

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة سعد دحلب البلدية -1

Université Saad Dahleb Blida 1



Faculté des sciences
Département de physique

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

Option : **Physique des rayonnements**

Thème :

***Analyse de la radioactivité naturelle des eaux thermales
par la Spectrométrie Gamma***

Présenté par :

MESBOUT Bisma

Soutenu le 03 / 11 / 2020 devant le jury composé de :

Mouzali Aziz	Maitre de conférences 'B'	USDB1	Président
Zidouni Faiza	Maitre de conférences 'A'	USTHB	Examineur
Tarek Azli	Chercheur principal	CRND	Encadreur

Blida -1- 2019/2020

Remerciements :



Les travaux de mon mémoire de master ont été réalisés au Centre de Recherche Nucléaire de Draria (CRND) ainsi qu'aux niveaux de huit stations thermales du nord Algérien.

Ma haute considération s'adresse Mr AZLI Tarek, chercheur principal et responsable du laboratoire d'analyse par activation neutronique qui a accepté de m'encadrer et me a suivie toute au long de cette expérience depuis le début de notre stage jusqu'à la fin et a madame à Madame ZIDOUNI Faiza, Maitre de conférences A à l'Université des Sciences et Technologie Houari Boumediene, qui m'a aidé et inondé de conseils utiles.

Je tiens à exprimer ma reconnaissance et ma gratitude envers le personnel du Centre de Recherche Nucléaire de Draria (CRND) en particulier Mr. A. NEDJAR Directeur du centre nucléaire qui m'a accepté pour faire ce stage et Mr. Mazidi Samir, Mr. Hadri Abdel Razek et Mr. Benbouzid Soufiane pour leur aide, support et leur gentillesse.

Mes remerciements iront de même à tous les personelles qui m'ont aidé à récupérer les échantillons des stations thermales.

Ma haute considération s'adresse à tous les enseignants qui par leur esprit responsable et leur sens moral, ont contribué de façon concrète à ma formation depuis ma première année universitaire à ce jour.



Je tiens à remercier vivement tous mes enseignants de primaire, Moyenne et lycée.



Dédicace :

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents

Ma mère, qui a toujours été une source de tendance et d'encouragement

Mon père l'homme qui a fait beaucoup pour moi

Mes meilleurs frères Sif Eddine et Mohamed

Et ma Chère sœur Soumia

Et je n'oublie pas mes meilleures amies Kaouthar, Rayen, Salma, Chaima

et Rokaia

A ma très chère amie d'enfance Boumaiza Narimene

A mon collègue Abderrahmane pour ses aides et encouragement

Résumé :

Les eaux thermales ont des propriétés assez particulières leur conférant des caractéristiques bénéfiques et parfois nocif pour le corps humain. Certains de ces propriétés sont attribués à leur radioactivité. La présence de cette dernière dans les eaux thermales provient de deux sources principales : les radioéléments naturels, représentés principalement par les familles radioactives ($^{238}_{92}U$), ($^{235}_{92}U$), ($^{232}_{90}Th$) et l'élément $K^{40}_{19}K$ et par le radioélément produit par l'interaction des rayonnements cosmiques avec l'atmosphère qui sont déposés à la surface et puis au profond de la terre les eaux de pluie. Le travail engagé dans ce mémoire consiste à identifier les éléments radioactifs présents dans les eaux thermales dans plusieurs régions en Algérie. Elle permet également d'évaluer, à titre informatif si les radio-isotopes dans les eaux thermales étudiées, présentent un risque d'un point de vue de santé publique, de synthétiser les processus affectant ces radio-isotopes le long du parcours souterrain profond et de dresser une liste la plus exhaustive possible.

Sommaire :

Remerciements :	i
Dédicace :	ii
Résumé :	iii
Sommaire :	iv
Liste de figure:	vii
Liste de tableau:	ix
INTRODUCTION GÉNÉRALE	
Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralité sur la radioactivité.....	
1. Introduction.....	3
2. Définition	3
3. Les différents Types des désintégrations radioactives	4
3.1. Radioactivité alpha	4
3.2. Radioactivité Béta	4
3.3. Fission spontanée	5
3.4. Radioactivité de neutron	5
3.5. Emission gamma	5
4. Source radioactive.....	6
4.1. Sources naturelles.....	6
4.1.1. Rayonnement cosmique	6
4.1.2. Rayonnement terrestre	6
4.2. Sources artificielles.	7
5. Les séries de désintégration des radioéléments primordiaux naturels	7
5.1. Lois générale de la radioactivité et affiliation radioactive	8
5.1.1. Désintégration simple	8
5.1.2. Désintégration multiple (Filiation radioactive)	9
5.2. Radioéléments dans les eaux thermales	12

CHAPITRE II: Spectrométrie Gamma	13
1. Introduction.....	13
2. Rayonnement ionisant	13
3. Types des rayonnements ionisant	14
4. Mécanisme d'interaction du rayonnement gamma avec la matière	16
4.1. L'effet photoélectrique	16
4.2. L'effet Compton	16
4.1. L'effet création de pair	16
5. Détection du rayonnement gamma	17
5.1. Chambres à remplissage gazeux	17
5.2. Scintillateurs	18
5.3. Détecteurs à semi-conducteurs	18
A. Détecteur Germanium hyper pure Ge(HP)	18
B. Présentation du détecteur semi-conducteur de Ge(HP) du CRND	19
6. Chaîne de mesure spectrométrie gamma associe	20
6.1. Détecteur	21
6.2. Préamplificateur	21
6.3. Amplificateur	22
6.4. Convertisseur analogique numérique	22
6.5. Analyse multicanaux MCA	22
6.5. Logiciel de traitement du spectre (gamma vision)	23
7. Détermination d'activité de radionucléide	24
7.1. Etalonnage électronique	25
7.2. Etalonnage en énergie	26
7.3. Etalonnage en efficacité	28
7.4. Détermination de l'activité d'un radionucléide.....	30
CHAPITRE III: Analyses et Mesures	31
1. Echantillonnage	30
2.1. Hammam Melouane Blida	31
2.2. Hammam Ouled Tebban _Sétif	31
2.3. Hammam Bouhanifia Mascara	31

<i>2.4. Hammam Essalhine_Bsakra</i>	32
2. Préparation l'échantillon d'analyse	33
3. Analyse qualitative	35
3.1. Mesure du bruit de fond	35
3.2. Analyse des spectres des échantillons.....	36
4. Analyse quantitative	41
4.1. Formules des calculs :	41
4.1. Limite et seuil de détection	43
5. Résultats de mesure	44
6. déduction d'activité du Radium(226).....	49
7. Discussion des résultats	50
CONCLUSION GENERALE	52

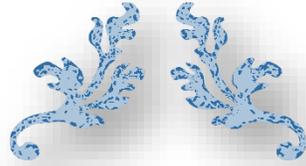
Liste de figure:

Figure. I. 1: la radioactivité d'une atome	3
Figure. I. 2: Radioactivité alpha.	4
Figure. I. 3: Radioactivité Béta.	4
Figure. I. 4: Emission gamma.	5
Figure. I. 5: Séries de désintégration de l'uranium-238.	7
Figure. I. 6: Séries de désintégration du Thorium-232.	8
Figure. I. 7: Courbe de décroissance radioactive.	9
Figure. I. 8: . Activité des élément dans le Cas d'équilibre séculaire.....	10
Figure. I. 9: . Activité des élément dans le Cas d'équilibre transitoire.	11
Figure. I. 10: . Activité des élément dans le Cas non équilibre	11
Figure. II. 1 : les effets des rayonnement ionisants dur L'ADN.....	14
Figure. II. 2: Classification des rayonnements.....	15
Figure. II. 3: L'atténuation des rayonnements ionisants	15
Figure. II. 4: Mécanisme d'interaction des rayonnements avec la matière	16
Figure. II.5: Schématisation des bandes de conduction dans les différents matériaux.....	17
Figure. II. 6: Détecteur Ge(HP).....	18
Figure. II. 7: Détecteur Ge(HP) utilisée dans CRND.....	19
Figure. II.8: Chaîne de mesure de spectrométrie gamma	20
Figure. II. 9: Installation de la chaîne mesure de spectrométrie gamma(CRND)	20
Figure. II. 10: Histogrammes donnant le nombre de photons détectés en fonction de nombre de canal.....	21
Figure. II. 11: logiciel gamma vision	22
Figure. II. 12: Procédure de mesure de l'activité d'un radionucléides	24
Figure. II. 13: Courbe de calibration en énergie.....	26
Figure. II. 14: conteneur marinelli type I.....	28
Figure. II. 15: Courbe de calibration en efficacité.....	29
Figure. III. 1: Une mappe représente la situation de différent bains.....	30
Figure. III. 2: Passage de hammam Melouane.....	31
Figure. III. 3: Passages de hammam Bouhanifia Mascara.....	32
Figure. III. 4: Passages de Hammam Essalhinne Bsakra.....	32
Figure. III. 5: Le stockage des échantillons.....	33
Figure. III. 6: Nettoyage des marinelli.....	33
Figure. III. 7: Remplissages des marinelli avec l'eau thermale.....	34

Figure. III. 8 : Des marinelli exclu dans état séculaire.	34
Figure. III. 9: Le spectre des rayonnements γ émis par bruit de fond (Eau dés ionisé).....	36
Figure. III. 10: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Essalhinne Media.....	37
Figure. III. 11: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Bouhniffa..	37
Figure. III. 12: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon hammam Boutrike.	38
Figure. III. 13: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Meluoane Blida.	38
Figure. III. 14: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Debagh..... Galma.	39
Figure. III. 15: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Essalhinne Biskra.....	39
Figure. III. 16: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Oualed Tebben.....	40
Figure. III. 17 : Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Oualade Djalale.....	40

Liste de tableau:

Tableau. I. 1: Radioéléments source du rayonnement terrestres.	6
Tableau. II. 1: Raies gamma d'Eu (252) utilisées pour l'étalonnage.	25
Tableau. III. 1: comptages des différents radioéléments identifiés dans les différents échantillons d'eau.	41
Tableau. II. 2: L'erreur de la déférente efficacité.	44
Tableau. III. 3: La limite de détection de quelque élément.	44
Tableau. III. 4: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Melouane –Blida.	44
Tableau. III. 5: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Bouhniffa – Mascara.	45
Tableau. III. 6: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Boutrike.	45
Tableau. III. 7: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Debagh Galma...	46
Tableau. III. 8: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Elssalhinne-Biskra.	46
Tableau. III. 9: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Elssalhinne-Media.	47
Tableau. III. 10: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Oualade-Djalale.	47
Tableau. III. 11: Les résultats des mesures du la radioactivité dans hammam Oualade-Tebben-Sétif.	48
Tableau. III. 12: les résultats finals des activités spécifiques de Pb et Bi.	48
Tableau. III. 13: Les résultats des mesures du la radioactivité de radium.	49



***INTRODUCTION
GÉNÉRALE***



Introduction générale

Les eaux thermales sont utilisées à des fins thérapeutiques depuis l'Antiquité. En Algérie, la richesse des sources chaudes est connue depuis longtemps et leur utilisation à des fins curatives est une tradition connue depuis des millénaires. La distribution spatiale des sources chaudes a facilité l'apparition des stations balnéaires dans les différentes régions d'Algérie, dans lesquelles les utilisateurs croient que se baigner ou boire de l'eau de source peut détendre leur esprit et leur corps et guérir certaines maladies.

Dans le langage courant, on appelle « eau thermale » toute eau minérale dotée de propriétés thérapeutiques et utilisée au sein d'un établissement thermal. La radioactivité des eaux thermales (minérales) est en relation directe avec la nature géologique des roches traversées par ces eaux tout au long de leur périple jusqu'à la surface. Elle se charge en divers radioéléments et notamment en radium(^{226}Ra) très soluble dans l'eau. De par leur large utilisation (eaux thermales); la radioactivité qu'elles contiennent peut provoquer des contaminations par ingestion, en consommant l'eau thermale chargée en ^{226}Ra , ou bien par inhalation du radon ^{222}Rn lors du dégazage dans l'atmosphère intérieure des différents locaux des stations thermales. Selon le type de soins pratiqués, l'activité volumique du radon dans l'air est très variable; elle est tributaire de deux facteurs, l'alimentation en eau thermale chargée en ^{226}Ra qui va se décroître en gaz du ^{222}Rn , et la ventilation des différents locaux.

Le travail engagé dans ce mémoire consiste à identifier et à quantifier la radioactivité présente dans les eaux thermales dans plusieurs stations thermales en Algérie, à savoir; Hammam Melouane à Blida, Hammam Ouled Tebbane à Sétif, Hammam Ouled Djalale et Hammam Essalhine à Média, Hammam Debagh à Guelma, Hammam Essalhine à Biskra, Hammam Bouhniiffia à Mascara, et finalement, Hammam Boutrike dans la wilaya de Djelfa. Cette étude nous permettra également d'évaluer, à titre informatif, si les teneurs absolues en radio-isotopes dans les eaux utilisées pour la consommation ou la baignade, présentent un risque d'un point de vue de santé publique.

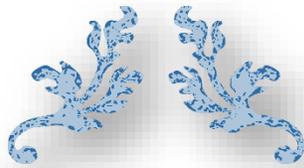
Pour parvenir à ces fins, le présent rapport a été structuré de la manière suivante:

Le premier chapitre de ce mémoire est consacré à la présentation des notions fondamentales de la radioactivité ainsi que les différents types de décroissance

radioactive et leur état d'équilibre, tenant compte de l'importance de la spectrométrie gamma.

Le deuxième chapitre présente quelques notions sur l'interaction des photons gamma avec la matière, le principe de la spectrométrie gamma par les détecteurs à semi-conducteur, les différents composants de la chaîne de mesure. La procédure de calibration du spectromètre en énergie et en efficacité est également présentée.

La dernière partie porte sur la description des sites d'échantillonnage, de traitement ainsi que les différentes étapes de mesure de l'activité des radioéléments existant dans les échantillons. Les résultats sont discutés et interprétés. Ce mémoire se termine par une conclusion générale.



CHAPITRE I :
**Généralité sur la
radioactivité**



1. Introduction

Depuis plus d'un siècle, l'homme découvre l'existence de la radioactivité. Il a exploité de l'énergie fabuleusement cachée au cœur de la matière. A partir de ce temps, l'homme fait plusieurs recherches sur ce phénomène. Il a trouvé deux types de radioactivité, une désintégration naturelle est une radioactivité d'origine de la l'apparition de vie sur la terre, c'est elle qui entretient la combustion au sein du soleil par le biais de la réaction thermonucléaire ou l'hydrogène est transformé en Hélium 4_2He . La désintégration artificielle est une radioactivité construite par l'homme en exposant une matière stable à un rayonnement pour devenir instable un certain moment et revenir à son état stable par un processus de désintégration. [1]

Dans ce premier chapitre on se concentre sur la radioactivité naturelle, sa définition, les différents types de désintégration radioactive et quelques détails nécessaires pour notre travail.

2. Définition

La radioactivité ou bien la désintégration est un phénomène physique spontané. C'est une transformation d'atome instable nous le symbolisé « X » en un autre état stable symbolisé « Y » avec émission de rayonnement nucléaire et un changement du nombre atomique Z, des nombre massique A et ou des niveaux d'énergie nucléaire. [2]

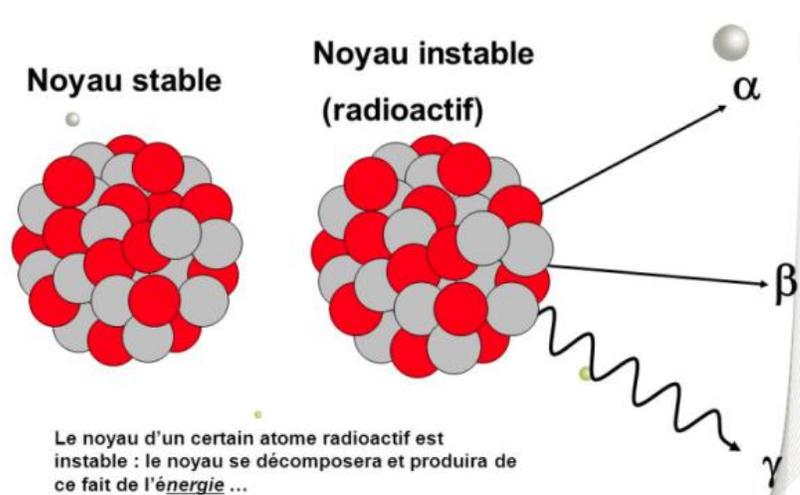


Figure. I. 1: La radioactivité d'un atome.

3. Les différents Types de désintégration radioactive

Cette dénier se passe selon plusieurs processus :

3.1. Radioactivité alpha: L'atome instable passe à un autre état plus stable avec l'émission d'une particule chargée alpha (Hélium) ${}^4_2\text{He}$ au cas du nombre magique $Z = de 82$. [3]

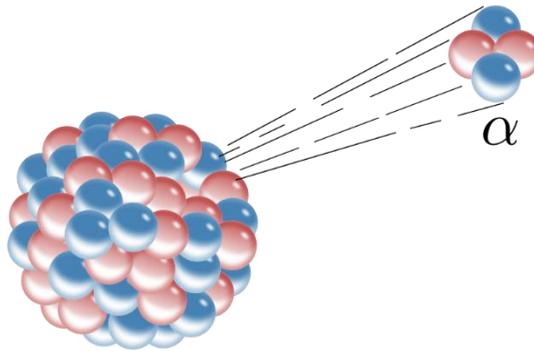


Figure. I. 2: Radioactivité alpha.

3.2. Radioactivité Béta: Type de désintégration radioactive dans laquelle une particule chargée béta est émise un électron ou un positon. [4]

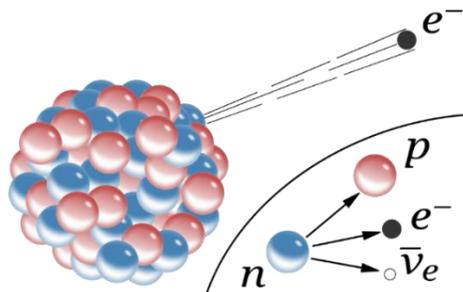


Figure. I. 3: Radioactivité Béta.

3.3. Fission spontanée: La fission spontanée est une forme de désintégration radioactive dans laquelle le noyau d'un atome se divise en deux petits noyaux, un néant ou un réseau est concerné les noyaux très lourds de numéro atomique $Z \geq 90$. [5]

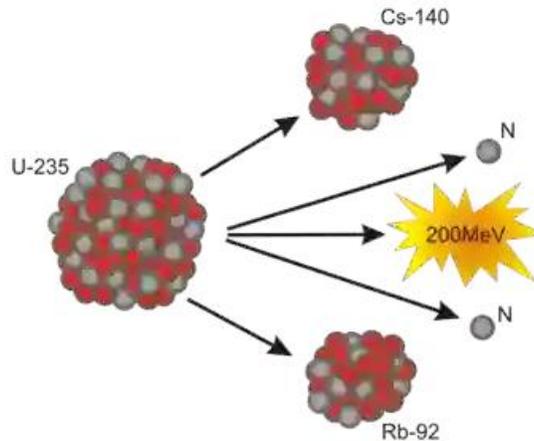
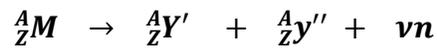


Figure. I. 4: La fission spontanée.

3.4. Radioactivité de neutron: Les neutrons ne sont pas libres sans le noyau, et sont très fortement liée au proton [8]. C'est pour ça l'émission de neutron est très rare. [7]

3.5. Emission gamma: Si l'atome excité Y^* résultant de la désintégration alpha où béta de l'atome X n'est pas dans son état fondamentale (stable), il retrouve sa stabilité par émission de plusieurs photon gamma γ successif. [9]

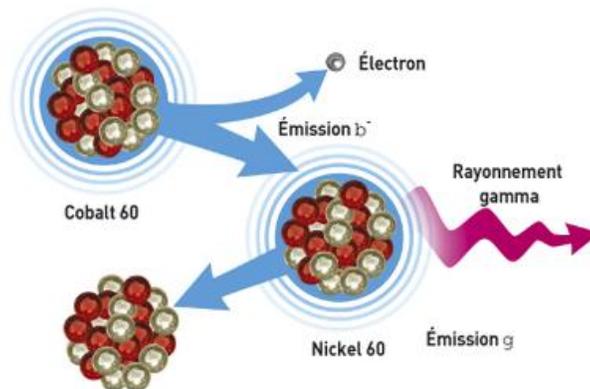


Figure. I. 5: Emission gamma.

4. Source radioactive

4.1. Sources naturelles

Ces sources font partie de l'univers. Elles sont présentes de façon naturelle dans notre environnement et sont divisées en deux types :

4.1.1. Rayonnement cosmique : Le rayonnement cosmique a des origines diverses et résulte principalement du soleil et d'autres phénomènes célestes extérieures au système solaire dans l'univers. Une partie de ce rayonnement ionisant pénètre dans l'atmosphère terrestre et produit des réactions nucléaires avec les composants de l'atmosphère et produit des substances radioactives qui sont absorbées par les êtres humains.

4.1.2. Rayonnement terrestre : La croûte terrestre contient des radionucléides dits « primordiaux », présents depuis la création de la Terre avec des périodes radioactives suffisamment longues devant l'âge de celle-ci pour y subsister en quantité importante. [8]

Tableau. I. 1: Radioéléments source du rayonnement terrestre. [9]

<i>Radionucléides primordiaux</i>	<i>Symbole</i>	<i>Demi-vie</i>
<i>Uranium 235</i>	^{235}U	$7,04 \cdot 10^8$ ans
<i>Uranium 238</i>	^{238}U	$4,47 \cdot 10^9$ ans
<i>Thorium 232</i>	^{232}Th	$4,47 \cdot 10^9$ ans
<i>Potassium 40</i>	^{40}K	$1,28 \cdot 10^9$ ans
<i>Rubidium 87</i>	^{87}Rb	$4,92 \times 10^{10}$ ans
<i>Lanthanum 147</i>	^{147}La	$1,02 \times 10^{11}$ ans
<i>Samarium 147</i>	^{147}Sm	$1,06 \times 10^{11}$ ans
<i>Lutétium 176</i>	^{176}Lu	$3,78 \times 10^{10}$ ans

4.2. Sources artificielles : Les radionucléides « artificiels » désignent les éléments radioactifs qui n'existent plus sur la Terre, et qui sont recréés artificiellement. Depuis le début du 20ème siècle, les activités humaines ont entraîné la présence de radioactivité artificielle dans l'environnement. La production de radionucléides artificiels se fait au moyen d'un accélérateur de particules ou d'un réacteur nucléaire.

5. Les séries de désintégration des radioéléments primordiaux naturels

Lors d'une désintégration, l'élément radioactif se transforme en un autre élément appelé produit de désintégration ou bien radio-isotope. Une désintégration peut être représentée graphiquement par un schéma de désintégration, particulièrement utile lorsque la désintégration peut présenter des variantes complexes. Ce produit de désintégration est généralement lui-même radioactif, et sa propre désintégration conduira à un troisième élément, et ainsi de suite. [10]

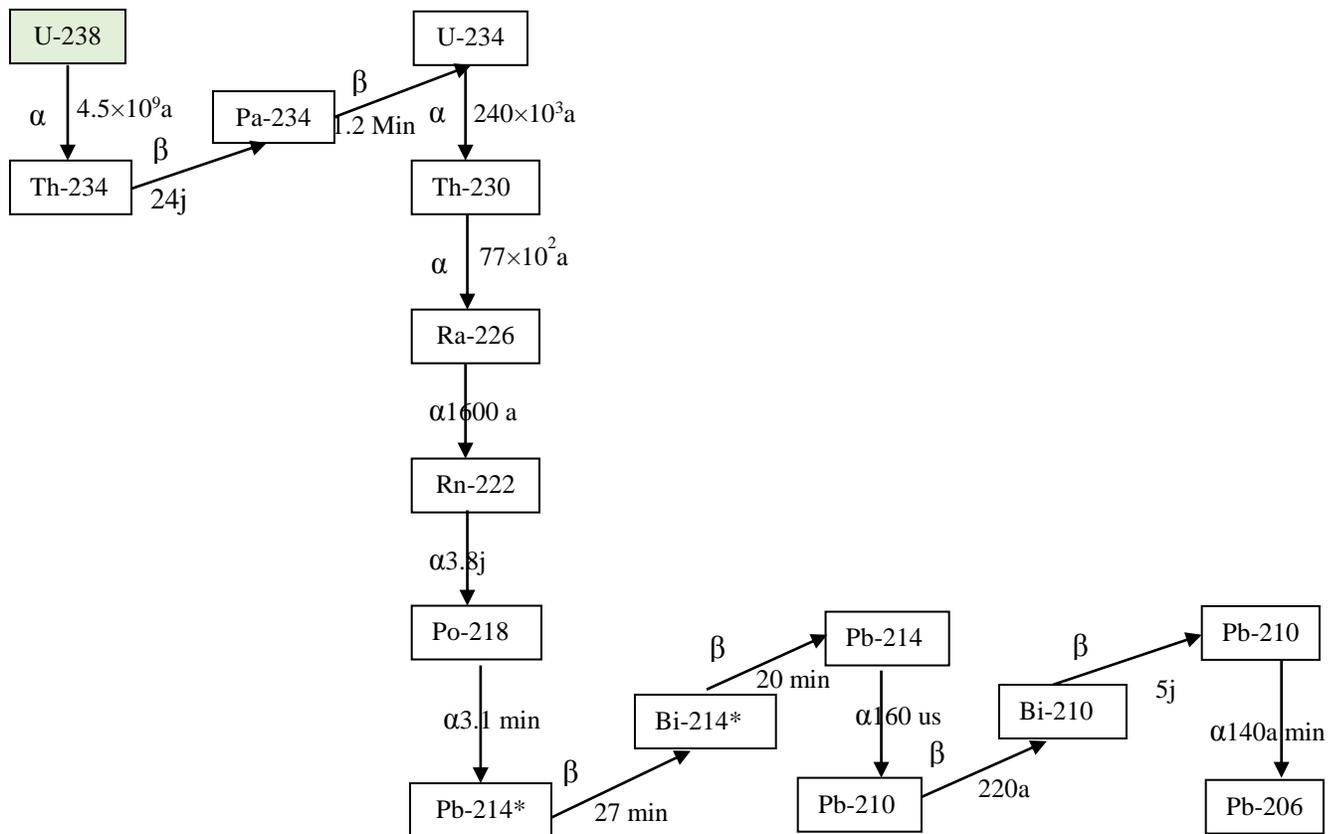


Figure. I. 6: Séries de désintégration de l'uranium-238.

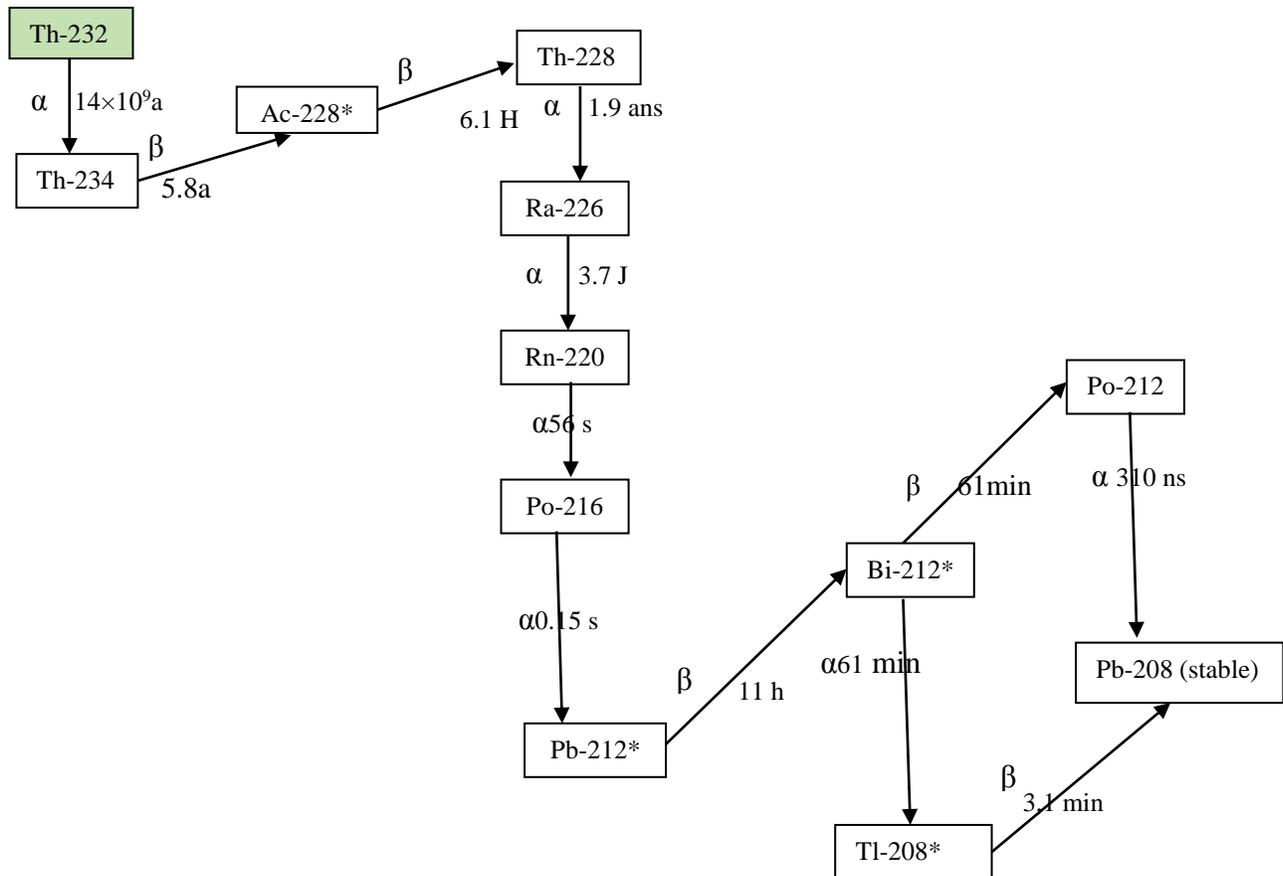


Figure. I. 7: Séries de désintégration du Thorium-232.

5.1. Lois générale de la radioactivité et affiliation radioactive

5.1.1. Désintégration simple

Étant donné une population de $N(t)$ noyaux radioactifs à la date t , on note ΔN la variation de cette population pendant une durée Δt . La désintégration d'un certain nombre de noyaux radioactifs, la population $N(t)$ décroît et la variation correspondante ΔN est négative. La quantité de noyaux qui se désintègrent pendant cette durée Δt est égale à $(-\Delta N)$ telle que : [11]

$$\Delta N = -\lambda \cdot N \cdot \Delta t \quad (1)$$

La grandeur positive λ est la constante radioactive. Elle est caractéristique du type de noyau pour la désintégration étudiée (unité : S^{-1})

La conséquence de cette relation (1) est que le nombre moyen de noyaux non désintégrés présents dans l'échantillon à une date t est :

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

Avec $\tau = \frac{1}{\lambda}$ la constante de temps et N_0 le nombre de noyaux radioactifs initialement présents dans l'échantillon.

La demi-vie, ou période radioactive, d'un nucléide radioactif est la durée au bout de laquelle la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans un échantillon s'est désintégrée :

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \quad (3)$$

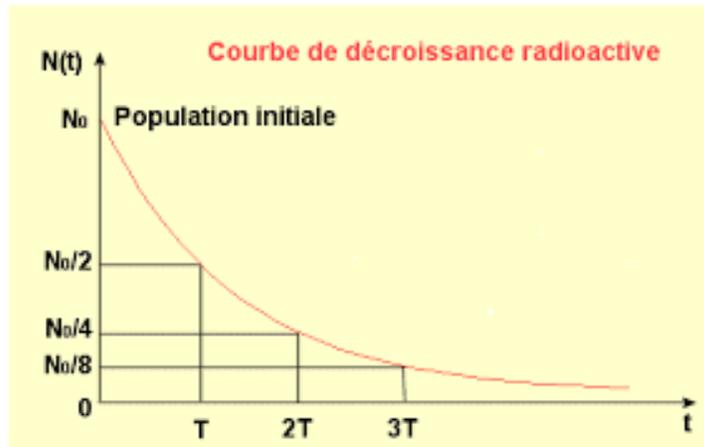
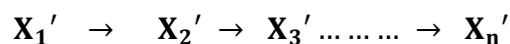


Figure. I. 8: Courbe de décroissance radioactive.

5.1.2. Désintégration multiple (Filiation radioactive)

Une filiation radioactive (dite aussi "série de décroissance radioactive" ou encore "décroissance multiple") est par définition la stabilisation d'un noyau appelé "noyau mère" en une succession de désintégrations. Chaque étape est caractérisée par un état intermédiaire correspondant à un radionucléide appelé "nucléide fille" de l'élément mère. Nous avons :



Où X' désigne un isotope radioactif donné, X_n' l'isotope stable de la filiation radioactive de l'élément mère X₁' (les éléments entre deux étant tous des nucléides instables) [12].

Dans la nature, les filiations radioactives concernent principalement trois éléments lourds dont le temps de vie est de l'ordre du milliard d'années : l'uranium(238), l'uranium(235) et le Thorium(232). Les descendants de ces trois noyaux, présents en très petites quantités dans les roches, contribuent à la radioactivité naturelle. Selon la durée de vie des isotopes et leurs descendants trois types d'équilibre peuvent s'établir entre les noyaux que l'on définit comme suit :

a. Cas d'équilibre séculaire : L'équilibre est dit séculaire quand le temps de demi-vie du père est nettement plus grand que celle du fils, c'est-à-dire que l'activité du père est nettement plus faible que celle du fils. $T_A \gg T_B$, $\lambda_A \ll \lambda_B$ [14]

Cet état est particulièrement important pour notre cas car il permet de déterminer l'activité du noyau père de longue période à travers l'activité des noyaux fils.

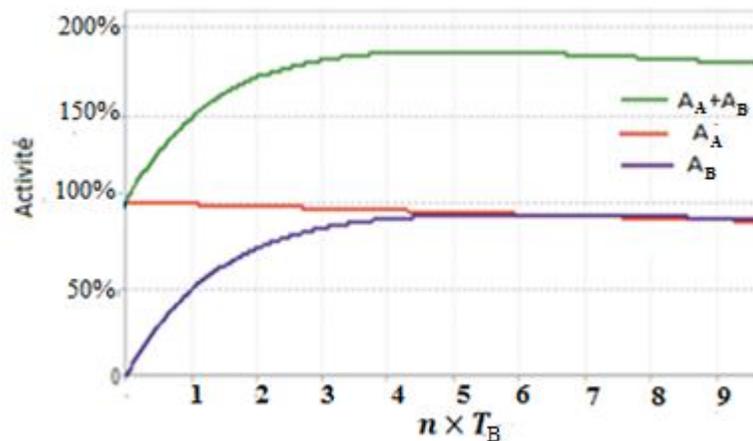


Figure. I. 9: Activité des élément dans le Cas d'équilibre séculaire.

b. Cas d'équilibre transitoire : Dans ce cas la demi-vie du noyau parent est légèrement plus longue que la demi-vie du descendant. L'activité du produit de désintégration du fils augmente pendant une période égale à environ deux fois sa demi-vie puis ces deux activités (père et fils) deviennent du même ordre de grandeur puis diminuent avec une allure similaire. $T_A > T_B$ [15]

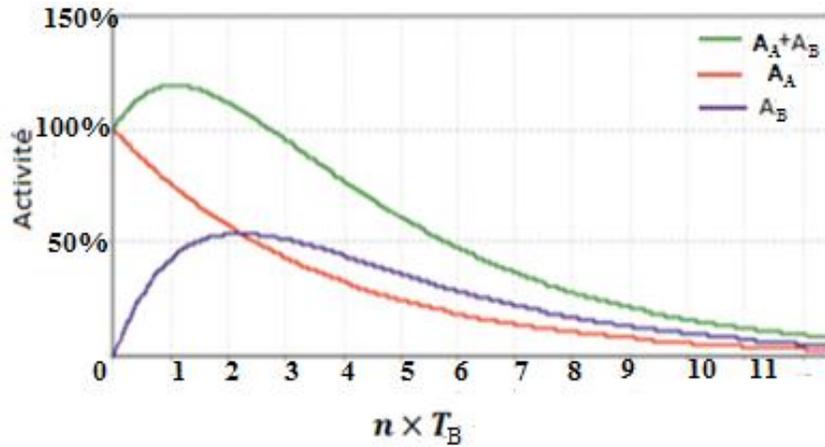


Figure. I. 10: Cas d'équilibre transitoire.

c. **Cas non équilibre** : Lorsque la demi-vie T_A du nucléide parent est beaucoup plus courte que celle du descendant, $\lambda_A \gg \lambda_B$. [16]

On aura alors :

$$N_B(t) = N_A(0) \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} \left(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t} \right)$$

D'où

$$N_B(t) = N_A(0) e^{-\lambda_B t}$$

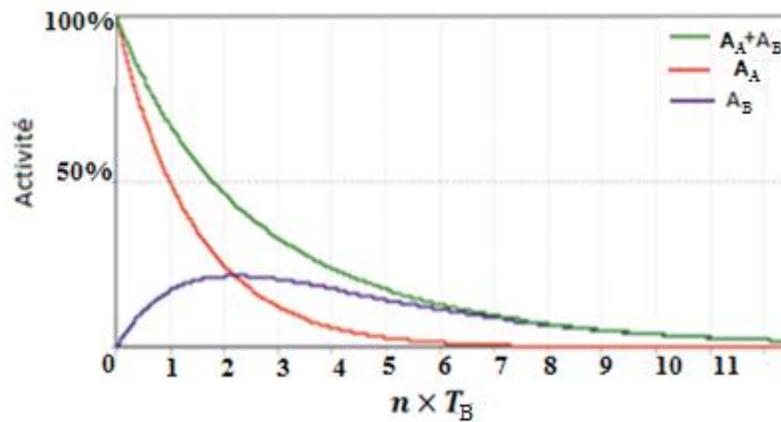


Figure. I. 11: Cas non équilibre.

5.2. Radioéléments dans les eaux thermales

Les eaux thermales et minérales, contiennent des éléments radioactifs naturels dont les concentrations varient en fonction de paramètres tels que : nature géologique des terrains traversés, temps de contact (âge de l'eau), température, solubilité de l'élément concerné, etc... [17]

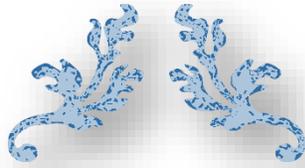
5.3.1. L'Uranium: L'abondance de l'uranium naturel est de l'ordre de 1 à quelques mg/kg dans l'écorce terrestre. Elle est généralement plus élevée dans les granites que dans les roches sédimentaires. Elle peut atteindre une concentration de 4 mg/kg. Dans certaines régions les eaux de surface peuvent atteindre des concentrations en uranium de 1 µg/l et les eaux souterraines peuvent dépasser 5 µg/l (1 µg/l génère 25 mBq/l de radioactivité α).

Ses principaux descendants sont :

- ✓ Le ^{222}Rn ce dernier représente une source non négligeable d'exposition à la radioactivité alpha dans les stations thermales. (Voir la figure I. 1)
- ✓ Le radium est aussi un descendant de l'uranium($^{238}_{92}\text{U}$). Dans notre présente étude, nous nous intéresserons à l'activité de cet élément dans chaque échantillon.

5.3.2. Le thorium: Le thorium ($Z = 90$; $A = 212 - 236$) est un élément radioactif primordial appartenant à la famille des actinides et possède 25 isotopes. Bien que la solubilité du thorium dans les eaux thermales est très faible et dépasse rarement 1 µg/l. (de 4 mBq/l). Cet élément génère le ^{220}Rn également une source d'exposition alpha non négligeables dans les stations thermales (Voir figure I.7)

5.3.3. Le potassium: Présent dans le corps humain, la régulation métabolique assure une concentration régulière d'environ 2 g/kg (soit 0,2 mg/kg de potassium(^{40}K)). Les eaux souterraines contiennent généralement entre 1 et 200 mg/l de potassium naturel, mais il existe quelques cas (pour les eaux très salées) avec des teneurs dépassant le 200 mg/l.



CHAPITRE II:
Spectrométrie Gamma



1. Introduction

Le rayonnement ou radiation est défini comme un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Les rayonnements ne peuvent être détectés et caractérisés que grâce à leurs interactions avec la matière dans laquelle ils se propagent. Ils peuvent céder au milieu qu'ils traversent, la totalité ou une partie de leur énergie au cours de ces interactions. [18]

Dans ce chapitre nous parlerons des rayonnements ionisant comme rappelle. On s'intéresse particulièrement à l'interaction rayonnement gamma avec la matière car elle constitue le principe de fonctionnement des détecteurs par spectrométrie gamma. Une description du spectromètre Ge(HP) utilisé dans nos mesures sera présentée.

La procédure de calibration de la chaîne de mesure en guise de préparation de l'analyse des échantillons est également détaillée.

2. Rayonnement ionisant

Un rayonnement est dit ionisant quand il est susceptible d'arracher des électrons à la matière. D'une façon plus précise un rayonnement ionisant est un rayonnement électromagnétique ou corpusculaire capable de produire directement ou indirectement des ions lors de son passage à travers la matière. Ces rayonnements peuvent être produits par la radioactivité d'atomes tels que l'uranium ou le plutonium. Ils ont des applications dans les domaines de la défense, de la santé, de la production d'électricité, etc. [19] Pour les organismes vivants, les rayonnements ionisants sont nocifs, et même mortels en cas de dose élevée car ils détruisent les cellules. Ils peuvent également produire des modifications irréversibles dans l'ADN et entraîner des mutations génétiques et des maladies comme le cancer. Les rayonnements ionisants peuvent provenir de la radioactivité artificielle ou naturelle. Dans les sections suivantes, on ne s'intéresse qu'à la radioactivité naturelle. [20]

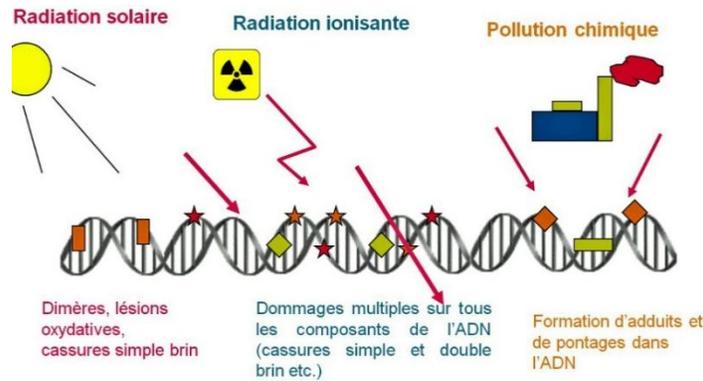


Figure. II. 1: Les effets des rayonnements ionisant sur L'ADN.

3. Types des rayonnements ionisant

On peut distinguer les rayonnements corpusculaires (ou particulaires) par le type de particule auquel ils sont associés. Il peut par exemple s'agir de neutrons, de protons, d'électrons (ou de positrons), de particules alpha, de photons, de neutrinos ou de muons : [21]

Le rayonnement alpha (α): Il est émis par les atomes très lourds. Il correspond à l'émission d'un noyau d'atome d'hélium, composé de deux protons et de deux neutrons.

Le rayonnement Bêta (β): Il correspond à deux types de transformations pouvant survenir dans un radionucléide : une transformation bêta moins, et une transformation bêta plus.

Le rayonnement gamma (γ): Est émis par les noyaux excités. C'est un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière ou les rayons X.

Le rayonnement de neutrons(n): Est laquelle la réaction perde un neutron.

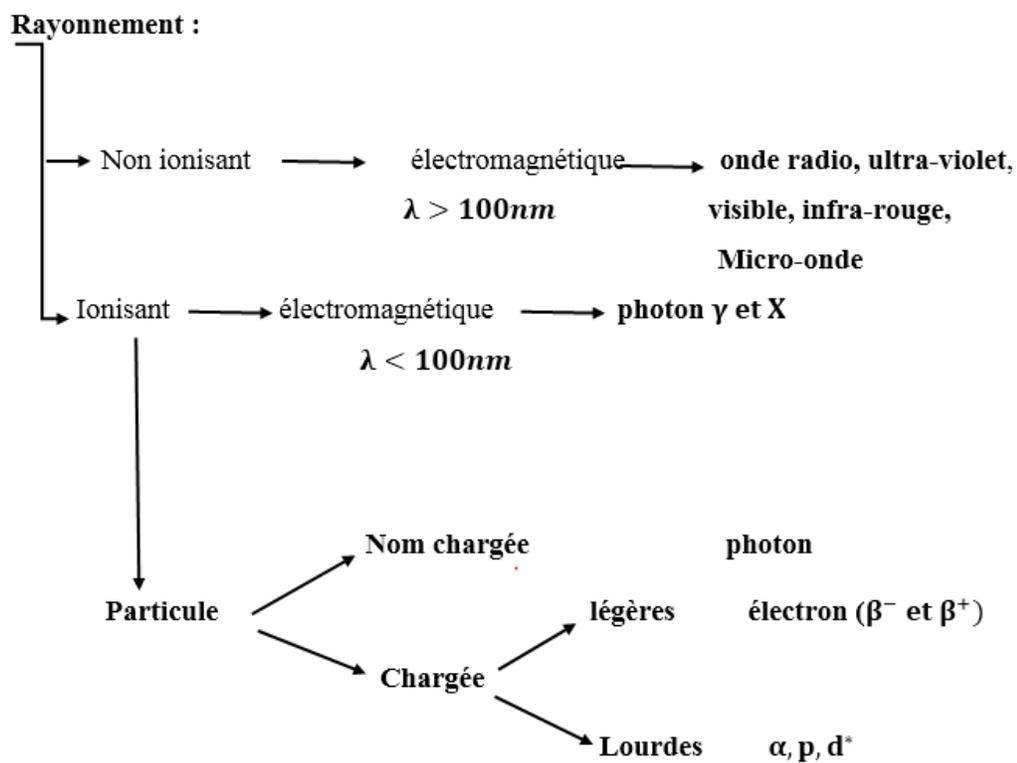


Figure. II. 2: Classifications des rayonnements.

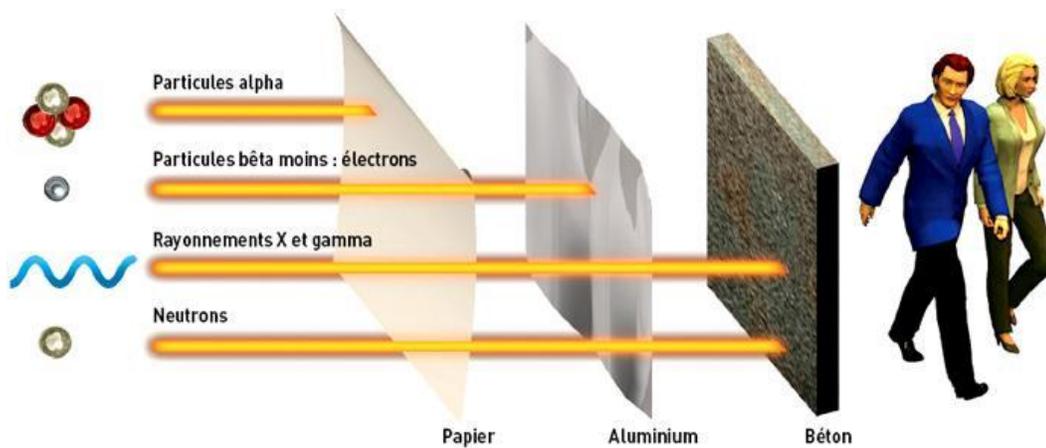


Figure. II. 3: L'atténuations des rayonnements ionisants.

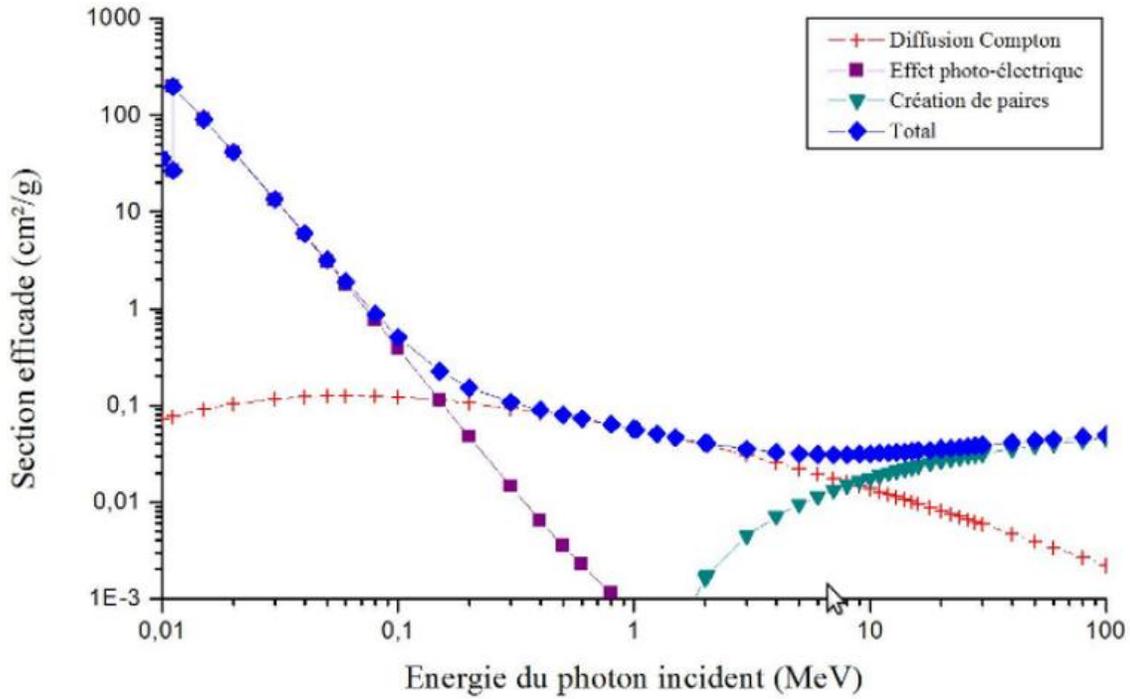
4. Mécanisme d'interaction du rayonnement gamma avec la matière

On définit trois mécanismes d'interaction du rayonnement avec la matière: effet photoélectrique, effet Compton et effet création de paire: [22]

4.1. L'effet photoélectrique : Un photon d'énergie incidente E_i qui interagit avec un électron d'un atome cible peut éjecter cet électron de son orbite en lui communiquant une énergie cinétique E_C : $E_C = E_i - E_L$ Avec E_L est l'énergie de liaison de l'électron éjecté sur son orbite.

4.2. L'effet Compton : Le photon incident interagit encore une fois avec un électron, qui a une énergie de liaison beaucoup plus faible que celui impliqué dans l'effet photoélectrique. Le photon incident est diffusé dans une direction qui fait un certain angle avec la direction de l'électron Compton.

4.1. L'effet création de paire: Le champ électrique intense qui entoure un noyau peut transformer un photon en négaton et positon: c'est l'effet de production de paires.



(a)

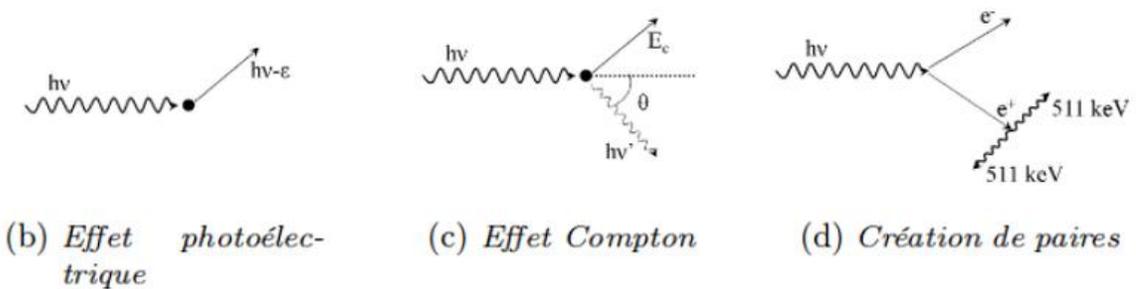


Figure. II. 4: Mécanisme d'interaction d'un rayonnement avec la matière.

5. Détection du rayonnement gamma

Les effets produits par les rayonnements gamma qui viennent d'être décrits impliquant l'existence de trois types de détecteurs : [23]

5.1. Chambres à remplissage gazeux : On construit ces détecteurs en disposant deux électrodes au sein d'un milieu gazeux que l'on polarise, grâce à une alimentation de haute tension continue.

5.2. Scintillateurs: Également appelé compteur à scintillation ou plus souvent scintillateur est un instrument composé d'un matériau qui émet de la lumière à la suite d'un dépôt d'énergie par interaction d'un rayonnement incident.

5.3. Détecteurs à semi-conducteurs: Les semi-conducteurs sont des matériaux dont la conductivité électrique se situe entre celle des métaux et celle des isolants. La conductivité électrique est une propriété qui varie énormément d'un matériau à un autre. Un semi-conducteur est un cristal qui est isolant s'il est pur et à la température zéro absolu, et dont la conductivité électrique est due à l'agitation thermique, à des impuretés ou à différents types de défauts. Pour fixer les idées, les métaux ont une résistivité de l'ordre de $10^{-6} \Omega/cm$, les isolants de $10^{14} \text{ à } 10^{22} \Omega/cm$, les semi-conducteurs typiques, à température ambiante, de 10^{-3} à $10^9 \Omega/cm$.

Les principaux semi-conducteurs sont : le germanium(*Ge*), le silicium (*Si*), sélénium(*Se*)..

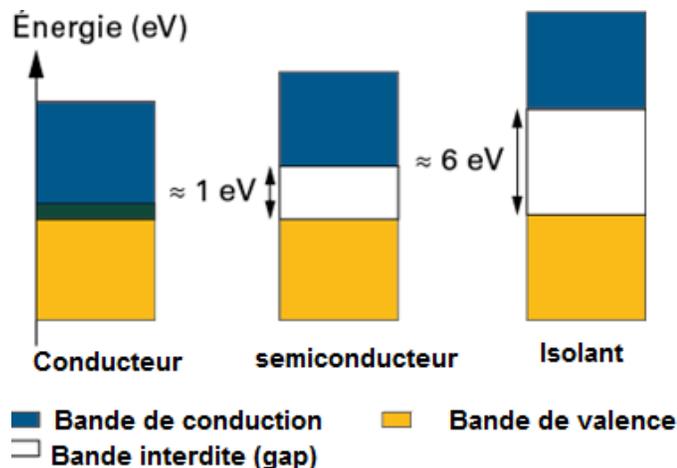


Figure. II. 5: Schématisation des bandes de conduction dans les différents matériaux.

A. Détecteur Germanium hyper pure *Ge*(HP)

Dans le cas particulier du germanium, les techniques modernes permettent d'atteindre de très hauts niveaux de pureté : jusqu'à seulement 10^{10} atomes d'impuretés par cm^3 . Dans ce cas, le volume utile du détecteur est limité par la taille des cristaux qu'il est possible de fabriquer. Il est ainsi aujourd'hui possible d'obtenir des détecteurs de $400 cm^3$ de volume et des épaisseurs de plusieurs centimètres. Étant donné le très faible gap du germanium ($0,7 eV$), à température

ambiante, la génération thermique de porteurs induit un courant trop élevé lorsque le détecteur est polarisé (1500 à 4000 V). Ce type de détecteur fonctionne dans la température de l'azote liquide (77 °K) est récent par rapport aux $Ge(Li)$ qu'ils ont tendance à supplanter, avec l'avantage de ne pas avoir à être refroidi en dehors de période d'utilisation. [24]



Figure. II. 6: Détecteur Germanium hyper pure Ge(HP)

B. Présentation du détecteur semi-conducteur de Ge(HP) du CRND

Dans l'objectif d'une analyse de la radioactivité environnementale, nous avons utilisé un détecteur de germanium hyper pur. C'est un détecteur semi-conducteur utilisé dans le centre de recherche nucléaire Draria est un détecteur de types N de géométrie coaxial avec une modèle GR 3019 et d'efficacité relative de 30% ayant un volume actif de 340 cm^3 . Leur résolution égal à $1,9 \text{ KeV}$. Le cristal Ge(HP) a été monté verticalement sur le cryostat à azote liquide à 77°K qui a blindé par un château de plomb de 100mm pour réduire le bruit fond (diminuer le rayonnement cosmique et celui de l'environnement du détecteur). Celui-ci est renforcé par deux feuilles d'étains et cuivre d'épaisseur 3mm et 1,5 mm à l'intérieur du château pour réduire la contribution du

spectre des rayons X de freinages dû aux émises par l'échantillon lors du comptage. La tension de polarisation est égale à -3500 V par un module haut tension modèle 659 d'ORTEC. [25]



Figure. II. 7: Détecteur Ge(HP) utilisé dans CRND.

6. Chaîne de mesure spectrométrie gamma associée

La spectrométrie gamma utilise un ensemble d'outils qui sont : les sources radioactives, le détecteur, l'électronique associée au détecteur et un système d'acquisition. [26]

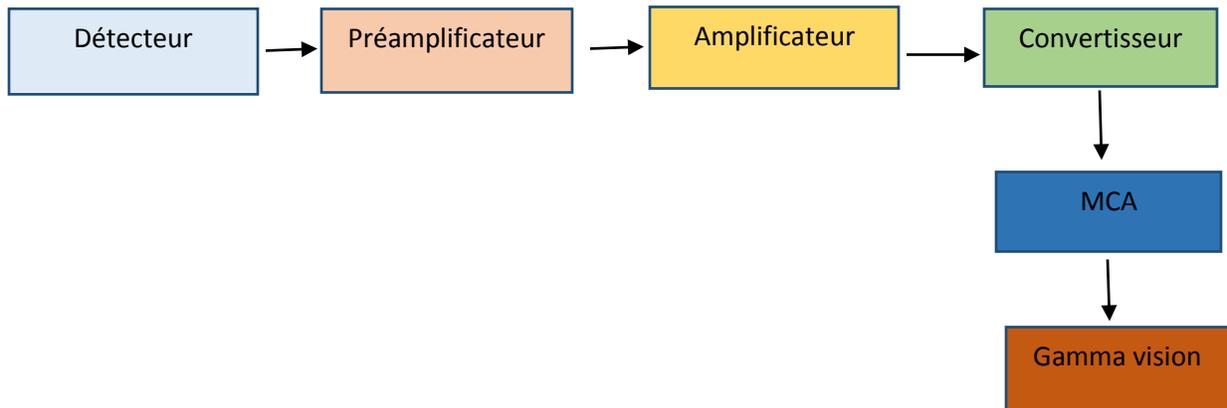


Figure. II. 8: Chaîne de mesure de spectrométrie gamma.



Figure. II. 9: Installation de la chaîne de mesure de spectrométrie gamma (CRND).

6.1. Détecteur: Le détecteur de Ge(HP) décrit précédemment voir (**Figure. II. 5**).

6.2. Préamplificateur: Le préamplificateur est un module relié directement au détecteur de rayonnement, il réalise les fonctions essentielles suivantes :

- ❖ Amplifier le signal avec un gain fixé.
- ❖ Réduire le bruit qui peut changer le signal.
- ❖ Récupérer le maximum de signal.
- ❖ Minimiser les effets capacitifs.
- ❖ Effectuer une première mise en forme du signal (production de l'impulsion à traiter).

6.3. Amplificateur: L'amplificateur réalise deux tâches essentielles : la mise en forme du signal et son amplification. Exploite les impulsions sortant du préamplificateur. Il adapte tout d'abord l'amplitude du signal incident à une gamme de tension exploitable par l'étage suivant. Il réalise ensuite une mise en forme, le plus souvent gaussienne, en filtrant une partie des parasites de haute fréquence. On rencontre en général deux types de système : les amplificateurs à mise en forme CR-RC et les amplificateurs intégrateur.

6.4. Convertisseur analogique numérique: A la sortie de l'amplificateur on a un signal gaussienne, le convertisseur transforme l'amplitude du signal à une quantité numérique qui est proportionnelle à l'énergie déposée dans le cristal [Lyoussi, 2010]. Cette opération nécessite entre 0,8 et 6 μ s (Canberra). La sortie de l'ADC est enregistrée dans une mémoire qui possède autant d'adresses que le maximum de numéro de canaux servant à découper le spectre final. Il y a au total 8192 canaux disponibles pour l'acquisition.

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

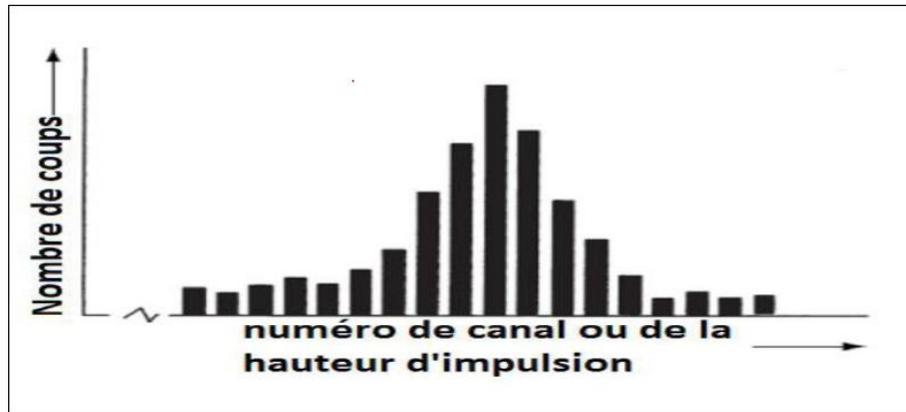


Figure. II. 10: Histogrammes donnant le nombre de photons détectés en fonction du nombre de canaux.

6.5. Logiciel de traitement du spectre (gamma vision): Le logiciel de spectrométrie gamma le plus connu et distribué sur le marché mondial est le ‘‘Gamma Vision’’. Il regroupe un ensemble de modules qui permettent de contrôler les spectromètres de marque, de les calibrer et de générer des rapports d’assurance qualité. Il permet d’afficher et d’analyser les spectres et finalement d’automatiser les mesures. [27]

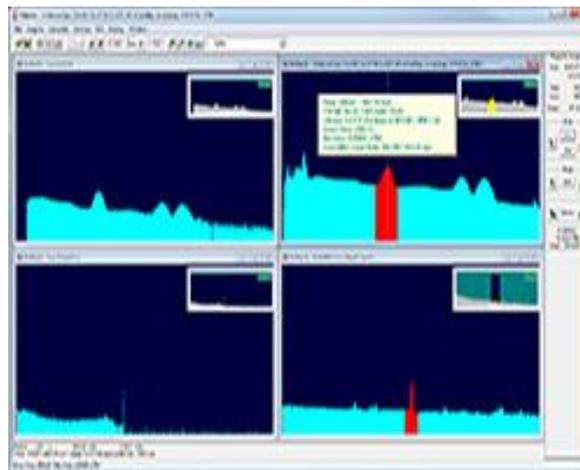


Figure. II. 11: Logiciel gamma vision.

7. Détermination d'activité de radionucléide

L'analyse de la radioactivité environnementale est contestée par la possibilité de faire des mesures précises pour des échantillons complexes (solides ou liquides), caractérisées par une très faible radioactivité. Afin de remédier à ces difficultés de détection et de mesure, il est impératif d'augmenter l'efficacité de détection, et cela pourrait être effectué en procédant par :

- Diminution du bruit de fond (blindage, anti-Compton,...).
- Augmentation du volume du Crystal du détecteur.
- Réduction de la distance source-détecteur.
- Augmentation du volume de l'échantillon.
- Augmentation de l'angle d'incidence entre l'échantillon et le détecteur.

Pendant cet arrangement n'est pas sans conséquence ; en effet, en réduisant la distance entre la source et le détecteur, on aura une augmentation de l'effet de coïncidence des pics sommes, dont le phénomène prend de l'ampleur en utilisant des sources caractérisées par un mode de désintégration complexe, où plusieurs rayonnements X ou gammas sont émises en cascade.

L'augmentation du volume de l'échantillon est aussi appréciable pour la mesure des échantillons de faible activité, car il permet d'augmenter l'angle d'incidence des rayonnements, ce qui fait augmenter par conséquent l'efficacité de détection. Toutefois, l'auto absorption des rayonnements émis à l'intérieur de l'échantillon lui-même, à des proportions variantes, dépendante du volume de l'échantillon ainsi que la densité de sa matrice, peuvent donner des fausses résultats de l'analyse quantitative de la radioactivité, s'il n'est pas pris en considération.

A défaut des mesures correctives adéquates, ces deux phénomènes physiques à savoir, l'auto-absorption dans l'échantillon lui-même, ainsi que l'effet de coïncidence des pics sommes, peuvent engendrer une surestimation ou une sous-estimation du comptage des pics photo-électrique concernés par la mesure quantitative, ainsi on aura une efficacité de détection en fonction de l'énergie erronée, ce qui pourrait par conséquent fausser complètement nos mesures quantitatives de la radioactivité. [28]

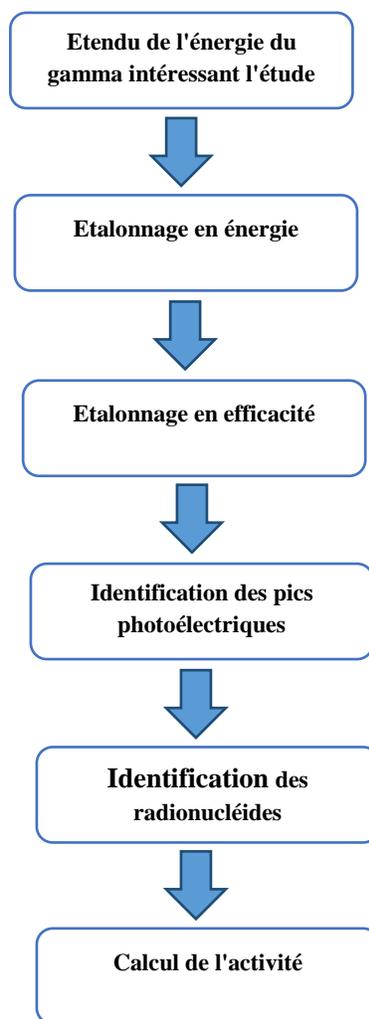


Figure. II. 12: Procédure de mesure de l'activité d'un radionucléide.

7.1. Etalonnage électronique

Lorsque le photon dépose son énergie dans le milieu de détection, un signal de tension est généré. Ce signal est mis en forme, amplifié et converti en un signal numérique pour permettre un affichage sous forme d'histogramme. Il existe une relation de proportionnalité entre l'énergie déposé par le photon et le canal qui lui correspond. Cette relation dépend principalement de deux ajustements. Le premier est réalisé sur l'amplificateur afin de régler le gain d'amplification, il a été fixé à 65.

Le second réglage est effectué sur le module MCB en choisissant un gain de conversion de 8192 *canaux*. Cette opération d'étalonnage électronique de la chaîne permet de s'assurer du

bon fonctionnement électronique de la chaîne de mesure et d'afficher grossièrement la position des pics photoélectrique d'intérêt. Cette opération doit être suivie par un étalonnage précis en énergie et efficacité. [29]

7.2. Etalonnage en énergie

L'objectif de cette opération est d'obtenir une relation entre le numéro du canal et l'énergie des photons. Pour l'établir, une source multi-gamma comme l'Europium Eu (152) couvrant l'étendu de mesure est utilisée. Cette opération permet de déterminer l'énergie du pic, et à l'aide de table d'identifier le ou les radionucléides présents dans la source. En raison de la quasi parfaite linéarité du convertisseur CAN, la relation entre l'énergie et le numéro du canal est de la forme :

$E = aC + b$ Avec E : énergie des photons. C : Numéro du canal, a et b des constantes.

Tableau. II. 1: Raies gamma d'Eu (252) utilisées pour l'étalonnage.

<i>Canal</i>	<i>Energie (KeV)</i>
405,8	121,78
815,2	244,7
1146,82	344,28
2594,67	778,91
3211,53	964,13
3630,09	1089,7
3704,92	1112,12
4690,64	1408,01

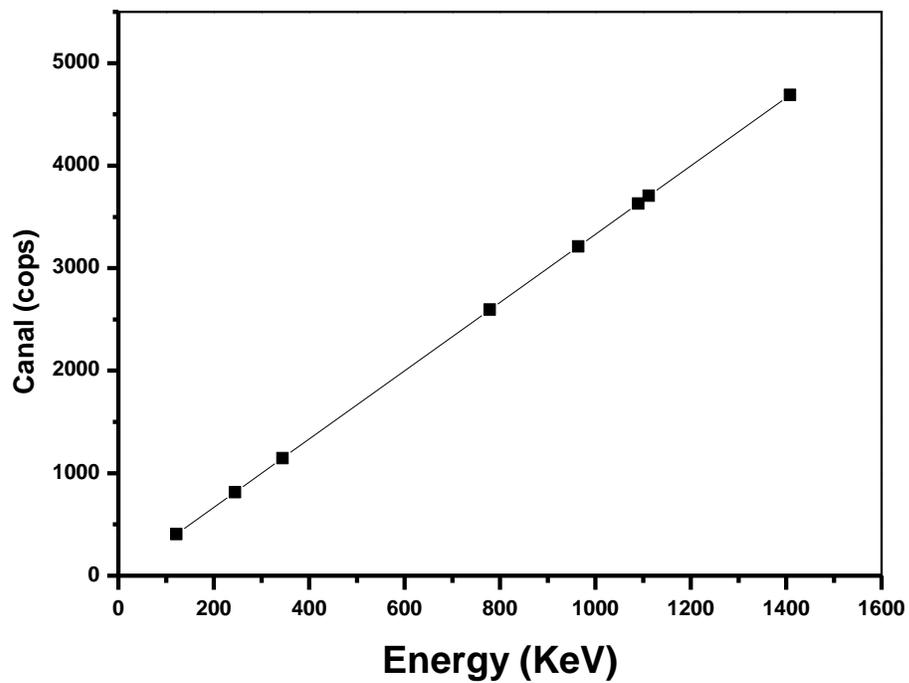


Figure. II. 13: Courbe de calibration en énergie.

Equation de cette courbe est de la forme $E = Ax + B$

On prendre deux énergie E_1 et E_2 pour calculer le A et le B :

$$\left. \begin{array}{l} 121.78 = A * 405.80 + B \\ 1408.01 = A * 4690.64 + B \end{array} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{array}{l} 121.78 = A * 405.80 + B \\ 1408.01 = A * 4690.64 + B \end{array} \right\} \quad (2)$$

Finalemment :

$$E = 0.3001815 * x - 0.0336527 \quad (4)$$

7. 3. Etalonnage en efficacité

Le but de l'étalonnage en efficacité est d'obtenir une relation entre le comptage des photons d'énergie E (ex l'aire du pic photoélectrique) et l'activité de la source étalon. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\varepsilon(E) = \frac{\text{taux}(\text{de comptage des photon d'énergie } E(\text{aire de pic d'énergie } E))}{\text{activité des radionuclide exprimie en photons d'énergie } E/\text{sec}}$$

Le détecteur germanium utilisé dans notre étude présente une fenêtre en plomb Cette fenêtre permet d'accroître le rendement de détection pour les photons gamma d'énergie faible et les photons X. [30]

Le rendement de l'installation de mesure n'est pas un paramètre proportionnel à l'énergie des photons détectés. Il dépend aussi de la géométrie source-détecteur appliquée. Pour déterminer son évolution il suffit d'étalonner la chaîne de mesure avec une source multi-gamma présentant la même forme que l'échantillon. L'étalonnage en efficacité (ou rendement) a été réalisé avec une source d'euporium dont la forme et les dimensions sont identiques à celles de l'échantillon. La source (**Figure. II. 14**) est conditionnée dans un conteneur Marinelli de type I de volume égal à 450 cm³ similaire à celui utilisé pour l'échantillon. L'activité de la source est de 4,17 kBq dont la date de référence est le 29 novembre 2000 à 12 : 00h. Cette source est sous forme d'un mélange des radionucléides (²⁴¹Am, ¹³⁹Ce, ¹⁰⁹Cd, ⁶⁰Co, ¹⁵²Cr, ¹³⁷Cs, ⁵⁴Mn, ⁸⁵Sr, ¹¹³Sn, ⁸⁸Y, ⁶⁵Zn) , ils émettent des rayons gamma.

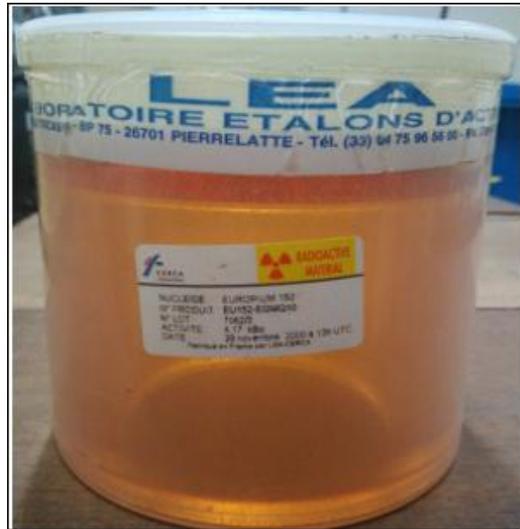


Figure. II. 15: Conteneur marinelli type I.

Tableau. II. 2: Raies gamma de ^{152}Eu utilisées pour l'efficacité.

<i>Energie (KeV)</i>	<i>Efficacité</i>
121.78	5.6616E-002
244.70	3.5452E-002
295.94	3.0114E-002
344.28	3.2001E-002
411.11	2.4191E-002
443.98	2.1645E-002
778.91	1.5034E-002
964.13	1.1948E-002
1112.12	1.1082E-002
1408.01	9.1281E-003

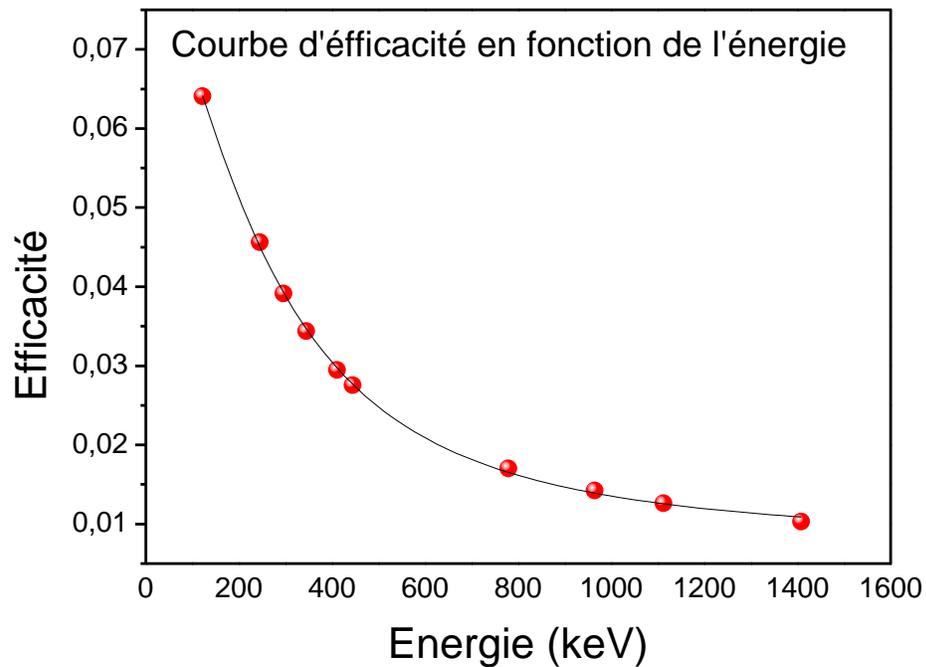


Figure. II. 16: Courbe de calibration en efficacité.

7. 4. Détermination de l'activité d'un radionucléide

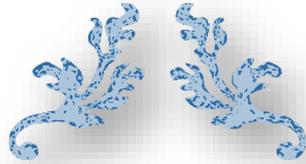
Connaissant l'efficacité de l'installation de mesure pour une géométrie définie et des photons d'énergie E , on peut déterminer l'activité d'un radionucléide à l'aide de l'expression suivante :

$$A = \frac{\text{Aire de pic photoelectrique d'énergie } E}{\varepsilon(E) \cdot t_m \cdot \gamma(E)} \quad (5)$$

Avec :

t_m :Durée de l'acquisition de spectre.

$\gamma(E)$: Probabilité d'émission (taux de branchement) des photons gamma d'énergie.



*CHAPITRE III: Analyses
et Mesures*



1. Echantillonnage

L'échantillonnage est une phase importante du processus analytique, car il doit répondre à l'objectif recherché de l'analyse. Concernant notre recherche ; il consiste à identifier les éléments radioactifs présentes dans les eaux thermales dans plusieurs régions en Algérie. Elle permet également d'évaluer, à titre informatif, si les radio-isotopes dans les eaux thermales étudiées, présentent un risque d'un point de vue de santé publique; et les échantillons avec lesquels nous avons travaillé provenaient de huit sources de différents état de territoire national :

1. *Hammam Debagh _Galma*
2. *Hammam Melouane _Blida*
3. *Hammam Essalhine_ Bisakra*
4. *Hammam Ouled Tebbane _Sétif*
5. *Hammam Bouhniffa _Mascara*
6. *Hammam Boutrike_Ain dafla*
7. *Hammam Essalhine _Médéa*
8. *Hammam Ouled Djalale*



Figure. III. 1: Une mappe qui représente la situation de différent bains.

2.1. Hammam Melouane Blida

La commune de Hammam Melouane est située au sud de la wilaya de Blida, à environ 30 km à l'est de Blida et à environ 40 km au sud d'Alger et à environ 47 km au nord-est de Médéa. [31]

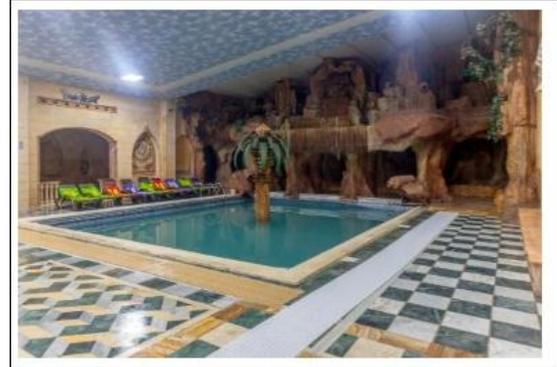
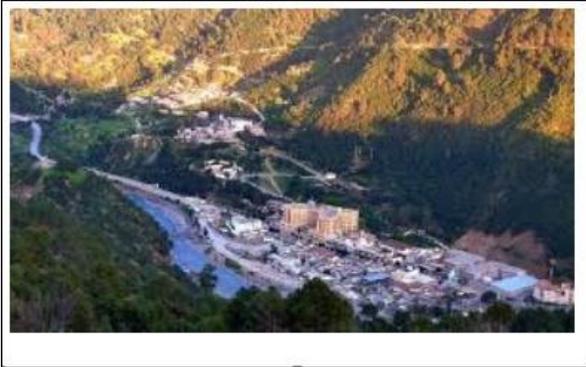


Figure. III. 2: Passage de hammam Melouane.

2.2. Hammam Ouled Tebbane _Sétif

Est un ancien Bain le vrai nom est hammam Sidi Mansour située dans le sud-ouest de la wilaya de Sétif. Cette commune est située à 69 km au sud de Sétif, à 65 km au sud-est de Bordj Bou Arreridj, à 79 km à l'est de Msila, et à 273 km au sud-est d'Alger.

L'altitude du Hammam est de 1150 mètres et la température moyenne annuelle de l'air est de 12,20°C. L'origine principale de cette source d'eau provient des précipitations de neige et de pluie pendant l'hiver dans la région d'Ouled Tebbane. Ces deux zones sont d'importants sites de tourisme thérapeutique en Algérie. [32]

2.3. Hammam Bouhanifia Mascara

Géographiquement, hammam Bouhanfia est situé à 25 Km au Sud-Ouest de Mascara, il s'étale dans un paysage sauvage dans le Tell oranais sur les bords de l'Oued El Hammam. Les eaux thermales jaillissent à des températures entre 20 et 70°C. sont répertoriées par les spécialistes comme étant des eaux hyperthermales, thermales, chlore-sulfatées ayant un débit de 23 l/s. [33]



Figure. III. 3: Passages de hammam Bouhanifia Mascara.

2.4. Hammam Salhine_Bsakra

Hammam Essalhine est situé dans la ville d'Al-Hammam, à 8 km de Biskra et à une altitude de 140 mètres, cet endroit à un climat sec. La température de l'eau est d'environ 70 ° C, et contient du sulfate de sodium et du chlore avec un débit de 65 l / s. [34]



Figure. III. 4: Passages de Hammam Essalhinne Bsakra.

2. Préparation l'échantillon d'analyse

1. Le stockage



Figure. III. 5: Le stockage des échantillons.

2 . Nettoyage des Marinelli.



Figure. III. 6: Nettoyage des Marinelli.

2. On doit remplir chaque Marinelli avec 450 ml d’eux thermales.



Figure. III. 7: Remplissages des marinelli avec l’eau thermale.

3. Le liquide prélevé est conditionné dans le récipient Marinelli et fermé de façon étanche au gaz avec du para-film pour éviter toute fuite du Gaz Radon ^{222}Rn . Après 24 jours d’entreposage, l’équilibre séculaires du ^{226}Ra avec ses descendants est atteint.



Figure. III. 8: Des marinelli exclu dans état séculaire.

Le récipient Marinelli comme conteneur pour l'échantillon Les mesures faisant intervenir des faibles activités radioactives comparables au bruit de fond comme c'est le cas de notre étude exigent des rendements de détection élevés. Pour l'augmenter, il faut soit disposer d'un détecteur germanium de gros volume qui coute énormément cher, soit augmenter l'angle solide entre l'échantillon et le détecteur.

C'est ce dernier choix qui a été utilisé. Pour un angle solide maximum d'environ 4π , il suffit que l'échantillon puisse englober quasi complètement le détecteur. Le récipient Marinelli en polyéthylène permet d'assurer ce type de géométrie 4π .

Le para-film M est un film plastique de paraffine sur papier produit par Bemis North America. Il est utilisé en laboratoire, pour sceller ou protéger de la verrerie et pour améliorer l'étanchéité d'un contenant avec couvercle contre l'humidité et la contamination de l'air, pour un stockage à long terme.

3. Analyse qualitative

Pour analyser les échantillons la chaîne doit être bien calibrée en énergie et en efficacité comme nous l'avons expliqué dans la partie **(II.7)**.

3.1. Bruit de fond

La mesure du bruit de fond est essentielle pour notre étude car les activités mesurées issues des échantillons sont relativement très faibles. Afin de garder les mêmes conditions de mesure, le spectre de bruit de fond émanant de l'installation de mesure et de son environnement a été déterminée en présence d'un échantillon d'eau distillée ou dés-ionisée (ne contient pratiquement pas d'ions) conditionné dans un récipient Marinelli type I et entreposé sur le détecteur de la même manière que les échantillons. La durée de l'acquisition du spectre est de 24 heures. Le spectre de bruit de fond de la figure ci-dessous révèle la présence des radionucléides de la série de l'uranium et du Thorium.

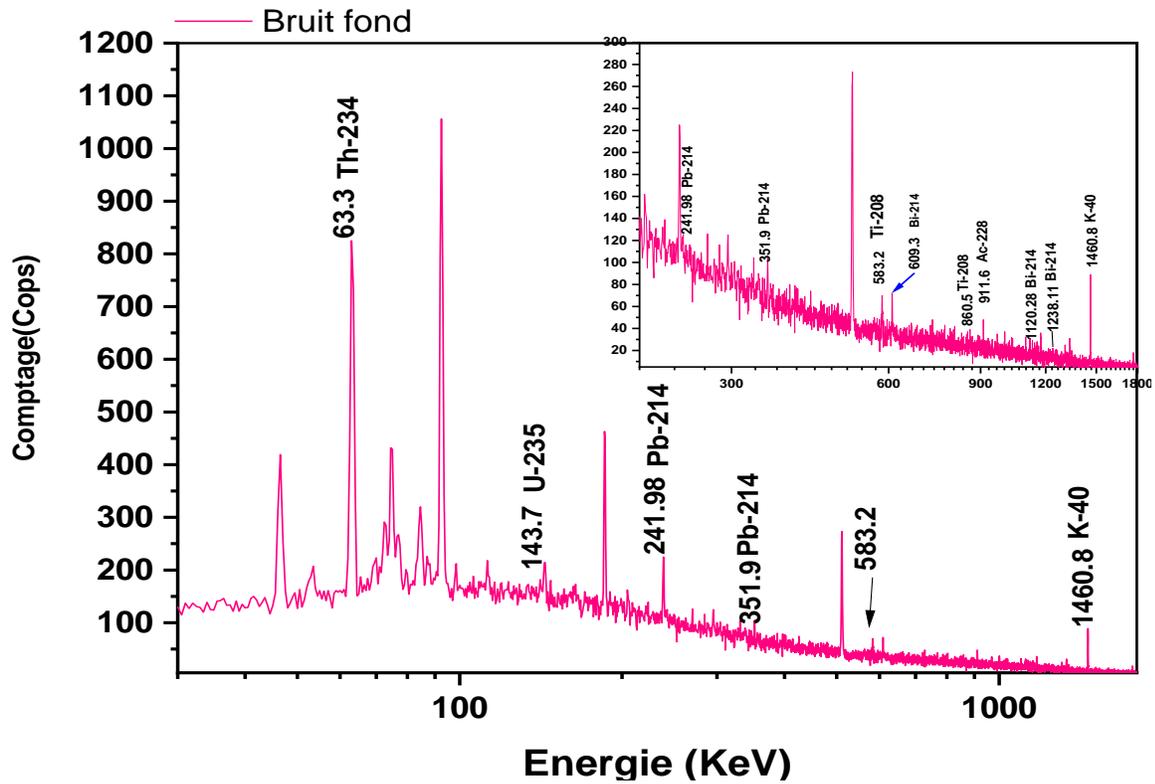


Figure. III. 9: Le spectre des rayonnements γ émis par bruit de fond (Eau dés ionisé).

3.2. Les spectres

Les spectres nous avons obtenus expriment le nombre de comptage en fonction de l'énergie.

Ainsi que en fonction d'énergie des photons ont identifié les radioéléments présents. L'air de chaque pic (nombre d'impulsion) nous permet de quantifier la radioactivité de l'élément.

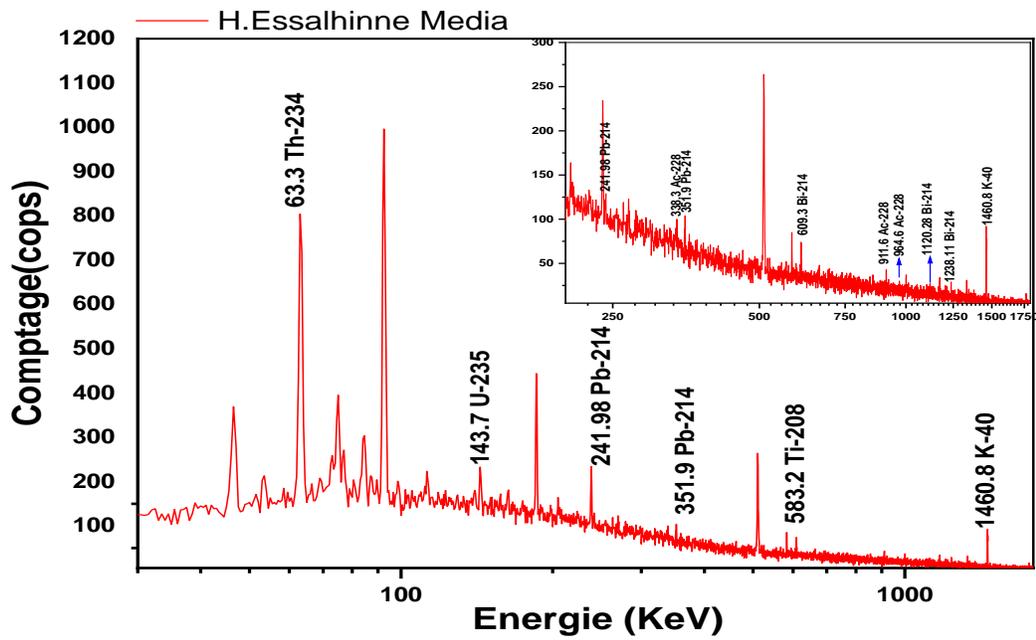


Figure. III. 10: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Essalhinne Médéa.

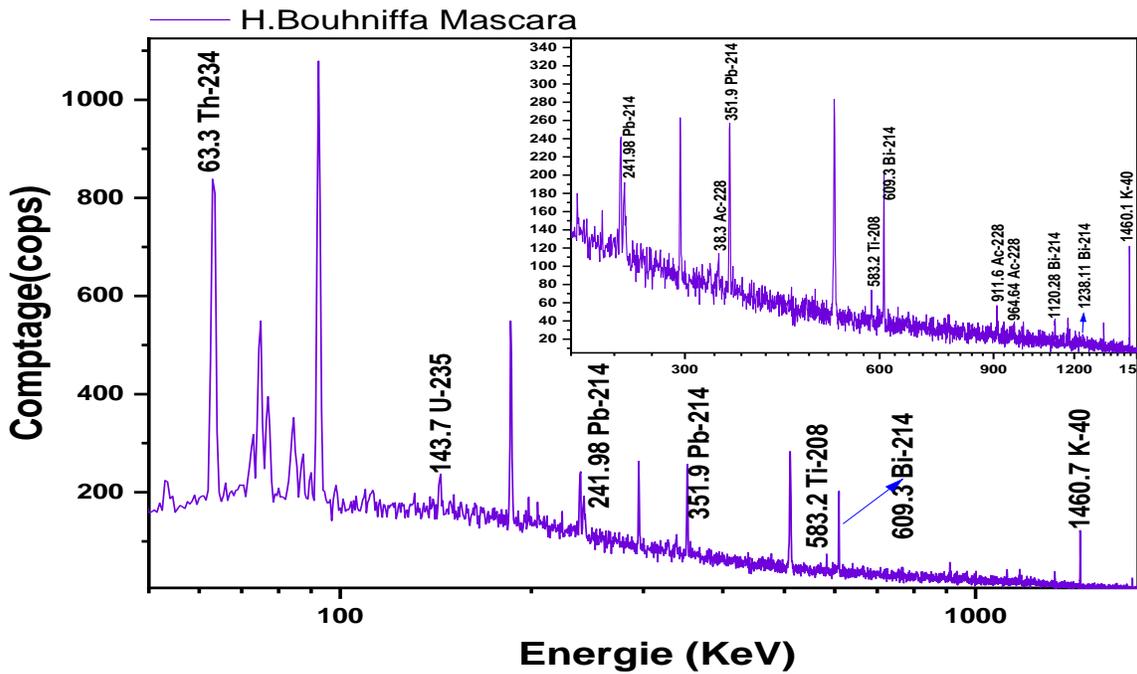


Figure. III. 11: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Essalhinne Mascara.

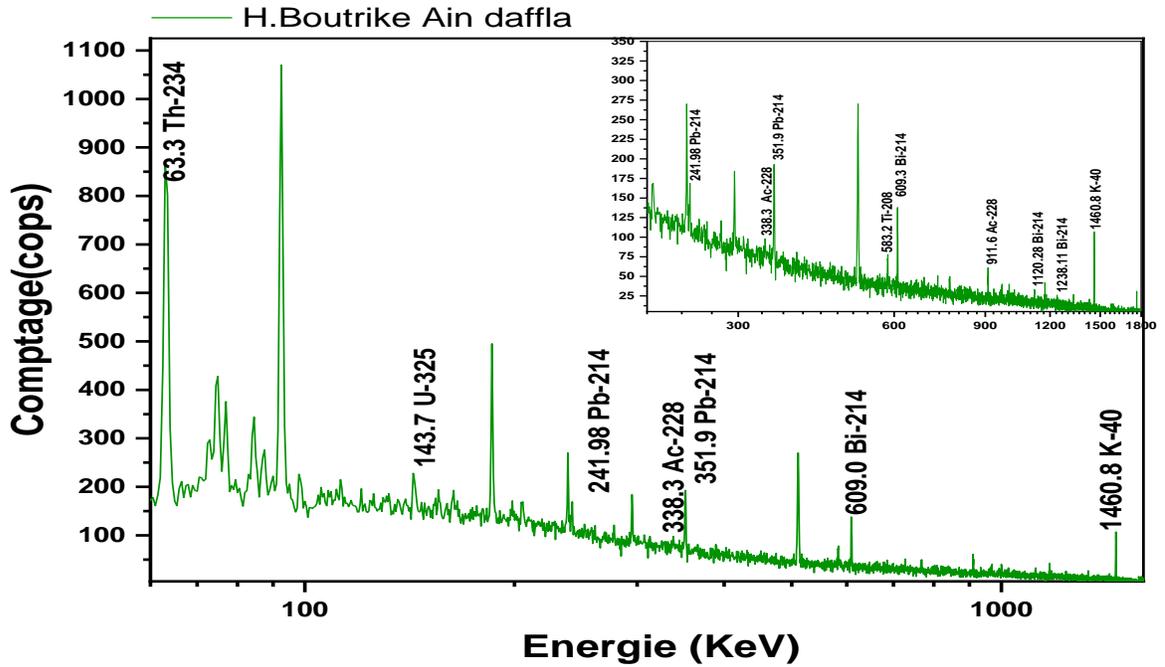


Figure. III. 12: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon hammam Boutrike.

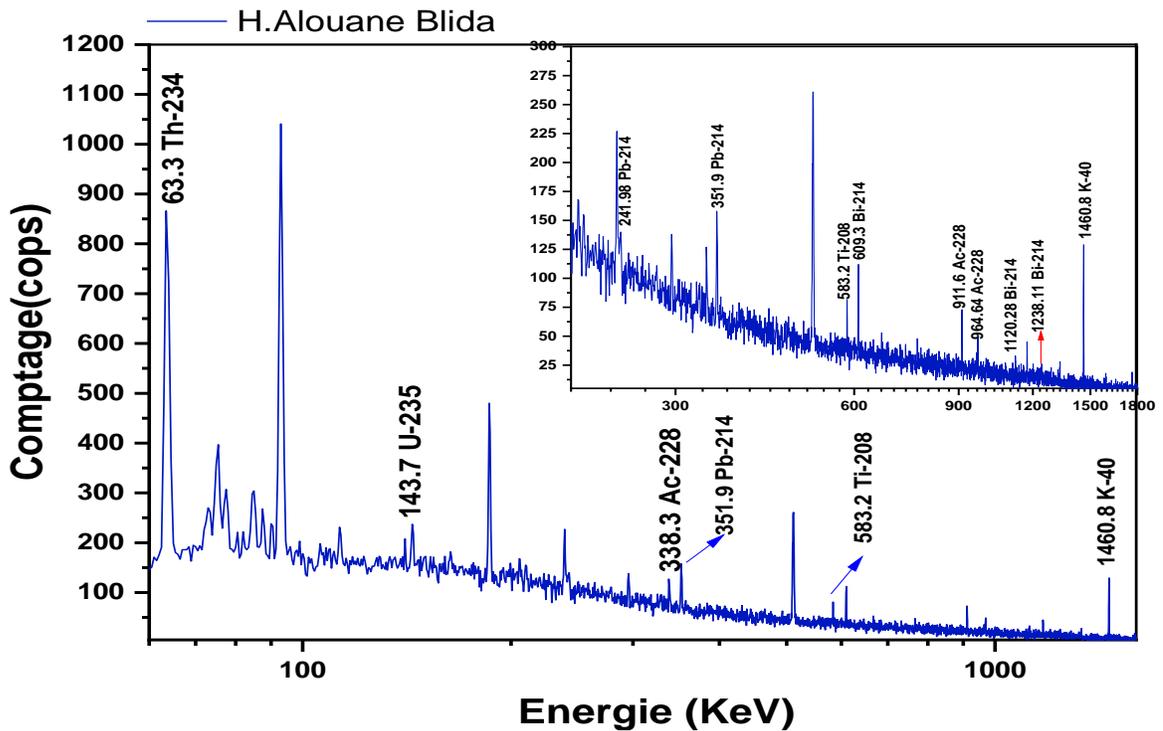


Figure. III. 13: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Meluoane Blida.

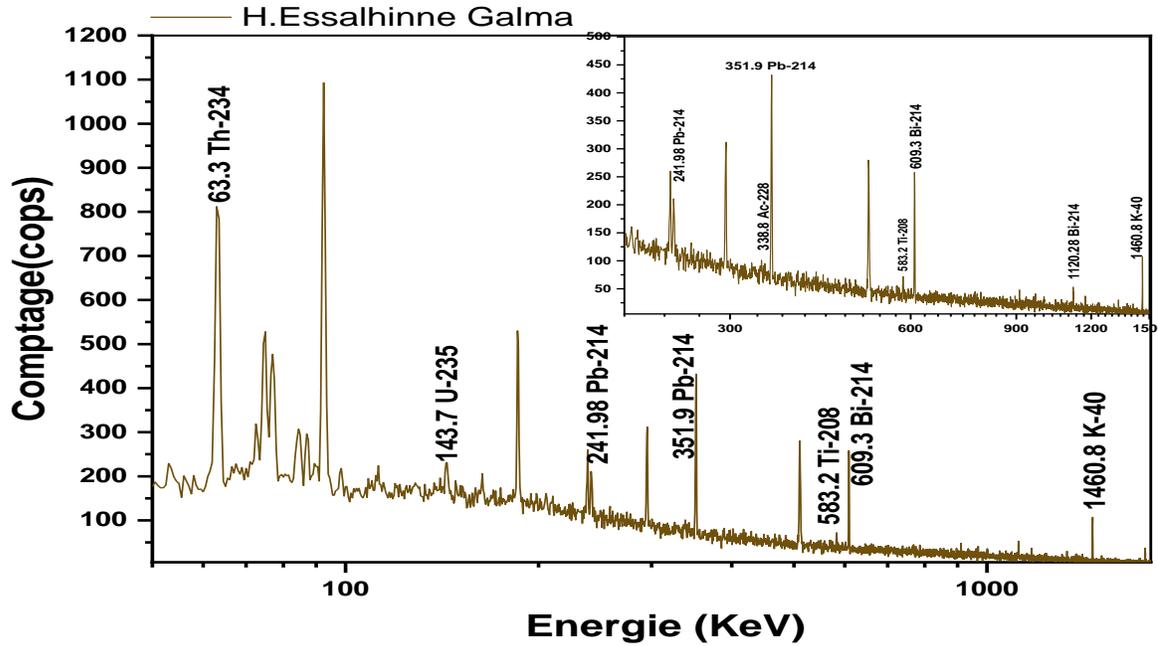


Figure. III. 14: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Debagh Galma.

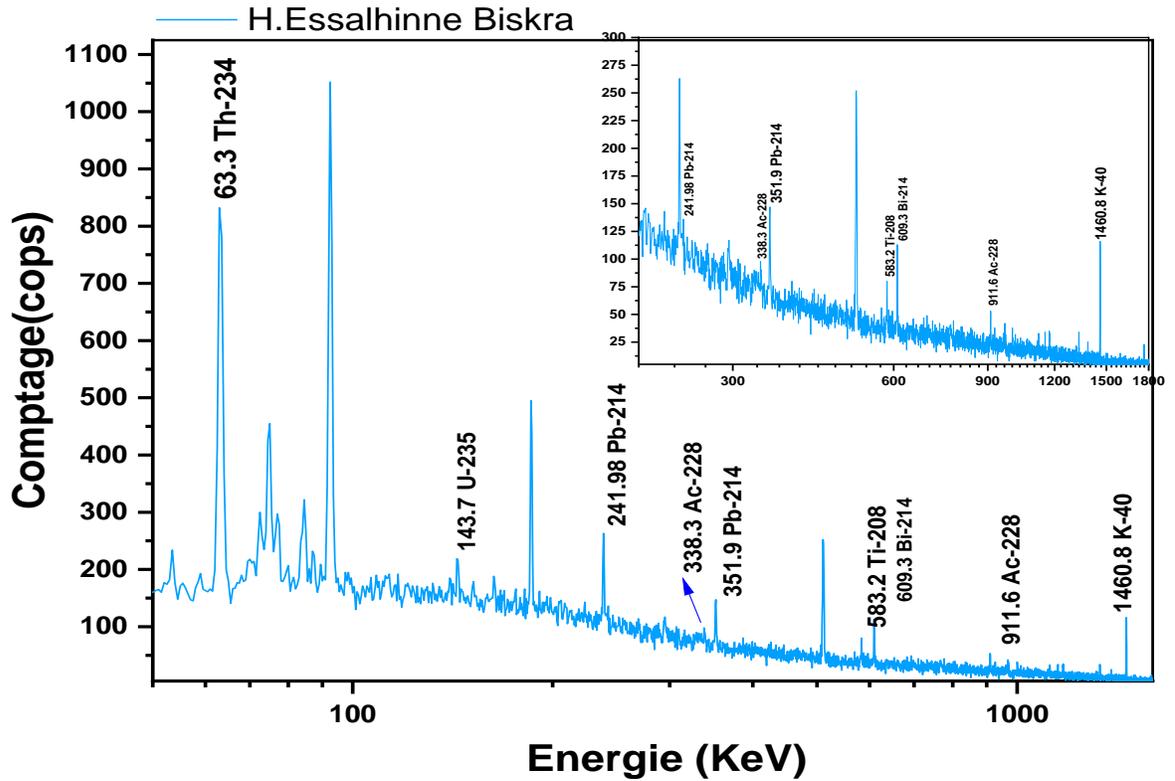


Figure. III. 15: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Essalhinne Biskra.

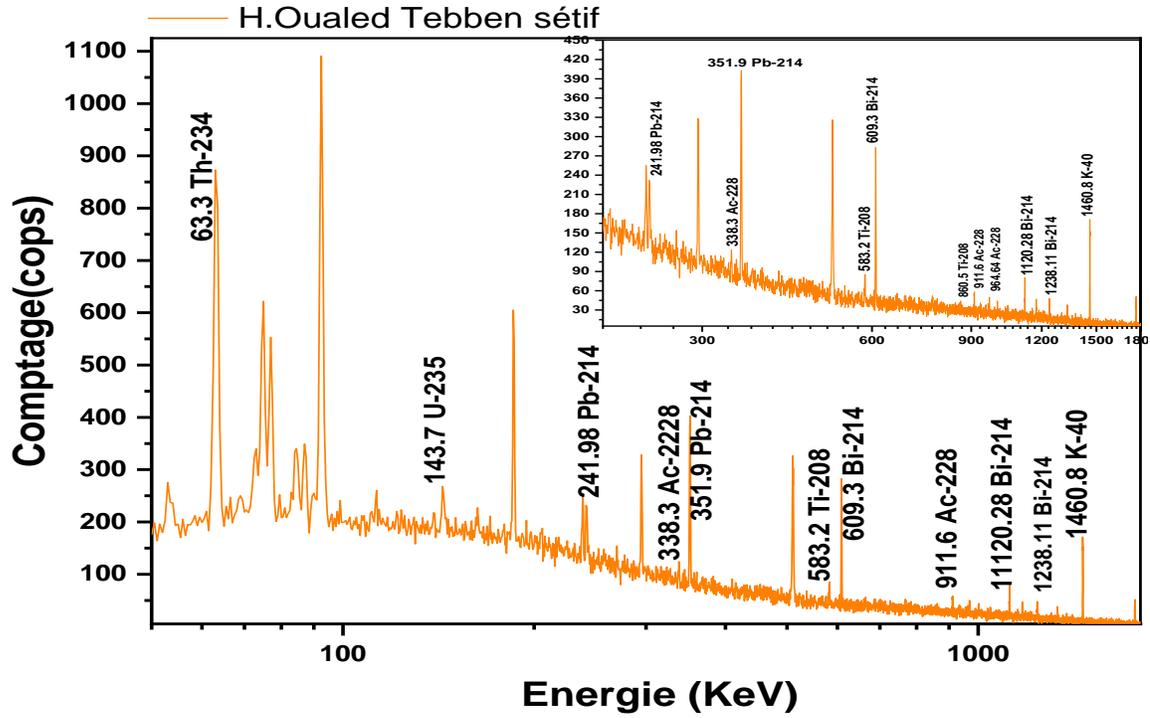


Figure. III. 16: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Oualed Tebben.

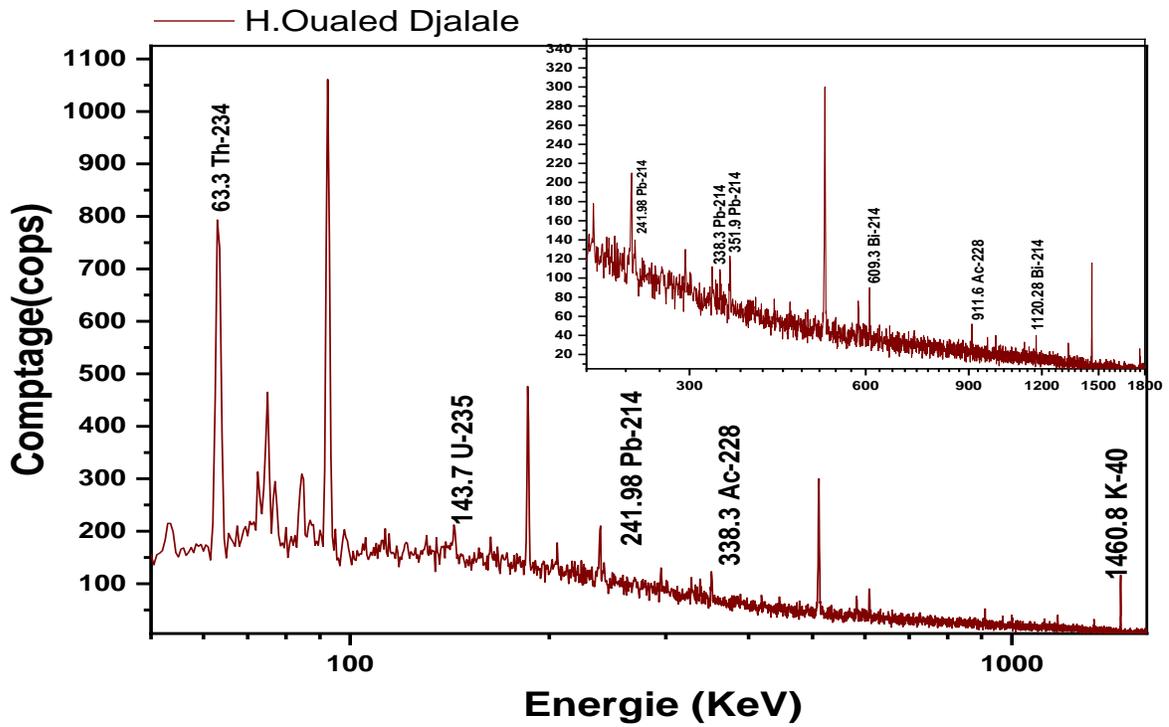


Figure. III. 17: Le spectre des rayonnements γ émis par l'échantillon de hammam Oulade Djellal.

Tableau. III. 1 : Comptages des différents radioéléments identifiés dans les différents échantillons d'eau.

Élément	E (keV)	Probabilité d'émission (%)	Efficacité	Bruit de fond	ECH 01 H. Debagh Galna	ECH 02 H. Melouane Blida	ECH 03 H. Essalbine Biskra	ECH 04 Ouled Tebben Séfif	ECH 05 Hammam Bouhiffia	ECH 06 Hammam Boutrike	ECH 07 Essalbine Médéa	ECH 08 Ouled Djatala
²¹⁴ Pb	351,9	37.2	3,19E-02	159	1165	345	270	1062	624	406	167	228
²¹⁴ Bi	609.3	46.3	1,94E-02	145	836	238	247	847	545	391	152	274
²²⁸ Ac	911.6	27.7	1,25E-02	110	133	216	128	182	156	145	96	111
²³⁵ U	143,7	10.5	6,60E-02	140	296	216	163	334	335	224	293	213
⁴⁰ K	1460,8	10.67	7,04E-03	419	493	568	598	862	589	560	460	561

Les échantillons ont été analysés dans les mêmes conditions que la mesure du bruit de fond. La durée de l'acquisition des spectres est de 24 heures.

4. Analyse quantitative

4.1. Formules des calculs :

Concernant l'analyse quantitative, les activités spécifiques des radioéléments ont été Calculées en appliquant la formule suivante :

$$A_s = \frac{N_{détc} - N_{BF}}{(\epsilon_{abs} \times \frac{\Omega_E}{\Omega_S}) \times f \times t_c \times v} \quad (6)$$

Où :

A_s : Activité spécifique de radioélément.

$N_{détc}$: Le nombre de coups enregistrés sur le pic.

N_{BF} : Comptage de bruit de fond

f : Taux d'embranchement.

t_c : Temps de comptage, est égal à 54000 s (15 heures).

v : Volume de l'échantillon, égale à 0,096 litre.

ϵ_{abs} : Efficacité absolue de notre détecteur.

Ω_E : L'angle solide situé entre l'échantillon et le détecteur.

Ω_S : L'angle solide situé entre la source radioactive de calibration et le détecteur.

$(\epsilon_{abs} \times \frac{\Omega_E}{\Omega_S})$: Représente la correction de l'efficacité de détection.

Dans notre cas les échantillons et la source radioactive de calibration ont la même forme géométrique et ils sont analysés par la même géométrie (géométrie zéro) $\Omega_E = \Omega_S$

Finalemnt La formule (1) devient :

$$A_S = \frac{N_{détc}}{\epsilon_{abs} \times f \times t_c \times v} \quad (7)$$

Nous avons la formule d'activité qui déjà montre dans l'étape passé:

Donc l'incertitude sur cette formule sera donc est :

$$\Delta A_S = A_S \left(\frac{\Delta N_{dét}}{N_{dét}} + \frac{\Delta t_c}{t_c} + \frac{\Delta \epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}} + \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta f}{f} \right) \quad (8)$$

Où:

$$\Delta f = \Delta v = \Delta t_c = 0$$

Donc:

$$\Delta A_S = A_S \left(\frac{\Delta N_{dét}}{N_{dét}} + \frac{\Delta \epsilon_{abs}}{\epsilon_{abs}} \right) \quad (9)$$

Tableau. III. 2: L'erreur de la déférente efficacité.

énergie (keV)	Efficacité	$\Delta\mathcal{E}$
351,9	3,19E-02	0,0018
609,3	1,94E-02	0,0012
911,6	1,25E-02	0,0032
143,7	6,60E-02	0,0029
1460,8	7,04E-03	0,0017

4.1. Limite et seuil de détection

Les limites de détection servent comme moyen d'estimation du niveau de confiance des mesures effectuée. Le (Tableau. III. 3) montre des limites de détection très petites devant toutes les activités mesurées des échantillons considérés.

$$LMD = \frac{LD}{\varepsilon_E \times V \times P_E} \quad (10)$$

Avec:

ε_E : Efficacité.

V : Volume d'échantillon par litre.

P_E : Probabilité d'émission.

Où LD est la limite de détection calculée à partir de la formule de Curie :

$$LD = 1,645 \times \frac{\sqrt{B}}{LT}$$

Avec B est le bruit de fond sous le pic d'intérêt, et LT est le temps réel de comptage.

Tableau. III. 4 : La limite de détection de quelque élément.

Radionucléide	E (keV)	B(Cps)	LD	efficacité	probabilité émission (%)	LMD (Bq/l)
$^{214}_{82}\text{Pb}$	351,9	159	0,00024	3,19E-02	0,372	0,0449
$^{214}_{83}\text{Bi}$	609,3	145	0,000229	1,94E-02	0,463	0,0567
$^{228}_{89}\text{Ac}$	911,6	110	0,0002	1,25E-02	0,277	0,128
$^{235}_{90}\text{U}$	143,7	140	0,000225	6,60E-02	0,105	0,0722
$^{40}_{19}\text{K}$	1460,8	419	0,000389	7,04E-03	0,1067	1,15

5. Résultats de mesure

Les résultats obtenus nous les activités spécifiques des radioéléments dans les huit échantillons sont récapitulés dans les huit tableaux suivants avec leurs erreurs relatives respectives :

Tableau. III. 5: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Melouane –Blida.

élément Radioactive	Energie (KeV)	bruit de fond	Comptage	Efficacité (ϵ_{abs})	Probabilité émission	Activité Spécifique (Bq/litre)	Incertitude
$^{214}_{82}\text{Pb}$	351,9	159	345	3,19E-02	0,372	0,402	0,084
$^{214}_{83}\text{Bi}$	609,3	145	238	1,94E-02	0,463	0,266	0,0588
$^{228}_{89}\text{Ac}$	911,6	110	216	1,25E-02	0,277	0,784	0,329
$^{235}_{92}\text{U}$	143,7	140	216	6,60E-02	0,105	0,281	0,0752
$^{40}_{19}\text{K}$	1460,8	419	568	7,04E-03	0,1067	5,097	1,513693

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 86469 s

Tableau. III. 6: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Bouhniffa –Mascara.

<i>Elément Radioactive</i>	<i>Energie (KeV)</i>	<i>bruit de fond</i>	<i>Comptage</i>	<i>efficacité</i>	<i>probabilité émission</i>	<i>Activité Spécifique (Bq/litr)</i>	<i>Incertitudes</i>
$^{214}_{82}Pb$	351,9	159	624	3,19E-02	0,372	1,01	0,144
$^{214}_{83}Bi$	609,3	145	545	1,94E-02	0,463	1,15	0,192
$^{228}_{89}Ac$	911,6	110	156	1,25E-02	0,277	3,41	1,711
$^{235}_{90}U$	143,7	140	335	6,60E-02	0,105	7,23	2,399
$^{40}_{19}K$	1460,8	419	589	7,04E-03	0,1067	5,82	1,735

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 86469 s

Tableau. III. 7: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Boutrike.

<i>Elément Radioactive</i>	<i>Energie (KeV)</i>	<i>bruit de fond</i>	<i>Comptage</i>	<i>Efficacité</i>	<i>probabilité émission</i>	<i>Activité Spécifique (Bq/litre)</i>	<i>Incertitudes</i>
$^{214}_{82}Pb$	351,9	159	406	3,19E-02	0,372	0,534	0,0840
$^{214}_{83}Bi$	609,3	145	391	1,94E-02	0,463	0,703	0,118
$^{228}_{89}Ac$	911,6	110	145	1,25E-02	0,277	0,259	0,126
$^{235}_{90}U$	143,7	140	224	6,60E-02	0,105	0,311	0,085
$^{40}_{19}K$	1460,8	419	560	7,04E-03	0,1067	4,823	1,441

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 86471 s

Tableau. III. 8: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Debagh Galma.

<i>élément Radioactive</i>	<i>énergie (KeV)</i>	<i>bruit de fond</i>	<i>comptage</i>	<i>Efficacité</i>	<i>probabilité émission</i>	<i>Activité (Bq/litre)</i>	<i>Incertitudes</i>
$^{214}_{82}\text{Pb}$	351,9	159	1165	3,19E-02	0,372	2,178	0,244
$^{214}_{83}\text{Bi}$	609,3	145	836	1,94E-02	0,463	1,977	0,243
$^{228}_{89}\text{Ac}$	911,6	110	133	1,25E-02	0,277	0,17	0,080
$^{235}_{90}\text{U}$	143,7	140	296	6,60E-02	0,105	0,578	0,199
$^{40}_{19}\text{K}$	1460,8	419	493	7,04E-03	0,1067	2,531	0,792

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 86468 s

Tableau. III. 9: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Elssalhinne-Biskra.

<i>élément Radioactive</i>	<i>énergie (KeV)</i>	<i>bruit de fond</i>	<i>Comptage</i>	<i>efficacité</i>	<i>probabilité émission</i>	<i>Activité Spécifique (Bq/litre)</i>	<i>Incertitudes</i>
$^{214}_{82}\text{Pb}$	351,9	159	270	3,19E-02	0,372	0,240	0,056
$^{214}_{83}\text{Bi}$	609,3	145	247	1,94E-02	0,463	0,292	0,067
$^{228}_{89}\text{Ac}$	911,6	110	128	1,25E-02	0,277	0,133	0,070
$^{235}_{90}\text{U}$	143,7	140	163	6,60E-02	0,105	0,0853	0,025
$^{40}_{19}\text{K}$	1460,8	419	598	7,04E-03	0,1067	6,123	1,811

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 86471 s

Tableau. III. 10: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Elssalhinne-Media.

<i>élément Radioactive</i>	<i>Energie (KeV)</i>	<i>bruit de fond</i>	<i>Comptage</i>	<i>efficacité</i>	<i>probabilité émission</i>	<i>Activité (Bq/litre)</i>	<i>Incertitudes</i>
$^{214}_{82}Pb$	351,9	159	167	3,19E-02	0,372	<LMD	0,005
$^{214}_{83}Bi$	609,3	145	152	1,94E-02	0,463	<LMD	0,005
$^{235}_{90}U$	143,7	140	293	6,60E-02	0,105	0,567	0,125
$^{40}_{19}K$	1460,8	419	460	7,04E-03	0,1067	1,402	0,440

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 86468 s

Tableau. III. 11: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Oualade-Djalale.

<i>Elément Radioactive</i>	<i>énergie (KeV)</i>	<i>bruit de fond</i>	<i>Comptage</i>	<i>Efficacité</i>	<i>Probabilité émission</i>	<i>Activité (Bq/litre)</i>	<i>Incertitudes</i>
$^{214}_{82}Pb$	351,9	159	228	3,19E-02	0,372	0,149	0,041
$^{214}_{83}Bi$	609,3	145	274	1,94E-02	0,463	0,369	0,079
$^{228}_{89}Ac$	911,6	110	111	1,25E-02	0,277	<LMD	0,004
$^{235}_{90}U$	143,7	140	213	6,60E-02	0,105	0,270	0,134
$^{40}_{19}K$	1460,8	419	561	7,04E-03	0,1067	4,858	1,483

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 86467 s

Tableau. III. 12: Les résultats des mesures de la radioactivité dans hammam Ouled Tebben-Sétif.

<i>Elément Radioactive</i>	<i>Energie (KeV)</i>	<i>Bruit de fond</i>	<i>Comptage</i>	<i>Efficacité</i>	<i>Probabilité émission</i>	<i>Activité (Bq/litre)</i>	<i>Incertitudes</i>
$^{214}_{82}\text{Pb}$	351,9	159	1062	3,19E-02	0,372	1,96	0,245
$^{214}_{83}\text{Bi}$	609,3	145	847	1,94E-02	0,463	2,008	0,233
$^{228}_{89}\text{Ac}$	911,6	110	182	1,25E-02	0,277	0,534	0,251
$^{235}_{90}\text{U}$	143,7	140	334	6,60E-02	0,105	0,7194	0,237
$^{40}_{19}\text{K}$	1460,8	419	862	7,04E-03	0,1067	15,156	4,373

Avec : $V = 0,45$ Litre Et temps de comptage = 8647 s

Tableau. III. 13: Les résultats finaux des activités spécifiques de Pb et Bi.

	<i>Activité Spécifique (Bq/litre)</i>	
	$^{214}_{82}\text{Pb}$	$^{214}_{83}\text{Bi}$
<i>H. Debagh (Galma)</i>	2.178 ± 0.244	1.977 ± 0.243
<i>H. Ouled-Tebben (Sétif)</i>	1.96 ± 0.245	2.008 ± 0.233
<i>H. Bouhniffa (Mascara)</i>	1.01 ± 0.144	1.15 ± 0.192
<i>H. Boutrike (Ain Defla)</i>	0.534 ± 0.084	0.703 ± 0.118
<i>H. Essalhine (Biskra)</i>	0.240 ± 0.056	0.292 ± 0.067
<i>H. Melouane (Blida)</i>	0.402 ± 0.084	0.266 ± 0.0588
<i>H. Ouled-Djalale</i>	0.149 ± 0.041	0.369 ± 0.079
<i>H. Essalhine (Media)</i>	<LMD	<LMD

<LMD : Inférieur à la limite de détection.

6. Dédution d'activité du Radium(226)

Le radium(226) ^{226}Ra appartient à la série de l'uranium(238) $^{238}_{92}\text{U}$ (voir fig.1 :6). Il existe plusieurs méthodes pour déterminer son activité. Cependant, celle qui fait intervenir l'équilibre séculaire est la plus usitée. L'équilibre séculaire est atteint en piégeant le gaz ^{222}Rn pendant 28 à 30 *jours* (Dans notre cas l'équilibre séculaire atteint pendant 24 jours) c'est-à-dire environ 7 à 8 fois la période du Radon. Ce procédé égalise les activités de la série de désintégration et principalement les activités du ^{226}Ra et de ses fils qui sont ^{222}Rn , ^{218}Po , ^{214}Pb et ^{214}Bi . Ces deux derniers radionucléides affichent des pics photoélectriques assez conséquents.

$$A_{226\text{Ra}} = \frac{A_{214\text{Bi}} + A_{214\text{Pb}}}{2} \quad (11)$$

Tableau. III. 14: Les résultats des mesures de la radioactivité de radium.

Nom de Hammam	Activité spécifique de Radium (226) en Bq/l
H. Debagh-Galma	2,0775±0,243
H. Ouled-Tebben-Sétif	1,984± 0,239
H. Bouhniffa (Mascara)	1,08±0,168
H .Boutrike	0,618±0,101
H. Melouane (Blida)	0,334±0,0714
H. Essalhine -Biskra	0,266± 0,0615
H. Oulede-Djalale	0,259± 0,06
H. Essalhine-Médéa	<LMD

7. Discussion des résultats

L'origine naturelle de la radioactivité est due à la série naturelle de l'uranium et du thorium ainsi qu'à des séries d'autres éléments dont le principal est le potassium-40, et dans une moindre proportion, le tritium existant dans la croûte terrestre (Brillanceau et Hubert 1998). Selon Améon (2003).

L'activité des radionucléides présents dans les spectres est calculée à l'aide de l'expression de l'activité (équation 01-III). Le tableau III-1 présente les valeurs de la probabilité d'émission, le comptage des pics et l'efficacité pour chaque raie gamma utilisées pour le calcul de l'activité des radionucléides.

Il est nécessaire de déduire du comptage de chaque pic photoélectrique, la contribution du bruit de fond. Les incertitudes élevées associées aux activités s'expliquent par la faiblesse des activités issues des échantillons dont l'intensité est légèrement supérieure à celle du bruit de fond. Les tableaux (III-4 a III-11) renferment les valeurs des activités spécifiques des radionucléides qui ont été identifiées et quantifiées. L'incertitude associée à la valeur de l'activité représente un écart type de 1 sigma (une moyenne de 25% d'intervalle de confiance).

Le processus d'analyse mené a permis d'analyser six radio-isotopes qui sont: ^{228}Ac , ^{235}U , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{226}Ra et le ^{40}K . Le premier appartient à la série du ^{232}Th ; les suivants exceptés le ^{40}K sont les descendants de ^{238}U .

Ainsi, les conclusions qui peuvent être tirés de ses résultats sont les suivantes :

Parmi tous les éléments détectés, on s'est intéressé le plus à la quantification du ^{226}Ra , car ce dernier radioélément très soluble dans l'eau, et qui présente en outre une période biologique très longues, peut provoquer des contaminations par ingestion, en consommant l'eau thermale chargée en ^{226}Ra , ou bien par inhalation du ^{222}Rn lors du dégazage dans l'atmosphère intérieure des différents locaux des stations thermales. Dans cette objectif, cette analyse à révéler la présence de ^{226}Ra dans tous les échantillons liquides prélevés à partir des huit stations thermales.

La similitude des activités spécifiques du ^{214}Pb et ^{214}Bi montre que l'équilibre séculaire entre le ^{226}Ra et ses descendants a été bien établi.

Dans cette étude, les valeurs trouvées de l'activité en ^{226}Ra , pour les différents échantillons issue des différentes stations thermales en Algérie, se situe dans la plage des résultats affichés dans la littérature portant sur les mêmes natures (eaux thermales) [entre 0,0185-0,0926 Bq/l jusqu'à 29 Bq/l] (Butler and Helena 1990).

L'activité maximale en ^{226}Ra a été constatée dans les eaux thermales du hammam Ouled-Tebben de Sétif, et hammam Debagh de Guelma avec une valeur maximale respective égale à 1,7822 Bq/litre et 1,8697 Bq/litre.

Il est à signaler que; à l'exception de l'eau thermale de H. Essalhine-Médéa, qui présente une activité inférieure à la limite de détection (LMD) égale à 0,018 Bq/l, tout le reste des échantillons des eaux thermales analysés sont impropre à la consommation (à boire). En effet, l'activité mesurée du ^{226}Ra , pour ces derniers, est largement supérieurs à la limite maximale admissible (LMA) égale à 185 mBq/L, établie pour l'eau de consommation par l'agence Américaine de protection de l'environnement. [35]

Le potassium (^{40}K) est présent dans le corps humain en quantité constante et ne se concentre pas comme les autres isotopes. Il n'est ainsi pas considéré comme sans risque pour la santé humaine. Toutefois, il est à signalé que tous les échantillons des eaux thermales se révèlent aussi bien chargé en ^{40}K , dont l'activité en becquerel/litre oscille entre 1 et 4, à l'exception de l'eau thermale issue du hammam Ouled Tebben-Sétif qui affiche une activité très élevée égale 16 Bq/litre.

Le radionucléide ^{235}U , est aussi présent dans tous les échantillons analysés avec une quantification très variable qui ne peut être affirmé en raison des incertitudes élevées associées aux valeurs de concentration.



CONCLUSION GENERALE



Conclusion générale

Dans cette étude, nous avons identifié et quantifiée la radioactivité présente dans les eaux thermales dans plusieurs stations thermales en Algérie, à savoir; Hammam Melouane à Blida, Hammam Ouled Tebbane à Sétif, Hammam Ouled Djalale et Hammam Essalhine à Media, Hammam Essalhine à Galma, Hammam Essalhine à Biskra, Hammam Bouhniffa à Mascara, et finalement, Hammam Boutrike dans la willaya de Djelffa. Cette étude nous a permis également d'évaluer, à titre informatif, si les teneurs absolues en radio-isotopes dans les eaux utilisées pour la consommation ou la baignade, présentent un risque d'un point de vue santé publique.

La méthode nucléaire d'analyse utilisée est basée sur la technique de spectrométrie gamma fine (Abas bruit fond). Le processus d'analyse mené a permis d'analyser six radio-isotopes qui sont: ^{228}Ac , ^{235}U , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{226}Ra et le ^{40}K . Le premier appartient à la série du ^{226}Th , les suivants excepté le ^{40}K sont les descendants de l' ^{238}U .

Parmi tous les éléments détectés, on s'est intéressé le plus à la quantification du ^{226}Ra en raison de sa haute solubilité dans l'eau, et sa haute toxicité dans le corps humain (longue période biologique). En effet, ce radioélément peut provoquer des contaminations par ingestion (lors de la consommation de cette eau), ainsi que par inhalation du ^{222}Rn lors du processus de dégazage, dans l'atmosphère intérieure des différents locaux des stations thermales.

Dans cette étude, les valeurs trouvées de l'activité en Ra ^{226}Ra pour les différents échantillons issues des différentes stations thermales en Algérie, se situent dans la plage des résultats affichés dans la littérature (0,085 – 0,0926 Bq /l jusqu'à 29 Bq/ l). [36]

Il est à signaler que; à l'exception de l'eau thermale de H. Essalhine-Media, qui présente une activité inférieure à la limite de détection (LMD) égale à 0,018 Bq/l. Le reste des échantillons d'eau analysés présentent une activité de ^{226}Ra , largement supérieure à la limite maximale admissible (LMA) 185 mBq/L [37]. Ils sont ainsi impropres à la consommation.

Ces résultats doivent être confirmés par d'autres expériences faisant intervenir plusieurs dizaines de prélèvements dans la région ainsi que d'autres techniques d'analyse nucléaire telle que la spectrométrie alpha,

La mesure directe du ^{222}Rn en utilisant les détecteurs de trace nucléaire (CR39), serait très appréciée. En effet, cette mesure nous permettrait de quantifier l'accumulation du ^{222}Rn , lors du dégazage dans l'atmosphère intérieure des différents locaux des stations thermales.

Références

- [1]: Christine Jimonet, Henri Métivier, Collectif Principes de radioprotection Réglementation.pdf.
- [2]: thèse. Après. Correction kebir.2017.pdf.
- [3]: <https://www.semanticscholar.org/paper>.
- [4]: <https://www.semanticscholar.org/paper>.
- [5]: <https://www.semanticscholar.org/paper>.
- [6]: Eugène Hecht, *Physique*, De Boeck, 1999, p. 1 099
- [7]: Eugène Hecht, *Physique*, De Boeck, 1999, p. 1 099
- [8]: Institut de Radioprotection et de sureté Nucléaire, IRSN 2015, *Exposition* de la population Française aux rayonnements ionisants, p 8.
- [9]: Institut de Radioprotection et de sureté Nucléaire, IRSN 2015, *Exposition* de la population Française aux rayonnements ionisants, p 8.
- [10]: S. OUICHAOUI, Introduction à la physique nucléaire, OPU, 1992.
- [11]: <https://www.laradioactivite.com/site/pages/desintegrationencascade.htm>
- [12]: thèse. Après. Correction kebir.2017.pdf
- [13] [14] [15] [16] [17]: Mémoire de Master_Merabet.pdf
- [18]: Christine Jimonet, Henri Métivier, Collectif - Principes de radioprotection _ Réglementation .pdf.

[19]: Remy, E., Estades J., 2006, Déconfiner l'expertise sur les faibles doses de rayonnements ionisants, Hydroécol. Appl., Tome 15, 123-137.

[20]: Christine Jimonet, Henri Métivier, Collectif - Principes de radioprotection _
Réglementation .pdf.

[21]: Christine Jimonet, Henri Métivier, Collectif - Principes de radioprotection _
Réglementation .pdf.

[22]: Christine Jimonet, Henri Métivier, Collectif - Principes de radioprotection _
Réglementation .pdf.

[23]: Remy, E., Estades J., 2006, Déconfiner l'expertise sur les faibles doses de rayonnements ionisants, Hydroécol. Appl., Tome 15, 123-137.

[24]: <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/bitstream>.

[25]: Cours d'interaction rayonnement avec la matière de master 2.

[26]: <https://tel.archives-ouvertes.fr>.

[27]: <https://www.htds.fr/nucleaire-radioprotection/logiciels-de-spectrometrie>.

[28]: <https://www.htds.fr/nucleaire-radioprotection/logiciels-de-spectrometrie>.

[29]: Omar Denden, Mémoire de magister.pdf.

[30]: [thèse après correction, page 63].

[31]: [<https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin.pdf> PAGE 17].

[32]: https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_013_10.pdf PAGE18.

[33]: https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_013_10.pdf PAGE18.

[34]: https://www.cder.dz/vlib/bulletin/pdf/bulletin_013_10.pdf PAGE19.

[35] [36]: [REF] L. Roper, Toxicological profile for radium, Agency for Toxic Substances and Disease Registry U.S. Public Health Service In collaboration with: U.S. Environmental Protection Agency, 1990.

