

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté de Science et de la Technologie

Département Science de la Matière

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم علوم المادة



Mémoire De Fin D'études

THÈME

**Utilisation des techniques
nucléaires pour l'étude de la pollution
environnementale**

Soutenue le : 23/06/2026

Présenté par : - MADADI Soumaya

Devant le jury :

Président :	Dr. REGAIGUI Elgasmi	M.A.A. Université de Bordj Bou Arreridj
Rapporteur :	Dr. KEBIR Hadda	M.C.A. Université de Bordj Bou Arreridj
Examineur	Dr. MIHOUBI Karima	M.C.B. Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2025-2026

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciement

Je tiens tout d'abord à remercier Allah le Tout-Puissant pour m'avoir donné la force et la patience nécessaires à la réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements à Mme KEBIR HADDA, MCA, rapporteur de ce mémoire, pour son encadrement, sa disponibilité, ses précieux conseils et son soutien tout au long de ce travail.

Je remercie également les membres du jury :

- **Mme MIHOUBI KARIMA, MCB, Examinatrice ;**
- **M. REGAIGUI Elgasmi, MAA, Président ;**

pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce mémoire.

Mes remerciements vont aussi à tous mes enseignants ainsi qu'à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

Remerciements



Dédicace

Je dédie ce travail à mes chers parents, qui ont toujours été une source d'amour, de soutien et d'encouragement. Leur confiance et leurs sacrifices ont été la clé de tous mes succès.

À toute ma famille, et plus particulièrement à ma sœur Hanan, pour leur amour, leur soutien et leurs précieux conseils tout au long de mon parcours.

À mes chers amis, qui ont partagé avec moi des moments de joie et des moments de doute, et dont l'amitié sincère a toujours été un grand soutien.

À une personne qui m'est très chère, pour sa présence, sa gentillesse et ses encouragements constants.

*À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.
Je dédie cette thèse avec ma plus profonde gratitude.*

Soumaya

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières

INTRODUCTION.....	12
CHAPITRE I : POLLUTION ENVIRONNEMENTALE ET TECHNIQUES D'ANALYSE.....	15
I. INTRODUCTION :	15
I.1. Définition de la pollution	15
I.2. TYPES DE POLLUTION	15
I.2.1. Pollution de l'air	15
I.2.2. Pollution de l'eau	16
I.2.3. Pollution des sols.....	17
I.2.4. Pollution chimique	18
I.3. IMPORTANCE DES TECHNIQUES D'ANALYSE ENVIRONNEMENTALE	19
I.4. SPECTROSCOPIE INFRAROUGE	19
I.5. SPECTROSCOPIE INFRAROUGE AVANCE ET FTIR.....	20
I.6. SPECTROSCOPIE GAMMA	21
I.6.1. Définition	21
I.6.2. Principe.....	21
I.6.3. Applications	22
I.6.4. Détecteurs (NaI)	22
I.6.5. Limites.....	22
I.7. COMPLEMENTARITE ENTRE SPECTROSCOPIE GAMMA ET INFRAROUGE	22
I.8. CONCLUSION.....	24
CHAPITRE II. SPECTROSCOPIE GAMMA.....	26
II.1. INTRODUCTION	26
II.2. ORIGINE DES RAYONNEMENTS GAMMA	26
II.3. INTERACTION DES RAYONS GAMMA AVEC LA MATIERE	27
II.3.1. Effet photoélectrique.....	28
II.3.2. Combinaison des interactions	29
II.4. DETECTEURS UTILISES EN SPECTROSCOPIE GAMMA.....	29
II.4.1. Détecteurs à scintillation	30
II.4.2. Détecteurs à semi-conducteurs.....	30
II.5. SPECTRE GAMMA ET ANALYSE ENERGETIQUE	32
II.6. PROBLEMES EXPERIMENTAUX EN SPECTROSCOPIE GAMMA	33
II.7. TRAITEMENT DU SIGNAL (SPECTRAL ANALYSES).....	34
II.8. DEPLIAGE SPECTRAL EN SPECTROSCOPIE GAMMA.....	35
II.9. IDENTIFICATION DES RADIOISOTOPES (RIID).....	35
II.10. METHODES MODERNES D'ANALYSE	35
II.11. MODELE DE REPONSE DU DETECTEUR (DRF).....	35
II.12. APPLICATIONS DE LA SPECTROSCOPIE GAMMA	35
II.13 CAS D'ETUDE :	36

II.14. CONCLUSION	36
CHAPITRE III. MESURE DE LA RADIOACTIVITE DES ECHANTILLONS DE MATERIAUX DE CONSTRUCTION PAR SPECTROMETRIE GAMMA.....	38
INTRODUCTION.....	38
PARTIE I : PARTIE THEORIQUE	38
III.1. LES PRINCIPALES CARACTERISTIQUES DES SPECTROMETRES	38
III.2.1. Résolution	39
III.2.2. Forme gaussienne du pic.....	41
III.2.3. Rapport Pic-au-Compton	42
III.2.4. Résolution et forme de pic	43
III.2.5. Source des rayons γ	44
III.3. PRINCIPE DE LA TECHNIQUE DE SPECTROMETRIE GAMMA.....	46
III.3.1. Chaîne de spectrométrie gamma	46
III.4. Temps mort.....	47
III.5. Bruit de fond	47
PARTIE II : PARTIE PRATIQUE	48
III.2.1. Site de l'étude : Zone industrielle de Bordj Bou Arreridj	48
III.2.2. Échantillonnage et conditionnement	52
III.2.3. Présentation des échantillons.....	54
III.2.4. Activités spécifiques	54
III.3. CALCUL D'ERREURS	55
III.3.1. L'incertitude sur cette formule est obtenue par.....	55
III.4. ANALYSE ET DISCUSSION.....	58
CONCLUSION	59
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	61
ANNEXES	-
RESUMES	-

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Analyse comparative et complémentarité des spectroscopies gamma et infrarouge pour la caractérisation des matériaux et des polluants.....	23
Tableau 2. Comparaison des performances des détecteurs NaI(Tl) et HPGe.....	32
Tableau 3. Indique la valeur de résolution (en <i>KeV</i>) pour différents types de détecteurs disponibles sur le marché.	41
Tableau 4. Valeurs mesurées et garantis de rapport Pic-au-Compton.	42
Tableau 5. Données nucléaires des sources d'étalonnage.	45
Tableau 6. Identification et codification des échantillons expérimentaux	53
Tableau 7. Activité spécifique et paramètres physiques des six échantillons.....	56
Tableau 8. Comparaison des activités spécifiques des radionucléides dans les six échantillons étudiés avec d'autres pays.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 9. Activités spécifiques du ^{40}K , des familles de ^{238}U et du ^{232}Th dans les sols au niveau international en (Bq.kg^{-1}).....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des Figures

Figure 1 :Chaîne des événements dans le cadre de responsabilité de la pollution de l'air	16
Figure 2:. Les étapes du mécanisme de l'eutrophisation anthropique des milieux aquatiques [7].	17
Figure 3 : Classification systématique des principaux polluants présents dans les sols ...	18
Figure 4 :. Diagramme simplifié des transferts de contaminants dans les compartiments environnementaux	19
Figure 5 :. Moléculaire vibration (IR spectroscopie)	20
Figure.6 :. Schéma de principe d'un spectromètre FTIR basé sur l'interféromètre de Michelson.	21
Figure 7 : Schéma simplifié d'un spectrométrie gamma.	22
Figure 8 : Courbe de décroissance radioactive et définition des temps caractéristiques ..	27
Figure 9 : Les trois principaux modes d'interaction rayonnement-matière.....	28
Figure 10 : Illustration schématique de l'effet photoélectrique	29
Figure 11 : Principe de fonctionnement d'un détecteur semi-conducteur (Structure des bandes et création de paires électron-trou).	31
Figure 12 : Diagramme synoptique d'une chaîne de mesure pour la spectroscopie gamma.	32
Figure 13. Exemple d'un spectre gamma typique montrant les différentes composantes d'interaction (Pics d'échappement, Fond Compton et Pic d'absorption totale).....	33
Figure 14. Illustration des pertes de comptage dues au temps mort (Modèles paralysable et non paralysable).....	34
Figure 15 : Spectre de mesure au système de spectrométrie gamma à détecteur HPGe GC3018 (échelle LIN-LOG)	39
Figure 16 Résolution du détecteur (pic gaussien et largeurs caractéristiques)	40
Figure 17: 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)	43

Figure 18 : Pic Photoélectrique 1332.5 KeV typique bien défini à partir du spectre collecté.....	44
Figure 19 : Schéma de la chaîne de spectrométrie gamma.	47
Figure 20 : Carte de localisation des sites de prélèvement des échantillons de matériaux de construction étudiés dans la région de Bordj Bou Arreridj (Algérie).....	49
Figure 21 : Le sable de Boussaâda.....	50
Figure 22 : Ciment de Bordj Bou Arreridj.	50
Figure 23 : Le brique rouge de Medjana BBA.....	51
Figure 24 : Le béton	51
Figure 25 : Les six échantillons	53

INTRODUCTION

Introduction

La pollution environnementale constitue aujourd'hui l'un des principaux défis auxquels sont confrontées les sociétés modernes. Le développement industriel, l'urbanisation croissante et l'exploitation intensive des ressources naturelles ont contribué à l'introduction de nombreux polluants dans l'air, l'eau et les sols. Ces contaminants peuvent avoir des effets néfastes sur les écosystèmes et sur la santé humaine, ce qui rend indispensable la mise en place de méthodes fiables pour leur surveillance et leur évaluation.

Dans ce contexte, les techniques analytiques jouent un rôle essentiel dans l'identification et la caractérisation des polluants. Parmi elles, les méthodes spectroscopiques occupent une place importante grâce à leur précision et à leur capacité à fournir des informations qualitatives et quantitatives sur les substances étudiées. La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) permet notamment d'identifier les composés moléculaires à partir de leurs vibrations caractéristiques, tandis que la spectrométrie gamma est utilisée pour détecter et quantifier les radionucléides présents dans différents échantillons environnementaux.

La spectrométrie gamma présente un intérêt particulier dans l'étude des matériaux de construction, qui contiennent naturellement des radionucléides tels que l'uranium, le thorium et le potassium. L'évaluation de leur activité massique est importante pour estimer les niveaux d'exposition radiologique et vérifier la conformité de ces matériaux aux normes de radioprotection.

Le présent mémoire s'inscrit dans cette démarche et vise à mettre en évidence l'apport des techniques spectroscopiques dans le monitoring environnemental. Il est organisé en trois chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur la pollution environnementale et les principaux outils d'analyse utilisés pour son suivi. Le deuxième chapitre est consacré aux fondements théoriques de la spectroscopie gamma, aux interactions des rayonnements avec la matière ainsi qu'aux détecteurs utilisés pour leur mesure. Enfin, le troisième chapitre expose la partie expérimentale de cette étude, portant sur la détermination de l'activité massique des radionucléides naturels dans des matériaux de construction prélevés dans la région de Bordj Bou Arreridj à l'aide d'un détecteur HPGe.

Cette étude met ainsi en évidence l'importance des techniques nucléaires dans l'évaluation de la qualité environnementale et dans la gestion des risques radiologiques liés aux matériaux utilisés dans la vie quotidienne.

.

CHAPITE I
POLLUTION ENVIRONNEMENTALE ET
TECHNIQUE D'ANALYSE

Chapitre I : Pollution environnementale et techniques d'analyse.

I. Introduction :

1. Définition de la pollution

La pollution est une modification indésirable de l'environnement entraînant des effets néfastes sur les plantes, les animaux et les êtres humains. Elle résulte souvent de la priorité accordée aux gains économiques à court terme au détriment des bénéfices environnementaux à long terme. Les polluants peuvent être des substances solides, liquides ou gazeuses issues des activités humaines et présentes à des concentrations supérieures aux niveaux naturels. Leur accumulation peut perturber l'équilibre écologique et affecter la santé humaine [1]. La pollution peut être d'origine naturelle ou anthropique, mais les activités humaines telles que l'industrie, le transport et l'agriculture intensive constituent les principales sources. Les phénomènes naturels comme les volcans ou les incendies de forêts y contribuent également [2]. La pollution radioactive est considérée comme un type particulier en raison de sa dangerosité et de ses effets à long terme. De plus, même de faibles concentrations de polluants peuvent avoir des impacts significatifs sur la santé.

2. Types de pollution

2.1. Pollution de l'air

La pollution de l'air correspond à la présence de substances nocives dans l'air intérieur ou extérieur modifiant ses caractéristiques naturelles. Elle provient principalement de la combustion des carburants dans les transports, les habitations et les activités industrielles. Les principaux polluants environnementaux incluent des gaz tels que le CO₂ et les oxydes d'azote (NO_x), l'ozone (O₃), les particules fines (PM), les métaux lourds, les contaminants biologiques comme les bactéries et virus, la fumée de tabac, ainsi que les composés organiques volatils. Ces polluants sont fortement associés aux maladies respiratoires et cardiovasculaires, même à de faibles niveaux d'exposition. On estime qu'environ 99 % de la population mondiale respire un air dépassant les normes recommandées [3]. La figure 1 met en évidence l'enchaînement des événements résultant de la pollution de l'air.

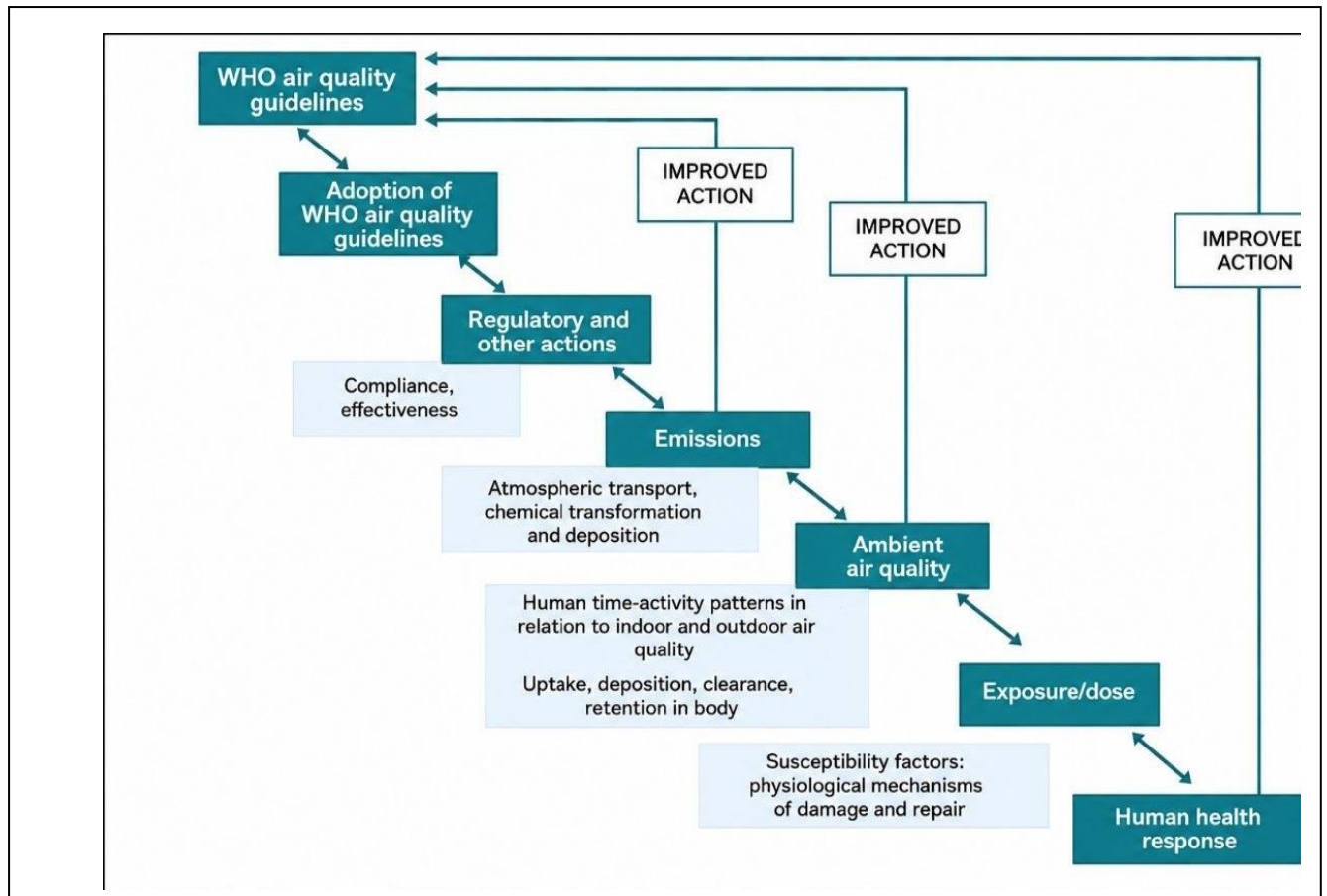


Figure 1. Chaîne des événements dans le cadre de responsabilité de la pollution de l'air [4].

2.2. Pollution de l'eau

La pollution issue des activités industrielles, agricoles et domestiques affecte directement la santé humaine, provoquant diarrhée, affections cutanées et certains cancers, surtout chez les enfants et les populations vulnérables. Les activités agricoles contribuent fortement à la pollution de l'eau, notamment par l'excès de nutriments qui provoque l'eutrophisation et perturbe les écosystèmes aquatiques. Cette pollution impacte la biodiversité et peut entraîner des maladies humaines comme les infections et les troubles digestifs. Une exposition prolongée à l'eau contaminée peut entraîner des effets sanitaires aigus ou chroniques, notamment des troubles gastro-intestinaux, des atteintes aux organes, des problèmes de développement ainsi qu'une augmentation du risque de cancer. L'apport excessif de nutriments engendre une prolifération algale qui asphyxie l'écosystème en bloquant la lumière et en épuisant l'oxygène dissous [5]. La

figure 2 présente les principales étapes du mécanisme d'eutrophisation anthropique des milieux aquatiques, conséquence directe de l'enrichissement excessif des eaux en nutriments.

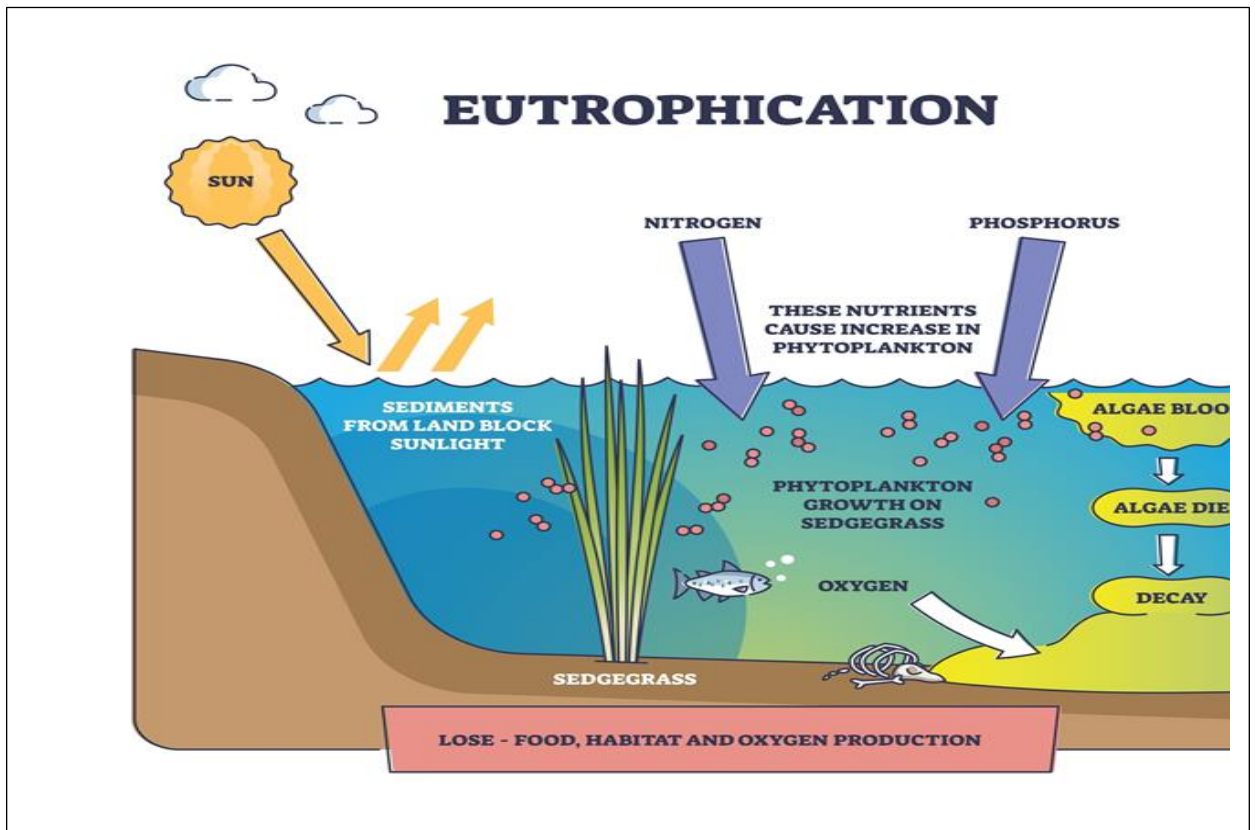


Figure 2. Les étapes du mécanisme de l'eutrophisation anthropique des milieux aquatiques [6].

2.3. Pollution des sols

La pollution des sols est définie comme la réduction de la productivité des sols due à des polluants qui affectent négativement ses propriétés physiques, chimiques et biologiques. La pollution des sols est liée à l'accumulation de substances toxiques comme les métaux lourds (plomb, cadmium) et les engrais chimiques. Ces polluants réduisent la fertilité des sols, affectent la croissance des plantes et diminuent la productivité agricole. Ils entraînent également une perte de biodiversité et perturbent les fonctions écologiques essentielles comme le cycle des nutriments [7]. Ce phénomène est illustré par la figure 3 ci-dessous.

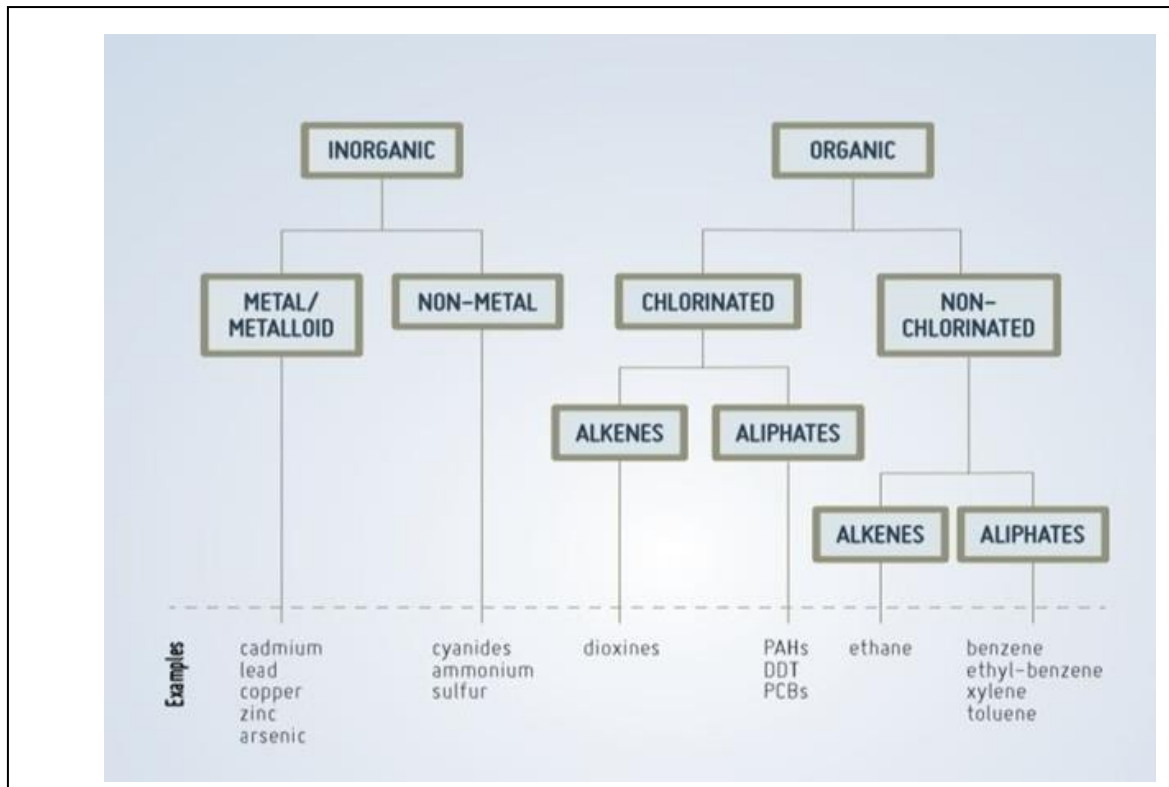


Figure 3. Classification systématique des principaux polluants présents dans les sols [8].

2.4. Pollution chimique

La pollution chimique résulte de la présence de substances chimiques nocives dans l'environnement. Ces substances peuvent être solides, liquides ou gazeuses et proviennent principalement des activités humaines, notamment industrielles, agricoles et domestiques. Certaines d'entre elles sont persistantes et non biodégradables, ce qui favorise leur accumulation dans les différents compartiments de l'environnement et accroît leurs effets néfastes sur les écosystèmes et la santé humaine. La pollution chimique des rivières et des cours d'eau comprend notamment des composés organiques, des nutriments, des pesticides et des produits pharmaceutiques. Ces contaminants peuvent dégrader la qualité de l'eau, perturber les écosystèmes aquatiques et représenter un risque pour les organismes vivants [9]. Le transfert des contaminants entre les différents compartiments environnementaux est illustré de manière synthétique dans la Figure 4.

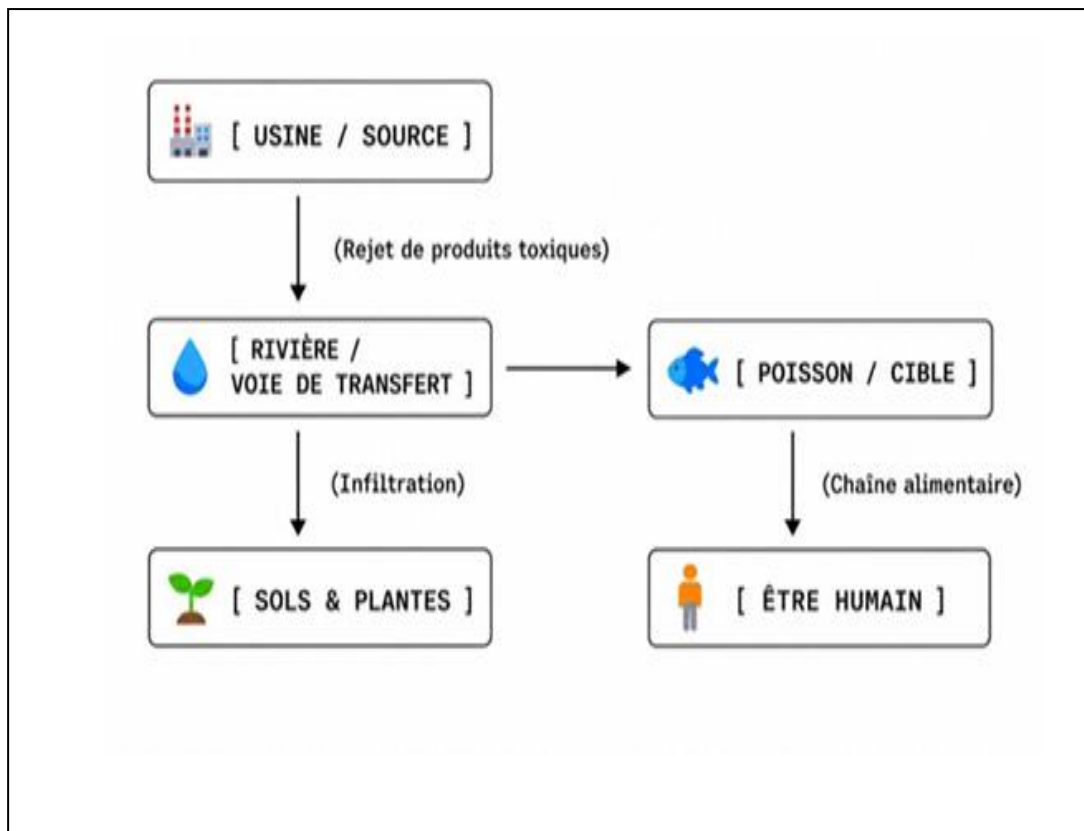


Figure 4. Diagramme simplifié des transferts de contaminants dans les compartiments environnementaux [10].

3. Importance des techniques d'analyse environnementale

La diversité des types de pollution nécessite l'utilisation de techniques analytiques précises pour leur détection et leur suivi. Ces méthodes permettent d'identifier les polluants avec une grande précision et d'évaluer leurs impacts sur l'environnement et la santé humaine [11].

4. Spectroscopie infrarouge

La spectroscopie infrarouge est une technique analytique utilisée pour identifier les composés chimiques à partir de leur interaction avec le rayonnement infrarouge. Elle repose sur l'absorption de rayonnements à des fréquences spécifiques correspondant aux vibrations des liaisons chimiques, permettant ainsi de déterminer la structure moléculaire. Une molécule doit être active en infrarouge, c'est-à-dire posséder un moment dipolaire variable, afin d'absorber le rayonnement et générer des vibrations de type élongation et flexion.

Elle est largement utilisée dans différents domaines tels que la chimie, l'environnement, la pharmacie et la science des matériaux [12]. Les différents modes de vibration moléculaire à l'origine de l'absorption du rayonnement infrarouge sont illustrés dans la figure suivante.

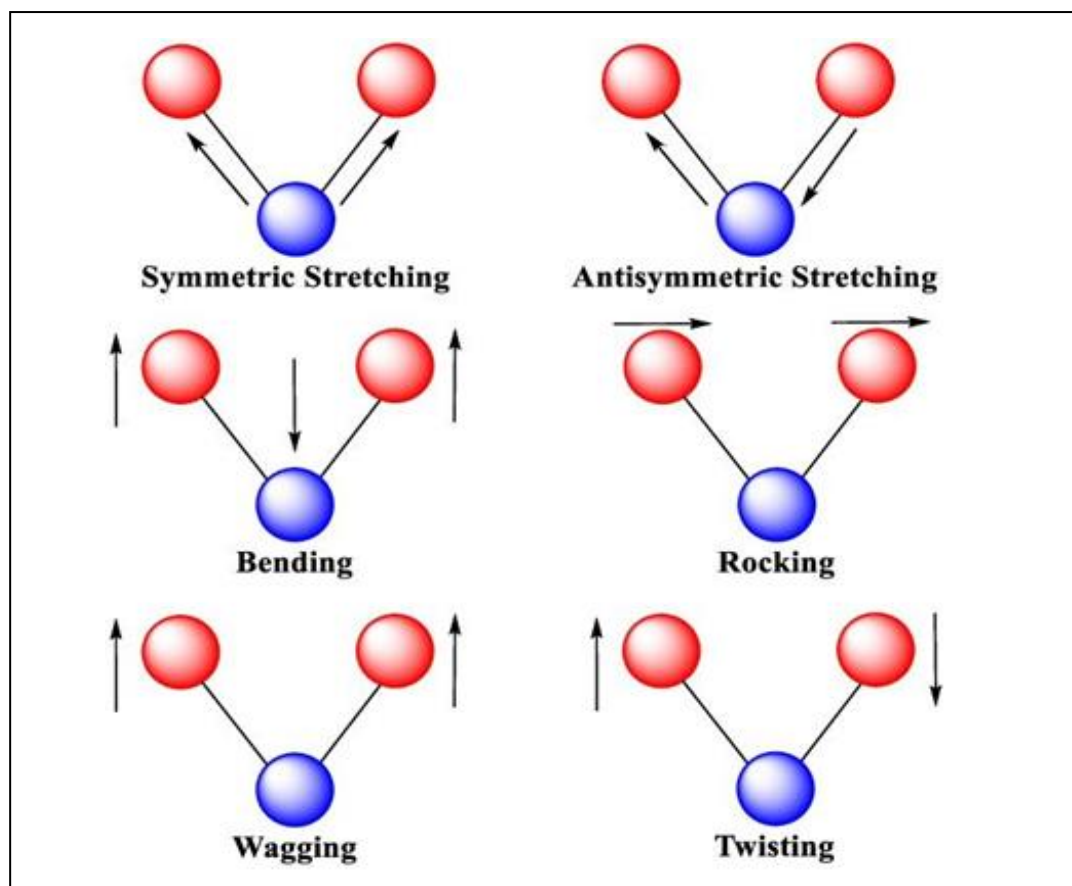


Figure 5. Moléculaire vibration (IR spectroscopie) [12].

5. Spectroscopie infrarouge avancé et FTIR

La spectroscopie FTIR est une forme avancée de cette technique. Elle utilise un interféromètre pour obtenir un spectre précis rapidement un spectre précis. Elle est utilisée pour analyser des matériaux complexes tels que des échantillons biologiques et des sols. En résumé, cette technique a connu un développement important et est devenue un outil essentiel de la recherche scientifique et des applications modernes, en particulier dans les domaines médical et environnemental [13]. La figure 6 présente le schéma de principe d'un spectromètre FTIR utilisant l'interféromètre de Michelson pour l'acquisition des spectres infrarouges.

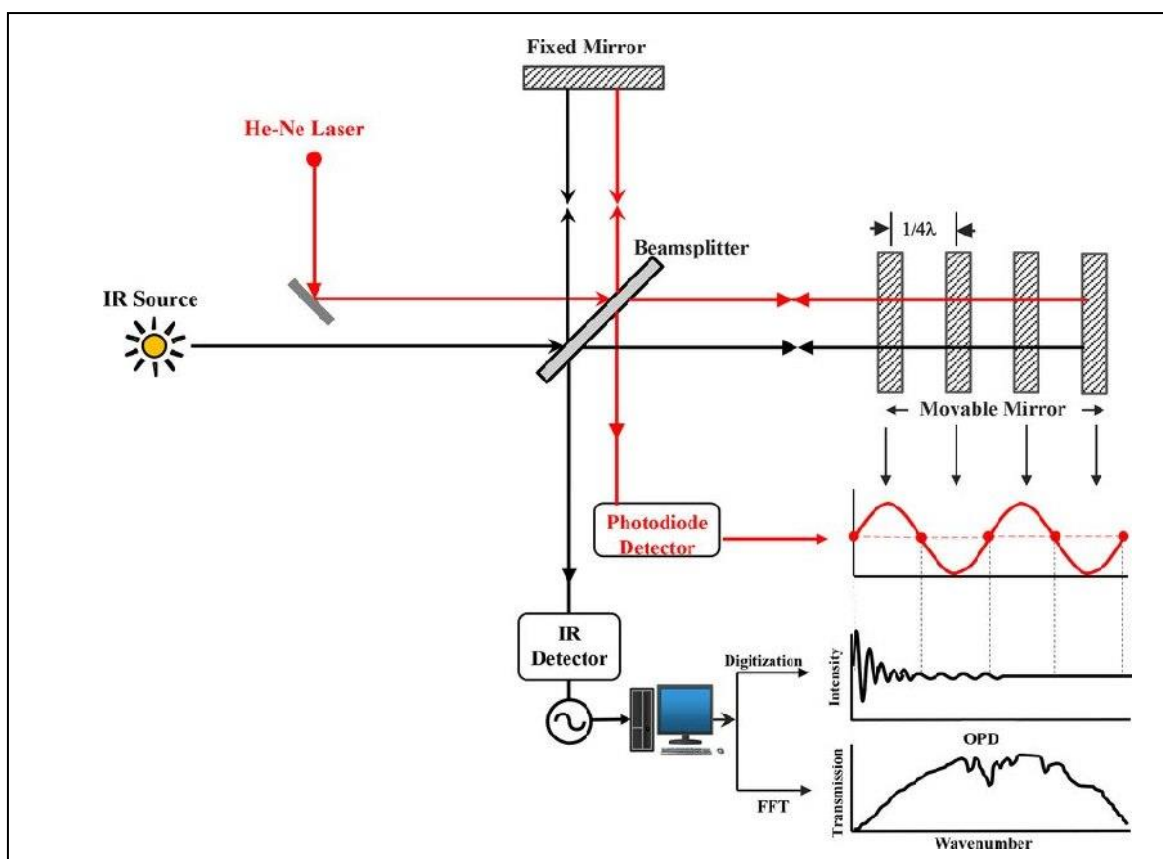


Figure.6. Schéma de principe d'un spectromètre FTIR basé sur l'interféromètre de Michelson [13].

6. Spectroscopie Gamma

6.1. Définition

La spectroscopie gamma est une technique permettant de mesurer l'énergie des rayonnements gamma émis par des éléments radioactifs afin d'identifier les radionucléides et déterminer leurs concentrations [14].

6.2. Principe

Cette technique repose sur la mesure du rayonnement gamma émis par les isotopes radioactifs naturels présents dans les sols et les roches (K, Th, U). Un détecteur enregistre l'intensité du rayonnement dans une gamme d'énergie spécifique, puis analyse le spectre pour déterminer la concentration de chaque élément. Cette analyse permet de cartographier la distribution des éléments radioactifs, que ce soit pour l'exploration géologique ou l'évaluation environnementale, et nécessite la séparation des pics spectraux de chaque isotope dans une fenêtre d'énergie spécifique [15].

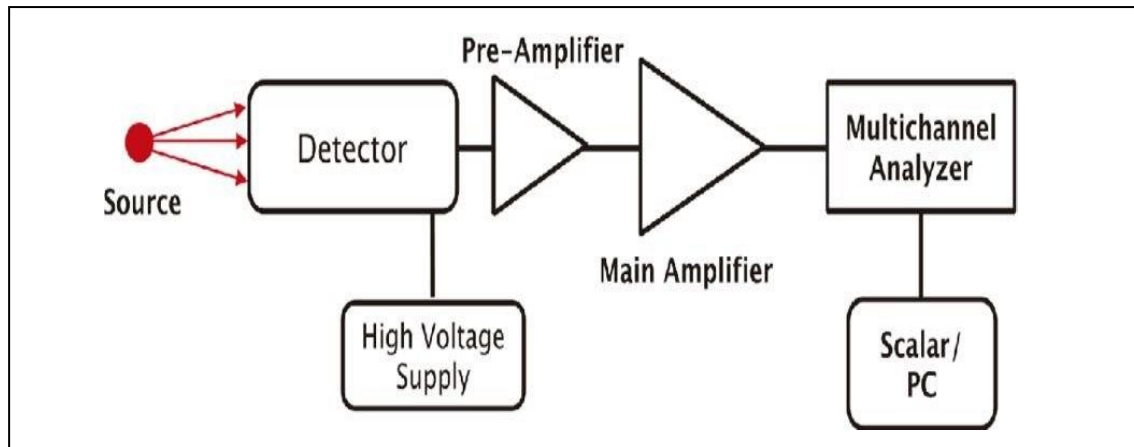


Figure 7. Schéma simplifié d'un spectrométrie gamma [16].

6.3. Applications

- Physique nucléaire : étude des propriétés des noyaux atomiques.
- Médecine nucléaire : utilisation des radio-isotopes pour le diagnostic et la thérapie.
- Sécurité nucléaire : détection et suivi des matériaux radioactifs pour la protection et la sûreté.
- Surveillance environnementale : évaluation de la contamination radioactive naturelle ou artificielle et suivi de l'impact des activités nucléaires [17].

6.4. Détecteurs (NaI)

- Détecteurs peu coûteux et faciles à utiliser pour la spectrométrie gamma.
- Résolution énergétique plus faible que les détecteurs HPGe.
- Utilisés surtout pour la surveillance environnementale.

6.5. Limites

- Difficulté à distinguer des pics gamma proches.
- Sensibilité réduite pour les énergies très élevées [18].

7. Complémentarité entre spectroscopie gamma et infrarouge

L'intégration conjointe de ces deux outils spectroscopiques permet d'obtenir une caractérisation holistique. Alors que la spectroscopie gamma quantifie avec précision les sources de radio-polluants et suit les modifications structurales lourdes induites par la radiolyse au cœur

de la matière, la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) apporte une lecture fine des mécanismes chimiques moléculaires périphériques et de l'impact des additifs environnementaux [19].

Tableau 1. Analyse comparative et complémentarité des spectroscopies gamma et infrarouge pour la caractérisation des matériaux et des polluants [19].

Caractéristique / Paramètre	Spectroscopie Gamma (γ)	Spectroscopie Infrarouge (IR / FTIR)
Phénomène physique	Transition énergétique au sein du noyau atomique (désexcitation nucléaire).	Transition énergétique entre les niveaux de vibration moléculaire .
Nature de la mesure	Émission de photons de très haute énergie (rayonnements ionisants).	Absorption de photons de basse énergie (rayonnement électromagnétique IR).
Cible de l'analyse	Radionucléides (isotopes radioactifs naturels comme 40K, U, Th ou artificiels).	Liaisons chimiques et groupements fonctionnels moléculaires (C=O, O-H, C-H, etc.).
Échelle d'investigation	Analyse volumique / Macroscopique : Évalue les modifications et la dégradation globale dans la masse du matériau.	Analyse de surface / Microscopique : Détecte les modifications structurales chimiques locales et de surface.
Indicateurs de dégradation (ex: Polymères)	Met en évidence les phénomènes globaux de scission de chaînes et de réticulation .	Identifie l'apparition de nouveaux groupements chimiques liés à l' oxydation (ex: carbonyles).
Sensibilité instrumentale	Limitée par le type de détecteur (NaI possède une résolution plus faible que le HPGe).	Très haute vitesse et excellente résolution grâce à l'utilisation de l' interféromètre .
Objectif écotoxicologique	Quantification de la radioactivité spécifique (\$Bq/kg\$) et évaluation des risques radiologiques.	Identification de l' empreinte digitale chimique des polluants organiques ou microplastiques.

8. Conclusion

La pollution environnementale constitue un défi majeur en raison de ses effets sur l'air, l'eau, les sols, les écosystèmes et la santé humaine. Les différentes formes de pollution, principalement liées aux activités humaines, nécessitent une surveillance et une caractérisation précises.

Dans ce contexte, les techniques analytiques jouent un rôle essentiel dans l'identification et le suivi des polluants. La spectroscopie FTIR permet de caractériser les composés chimiques et leurs transformations moléculaires, tandis que la spectroscopie gamma est utilisée pour identifier et quantifier les radionucléides présents dans l'environnement.

La complémentarité de ces deux techniques offre une approche efficace pour l'étude et l'évaluation de la pollution environnementale, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des contaminants et à la protection des ressources naturelles.

CHAPITRE II
SPECTROSCOPIE GAMMA

Chapitre II. Spectroscopie Gamma

1. Introduction

La spectroscopie gamma est une technique d'analyse permettant d'identifier les radionucléides à partir de leurs émissions gamma caractéristiques. Elle repose sur l'exploitation des spectres énergétiques qui constituent une signature unique pour chaque isotope. Elle est largement utilisée en physique nucléaire et en radioprotection pour l'étude des matériaux et des environnements. Elle permet également l'analyse quantitative des éléments naturels tels que l'uranium, le thorium et le potassium dans les formations géologiques. D'un point de vue nucléaire, les rayonnements gamma proviennent des transitions entre les niveaux d'énergie du noyau atomique. Chaque radionucléide possède un spectre gamma qui lui est propre, constituant ainsi une véritable signature énergétique. Les énergies des photons gamma peuvent s'étendre de quelques keV à plusieurs MeV [20].

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (1)$$

E : énergie du photon (J ou eV)

h : constante de Planck

ν (nu) : fréquence (Hz)

c : vitesse de la lumière ($\approx 3 \times 10^8$ m/s)

λ (lambda) : longueur d'onde (m)

2.2. Origine des rayonnements gamma

Les rayonnements gamma sont produits principalement lors de la désintégration radioactive des noyaux instables

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (2)$$

Où :

N(t) : Nombre de noyaux restants

N₀ : Nombre initial de noyaux

λ : Constante de décroissance

t : Temps

À partir de la loi de décroissance radioactive, l'activité d'un radionucléide peut être définie par l'équation suivante :

$$A = \lambda N \quad (3)$$

A : Activité (Becquerel, Bq)

Chapitre II : Spectroscopie Gamma

λ : Constante de décroissance radioactive

N : Nombre de noyaux radioactifs

Dans les matériaux géologiques, les éléments naturels comme l'uranium, le thorium et le potassium constituent des sources importantes de rayonnement gamma. Par ailleurs, les rayonnements gamma peuvent aussi être produits par capture neutronique dans les noyaux. En particulier, les réactions de type (n, γ) permettent de générer des photons gamma de haute énergie. Enfin, les noyaux excités émettent des photons gamma lorsqu'ils retournent à un état d'énergie plus stable. Afin d'illustrer le phénomène de décroissance radioactive ainsi que les principaux paramètres qui le caractérisent, la figure suivante présente une courbe typique de décroissance radioactive [21].

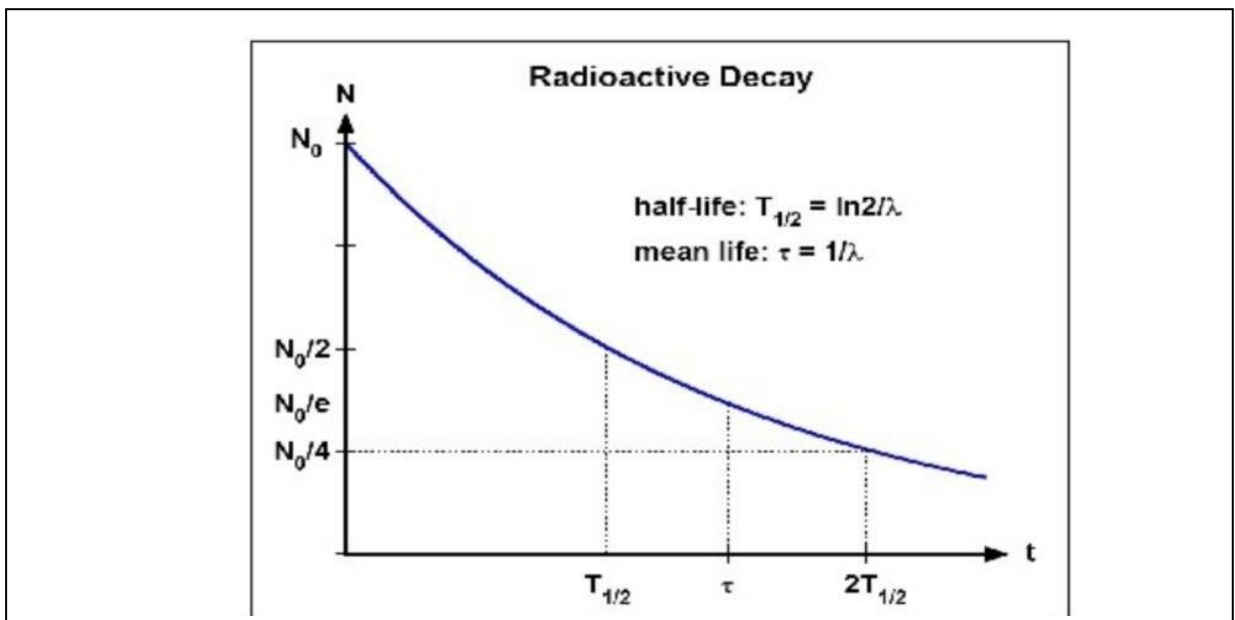


Figure 8. Courbe de décroissance radioactive et définition des temps caractéristiques [22].

3. Interaction des rayons gamma avec la matière

Lors de leur traversée de la matière, les rayonnements gamma subissent une atténuation exponentielle décrite par la relation suivante :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad (4)$$

I : Intensité après traversée du matériau

I_0 : Intensité initiale

μ (μ) : Coefficient d'atténuation

x : Épaisseur du matériau

e : Base du logarithme népérien

Le coefficient d'absorption caractérise la probabilité d'interaction des photons gamma avec la matière. Plus sa valeur est élevée, plus l'atténuation du rayonnement est importante. Les rayons gamma interagissent avec la matière par effet photoélectrique. Ils subissent également la diffusion Compton lors de leur propagation dans les matériaux. À haute énergie, ils peuvent produire des paires électron-positon. Dans certains cas, l'énergie libérée lors du réarrangement électronique n'est pas émise sous forme de rayonnement X. Elle est transférée directement à un autre électron périphérique, qui est alors éjecté de l'atome sous forme d'électron Auger. Ce processus peut se produire en cascade et conduire à l'émission de plusieurs électrons [23]. Ainsi, ces différentes interactions déterminent la forme finale du spectre mesuré. Les principaux mécanismes d'interaction des rayonnements gamma avec la matière sont représentés schématiquement dans la figure suivante.

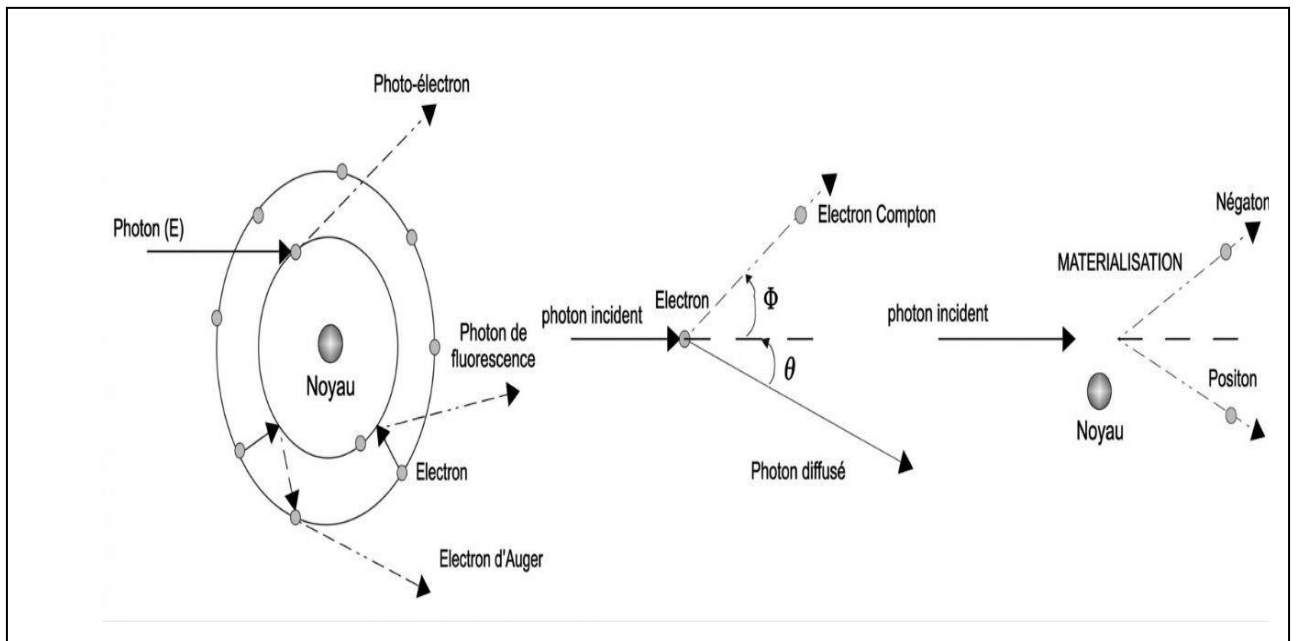


Figure 9. Les trois principaux modes d'interaction rayonnement-matière [24].

3.1. Effet photoélectrique

Lorsqu'un électron d'une couche interne est éjecté par l'effet photoélectrique, la vacance créée est comblée par un électron provenant d'une couche plus externe. La différence d'énergie

entre les deux couches est émise sous forme d'un rayonnement X de fluorescence, qui peut éventuellement produire à son tour des interactions secondaires dans le milieu [25].

La figure suivante illustre le mécanisme de l'effet photoélectrique ainsi que l'éjection d'un électron d'une couche interne de l'atome.

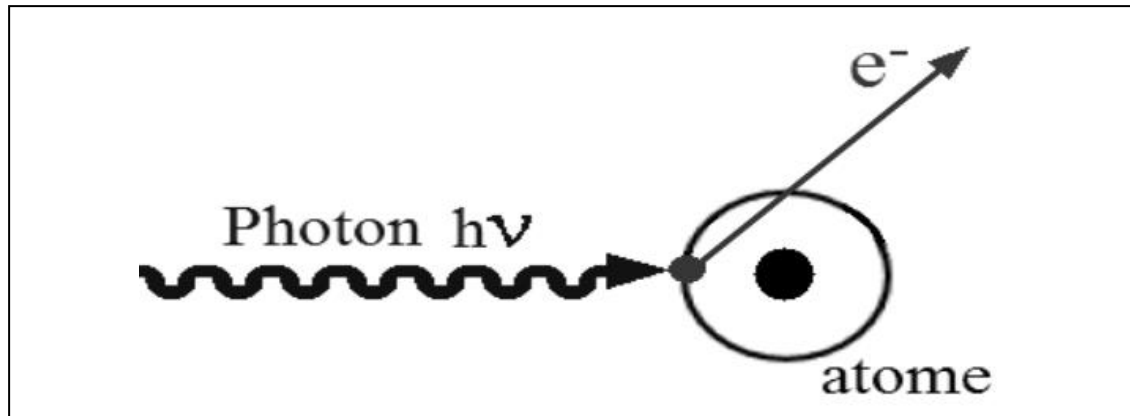


Figure 10. Illustration schématique de l'effet photoélectrique [25].

3.2. Combinaison des interactions

Les interactions des rayonnements gamma avec la matière résultent principalement de trois mécanismes : l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la création de paires. La prédominance de chacun de ces effets dépend de l'énergie des photons incidents ainsi que du numéro atomique du matériau absorbant [26]. La coexistence de ces trois mécanismes conduit à l'apparition de différentes structures dans les spectres gamma mesurés. Selon les caractéristiques du détecteur et l'absorption des produits secondaires, le spectre peut présenter un pic d'absorption totale, un fond Compton ainsi que des pics d'échappement. Le pic d'absorption totale est associé au dépôt complet de l'énergie du photon dans le détecteur, tandis que le fond Compton résulte des diffusions partielles des photons gamma. Lorsque la création de paires se produit, des pics de simple et de double échappement peuvent également apparaître dans le spectre [27].

4. Détecteurs utilisés en spectroscopie gamma

Les détecteurs utilisés en spectrométrie gamma permettent de convertir l'énergie déposée par les rayonnements gamma en signaux électriques exploitables pour l'identification et la quantification des radionucléides. Les principaux détecteurs sont les détecteurs à scintillation et les détecteurs à semi-conducteurs [28].

4.1. Détecteurs à scintillation

Les détecteurs à scintillation sont constitués d'un scintillateur couplé à un photomultiplicateur. Ils transforment l'énergie déposée par les rayonnements gamma en lumière puis en signal électrique mesurable.

Types de scintillateurs

- NaI(Tl) : utilisé pour des mesures rapides mais avec une faible résolution énergétique.
- CeBr₃ : offre une meilleure résolution spectrale.
- CsI(Tl) : adapté aux systèmes compacts et embarqués.

Scintillateurs organiques : permettent la discrimination neutron/gamma.

Le photomultiplicateur est un dispositif optique-électronique couplé au scintillateur. Il a pour rôle de convertir les photons lumineux produits dans le scintillateur en électrons grâce à une photocathode. Ces électrons sont ensuite multipliés à travers une série de dynodes sous l'effet d'un champ électrique. À chaque dynode, le nombre d'électrons augmente par émission secondaire, ce qui permet une amplification importante du signal initial. Le signal final est collecté à l'anode sous forme d'une impulsion électrique facilement mesurable et proportionnelle à l'énergie déposée par le rayonnement gamma [29].

4.2. Détecteurs à semi-conducteurs

Les détecteurs à semi-conducteurs fonctionnent grâce à la création de paires électron-trou dans un cristal soumis au rayonnement gamma. Sous l'effet d'un champ électrique, les charges sont collectées et génèrent un signal proportionnel à l'énergie déposée.

Le détecteur HPGe (Germanium hyper pur) est le plus utilisé en spectrométrie gamma pour sa très haute résolution énergétique, permettant une séparation précise des pics gamma voisins. Il nécessite un fonctionnement à basse température (azote liquide) afin de réduire le bruit électronique [30].

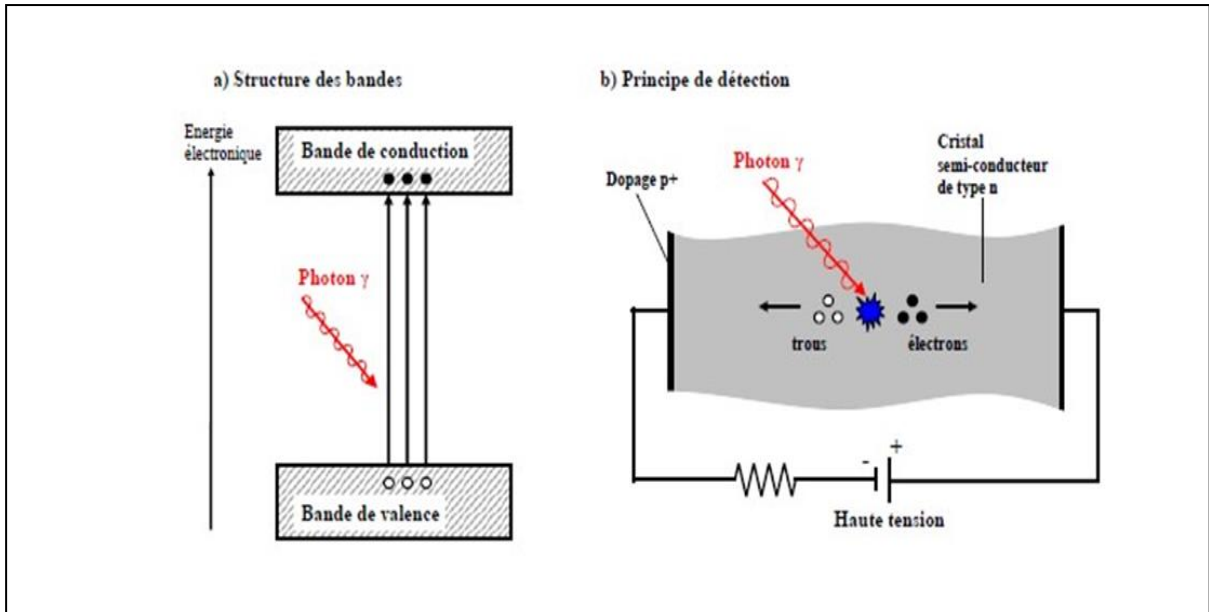


Figure 11. Principe de fonctionnement d'un détecteur semi-conducteur (Structure des bandes et création de paires électron-trou) [24].

4.3. Systèmes modernes de détection

Les systèmes modernes utilisent des photodiodes ou des SiPM pour convertir la lumière issue des scintillateurs en signal électrique. Ces systèmes sont compacts et adaptés aux applications mobiles et embarquées [31].

4.4. Comparaison des détecteurs

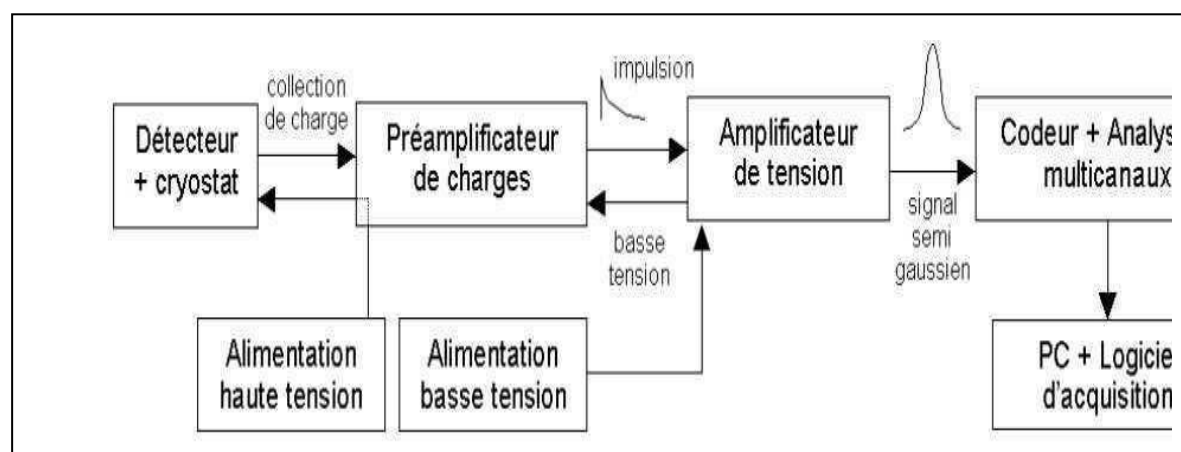
Les détecteurs utilisés en spectroscopie gamma présentent des performances différentes selon leur principe de fonctionnement et leur domaine d'application. Les détecteurs à scintillation NaI(Tl) sont caractérisés par une bonne efficacité de détection, une simplicité d'utilisation et un coût relativement faible. En revanche, les détecteurs à semi-conducteurs de type HPGe offrent une très haute résolution énergétique permettant une identification précise des pics gamma, mais nécessitent un refroidissement et présentent un coût plus élevé ainsi qu'une utilisation plus complexe [32]. Tableau 2 présente une comparaison synthétique des principales caractéristiques et performances des détecteurs NaI(Tl) et HPGe.

Chapitre II : Spectroscopie Gamma

Tableau 2. Comparaison des performances des détecteurs NaI(Tl) et HPGe [33].

Critère	NaI(Tl)	HPGe
Principe	Scintillation	Semi-conducteur
Résolution énergétique	Faible à moyenne	Très élevée
Efficacité de détection	Élevé	Moyenne
Identification des radionucléides	Limitée pour les pics proches	Très précise
Refroidissement	Non nécessaire	Nécessite un refroidissement (azote liquide ou refroidisseur électrique)
Coût	Relativement faible	Élevé
Utilisation principale	Mesures de terrain, surveillance radiologique	Analyse spectrométrique de haute précision en laboratoire
Vitesse de mesure	Rapide	Plus lente

Après avoir comparé les principales caractéristiques des détecteurs NaI(Tl) et HPGe, il est également important de comprendre leur intégration au sein d'un système de mesure. La figure 12 présente le diagramme synoptique d'une chaîne de mesure utilisée en spectroscopie gamma, mettant en évidence les différents éléments intervenant dans l'acquisition et le traitement du



signal.

Figure 12. Diagramme synoptique d'une chaîne de mesure pour la spectroscopie gamma [26].

5. Spectre gamma et analyse énergétique

Le spectre gamma contient des photopeaks représentant les énergies caractéristiques des radionucléides. Il contient également un continuum Compton dû aux diffusions partielles. Les

Chapitre II : Spectroscopie Gamma

éléments U, Th et K produisent des pics caractéristiques dans les spectres naturels. Ainsi, le spectre est affecté par des fluctuations statistiques de type Poisson.

$$\sigma = \sqrt{N} \quad (5)$$

σ (sigma) : écart-type

N : nombre de comptages

La représentation spectrale met en évidence les différentes composantes résultant des interactions des rayonnements gamma avec le détecteur, comme illustré dans la figure suivante.

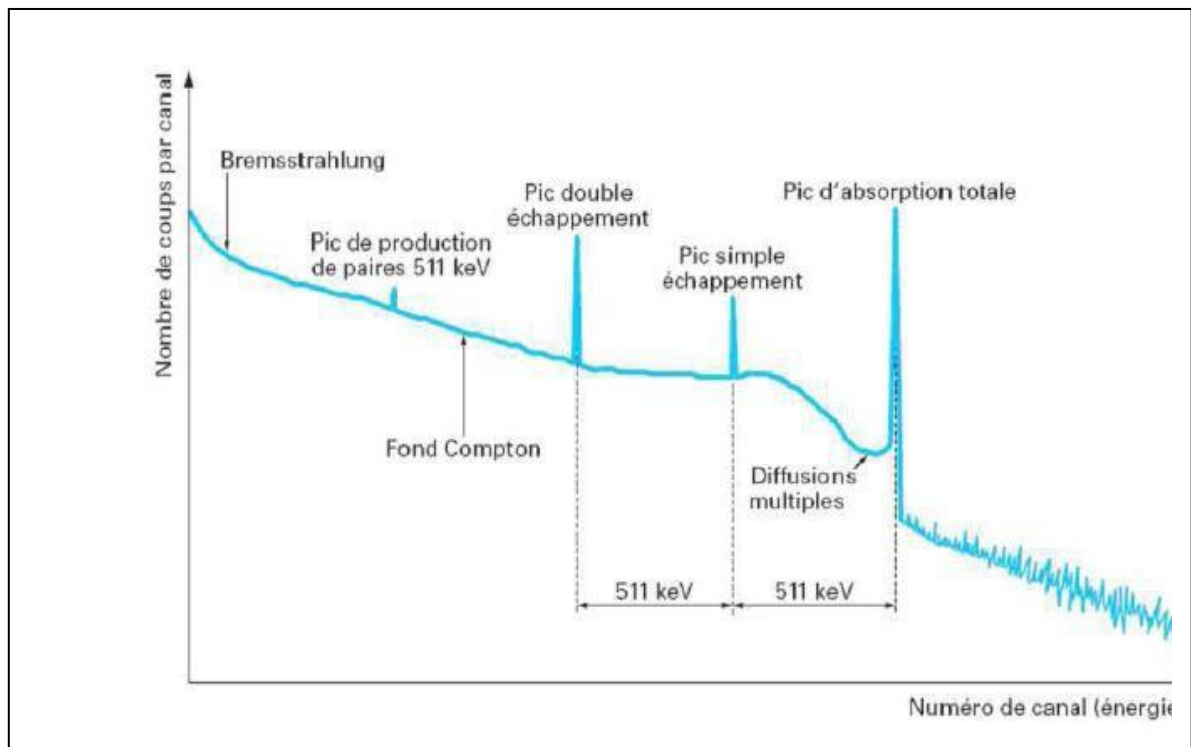


Figure 13. Exemple d'un spectre gamma typique montrant les différentes composantes d'interaction (Pics d'échappement, Fond Compton et Pic d'absorption totale) [24].

D'un point de vue physique, les rayonnements gamma sont issus de transitions entre niveaux d'énergie nucléaire. Par conséquent, l'analyse du spectre gamma permet l'identification des éléments présents dans un matériau [34].

6. Problèmes expérimentaux en spectroscopie gamma

Le phénomène de pile-up peut déformer les mesures à fort flux. Par ailleurs, le dead time réduit la précision des comptages. De plus, le chevauchement des pics complique l'identification des isotopes, Ce phénomène est illustré dans la figure suivante.

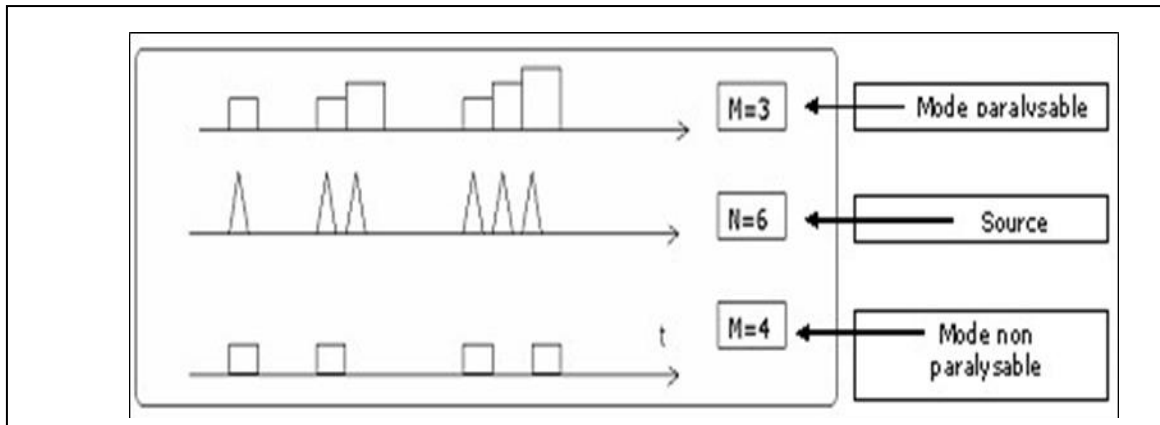


Figure 14. Illustration des pertes de comptage dues au temps mort (Modèles paralysable et non paralysable) [24].

Des rayonnements rétrodiffusés (backscattering) peuvent également apparaître lorsque des photons gamma sont diffusés par les matériaux environnants puis reviennent vers le détecteur. Ils contribuent au fond du spectre et peuvent perturber l'interprétation des mesures. Pour limiter l'influence des rayonnements parasites, un blindage en plomb est souvent utilisé autour du détecteur. Une couche d'aluminium est généralement ajoutée à l'intérieur du blindage afin d'absorber les photoélectrons et les électrons Compton produits dans le plomb, qui pourraient autrement atteindre le détecteur et perturber les mesures. En outre, les contraintes de poids et de taille limitent les détecteurs embarqués. Enfin, la qualité du signal dépend fortement de la distance source-détecteur [35].

7. Traitement du signal (Spectral analyses)

Le lissage (smoothing) permet de réduire le bruit statistique dans les spectres.

La soustraction du bruit de fond améliore la qualité du signal mesuré.

La détection des pics permet d'identifier les énergies caractéristiques.

Le calcul de l'aire des pics permet l'estimation quantitative des éléments.

La calibration énergétique relie les canaux du détecteur aux énergies physiques.

$$E = a + b \cdot ch \quad (6)$$

E : énergie

Ch : numéro de canal

a, b : coefficients de calibration

En pratique, la calibration énergétique est réalisée à l'aide de sources gamma présentant des lignes bien définies en énergie. Ainsi, les lignes de calibration doivent être bien séparées pour garantir une mesure précise [36].

8. Dépliage spectral en spectroscopie gamma

Le dépliage spectral permet de reconstruire le spectre source à partir des mesures. Par ailleurs, le modèle repose sur une combinaison linéaire des contributions des radionucléides. En complément, la recherche de pics permet d'identifier les pics dans le spectre. Ainsi, la séparation des pics améliore la résolution spectrale.

9. Identification des radioisotopes (RIID)

La RIID permet d'identifier les isotopes présents dans un échantillon. Elle utilise des bibliothèques isotopiques pour la comparaison. Les éléments U, Th et K sont des composants clés dans les analyses naturelles. Le chevauchement des pics reste une difficulté majeure [37].

10. Méthodes modernes d'analyse

L'approche bayésienne permet d'estimer la présence des isotopes. L'approximation bayésienne par calcul (ABC) permet d'analyser des données bruitées. La méthode de régression LASSO permet la sélection des variables pertinentes. Les réseaux de neurones convolutifs (CNN) permettent la classification automatique des spectres [38].

11. Modèle de réponse du détecteur (DRF)

Le modèle de réponse du détecteur (DRF) modélise la réponse du détecteur aux rayonnements gamma. Il inclut l'élargissement gaussien des pics. La matrice de réponse relie les signaux mesurés aux éléments présents. Il permet la simulation de spectres réalistes pour comparaison avec les données expérimentales.

12. Applications de la spectroscopie gamma

La spectroscopie gamma est utilisée en radioprotection et pour la surveillance des réacteurs nucléaires. Elle permet l'analyse des matériaux géologiques et de construction, ainsi que la détermination des concentrations en uranium, thorium et potassium (U, Th et K). Par ailleurs, cette technique est largement employée dans les études environnementales et géophysiques. Ainsi que dans les systèmes de surveillance mobile et les drones. Enfin, elle La spectroscopie

gamma joue un rôle important en sécurité nucléaire et en détection des menaces de type CBRN [39].

13. Cas d'étude :

Plusieurs études ont démontré l'intérêt de la spectroscopie gamma dans la caractérisation des radionucléides naturels et artificiels. Elle est utilisée pour la surveillance environnementale, le contrôle radiologique, la cartographie de la contamination radioactive ainsi que le suivi des installations nucléaires. Ces applications illustrent l'importance de cette technique dans les domaines de la radioprotection, de l'environnement et de la sûreté nucléaire [40].

14. Conclusion

Ce chapitre a permis de présenter les principes fondamentaux de la spectroscopie gamma ainsi que les phénomènes physiques qui gouvernent l'émission et l'interaction des rayonnements gamma avec la matière. Les principaux mécanismes d'interaction, notamment l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la création de paires, ont été décrits afin de mieux comprendre la formation des spectres gamma.

Les différents types de détecteurs utilisés en spectrométrie gamma ont également été présentés, avec un intérêt particulier pour les détecteurs à semi-conducteurs HPGe, reconnus pour leur excellente résolution énergétique. Les notions relatives à l'analyse spectrale, au traitement du signal, à l'identification des radionucléides ainsi qu'aux méthodes modernes d'analyse ont été abordées afin de mettre en évidence les outils permettant une caractérisation fiable des sources radioactives.

Enfin, les nombreuses applications de la spectroscopie gamma dans les domaines de la radioprotection, de l'environnement, de la géologie et de la sûreté nucléaire illustrent l'importance de cette technique comme méthode d'analyse non destructive et de haute précision. Les connaissances présentées dans ce chapitre constituent ainsi la base théorique nécessaire à la compréhension du dispositif expérimental et à l'interprétation des résultats qui seront exposés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

MESURE DE LA RADIOACTIVITÉ DES

ÉCHANTILLONS DE MATÉRIAUX DE

CONSTRUCTION PAR SPECTROMÉTRIE

GAMMA

Chapitre III. Mesure de la radioactivité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie gamma.

Introduction

La spectrométrie gamma est une technique radio analytique utilisée pour l'identification et la quantification des radionucléides naturels et artificiels, notamment dans les échantillons environnementaux [41]. Elle permet une analyse qualitative et quantitative des radionucléides émetteurs gamma à l'aide d'un système de détection adapté.

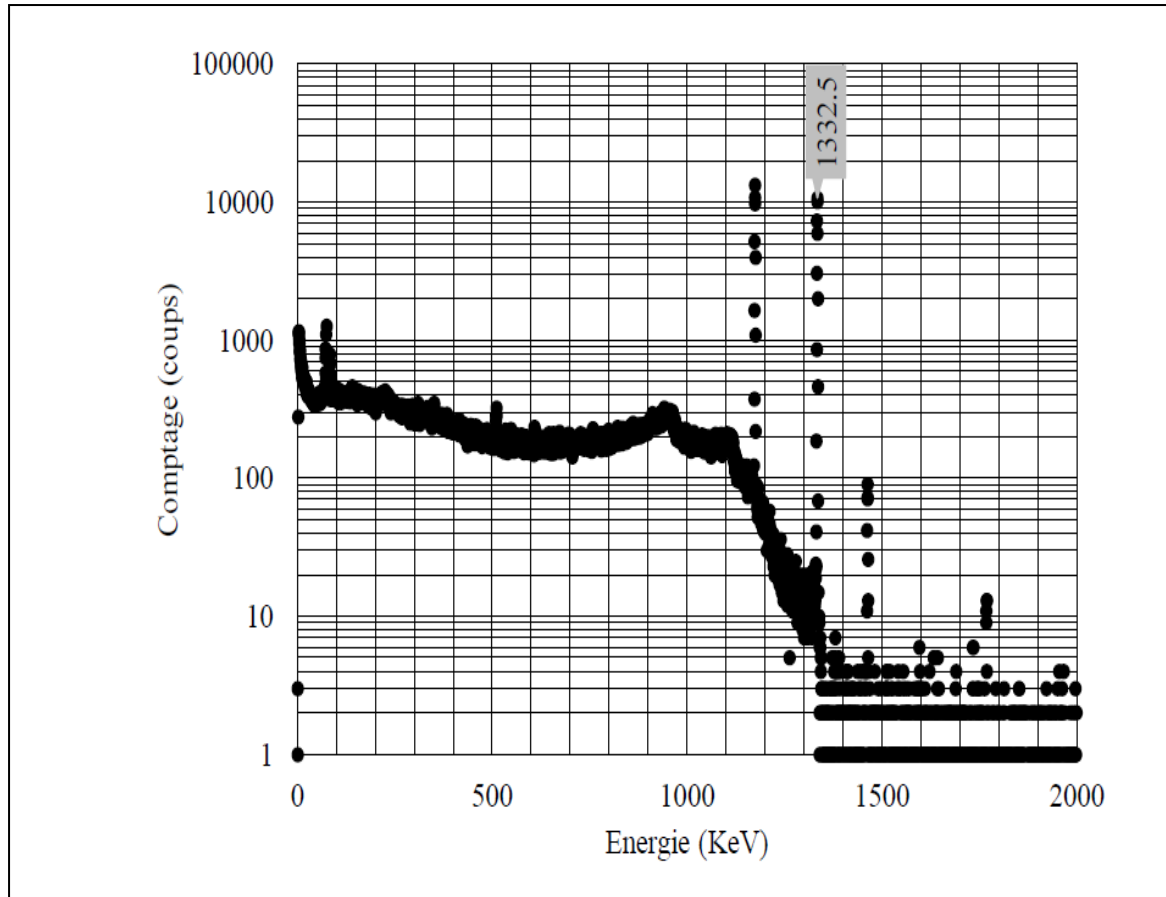
La précision des mesures dépend des performances des détecteurs HPGe, qui doivent être contrôlés selon des critères de qualité tels que la résolution, la forme des pics et le rapport pic-Compton. Elle dépend également de la connaissance de l'efficacité de détection (FEPE), liée à la géométrie source-détecteur et déterminée à partir de sources étalons [42].

Ce travail vise à étudier par spectrométrie gamma la radioactivité naturelle présente dans six (6) échantillons de sol qui entre dans la production des matériaux de construction prélevés dans l'est de l'Algérie.

Partie I : partie théorique

1. Les principales caractéristiques des spectromètres

Avant de présenter les principales caractéristiques de performance du détecteur HPGe GC3018 utilisé dans cette étude, la figure suivante illustre un spectre gamma typique obtenu



avec le système de mesure employé.

Figure 15. Spectre de mesure au système de spectrométrie gamma à détecteur HPGe GC3018[43].

2.1. Résolution

La raison pour L'IUPAC définit la résolution en spectroscopie comme la plus petite différence de nombre d'onde, de longueur d'onde ou de fréquence (associée à l'énergie) permettant de distinguer deux raies spectrales [44]. Le pouvoir de résolution R est exprimé comme le rapport entre la grandeur caractéristique (nombre d'onde, longueur d'onde, fréquence ou énergie) et la résolution.

Une bonne résolution est importante pour deux raisons principales. D'une part, elle permet de séparer des rayonnements gamma proches en énergie : lorsque les centres des pics sont espacés d'environ $3 \times \text{FWHM}$, les pics sont clairement résolus. D'autre part, une meilleure

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

résolution améliore la détection des petits pics sur un bruit de fond, car les comptages sont mieux concentrés et se distinguent plus facilement du continuum. C'est l'une des lesquelles les détecteurs HPGe sont préférés aux détecteurs NaI(Tl) dans les mesures de faibles activités.

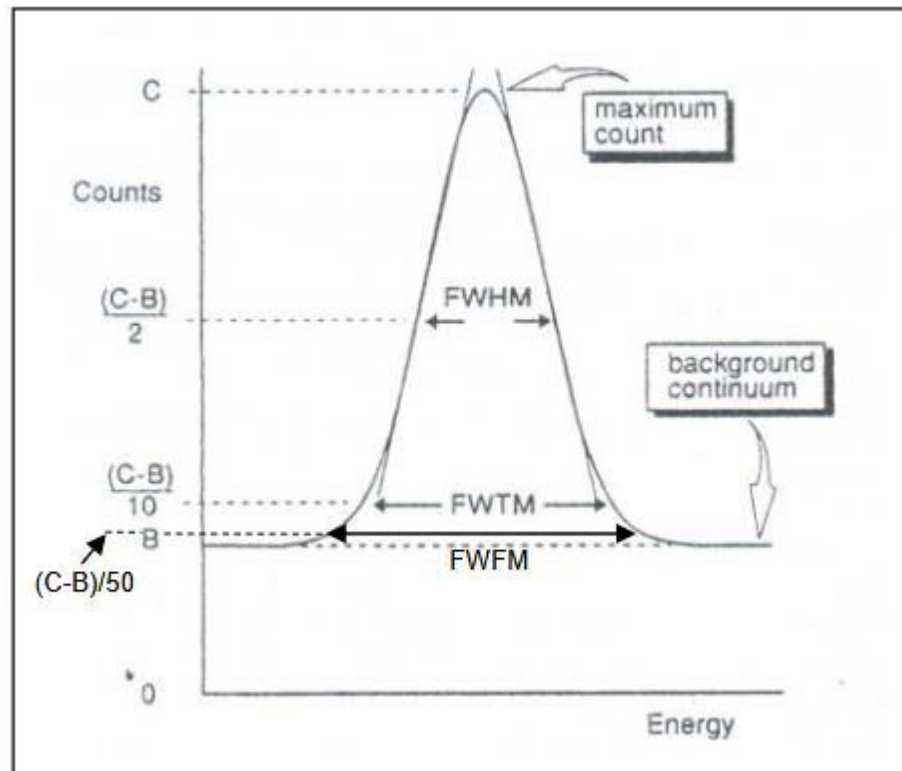


Figure 16. Résolution du détecteur (pic gaussien et largeurs caractéristiques) [45].

Après avoir présenté la résolution du détecteur à travers la figure précédente, le tableau suivant donne les valeurs de résolution (en keV) pour différents types de détecteurs disponibles sur le marché.

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

Tableau 3. Indique la valeur de résolution (en *KeV*) pour différents types de détecteurs disponibles sur le marché.

Detector type	Photon Energie(<i>KeV</i>)		
	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	–	–

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 les 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.

2.2. Forme gaussienne du pic

La forme gaussienne d'un pic est évaluée à l'aide des rapports FWTM/FWHM et FWHM/FWHM, permettant de vérifier l'élargissement du pic. Théoriquement, le rapport FWTM/FWHM est égal à 1,823, tandis qu'en pratique une valeur inférieure ou égale à 1,9 est généralement acceptable. De même, le rapport FWHM/FWHM vaut 2,376 en théorie et doit rester inférieur ou égal à 2,5 pour un pic considéré comme gaussien [46].

En pratique, le rapport FWHM/FWHM n'est pas toujours garanti par les fabricants, car il est fortement influencé par le continuum Compton (bruit de fond).

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

Tableau 4. Valeurs mesurées et garantis de FWHM, FWTM et FWFM.

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

2.3. Rapport Pic-au-Compton

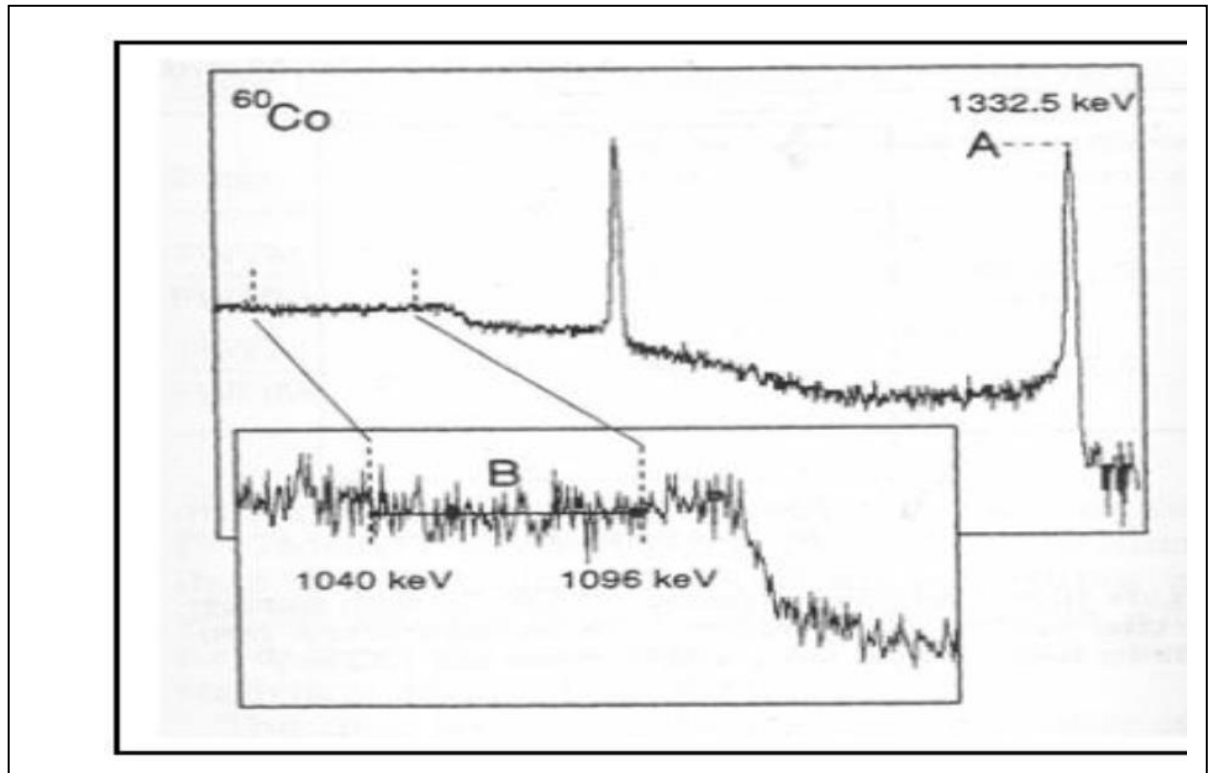
Tableau 5. Valeurs mesurées et garantis de rapport Pic-au-Compton.

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

La mesure du rapport pic-au-Compton est réalisée à partir du pic de 1332,5 keV du ^{60}Co , utilisé pour l'évaluation de la résolution. Selon la norme ANSI/IEEE, ce rapport correspond au rapport entre le nombre de coups au maximum du pic photoélectrique et le nombre moyen de coups dans une région du continuum Compton (1040–1096 keV).

Ce paramètre permet d'évaluer la qualité de détection du système et peut être assimilé à un rapport signal/bruit. Un rapport élevé indique une meilleure performance du détecteur, caractérisée par un pic bien défini et un continuum Compton réduit.

Les valeurs typiques varient d'environ 40:1 pour des détecteurs de faible efficacité à plus



de 90:1 pour des détecteurs HPGe performants [47].

Figure 17. 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).[47]

Un rapport élevé traduit une meilleure performance du détecteur, caractérisée par un pic photoélectrique plus intense et un continuum Compton plus faible.

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 [48].

2.4. Résolution et forme de pic

La figure 4 présente le spectre obtenu à partir d'une source de ^{60}Co placée à une distance de 25 cm de la fenêtre d'entrée (End-Cap) d'un détecteur coaxial HPGe. Le pic photoélectrique à 1332,5 keV ainsi que la région du continuum Compton comprise entre 1040 et 1096 keV sont clairement identifiés sur le spectre. Les données enregistrées ont servi à l'évaluation des

performances du détecteur, notamment la résolution, la forme du pic et le rapport pic-au-Compton, comme la montre la figure 18.

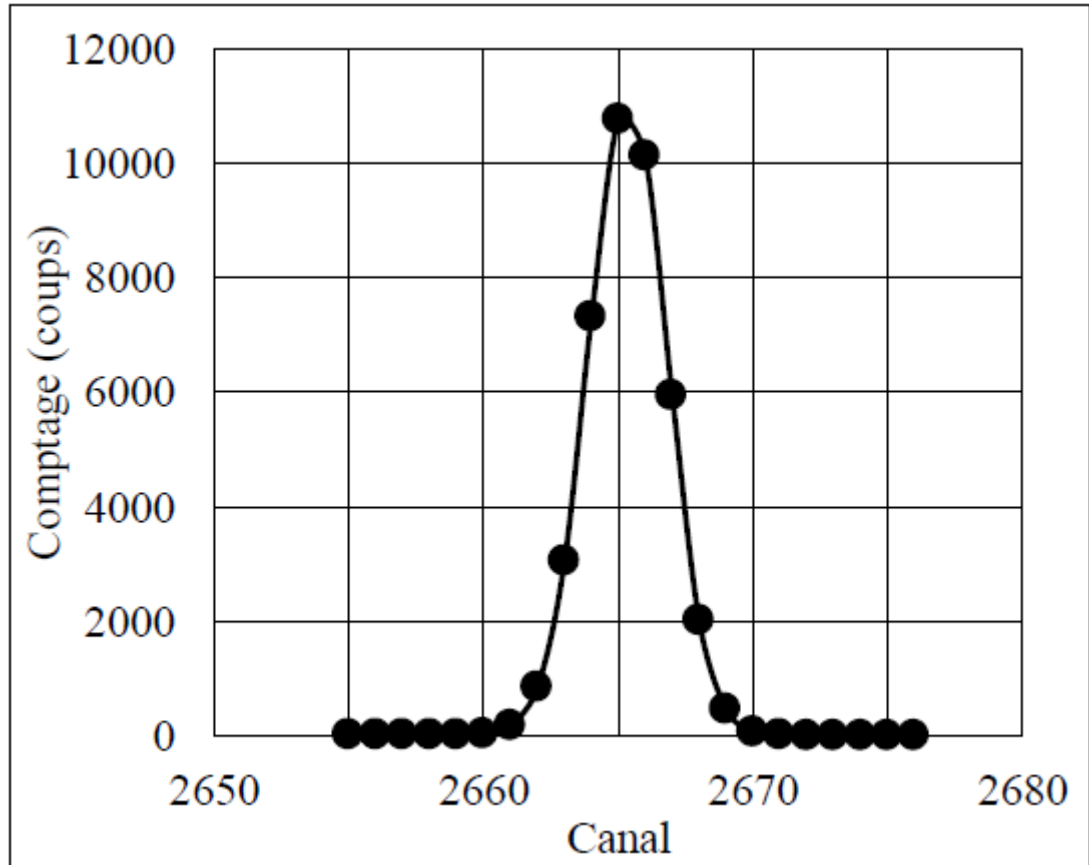


Figure 18. Pic Photoélectrique 1332.5 KeV typique bien défini à partir du spectre collecté [49].

L'approche adoptée pour l'ajustement de la courbe consiste à supposer que les données suivent une fonction contenant un certain nombre de paramètres inconnus. Ensuite, ces paramètres sont modifiés pour s'adapter au mieux aux données. Nous allons ajuster les pics photoélectriques de nos spectres gamma et supposer que le pic photoélectrique a la forme d'une fonction gaussienne due au rayon gamma, plus un bruit de fond. Nous limiterons notre ajustement aux données situées autour du pic photoélectrique, pour lesquelles ces hypothèses sont valables.

2.5. Source des rayons γ

L'étalonnage de l'efficacité d'absorption totale (FEPE) du détecteur GC3018 a été réalisé dans la gamme d'énergie de 53 à 1408 keV à l'aide des sources de référence ^{241}Am , ^{133}Ba ,

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

^{60}Co , ^{137}Cs et ^{152}Eu , fournies par LEA-CERCA (France). Les principales caractéristiques de ces sources sont présentées dans le tableau 6.

Les radionucléides utilisés sous forme de sources Marinelli assurent une répartition homogène des pics d'étalonnage sur l'ensemble du domaine énergétique étudié. Les énergies, les intensités d'émission gamma ainsi que les autres paramètres nucléaires des pics retenus sont regroupés dans le tableau 6. Les valeurs des demi-vies et des intensités gamma ont été extraites de la base de données de l'AIEA (2007) [48].

Tableau 6. 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	29/11/0 0 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				

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

	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				

3. Principe de la technique de spectrométrie gamma

La spectrométrie gamma est une technique radioanalytique permettant l'identification et la quantification des radionucléides présents dans un échantillon à partir des rayonnements gamma qu'ils émettent. Le principe de mesure repose sur la conversion de l'énergie déposée dans le détecteur HPGe en impulsions électriques proportionnelles à cette énergie. Ces signaux sont ensuite traités par la chaîne électronique du système afin d'obtenir un spectre énergétique exploitable pour l'analyse qualitative et quantitative des radionucléides étudiés [50].

3.1. Chaîne de spectrométrie gamma

Le système de détection est constitué d'une chaîne électronique qui permet de convertir le rayonnement gamma en spectre énergétique. Le principe général de transmission de l'information est le suivant :

Source radioactive → Détecteur HPGe → Préamplificateur → Amplificateur → Analyseur multicanaux (MCA) → Ordinateur

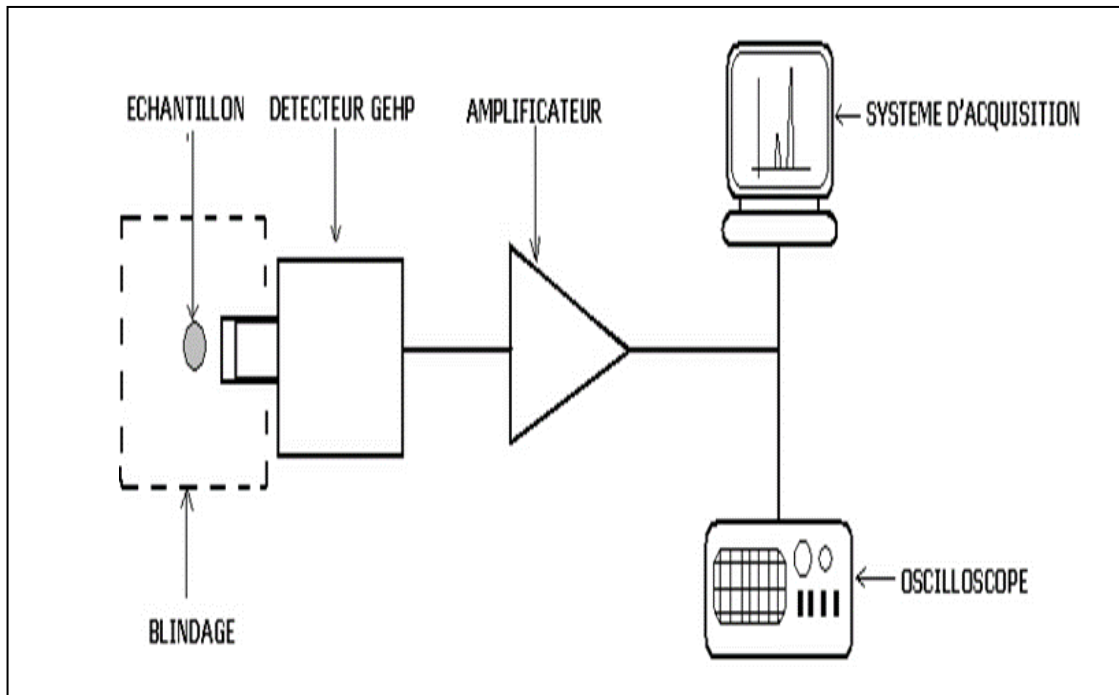


Figure 19 : Schéma de la chaîne de spectrométrie gamma [50].

4. Temps mort

Le temps mort correspond à la période durant laquelle le système de détection est incapable d'enregistrer un nouvel événement, car il est encore occupé au traitement d'un signal précédent. Cette limitation est liée aux différentes opérations électroniques, telles que l'amplification et le traitement des signaux. Les pertes de comptage augmentent avec l'activité de la source, en raison de la probabilité plus élevée de détection simultanée de plusieurs rayonnements gamma. Le logiciel d'analyse fournit généralement le temps réel de mesure ainsi que le temps actif, ce dernier tenant compte des pertes dues au temps mort.

5. Bruit de fond

Le bruit de fond correspond au signal enregistré par le système de mesure en l'absence de l'échantillon étudié. Il provient principalement du rayonnement cosmique, de la radioactivité naturelle présente dans l'environnement ainsi que des matériaux constituant le spectromètre. La connaissance du bruit de fond est essentielle pour améliorer la précision des mesures, notamment lors de la détermination de faibles activités. Sa contribution doit être soustraite du spectre mesuré et prise en compte dans le calcul des incertitudes.

Partie II : partie pratique

2.1. Site de l'étude : Zone industrielle de Bordj Bou Arreridj

2.1.1. Présentation générale de la zone d'étude

La wilaya de Bordj Bou Arreridj est située dans le nord-est de l'Algérie, au cœur de la plaine de la Medjana, entre les monts des Bibans au nord et la chaîne du Hodna au sud. Elle occupe une position géographique stratégique grâce à son emplacement entre plusieurs wilayas importantes telles que Sétif, M'Sila, Bejaïa et Bouira .

La wilaya se distingue également par son activité industrielle dynamique et diversifiée. Elle constitue l'un des pôles industriels les plus importants du pays, notamment dans les domaines de l'électroménager, de l'électronique et de la fabrication de matériels technologiques. Cette activité industrielle s'accompagne d'une utilisation importante de matériaux de construction et de ressources naturelles susceptibles de contenir des radionucléides naturels [51].

2.1.2. Sites et matériaux étudiés

Plusieurs sites d'échantillonnage ont été sélectionnés dans la zone industrielle de la province de Bordj Bou Arreridj afin de représenter différents matériaux de construction largement utilisés dans le secteur du bâtiment.

Ces échantillons sont représentatifs de différentes sources de matériaux de construction qui peuvent différer par leur composition minérale, et donc par leur teneur en radioactivité naturelle. Les matériaux de construction ont été sélectionnés en raison de leur utilisation fréquente dans les habitations et les infrastructures. Ils peuvent contenir naturellement des radionucléides tels que l'uranium, le thorium et le potassium, susceptibles de contribuer à l'exposition radiologique de la population. Les sites d'échantillonnage sont présentés dans la figure :

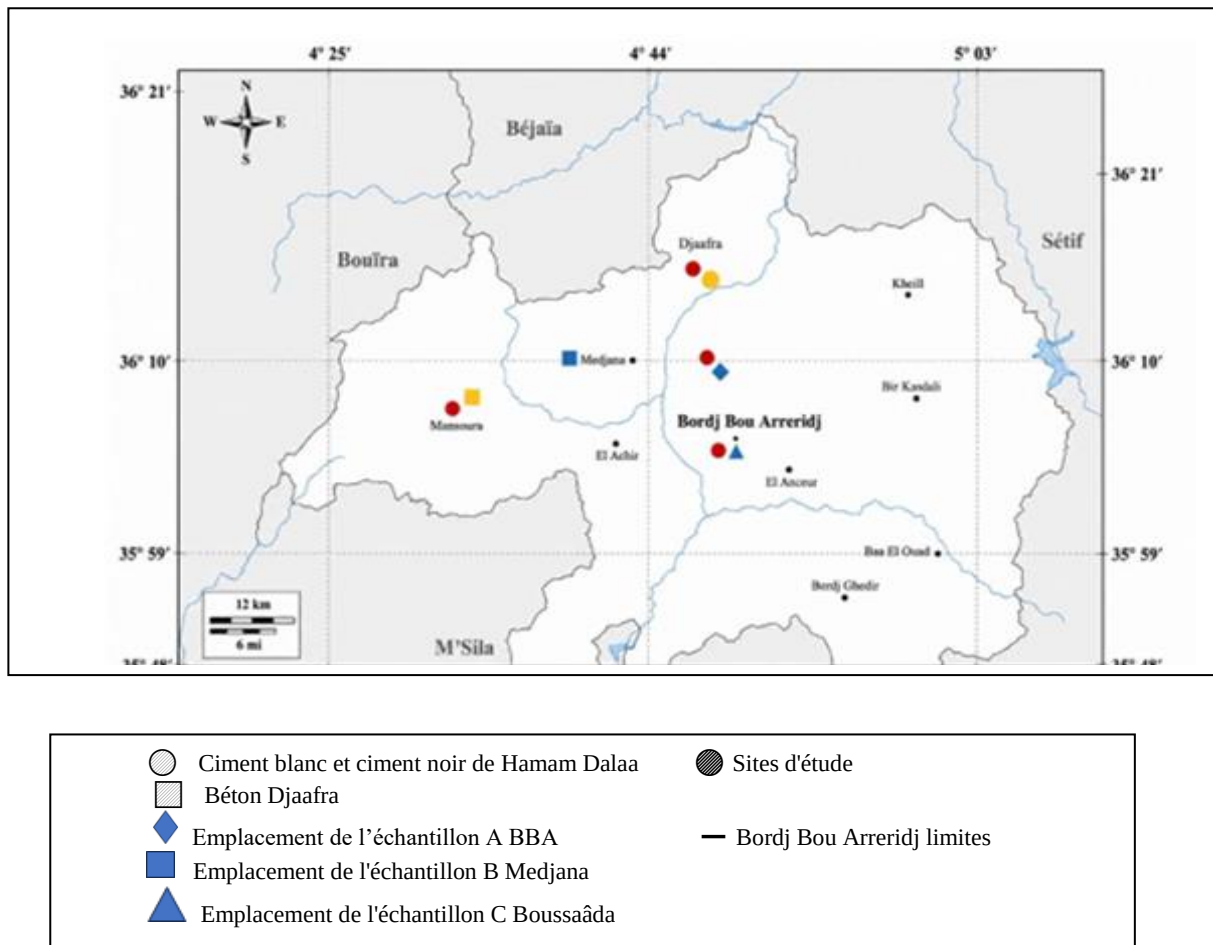


Figure 20. Carte de localisation des sites de prélèvement des échantillons de matériaux de construction étudiés dans la région de Bordj Bou Arreridj (Algérie) [52].

2.1.3. Nature des échantillons étudiés

a) Le sable

Le sable est un matériau de construction essentiel constitué principalement de quartz, avec des proportions variables de mica et de feldspath. Il provient de la désagrégation des roches sous l'action d'agents naturels tels que le vent et l'eau [53].



Figure 21. Le sable de Boussaâda.

b) Le ciment

Le ciment est un matériau hydraulique composé principalement de CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et de Fe_2O_3 . Il durcit en présence d'eau et est largement utilisé dans le secteur de la construction [54].

Dans cette étude, nous considérons les types de ciment suivants :

- ciment gris
- ciment blanc (Hammam Dalaa)
- ciment noir (Hammam Dalaa).



Figure 22. Ciment de Bordj Bou Arreridj.

c) Les briques rouges

Les briques rouges sont des matériaux fabriqués à partir d'argile cuite à haute température. Leur fabrication comprend plusieurs étapes : stockage, concassage, broyage, tamisage, moulage, séchage et cuisson.

Ces étapes influencent directement les propriétés finales du matériau ainsi que sa composition radiologique [55].

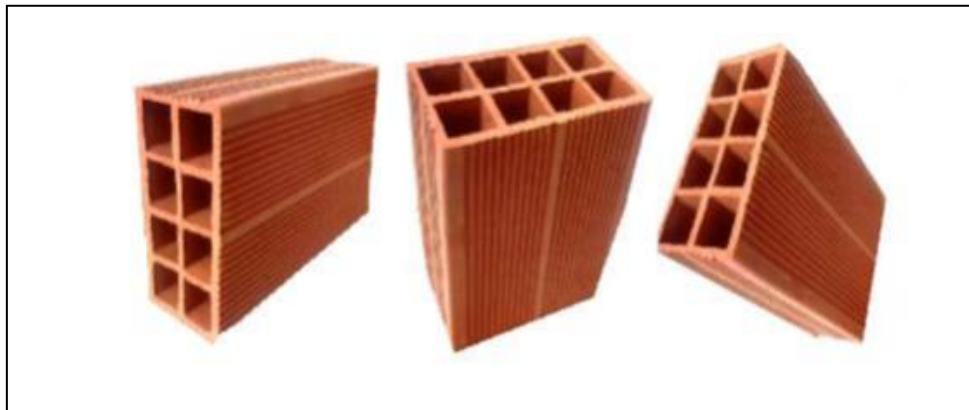


Figure 23. Le brique rouge de Medjana BBA

d) Le béton

Le béton est un matériau composite constitué de ciment, de sable, de gravier et d'eau. L'échantillon étudié provient de la région de Djaafra et sert à évaluer la radioactivité naturelle.



Figure 24. Le béton

2.2. Échantillonnage et conditionnement

2.2.1. Méthodologie de prélèvement

Les échantillons analysés dans le cadre de cette étude ont été prélevés sur différents sites industriels et dans différentes zones environnementales réparties sur plusieurs régions. L'objectif de cette campagne est de recueillir des échantillons représentatifs de matériaux de construction couramment utilisés, afin d'évaluer leur contribution à la radioactivité naturelle par spectrométrie gamma.

Les matériaux étudiés sont les suivants :

- Échantillon A : ciment gris provenant de M'Sila
- Échantillon B : brique rouge issue de la région de Medjana (Bordj Bou Arreridj)
- Échantillon C : sable prélevé à Boussaâda
- Échantillon E : ciment blanc de Hammam Dalaa
- Échantillon F : ciment noir de Hammam Dalaa
- Échantillon G : béton provenant de Djaafra.

Ces échantillons ont été sélectionnés en raison de leur utilisation courante dans le secteur du bâtiment, ainsi que de la diversité de leur origine géologique et industrielle, ce qui permet de comparer de manière pertinente les niveaux de radioactivité naturelle.



Figure 25. Les six échantillons

2.2.2 Identification et codification des échantillons

Afin d'assurer une traçabilité rigoureuse et une exploitation optimale des données expérimentales, chaque échantillon a été attribué à un code spécifique permettant de l'identifier tout au long du protocole analytique.

Tableau 7. Identification et codification des échantillons expérimentaux

Code	Nature de l'échantillon	Provenance
A	Ciment gris	M'Sila
B	Brique rouge	Medjana (BBA)
C	Sable	Boussaàda
E	Ciment blanc	Hammam Dala
F	Ciment noir	Hammam Dala
G	Béton	Djaafra (BBA)

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

2.2.3. Conditionnement, transport et stockage

Après leur prélèvement, les échantillons ont été conditionnés dans des récipients hermétiques adaptés afin de préserver leur intégrité physico-chimique et d'éviter toute contamination ou perte de matière. Chaque échantillon a été étiqueté avec soin conformément au système de codification défini précédemment. Ils ont ensuite été transportés vers le laboratoire dans des conditions contrôlées, puis stockés à température ambiante dans un environnement sec jusqu'à leur préparation et leur analyse.

Ces précautions expérimentales sont essentielles pour garantir la fiabilité et la reproductibilité des mesures de radioactivité effectuées par spectrométrie gamma.

2.3. Présentation des échantillons

Les matériaux de construction étudiés dans le cadre de ce travail sont largement utilisés dans le secteur du bâtiment en Algérie. Ces matériaux peuvent naturellement contenir des radionucléides tels que l'uranium 238, le thorium 232 et le potassium 40, qui sont à l'origine d'une exposition aux rayonnements ionisants. L'étude de ces matériaux permet d'évaluer leur impact radiologique potentiel sur la population exposée dans les habitations et les bâtiments.

2.4. Activités spécifiques

L'activité massique représente la concentration des radionucléides présents dans les matériaux étudiés. Les mesures ont été réalisées par spectrométrie gamma à l'aide d'un détecteur HPGe (High Purity Germanium) à haute résolution. Les résultats obtenus montrent une variation notable des concentrations radioactives en fonction de la nature géologique et chimique des matériaux de construction. L'activité massique des radionucléides naturels ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th a été déterminée pour l'ensemble des échantillons analysés. L'activité spécifique des radionucléides naturels a été calculée en appliquant la formule suivante :

$$A_s = \frac{N(S-B)}{t_C \times P_\gamma \times \epsilon \times c \times M} \quad (7)$$

A_s : Activité spécifique de l'échantillon ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)

S : La surface sous le pic

B : Bruit de fond

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

t_c : Temps de comptage, égal à 180 000 s (50 heures).

P_γ : Probabilité d'émission des rayonnements γ

ε : Efficacité absolue de notre détecteur HPGe

M ou m : La masse des échantillons en kg.

3. Calcul d'erreurs

3.1. L'incertitude sur cette formule est obtenue par

$$\frac{\Delta A}{A} = \sqrt{\left(\frac{\Delta S}{S}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_\gamma}{P_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}\right)^2 + \left(\frac{\Delta m}{m}\right)^2} \quad (8)$$

$\frac{\Delta A}{A}$: rapport de l'incertitude relative.

$\frac{\Delta S}{S}$: incertitude relative sur le nombre de coups net s.

$\frac{\Delta P_\gamma}{P_\gamma}$: incertitude relative sur la probabilité d'émission gamma.

$\frac{\Delta \varepsilon}{\varepsilon}$: incertitude relative sur l'efficacité du détecteur.

$\frac{\Delta m}{m}$: incertitude relative sur la masse de l'échantillon.

Où : $\Delta t = 0$ et $\Delta m = 10^{-3}$ g.

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

Tableau 8. Activité spécifique et paramètres physiques des six échantillons

échantillons	Origine	AS (Bq/Kg)	Moyenne (Bq/Kg)	Energie(Kev)	Elément	P%	T _{1/2}
A	²³⁸ U séries	2377,84 ± 26,68	1908.49 ± 25.51	351	²¹⁴ Pb	53,6	26.8min
		3320,54 ± 48,00		609,3	²¹⁴ Bi	45,49	19.9min
		27,11 ± 1,846		63,29	²³⁴ Th	3,665	24.1y
	²³² Th séries	56,89 ± 56,89	715.24 ± 25.97	911,196	²²⁸ Ac	26,2	6.13h
		406,34 ± 32,86		727,1	²¹² Bi	6,65	1.01h
		2364,04 ± 68,00		583,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1min
		33,71 ± 2,401		84,373	²²⁸ Th	1,22	1.9y
	Primordial	140,25 ± 2,88	140.25 ± 2.88	1460,8	⁴⁰ K	10,67	1.28×10 ⁹ y
B	²³⁸ U séries	2847,06 ± 30,12	2263.39 ± 31.87	351	²¹⁴ Pb	35,6	26.8min
		3908,68 ± 52,78		609,3	²¹⁴ Bi	45,49	19.9min
		34,43 ± 2,596		63,29	²³⁴ Th	3,665	24.1y
	²³² Th séries	369,47 ± 5,74	4647.23 ± 53.53	911,196	²²⁸ Ac	26,2	6.13h
		2484,04 ± 67,61		727,1	²¹² Bi	6,65	1.01h
		15589,38 ± 209,59		538,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1min
		145,77 ± 6,272		84,373	²²⁸ Th	1,22	1.9y
	Primordial	927,36 ± 13,91	927.36 ± 13.9	1460,8	⁴⁰ K	10,67	1.28×10 ⁹ y
C	²³⁸ U séries	218,48 ± 6,25	401.29 ± 6.80	351	²¹⁴ Pb	35,6	26,8min
		584,10 ± 13,44		609,3	²¹⁴ Bi	45,49	19,9min
	²³² Th séries	23,25 ± 1,034	222.42 ± 10.66	911,196	²²⁸ Ac	26,2	6,13h
		170,43 ± 18,45		727,1	²¹² Bi	6,65	1,01h
		473,58 ± 39,61		583,187	²⁰⁸ Tl	85	3,1min
	Primordial	72,13 ± 1,59	72.13 ± 1.59	1460,8	⁴⁰ K	10,67	1,28×10 ⁹ y
E	²³⁸ U séries	37,26 ± 2,13	1973,45 ± 26,287	63,29	²³⁴ Th	3,665	24.1y
		3369,54 ± 33,23		351	²¹⁴ Pb	35,6	26.8min
		4730,61 ± 60,27		609,3	²¹⁴ Bi	45,49	19.9min
	²³² Th séries	54,64 ± 2,00	716,52 ± 27,99	911,196	²²⁸ Ac	26,2	6.13h
		351,68 ± 33,62		727,1	²¹² Bi	6,65	1.01h
		2401,611 ± 72,52		583,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1min
		58,84 ± 3,82		84,373	²²⁸ Th	1,22	1.9y
	Primordial	104,78 ± 2,35	104,78 ± 2,35	1460,8	⁴⁰ K	10,67	1.28×10 ⁹ y
F	²³⁸ U séries	27,412 ± 2,114	1973,45 ± 26,287	63,29	²³⁴ Th	3,665	24.1y
		3393,991 ± 47,975		351	²¹⁴ Pb	35,6	26.8min
		2498,946 ± 29,191		609,3	²¹⁴ Bi	45,49	19.9min
	²³² Th séries	62,322 ± 2,114	788,9 ± 28,650	911,196	²²⁸ Ac	26,2	6.13h
		438,315 ± 34,268		727,1	²¹² Bi	6,65	1.01h

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

G		2613,783 ± 74,938		583,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1min
		1,192 ± 3,279		84,373	²²⁸ Th	1.22	1.9y
	Primordial	143,72 ± 2,99	143,72 ± 2,99	1460,8	⁴⁰ K	10.67	1.28×10 ⁹ y
	²³⁸ U séries	4418,841 ± 40,070	5186,11 ± 55,80	351	²¹⁴ Pb	35.6	26.8min
		5953,38 ± 71,53		609,3	²¹⁴ Bi	45.49	19.9min
	²³² Th séries	133,45 ± 3,16	2280,02 ± 52,74	911,196	²²⁸ Ac	26.2	6.13h
		852,77 ± 43,65		727,1	²¹² Bi	6.65	1.01h
		5853,82 ± 111,42		583,187	²⁰⁸ Tl	85	3.1min
	Primordial	83,40±2,01	83,40 ± 2,01	1460,8	⁴⁰ K	10.67	1.28×10 ⁹ y

Tableau 9. Comparaison des activités spécifiques des radionucléides dans les six échantillons étudiés avec d'autres pays.

Pays	Echantillon	Activité (Bq·kg ⁻¹)			Références
		238U	232Th	40K	
Algérie	Echantillon A	1908.49	715.24	140.25	Présent travail
	Echantillon B	2263.39	4647.23	927.36	
	Echantillon C	401.29	222.42	72.13	
	Echantillon E	2712.47	716.52	104.78	
	Echantillon F	1971.43	783.94	84.73	
	Echantillon G	1861.16	830.04	84.04	
Égypte	Matériaux de construction	116 ± 54	64 ± 34	480 ± 220	Ahmed & El-Arabi (2005)
Iran	Matériaux de construction	16 ± 6	25 ± 11	280 ± 101	Bavarnegin et al. (2012)
Turquie	Ciments utilisés dans la construction	18 – 143	5 – 66	142 ± 540	Uygunol et al. (2016)
Espagne / Portugal	Matériaux de construction	62	31	519	Madruga et al. (2019)

Tableau 10. Activités spécifiques du ^{40}K , des familles de l' ^{238}U et du ^{232}Th dans les sols au niveau international en ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$)

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

4. Analyse et discussion

L'analyse quantitative présentée dans le tableau 6 révèle une variabilité importante des activités spécifiques entre les matériaux étudiés. L'échantillon B (brique rouge de Medjana) présente les valeurs les plus élevées pour la famille du ^{232}Th et le radionucléide ^{40}K , tandis que l'échantillon E (ciment blanc) se distingue par la plus forte activité de la famille du ^{238}U . À l'inverse, l'échantillon C (sable de Boussaâda) enregistre les activités les plus faibles. Cette variabilité est principalement liée à la composition minéralogique et à l'origine géologique des matériaux.

L'analyse des spectres gamma des échantillons étudiés (figures 8 à 13) met en évidence la présence des radionucléides naturels appartenant aux familles du ^{238}U , du ^{232}Th ainsi que du ^{40}K . Les différences observées dans l'intensité des pics confirment la variabilité des activités spécifiques entre les matériaux analysés. Les échantillons présentant les activités les plus élevées montrent des pics plus intenses, alors que l'échantillon C se caractérise par des pics moins marqués, ce qui est en accord avec les résultats de l'analyse quantitative.

Les figures 1, 2 et 3 confirment les tendances observées dans le tableau 6, alors que la figure 4 offre une vue d'ensemble permettant de comparer simultanément les contributions du ^{238}U , du ^{232}Th et du ^{40}K dans les différents échantillons. Elle met clairement en évidence les niveaux élevés de radioactivité naturelle observés dans les échantillons B et E par rapport aux autres matériaux analysés. La comparaison des activités spécifiques des radionucléides naturels

Chapitre III : Mesure de la radio activité des échantillons de matériaux de construction par spectrométrie GAMMA

dans les six échantillons met ainsi en évidence une variabilité importante des concentrations d'activité d'un matériau à un autre, principalement liée à leur nature et à leur composition.

La comparaison avec les données de la littérature internationale (tableau 7) montre que les activités spécifiques mesurées dans cette étude sont généralement supérieures à celles rapportées en Égypte, en Iran, en Turquie ainsi qu'en Espagne et au Portugal. Cette observation est corroborée par le tableau 8, qui indique que les activités associées à la famille du ^{238}U dépassent largement les intervalles généralement rapportés à l'échelle internationale, tandis que celles du ^{232}Th et du ^{40}K demeurent comparables ou légèrement supérieures selon les échantillons. Ces résultats mettent ainsi en évidence une radioactivité naturelle relativement élevée dans certains matériaux de construction étudiés.

5. Conclusion

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux de la spectrométrie gamma ainsi que le système de détection HPGe utilisé pour l'étude des radionucléides naturels. Une analyse expérimentale a ensuite été réalisée sur différents matériaux de construction. Les résultats ont mis en évidence la présence des radionucléides naturels des séries de l' ^{238}U et de l' ^{232}Th , ainsi que du ^{40}K dans l'ensemble des échantillons, avec une variabilité des activités selon la nature des matériaux. La comparaison avec les données internationales montre que certaines valeurs, notamment celles liées à la série de l' ^{238}U , restent relativement élevées, tandis que celles du ^{232}Th et du ^{40}K sont globalement comparables aux références. Cette étude confirme ainsi l'intérêt de la spectrométrie gamma pour l'évaluation de la radioactivité naturelle des matériaux de construction.

CONCLUSION

Conclusion générale

Au terme de ce travail de recherche consacré à l'utilisation des techniques nucléaires pour l'étude de la pollution environnementale, il apparaît clairement que la maîtrise des outils spectroscopiques est une clé de voûte de la surveillance environnementale moderne. Les recherches menées tout au long des trois chapitres ont permis de démontrer que l'identification précise des polluants, qu'ils soient d'origine chimique ou radiologique, nécessite une compréhension rigoureuse des phénomènes physiques sous-jacents. Le volet théorique nous a permis de mettre en évidence la supériorité des détecteurs HPGe en matière de résolution énergétique, facilitant ainsi une identification fiable des radionucléides naturels comme l'uranium, le thorium et le potassium. La partie pratique, dédiée à l'analyse des matériaux de construction de la région de Bordj Bou Arreridj, a confirmé la pertinence de cette technique, révélant des variations significatives dans les niveaux d'activité spécifique selon la nature géologique et industrielle des échantillons. Cette étude a non seulement permis de dresser une cartographie radiologique préliminaire de ces matériaux, mais elle a également souligné l'importance du respect des normes internationales de sécurité face à l'exposition aux rayonnements ionisants. En conclusion, les résultats obtenus confirment que la spectrométrie gamma demeure une méthode d'analyse non destructive de haute précision, essentielle pour le contrôle de la qualité des matériaux et la préservation de la santé humaine. Ce travail ouvre ainsi la voie à de futures investigations plus approfondies, notamment par l'intégration de modèles de simulation numérique et l'extension des analyses à une plus large gamme de contaminants environnementaux.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Références bibliographiques

- [1] Sharma, M., & Kashyap, P. (2022). Pollution and its types. *Journal Global Values*, Vol. XIII, Special Issue. <https://doi.org/10.31995/jgv.2022.v13iS.026>
- [2] Khasanova, S., Alieva, E., & Shemilkhanova, A. (2023). Environmental pollution: types, causes and consequences. *BIO Web of Conferences*, 63, 07014.
- [3] World Health Organization (WHO). (n.d.). Air pollution. Disponible à : <https://www.who.int/health-topics/air-pollution> (consulté en mars 2026).
- [4] World Health Organization. WHO Global Air Quality Guidelines. Geneva: World Health Organization, 2021, p. 191.
- [5] Mishra, R. K., Mohammad, N., & Roychoudhury, N. (2016). Soil pollution: Causes, effects and control. Tropical Forest Research Institute. Available at ResearchGate: https://www.researchgate.net/publication/289281444_Soil_pollution_Causes_effects_and_control.
- [6] Ansari, A. A., Gill, S. S., Lanza, G. R., & Rast, W. (Eds.). (2011). Eutrophication: Causes, Consequences and Control. Springer Science & Business Media.
- [7] Havugimana, E., Bhople, B. S., Kumar, A., Byiringiro, E., Mugabo, J. P., & Kumar, A. (2017). Soil pollution: major sources and types of soil pollutants. *Environmental Science and Engineering*, 11, 53–86.
- [8] FAO. (2018). Water quality for agriculture (FAO Irrigation and Drainage Paper No. 29 Rev. 1). Food and Agriculture Organization. <https://www.fao.org/3/i9183en/I9183EN.pdf>
- [9] Moulinec, A., et al. (2025). Assessing chemical pollution with biomonitoring approaches in streams and rivers. *Environmental Sciences Europe*, 37(1), 69. <https://doi.org/10.1186/s12302-025-01110-z>
- [10] Suter, G. W. (2016). *Ecological Risk Assessment* (3rd ed.). CRC Press.
- [11] Martin, L., et al. (2025). Physical activity, air pollution, and mortality. *Sports Medicine-Open*, 11(1), 35.
- [12] Thompson, J. M. (2018). *Infrared Spectroscopy*. Jenny Stanford Publishing.
- [13] Al-Amin, K., et al. (2025). FTIR spectroscopic technique for inorganic materials. *Nanoscale Advances*, 7, 6677–6702. <https://doi.org/10.1039/D5NA00522A>
- [14] Thakur, Y. P., et al. (2025). IR spectroscopy interpretation guide. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Drug Analysis*, 5(2), 6–12.

- [15] Imaizumi, M. (2024). Overview on spectral analysis techniques for gamma-ray spectrometry. *Journal of Nuclear Science and Applications*, 18(2), 45–60.
- [16] Bashiri, B., et al. (2024). Machine learning applications in gamma spectroscopy. *Journal of Radiation Measurements*, 62, 101–115.
- [17] Yücel, H., & Dikmen, H. (2009). Gamma-ray spectrometric methods. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 280, 453–464.
- [18] Maléchaux, A., et al. (2021). Influence of gamma irradiation on materials. *Polymers*, 13(9), 1451. <https://doi.org/10.3390/polym13091451>
- [19] IAEA. (2018). *Measurement of Radionuclides in Food and Environment (Technical Reports Series No. 295)*. International Atomic Energy Agency.
- [20] L'Annunziata, M. F. (2012). *Handbook of Radioactivity Analysis (3rd ed.)*. Academic Press.
- [21] AFRA / IAEA. (2018). *Teaching Modules in Environmental Isotope Hydrology*. International Atomic Energy Agency.
- [22] Dendene, O. (2009). *Étude par spectrométrie gamma des eaux thermales*. Thèse de Magister, Université Ferhat Abbas - Sétif.
- [23] Lefort, M. (1969). *Les radiations nucléaires*. Presses Universitaires de France (PUF).
- [24] Kebir, H. (2017). *Uranium-238 in thermal waters*. Thèse de Doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1 (UFAS).
- [25] Akkurt, I., et al. (2010). Interaction of gamma rays with matter. *Annals of Nuclear Energy*, 37(7), 910–914.
- [26] Hossain, I., et al. (2021). Monte Carlo simulation of NaI(Tl) gamma spectra. *Radiation Physics and Chemistry*, 185, 109491.
- [27] Bodeneau, J. C. (1982). *Détection des rayonnements*. Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN).
- [28] Otte, A. N. (2017). Silicon photomultiplier review. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 845, 8–18.
- [29] Chierici, A., et al. (2022). Gamma spectrometer for unmanned systems. *Sensors*, 22(3), 1078. <https://doi.org/10.3390/s22031078>

- [30] Gundacker, S., & Heering, A. (2020). Silicon photomultipliers. *Physics in Medicine & Biology*, 65(17), 17TR01.
- [31] Huy, N. Q., et al. (2011). NaI(Tl) vs HPGe detectors for radioactivity measurement. *Applied Radiation and Isotopes*, 69(7), 1034–1039.
- [32] Nachab, A. (2003). Monte Carlo studies in gamma detection. Thèse de Doctorat, Université de Strasbourg.
- [33] Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement* (4th ed.). Wiley.
- [34] Fazio, A., et al. (2024). Airborne gamma-ray spectrometry using drone technology for environmental monitoring. *Journal of Environmental Radioactivity*, 271, 107312. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2023.107312>
- [35] Helmer, R.G.; van der Leun, C. Recommended Standards for Gamma-Ray Energy Calibration. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 450(1), 35–70, 2000.
- [35] Helmer, R. G., & van der Leun, C. (2000). Gamma-ray calibration standards. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 450(1), 35–70.
- [36] ICRU. (1994). Gamma-ray interaction and standards (ICRU Report 52). International Commission on Radiation Units and Measurements.
- [37] Gilmore, G. (2008). *Practical Gamma-Ray Spectrometry* (2nd ed.). Wiley.
- [38] Mulyana, D., & Chirayath, S. S. (2024). Gamma spectroscopy safeguards. *Annals of Nuclear Energy*, 195, 110186.
- [39] Cechák, T., & Klusoň, J. (2010). In-situ gamma spectrometry. *Applied Radiation and Isotopes*, 68(4–5), 529–535.
- [40] IAEA. (1989). Radionuclide measurement in food and environment. International Atomic Energy Agency.
- [41] NCRP. (2004). Radiation shielding design and protection for medical X-ray imaging facilities (NCRP Report No. 147). National Council on Radiation Protection and Measurements.
- [42] EPA. (2019). Water contaminants assessment report. Environmental Protection Agency.
- [43] Jenkins, R. (2023). *Introduction to X-Ray Spectrometry and Radiation Counting*. Springer Nature.
- [44] IEEE. (1996). IEEE Standard Test Procedures for Germanium Detectors for Ionizing Radiation (IEEE Std 325-1996). IEEE.

[45] Oberer, R. B., & Miller, L. F. (2021). Channel-to-energy calibration methods for digital gamma-ray spectrometers. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 329(2), 845–853.

[46] IAEA. (2014). Guidelines for radioelement mapping using gamma ray spectrometry data (TECDOC No. 1363). International Atomic Energy Agency.

[47] IAEA. (2007). Gamma-ray standards for detector calibration. International Atomic Energy Agency.

[48] Abbas, M. I. (2006). Solid angle calculations. *Applied Radiation and Isotopes*, 64(9), 1048–1056.

[49] Podgorsak, E. B. (2022). *Radiation Physics for Medical Physicists* (4th ed.). Springer.

[50] Khinouche, S., & Meddah, K. (2021). Urban evolution study [Master's thesis]. Université Ferhat Abbas - Sétif 1.

[51] Garcia-Talavera, M., et al. (2000). Monte Carlo detector modeling. *Applied Radiation and Isotopes*, 52(3), 777–783.

[52] Boutaghane, H., Boudjemaa, K., & Dehimi, S. (2022).

Geospatial modelling of the future urban expansion map using AHP and GIS in Bordj Bou Arreridj, Algeria.

Journal of Degraded and Mining Lands Management, 9(4), 3733–3743.

<https://doi.org/10.15243/jdmlm.2022.094.3733>

[53] Helmer, R. G. (2003). Gamma spectrometry tools and simulation codes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 505(1–2), 322–326.

[54] Lafarge Algeria. (2024). Fiche produit ciment super blanc Malaki TM 52.5. <https://www.lafarge.dz/sites/algeria/files/docs/fiche-produit-ciment-super-blanc-malaki-tm-52-5-en-francais.pdf>🔗

[55] Karamanis, D., et al. (2002). HPGe detector efficiency. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, 487(3), 477–487.

ANNEXES

ANNEXE 1

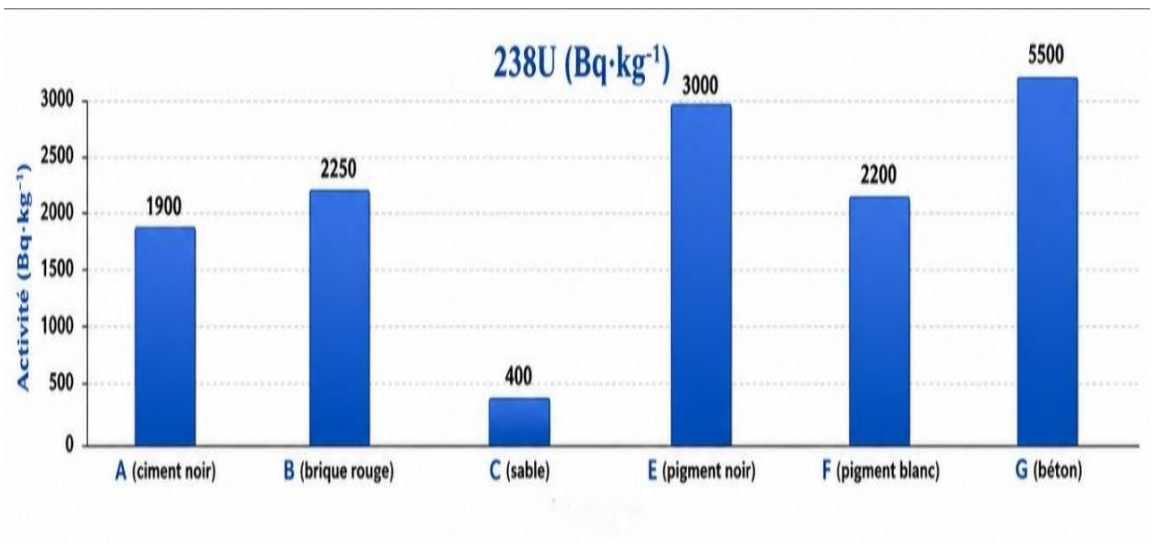


Figure 1. Les activités spécifiques de ^{238}U dans les six échantillons utilisés

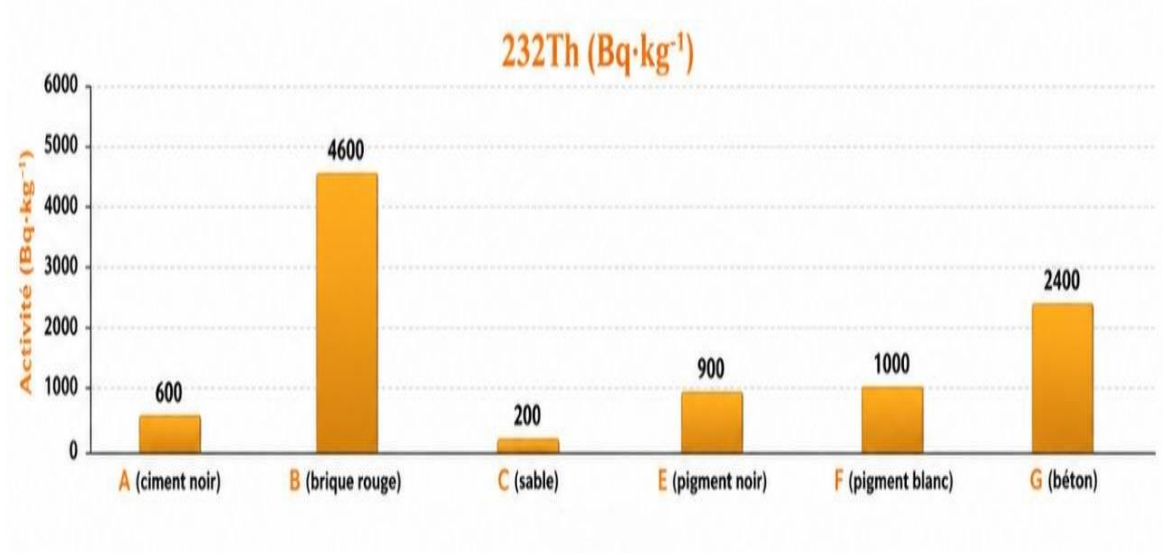


Figure 2. Les activités spécifiques de ^{232}Th dans les six échantillons utilisés

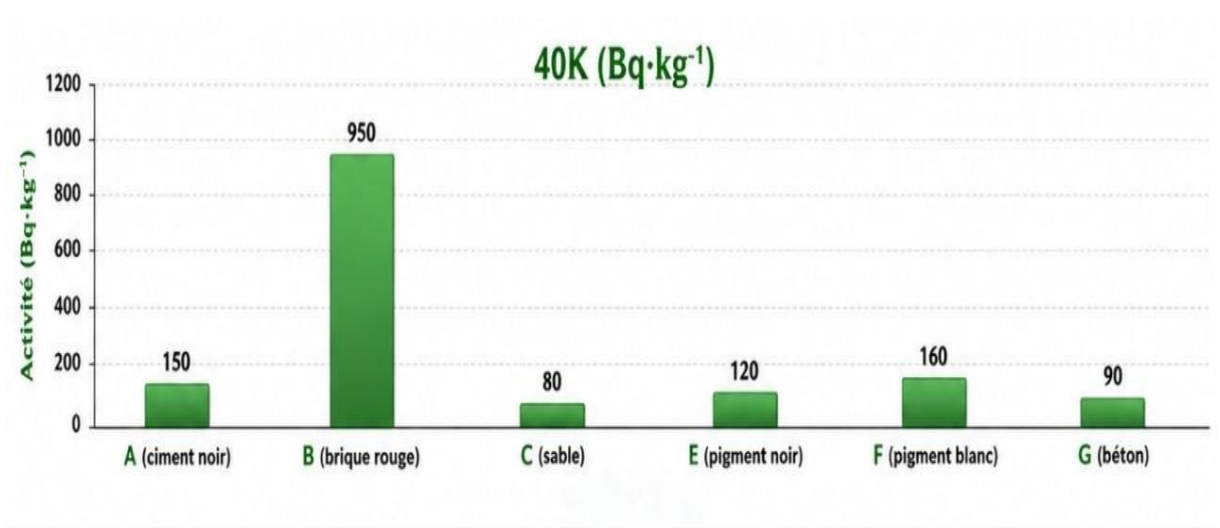


Figure 3. Les activités spécifiques de ⁴⁰K dans les six échantillons utilisés

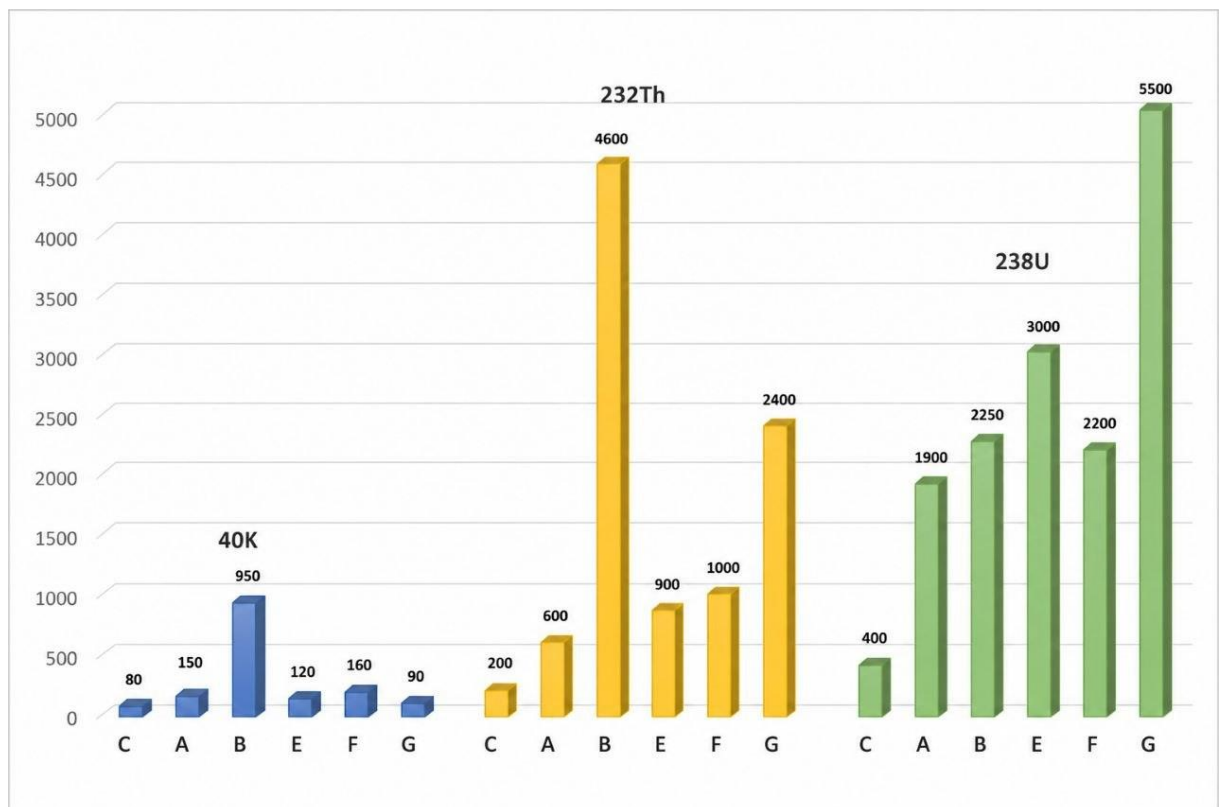


Figure 4. Comparaison des activités spécifiques de ²³⁸U, ²³²Th et ⁴⁰K des six échantillons

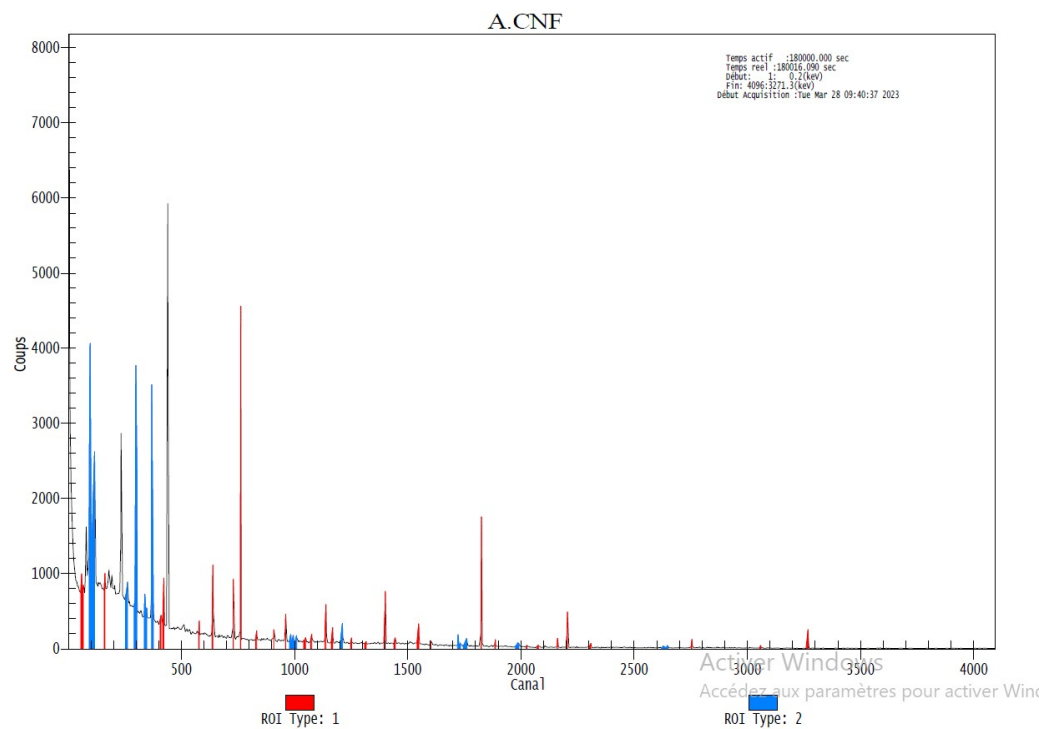


Figure 5. Spectre A de ciment noir M'Sila .180000 s (50heurs)

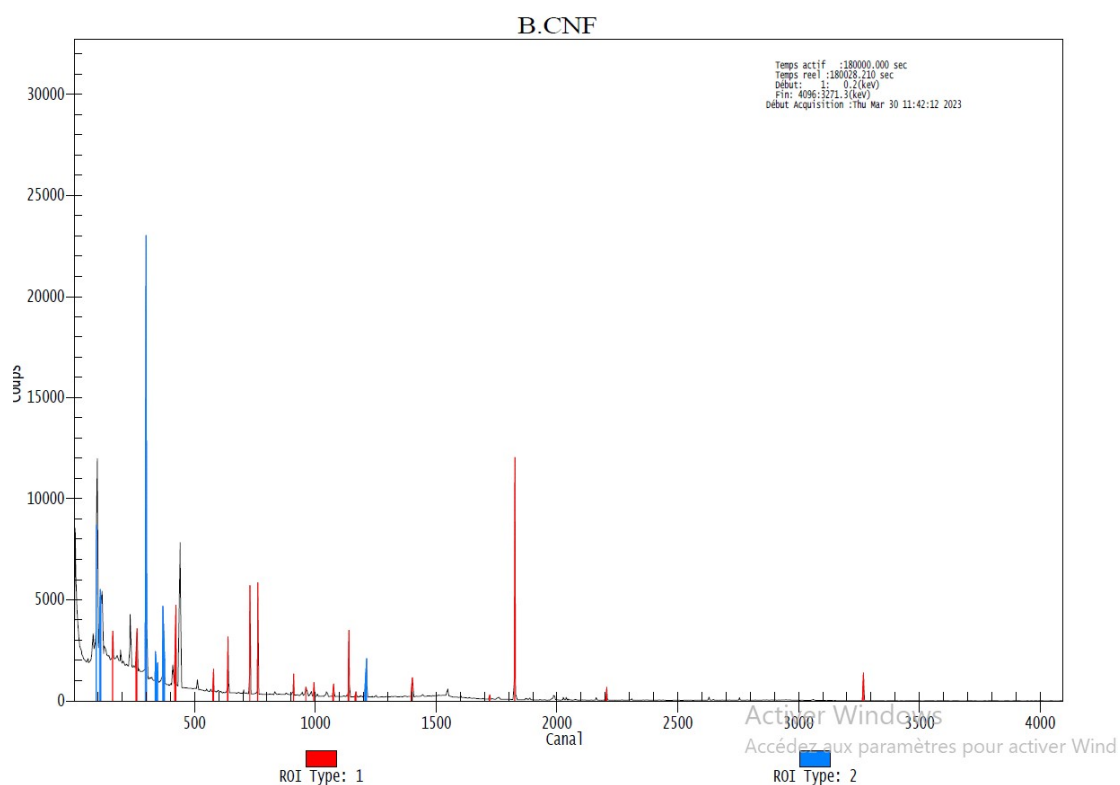


Figure 6. Spectre de B le brique rouge de Medjana BBA. 180000 s (50heurs)

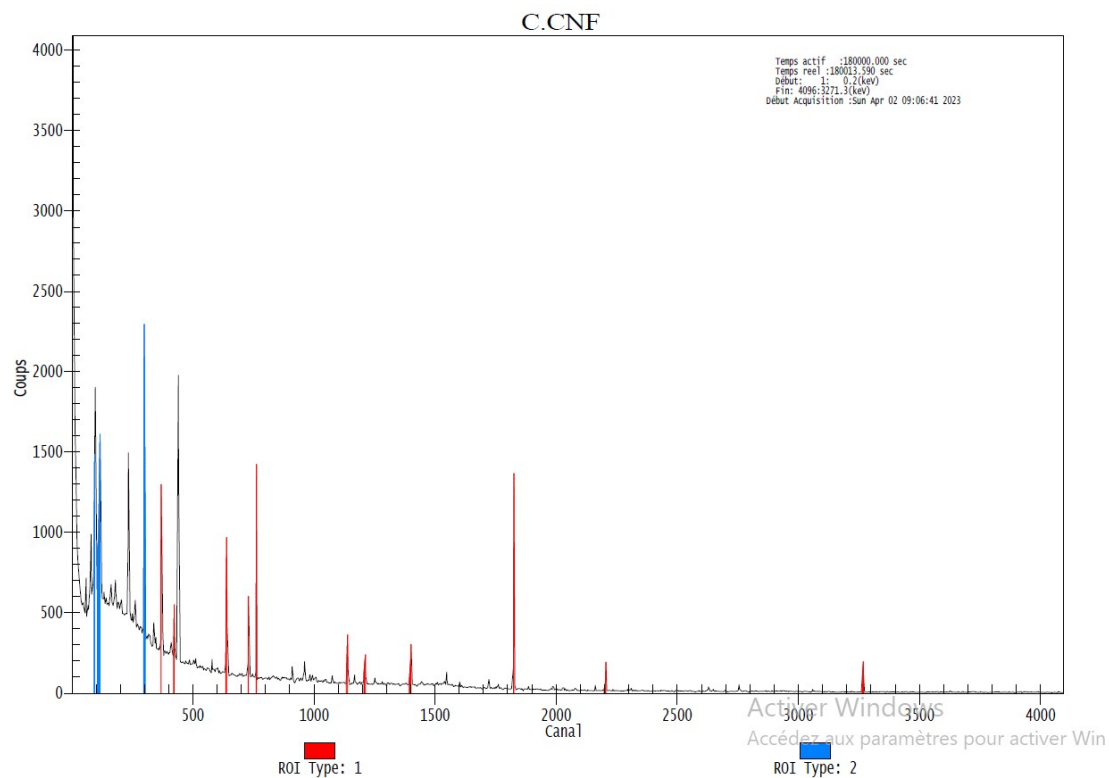


Figure 7. Spectre de C le sable de Boussaâda. 180000 s (50heurs)

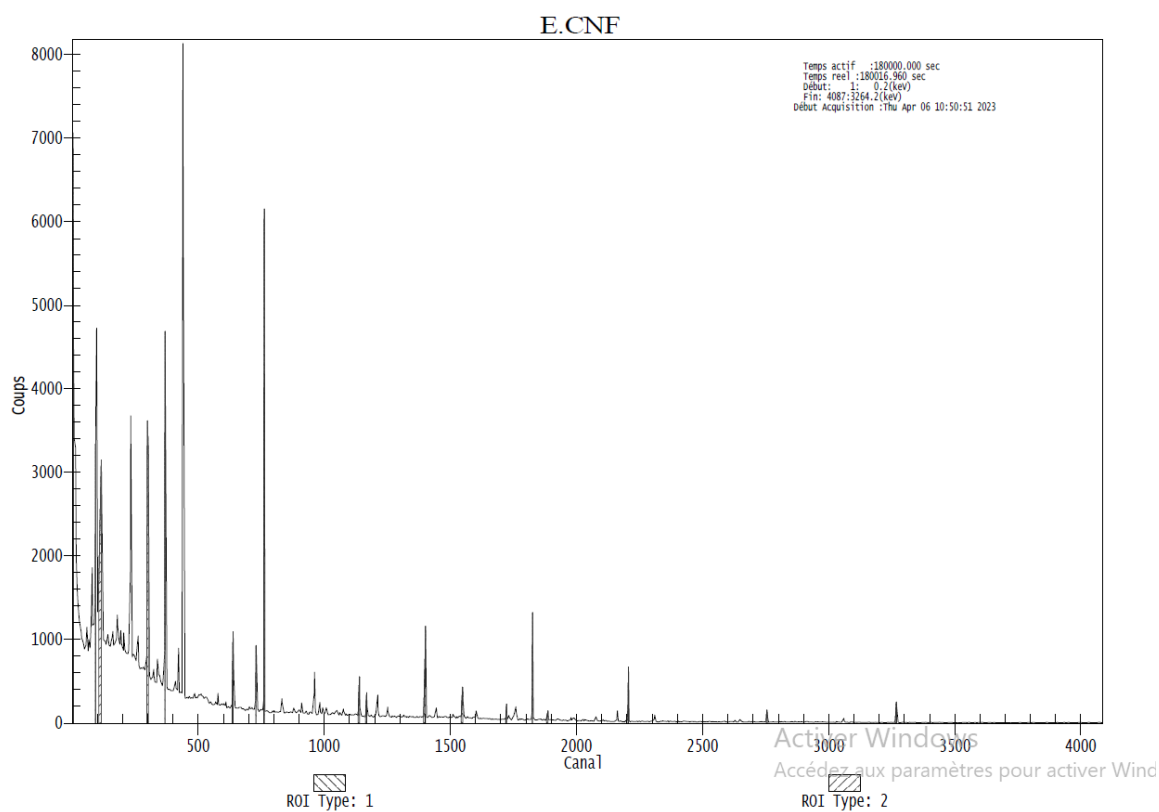


Figure 8. Spectre de l'échantillon E (ciment noir)

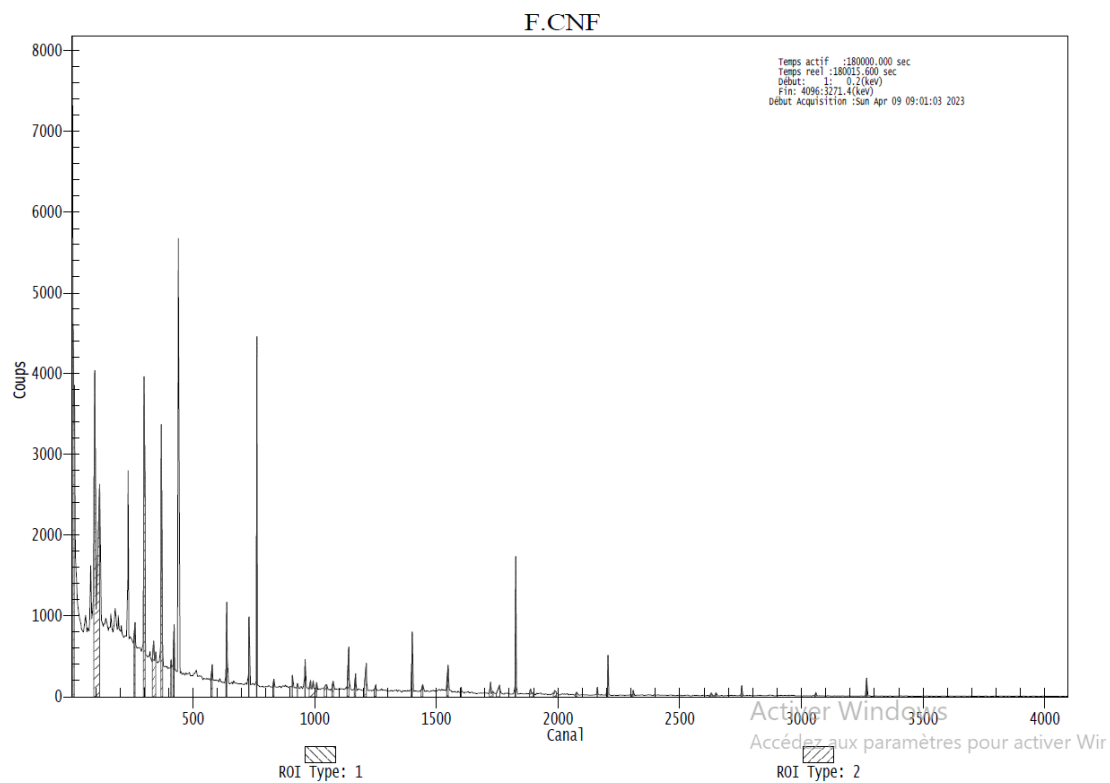


Figure 9. Spectre de l'échantillon F (ciment blanche)

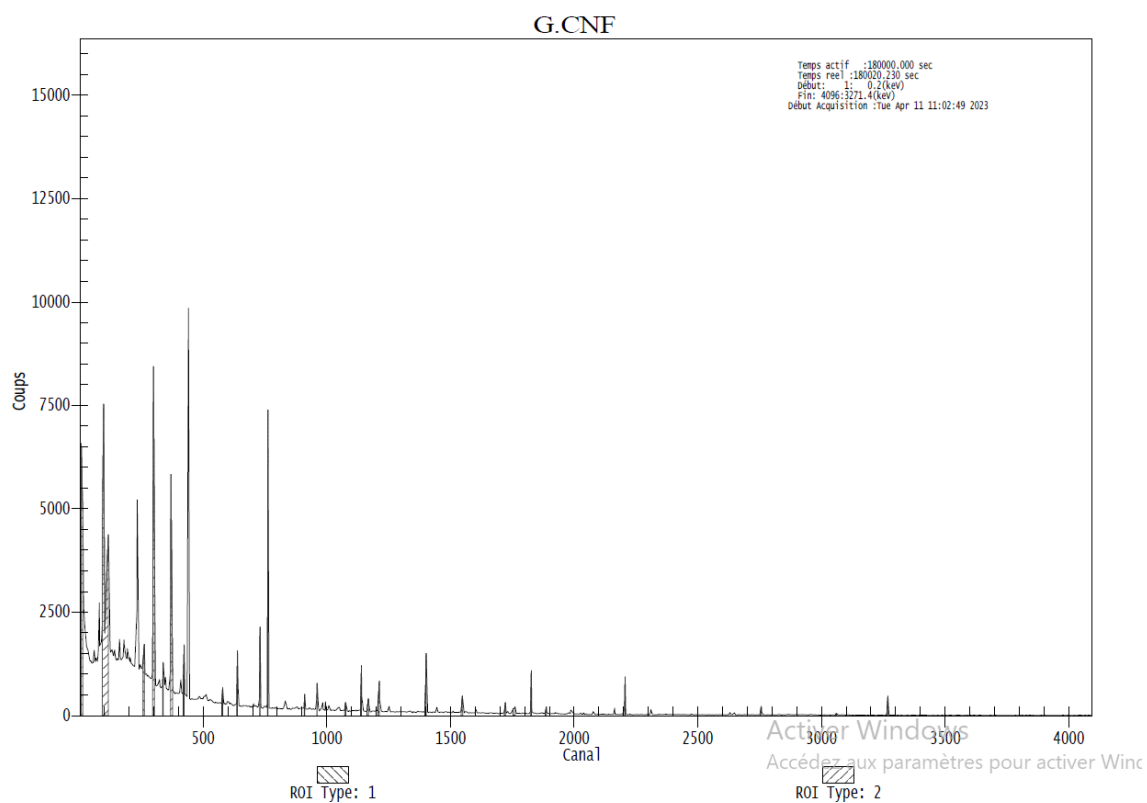


Figure 10. Spectre de l'échantillon G (béton)

ANNEXE 2

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.

$1\text{nGy} = 1\text{Sv}$

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

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

Résumés

Résumé

Ce mémoire étudie l'utilisation des techniques spectroscopiques dans le suivi de la pollution environnementale, notamment la spectrométrie gamma appliquée à l'analyse des radionucléides naturels présents dans les matériaux de construction. L'objectif est de déterminer l'activité massique de l'uranium, du thorium et du potassium à l'aide d'un détecteur HPGe. Les résultats obtenus permettent d'évaluer les niveaux de radioactivité et de vérifier la conformité radiologique des matériaux étudiés.

Abstract

This thesis investigates the use of spectroscopic techniques in environmental pollution monitoring, focusing on gamma spectrometry for the analysis of natural radionuclides in building materials. The main objective is to determine the specific activity of uranium, thorium, and potassium using an HPGe detector. The results allow the evaluation of radioactivity levels and the radiological safety of the studied materials.

ملخص

تدرس هذه المذكرة استخدام التقنيات الطيفية في مراقبة التلوث البيئي، خاصة مطيافية غاما لتحليل النويدات المشعة الطبيعية الموجودة في مواد البناء. الهدف هو تحديد النشاط الكتلي لليورانيوم والثوريوم والبوتاسيوم باستعمال كاشف HPGe. تسمح النتائج بتقييم مستويات النشاط الإشعاعي والتحقق من سلامة المواد المدروس.