

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE SAAD DAHLEB \_ BLIDA 1 \_



FACULTE DES SCIENCES

Département de physique

MÉMOIRE DE MASTER

Option : Physique des Rayonnements

Thème :

Etude de la qualité radiologique des eaux potables en Algérie

Présenté Par :

Mahammedi Rania

et

Hadjoudj Ilhem

Présenté le : 27-06-2024

devant le jury composé de :

Mme. A.Cherfi

Maitre Assistante 'A' USDB

Présidente

Dr. N.Taibouni

Maitre de Conférences 'B' USTHB

Examinateur

Dr. N.Belouadah

Maitre de Conférences 'A' USTHB

Encadreur

Dr. T.Azeli

Chercheur Senior (CRND)

Co-Encadreur

## ***Résumé***

La radioactivité naturelle dans les eaux dépend de la nature géologique des terrains qu'elles traversent, du temps de contact (âge de l'eau), de la température, de la solubilité des radioéléments rencontrés, etc. L'eau se charge d'éléments radioactifs lors de son passage au travers de certaines roches profondes. Dans les zones de roches riches en uranium et en thorium, la radioactivité est plus élevée que dans les zones sédimentaires. Ainsi, les eaux souterraines des régions granitiques présentent parfois une radioactivité naturelle élevée due à la présence de radium 226 et de radon 222.

L'objectif de ce travail consiste à déterminer la radioactivité naturelle et les risques radiologiques dans des eaux potables par la technique de spectrophotométrie gamma au niveau du centre de recherche nucléaire de Draria. Le principe de cette méthode est basé sur la détection des gammas par un détecteur de la radioactivité naturelle GeHP. En même temps, les résultats expérimentaux vont être analysés et comparés avec des données expérimentales.

## **ABSTRACT**

The natural radioactivity in water depends on the geological nature of the terrains it traverses, the contact time (water age), temperature, and the solubility of encountered radionuclides. Water becomes charged with radioactive elements as it passes through certain deep rocks. In areas rich in uranium and thorium, radioactivity is higher than in sedimentary zones. Consequently, groundwater in granitic regions sometimes exhibits elevated natural radioactivity due to the presence of radium-226 and radon-222.

The objective of this study is to determine the natural radioactivity in potable water using the gamma spectrophotometry technique at the Draria Nuclear Research Center. The method relies on detecting gamma rays using a GeHP detector for natural radioactivity. Simultaneously, the experimental results will be analyzed and compared with existing data.

## المخلص

الإشعاع الطبيعي في المياه يعتمد على الطبيعة الجيولوجية للأراضي التي تمر بها، وزمن الاتصال (عمر المياه)، ودرجة الحرارة، وذوبان العناصر الإشعاعية المواجهة. تُشحن المياه بالعناصر الإشعاعية أثناء مرورها عبر بعض الصخور العميقة. في المناطق الغنية باليورانيوم والثوريوم، يكون الإشعاع أعلى من المناطق الرسوبية. وبالتالي، تظهر مياه الجوف في المناطق الجرانيتية أحياناً إشعاعاً طبيعياً مرتفعاً بسبب وجود الراديوم-226 والرادون-222.

هدف هذا البحث هو تحديد الإشعاع الطبيعي في المياه الصالحة للشرب باستخدام تقنية الطيف الجاما في مركز البحث النووي في درارية . تعتمد هذه الطريقة على اكتشاف الأشعة الجاما باستخدام جهاز كاشف في الوقت نفسه سيتم تحليل النتائج التجريبية و مقارنتها مع البيانات الحالية

## *Remerciement*

*Nous tenons d'abord et avant tout à exprimer notre gratitude envers ALLAH tout puissant pour sa guidance, ainsi que pour le courage, la patience et la santé qu'il nous a accordés tout au long de ces années d'études, et dans la vie en général, nous permettant ainsi de surmonter toutes les difficultés et obstacles rencontrés sur notre chemin .*

*Celui qui ne remercie pas les gens ne remercie pas guère Dieu.*

*Nous exprimons notre profonde gratitude à M. AZLI Tarek, chercheur principal et responsable du laboratoire d'analyse par activation neutronique. Ce travail n'aurait pas pu aboutir sans sa rigueur et ses précieuses orientations. Nous lui sommes reconnaissants pour sa gentillesse, son soutien et le partage de son expérience.*

*Nos hautes considérations s'adressent à Madame Belouadah Naima, Maitre de conférences à l'université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene , d'avoir proposé et suivi ce travail avec beaucoup d'attention et de patience , nous la remercions également pour son soutien moral, aide et précieux conseils .*

*Mes remerciements s'adressent à Madame Cherfi Amel pour l'honneur qu'elle nous fait en présidant le jury d'évaluation de ce travail.*

*Nos vifs remerciements à Madame Taibouni Nabila, Maitre de conférences à l'université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene, d'avoir accepté d'examiner et juger ce modeste travail.*

*Nous remercions aussi tout le personnel du Laboratoire d'analyse par activation neutronique au niveau de département physique nucléaire au CRND en particulier Mr.Bouzidi Soufiane et Mr.Khelili Rachid pour leur aide, support et leur gentillesse .*

*Notre haute considération s'adresse à tous les enseignants qui par leur esprit responsable et leur sens moral, ont contribué de façon concrète à notre formation depuis notre première année universitaire*

## dédicace

*Je dédie ce modeste travail*

*À mes très chères parentes mon père et ma mère*

*Pour leur sacrifice, leur patience, leur amour, leur soutien, et leur encouragement.*

*À mon frère et à ma sœur*

*À toute ma famille*

*À ma chère amie,*

*Ainsi qu'à tous ceux qui sont proches de mon cœur*

*À toute la promotion de physique des Rayonnement*

*Ilhem*

## ***Dédicace***

*Je dédie ce modeste travail a mes très chères parents mon père Moussa et ma mère Zakia pour*

*menera bien mes étude pour leur sacrifice leur amour leur encouragement et leur soutien*

*A mes frères Mohamed Radouane Hamza Oussama et Aymen pour leur soutien*

*A mon chère marie Bilal*

*A mes belles sœur Houda et Soumia*

*Et je n'oublie pas mes meilleures amies Rayane et Maroua*

*Ainsi que a tous ceux qui sont proches de mon cœur*

*A toute la promotion de physique des rayonnements*

*Rania*

# Sommaire

Introduction generale .....	1
Chapitre 1: Généralité sur la radioactivité	
1.1 Introduction .....	3
1.2 Types de désintégrations radioactives .....	3
1.2.1 Radioactivité alpha( $\alpha$ ) .....	3
1.2.2 Radioactivité Béta plus ( $\beta +$ ) .....	4
1.2.3 Radioactivité Béta moins ( $\beta -$ ) .....	4
1.2.4 La radioactivité gamma .....	4
1.2.5 Fission spontanée .....	5
1.3 Sources de radioactivité .....	6
1.3.1 Sources naturelles .....	6
1.3.2 La Radioactivité artificielle .....	7
1.4 Les séries de désintégration des radioéléments .....	7
1.5 Loi de désintégration des noyaux radioactifs .....	9
1.5.1 Désintégration simple .....	9
1.5.2 Filiation radioactive .....	10
1.6 Equilibres radioactifs dans la nature .....	10
1.6.1 Equilibre séculaire .....	11
1.6.2 Equilibre transitoire .....	11
1.6.3 Non équilibre .....	12
1.7 Les radioéléments dans les eaux potables .....	13
1.8 Les effets des radioéléments sur la santé humaine .....	14
<u>Chapitre 2 : Spectrométrie gamma</u>	
2.1 Introduction .....	15
2.2 Mécanisme de l'interaction des gammas avec la matière .....	15
2.2.1 Effet photoélectrique .....	16
2.2.2 Effet Compton .....	17

2.2.3	Création de paires .....	17
2.3	Les différents types de détecteurs .....	18
2.3.1	Les scintillateurs .....	18
2.3.2	Détecteur au Germanium hyper pur (Ge HP) .....	19
2.4	Chaîne de détection gamma du CRND .....	21
2.4.1	Les caractéristiques de l'inspecteur 2000 .....	21
2.4.2	Logiciel Génie 2000 .....	22
2.5	Détermination de l'activité de radionucléide .....	22
<b>Chapitre 3 : Résultats et discussions</b>		
3.1	Introduction .....	25
3.2	Échantillonnage et préparation .....	25
3.3	Analyse qualitative .....	27
3.3.1	Etalonnage en énergie .....	28
3.3.2	Etalonnage en efficacité .....	29
3.3.3	Mesure du bruit de fond .....	31
3.3.4	Limite de détection .....	32
3.4	Analyse quantitative .....	33
3.4.1	Détermination des activités spécifiques des radioéléments .....	33
3.5	Évaluation du risque radiologique .....	36
3.5.1	Détermination de l'activité de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ .....	38
3.5.2	Mesure de l'activité équivalente du radium .....	39
3.5.3	Indice de risque externe et interne .....	40
5.3.1	Indice de risque externe .....	40
5.3.2	Indice de risque interne .....	40
3.6	Débit de dose absorbée .....	40
3.6.1	Indice de niveau représentatif gamma .....	41
3.6.2	Indice de niveau représentatif Alpha .....	41
3.7	Doses annuelles efficaces dues à l'ingestion .....	41
3.8	Discussion des résultats .....	43



Conclusion générale.....47  
Références

## Liste des figures

FIGURE 1.1: RADIOACTIVITE ALPHA.....	3
FIGURE 1.2: RADIOACTIVITE BETA.....	4
FIGURE 1.3: RADIOACTIVITE GAMMA.....	5
FIGURE 1.4: FISSION SPONTANEE.....	6
FIGURE 1.5: CHAINE DE DESINTEGRATION DE L'URANIUM-238.....	8
FIGURE 1.6: CHAINE DE DESINTEGRATION DU THORIUM-232.....	8
FIGURE 1.7: COURBE DE DECROISSANCE RADIOACTIVE.....	9
FIGURE 1.8: ACTIVITE DES ELEMENTS DANS LE CAS D'EQUILIBRE SECLAIRE.....	12
FIGURE 1.9: CAS D'EQUILIBRE TRANSITOIRE.....	12
FIGURE 1.10: CAS NON EQUILIBRE.....	13
FIGURE 2.1: PRINCIPALES INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIERE.....	16
FIGURE 2.2: SCHEMA DE L'INTERACTION PHOTOELECTRIQUE.....	16
FIGURE 2.3: SCHEMA DE L'INTERACTION COMPTON.....	17
FIGURE 2.4: SCHEMA REPRESENTATIF DE LA CREATION DE PAIRE.....	18
FIGURE 2.5: SCHEMA DE PRINCIPE DES DETECTEURS A SCINTILLATION.....	19
FIGURE 2.6. DETECTEUR AU GERMANIUM HYPER PUR UTILISE DANS CRND.....	20
FIGURE 2.7: L'INSPECTEUR 2000.....	21
FIGURE 2.8: SPECTRE DE CALIBRATION D'UNE SOURCE <sup>152</sup> EU OBTENUE PAR GENIE 2000.....	22
FIGURE 2.9: PROCEDURE DE MESURE DE L'ACTIVITE D'UN RADIONUCLEIDE.....	24
FIGURE 3.1: UNE CARTE QUI REPRESENTE LA SOURCE DE DIFFERENTS ECHANTILLONS.....	26
FIGURE 3.2: NETTOYAGE DES MARINELLI AVEC L'ALCOOL.....	27
FIGURE 3.3: COURBE DE CALIBRATION EN ENERGIE.....	28
FIGURE 3.4: SOURCE DE CALIBRATION.....	29
FIGURE 3.5: EVOLUTION DE L'EFFICACITE EN FONCTION DE L'ENERGIE.....	30
FIGURE 3.6: SPECTRE DU BRUIT DE FOND.....	31
FIGURE 3.7: SPECTRE GAMMA DE L'EAU MENERALE DE EL KENTARA.....	34
FIGURE 3.8: SPECTRE GAMMA DE L'EAU MENERALE DE MESSAD.....	35
FIGURE 3.9: SPECTRE GAMMA DE L'EAU MENERALE DE MESTLE.....	35
FIGURE 3.10: SPECTRE GAMMA DE L'EAU DU ROBINET DE CRND.....	36
FIGURE 3.11: CONCENTRATION D'ACTIVITE DES RADIONUCLEIDES.....	44

## **Liste des tableaux**

<i>TABLEAU 1.1: RADIOELEMENTS SOURCES DU RAYONNEMENT TERRESTRE.....</i>	<i>7</i>
<i>TABLEAU 3.1: RAIES GAMMA DE MULTI SOURCES UTILISEES POUR L'ETALONNAGE.....</i>	<i>28</i>
<i>TABLEAU 3.2: RAIES GAMMA DE MULTI SOURCE UTILISEES POUR L'EFFICACITE.....</i>	<i>30</i>
<i>TABLEAU 3.3: COMPTAGE DU BRUIT DE FOND PENDANT 48H.....</i>	<i>31</i>
<i>TABLEAU 3.4: LA LIMITE DE DETECTION DE QUELQUE ELEMENT.....</i>	<i>32</i>
<i>TABLEAU 3.5: LES RESULTATS DES MESURES DE LA RADIOACTIVITE NATURELLE ( EL KANTARA).....</i>	<i>37</i>
<i>TABLEAU 3.6 : LES RESULTATS DES MESURES DE LA RADIOACTIVITE NATURELLE DANS MESSAD.....</i>	<i>37</i>
<i>TABLEAU 3.7: LES RESULTATS DES MESURES DE LA RADIOACTIVITE NATURELLE (NESTLE).....</i>	<i>38</i>
<i>TABLEAU 3.8: LES RESULTATS DES MESURES DE LA RADIOACTIVITE NATURELLE D'EAU DU ROBINET DE CRND .38</i>	
<i>TABLEAU 3.9: ACTIVITE DES RADIONUCLEIDES 226 RA, 232 TH ET 40 K.....</i>	<i>39</i>
<i>TABLEAU 3.10: ACTIVITE, DEBIT DE DOSE ET INDICES DE RISQUE MESURES POUR LES ECHANTILLONS ETUDIES..</i>	<i>41</i>
<i>TABLEAU 3.11: LES FACTEURS DE CONVERSION (CF) DES RADIONUCLEIDES PERTINENTS POUR DIFFERENTES GROUPES D'AGE.....</i>	<i>42</i>
<i>TABLEAU 3.12: DOSES ANNUELLES EFFICACES DUES A L'INGESTION.....</i>	<i>42</i>
<i>tableau 3.13: Comparaison d'activité (Bq/L) de 226Ra, 232Th et 40K.....</i>	<i>45</i>

# Introduction Générale

La radioactivité présente dans les eaux potables est principalement d'origine naturelle. L'eau se charge d'éléments radioactifs lors de son passage au travers de certaines roches profondes. Dans les zones riches en roches contenant des éléments radioactifs (uranium, thorium, ...), la radioactivité des eaux est plus élevée que dans les zones sédimentaires. En particulier, les eaux souterraines des roches granitiques présentent parfois une radioactivité naturelle élevée due à la présence de radium  $^{226}\text{Ra}$  et de radon  $^{222}\text{Rn}$ . Outre les types de roches traversées, la présence de radioactivité va aussi dépendre du temps de contact, de la température, de la solubilité des radioéléments rencontrés...

Des eaux superficielles peuvent aussi présenter une radioactivité importante lorsqu'elles ont pour réservoir des roches anciennes. Ces eaux superficielles sont aussi naturellement radioactives du fait de la présence de potassium (K) naturel et radioactif à l'état dissous (avec un ratio  $^{40}\text{K}/^{39}\text{K}$  de 0,011%). Outre cette radioactivité naturelle, les eaux potables peuvent également être contaminées par des éléments radioactifs artificiels provenant des essais militaires, de l'industrie nucléaire civile et des activités nucléaires diffuses, en particulier les applications médicales.

Notre objectif dans ce travail est d'évaluer les risques radiologiques des eaux minérales et l'eau potable dans différentes régions d'Algérie, par l'utilisation de la technique de spectrométrie gamma au niveau du centre de recherche nucléaire de Draria. Cette technique basée sur l'identification et la quantification des radioéléments naturels émettant des rayonnements gamma présents dans les eaux potables à partir d'un spectre gamma qui représente la distribution des nombres de photons détectés en fonction de leur énergie.

Ce travail comporte différentes parties. La première partie est consacrée à une présentation des notions fondamentales de la radioactivité ainsi que les différents types de la décroissance radioactive et leur état d'équilibre (chapitre1). La deuxième partie présente le principe de la spectrométrie gamma par le détecteur à semi-conducteur, la chaîne de détection en utilisant l'inspecteur et le logiciel Génie 2000 (chapitre2). La dernière partie comporte l'interprétation et la discussion des résultats en les comparant aux normes internationales en vigueur, afin de nous permettre d'interpréter et d'évaluer la concentration d'activité de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ , le

débit de dose équivalent au radium ( $R_{\text{aeq}}$ ), les indices de danger externes et internes dans les eaux potables et la dose annuelle efficace due à l'ingestion (chapitre 3). Ce travail est finalisé par une conclusion générale.

### 1.1 Introduction

La radioactivité est un phénomène naturel découvert en 1898 par Henri Becquerel, où des noyaux atomiques instables se transforment spontanément en d'autres atomes en émettant des particules de matière. Elle peut être mesurée en Becquerels (Bq), correspondant à une désintégration par seconde. La radioactivité peut être naturelle ou artificielle, cette dernière étant obtenue en bombardant des noyaux stables avec des particules chargées ou des neutrons [1]. Dans ce premier chapitre, on s'intéresse à la radioactivité naturelle, à sa définition, aux différents types de désintégration radioactive et à quelques détails nécessaires pour notre travail.

### 1.2 Types de désintégrations radioactives

La radioactivité est un phénomène naturel qui émerge au sein du noyau atomique. Dans un atome radioactif instable, un excès d'énergie provoque sa désintégration en un autre atome. Au cours de ce processus, l'atome libère son excès d'énergie sous forme de rayonnements invisibles, appelés rayonnements ionisants. [2-3]

Il existe 4 types de radioactivité

#### 1.2.1 Radioactivité alpha( $\alpha$ )

Dans le phénomène de la radioactivité alpha, un atome instable se transforme en un état plus stable en émettant une particule chargée alpha. Cette émission alpha est principalement observée dans les noyaux atomiques lourds, avec un numéro atomique  $Z > 82$ .

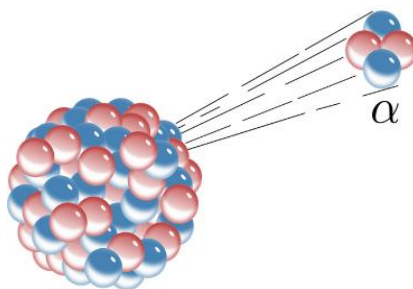
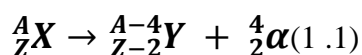


Figure.1.1 :Radioactivité alpha

### 1.2.2 Radioactivité Béta plus( $\beta^+$ )

Dans un noyau instable, un proton se convertit en neutron, entraînant la création d'une particule nécessairement positive appelée positron ou électron positif, qui est éjectée du noyau en même temps qu'un neutrino est émis.[4]



### 1.2.3 Radioactivité Béta moins( $\beta^-$ )

Dans ce mode de désintégration, un noyau père se transforme en un noyau fils en émettant un électron ( $\beta^-$ ) et un antineutrino. Cette forme de désintégration est caractéristique des noyaux instables qui présentent un excès de neutrons.

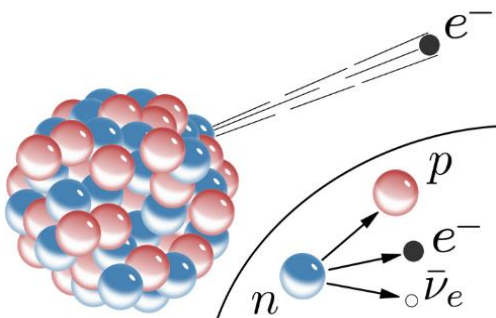


Figure.1.2 : Radioactivité Béta

### 1.2.4 La radioactivité gamma

Le rayonnement gamma est une onde électromagnétique similaire à la lumière visible ou aux rayons X, mais plus énergétique. Il est souvent observé après une désintégration de type alpha ou bêta. Après l'émission de la particule alpha ou bêta, le noyau demeure encore excité, car ses protons et neutrons n'ont pas atteint leur état d'équilibre. Par conséquent, il libère rapidement son excès d'énergie en émettant un rayonnement gamma.[5]

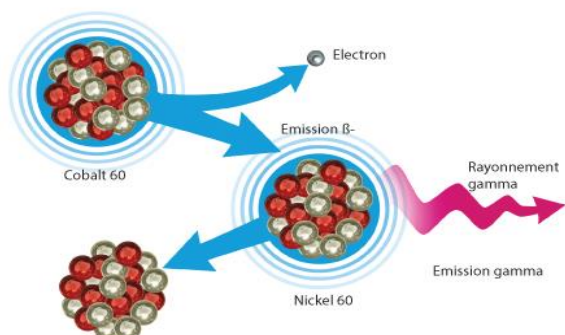


Figure.1.3: Radioactivité gamma

### 1.2.5 Fission spontanée

La fission spontanée est un processus de désintégration radioactive au cours duquel le noyau d'un atome se divise en deux noyaux plus légers. Ce phénomène concerne principalement les noyaux très lourds, avec un numéro atomique  $Z \geq 90$ . [6]

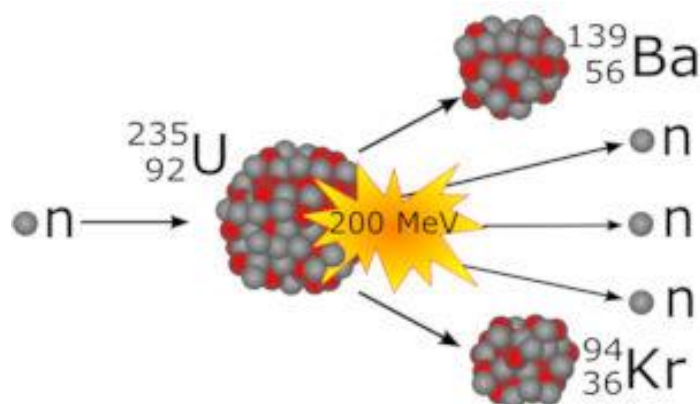


Figure.1.4: Fission spontanée



### 1.3 Sources de radioactivité

#### 1.3.1 Sources naturelles

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

##### 1.3.1.1 Les rayonnements cosmiques

Le rayonnement cosmique provient de différentes sources, principalement du soleil et d'autres phénomènes célestes extérieurs au système solaire. Une fraction de ce rayonnement ionisant atteint l'atmosphère terrestre, où il interagit avec ses composants, déclenchant des réactions nucléaires et générant des substances radioactives. Ces substances sont ensuite absorbées par les êtres humains.

##### 1.3.1.2 Les rayonnements terrestres

La croûte terrestre renferme des radionucléides appelés "primordiaux", qui sont présents depuis la création de la terre. Ces radio-isotopes présentent des demi-vies de l'ordre de centaines de millions d'années (voir tableau 1.1).

**Tableau 1.1 : Radioéléments des sources de rayonnement terrestre.**

Radionucléides primordiaux	Symbole	Demi-vie
Uranium 235	$U^{235}$	$7,04 \times 10^8$ ans
Uranium 238	$U^{238}$	$4,47 \times 10^9$ ans
Thorium 232	$Th^{232}$	$4,47 \times 10^9$ ans
Potassium 40	$K^{40}$	$1,28 \times 10^9$ ans
Rubidium 87	$Rb^{87}$	$4,92 \times 10^{10}$ ans
Lanthanum 138	$La^{138}$	$1,02 \times 10^{11}$ ans
Samarium 147	$Sm^{147}$	$1,06 \times 10^{11}$ ans
Lutéium 176	$Lu^{176}$	$3,78 \times 10^{10}$ ans

#### 1.3.2 La Radioactivité artificielle

Cette radioactivité est engendrée par des activités humaines telles que l'accélération de particules, l'utilisation de réacteurs nucléaires ou encore des expériences en laboratoire et dans le domaine médical. Elle englobe tous les processus de transmutation des radio-isotopes créés

artificiellement en bombardant des éléments stables avec différents types de particules, comme les neutrons, les particules alpha ou les deutons.

Elle est aussi engendrée par les accidents nucléaires produits au fil des décennies (catastrophe de Tchernobyl en 1986, catastrophe de Fukushima en 2011...).

### 1.4 Les séries de désintégration des radioéléments

Lorsqu'un radionucléide se désintègre, il se transforme en un isotope d'un autre élément, créant ainsi une "famille radioactive". Si ce nouvel isotope est également radioactif, il poursuit sa désintégration. Les familles radioactives les plus communes parmi les Matériaux radioactifs Naturels (MRN) sont celles de l'uranium 238 et du thorium 232. Les caractéristiques des radio-isotopes associés à la famille radioactive de l'uranium et du thorium sont présentées dans les figures (1.5) et (1.6) respectivement, incluant les symboles chimiques pour chaque élément et isotope. D'autres radionucléides, tels que  $^{235}\text{U}$ ,  $^{87}\text{Rb}$ ,  $^{138}\text{La}$ ,  $^{147}\text{Sm}$ , et  $^{176}\text{Lu}$ , existent également, mais leur présence dans la nature est si minime que leur contribution à la dose radiologique est négligeable. [7]

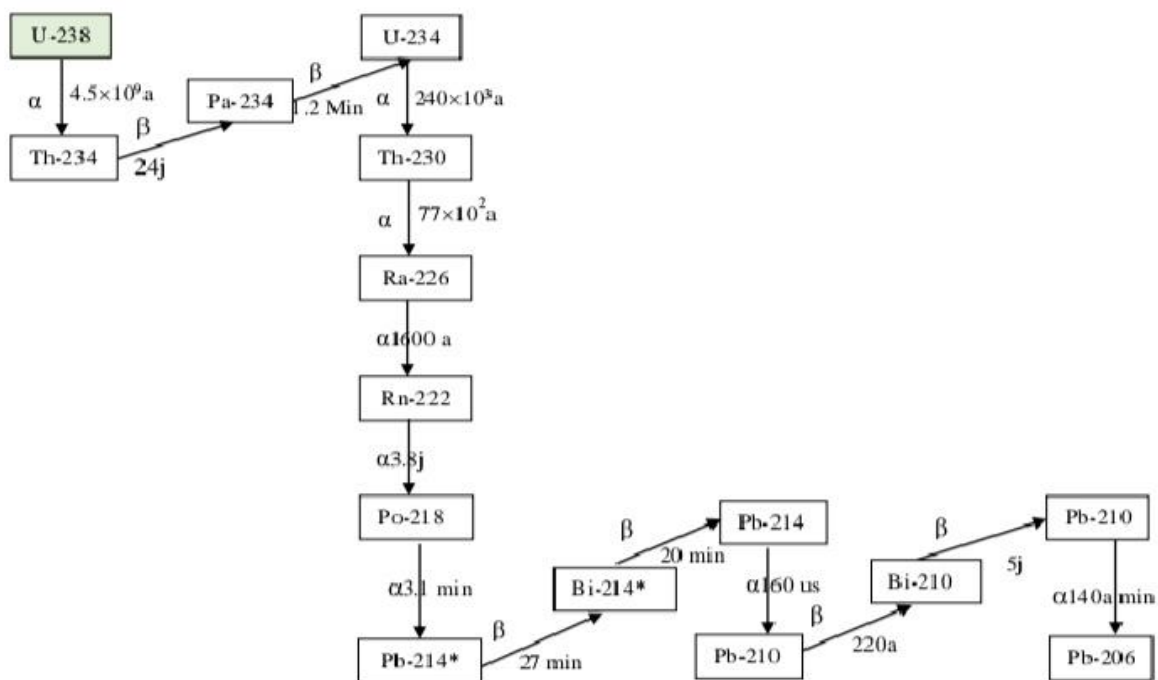


Figure.1.5.Chaine de désintégration de l'Uranium-238

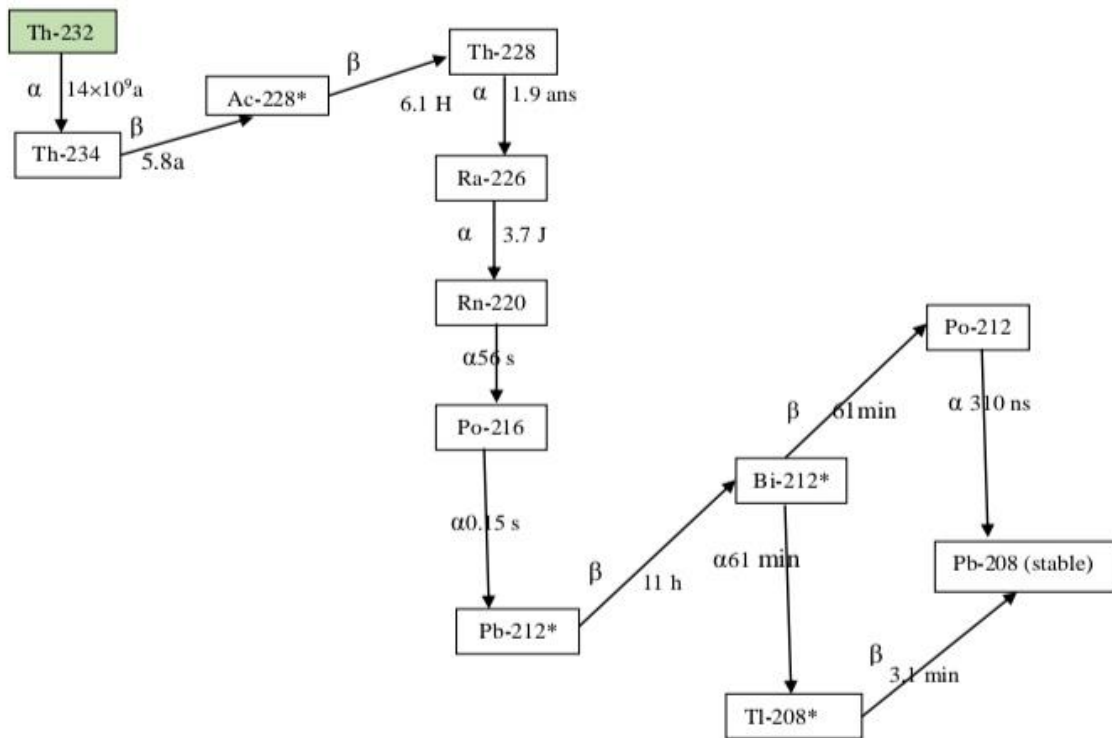


Figure.1.6:Chaîne de désintégration du Thorium-232

## 1.5 Loi de désintégration des noyaux radioactifs

### 1.5.1 Désintégration simple

Lorsqu'on examine à un instant donné  $t$  un nombre  $N$  de noyaux radioactifs, le nombre de noyaux se désintégrant pendant un intervalle de temps élémentaire  $dt$  est proportionnel au nombre de noyaux  $N$ . On a donc :

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad (1.6)$$

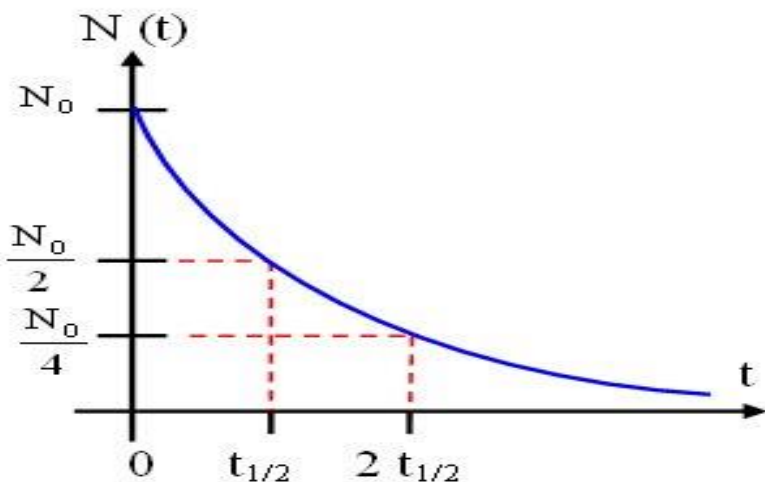
$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1.7)$$

$N$  : Nombre de noyaux radioactifs présents à l'instant  $t$

$N_0$  : Nombre de noyaux initial

$\lambda$  : Constante de décroissance radioactive

Le temps de demi-vie est le temps au bout duquel il ne reste plus que la moitié des noyaux initiaux de l'équation (1.7) il en résulte :  $T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$



**Figure.1.7 :** Courbe de décroissance radioactive

### 1.5.2 Filiation radioactive

Une famille radioactive nommée aussi filiation radioactive, représente une série de désintégrations spontanées d'un isotope instable vers un autre, culminant avec la formation d'un élément chimique dont le noyau est stable. Habituellement, le plomb constitue le produit final stable de ces séries de désintégrations. Parmi les familles radioactives les plus connues, on compte celles de l'Uranium 238 ( $^{238}\text{U}$ ), de l'Uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ ) et du Thorium 232 ( $^{232}\text{Th}$ ), qui génèrent des séquences de descendants radioactifs et forment la majorité des éléments radioactifs naturels sur terre.[8]

Du point de vue mathématique, l'évolution d'une filiation radioactive peut être modélisée en considérant une désintégration en deux étapes, qui conduiront à un élément stable (cas où l'on a uniquement deux désintégrations successives). Un noyau parent A se transforme en un noyau fils B. Au départ, une population initiale de  $N_A(0)$  noyaux radioactifs de type A est supposée, avec une constante radioactive  $\lambda_A$  associée. Si A se désintègre en produisant le noyau B, lui-même radioactif avec une constante radioactive  $\lambda_B$ , la population de noyaux B résultant de la désintégration de A peut être décrite par l'équation suivante :

$$N_A(t) = N_{0A}e^{-\lambda_A t} \quad (1.9)$$

Ainsi, le nombre  $dN_A$  de noyaux présents pendant une variation de temps  $dt$  est donné par l'expression suivante :

$$dN_A(t) = -\lambda_A N_A dt \quad (1.10)$$

$$dN_B(t) = \lambda_A N_A dt - \lambda_B N_B dt \quad (1.11)$$

Cette équation permet de suivre l'évolution temporelle des populations des noyaux A et B au sein de la filiation radioactive.

### 1.6 Equilibres radioactifs dans la nature

Dans la nature, les familles radioactives se concentrent principalement autour de trois éléments lourds dont la demi-vie est de l'ordre du milliard d'années. Les descendants de ces isotopes, présents en très faibles quantités dans les roches, contribuent significativement à la radioactivité naturelle.

À l'intérieur de ces trois familles radioactives, un équilibre s'est établi entre les quantités du noyau initial et celles de ses descendants. Trois situations d'équilibre distinctes peuvent être distinguées.

#### 1.6.1 Equilibre séculaire

L'équilibre séculaire se produit lorsque le temps de demi-vie du noyau père est significativement plus long que celui du noyau fils, ce qui signifie que l'activité du noyau père est nettement inférieure à celle du noyau fils. Cet état revêt une importance particulière dans notre contexte, car il permet de déterminer l'activité du noyau parent à longue période à partir

de l'activité des noyaux fils tel que  $T_A \gg T_B$ ,  $\lambda_A \ll \lambda_B$

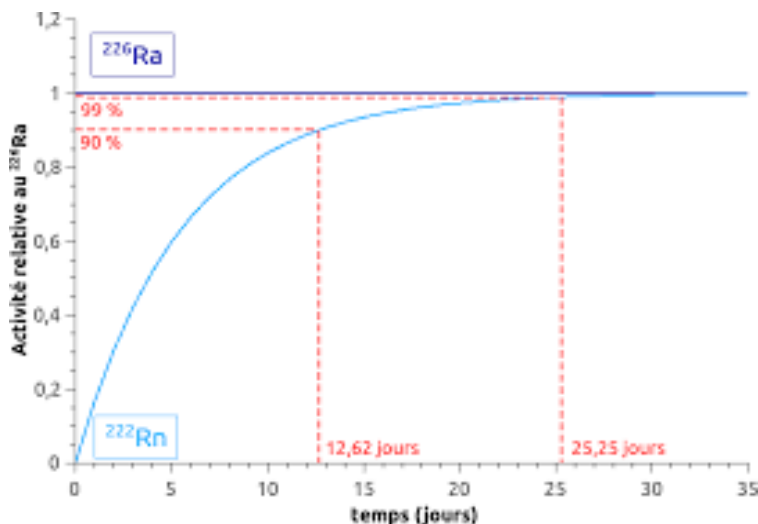


Figure.1.8 : Activité des éléments dans le cas de l'équilibre séculaire

### 1.6.2 Equilibre transitoire :

Dans ce cas, la demi-vie du noyau parent est légèrement supérieure à celle du descendant. L'activité du produit de désintégration du fils augmente pendant environ deux fois sa demi-vie, puis les activités du père et du fils atteignent des niveaux comparables avant de diminuer selon une tendance similaire.  $T_A > T_B$

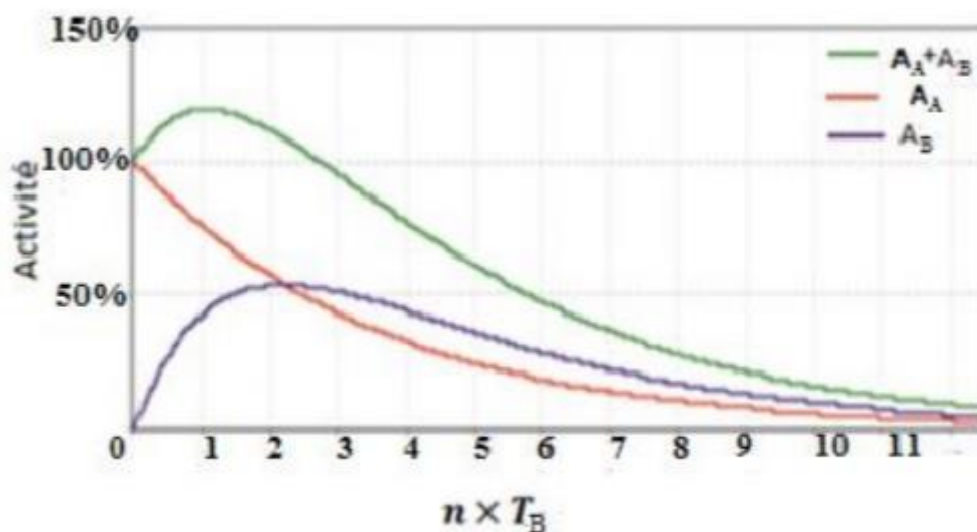


Figure.1.9 : Cas de l'équilibre transitoire

### 1.6.3 Non équilibre

Lorsque la demi-vie  $T_A$  du nucléide parent est beaucoup plus courte que celle du descendant,  $\lambda_A \gg \lambda_B$  [6]

$$\text{On aura alors : } N_B(t) = N_A(0) \frac{\lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) \quad (1.12)$$

$$N_B(t) = N_A(0) e^{-\lambda_B t} \quad (1.13)$$

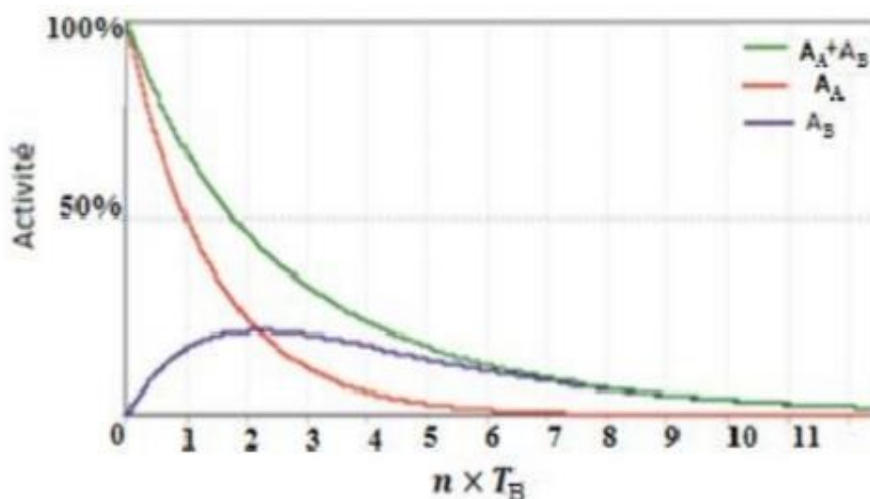


Figure.1.10 : Cas de non équilibre

### 1.7. Les radioéléments dans les eaux potables

Les principaux radioéléments présents dans les eaux potables sont d'origine naturelle :

**Uranium (U)** : On trouve deux isotopes de l'uranium dans l'eau potable : l'uranium 238 (U-238) et l'uranium 234 (U-234). L'uranium 238 est l'isotope parent de la série de désintégration de l'uranium, qui comprend le radium 226 et le radon 222.

**Radium (Ra)** : Le radium 226 (Ra-226) est un produit de désintégration de l'uranium 238. Il est présent dans les roches et les sols granitiques et peut s'infiltrer dans les eaux souterraines. Le radium 226 est un émetteur alpha puissant, ce qui signifie qu'il peut libérer des particules alpha qui peuvent endommager les cellules.

**Radon (Rn)** : Le radon 222 (Rn-222) est un gaz radioactif qui est un produit de désintégration du radium 226. Il peut s'infiltrer dans les maisons à partir du sol et s'accumuler dans l'air intérieur. Le radon 222 est la principale cause du cancer du poumon chez les non-fumeurs.

**Potassium (K) :** Le potassium 40 (K-40) est un radio-isotope naturel présent dans tous les organismes vivants. Il est également présent dans les roches et les sols, et peut s'infiltrer dans les eaux souterraines. Le potassium 40 est un émetteur bêta, ce qui signifie qu'il peut libérer des particules bêta qui peuvent endommager les cellules. [9]

### 1.7 Les effets des radioéléments sur la santé humaine :

L'exposition aux radioéléments présents dans l'eau potable peut avoir divers effets sur la santé humaine. Ces effets comprennent l'augmentation du risque de cancer, notamment du poumon en raison de l'inhalation de radon, du cancer des os lié à l'exposition au radium et du cancer du rein résultant de l'exposition à l'uranium. De plus, des études suggèrent que des niveaux élevés de radium et d'uranium peuvent affaiblir le système immunitaire, augmentant ainsi la susceptibilité aux infections et aux maladies. Certains radioéléments, comme le radium, ont la capacité de s'accumuler dans les os et les tissus mous, ce qui peut entraîner des dommages cellulaires et affecter le fonctionnement des organes internes. De plus, l'exposition aux radioéléments peut avoir des effets sur la reproduction, y compris des anomalies congénitales, des troubles de la fertilité et des complications pendant la grossesse. Il est essentiel de noter que les effets sur la santé peuvent être à la fois à court terme et à long terme, et qu'ils dépendent de la dose absorbée et de la sensibilité individuelle. [10-11]



## 2.1 Introduction

Depuis la découverte de la radioactivité, il a été nécessaire de développer des instruments et des techniques pour détecter d'abord ces rayonnements nucléaires, puis mesurer leur intensité et leur énergie. Les principes de détection reposent tous sur des phénomènes d'interaction avec la matière. Mesurer l'activité d'une source radioactive n'est possible que si l'on connaît sa composition.

La spectrométrie gamma, une technique nucléaire largement utilisée, permet de détecter les éléments radioactifs en mesurant l'énergie du rayonnement gamma.

Dans ce chapitre nous parlerons des interactions gammas avec la matière, des différents types de détecteurs et de la chaîne de détection gamma du CRND.

## 2.2 Mécanisme de l'interaction des gammas avec la matière

Les interactions principales entre les photons et la matière sont : l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la création de paires électron-positron (Figure 2.1).

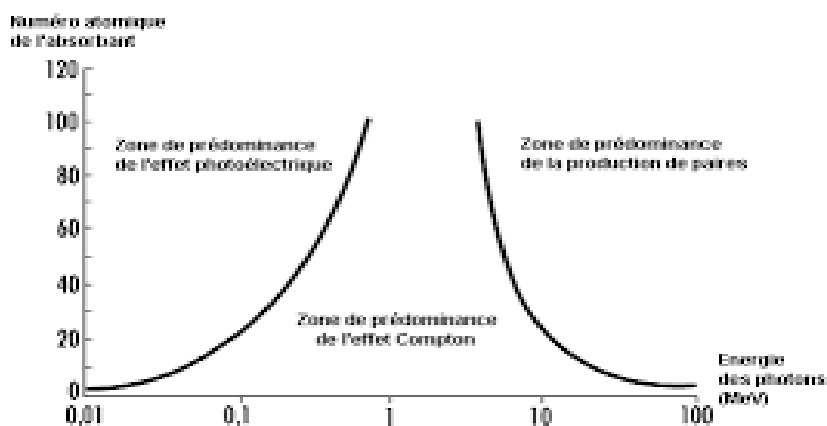


Figure 2.1 : Prédominance des principales interactions des photons avec la matière

### 2.2.1 Effet photoélectrique

Dans le phénomène de photoélectricité, les photons incidents interagissent avec les électrons atomiques et sont ensuite totalement absorbés. Il est probable que la particule de photoélectron émise provienne de la couche K des atomes cibles. L'énergie cinétique de l'électron émis est [12-13] :

$$E_c = h\nu - E_i \quad (2.1)$$

$E_i$  : Energie de liaison ,  $h$  : constante de Planck ,  $\nu$ : fréquence du photon

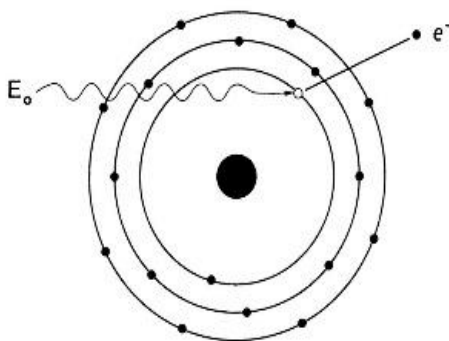


Figure 2.2 : Schéma de l'interaction photoélectrique

### 2.2.2 Effet Compton

Dans la diffusion incohérente ou effet Compton, le rayonnement gamma incident est dévié avec un angle( $\theta$ ) par rapport à la direction d'origine. Une partie de son énergie et de sa quantité de mouvement est transférée à l'électron de recul. En raison de la variation de l'angle de diffusion, l'énergie du photon diffusé peut être écrite comme suit:

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E(1 - \cos\theta)}{m_0c^2}} \quad (2.2)$$

$E'$  : l'énergie du photon diffusé,  $E$  : l'énergie du photon incident,  $m_0$  : la masse de l'électron  $\theta$  : angle de diffusion

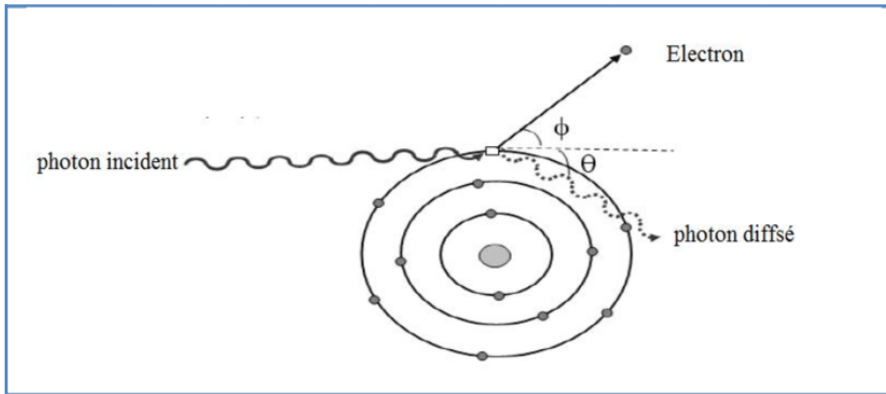


Figure 2.3 :Schéma de l'interaction Compton

### 2.2.3 Création de paires

Lorsque le photon incident interagit avec les nucléons de l'atome dans le champ coulombien du noyau, cela entraîne la création d'une paire d'électrons et de positrons. Ce processus nucléaire est réalisable lorsque l'énergie du photon incident atteint ou dépasse 1,022 MeV

$$E_c = E_{ph} - m_0c^2 \quad (2.3)$$

$E_c$  :L'énergie cinétique de l'électron ,  $E_{ph}$  :l'énergie du photon incident

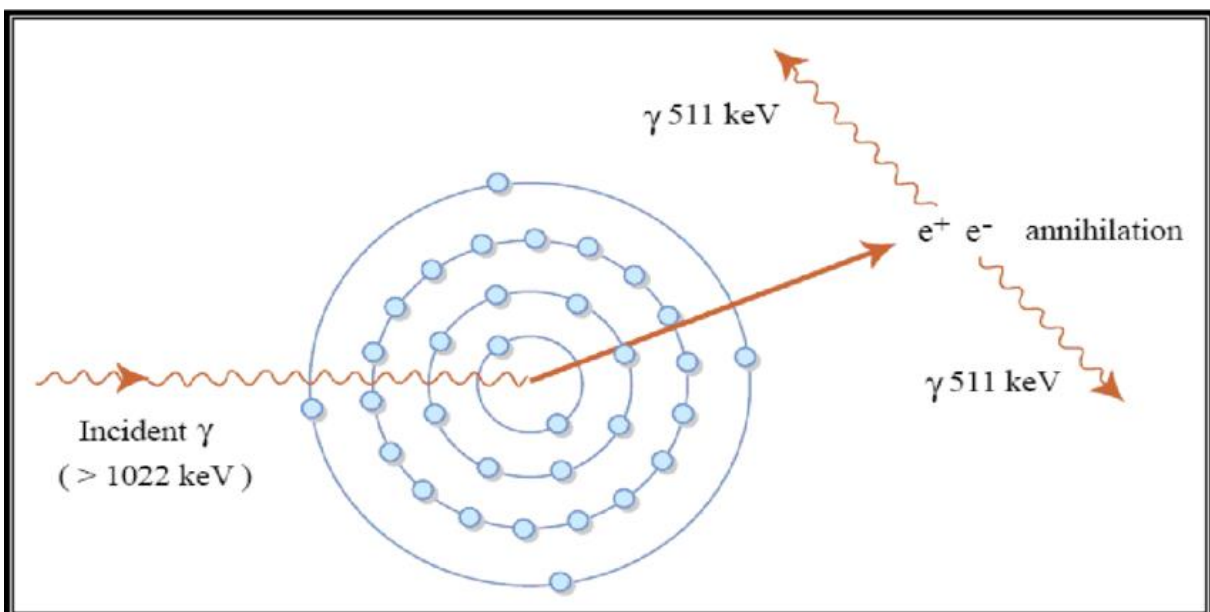


Figure 2.4 : Schéma représentatif de la création de paire

## 2.3 Les différents types de détecteurs

La détection de la radioactivité repose sur l'interaction entre le rayonnement et la matière. Cela implique la conversion de l'énergie déposée dans le détecteur en un signal électrique mesurable. En spectrométrie gamma, les principaux détecteurs utilisés sont les scintillateurs et les semi-conducteurs [14].

### 2.3.1 Les scintillateurs

Lorsque le rayonnement interagit avec un cristal de scintillation, il peut promouvoir un électron de la bande de valence à la bande de conduction, créant ainsi un vide dans la bande de valence. Dans les cristaux purs comme le NaI, cet électron ne revient pas efficacement à la bande de valence, produisant ainsi un photon dans un processus appelé scintillation. Cependant, les photons émis ont souvent une énergie trop élevée pour être visibles. Pour améliorer la probabilité d'émission de photons visibles, des impuretés telles que le thallium sont souvent ajoutées au scintillateur, créant ainsi des états d'énergie permettant à l'électron de retourner à la bande de valence avec une émission de photon visible. Le NaI(Tl) est un matériau de scintillation efficace mais fragile et sensible à l'humidité. La collecte efficace de la lumière provenant du cristal est essentielle et est améliorée par l'utilisation de réflecteurs, comme la poudre de MgO, et le couplage direct avec le tube photomultiplicateur. Ce dernier est composé d'une cathode photosensible convertissant les photons en photoélectrons, et d'un tube multiplicateur où les électrons sont amplifiés par émission secondaire à partir de dynodes [15].

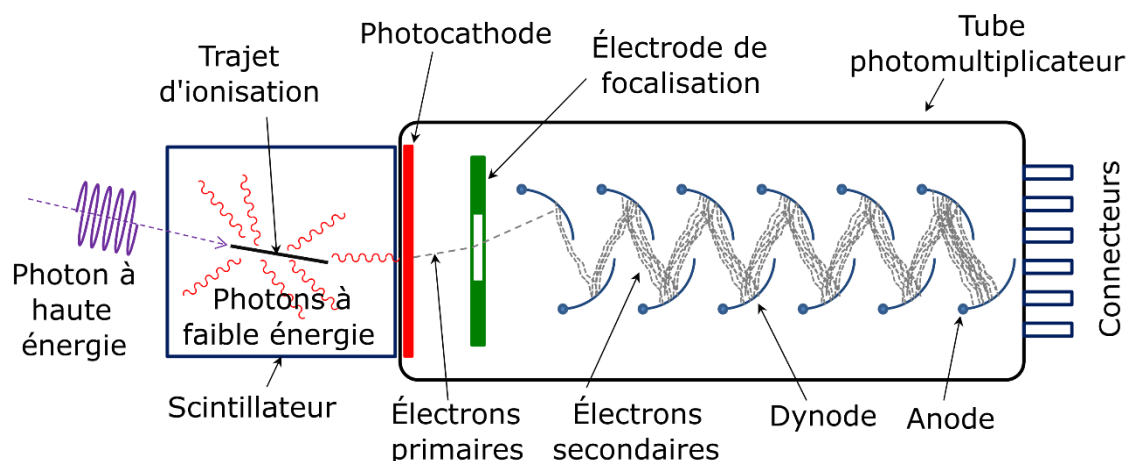


Figure 2.5 : Schéma principe des détecteurs à scintillation

### 2.3.2 Détecteur au Germanium hyper pur (Ge HP)

Le détecteur Germanium GeHP est composé d'un cristal de germanium hyper pur, enveloppé dans une structure en plomb pour atténuer les rayonnements ionisants externes tels que les rayons cosmiques, et encadré dans une cage de Faraday en cuivre. Un cryostat maintient la température du cristal basse, réduisant ainsi l'agitation thermique pour limiter le bruit de fond et stabiliser le cristal.

L'avantage du germanium par rapport aux scintillateurs réside dans sa résolution énergétique exceptionnelle, une caractéristique cruciale pour les expériences impliquant un grand nombre de raies spectrales. [13]

Trois types de configuration de germanium hyper-pur peuvent être distingués.[13]

### 2.3.3 Détecteur planaire

Présenté sous forme d'un disque de germanium disponible en différents diamètres, doté d'un contact électrique sur les surfaces planes. Une fine fenêtre en carbone ou en béryllium est ajoutée à l'avant du détecteur pour collecter les radiations de faible énergie. Ce type de géométrie peut être utilisé avec succès, offrant une résolution énergétique et une efficacité élevées.

### 2.3.4 Détecteur coaxial

Organisé sous forme de cylindre creux, plus grand que la configuration plane. Ses principales caractéristiques comprennent une haute résolution énergétique, une bonne efficacité de détection et une adaptabilité aux gammes d'énergies faibles.

### 2.3.5 Détecteur puits

La même configuration qu'un détecteur coaxial, mais à l'envers. Ce type est adapté aux niveaux de radioactivité faibles, où l'efficacité de détection est de  $4\pi$  par ordre de grandeur et pour des quantités d'échantillon réduites. Il est extrêmement sensible à l'effet de sommation.



Figure 2.6 :Détecteur au Germanium hyper pur (Ge HP) utilisé dans CRND

## 2.4 Chaîne de détection gamma du CRND

### L'Inspecteur 2000

L'inspecteur 2000 est un ensemble intégré comprenant l'alimentation haute tension, l'amplificateur linéaire et l'analyseur multi-canal. Il est basé sur la technologie de traitement de signal numérique (Digital Signal Processing, DSP). Il est surtout utilisé avec des détecteurs de types Ge (HP) et NaI



Figure 2.7 :L'inspecteur 2000

A l'opposé des électroniques conventionnelles qui numérisent le signal en fin de chaîne, l'Inspecteur2000 effectue cette opération sur le signal issu du préamplificateur, donc en tête de chaîne, il résulte une amélioration de la stabilité de la précision et de la reproductibilité des mesures. L'utilisation d'un DSP améliore les performances globales de l'acquisition [16].

### 2.4.1 Les caractéristiques de l'inspecteur 2000

L'inspecteur est caractérisé par les avantages suivants :

- Ultra-compact et ultra-léger .
- Alimentation par batterie au lithium 7.2V (Autonomie : 10H avec le détecteur GeHp, 12 heures avec le détecteur NaI) ou chargeur externe, ce qui permet de faire des analyses in situ.
- Connexion avec l'ordinateur par câble série RS-232 ou USB.
- Mode oscilloscope numérique intégré pour l'assistance au paramétrage.

L'ensemble est contrôlé au moyen du logiciel Génie 2000 qui lui confère une excellente souplesse d'utilisation sur le terrain.

### 2.4.2 Logiciel Génie 2000

Le logiciel Genie2000 permet de visualiser en temps réel la sortie de l'inspecteur, à savoir un spectre avec en abscisse le numéro de canal et en ordonnée le nombre de coups dans ce canal.

La figure (2.8) représente un spectre de calibration d'une source  $^{152}\text{Eu}$  obtenue par le logiciel Génie2000.

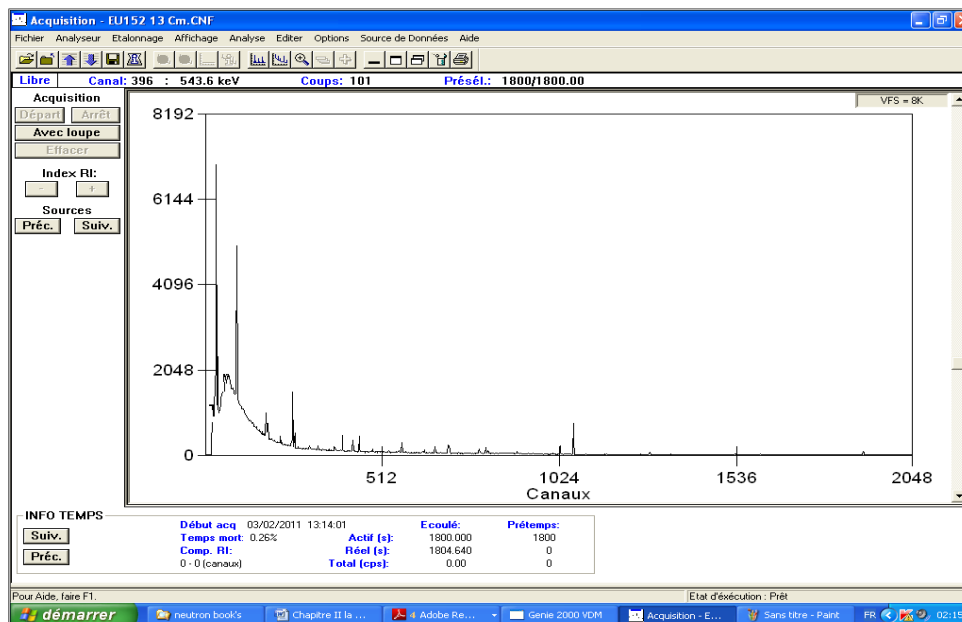


Figure 2.8 : Spectre de calibration d'une source  $^{152}\text{Eu}$  obtenue par Génie 2000

L'analyse de spectres, c'est-à-dire le calcul de la surface des pics ne peut être possible que si l'étalonnage en énergie est réalisé une fois, ceci effectué l'analyse sort une liste de pics avec leurs surfaces respectives.

### 2.5. Détermination de l'activité des radionucléides naturels

L'analyse de la radioactivité naturelle environnementale est compliquée par la difficulté de réaliser des mesures précises sur des échantillons complexes (solides ou liquides) avec une très faible radioactivité. Pour améliorer la détection, il est nécessaire d'augmenter l'efficacité de détection en :

- Réduisant le bruit de fond (par blindage, anti-Compton, etc.)
- Augmentant le volume du cristal du détecteur
- Réduisant la distance entre la source et le détecteur
- Augmentant le volume de l'échantillon
- Augmentant l'angle d'incidence entre l'échantillon et le détecteur

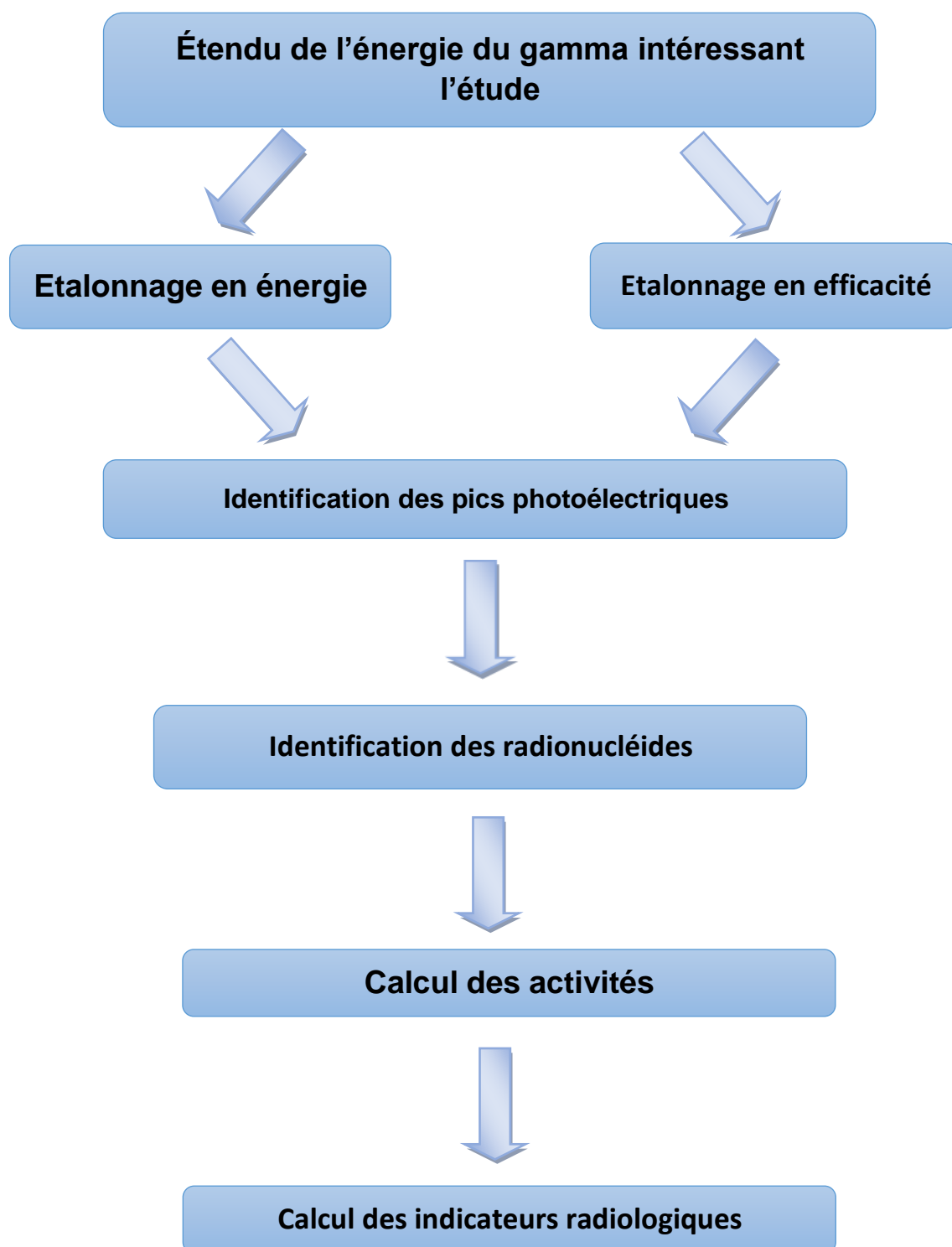
Cependant, réduire la distance source-détecteur accroît l'effet de coïncidence des pics sommes, surtout pour des sources à désintégration complexe émettant plusieurs rayonnements X ou gamma en cascade. L'augmentation du volume de l'échantillon est aussi utile pour mesurer des échantillons de faible activité en augmentant l'angle d'incidence de



rayonnements, mais cela peut entraîner une auto-absorption des rayonnements au sein de l'échantillon affectant les résultats quantitatifs.

Sans mesures correctives appropriées, l'auto-absorption et l'effet de coïncidence des pics sommes peuvent entraîner une surestimation ou une sous-estimation des comptages des pics photoélectriques, faussant ainsi l'efficacité de détection en fonction de l'énergie et les mesures quantitatives de la radioactivité.

Pour accomplir l'analyse d'un échantillon environnemental, il est recommandé de suivre les étapes suivantes :



**Figure 2.9:** Etapes d'analyse des échantillons avec la spectrométrie gamma

### 3.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la partie expérimentale réalisée au niveau du laboratoire d'analyse par activation neutronique du centre de recherche nucléaire de Draria (CRND -COMENA) dans le but d'identifier les radioéléments naturels présents dans les eaux potables dans plusieurs régions d'Alger. Pour cela, nous avons utilisé la spectrométrie gamma avec le détecteur Ge(HP) pour l'identification des radionucléides. Les mesures du bruit de fond, la limite de détection, les activités des échantillons ainsi que les calculs du débit de dose absorbée, les indices de risque interne et externe, et la mesure de l'activité du radium équivalent seront également présentés.

### 3.2. Échantillonnage et préparation

L'origine de chaque échantillon dans différentes régions est :

- 1- Nestlé pure life - Blida (eau de source )
- 2- Messad - El Djelfa (eau de source)
- 3- El Kantara – Biskra ( eau de source )
- 4- Eau du robinet –CRND-Alger



Figure.3.1: Une carte qui représente les sources des différents échantillons.

Étape 1 : Le stockage des échantillons.

**Étape 2 :** Nettoyage des Marinelli.

Pour avoir une meilleure détection, on utilise un récipient de type Marinelli type I qui assurera une géométrie de  $4\pi$ . Ces dernières sont lavées de l'alcool afin d'éviter la présence d'impuretés.



**Figure.3.2 :** Nettoyage des Marinelli avec l'alcool.

**Étape 3:** Remplissage de chaque Marinelli avec un volume d'eau minérale et potable

**Étape 4:** Scellage des Marinelli à l'aide de para film :

L'évitement des fuites du gaz Radon ( $^{222}\text{Rn}$ ) est fait par le scellage des Marinelli pendant 21 jours pour atteindre l'équilibre séculaire.

**Étape 5 :** Comptage et détection.

### 3.3. Analyse qualitative

Pour analyser les échantillons, la chaîne de détection doit être bien calibrée en énergie et en efficacité.

### 3.3.1. Etalonnage en énergie

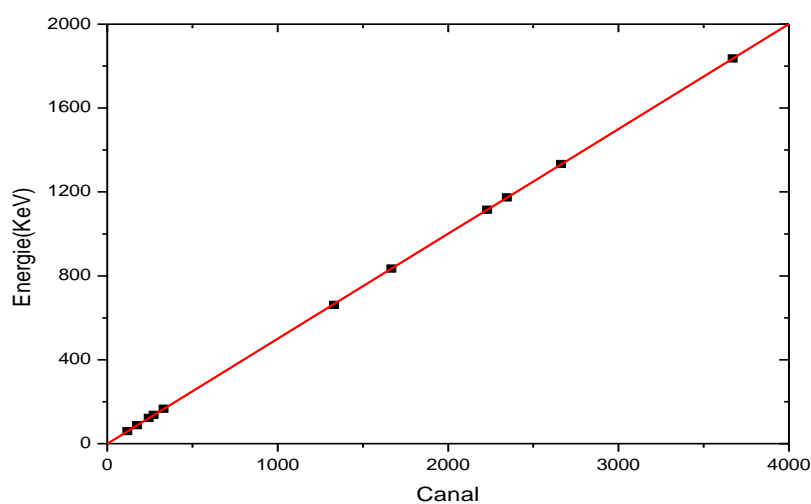
La calibration en énergie est une étape essentielle pour convertir les canaux de mesure en unités énergétiques. Pour ce faire, il est indispensable d'établir une correspondance entre les énergies des photons gamma émis par une source de référence et les canaux appropriés (voir tableau 3.1).

La relation entre l'énergie et le numéro du canal suit une forme mathématique de type :  $E = aC + b$  (3.1)

Où E représente l'énergie, C le numéro du canal, et a et b sont des constantes.

**Tableau 3.1:** Raies gamma de multi sources utilisées pour l'étalonnage

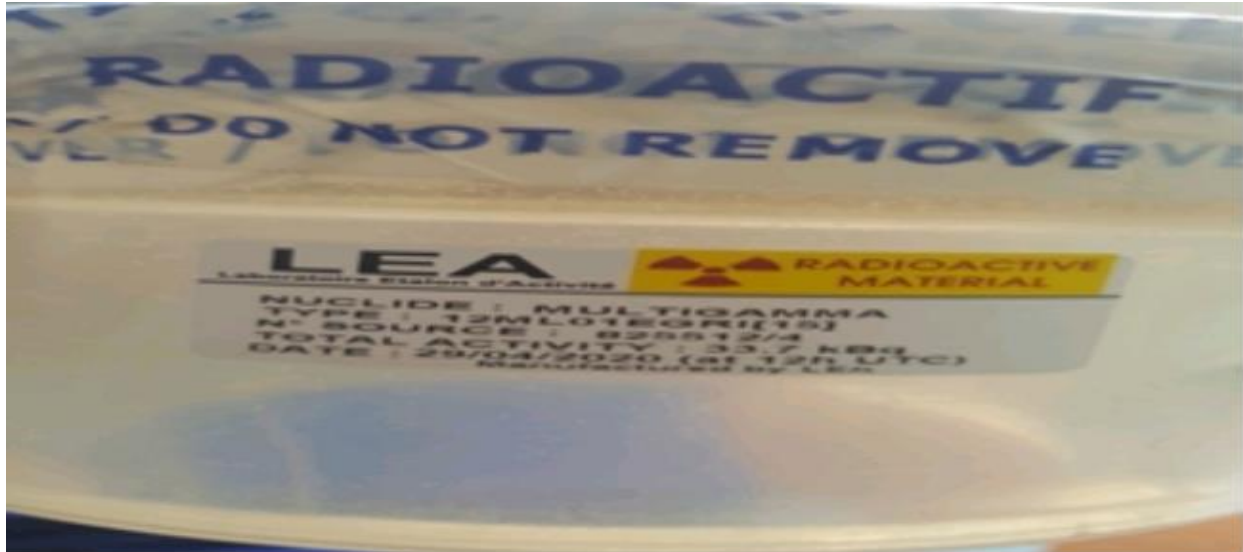
Elément	énergie	Canal
$Am^{241}$	59.26	118.35
$CD^{109}$	88.04	175.91
$CO^{57}$	121.89	243.60
$CO^{57}$	136.47	272.75
$CE^{139}$	165.65	331.11
$Cs^{137}$	661.32	1322.14
$MN^{54}$	834.58	1668.45
$ZN^{65}$	1115.45	2229.74
$CO^{60}$	1173.17	2345.06
$CO^{60}$	1332.61	2663.62
$Y^{88}$	1836.60	3670.26



**Figure 3.3:** Courbe de calibration en énergie.

### 3.3.2. Etalonnage en efficacité

Le rendement de l'installation de mesure ne dépend pas uniquement de l'énergie des photons détectés, mais aussi de la configuration de la géométrie source-détecteur utilisée. Afin d'évaluer sa variation, il est nécessaire de calibrer la chaîne de mesure avec une source multi-gamma ayant une configuration similaire à celle de l'échantillon (figure 3.4).



**Figure 3.4:** Source de calibration

Soit  $N$  le taux de comptages d'un photo-pic du spectre obtenu pendant un temps de comptage  $t_c$ , l'efficacité du détecteur à l'énergie  $E_\gamma$  est donnée par :

$$\varepsilon_\gamma = \frac{N}{AI_\gamma(1 - e^{-\lambda t_c})} \quad (3.2)$$

Où  $A$  est l'activité de la source au début du comptage et  $I_\gamma$  est l'intensité de la raie gamma.  $\varepsilon(E_\gamma)$  peut se mettre sous la forme si  $t_c \ll T_{1/2}$  :

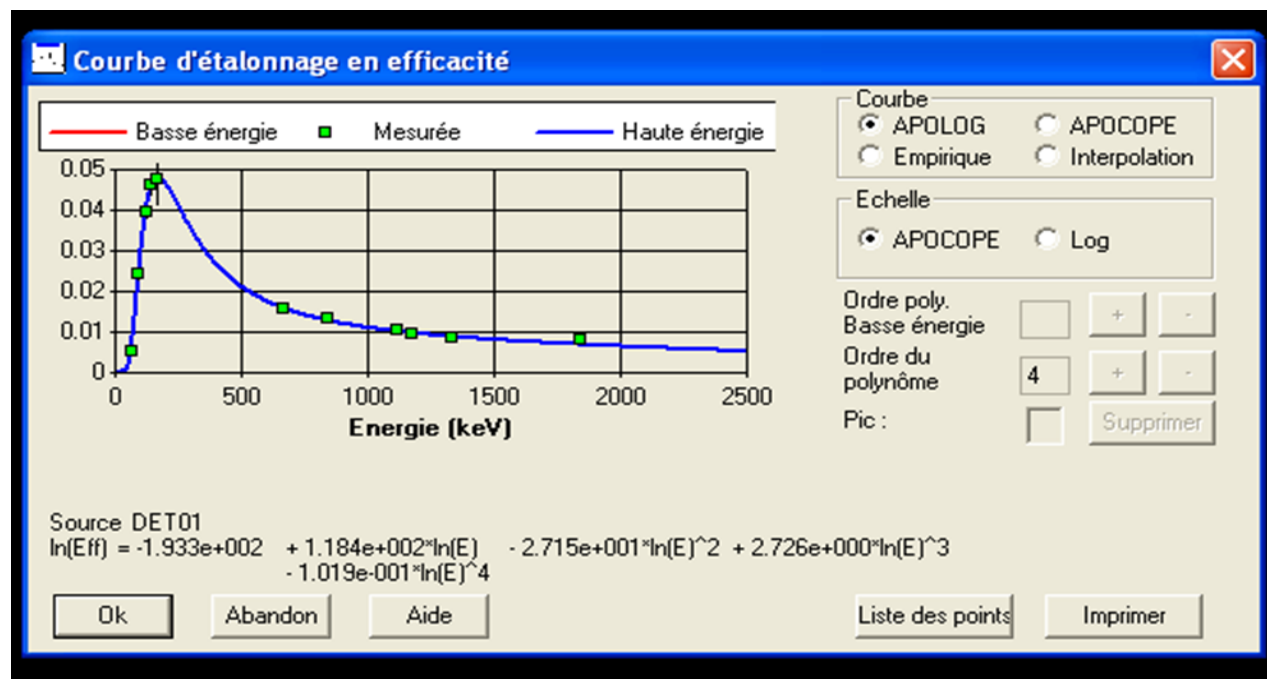
$$\varepsilon_\gamma = \frac{N}{AI_\gamma t_c} \quad (3.3)$$

## Chapitre 3 Résultats et discussions

La figure (3.5) illustre l'étalonnage en efficacité (ou rendement), effectué avec une multi source présentant les mêmes dimensions et la même forme que l'échantillon voir aussi le tableau 3.2.

**Tableau 3.2 :** Raies gamma de multi source utilisées pour l'efficacité.

Elément	Energie (keV)	Efficacité
$Am^{241}$	59.54	0.00498
$Cd^{109}$	88.04	0.02251
$Co^{57}$	122.06	0.04058
$Co^{57}$	136.47	0.04468
$Ce^{139}$	165.85	0.04784
$Cs^{137}$	661.65	0.01571
$Zn^{65}$	1115.52	0.00986
$Co^{60}$	1173.22	0.00947
$Co^{60}$	1332.49	0.00858
$\gamma^{88}$	1836.01	0.00666



**Figure 3.5:** Evolution de l'efficacité en fonction de l'énergie

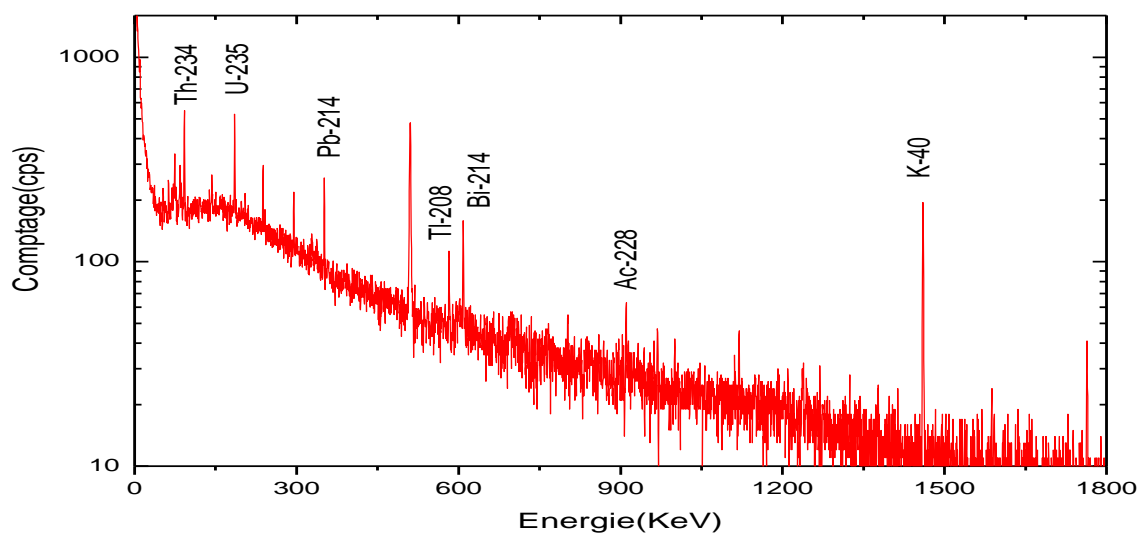


### 3.3.3. Mesure du bruit de fond

Le bruit de fond gamma a été déterminé avec un bécquer Marinelli vide. Celui-ci est posé sur le détecteur de la même manière que les échantillons. Le spectre obtenu est présenté sur la figure (3.6), le comptage du bruit de fond sera soustrait du comptage des radionucléides présents dans l'échantillon pour obtenir un comptage corrigé pour chaque élément. Le tableau (3.3) illustre le comptage du bruit de fond.

**Tableau 3.3 :** Comptage du bruit de fond pendant 48h

Radionucléide	Energie (keV)	$I_\gamma$	Bruit de fond Net	Erreur $\Delta$ Net
$Th^{234}$	92.80	0.03	382	16.64
$U^{235}$	143.76	0.105	195	28.76
$Pb^{214}$	351.51	0.391	512	14.07
$Tl^{208}$	583.14	0.86	218	15.34
$Bi^{214}$	609.20	0.460	337	13.39
$Ac^{228}$	911.02	0.29	137	21.79
$K^{40}$	1461.43	0.107	744	5.44



**Figure 3.6 :** Spectre du bruit de fond

### 3.3.4. Limite de détection

Les limites de détection servent comme moyen d'estimation du niveau de confiance des mesures effectuées. Les limites sont estimées à partir de la relation suivante [17]:

$$LMD = \frac{LD}{\varepsilon \times v \times I_{\gamma}} \quad (3.4)$$

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

**LD =**

$$1.645 \times \frac{\sqrt{N_B}}{T_c} \quad (3.5)$$

Avec :

$N_B$  : Bruit de fond sous le pic d'intérêt.

$T_c$  : Temps réel de comptage.

$v$  : volume par litre (V=0.6 litre)

$I_{\gamma}$  : la probabilité

$\varepsilon$  : efficacité de détection pour une énergie E donnée

Le tableau (3.4) montre la limite de détection calculé pour des radionucléides naturels

**Tableau 3.4** : la limite de détection de quelque élément.

Radionucléide	Energie (keV)	Bruit de fond (cps)	Efficacité	$I_\gamma$	LD	LMD (Bq/l)
$Th^{234}$	92.80	91	0.027	0.03	0.00018	0.50043
$U^{235}$	143.76	73	0.049	0.105	0.00021	0.03692
$Pb^{214}$	351.51	226	0.033	0.371	0.00017	0.04479
$Tl^{208}$	583.14	41	0.019	0.86	0.00011	0.06568
$Bi^{214}$	609.20	174	0.018	0.460	0.00014	0.01844
$Ac^{228}$	911.02	48	0.012	0.29	0.00013	0.05661
$K^{40}$	1461.43	215	0.008	0.107	0.00025	0.59983

### 3.4 Analyse quantitative : Détermination des activités des radioéléments

Les activités spécifiques des radioéléments ont été calculées en appliquant la formule suivante [18] :

$$A_s = \frac{N_{détc} - N_{BF}}{(\epsilon_E \times \frac{\Omega_E}{\Omega_s}) \times I_\gamma \times t_c \times v} \quad (3.6)$$

Avec :

- $A_s$  : Activité spécifique de radioélément.
- $N_{détc}$  : le nombre de coups enregistrés sur le pic.
- $N_{BF}$  : comptage de bruit de fond.
- $\epsilon_E$  : efficacité de détection pour une énergie E donnée.
- $I_\gamma$  : l'intensité .
- $t_c$  : temps de comptage exprimé en seconde.
- $v$  : volume de l'échantillon.
- $\Omega_E$  : l'angle solide situé entre l'échantillon et le détecteur.

## Chapitre 3 Résultats et discussions

- $\Omega_s$ : l'angle solide situé entre la source radioactive de calibration et le détecteur  
 $(\epsilon_E \times \frac{\Omega_E}{\Omega_s})$  : 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)  $\Omega_E = \Omega_s$

Finalement, la formule devient :

$$A_s = \frac{N_{net}}{\epsilon_E \times I_\gamma \times t_c \times v} \quad (3.7)$$

$N_{net}$  est la soustraction entre le nombre de coups ( $N_{détc}$ ) détecté et le bruit de fond des aires des pics ( $N_{BF}$ ), elle est donnée par la relation suivante :

$$N_{net} = N_{détc} - N_{BF} \quad (3.8)$$

L'incertitude sur l'activité sera donc :

$$\Delta A_s = A_s \sqrt{\left(\frac{\Delta N_{détc}}{N_{détc}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta t_c}{t_c}\right)^2 + \left(\frac{\Delta \epsilon_E}{\epsilon_E}\right)^2 + \left(\frac{\Delta v}{v}\right)^2 + \left(\frac{\Delta I_\gamma}{I_\gamma}\right)^2} \quad (3.9)$$

Avec :  $\Delta t_c = \Delta \epsilon_E = \Delta v = \Delta I_\gamma = 0$

$$\text{Donc : } \Delta A_s = A_s \frac{\Delta N_{det}}{N_{det}} \quad (3.10)$$

Les figures suivantes montrent le comptage des rayonnements gammas dans le but de déterminer les activités spécifiques pour les échantillons d'eau de source et d'eau du robinet

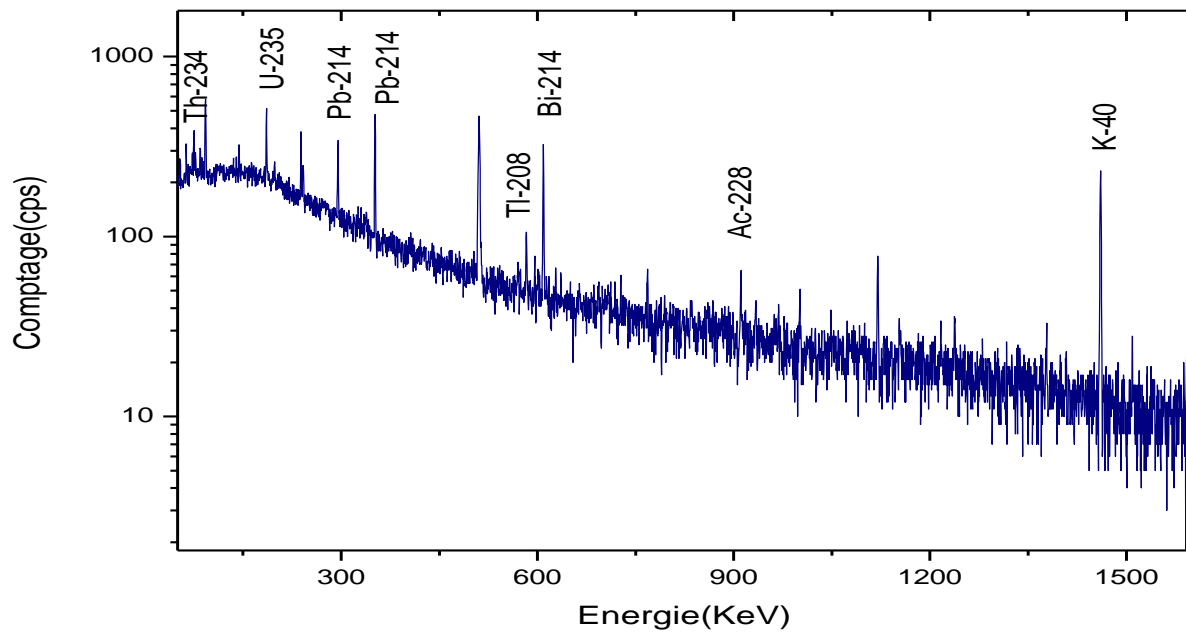


Figure 3.7 : Spectre gamma de la source EL Kentara

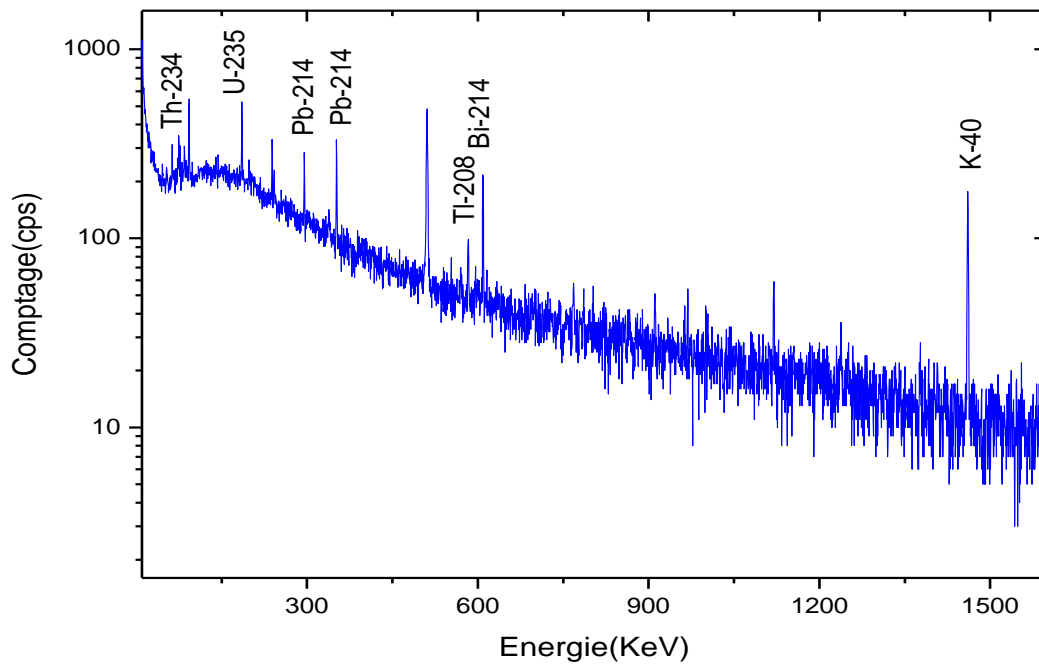


Figure 3.8 : Spectre gamma de la source de Messad

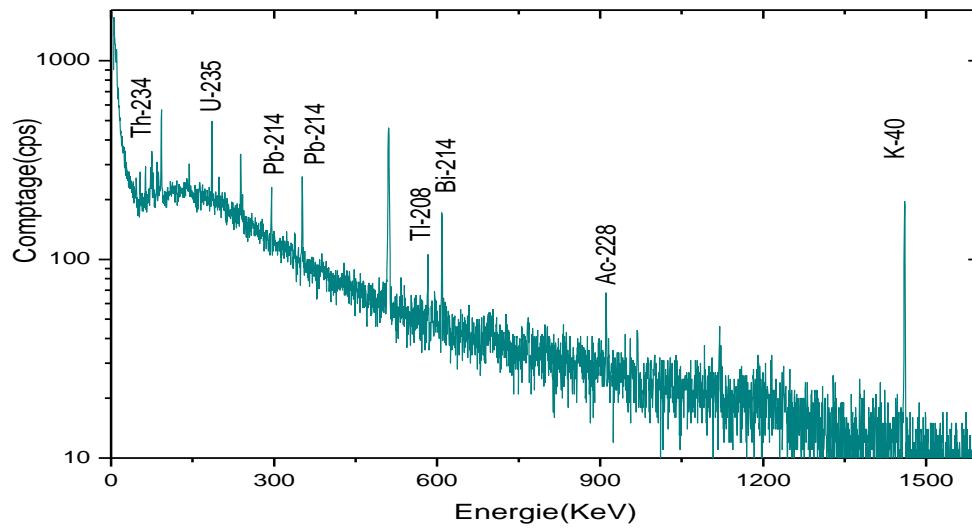


Figure 3.9 : Spectre gamma de la source de Nestlé

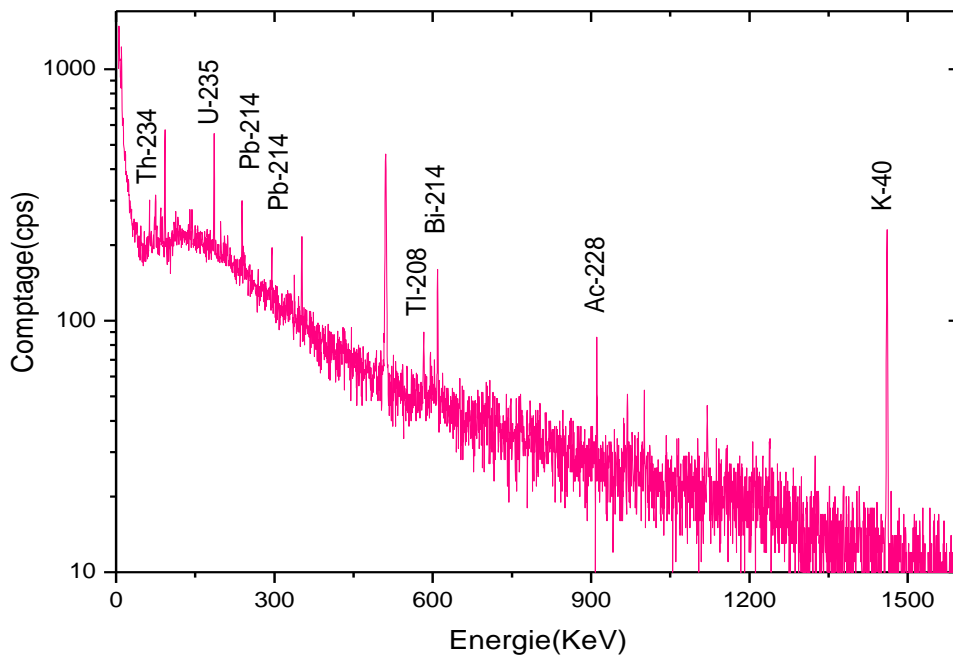


Figure 3.10 : Spectre gamma d'eau du robinet du CRND

### 3.5 .Evaluation du risque radiologique

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

**Tableau 3.5 :** Les résultats des mesures de la radioactivité naturelle (El Kantara)

Radionucléide	Energie (keV)	$N_{\text{dét}}$	$\Delta N_{\text{dét}}$	Efficacité	$I_{\gamma}$	Activité spécifique (Bq/litre) $A_s$	Incertitude $\Delta A_s$
$Pb^{214}$	351.51	1002	133	0.033	0.371	0,380	0,062
$Tl^{208}$	583.14	164	70	0.019	0.86	---	0
$Bi^{214}$	609.20	840	105	0.018	0.46	0,580	0,180
$Ac^{228}$	911.02	140	66	0.012	0.29	0,008	0,003
$K^{40}$	1461.43	786	70	0.008	0.107	0,470	0,044

**Tableau 3.6 :** Les résultats des mesures de la radioactivité naturelle (Messad)

Radionucléide	Energie (keV)	$N_{\text{dét}}$	$\Delta N_{\text{dét}}$	Efficacité	$I_{\gamma}$	Activité spécifique (Bq/litre)	Incertitude
$Pb^{214}$	351.51	596	112	0.033	0.371	0,0422	0,0092
$Tl^{208}$	583.14	154	79	0.019	0.86	---	---
$Bi^{214}$	609.20	562	92	0.018	0.460	0,26	0,0709
$Ac^{228}$	911.02	0	0	0.012	0.29	---	---
$K^{40}$	1461.43	714	73	0.008	0.107	---	---

**Tableau 3.7 :** Les résultats des mesures de la radioactivité naturelle (Nestlé)

Radionucléide	Energie (keV)	$N_{\text{dét}}$	$\Delta N_{\text{dét}}$	Efficacité	$I_{\gamma}$	Activité spécifique (Bq/litre)	Incertitude
$Pb^{214}$	351.51	471	128	0.033	0.371	---	---
$Tl^{208}$	583.14	158	72	0.019	0.86	---	---
$Bi^{214}$	609.20	384	85	0.018	0.460	0,059	0,0148
$Ac^{228}$	911.02	86	70	0.012	0.29	---	---
$K^{40}$	1461.43	718	75	0.008	0.107	---	---



**Tableau 3.8 :** les résultats des mesures de la radioactivité naturelle d'eau du robinet du CRND

Radionucléide	Energie (keV)	$N_{\text{dét}}$	$\Delta N_{\text{dét}}$	$I_{\gamma}$	Efficacité	Activité spécifique (Bq/litre)	Incertitude
$Pb^{214}$	351.51	214	136	0.371	0.033	---	---
$Ti^{208}$	583.14	162	80	0.86	0.019	---	---
$Bi^{214}$	609.20	249	89	0.460	0.018	---	---
$Ac^{228}$	911.02	135	49	0.29	0.012	---	---
$K^{40}$	1461.43	885	87	0.107	0.008	1,73	0,2022

### 3.5.1. Détermination de l'activité de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$

Le  $^{226}\text{Ra}$  (186 keV) est parmi les descendants de la série du  $^{238}\text{U}$ . Il est difficile de déterminer son activité directement à cause de l'interférence avec le pic de  $^{235}\text{U}$  (185.7 keV). L'activité du Ra-226 est donc déterminée après l'obtention de l'équilibre séculaire entre ses descendants, à savoir le  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ , et  $^{214}\text{Bi}$ .

$$A_{Ra^{226}} = \frac{A_{Pb^{214}} + A_{Bi^{214}}}{2} \quad (3.11)$$

Le tableau (3.10) montre les différentes activités mesurées. Seuls le  $^{214}\text{Pb}$  (351.9 keV) et le  $^{214}\text{Bi}$  (609.3 keV) affichent des pics photoélectriques assez importants, donc plus précis.

- Le  $^{214}\text{Pb}$  (351.9 keV) et  $^{214}\text{Bi}$  (609.3 keV) ont été choisis, car ils affichent des pics photoélectriques assez importants, donc plus précis.
- L'activité du  $^{40}\text{K}$  est mesurée directement à partir de la raie de 1460 keV.
- L'activité du  $^{232}\text{Th}$  est mesurée indirectement à partir de la raie 911.16 keV de  $^{228}\text{Ac}$ .

**Tableau 3.9** : Activité des radionucléides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ .

Échantillon	Activité de $\text{Ra}^{226}$ (Bq/litre)	Activité de $\text{Th}^{232}$ (Bq/litre)	Activité de $\text{K}^{40}$ (Bq/litre)
El Kantara	0,480	0,008	0,47
Messad	0,151	---	---
Nestlé	0,026	---	---
Eau du robinet	---	---	1,73

### 3.5.2 Mesure de l'activité équivalente du radium

L'activité équivalente du radium ( $Ra_{eq}$ ) est un indice unique utilisé pour décrire la production de rayons gamma provenant de différents mélanges de radium, de thorium et de potassium dans le matériau et a été calculée à l'aide de l'équation. (3.12) [19-20]

$$Ra_{eq}(Bq/l) = A_{Ra^{226}} + 1.43A_{Th^{232}} + 0.077A_{K^{40}} \quad (3.12)$$

Avec :

$A_{Ra^{226}}$ ,  $A_{Th^{232}}$ ,  $A_{K^{40}}$  et sont respectivement les activités du  $\text{Ra}^{226}$ ,  $\text{Th}^{232}$  et  $\text{K}^{40}$ .

### 3.5.3 Indice de risque externe et interne

#### 5.3.1 Indice de risque externe :

L'indice de risque externe  $H_{ex}$  est défini à l'aide de l'équation suivante : [18]

$$H_{ex} = \frac{A_{Ra^{226}}}{370} + \frac{A_{Th^{232}}}{250} + \frac{A_{K^{40}}}{4810} \quad (3.13)$$

### 5.3.2 Indice de risque interne

Le radon et ses produits à vie courte présentent un risque principalement pour les organes respiratoires. L'exposition interne à cet élément radioactif et à ses sous-produits est quantifiée par un indice de risque  $H_{in}$  défini par l'équation : [18]

$$H_{in} = \frac{A_{Ra^{226}}}{185} + \frac{A_{Th^{232}}}{259} + \frac{A_{K^{40}}}{4810} \quad (3.14)$$

D'après l'ICRP [33], ces indices doivent être inférieurs à 1. Le risque devient très probable lorsqu'ils deviennent proches de 0,5.

### 3.6 Débit de dose absorbée

Le débit de dose absorbée dépend principalement des concentrations des radionucléides tels que le radium-226 ( $^{226}\text{Ra}$ ), le thorium-232 ( $^{232}\text{Th}$ ) et le potassium-40 ( $^{40}\text{K}$ ) dans l'eau potable, ainsi que de facteurs tels que la distance de la source radioactive, le temps d'exposition et les propriétés de dispersion de l'eau. Surveiller régulièrement ce débit de dose absorbée dans les eaux potables est crucial pour maintenir les niveaux de radioactivité dans des limites acceptables pour la santé humaine. Le débit de dose est décrit par la relation : [17]

$$D \left( \frac{n\text{Gy}}{h} \right) = 0.462A_{Ra^{226}} + 0.621A_{Th^{232}} + 0.0417A_{K^{40}} \quad (3.15)$$

### 3.6.1 Indice de niveau représentatif gamma

L'indice gamma utilisé pour estimer les rayonnements gamma liés aux radionucléides naturels dans les eaux potables, doit être inférieur ou égal à 1, il est calculé à partir de l'expression (3.16):

$$I_{\gamma} = \frac{A_{Ra^{226}}}{150} + \frac{A_{Th^{232}}}{100} + \frac{A_{K^{40}}}{1500} \quad (3.16)$$

### 3.6.2 Indice de niveau représentatif Alpha

L'indice alpha pour estimer les rayonnements alpha liés aux radionucléides naturels dans les eaux minérales et l'eau potable, a été calculé à partir de cette équation :

$$I_{\alpha} = \frac{Ra_{eq}}{200} \quad (3.17)$$

**Tableau 3.10** : Activité, débit de dose et indices de risque mesurés pour les échantillons étudiés.

Échantillon	$Ra_{eq} (Bq/l)$	D(nGy/h)	$H_{ex}$	$H_{in}$	$I_{\gamma}$	$I_{\alpha}$
El Kantara	0,527	0,2463	0,0014	0,0027	0,0035	0,0026
Messad	0,151	0,0697	0,0004	0,0008	0,0010	0,0007
Nestelé	0,026	0,0120	0,0007	0,0001	0,0001	0,0001
Eau du robinet	0,133	0,0721	0,0003	0,0003	0,0011	0,0006

### 3.7 Doses annuelles efficaces dues à l'ingestion

Les doses efficaces annuelles totales dues à l'ingestion de  $^{226}Ra$ ,  $^{232}Th$  et  $^{40}K$  dans l'eau minérale et l'eau potable ont été évaluées pour différents groupes d'âge, selon l'équation (3.18) introduite par (OMS) [21].

$$D = A \times C \times I \quad (3.18)$$

## Chapitre 3 Résultats et discussions

Avec  $D$  = dose annuelle ( $\text{mSv}\cdot\text{année}^{-1}$ ).

$A$  = l'activité volumique des radionucléides dans l'eau potable ( $\text{Bq/L}$ )

$C$  = le taux de consommation d'eau potable pour le groupe d'âge concerné ( $\text{L}\cdot\text{année}^{-1}$ ) pour une personne en 1 an, soit (150, 350 et 500) ;  $L$  pour les nourrissons, les enfants et les adultes, respectivement.

$I$  = coefficient de dose d'ingestion pour le groupe d'âge concerné ( $\text{mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ), présenté dans le tableau 2 [21-22].

**Tableau 3.11:** Les facteurs de conversion (CF) des radionucléides pertinents pour différentes groupes d'âge.

Groupe d'âge	$^{226}\text{Ra}\times 10^{-4}$ ( $\text{mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ )	$^{232}\text{Th}\times 10^{-4}$ ( $\text{mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ )	$^{40}\text{K}\times 10^{-4}$ ( $\text{mSv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ )
Les nourrissons	9.6	4.5	5
Enfants	8-9.6	2.9 – 4.5	5
Adultes	2.8	2.3	5

**Tableau 3.12 :** Doses annuelles efficaces dues à l'ingestion

Echantillons	Dose annuelle efficace des nourrissons de 1 an ( $\text{mSv}/\text{an}$ )			
	Dose de $^{226}\text{Ra}$	Dose de $^{232}\text{Th}$	Dose de $^{40}\text{K}$	Dose totale ( $\text{mSv}/\text{an}$ )
El Kantara	0,06912	0,00054	0,03525	0,10491
Messad	0,02174	---	---	0,02174
Nestlé	0,00374	---	---	0,00374
Eau du robinet	---	---	0,12975	0,12975
Echantillons	Dose annuelle efficace chez les enfants ( $\text{mSv}/\text{an}$ )			
	Dose de $^{226}\text{Ra}$	Dose de $^{232}\text{Th}$	Dose de $^{40}\text{K}$	Dose totale ( $\text{mSv}/\text{an}$ )
El Kantara	0,04650	0,00103	0,08225	0,12979
Messad	0,00800	---	---	0,00800
Nestlé	---	---	---	---

Eau du robinet	---	---	0,30275	0,30275
Echantillons	Dose annuelle efficace chez les adultes (mSv/an)			
	Dose de $^{226}\text{Ra}$	Dose de $^{232}\text{Th}$	Dose de $^{40}\text{K}$	Dose totale (mSv/an)
El Kantara	0,06720	0,00092	0,11750	0,18562
Messad	0,02114	---	---	0,02114
Nestlé	0,00364	---	---	0,00364
Eau du robinet	---	---	0,43250	0,43250

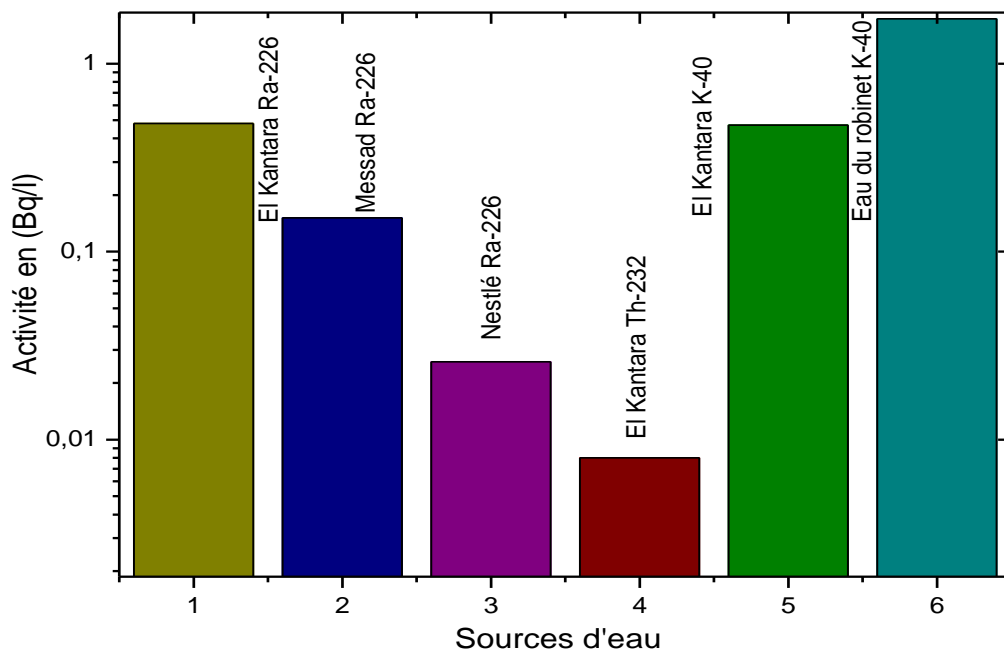
### 3.8 Discussion des résultats

La méthode d'analyse par spectrométrie gamma utilisée dans ce travail a permis l'identification et la quantification des radionucléides suivants de la série naturelle de l'Uranium et du Thorium :  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{208}\text{Tl}$  et le  $^{40}\text{K}$ . L'origine naturelle de la radioactivité est due aux séries naturelles de l'uranium et du thorium ainsi que d'autres éléments dont le principal est le potassium  $^{40}\text{K}$ . Pour chaque radioélément du spectre, la surface nette de la raie correspondante a été mesurée (après déduction du bruit de fond) dans le but de calculer l'activité spécifique de cet élément par la formule (3.6). À noter qu'avant le calcul de cette activité, les efficacités de détection respectives des radioéléments ont été déterminées en utilisant les paramètres apparaissant sur la figure (3.5) de la courbe d'efficacité.

Le but de cette étude est d'estimer le risque radiologique du radionucléide ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ ) ; l'activité volumique spécifique de ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ ), l'activité équivalente au radium, ainsi que les dangers externes et les indices internes qui ont été calculés pour les échantillons d'eau potable sélectionnés.

Les concentrations d'activité du  $^{226}\text{Ra}$  varient entre  $0.026 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  et  $0.48 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  avec une valeur moyenne d'activité volumique très faible  $A=0.21 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ . La concentration d'activité du  $^{232}\text{Th}$  dans l'eau de El Kantara elle est de  $0.008 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ , on note aussi l'absence de ce radioélément dans l'eau de Messad, Nestlé et l'eau du robinet du CRND. Les concentrations d'activité de  $^{40}\text{K}$  dans l'eau varient entre  $0.47 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  et  $1.73 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  dans l'eau de El Kantara et l'eau du robinet

respectivement. La variation de la concentration de radioactivité de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$ , comme indiqué dans le tableau(3.9) , peut être due à la différence dans la nature des échantillons (la région de chaque source). Pour une analyse comparative, la concentration d'activité des radionucléides de  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$  dans les échantillons d'eau, a été tracée (Fig. 3.11).



**Figure 3.11:** Concentration d'activité des radionucléides

En général, la concentration d'activité la plus élevée en  $^{40}\text{K}$  a été trouvée dans l'eau du robinet du CRND ( $A= 1.73 \text{ Bq/l}$ ), et la concentration d'activité la plus faible ont été retrouvée dans la source de El Kantara (Fig. 4). Les concentrations d'activité de  $^{40}\text{K}$  sont relativement supérieures à celles de  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$  dans tous les échantillons, ce qui concorde avec une étude similaire réalisée par Darwish et al. [23]. De plus, la concentration de  $^{226}\text{Ra}$  dans les échantillons est très faible à la valeur maximale de  $^{226}\text{Ra}$  ( $370 \text{ Bq L}^{-1}$ ), comme le suggère l'OCDE [24].

## Chapitre 3 Résultats et discussions

Les études qui ont été réalisées dans différents pays pour mesurer les radionucléides naturels dans les échantillons d'eau sont indiquées dans le tableau 3.12.

**Tableau 3.13 :** Comparaison d'activité (Bq/L) de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$

Pays	Type de l'eau	Concentration d'activité (Bq /L)			
		$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	Références
<i>Algérie</i> <i>Bourdj bou</i> <i>Argeridj</i>	Eau de source	---	0.04	1.40-1.60	[25]
<i>Yémen</i>	Eau de source	---	2.17	5.64-22.5	[26]
<b>Pakistan</b>	Eau minérale	6.2	1.1	49.2	[27]
<i>Arizona/USA</i>	Eau de source	0.185	---	---	[28]

Il est visible que les concentrations d'activité des radionucléides diffèrent selon les pays. Les États Unis affichent une concentration d'activité plus élevée de  $^{226}\text{Ra}$  par rapport au Pakistan. De plus, des variations sont observées dans la mesure des concentrations de  $^{232}\text{Th}$ , la valeur la plus élevée a été mesurée au sein du Yemen, l'Algérie présentant les plus faibles concentrations d'activité en  $^{40}\text{K}$ .

L'activité équivalente du radium ( $R_{\text{aeq}}$ ) de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  s'est révélée irrégulière. La valeur maximale de  $R_{\text{aeq}}$  est très inférieure à  $370 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ , ce qui se situe dans le niveau sécuritaire recommandé par l'Organisation de coopération et de développement économiques (Murat et al.) [29]. L'activité équivalente en radium ( $R_{\text{aeq}}$ ) dans les échantillons d'eau varie de  $0,026 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  dans la source de Nestlé à  $0,527 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$  dans la source de El Kantara avec une valeur moyenne de  $0,2 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ , comme le montre le tableau (3.9), tous inférieurs au maximum admissible de  $370 \text{ Bq}\cdot\text{L}^{-1}$ .

L'indice de danger gamma à l'extérieur et l'indice de danger gamma à l'intérieur des radionucléides pour chaque échantillon ont été calculés. Les valeurs de l'indice de danger externe ( $H_{\text{ex}}$ ) allaient de 0,003 à 0,014 avec une valeur moyenne de 0,0007, tandis que les valeurs de l'indice de danger interne ( $H_{\text{in}}$ ) allaient de 0,0001 à 0,0027 avec une valeur moyenne de 0,0009. Le débit de dose absorbée variait de 0.01 et 0.24 nGy/h et la valeur moyenne est de 0.1 nGy/h. Cependant, la valeur moyenne est inférieure à la valeur recommandée de 70



nGy $\cdot$ h<sup>-1</sup> (UNSCEAR [20]; Nisar [30]). De plus, les valeurs minimales et maximales du gamma externe ( $I_\gamma$ ) étaient de 0,0001 et 0,003, tandis que les valeurs minimales et maximales de l'indice alpha interne ( $I_\alpha$ ) étaient de 0,0001 et 0,002. Les valeurs maximales de  $I_\gamma$  et  $I_\alpha$  sont inférieures à la valeur maximale admissible (1), ce qui indique que les sources d'eau étudiées se trouvent à l'abri du risque de radiation (Bashir et al.; Ababneh et al.) [31-32], car pour maintenir le risque de radiation et la valeur de ( $H_{ex}$ ) doit également être inférieure à un. L'objectif principal de cet indice est de limiter la dose de rayonnement à la limite de dose acceptée de 1,5 mSv an<sup>-1</sup>. Cela correspond à la valeur maximale de l'activité équivalente d'uranium de 370 Bq $\cdot$ L<sup>-1</sup> (UNSCEAR).

L'équivalent de dose efficace annuel (AEDE) due à l'ingestion de <sup>226</sup>Ra et <sup>232</sup>Th dans l'eau potable a été mesuré pour chaque groupe de population individuel, dont les résultats de <sup>232</sup>Th et le <sup>226</sup>Ra sont bien inférieurs à la valeur de référence recommandée de 0,1 mSv, résultant d'une consommation d'eau potable pendant un an, conformément aux recommandations de l'OMS.

Les résultats obtenus par cette étude constitueraient des données utiles pour établir une base de référence sur la radioactivité naturelle. Ces données de base nous aideront à évaluer toute variation des niveaux de radioactivité due à des événements inattendus et que la dose d'ingestion est inférieure à la limite de dose de 1 mSv $\cdot$ an<sup>-1</sup> pour l'exposition du public dans les situations d'exposition planifiées, comme recommandé par (ICRP) [33], indiquant également que les personnes sont en sécurité radiologiquement.

## Conclusion générale

Dans le présent travail nous avons évalué les risques radiologiques des radioéléments naturels présents dans les eaux de source et l'eau du robinet du CRND par la technique de spectrométrie gamma à l'aide du détecteur GeHp.

L'ensemble des mesures effectuées sur les eaux potables nous a permis de faire les constatations suivantes :

- La méthode d'analyse par spectrométrie gamma utilisée a permis l'identification et la quantification des radionucléides suivants de la série naturelle de l'Uranium et du Thorium :  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , et  $^{40}\text{K}$ .
- L'activité spécifique du  $^{226}\text{Ra}$  a été déterminée après l'obtention de l'équilibre séculaire entre ses descendants à savoir le  $^{222}\text{Rn}$ ,  $^{218}\text{Po}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ , et  $^{214}\text{Bi}$ .
- La détermination des indicateurs radiologiques des eaux potables basé sur les activité des radioéléments naturels tels que le  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , et  $^{40}\text{K}$ .

Grace aux résultats obtenus dans ce travail, nous pouvons déduire des informations importantes sur les risques liés à l'irradiation externe, nous avons calculé les paramètres radiologiques tels que l'activité équivalente du radium ( $^{226}\text{Ra}_{\text{eq}}$ ), les paramètres de risque externe ( $H_{\text{ex}}$ ) et interne ( $H_{\text{in}}$ ), le débit de dose absorbée, la dose effective annuelle et l'indice du niveau représentatif gamma et alpha. Les valeurs maximales de  $I_{\gamma}$  et  $I_{\alpha}$  sont inférieures à la valeur maximale admissible (1), ce qui indique que les sources d'eau étudiées sont à l'abri du risque de radiation.

L'équivalent de dose efficace annuel (AEDE) dû à l'ingestion de  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$  dans l'eau potable a été mesuré pour chaque groupe de population individuel, les résultats sont bien inférieurs à la valeur de référence recommandée de 0,1 mSv résultant d'une consommation d'eau potable pendant un an, conformément aux recommandations de l'OMS.

Les données actuelles pourraient être utiles à la surveillance de la pollution radioactive de l'eau dans l'environnement. Il est très important de déterminer le niveau de concentration de la radioactivité dans l'eau du robinet et l'eau minérale pour garantir la sécurité des consommateurs. Cette étude fournit des données supplémentaires pour estimer l'effet de l'exposition aux rayonnements environnementaux sur la santé humaine.

## Références

- [1] C. Jimonet , H.Metivier , Collectif Principes de radioprotection Reglementation (2013)
- [2] H.Kebir. Concentrations de l'uranium-238 dans les eaux thermales a l'est algérien (2018)
- [3] K.Kikuchi.and M.Kawai M, Nuclear Matter and Nuclear Reactions North-Holland. Publishing Company Amsterdam (1968).
- [4] Mémoire de Master\_N. Merabet , Mesure de l'activité des matières radioactives naturelles dans le sol de la cimenterie de Meftah-Algerie (2019).
- [5] Institut de radioprotection et sureté nucléaire, Exposition de la population Française aux rayonnements ionisants, IRSN (2015)
- [6] S.OUICHAOUI,Introduction a la physique nucleaire ,OPU,(1992)
- [7] Paul Reuss, Précis de Neutronique, EDP Science (2003).
- [8] Z.B.Alfassi, C.Chung, activation analysis, vol 1 CRC Press, (2000).
- [9] L.Böhm Etude de la radioactivité des eaux potables de Bretagne et perspective d'évaluation du risque sanitaire éventuel lié au radon. École national de la santé France (2007)
- [10] Agency for Toxic Substances and Disease Registry (ATSDR). Toxicological Profile for Radium (2017)
- [11] I.Guido, la radioactivité naturelle dans les eaux de consommation. École national de la santé France (2000)
- [12] N Tsoufanidis, and S Landsberger, Measurement and Detection of Radiation, Taylor & Francis Group – 4<sup>th</sup> edition. (2015)
- [13] G.F Knoll, Radiation Detection and Measurement, John Wiley & Sons – 3<sup>rd</sup> edition., New York.(1999)
- [14] M. Hugues Paradis. Développement de la mesure par spectrométrie  $\gamma$  en coïncidence.These de doctorat de l'universite Paris-Saclay (2016)
- [15] T.Azli.Simulation de la détection des rayonnements gamma par un détecteur en Germanium Thèse de doctorat (2018)
- [16] Logiciel de traitement de spectres gamma, Genie 2000,Canberra (2007)

- [17] T.Kota Tinggi, N.Johar, S. Kok. Measurement Of Natural Radioactivité And Assessment Of Radiation Hazard Indices In Soil Samples At Pengerang. Advancing Nuclear Research and Energy Development, Malaysia, 2014.
- [18] A.Taiwo,D.Adeyemo , U.Sadiq and I.Bappah . Determination of external and internal hazard indices from natural occurring radionucléide around a superphosphate fertilizer factory in Nigeria. Archives Of Applied Science Research, 6 (1) :23-27, 2014.
- [19] J.Beretka , P.Mathew . Natural radioactivity of Australian building materials, industrial wastes and by-products. Health Phys 48:87–95.1985
- [20] UNSCEAR . Effects of atomic radiation to the general assembly. New York: United Nations Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation, United Nations (2000).
- [21] WHO . Management of radioactivity in drinking-water. World Health Organization .P124, (2018)
- [22] Hany El-G, Ahmed S, Ghada S Determination of natural radionuclides for water resources on the West Bank of the Nile River, Assiut Governorate, Egypt. Water Journal 11:1–13. (2019)
- [23] Darwish DAE, Abul-Nasr KTM, El-Khayatt AM (2015) The assessment of natural radioactivity and its associated radiological hazards and dose parameters in granite samples from South Sinai.Egypt Jo f Radiat Resea and Appli Sci 8:17–25. (2015)
- [24] OECD. Exposure to radiation from the natural radioactivity in building materials. Organization of Economic Cooperation and Development. Report by a group of experts of the OECD Nuclear Energy Agency, Paris, France (1979)
- [25] S.Bekrar . Constrations naturelles de radionucléides dans un échantillon d'eau potable (eaux de sources) de la région de Bordj-Bou-Arreridj- Algérie (2222)
- [26] Abd El-Mageed AI, EL-Kamel AH, Abbady AB, Harb S, Issa Saleh I. Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen. Désaliénation 321: 28-31(2013)
- [27] Khalid K, Akhter P, Orfi SD, Malik GM, Tufail M (2003) Natural radioactivity levels in river, stream and drinking water of the northwestern areas of Pakistan. J of Radioanaly and Nucl Chem 256:289–292 (2023)
- [28] Kenya MDC, Helenes H, Adam BMT, AH, Ground water contamination with  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{210}\text{Pb}$  from past uranium mining: cove wash, Arizona. Environ Geochem Health 36:477–487.(2014)

- [29] Murat B, Onder K, Yavuz C, Sayhan T .The effects of physicochemical Properties on gamma emitting natural radionuclide levels in the soil profile of Istanbul. Environ Monit Assess (2010)
- [30] Nisar A . Natural radioactivity, radon concentration and heavy metals in soil and water in Kedah Malaysia. PhD Thesis, Doctor of Philosophy, Universiti sains Malaysia (2015)
- [31] Bashir GM, Mohammad SJ, Azhar AR . Determination of radioactive elements and heavy metals in sediments and soil from domestic water sources in northern peninsular Malaysia. Environ Monit Assess 184:5043–5049 (2012)
- [32] Ababneh ZQ, Al-Omari H, Rasheed M, Al-Najjar T, Ababneh AM. Assessment of gamma-emitting radionuclides in sediment cores from the Gulf of Aqaba, Red Sea. Radiat Protect Dosim
- [33] ICRP .International Commission on Radiological Protection (ICRP Publication. United Nations, New York, p 119 41:289–298 (2012)

