées dans le tableau III.2.

Les cinq radionucléides se présentent sous la forme de sources. Marinelli Avec ces sources de rayonnement, une distribution presque uniforme des pics d'étalonnage peut être obtenue dans le domaine d'énergie comprise entre 53 et 1408 KeV, ce qui réduira la probabilité d'occurrence d'oscillations non physiques. De plus, les pics d'étalonnage appliqués ont été regroupés dans le tableau 1 pour plus de commodité. Ce tableau contient également les activités certifiées à la date de référence. Les demi-vies utilisées et les intensités d'émission des photons gamma sont tirées à partir de la base de données de l'AIEA-2007 [35]

Tableau III.3 : Données nucléaires des sources d'étalonnage.

Source	Énergie (KeV)	I_γ (%)	A_0 (KBq)	$\Delta A_0/A_0$	Date REF.	Date MES.
Ba-133	81	32.90	31200	0,01	18/6/03 12 :00	17/4/23 14 :31
	223.23	0.45				
	276.4	7.16				
	302.85	18.34				
	356.02	62.05				
	383.85	8.94				
Eu-152	121.78	28.41	4170	0,01	29/11/00 12 :00	16/4/23 9 :57
	244.7	7.55				
	295.94	0.44				
	344.28	26.59				
	367.79	0.86				
	411.12	2.24				
	443.96	3.12				
	488.68	0.41				
	503.47	0.15				
	586.26	0.46				
	656.49	0.14				
	678.62	0.47				
	688.67	0.84				
	719.35	0.33				
	778.9	12.97				
	810.45	0.32				
	867.38	4.24				
	919.33	0.43				
	964.08	14.50				
	1085.87	10.13				
	1089.74	1.73				
1112.07	13.41					
1212.95	1.42					
1249.94	0.19					
1299.14	1.63					
1408.01	20.85					

III.4. Efficacité relative

L'efficacité relative est calculée sur la base de la norme IEEE 325-1996 [34]. La procédure doit être suivie soigneusement pour obtenir des résultats significatifs. Pour effectuer ce test, on place perpendiculairement une source standard ponctuelle de Co-60 (précision de 1 % en activité) à 25 cm de « End-Cap » de détecteur. L'activité actuelle de cette source doit être calculée sur la base du taux de décroissance du Co-60. L'efficacité absolue du détecteur au germanium pour les photons d'énergie 1332,5 KeV est mesurée avec des corrections de temps mort appropriées. L'efficacité absolue est donnée par le rapport des comptages totaux dans le pic de 1332,5 KeV au nombre total de désintégrations de la source pendant la durée de vie écoulée. (Temps active = temps réel - temps mort, y compris le temps mort de l'amplificateur et de l'analyseur). Il est suggéré qu'au moins 20 000 comptages soient accumulés dans le pic 1332,5 KeV. Le rapport de l'efficacité absolue du détecteur au germanium à l'efficacité d'un détecteur à scintillation NaI(Tl) 3''×3'' à 25,0 cm (connu comme étant de $1,2 \times 10^{-3}$) est calculé. Le rapport, exprimé en pourcentage, est donné comme l'efficacité relative du détecteur.

$$\varepsilon_{REL.}(\%) = \frac{S/t_m}{I \times A_0 \times e^{-\lambda t_d} \times 1,2 \times 10^{-3}} \times 100 \quad (III.1)$$

Avec S : La surface sous le pic 1332.5 KeV du Co-60 : t_m : Temps de mesure en secondes : I : Intensité de transition du pic 1332.5 KeV (égale à 0.999845) : λ : La constante de décroissance du Co-60 : A_0 : L'activité initiale de Co-60 donnée par le fournisseur : t_d : Le temps compris entre la date de fabrication de la source et la date d'acquisition.

Tableau III.5 : Valeurs mesurées et garantis de l'efficacité relative.

E=1332.5 KeV, X-S-D=25 cm	
Activité initiale de la source Co-60 (KBq)	406.6
Temps de décroissance (jours)	5640.13
Période de Co-60 (Jours)	1925.23
Intensité du pic 1332.5 de Co-60	0.999856
Surface du pic 1332.5 (coups)	40630
Temps de mesure (s)	2170
Efficacité relative mesurée (%)	29.25
Efficacité relative garantie (%)	35.1
Bias relative (%)	16.68

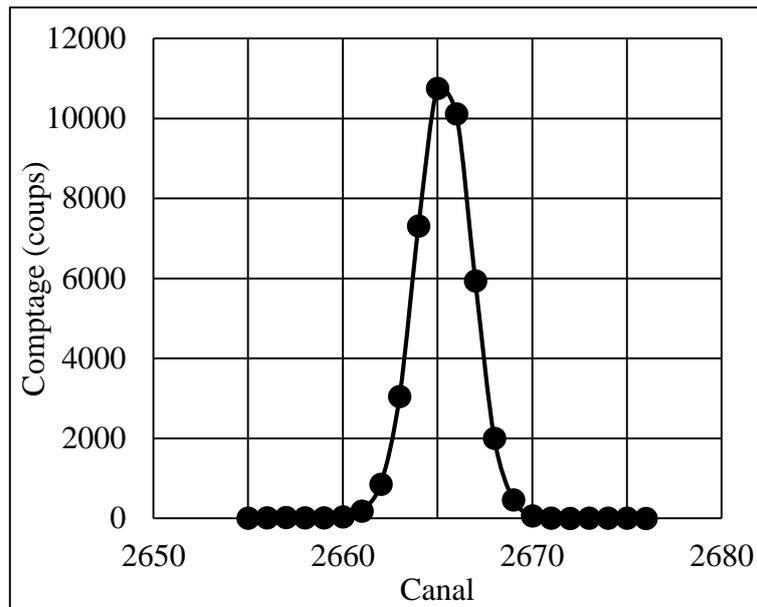


Figure III.4 : Pic Photoélectrique 1332.5 KeV typique bien défini à partir du spectre collecté.

L'approche adoptée dans l'ajustement de courbe consiste à supposer que les données suivent une certaine fonction qui contient un certain nombre de paramètres inconnus. Ensuite, les paramètres sont modifiés pour « s'adapter au mieux » aux données. Nous allons ajuster les pics photoélectriques dans nos spectres gamma et supposer que la photo pic a la forme d'une fonction gaussienne due au rayon gamma plus un bruit de fond. Nous limiterons notre ajustement aux données autour de la photo pic où ces hypothèses s'appliquent.

La racine de tous les programmes d'analyse de spectre est la capacité de localiser les pics de rayons gamma. Une mauvaise résolution empêchera deux photo pics proches de se distinguer et apparaîtra comme un grand pic additionné. Pour vérifier la résolution, le meilleur test serait de déterminer FWHM, FWTM et FWFm comme décrit ci-dessus.

La forme du pic avec un rapport compris dans les limites indiquées ci-dessus doit être considérée comme un critère nécessaire mais non suffisant. Si les rapports pour FWTM/FWHM et FWFm/FWHM sont inférieurs aux valeurs gaussiennes, alors quelque chose ne va pas. Il se peut très probablement que les comptages insuffisants aient été accumulés et que le résultat soit un accident statistique. D'autre part, si les rapports sont supérieurs à la valeur de pratique, cela peut indiquer que le pic a une taille-basse ou taille-haute. Cependant, des pics de mauvaise forme, ayant, par exemple, une taille-basse ou taille-haute peuvent toujours donner des rapports raisonnables, tout comme les pics qui sont élargis aux trois hauteurs de mesure.

Un rapport Pic-au-Compton faible se traduira par des pics mal définis sur le spectre qui peuvent être négligés lors de l'analyse spectrale. En pratique, un rapport Pic-au-Compton plus

grand signifie de meilleures statistiques de comptage dans des spectres complexes avec une capacité améliorée à mesurer des pics à faible énergie en présence d'un continuum Compton à partir de gammas à plus haute énergie. Une faible efficacité relative signifie que moins de comptages peuvent être accumulés sur le même temps de comptage, ce qui entraîne une erreur statistique de comptage plus élevée [36]

III.4.1 Efficacité d'absorption totale fepe

À partir de l'équation (2), l'efficacité d'absorption totale FEPE est déterminée à partir de sources d'activité connue :

$$\varepsilon_p(E) = \frac{N_p/t_m}{I_\gamma \times A_0 \times \Pi C_i} \quad (III.2)$$

Les mesures d'efficacité ont été effectuées pour 2 positions notées par G06 et G08, correspondantes aux distances source-détecteur 140 et 180 mm respectivement. Les temps d'acquisition des spectres ont été choisis en fonction des activités des sources pour maintenir l'incertitude statistique sur les surfaces des pics principaux en dessous de 1%. Le temps mort varie entre 1% et 3.2% en fonction de la position et la source elle-même. Les contributions de bruit de fond ont été soustraites des spectres de source standard correspondante. Les régions d'intérêt et les surface des pics ont été sélectionnés automatiquement et calculées avec GENIE 2000. La déconvolution de tous les spectres a été faite à l'aide du module INTERACTIVE PEACK FIT de GENIE2000

Tableau III.6 : Résultats expérimentales de l'étalonnage de l'efficacité avec les cinq sources références pour les 4 distances source-détecteur.

Source	Energie	ϵ	$\epsilon / \Delta\epsilon$ (%)
Ba-133	53,16	0,00307	2,09
	81	0,01156	1,36
	160,61	0,01642	1,47
	223,23	0,01373	1,59
	276,4	0,01134	1,23
	302,85	0,01062	1,23
	356,02	0,00932	1,05
	383,85	0,00894	1,21
Eu-152	121,78	0,01448	1,11
	244,7	0,01121	1,18
	295,94	0,01017	2,72
	344,28	0,00889	1,11
	367,79	0,00861	2,28
	411,12	0,00747	1,35
	443,96	0,00708	1,50
	586,26	0,00573	3,32
	678,62	0,00496	3,51
	778,9	0,00455	1,16
	867,38	0,00409	1,36
	964,08	0,00395	1,14
	1085,87	0,00373	1,25
	1089,74	0,00371	1,68
	1112,07	0,00361	1,17
	1212,95	0,00322	1,91
	1299,14	0,00308	1,73
	1408,01	0,00299	1,12

À l'issue des opérations de déconvolution de l'ensemble des spectres d'étalonnage, les surfaces de chaque pic sont relevées dans MO-EXEL pour réaliser les calculs nécessaires à la détermination des points de l'efficacité d'absorption totale FEPE du détecteur GC3018 suivant l'équation 4. La répartition des différents points mesurés expérimentalement de l'efficacité d'absorption totale FEPE en fonction de l'énergie est présentée dans le Tableau 6. La Figure 6 montre graphiquement les valeurs expérimentales des efficacités pour les deux positions. Chaque valeur expérimentale d'efficacité est accompagnée d'une incertitude standard, qui a été calculée comme la somme quadratique des incertitudes individuelles sur l'activité des radionucléides, la désintégration, les probabilités d'émission et les statistiques de comptage. À partir de ces valeurs expérimentales de FEPE, il devient possible d'établir une fonction mathématique de lissage exprimant l'efficacité d'absorption totale FEPE en fonction de l'énergie à partir du logiciel GENIE 2000. L'expression analytique de cette fonction mathématique de lissage de la courbe d'efficacité FEPE obtenue est :

$$\ln(\varepsilon_p(E)) = \sum_{n=1}^5 [\ln(E)]^n \quad (III.3)$$

Le résultat correspond à une courbe de lissage de l'efficacité d'absorption totale FEPE présentée par une fonction logarithmique polynomiale d'ordre 5 et calculée par l'algorithme APOLOG de GENIE 2000 en utilisant l'équation (5) et ces valeurs ont été utilisées comme données d'efficacité intrinsèque. Le tableau 7 montre les coefficients des polynômes décrivant les efficacités mesurées pour les deux positions.

III.4.2. Étalonnage en énergie

Genie2000 permet de visualiser en temps réel la sortie de l'analyseur multicanaux, à savoir un spectre avec en abscisse le numéro de canal et en ordonnée le nombre de coups dans ce canal. De manière à pouvoir identifier les désintégrations radioactives mises en jeu, le spectre doit être étalonné en énergie. Cela consiste à établir une relation polynômiale entre le numéro de canal et l'énergie déposée dans le cristal. Le spectre obtenu est alors un ensemble de pics distribués en énergie se rajoutant à un fond. L'énergie du pic correspond à l'énergie du photon incident, ce qui permet d'identifier le radioélément émetteur gamma.

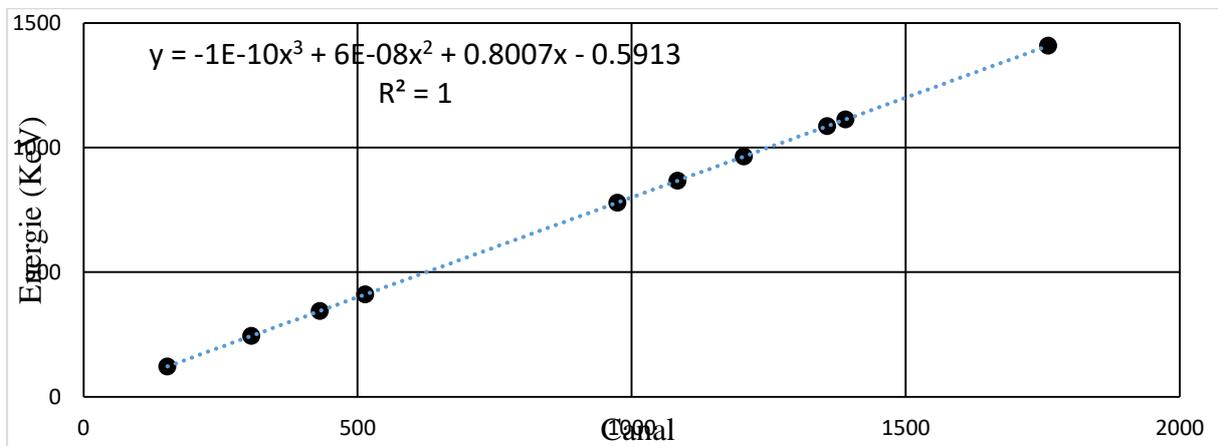


Figure III.5 : Courbe d'étalonnage en énergie pour le détecteur GC3018 (La pente égale à 0.5 KeV/Canal)

Cet étalonnage est fait à l'aide d'une source d'étalonnage d'Eu-152. Le résultat obtenu est présenté par la figure 3 ou la formule polynomiale de lissage (fitting) de l'énergie en fonction du numéro du canal est calculée par un algorithme approprié de GENIE2000.

Tableau III.7 : Coefficients des polynômes d'ajustements des fonctions des efficacités d'absorption totales pour les deux positions.

Coefficient	Valeurs
a_0	-1865
a_1	1965
a_2	-856.6
a_3	203.2
a_4	-26.79
a_5	1.877
a_6	-0.05455

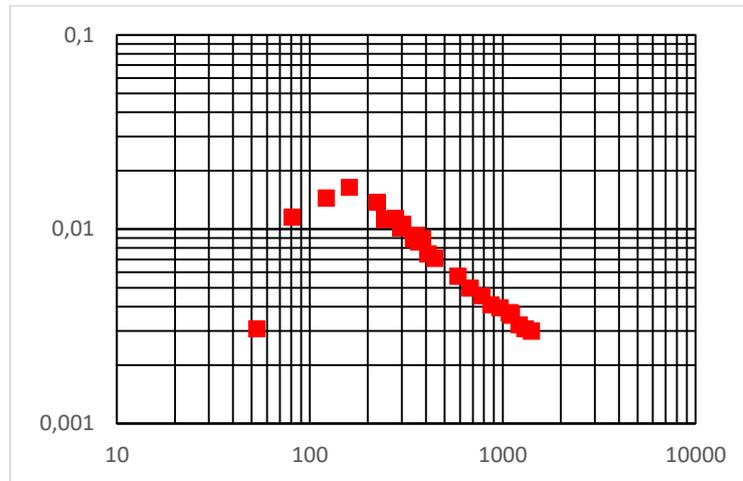


Figure III.6 : Valeurs expérimentales de l'efficacité d'absorption totale FEPE (Échelle LOG-LOG).

III.5. Le temps mort

L'électronique peut introduire des limitations sur le taux de comptage à cause des effets de temps mort et des problèmes liés à la collection de charge. Le temps mort correspond au temps minimal pour séparer deux évènements qui vont être transformés en deux signaux électriques distincts. Si une particule interagit avec le cristal alors que le signal délivré par une interaction précédente est en cours d'acquisition, elle ne donne lieu à aucun comptage car l'entrée est bloquée électroniquement [Courtine 2007].

Le temps mort est relié à une limitation de l'électronique : les opérations telles que la conversion de la charge collectée aux électrodes en un signal électrique, l'amplification et le filtrage de ce signal nécessitent un temps assez long pendant lequel le signal est traité, sachant qu'un seul signal peut être traité à la fois.

Les pertes de comptage liées au temps mort sont d'autant plus importantes que l'activité de la source est grande, car cela augmente la probabilité pour que deux gammas interagissent avec le cristal dans un laps de temps inférieur au temps mort. Le logiciel d'analyse de spectre fournit donc deux informations : le temps « réel » qui correspond au temps total pendant lequel les mesures ont été effectuées et le temps « actif » qui prend en compte le temps mort (le temps actif étant plus petit que le temps réel)

III.6. Le bruit de fond

Le bruit de fond est le comptage ou l'enregistrement d'un spectre dans des conditions normales d'utilisation de la chaîne de mesure en l'absence de la source dont on veut mesurer le rayonnement on définit aussi comme étant le spectre enregistré à partir d'un détecteur, seul ou avec un conteneur vide ou contient de l'eau pure la connaissance de ce bruit de fond est utile pour améliorer la justesse des résultats de mesure de l'activité notamment dans le cas des traces. Les composantes du bruit de fond ont assentiment pour origine le rayonnement cosmique, la radioactivité des radionucléides présents dans les matériaux terrestres (familles d'U235, U238 et Th232) et la radioactivité artificielle qui est présentée dans les matériaux constituant le spectromètre ou dans son environnement immédiat. Après l'ajustement des pics, il est nécessaire de soustraire la contribution du bruit de fond dans le pic et d'en tenir compte dans le calcul d'incertitude globale [Lyoussi, 2010].

III.7. Mesure de la radioactivité des échantillons prélevés de l'environnement

III.7.1. Résultats et discussion

Ce qui est important en spectrométrie γ , après l'identification des pics d'un spectre donné, est de relier leurs aires au quantité des radionucléides qui se trouvent dans l'échantillon. Le lien entre ces deux paramètres doit être lié à la géométrie de l'échantillon et du détecteur d'une part, et les caractéristiques de la chaîne de mesure d'autre part. La méthodologie du travail suivi dans cette partie est résumée dans les étapes :

III.7.2. Préparation des échantillons

Les échantillons trois utilisés sont prélevés de différents sites :

L'échantillon **A** : ciment noir de M'Sila.

L'échantillon **B** : Le brique rouge de Medjana BBA.

L'échantillon **C** : le sable de Boussaâda.



Figure III.7 : Les trois l'échantillon A B et C.

Après avoir réglé notre chaîne de mesure et avoir choisi les meilleurs para- mètres de la chaîne, nous avons commencé les mesures quantitatives de chaque échantillon.

Le schéma de notre manipulation est illustré par la figure III.8 :

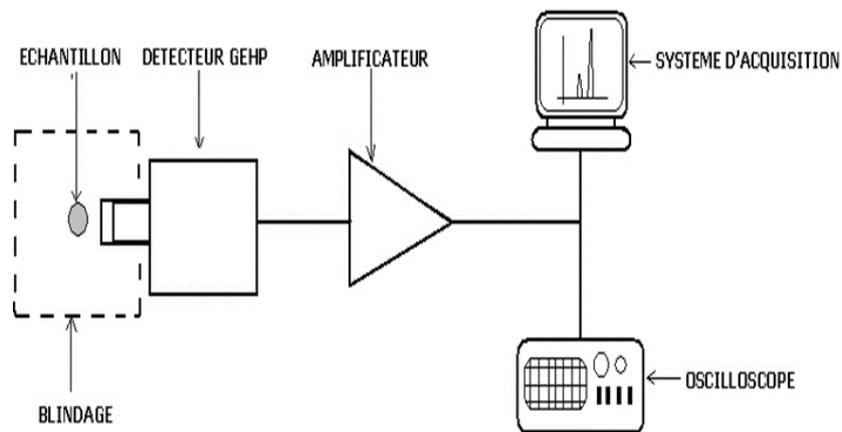


Figure III.8 : Schéma de la chaîne de spectrométrie gamma

D'abord, on commence par la mesure du bruit de fond pendant 180000 s (50 heures) et puis pour le même temps de comptage on mesure les échantillons l'un après l'autre.

$$A_S = \frac{N(S-B)}{t_C \times p_\gamma \times \epsilon \times C \times M} \quad (III.4)$$

A_S : Activité spécifique de l'échantillon.

S : La surface sous le pic.

B : Bruit de Fond.

M : la masse des échantillons en Kg.

t_c : Temps de comptage, est égale à 180000 s (50heurs).

p_γ : Probabilité d'émission des rayonnements γ .

ε : Efficacité absolue de notre détecteur.

III.8. Calcul d'erreurs

III.8.1. L'incertitude sur cette formule est obtenue par

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \rho \gamma}{\rho \gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2} \quad (III.5)$$

Où $\Delta t = 0 / \Delta m = 10^{-3}g$

Les résultats obtenus de l'activité spécifique des éléments dans les différents échantillons sont donnés par les tableaux suivants :

Tableau III.8 : Échantillon A ciment noir M'Sila

Energie (keV)	Élément	P(%)	T ^{1/2}	Origine	AS (Bq/kg)	Moyenne (Bq/kg)
351	²¹⁴ Pb	35.6	26.8min	²³⁸ U séries	2377,84±26,68	1908.49±25.51
609,3	²¹⁴ Bi	45.49	19.9 min		3320,54±48,00	
63,29	²³⁴ Th	3.665	24.1y		27,11±1,846	
911,196	²²⁸ Ac	26.2	6.13h	²³² Th series	56,89±56,89	715.24±25.97
727,1	²¹² Bi	6.65	1.01h		406,34±32,86	
583,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1min		2364,04±68,00	
84,373	²²⁸ Th	1.22	1,9 Y		33,71±2,401	
1460,8	⁴⁰ K	10.67	1.28×10 ⁹ y	Primordial	140,25±2,88	140.25±2.88

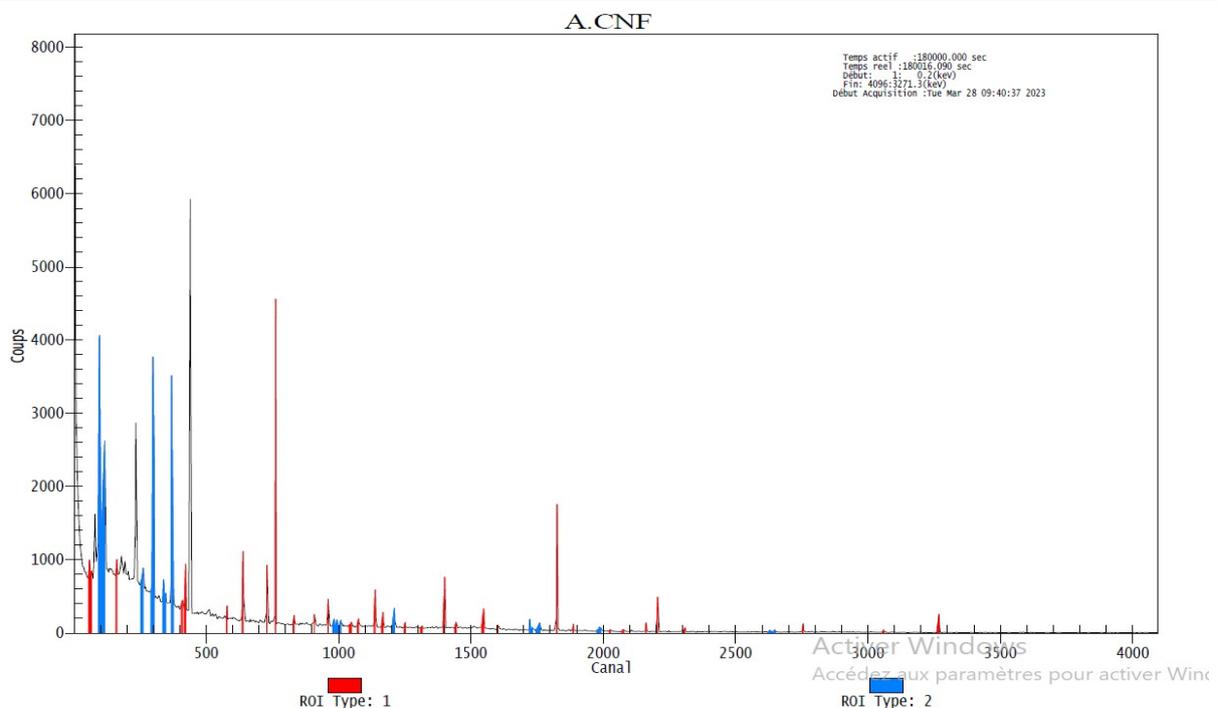


Figure III.9 : Spectre A de ciment noir M'Sila .180000 s (50heurs)

Tableau III.9 : Échantillon B le brique rouge de Medjana BBA

Energie (keV)	Elément	P(%)	T _{1/2}	Origine	AS (Bq/kg)	Moyenne (Bq/kg)
351	²¹⁴ Pb	35.6	26.8 min	²³⁸ U séries	2847,06±30,12	2263.39±31.87
609,3	²¹⁴ Bi	45.49	19.9 min		3908,68±52,78	
63,29	²³⁴ Th	3.665	24.1 y		34,43±2,596	
911,196	²²⁸ Ac	26.2	6.13 h	²³² Th séries	369,47±5,74	4647.23±53.53
727,1	²¹² Bi	6.65	1.01 h		2484,04±67,61	
583,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1 min		15589,38±209,59	
84,373	²²⁸ Th	1.22	1,9 Y		145,77±6,272	
1460,8	⁴⁰ K	10.67	1.28×10 ⁹ y	Primordial	927,36±13,91	927.36±13.9

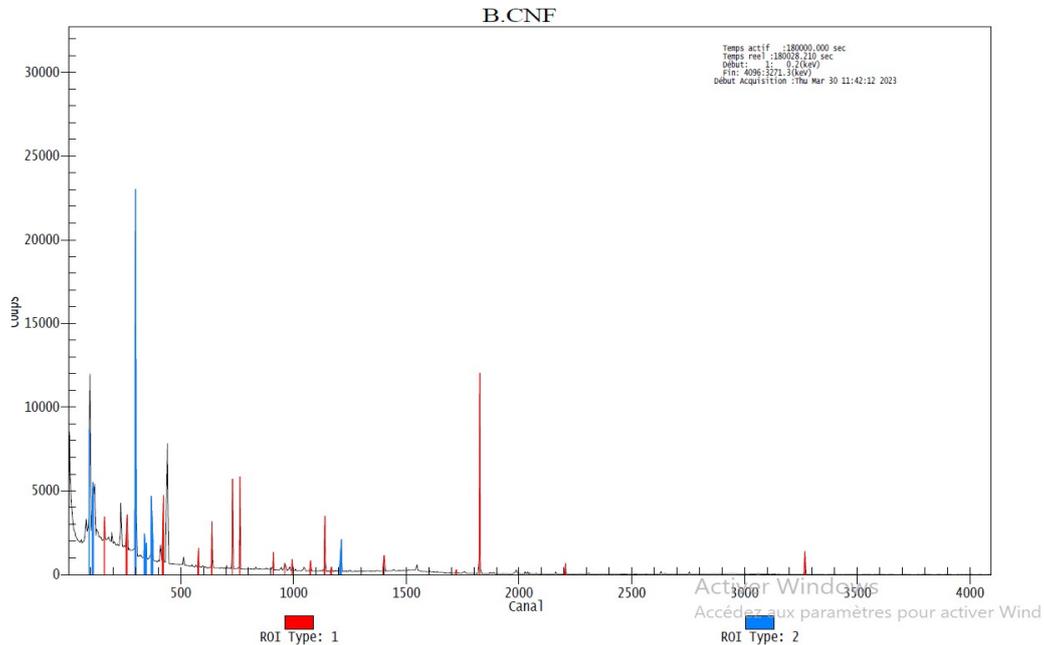
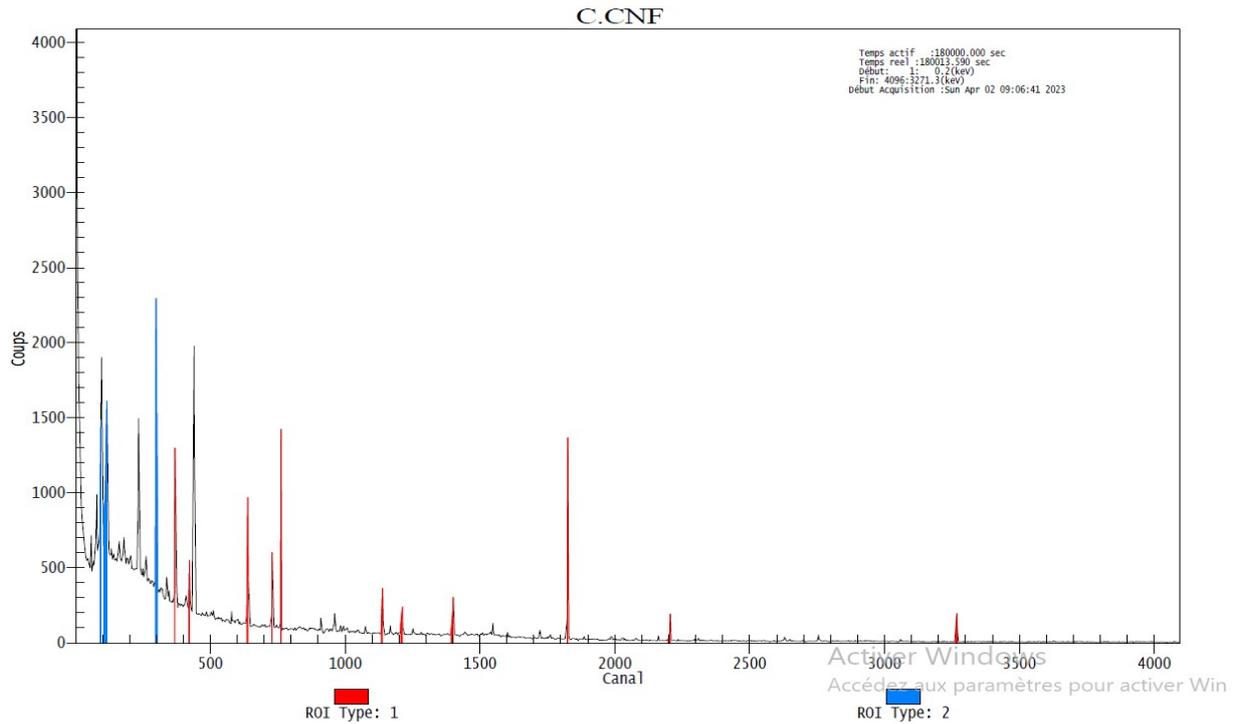


Figure III.10 : Spectre de B le brique rouge de Medjana BBA. 180000 s (50heurs)

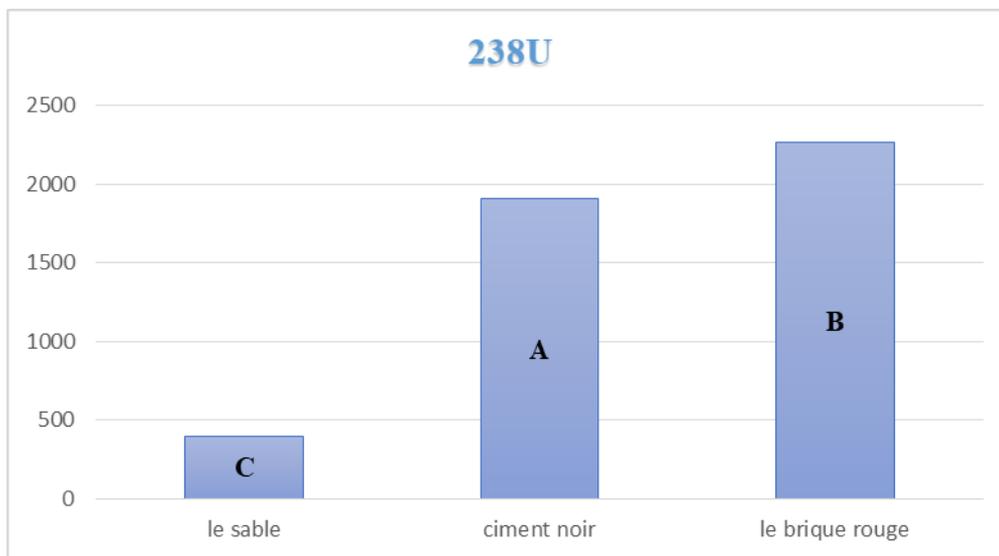
Tableau III.10 : Échantillon C le sable de Boussaâda

Energie (keV)	Elément	P(%)	T _{1/2}	Origine	AS (Bq /kg)	Moyenne(Bq/kg)
351	²¹⁴ Pb	35.6	26.8 min	²³⁸ U séries	218,48±6,25	401.29±6.80
609,3	²¹⁴ Bi	45.49	19.9 min		584,10±13,44	
911,196	²²⁸ Ac	26.2	6.13 h	²³² Th series	23,25±1,034	222.42±10.66
727,1	²¹² Bi	6.65	1.01 h		170,43±18,45	
583,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1 min		473,58±39,61	
1460,8	⁴⁰ K	10.67	1.28×10 ⁹ y	Primordial	72,13±1,59	72.13±1.59

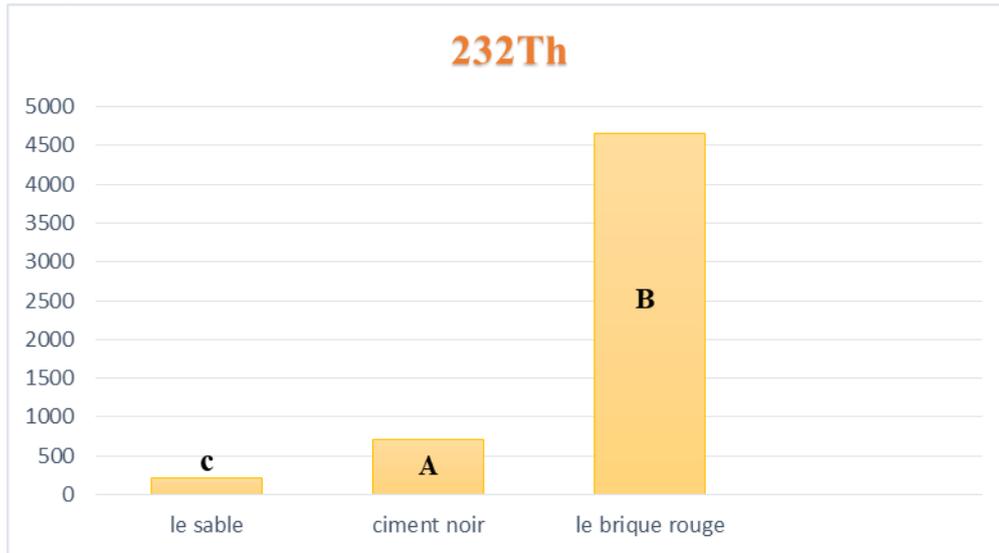


FigureIII.11 : Spectre de C le sable de Boussaâda. 180000 s (50heurs)

Ces concentrations sont présentées sur les figures (26.27.28). On remarque que les concentrations de ^{238}U , ^{40}K et ^{232}Th sont inférieures à celle du ^{40}K dans tous les matériaux de construction



FigureIII.12 : Les activités spécifiques du ^{232}U dans les échantillons de sol



FigureIII.13 : Les activités spécifiques du **232 Th** dans les échantillons de sol



FigureIII.14 : Les activités spécifiques du **40 K** dans les échantillons de sol

En ce qui concerne la comparaison mutuelle entre les deux échantillons, il n'y a pas de changement drastique des concentrations d'activité dans les deux espèces.

Planchers. Cependant, une légère tendance à la hausse a été observée dans l'activité mesurée dans chaque échantillon. (Voir la figure III.15).

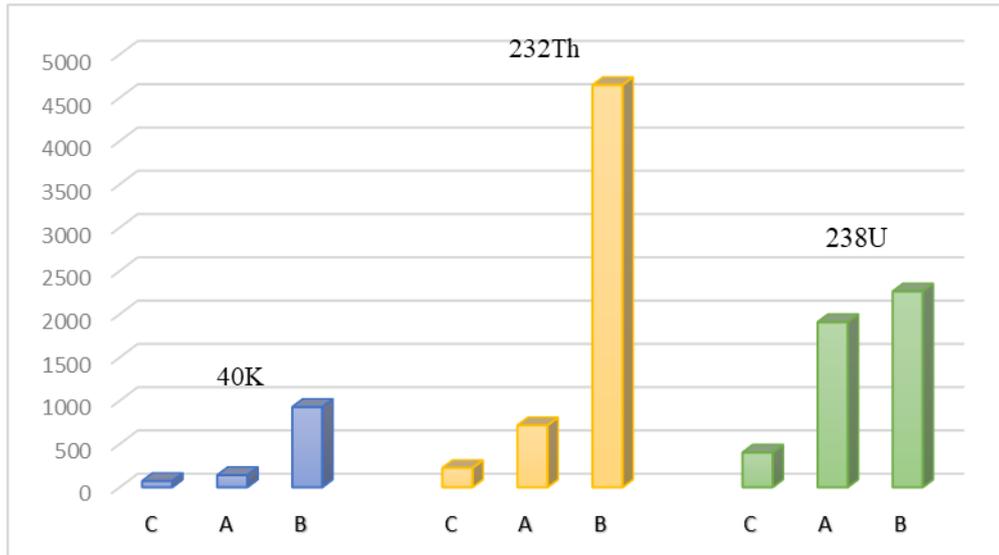


Figure III.15 : Comparaison de la radioactivité des matériaux utilisés pour trois échantillons

III.9. Analyse et discussion

D'après l'analyse que nous avons effectuée, nous avons constaté que le pourcentage de radioactivité diffère d'un échantillon à l'autre. Le tableau (8.9.10) résume les résultats des mesures des concentrations de radionucléides naturels (U^{238} , K^{40} , Th^{232}) dans le sol prélevé échantillons

Où l'on remarque que les valeurs de K^{40} dans l'échantillon C (le sable de Boussaâda) sont inférieures aux échantillons A (ciment noir de M'Sila) et B (La brique rouge de Medjana BBA), Et la valeur U^{238} dans les trois échantillons est très active, bien qu'elle varie d'un échantillon à l'autre.

Quant à la famille Th^{232} , nous avons constaté que dans chaque échantillon le taux de rayonnement était élevé, ce qui indique la présence d'un pourcentage important de phosphate dans les roches.

III.9.1 Comparaison des activités dans les sols analysés avec celles au niveau international

En se basant sur le rapport de l'UNSCEAR en 2000 concernant les valeurs au niveau mondial des activités du Potassium-40, de la famille de l'Uranium-238 et celle du Thorium-232 des sols, présentées dans le Tableau suivant :

Tableau III.11 : Comparaison des activités du ^{238}U , ^{40}K et ^{232}Th dans les trois échantillons avec d'autres pays

Pays	Echantillon	Activité (Bq/kg)			References
		^{238}U	^{232}Th	^{40}K	
Algérie	Echantillon A	1908.49	715.24	140.25	Présent travail Lamghari et al., 2004 Lamghari et al., 2004 Lamghari et al., 2004 Becegato et al.(2008) Becegato et al.(2008) Ahmed and El Arabi (2005).
	Echantillon B	2263.39	4647.23	927.36	
Maroc	Echantillon C	401.29	222.42	72.13	
	Echantillon B	144			
Brésil	Echantillon C	121	65		
	Fertilisant 1	2150	26		
Egypte (Qena)	Fertilisant 2	647.6	753.9	603	
	Fertilisant 3				
	Fertilisant NPK	366	66.7	4	
	Fertilisant Phosphaté				

Tableau III.12 : Activités spécifiques du ^{40}K , des familles de ^{238}U et du ^{232}Th dans les sols au niveau international en (Bq.kg⁻¹)

Les valeurs d'activité	Activités des radionucléides dans les sols (Bq.kg ⁻¹)		
	40 K (UNSCEAR)	Famille de ^{238}U (OFSP)	Famille du ^{232}Th (OFSP)
Minimales	112	1857	29.33
Maximum	565	4062.16	151.27

Le tableau **III.12** montre le niveau de radionucléides naturels dans le sol dans les deux organisations, l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) et l'OFSP (Office fédéral de la santé publique), en comparant les données entre les échantillons étudiés dans le monde entier. Nous notons que les valeurs de ^{40}K sont dans la fourchette inférieure, et que les valeurs de ^{238}U coïncident à peu près avec les valeurs des deux organisations, tandis que les valeurs de ^{232}Th sont légèrement sur le côté supérieur à deux organisations, l'UNSCEAR et l'OFSP.



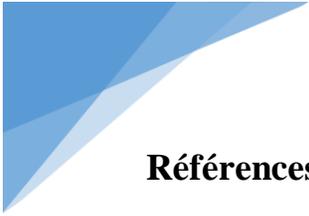
CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Ce travail a pour but de déterminer qualitativement et quantitativement la radioactivité de l'environnement et particulièrement celle d'origine naturelle. Nous avons utilisé pour cela, une technique très efficace qui est la spectrométrie gamma. Cette dernière est considérée comme étant une technique très puissante pour déterminer l'activité spécifique de chaque radionucléide naturel ou artificiel. Afin d'effectuer les mesures concernant les activités spécifiques des échantillons,

Nous avons tout d'abord réalisé un ensemble de mesure pour déterminer les différentes caractéristiques de notre chaîne de mesure, il s'agit : du temps mort, la résolution en énergie et la linéarité intégrale et différentielle. Les résultats de ces mesures ont montré que le temps mort et la résolution en énergie dépendent fortement du gain de conversion de la carte et du temps de mise en forme de l'amplificateur.

Concernant les mesures de la radioactivité des trois échantillons prélevés de l'Est de l'Algérie, nous avons constaté la présence, dans tous les spectres, les éléments des deux familles radioactives ^{238}U et ^{232}Th , ainsi que l'élément primordial ^{40}K . Les valeurs de ^{40}K sont dans la fourchette inférieure, et que les valeurs de ^{238}U coïncident à peu près avec les valeurs des deux organisations, l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) et l'OFSP (Swiss Federal Office of Public Health), tandis que les valeurs de ^{232}Th sont légèrement sur le côté supérieur à deux organisations, l'UNSCEAR et l'OFSP. Nous dirons que les matériaux de construction qui ont été étudiés peuvent être utilisés pour s'assurer que le ciment, la brique rouge et le sable ne représentent pas de risques radioactifs pour la santé des travailleurs et des personnes. Et cette étude a montré que ce matériau peut être considéré comme un produit.



Références bibliographiques

- [1] Nuclear Fuel Cycle and Materials Section International Atomic Energy Agency
Wagramer Strasse 5 P.O. Box 100 A-1400 Vienna, Austria
- [2] <http://www.andra.fr/fr/radioactivite/decrois.htm>, mai 2006
- [3] UNSCEAR, “Sources and effects of ionizing radiation,” New York, 2000
- [4] P. A. Karam and B. P. Stein, Radioactivity. New York: Chelsea House, 2009
- [5] E. Saadi, A. Azbouche, and F. Benrachi, “Spatial distribution of natural radioactivity and statistical analyses of radioactive variables in Algerian ceramic products,” *J. New Technol. Mater.*, vol. 10, no. 2, pp. 47–54, 2020
- [6] J. C. Gosse and F. M. Phillips, “Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application,” *Quat. Sci. Rev.*, vol. 20, pp. 1475–1560, 2001.
- [7] A. S. Paschoa and F. Steinhausler, Technologically enhanced natural radiation. United Kingdom: Elsevier Ltd, 2010
- [8] Abraham, Aglietta, Aguirre, et al. Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* 523, 50–95 (2004)
- [9] P. A. Karam and B. P. Stein, Radioactivity. New York: Chelsea House, 2009
- [10] M. ELHASNI, Introduction au physique nucléaire, OPU, 1982.
- [11] [Risler, 1974] Risler, J. J. la radioactivité des eaux thermo-minérales, service géologique régional massif central, 1974, pp1.
- [12] B. W. Hurley, “Natural radioactivity in the geologic environment,” in *Environmental management program*, 2009
- [13] R. Lauf, Introduction to radioactive minerals. Pennsylvania: Schiffer Publishing Ltd, 2008
- [14] “Nuclear Forensic Search Project.” https://metadata.berkeley.edu/nuclear-forensics/Decay_Chains.html
- [15] B. W. Hurley, “Natural radioactivity in the geologic environment,” in *Environmental management program*, 2009, p. 17.
- [16] Décret no 2018-434 du 4 juin 2018 portant diverses dispositions en matière nucléaire, JORF n°0127 du 5 juin 2018

- 
- [17]. Benaïssa K., Les radiations naturelles des matériaux de construction : Ciment de Beni Sa. Mémoire de master en chimie. Université Aboubekr BELKAID ,11 Septembre 2013.
- [18] Kebir H., Concentration de l'uranium-238 dans les eaux thermales à l'est algérien. Thèse de Doctorat de université ferhat abbas-setif ufas 25 / 11 / 2017
- [19] M. LEFORT, Les radiations nucléaires (troisième édition), Presses Universitaires de France, paris, 1969
- [20] Kebir H., Concentration de l'uranium-238 dans les eaux thermales à l'est algérien. Thèse de Doctorat de université ferhat abbas-setif ufas 25 / 11 / 2017
- [21] M. LEFORT, Les radiations nucléaires (troisième édition), Presses Universitaires de France, paris, 1969
- [22] IUPAC, (1997), Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Online corrected version: (2006–) "Resolution in optical spectroscopy".
- [23] Gordon L. Gilmore, Spectrométrie Pratique et Gamma Ray, Deuxième Édition, John Wiley & Sons, Chichester, 2008.
- [24] IEEE Standard Association, (1996), IEEE Standard 325-1996, "Standard Test Procedures for Germanium Gamma-ray Detectors".
- [25] De Felice, P., Angelini, P., Fazio, A., Biagini, R., 2000. Fast procedures for coincidence summing correction in γ -ray spectrometry. *Appl.Radiat.Isot.* 52, 745-752.
- [26] Abbas, M.I., 2006. Analytical calculations of the solid angles subtended by a well-type detector at point and extended circular sources. *Appl Radiat Isot.* 64, 1048-1056.
- [27] Arnolda, D., Sima, D., 2004. Extension of the efficiency calibration of germanium detectors using the GESPECOR software, *Appl Radiat Isot.* 61, 117 – 121.
- [28] Garcia-Talavera, M., Neder, H., Daza, M.J., Quintana, B., 2000. Towards a proper modeling of detector and source characteristics in Monte Carlo simulations *Appl Radiat Isot.* 52, 777 – 783
- [29] Hemler, R.G, 2003. Modern tools for precise γ -ray spectrometry with Ge detectors. *Nucl. Instrum. Methods in Physc. Res.* 505, 297 – 305.
- [30] Karamanis, D., Lacoste, V., Andriamonje, S., Barreau, G., Petit, M., 2002. Experimental and simulated efficiency of a HPGe detector with point-like and extended sources. *Nucl. Instrum. Methods in Physc. Res. A.* 487, 477 – 487.

- 
- [31] Z.R. Shi, K. Xu, L.H. Li, Standard Source of High Energy γ -Ray (China Institute of Atomic Energy, Beijing, 2008), pp. 206–210.
- [32] IUPAC, (1997), Compendium of Chemical Terminology, 2nd ed. (the "Gold Book"). Online Corrected version: (2006–) "Resolution in optical spectroscopy".
- [33] Gordon L. Gilmore, Spectrométrie Pratique et Gamma Ray, Deuxième Édition, John Wiley & Sons, Chichester, 2008.
- [34] IEEE Standard Association, (1996), IEEE Standard 325-1996, "Standard Test Procedures for Germanium Gamma-ray Detectors".
- [35] Update of X Ray and Gamma Ray Decay Data Standards For Detector Calibration and Other Applications, Vol. 1, – Recommended Decay Data, High Energy Gamma Ray Standards and Angular Correlation Coefficients, – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2007.
- [36] Michael F. L'Annunziata, Handbook of Radioactivity Analysis, Third Edition, Elsevier, Amsterdam, 2012.
- [Lyoussi, 2010]. Lyoussi A., Mesure nucléaire non destructive dans le cycle du combustible, Techniques de l'Ingénieur, 2010.
- [Courtine 2007]. Etalonnage d'un spectromètre gamma en vue de la mesure de la radioactivité naturelle, Mesures expérimentales et modélisation par techniques de Monte-Carlo. Thèse de docteur d'université soutenu mars 2007 Université Blaise Pascal France.

Résumé

Le développement de la spectrométrie a commencé avec le développement de la science et de la technologie nucléaires pour répondre aux besoins de contrôle, de caractérisation et d'analyse des matières radioactives. Elle est dite « non destructive » car elle respecte l'intégrité de l'objet à analyser.

Le but de cette étude est de déterminer qualitativement et quantitativement la radioactivité naturelle du ciment (Bordj Bou Arreridj) et des briques rouges (Bordj Bou Arreridj) (Sable du Bou Saada) dans l'est algérien à l'aide de la technique de spectrométrie gamma. Nous dirons que le sol étudié peut être utilisé sans restriction.

ملخص

بدأ تطوير قياس الطيف مع تطوير العلوم والتكنولوجيا النووية لتلبية احتياجات التحكم في المواد المشعة وتوصيفها وتحليلها. ويقال انه غير مدمر لأنه يحترم سلامة الكائن المراد تحليله. والهدف من هذه الدراسة هو التحديد النوعي والكمي للنشاط الاشعاعي الطبيعي للإسمنت (برج بوعريريج) والطوب الأحمر (برج بوعريريج) والرمل (بوسعادة). في شرق الجزائر بتقنية قياس طيف جاما سنقول إنه يمكن استخدام التربة المدروسة دون قيود.

Summary

The development of spectrometry has begun with the development of nuclear science and technology to meet the needs for monitoring, characterization and analysis of radioactive materials. It is called "non-destructive" because it respects the integrity of the object to be analyzed.

The purpose of this study is to determine qualitatively and quantitatively the natural radioactivity of cement (Bordj Bou Arreridj) and red bricks (Bordj Bou Arreridj) (Bou Saada sand) in eastern Algeria using gamma spectrometry technique. We will say that the studied soil can be used without restriction

ANNEXES

ANNEXES

ANNEXES

Types de minerais de phosphate

Le phosphate minéral d'apatite de Madagascar



Brazilianite Conselheiro Pena, Brésil



ANNEXES

Wavellite, minerai de phosphate.



Triplite - Alchuri, Shigar Valley, Baltistan, Pakistan.



ANNEXES

Calcul des concentrations de ^{232}Th et ^{238}U et ^{40}K dans les différents échantillons

Figure 1 : Les activités spécifiques du ^{238}U dans les échantillons de sol

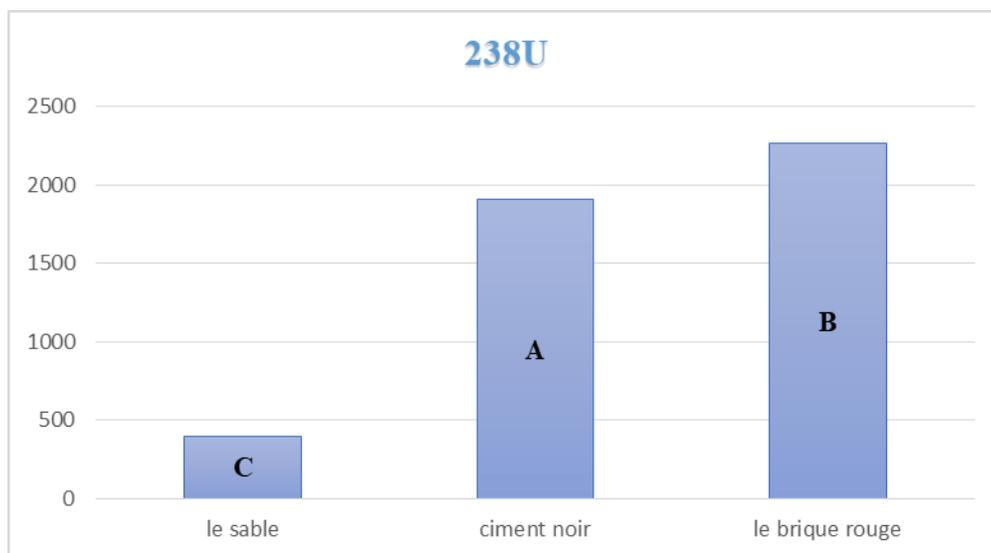
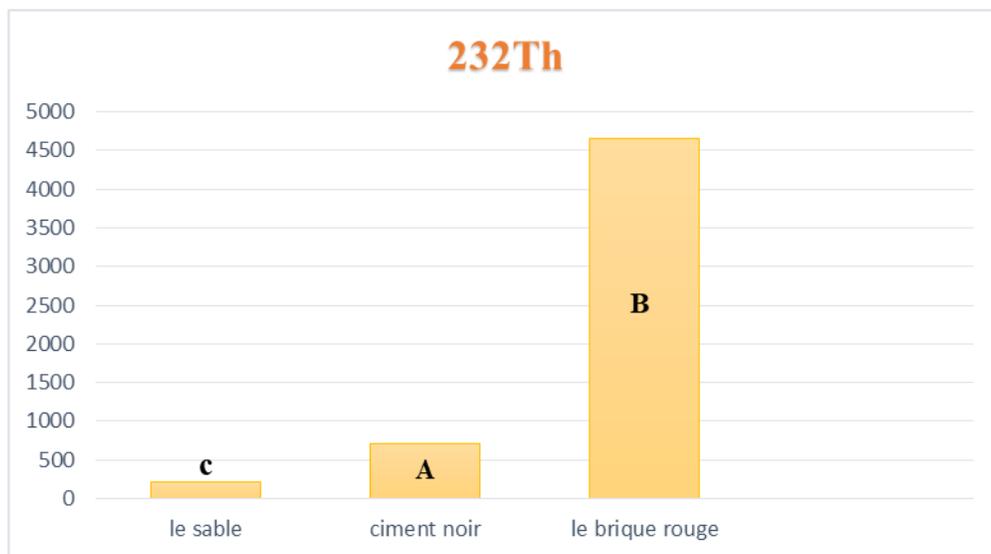


Figure 2 : Les activités spécifiques du ^{232}Th dans les échantillons de sol



ANNEXES

Figure3 : Les activités spécifiques du **40 K** dans les échantillons de sol

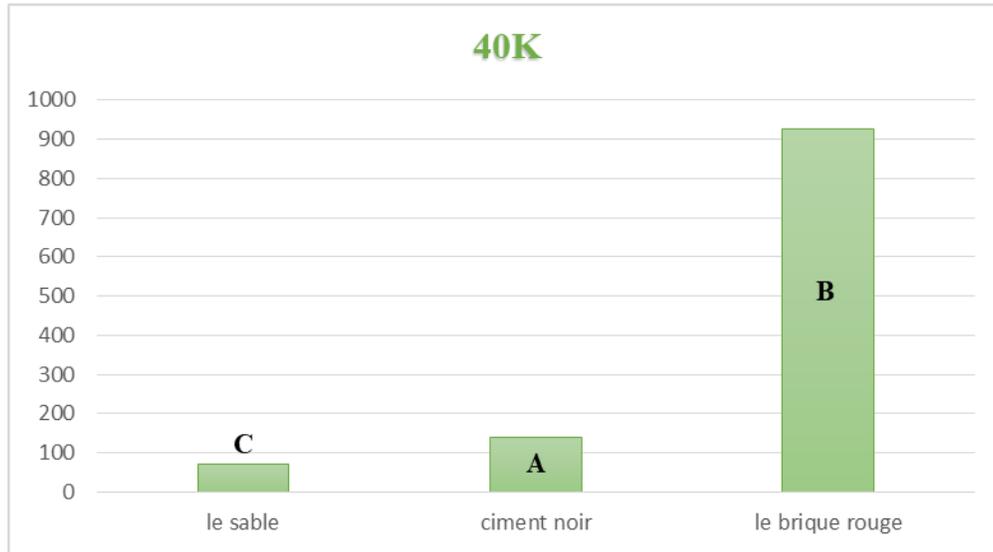
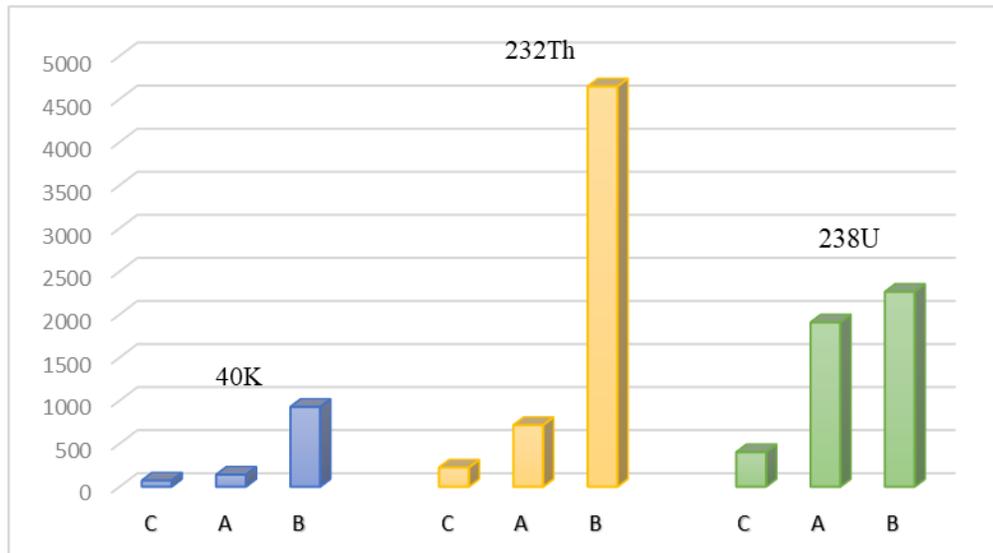


Figure 4 : Comparaison de la radioactivité des matériaux utilisés pour trois échantillons



ANNEXES

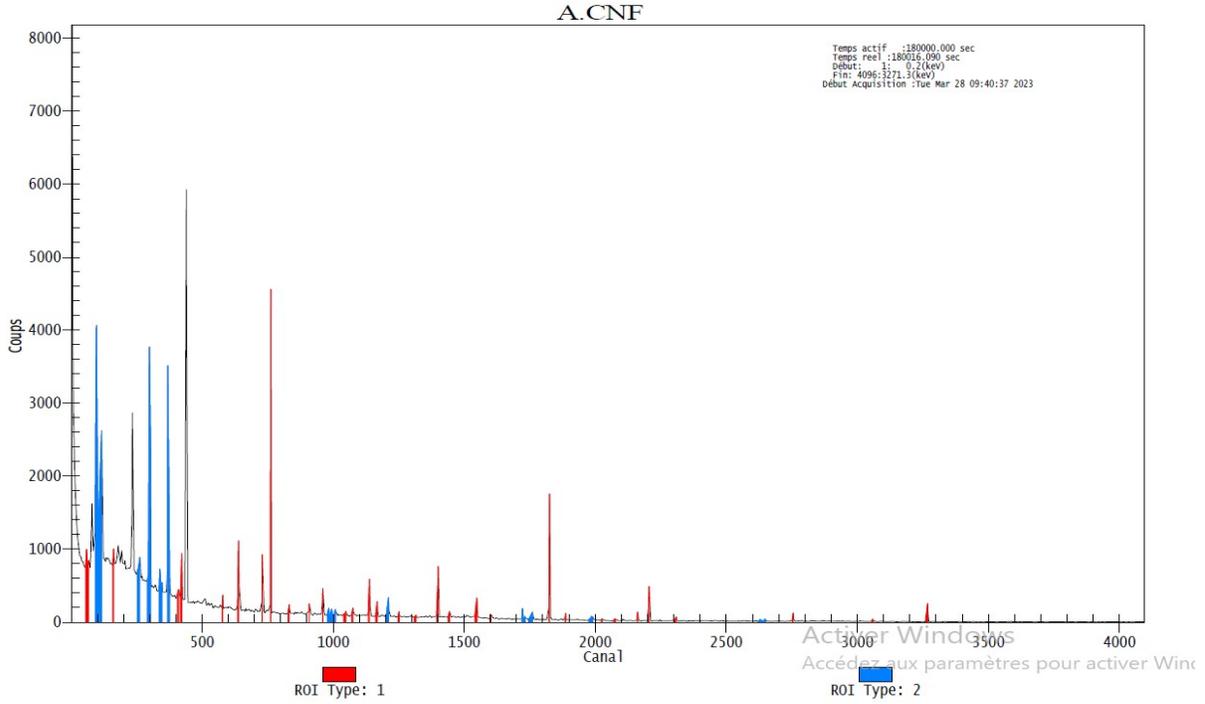


Figure 5 : Spectre A de ciment noir M'Sila .180000 s (50heurs)

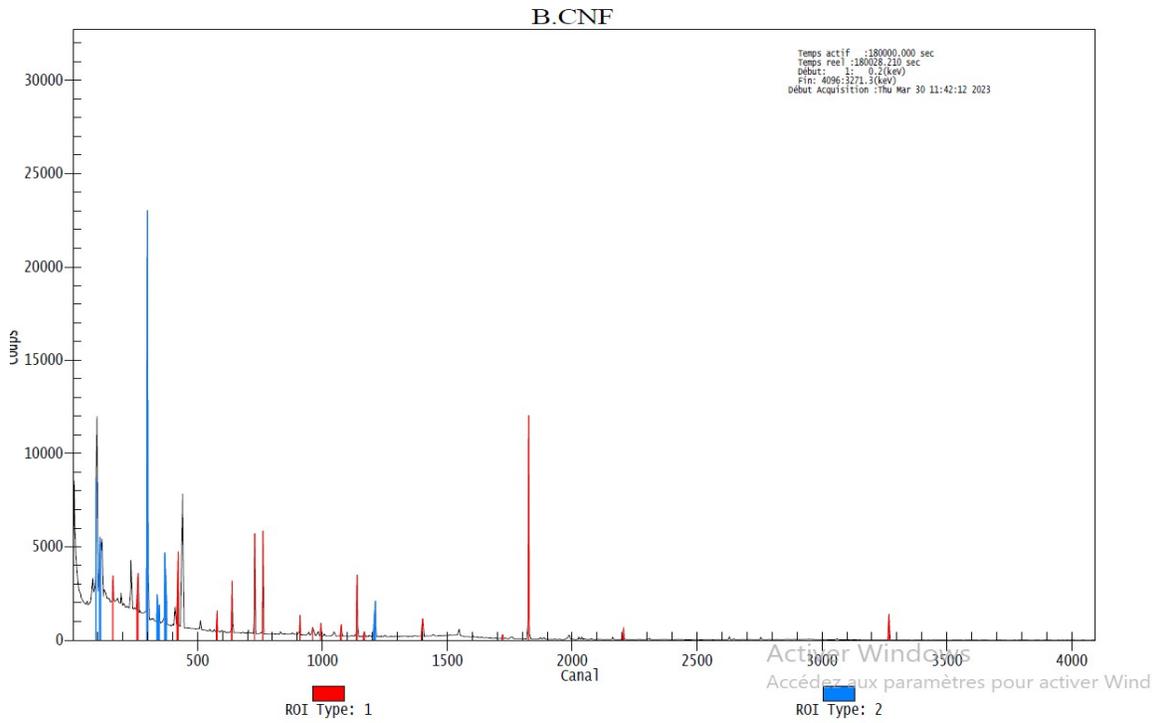


Figure 6 : Spectre de B le brique rouge de Medjana BBA. 180000 s (50heurs)

ANNEXES

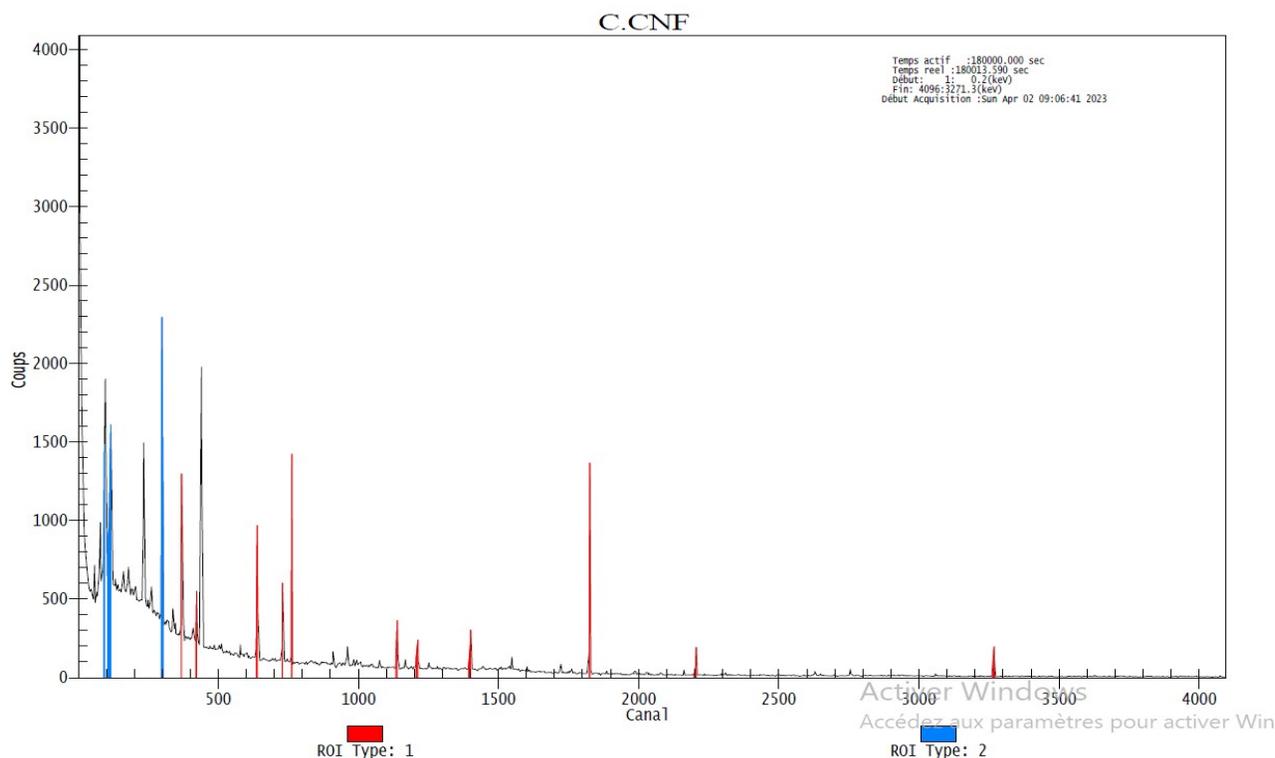


Figure 7 : Spectre de C le sable de Boussaâda. 180000 s (50heurs)

Radioactivité (radioactivity) : phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux instables – du fait d’un excès ou d’un défaut de neutrons – se désintègrent en dégageant de l’énergie sous forme de rayonnement, pour se transformer en noyaux atomiques plus stables.

Radionucléide : Nucléide radioactif. Nom donné aux atomes d’éléments radioactifs naturels ou artificiels

UNSCEAR : Comité scientifique des nations Unies pour l’étude des effets des rayonnements ionisants (**United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation**).

L’OFSP : Office fédéral de la santé publique.

1nGy = 1Sv

Demi-vie : durée nécessaire à la diminution de la moitié de l’activité d’un radionucléide.

Activité (activity) : nombre de désintégration par unité de temps.

L’échantillon A : ciment noir de Bordj Bou Arreridj

L’échantillon B : La brique rouge de Medjana BBA

L’échantillon C : le sable de Boussaâda

ANNEXES

Bq /Kg : Le becquerel / kilogramme

Bq : Le **becquerel** (symbole : **Bq**) est l'unité dérivée du Système international d'unités (SI) pour l'activité d'une certaine quantité de matière radioactive¹, c'est-à-dire le nombre de désintégrations qui s'y produisent par seconde. Il est homogène à l'inverse de la seconde (s^{-1}).

FWHM : Une **largeur à mi-hauteur** (LMH, sigle rarement utilisé, ou, en anglais full width at half maximum, FWHM), formule rapide pour largeur à mi-hauteur du maximum du pic, est une expression de l'amplitude d'une fonction