

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

UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF

UFAS

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

**Thèse**

Présentée par :

**KEBIR HADDA**

Pour l'obtention du Diplôme de

**Doctorat Sciences en Physique**

OPTION : GENIE NUCLEAIRE

THEME

**CONCENTRATIONS DE L'URANIUM-238 DANS LES EAUX THERMALES A L'EST  
ALGERIEN**

**Soutenu le : 25 / 11 / 2017 Devant la commission d'examen**

M. MAAMACHE	Prof. Univ. Abbas Ferhat Sétif	Président
A. BOUCENNA	Prof. Univ. Abbas Ferhat Sétif	Rapporteur
F. BENRACHI	Prof. Univ. Mentouri Constantine	Examineur
A. BELAFRITES	Prof. Univ. Jijel	Examineur
N.OUNOUGH	MCA. Univ.Jijel	Examineur
N.AMRANI	MCA. Univ. Abbas Ferhat Sétif	Examineur

# **Remerciements**

*Avant tout, je remercie Dieu tout puissant de m'avoir donné la force, le courage, la persistance et m'a permis d'exploiter les moyens disponible à fin d'accomplir ce modeste travail, d'avoir éclairé le chemin de la réussite.*

*J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire. En premier lieu, je remercie M' Ahmed Boucenna, professeur à l'université de Sétif, en tant que Directeur de mémoire, pour sa précieuse aide à la relecture et à la correction de mon mémoire.*

*J'adresse mes plus vifs remerciements à Monsieur Azzouz Abdelhakim pour ses efforts innombrables pour me permettre des facilités d'expérimentation, d'avoir consacré son temps précieux pour résoudre un nombre de problèmes.*

*Je témoigne toute ma reconnaissance amicale à M' M. Maamache président de la thèse, et les membres du jury M<sup>me</sup> F.Benrachi, Mr N. Ounoughi, M' A. Belafrites, N. Amrani qui ont bien voulu enrichir ce travail par leur précieuse évaluation.*

*Des remerciements particuliers sont adressés à ma chère amie Berrehail mounira qui m'a trop aidé et qui a su me pousser à aller toujours de l'avant.*

*Je voudrais remercier tous ceux qui ont participé de loin ou de près à l'aboutissement de ce travail.*

## *Dédicace*

*Grâce à dieu le tout puissant, qui m'a donné la volonté, la force, et qui m'a éclairé vers le bon chemin, que nul ne peut se faire sans son désir.*

*A mon père, l'homme qui a fait beaucoup pour moi.*

*A ma mère, qui a toujours été une source de tendance et d'encouragement.*

*A mes frères Abdelkader et Salah eddin ;*

*A mes sœurs ;*

*A ma fille Meriam (Lina) et à mes fils Amdjad et Yahia Abd Esselam*

*A mon mari ; Je le souhaite tout le bonheur du monde.*

*Je dédie ce travail*

# TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	10
-------------------	----

## CHAPITRE I : RADIOACTIVITÉ

I. Définition.....	13
II. Types de rayonnement.....	13
1. Le rayonnement alpha ( $\alpha$ ).....	13
2. Le rayonnement gamma ( $\beta$ ).....	13
3. Le rayonnement gamma ( $\gamma$ ).....	14
4. Période radioactive T.....	15
III. Les Sources radioactives.....	16
1. Sources naturelles.....	16
2. Sources artificielles.....	19
IV. Filiation radioactive.....	20
V. Notion d'équilibre radioactif ou équilibre séculaire.....	20
VI. Eléments radioactifs dans les eaux thermo-minérales.....	21
1. Uranium naturel.....	21
2. Thorium.....	21
3. Potassium 40.....	21
4. Radium 226.....	21
5. Radon.....	22
6. Le carbone 14.....	22
7. Le tritium.....	22
VII. Grandeurs dosimétriques.....	23
1. L'activité.....	23
2. La dose absorbé.....	23
3. La dose équivalente.....	23
4. La dose efficace.....	24

## CHAPITRE II : INTERACTION RAYONNEMENTS MATIÈRE

I. Rappel sur les rayonnements ionisants.....	27
II. Introduction.....	27

1. Rayonnement ionisant.....	27
2. Rayonnement non-ionisant.....	27
III. Effet biologiques des rayonnements ionisants.....	28
IV. Différents Types d'Exposition.....	28
a. L'exposition externe.....	28
b. L'exposition interne.....	29
V. Effets des Rayonnements Ionisants sur l'Organisme.....	29
a. Risque Stochastique.....	29
b. Risque Déterministe.....	29
VI. Les Rayonnements Electromagnétiques.....	31
1. Les rayonnements photon X.....	31
2. Les rayonnements photon $\gamma$ .....	31
a. L'effet photoélectrique.....	32
b. La diffusion Compton.....	33
c. La création de paire $e^+e^-$ .....	33
3. Importance relative des trois effets.....	34
4. Section efficace d'interaction et coefficient d'atténuation.....	35
VII. Généralités sur les détecteurs.....	36
a. Les semi-conducteurs.....	36
b. Détecteurs semi-conducteur couramment utilisés.....	38
c. Détecteurs germanium.....	38
d. Détecteurs germanium de haute pureté HPGe.....	39

### **CHAPITRE III : SPECTROMÉTRIE $\gamma$**

I. Introduction.....	41
II. La spectroscopie gamma : principe et applications.....	41
III. Présentation d'une chaîne de spectrométrie gamma.....	42
1. L'ensemble de détection.....	42
2. Electronique associée.....	42
3. Caractérisation des performances d'un spectromètre.....	47
IV. Applications de la spectroscopie gamma.....	55

## CHAPITRE IV : LES SOURCES THERMALES GUERGOUR ET OULED TEBBENE

I. Introduction.....	58
II. Paramètres géologiques et hydrogéologiques.....	58
1. La source thermale de Guergour (étude 1938).....	60
2. La source thermale de Guergour actuellement.....	62
3. La source thermale d'Ouled Tebben.....	63
4. L'eau potable de la population est loin de la source thermale .....	65

## CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSION

I. Méthodes de mesure.....	67
II. Préparation des échantillons.....	67
1. Etalonnage.....	68
2. Calibration de la chaîne de mesure.....	68
3. L'activité minimale détectable.....	70
III. Résultats et discussion.....	70
IV. Mesure des activités spécifiques des échantillons.....	70
V. Radionucléides identifiés dans les deux échantillons d'eau.....	71
VI. Analyse du spectre des deux sources Guergour et Ouled Tebben.....	72
VII. Calcul des activités moyennes, concentration et dose annuelle effective des deux échantillons.....	72
VIII. Concentrations des activités (Bq/L) de $^{226}\text{Ra}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{210}\text{Pb}$ et $^{40}\text{K}$ et paramètres physico-chimiques des eaux thermale et potable dans différents pays.....	78
<b>Conclusion</b> .....	83
<b>Références</b> .....	86
<b>Annexes</b> .....	93

## LISTES DES FIGURES

- Figure 1 :** Rayonnement alpha, béta, gamma.
- Figure 2 :** Pouvoir de pénétration des rayonnements.
- Figure 3 :** Courbe de décroissance radioactive.
- Figure 4 :** Chaînes de désintégration de l' $^{238}\text{U}$ , de l' $^{235}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$ .
- Figure 5 :** Classification des rayonnements.
- Figure 6 :** Spectre électromagnétique.
- Figure 7 :** Effet photoélectrique.
- Figure 8 :** Effet Compton.
- Figure 9 :** Création de paires.
- Figure 10 :** Interaction dominante entre rayonnement et matière en fonction du numéro atomique  $Z$  de l'atome et de l'énergie  $h\nu$  du photon incident.
- Figure 11 :** Principe du semi-conducteur : structure des bandes et fonctionnement.
- Figure 12 :** Les différentes configurations géométriques des détecteurs germanium.
- Figure 13 :** Spectre gamma de 1000 s enregistré sans source de calibration avec un détecteur HPGe coaxial. Toutes les raies observées (ainsi que le continuum) proviennent de la radioactivité naturelle, c'est-à-dire de la désintégration des éléments K, U et Th présents dans l'environnement du détecteur (essentiellement le sol et les murs).
- Figure 14 :** Schéma de principe d'une chaîne de mesure de spectrométrie  $\gamma$ .
- Figure 15 :** L'amplificateur.
- Figure 16 :** Histogrammes donnant le nombre de photons détectés en fonction de nombre de canal.
- Figure 17 :** Exemple de spectre de radioactivité naturelle obtenu après plusieurs jours de comptage.
- Figure 18 :** Spectre  $\gamma$  type.
- Figure 19 :** Temps mort d'un compteur (Modes paralysable et non paralysable).
- Figure 20 :** Définition de la résolution pour un pic parfaitement gaussien.
- Figure 21 :** Comparaison entre les résolutions des deux détecteurs NaI et GeHP.
- Figure 22 :** Notion élémentaire d'angle solide.
- Figure 23 :** Localisation des deux sources thermales étudiées dans la région de Sétif Est de l'Algérie.
- Figure 24 :** Plan des sources de Guergour.

- Figure 25 :** Carte de situation de la source chaude de Hammam Ouled Tebben. Source : extrait des cartes topographiques Ras El Oued et Souk Ouled Nadja (feuille n°142 et 169).
- Figure 26 :** Coupe schématique du Jurassique et du Crétacé basal à l'Ouest de Hammam Ouled Tebben.
- Figure 27 :** Matériel utilisé pour préparation de l'eau.
- Figure 28 :** Courbe de l'efficacité absolue en fonction de l'énergie d'un rayon gamma.
- Figure 29 :** Activité spécifique de l'uranium (Bq/ L) dans les sources thermales de (Guergour et Ouled Tebben).
- Figure 30 :** Dose efficace annuelle en uranium 238 (Hammam Guergour et Hammam Ouled Tebben).

## LISTE DES TABLEAUX

- Tableau 1 :** Radionucléides produits par l'homme.
- Tableau 2 :** Grandeurs dosimétriques.
- Tableau 3 :** Facteurs de pondération radiologique des différents types de radiation en fonction de leurs énergies.
- Tableau 4 :** Facteurs de pondération des différents types de tissus.
- Tableau 5 :** Exposition humaine à la radioactivité naturelle et artificielle.
- Tableau 6 :** Propriétés du semi-conducteur Ge, Si.
- Tableau 7 :** Récapitulatif des largeurs de gap et de l'énergie de création de paire pour différents matériaux semi-conducteurs.
- Tableau 8 :** Classement des Eaux minérales les plus riches de France et de l'Etranger selon le taux de radioactivité (radon) en 1938.
- Tableau 9 :** Points noirs numérotés (1 à 8): Sources étudiées ou utilisées.
- Tableau 10 :** Activités minimales détectables (MDA) dans les deux sources thermales.
- Tableau 11 :** Caractéristiques des radionucléides identifiés.
- Tableau 12 :** Activités spécifiques et MDA (Activité Minimale Détectable) des radioéléments identifiés dans les deux sources thermales HG et HOT.
- Tableau 13 :** Activités spécifiques des radionucléides présents dans les échantillons d'eau, concentration et dose annuelle effective des deux échantillons étudiés.
- Tableau 14 :** La limite de détection LD radionucléides présents dans les spectres des échantillons d'eau.
- Tableau 15 :** Concentrations des activités du  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{40}\text{K}$  et paramètres physico-chimiques des eaux thermales et potables dans différents pays.

## INTRODUCTION

Une eau thermale est tout d'abord une eau minérale naturelle, c'est-à-dire une eau possédant un ensemble de caractéristiques qui sont de nature à lui apporter des propriétés favorables à la santé. Une eau minérale naturelle, à la différence d'une eau de source n'est pas tenue d'être naturellement potable. Elle contient des minéraux, sels, gaz et boues, susceptibles d'agir efficacement sur la santé. Une eau minérale naturelle se distingue nettement des autres eaux destinées à la consommation humaine par sa nature (teneur en minéraux, oligo-éléments ou autres constituants), par ses effets et par sa pureté originelle, ces caractéristiques ayant été conservées intactes en raison de l'origine souterraine de cette eau ainsi tenue à l'abri de tout risque de pollution. L'eau minérale naturelle provient d'une nappe ou d'un gisement souterrain exploité à partir d'une ou plusieurs émergences naturelle sou forées, et témoigne, dans le cadre des fluctuations naturelles connues, d'une stabilité de ses caractéristiques essentielles, notamment de composition et de température à l'émergence, qui n'est pas affectée par le débit de l'eau prélevée. Une eau thermale est, par définition, une eau minérale chaude. Dans le langage courant, on appelle « eau thermale » toute eau minérale dotée de propriétés thérapeutiques et utilisée au sein d'un établissement thermal [Sanders, 2006].

Le granit est l'un des roches ignées. En termes de radioactivité naturelle, les granites présentent une concentration élémentaire accrue d'uranium (U) et thorium (Th) par rapport à la très faible abondance de ces éléments observés dans la croûte océanique de la terre. Les géologues fournissent une explication pour ce comportement, en tenant compte de la fusion partielle et cristallisation fractionnée du magma, qui permet U et Th à se concentrer dans la phase liquide et devenir incorporé dans des produits plus riches en silice [El-Taher et al. 2007; Buket et al. 2010]. Le contenu moyen de  $^{238}\text{U}$  dans la croûte terrestre a été estimé à 2,7 mg / kg, et les concentrations peuvent être élevé de 120 mg / kg dans les roches phosphatées [Singh et al., 1996], tandis que le contenu moyen de  $^{232}\text{Th}$  de la croûte terrestre est d'environ 9,6 mg / kg [Firestone et al., 1996].

Les radioisotopes lourds des séries de désintégration de l'uranium et du thorium sont présents naturellement en quantité variable dans les eaux souterraines. Ils ont fait l'objet de nombreuses mesures dans les eaux souterraines et ceci, principalement en raison du danger qu'ils représentent d'un point de vue de santé publique. Une grande partie de ces études donnent donc une répartition statistique des isotopes à l'échelle d'une région mais, peu d'entre elles cherchent à comprendre l'origine de leur présence d'un point de vue géologique et hydrogéologique [Gainon, 2008].

Cette étude a pour but de constituer une base de données sur les teneurs en  $^{238}\text{U}$  ( $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ) pour les eaux thermales de Guergour et d'Ouled Tebben (région de Sétif) de l'Est Algérien. Elle permet également d'évaluer, à titre informatif, si les radioisotopes 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 des informations qu'il est possible de tirer sur les eaux thermales de ces deux régions étudiées à l'aide des isotopes radioactifs de la série de l'uranium-238.

Le présent travail a été structuré selon cinq chapitres; notions sur la radioactivité, quelques rappels sur les processus d'interactions des photons avec la matière, présentation des principales problématiques liées aux mesures par spectrométrie gamma, présentation des sites d'études, interprétation des résultats basée sur les observations générales des deux sites étudiés.

# *CHAPITRE I*

# *RADIOACTIVITÉ*

## I. Définition

La **radioactivité** est un phénomène naturel qui naît au cœur de l'atome. Dans le noyau instable d'un atome radioactif, il existe ainsi un surplus d'énergie qui conduit à une désintégration de l'atome en un autre atome. Pendant cette transformation, l'atome expulse son énergie excédentaire sous la forme de rayonnements invisibles : on parle de rayonnements ionisants.

## II. Types de rayonnement

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

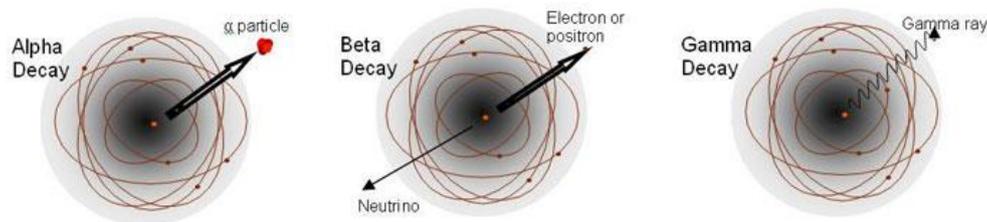


Figure 1. Rayonnement alpha, bêta, gamma.

### 1. Le rayonnement alpha ( $\alpha$ )

Il est émis par les atomes trop lourds. Il correspond à l'émission d'un noyau d'atome d'hélium, composé de deux protons et de deux neutrons : la particule alpha. Son parcours porté dans l'air est de quelques centimètres seulement. Elle peut être arrêtée par une simple feuille de papier.

### 2. Le rayonnement bêta ( $\beta$ )

Il correspond à deux types de transformations pouvant survenir dans un radionucléide : un neutron se transforme en proton et le noyau émet un électron chargé négativement (bêta moins), un proton se transforme en neutron et le noyau émet un anti-électron chargé positivement (bêta plus) ou capture un électron du cortège électronique par capture électronique. Le parcours des particules  $\beta$  dans l'air est de quelques mètres. Elles peuvent être arrêtées par une feuille d'aluminium.

### 3. Le rayonnement gamma ( $\gamma$ )

Le rayon gamma est émis par les noyaux excités. C'est un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière ou les rayons X, mais beaucoup plus énergétique. Les rayons gamma sont bien plus pénétrant que les autres types de rayonnements. En fonction de son énergie, ils peuvent parcourir plusieurs centaines de mètres dans l'air. Une forte épaisseur de plomb ou de béton est nécessaire pour les arrêter. La figure 2 représente le pouvoir de pénétration pour les trois types de rayonnement alpha, bêta et gamma.

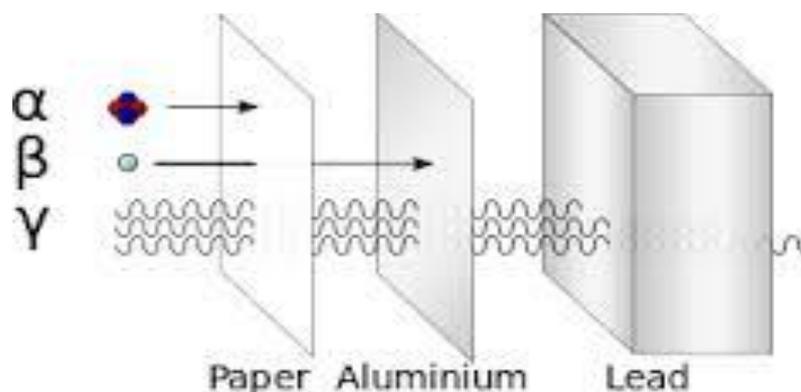


Figure 2. Pouvoir de pénétration des rayonnements.

#### \* Loi de désintégration radioactive

La désintégration radioactive est exponentielle et obéit à la loi de décroissance radioactive

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (1)$$

Par intégration, on obtient:

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

Où

Le signe moins (-) exprime le fait que le nombre d'atomes N diminue au cours du temps.

$N_0$  = nombre de noyaux initiaux, à l'instant  $t=0$ .

$N(t)$  = nombre de noyaux au temps  $t$

$\lambda$ =constante de désintégration propre à chaque isotope (1/s).

La loi de désintégration radioactive qui exprime la variation du nombre d'atomes radioactifs  $N(t)$ , en fonction du temps, est une loi de décroissance exponentielle (figure 3).

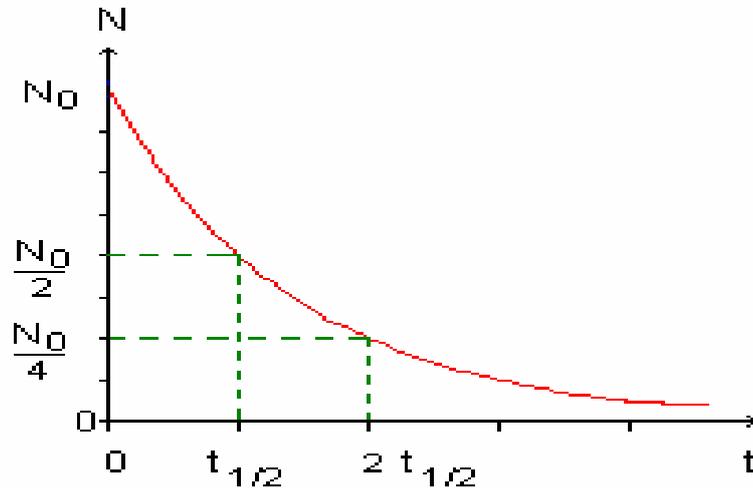


Figure 3. Courbe de décroissance radioactive.

#### 4. Période radioactive $T$

La période  $T$  est le temps au bout duquel la moitié des atomes présents sont désintégrés.

C'est pourquoi on l'appelle aussi « demi-vie ». Lorsque :

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} \quad (3)$$

On tire :

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (4)$$

La période  $T$ , comme la constante radioactive  $\lambda$ , est une caractéristique de chaque élément radioactif. Les périodes radioactives des éléments radioactifs naturels ont une gamme très étendue. Elles s'échelonnent entre quelques milliards d'années et une fraction de seconde. Par exemple :

Uranium 238,  $T = 4,5 \cdot 10^9$  années

Radium 226,  $T = 1617$  années

Radon 222,  $T = 3,8$  jours

Polonium 214,  $T = 1,6 \cdot 10^{-4}$  seconde

### **III. Les Sources radioactives**

#### **1. Sources naturelles**

La radioactivité fait partie de l'univers. Elle est présente de façon naturelle dans notre environnement et émise par diverses sources. Le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR) énonce quatre sources importantes d'exposition du public au rayonnement naturel : le rayonnement cosmique, le rayonnement terrestre, l'inhalation et l'ingestion de radionucléides naturels.

##### **a. 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 produit des réactions nucléaires avec les composants de l'atmosphère comme l'azote et produit des substances radioactives qui sont absorbées par les êtres humains. L'exposition à ces rayonnements est une exposition au rayonnement naturel.

##### **b. Rayonnement tellurique**

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. Ces radionucléides sont l'uranium 235 ( $^{235}\text{U}$ ), l'uranium 238 ( $^{238}\text{U}$ ) et le thorium 232 ( $^{232}\text{Th}$ ) qui, en se désintégrant, donnent naissance à trois familles de radionucléides naturels. Outre ces trois familles naturelles radioactives, existent d'autres radionucléides dont la désintégration conduit à des éléments stables : les plus importants d'entre eux sont le potassium 40 ( $^{40}\text{K}$ ) et, dans une moindre mesure, le rubidium 87 ( $^{87}\text{Rb}$ ) [IRSN, 2015].

#### **➤ Principaux radionucléides naturels**

##### **a. L'Uranium**

Il existe au total 26 isotopes naturels et artificiels de l'uranium. Cependant, trois isotopes naturels possèdent des périodes suffisamment longues pour être encore actuellement détectables dans l'environnement terrestre : U-234, U-235 et U-238. Les isotopes 234 et 235 de l'uranium représentent respectivement 0.0057% et 0.71% de l'uranium naturel, dont la masse molaire moyenne est de  $238.03 \text{ g. mol}^{-1}$ .

Les trois principaux isotopes de l'uranium se désintègrent essentiellement suivant des émissions de rayonnement  $\alpha$ . L'uranium possède quatre valences distinctes, en fonction des conditions d'oxydoréduction du milieu : U (+III), U (+IV), U (+V) et U (+IV). Les valences (+IV) et (+VI) sont majoritaires dans l'environnement, respectivement en fonction des conditions réductrices ou oxydantes du milieu et la valence (+VI) est considérée comme la forme la plus stable et la plus mobile. Dans les roches sédimentaires, l'uranium est moyennement représenté dans les sédiments clastiques ( $0.5 - 4 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) et les calcaires ( $2 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), alors qu'il peut être concentré dans les roches phosphatées et les « black shales » océaniques ( $3 - 1200 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) [Gascoyne, 1992].

### **b. Le thorium**

Le thorium ( $Z = 90$ ;  $A = 212 - 236$ ) est un élément radioactif primordial appartenant à la famille des actinides et possède 25 isotopes. Parmi ces isotopes, seulement 6 sont d'origine naturelle, dont les isotopes Th-230 ( $T = 75.38$  ans), Th-232 et Th-234 ( $T = 24.1$  jours). Le Th-232 est le seul isotope relativement stable puisque sa période radioactive a été estimée à  $14.1 \times 10^{10}$  ans. La figure 4 présente les différents descendants des trois séries radioactives, ainsi que leurs modes de désintégration.

### **c. Le potassium**

Le potassium-40, que l'on trouve à l'état de traces dans le potassium naturel, est responsable de plus de la moitié de la radioactivité du corps humain, à raison d'environ 4 à 5000 désintégrations par seconde pour un homme de 80 kg. Avec l'uranium et le thorium, le potassium contribue à la radioactivité naturelle des roches et à la chaleur de la Terre. L'isotope  $^{40}\text{K}$  a une période de l'ordre de 1,251 milliard d'années. Il se situe entre deux isotopes stables et beaucoup plus abondants ( $^{39}\text{K}$  et  $^{41}\text{K}$ ) qui constituent 93.25% et 6.73 % de cet élément.

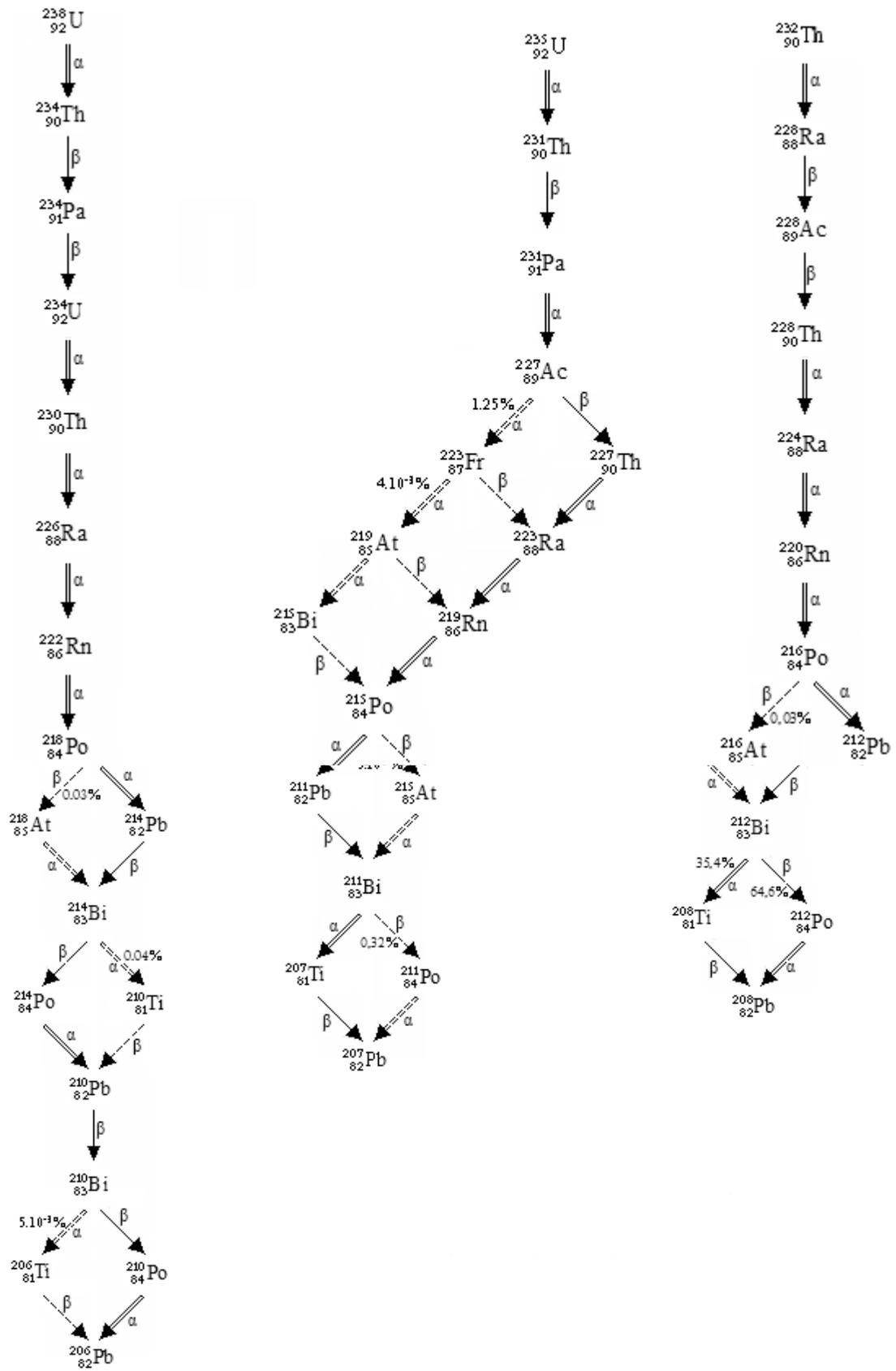


Figure 4. Chaînes de désintégration de l' $^{238}\text{U}$ , de l' $^{235}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$ .

Le  $^{40}\text{K}$  possède la particularité de se désintégrer en deux noyaux différents : dans 89 % des cas en  $^{40}\text{Ca}$  par désintégration bêta moins ; dans 11 % des cas en  $^{40}\text{Ar}$  par capture électronique suivie d'une émission gamma de 1,46 MeV. Cette émission gamma joue un rôle important car elle sert à identifier les désintégrations du  $^{40}\text{K}$ .

## 2. Sources artificielles

Par opposition aux radionucléides naturels, les radionucléides « artificiels » désignent les éléments radioactifs qui n'existent plus sur la Terre, et qui sont recréés artificiellement. Depuis le début du 20<sup>ème</sup> 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. Certains radionucléides peuvent être utilisés comme source de rayonnements pour des radiographies ou comme source d'irradiation pour des applications industrielles ou médicales (radiothérapie). Certains de ces radionucléides, fortement radioactifs produits par l'homme, constituent des déchets nucléaires devant être stockés sous haute surveillance.

Actuellement, une dizaine de radionucléides artificiels sont régulièrement mesurés dans l'environnement dont le strontium 90, le césium 137, l'iode 131, les isotopes du plutonium ( $^{238}\text{Pu}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ , et  $^{240}\text{Pu}$ ) et l'américium -241.

Ces radionucléides ont trois origines principales :

- ✓ Les rejets réglementés et autorisés des installations nucléaires et ceux liés aux activités de médecine nucléaire (examens radiologiques et traitements médicaux);
- ✓ Les retombées des essais atmosphériques d'armes nucléaires (de 1945 à 1980) et de l'accident de Tchernobyl en 1986; Fukushima en 2011.
- ✓ La rémanence des retombées de l'accident de Tchernobyl et des tirs atmosphériques constitue aujourd'hui le bruit de fond de la radioactivité artificielle de l'environnement.

Voici quelques produits anthropogénique dont la majorité est issue des essais d'armes et des réacteurs de fission (tableau 1).

Nucléide	Symbole	Demi-vie ( $T_{1/2}$ )
Tritium	$^3\text{H}$	12.3 ans
Iode 131	$^{131}\text{I}$	8.04 jours
Iode 129	$^{129}\text{I}$	$1.57 \cdot 10^7$ ans
Césium 137	$^{137}\text{Cs}$	30.17 ans
Strontium 90	$^{90}\text{Sr}$	28.78 ans
Technétium 99	$^{99}\text{Tc}$	$2.11 \cdot 10^5$ ans
Plutonium 239	$^{239}\text{Pu}$	$2.41 \cdot 10^4$ ans

*Tableau 1. Radionucléides produits par l'homme [ACRO, 1994].*

#### **IV. Filiation radioactive**

Une famille radioactive, appelée encore filiation radioactive, désigne une série de désintégrations spontanée d'un isotope instable vers un autre qui se termine par un élément chimique dont le noyau est stable. Le plomb est généralement le point stable auquel les chaînes de désintégration s'arrêtent. Ce sont les familles radioactives de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  ; qui produisant des séries de descendants radioactifs et qui forment la plupart des éléments radioactifs naturels existant.

#### **V. Notion d'équilibre radioactif ou équilibre séculaire**

Dans les filiations radioactives évoluant en système clos, il s'établit au cours du temps un état stationnaire tel que tous les descendants possèdent la même activité. Cet état est appelé équilibre séculaire et est atteint après un temps égal à environ 6 à 10 fois la période la plus longue de la chaîne de décroissance. Cet équilibre séculaire implique que le rapport d'activité entre un père et son fils direct est constant et égal à 1 le long de la filiation radioactive [Cuvier, 2015].

#### **VI. Eléments radioactifs dans les eaux thermo-minérales**

La plupart des eaux thermo-minérales sont radioactives. La radioactivité permanente est due à des sels de radium dissous, la radioactivité temporaire est due aux émanations

gazeuses des corps radioactifs dont le principale est le radon (durée de vie : 4 jours) [Risler, 1974].

Les concentrations des éléments radioactifs naturels que contiennent ces eaux thermo-minérales varient en fonction de différentes paramètres tels que ; la nature géologique des terrains traversés, temps de contact (âge de l'eau), température, solubilité de l'élément concerné, etc. Les radioéléments les plus significatifs sont le potassium 40, l'uranium naturel, le radium 226, le radon et le thorium qui est relativement peu soluble dans l'eau.

### ***1. Uranium naturel***

La concentration de l'uranium naturel dans les eaux minérales est généralement faible et ne dépasse pas 2 µg/l (50 mBq/l de radioactivité  $\alpha$ ). Toutefois à l'émergence, certaines eaux minérales peuvent avoir des teneurs dépassant 10 µg/l.

### ***2. Thorium***

Le thorium compte 6 isotopes naturels, le plus abondant étant l'isotope 232 suivi des isotopes 228 et 230. La solubilité du thorium dans les eaux souterraines est très faible et dépasse rarement 1 µg/l. A la teneur de 1 µg/l de thorium 232 correspond une radioactivité  $\alpha$  de 4 mBq/l.

### ***3. Potassium 40***

Le potassium 40 représente 0,01 % du potassium naturel, ce dernier étant assez abondant dans l'écorce terrestre (2.6 %); les eaux minérales 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 (la teneur de 10 mg/l de potassium naturel correspond à une activité alpha d'environ 260 mBq/l).

### ***4. Radium 226***

Ce radioélément, descendant de l'uranium 238, est émetteur  $\alpha$  (à coté du radium 226 on rencontre également les deux autres descendants du thorium 232 : Le radium 228 émetteur  $\beta$  et le radium 224 émetteur  $\alpha$ . Les teneurs en radium 226 dans 228 – émetteur  $\beta$  des eaux minérales sont très faibles, de l'ordre du picogramme; sa concentration dans l'eau est

indiquée en mBq/l. Les eaux minérales peuvent avoir des concentrations de quelques dizaines à quelques centaines de mBq/l.

### **5. Radon**

Il est généralement très abondant dans les eaux souterraines et aussi dans les eaux minérales. A l'émergence, il n'est pas rare de rencontrer des concentrations de quelques dizaines à plusieurs centaines de Bq/l. Cependant, comme il est indiqué au paragraphe précédent, le radon s'échappe de l'eau minérale dès que celle-ci est mise à l'air libre. Ce phénomène peut se traduire par des accumulations de radium dans les réservoirs de stockage ainsi que dans les galeries où sont situés les captages des sources d'eau minérale.

### **6. Le carbone 14**

Se forme dans l'atmosphère terrestre sous l'action des neutrons cosmiques sur l'azote. La concentration moyenne du carbone 14 dans le carbone naturel (principalement le carbone 12 stable) est de l'ordre de 10. Il se désintègre en émettant des particules  $\beta$  (156 keV). Dans les eaux minérales, le carbone se trouve principalement sous forme d'ions bicarbonates ( $\text{HCO}_3$ ). L'activité du carbone 14 contenu dans 1 g de carbone naturel (en prenant une abondance de  $10^{-12}$ ) est d'environ 0,2 Bq de rayonnement  $\beta$ . Sa concentration dans les eaux minérales est très faible. Sa présence est surtout utilisée pour étudier l'âge de l'eau.

### **7. Le tritium**

Le tritium est l'isotope radioactif de l'hydrogène qui se forme dans l'atmosphère sous l'action des neutrons cosmiques sur l'azote. Cette production naturelle de tritium conduit à une concentration d'environ 1 atome de tritium pour  $10^{18}$  atomes d'hydrogène stable (H). La désintégration du tritium donne lieu à une émission de rayonnement  $\beta$  négatif (0,0186 MeV) avec production d'hélium stable. La période est  $T = 12,2$  a. Pour caractériser la concentration du tritium dans les eaux minérales on utilise l'unité dite "UNITE TRITIUM" (UT). 1 UT = 1 atome de tritium pour  $10^{18}$  atomes d'hydrogène. Dans les eaux minérales, les concentrations en tritium s'échelonnent de 1 UT à environ 25 UT. Les eaux très "anciennes" sont caractérisées par des concentrations d'1 ou 2 UT. Les eaux "jeunes" ont des valeurs plus élevées. A une eau ayant 1 UT correspond une radioactivité de 0,12 Bq/l (de rayonnement  $\beta$  de 0,0186 MeV) [DNEMT, 2000]. La concentration du tritium dans les eaux minérales est très faible. Sa présence est surtout utilisée pour étudier l'âge de l'eau.

## VII. Grandeurs dosimétriques

La radioprotection est un ensemble de mesure destinées à assurer la protection de l'homme et de son environnement contre les effets néfastes des rayonnements ionisants. Trois unités principales sont utilisées en radioprotection (tableau 2) chacune servant respectivement à quantifier trois grandeurs qui dépendent de l'activité d'une source, de son énergie et des effets biologiques susceptibles d'être engendrés suite à une exposition.

Grandeurs dosimétriques	Définitions	Unités
Activité (A)	Nombre de désintégrations par seconde	Bequerel (Bq)
Dose absorbé(D)	Quantité d'énergie transférée à la matière	Grays (Gy)
Dose équivalente ( $H_T$ )	Effet des rayonnements sur l'organisme	Sievert (Sv)

Tableau 2 . Grandeurs dosimétriques [IRSN, 2007].

### 1. L'activité (A)

L'activité représente le nombre de désintégration qui se produit par unité de temps. L'activité est exprimée en Bequerel (Bq) correspondant à une désintégration par seconde.

### 2. La dose absorbé (D)

Les rayonnements ionisants interagissent avec la matière qu'ils pénètrent et lui transfèrent de l'énergie. Tout d'abord exprimée en rad, elle est actuellement exprimée en Grays (Gy) correspondant aux joules par kilogramme ( $1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad} = 1 \text{ J/kg}$ ). Le débit de dose est défini comme une énergie absorbée par kilogramme et par unité de temps, c'est-à-dire comme une dose absorbée par unité de temps (Gy/s).

### 3. La dose équivalente ( $H_T$ )

La dose équivalente mesure l'impact biologique des différents types de rayonnements sur un organe ou un tissu. Elle est exprimée en Sievert (Sv). Pour cela, un facteur de pondération radiologique ( $w_R$ ) appliqué à la dose moyenne  $D_{T,R}$  dans l'organe (moyenne pour l'organe ou le tissu T de la dose absorbée du rayonnement R) est introduit.  $w_R$  est établi par la CIPR et par L'International Commission on Radiation Units and Measurements (ICRU) (Tableau 3) ; il a ainsi pour but de refléter la nocivité de chaque type de rayonnement. Cette dose équivalente, utilisée dans le domaine de la

radioprotection et donc dans le cadre réglementaire de faibles niveaux d'exposition, est:

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (5)$$

Type de radiation et énergie	Facteur de pondération radiologique $W_R$
Photons toutes énergies	1
Electrons toutes énergies	1
Neutrons	
< 10 keV	5
De 10 keV à 100 keV	10
De 100 keV à 2 MeV	20
De 2 MeV à 20 MeV	10
20 MeV	5
Protons (autres que les protons de recul) d'énergie >2 MeV, particules alpha, fragments de fission, ions lourds	20

*Tableau 3. Facteurs de pondération radiologique des différents types de radiation en fonction de leurs énergies.*

#### 4. La dose efficace (E)

En radioprotection, la dose efficace n'est pas une grandeur physique mais une grandeur de radioprotection mesurant l'impact sur les tissus biologiques d'une exposition à un rayonnement ionisant, notamment à une source de radioactivité. L'unité de dose efficace est le sievert (Sv), en l'honneur du physicien Rolf Sievert, qui équivaut à un joule par kilogramme (J/kg). Cette grandeur se définit comme la somme des doses équivalentes pondérées délivrées aux différents tissus et organes du corps par l'irradiation.

Cette somme peut être considérée comme la dose effective qui, si elle était administrée de façon uniforme au corps entier, entraînerait le même préjudice pour la santé (même nombre de cas de mortalité par cancer ou effets génétiques notamment) que l'ensemble des doses, plus ou moins différentes les unes des autres, réellement reçues par les divers organes ou tissus. Elle est définie par la formule suivante :

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \cdot \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (6)$$

où  $W_T$  est le facteur de pondération tissulaire valable pour le tissu ou l'organe T. Ce facteur représente la contribution de cet organe au risque global pris en compte pour tout l'organisme. La somme de tous ces facteurs sur l'ensemble de l'organisme est égale à 1 (voir tableau 4).

Tissu ou organe	Facteur de pondération tissulaire $W_T$
Gonades	0,20
Moelle	0,12
Colon	0,12
Poumon	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Sein	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Os	0,01
Reste du corps	0,05

Tableau 4. Facteurs de pondération des différents types de tissus [Cressier, 2010] .

# *CHAPITRE II*

## *INTERACTION*

### *RAYONNEMENTS MATIÈRE*

## I. Rappel sur les rayonnements ionisants

### II. Introduction

Les rayonnements ionisants font partie naturellement de l'environnement de l'Homme, qu'ils soient d'origine cosmique ou tellurique. L'exposition aux rayonnements ionisants peut également être d'origine artificielle notamment au travers de certaines pratiques de soins actuelles (scanner, radiothérapie), d'expositions professionnelles (radiothérapeute, mineurs, travailleurs du cycle du nucléaire) ou d'expositions accidentelles (Tchernobyl, Fukushima). La quantification de leur impact sur la santé est un sujet majeur de recherche depuis de nombreuses années [Drubay, 2015].

On appelle rayonnement ou radiation le processus d'émission ou de transmission d'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

**1. Rayonnement ionisant** : Un rayonnement est dit ionisant quand il est susceptible d'arracher des électrons à la matière.

Un rayonnement ionisant est un transport d'énergie sous la forme de particules ou d'ondes électromagnétiques d'une énergie supérieure à 2.4 eV, pouvant produire des ions directement ou indirectement [Jimonet, 2007].

**2. Rayonnement non-ionisant** : Contrairement aux rayonnements ionisants, l'énergie des rayonnements non ionisants est, par définition, insuffisante pour troubler l'édifice électronique d'un atome [Coequyt, 2005].

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

**a. Radiations directement ionisantes** : comme les électrons, particules  $\alpha$ , positrons, protons, deutons...

**b. Radiations indirectement ionisantes** : comme les neutrons, rayons X, rayons  $\gamma$ .

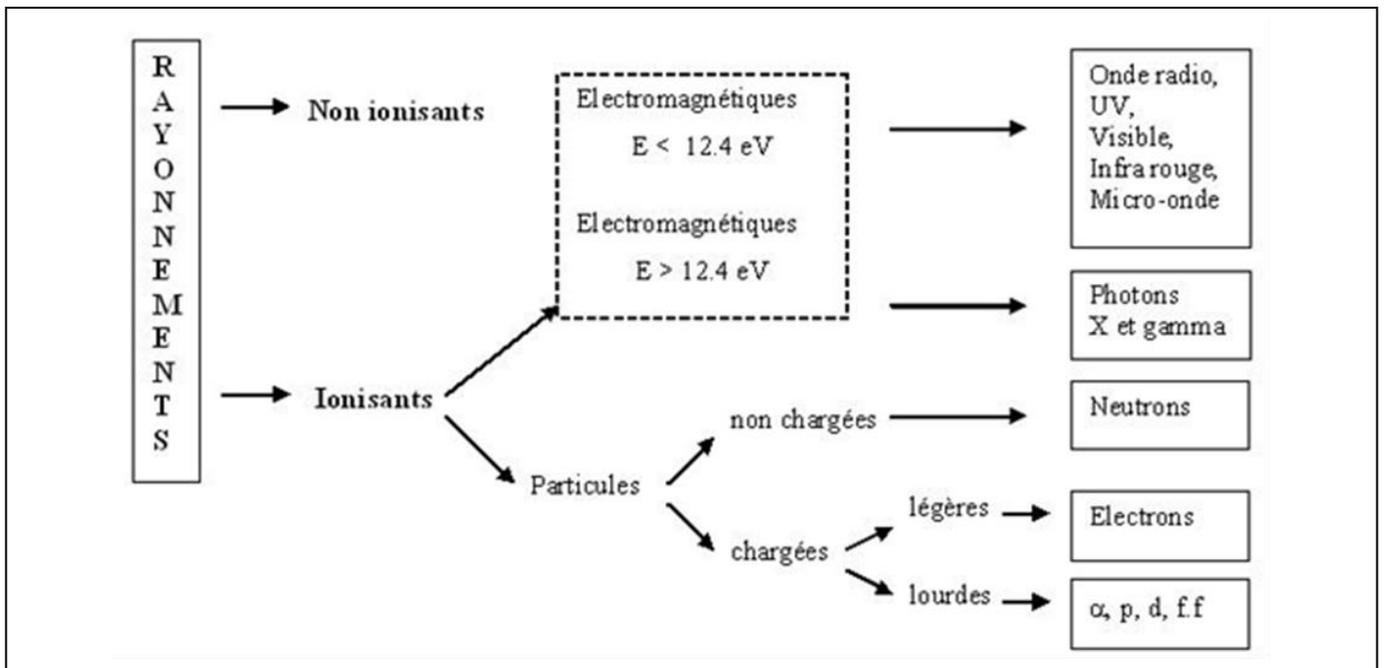


Figure 5. Classification des rayonnements [Jimonet, 2007].

### III. Effet biologiques des rayonnements ionisants

Les effets des rayonnements ionisants, qu'ils soient indésirables (irradiation accidentelle...) ou exploités (radiologie, imagerie nucléaire, radiothérapie...), reposent sur les interactions fondamentales qui interviennent entre les dits rayonnements et la matière. Le type des interactions occasionnées dépend de la nature des particules incidentes et de leur énergie, mais aussi du matériau irradié. Ceci conduit à des transferts d'énergie très divers [Frelin, 2006].

### IV. Différents Types d'Exposition

L'Homme peut être exposé de deux façons aux rayonnements ionisants. Lorsque la source de l'irradiation est extérieure à l'organisme considéré, nous parlons d'exposition **externe**, alors que dans le cas où la source est absorbée à l'intérieur de l'organisme, nous parlons d'exposition **interne** [Cressier, 2010].

**a. L'exposition externe :** Elle résulte de l'exposition à un champ de rayonnement. Celui-ci est dû essentiellement aux radionucléides primordiaux et aux rayons cosmiques pour l'exposition naturelle. En irradiation externe, il suffit de s'éloigner ou de se protéger de la source pour que l'irradiation cesse.

**b. L'exposition interne :** Elle est due à la pénétration dans l'organisme de radioéléments par inhalation (gaz, poussière, aérosol), blessure, ingestion d'eau ou d'aliments contenant des corps radioactifs ou par voie transcutanée. Elle provient pour l'essentiel de l'inhalation du radium et de ses descendants et de l'ingestion de radium et de potassium [De Guido, 2000].

## **V. Effets des Rayonnements Ionisants sur l'Organisme**

Les effets sur l'organisme des rayonnements ionisants sont de deux types. Ils résultent soit d'un risque aléatoire ou stochastiques soit d'un risque direct ou déterministe.

### **a. Risque Stochastique**

Le risque aléatoire résulte de la modification du matériel génétique. Il induit des cancers si les altérations ont touché les cellules somatiques, ou des modifications phénotypiques de la descendance si les altérations touchent les cellules germinales. Ce risque est réel après toute irradiation quelle que soit la dose, même si la probabilité d'apparition d'effets néfastes est linéairement dépendante de l'intensité de l'irradiation. Cette relation est facilement démontrée pour les fortes doses mais reste non prouvée pour les faibles doses. Cependant, il faut noter qu'une fois apparu, la gravité de cet effet est indépendante de l'irradiation initiale. Ces observations ont été établies à partir des données épidémiologiques recueillies avec le suivi des survivants des bombardements d'Hiroshima et de Nagasaki et l'apparition des cancers radio-induits.

### **b. Risque Déterministe**

Le risque direct ou déterministe est dû à l'effet physique de l'irradiation. Ce type d'effet apparaît toujours à partir d'une dose donnée appelée dose seuil. Cependant, la gravité de cet effet augmente avec la dose, et la vitesse d'apparition des effets est d'autant plus grande que la dose est élevée. De plus, selon l'individu, la valeur seuil de cet effet est plus ou moins grande car certaines maladies peuvent affaiblir les mécanismes de défense et de réparation de l'ADN et des cellules, engendrant ainsi une certaine radiosensibilité [Cressier, 2010].

Nature de la source	Exposition humaine à la radioactivité selon l'OMS : mSv par personne et par an	Radioactivité naturelle en %	Radioactivité artificielle en %
Radon.	1,3	42%	
Irradiation d'origine médicale (Radiographies, scanners, radiothérapies...)	0,6		20%
Eléments absorbés par alimentation (essentiellement du potassium 40 contenu naturellement dans les aliments)	0,5	16%	
Rayonnement cosmique	0,4	13%	
Rayonnement interne	0,2	6%	
Autres origines artificielles, sauf énergie nucléaire civile (industries minières diverses, retombées atmosphériques des essais militaires, instruments de mesure, certains procédés industriels tels la radiographie de soudures...)	0,1		3%
Energie nucléaire civile	0,01		0,3%
<b>Total</b>	<b>3,1</b>	<b>77%</b>	<b>23%</b>

Tableau 5. Exposition humaine à la radioactivité naturelle et artificielle [Cressier, 2010].

## VI. Les Rayonnements Electromagnétiques

Ce type de rayonnements correspond à une onde purement énergétique répondant donc aux lois de la physique ondulatoire. Les rayonnements ionisants de ce type sont compris entre le rayonnement ultraviolet et les rayonnements cosmiques :

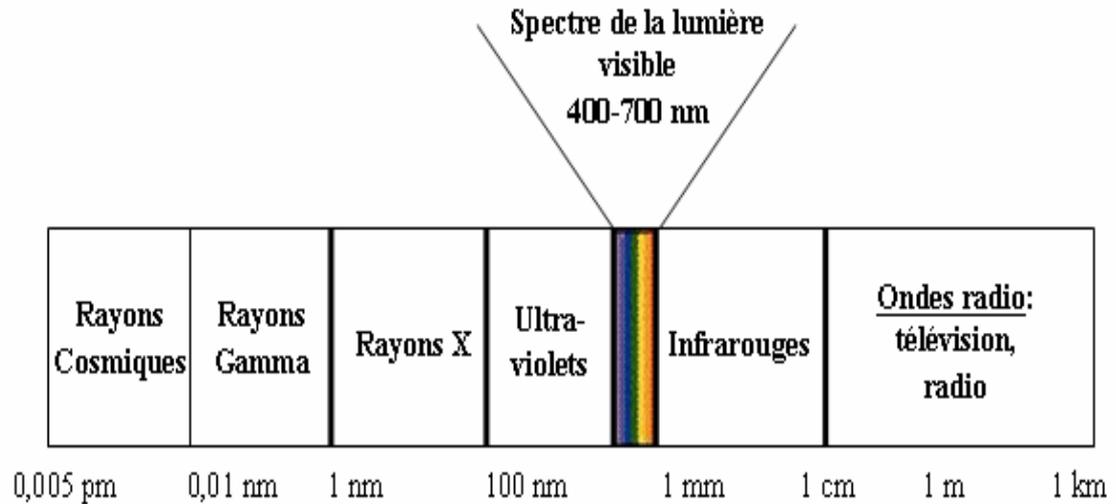


Figure 6. Spectre électromagnétique.

### 1. Les rayonnements photon X

Les rayonnements X sont similaires aux rayonnements  $\gamma$ , seule l'origine de ce rayonnement diffère. En effet, ce dernier résulte soit du freinage des particules  $\beta$  dans la matière soit du changement de niveaux d'énergie des électrons dans les atomes.

### 2. Les rayonnements photon $\gamma$

Le rayonnement gamma accompagne la stabilisation des atomes ne présentant pas de déséquilibre baryonique. Nous noterons qu'en général, la désintégration gamma suit une désintégration  $\alpha$  ou  $\beta$ . Ce type de rayonnement a été mis en évidence par Paul Villard en 1900. Il est dû à une réorganisation des nucléons et de la charge électrique à l'intérieur du noyau. Ce rayonnement, constitué uniquement de photons, est par conséquent purement énergétique. Nous remarquerons que lorsque ce rayonnement interagit avec la matière, l'énergie décroît progressivement au fur et à mesure que les photons incidents, énergétiquement indépendants les uns des autres, interagissent avec, entre autres, les électrons des cortèges électroniques des atomes. L'atténuation de ce faisceau est ainsi due à un transfert d'énergie aboutissant à l'accélération d'électrons qui sont ensuite ralentis par ionisations progressives des structures voisines. Il a aussi été remarqué qu'une partie de l'énergie absorbée peut être restituée sous forme d'un photon secondaire ou diffusée selon

une direction différente de celle du photon incident. L'atténuation de ce faisceau étant longue, il est très pénétrant. En effet, il traverse plusieurs centaines de mètres et pénètre profondément dans les tissus. Les particules émises au cours d'une désintégration radioactive interagissent différemment avec la matière selon leur charge électromagnétique, leur masse et leur énergie [Leconte, 2012] :

Lorsqu'ils traversent la matière, les photons peuvent subir différents types d'interactions en fonction de leur énergie et du milieu en présence (densité, type d'atome, etc.) : l'effet photoélectrique, la production de paires électron-positron, la diffusion Compton (dite aussi inélastique ou incohérente), la diffusion Rayleigh (dite aussi élastique ou cohérente), la photodésintégration ou encore la diffusion nucléaire résonante (ou effet Mössbauer). Parmi ces processus, seuls les trois premiers sont significatifs et décrits ci-dessous [Pirard, 2006].

### a. L'effet photoélectrique

C'est un phénomène d'absorption totale. Le photon incident disparaît après avoir donné toute son énergie  $h\nu$  à un électron d'un atome du milieu [Yannick, 2011]. L'électron éjecté emporte une énergie cinétique  $E_c$  égale à la différence entre l'énergie  $h\nu$  du photon incident et son énergie de liaison  $W$ .

$$E_c = h\nu - W \quad (2.2)$$

A la suite de l'expulsion de l'électron par effet photoélectrique, il ya réarrangement électronique avec émission de photons de fluorescence

- Soit de photon X pour les atomes lourds
- Soit de photons ultra-violet pour les atomes légers.

Le photon de fluorescence peut à son tour expulser un deuxième électron de l'atome ; dans ce cas on dit qu'il s'agit d'un électron Auger.

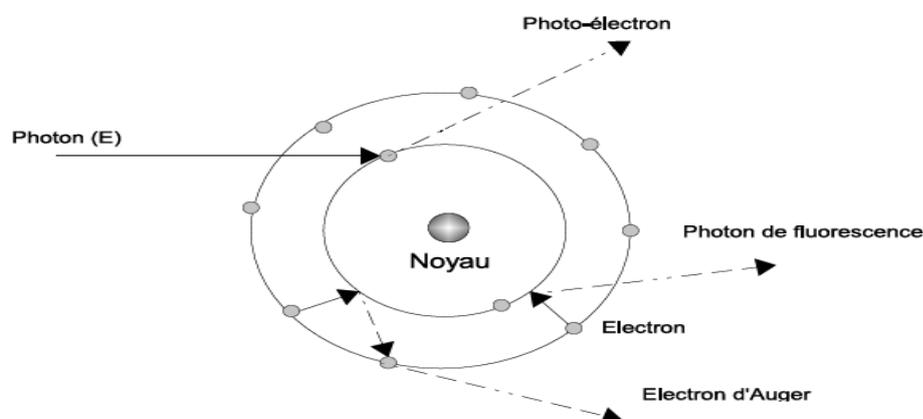


Figure 7. Effet photoélectrique.

### b. La diffusion Compton

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

$$\Delta \lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi) \quad (2.3)$$

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

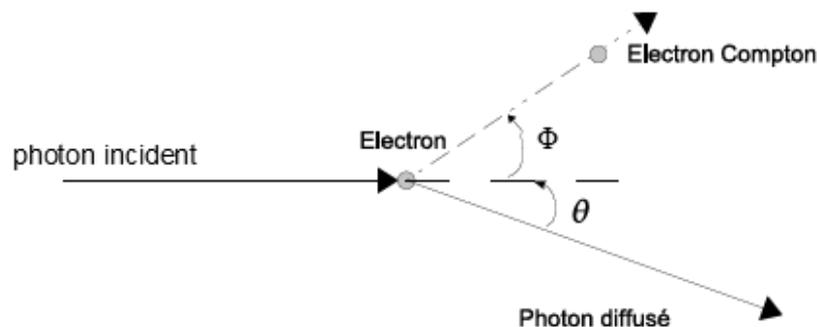


Figure 8. Effet Compton.

### c. La création de paire $e^+e^-$

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

$$E_c = h\nu + 2m_e \quad (2.4)$$

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

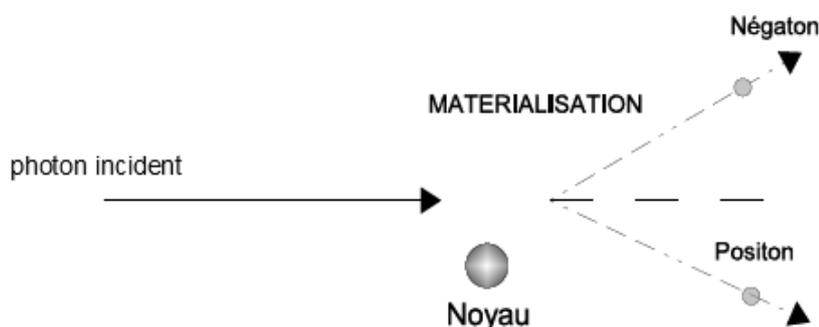


Figure 9. Création de paire.

### 3. Importance relative des trois effets

Des trois effets, seul l'effet photoélectrique conduit à une absorption totale de l'énergie du photon incident, sous forme d'énergie cinétique d'électrons primaires émis à l'endroit de l'interaction ou à moins d'un millimètre. Les interactions par diffusion Compton ou par création de paire vont à l'inverse conduire à la perte d'une fraction de l'énergie du photon incident et à la diffusion de photons secondaires dans tout le matériau, susceptibles d'interagir à leur tour à une distance de plusieurs centimètres ou de s'échapper du matériau. La capacité du détecteur à obtenir des informations fiables sur le lieu d'interaction et l'énergie du photon incident s'en trouvera donc dégradée. Pour cette raison, on cherchera à maximiser la fraction du rayonnement qui sera absorbée par effet photoélectrique. Les dépendances des sections efficaces d'absorption par atome selon chacun des trois processus nous montrent qu'il faut pour cela un numéro atomique  $Z$  élevé (dépendance en  $Z^n$  avec  $n$  compris entre 4 et 5) [Sellès, 2006].

L'effet photoélectrique est dominant à basse énergie. Dans les matériaux lourds, il cesse de l'être à partir de 500 KeV. A haute énergie, c'est l'effet de production de paire qui est prédominant, il commence à le devenir à partir de 5 MeV dans les matériaux de  $Z$  élevé. Entre les deux, se situe un domaine où c'est l'effet Compton qui domine. Pour les milieux de faible  $Z$  (carbone, air, eau, tissus humains), ce domaine est extrêmement large (de  $\approx 20$  KeV à  $\approx 3$  MeV).

La figure 10 résume la coexistence de ces trois effets en fonction du nombre atomique  $Z$  de la matière absorbante [Lefort, 1969].

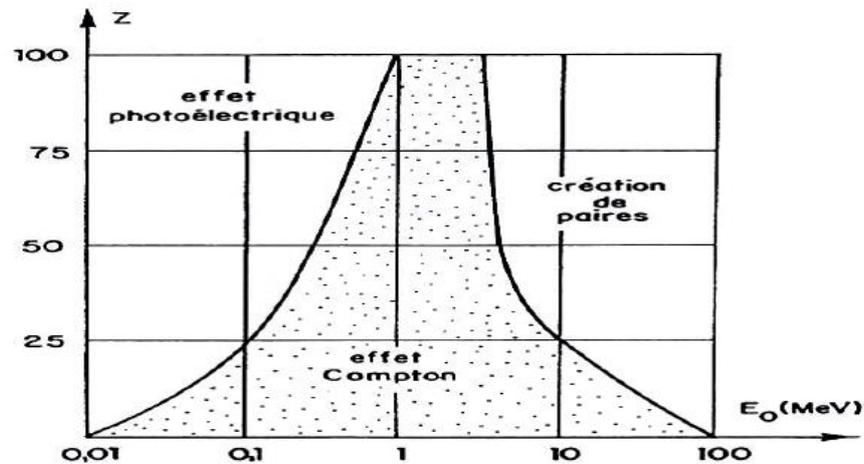


Figure 10. Interaction dominante entre rayonnement et matière en fonction du numéro atomique  $Z$  de l'atome et de l'énergie  $h\nu$  du photon incident.

#### 4. Section efficace d'interaction et coefficient d'atténuation

La probabilité pour un photon incident de déposer partiellement ou totalement son énergie dans la matière par un processus donné peut être exprimée par une section efficace atomique exprimée en  $\text{cm}^2$  ou en barns. La probabilité totale  $\sigma$  pour qu'un photon d'énergie donnée soit absorbé par un atome peut être exprimée par la somme des sections efficaces  $\sigma_{EP}$ ,  $\sigma_{DC}$  et  $\sigma_{PP}$  définies pour chaque processus d'interaction (respectivement l'effet photoélectrique, la diffusion Compton et la production de paire), [Pirard, 2006] :

$$\sigma = \sigma_{EP}, \sigma_{DC} \text{ et } \sigma_{PP} \quad (2.5)$$

La probabilité d'interaction du photon peut aussi être exprimée macroscopiquement par le coefficient d'atténuation linéaire,  $\mu$  (en  $\text{cm}^{-1}$ ), produit de la section efficace par la densité atomique  $n_a$  (en  $\text{cm}^{-3}$ ) :

$$\mu = \sigma \cdot n_a = \sigma \cdot \frac{\rho \cdot N_A}{M_{\text{mol}}} \quad (2.6)$$

(Avec de même  $\mu = \mu_{EP} + \mu_{DC} + \mu_{PP}$ )

Où  $\rho$  et  $M_{\text{mol}}$  sont la masse volumique et la masse molaire du matériau considéré et  $N_A$  le Nombre d'Avogadro [Pirard, 2006].

## VII. Généralités sur les détecteurs

Le principe de la détection d'un photon gamma repose sur la mesure de l'énergie qu'il a cédée (partiellement ou totalement) au matériau sensible via un des mécanismes d'ionisation considérés précédemment. Lorsque un rayonnement d'énergie  $E$  traverse un milieu (détecteur), il perd une partie ou toute son énergie dans ce milieu selon les différents processus d'interaction Rayonnement-matière (Effet photoélectrique, effet Compton, création de paires, . . . etc.). L'énergie perdue dans le détecteur laisse quelques atomes du milieu dans un état ionisé ou excité. Cette section présente le type de détecteur utilisé en spectroscopie gamma dans le domaine d'énergie de 20 keV à 10 MeV [Lyoussi, 2010]: Les semi-conducteurs. Un aperçu général est également donné de la chaîne électronique permettant de traiter le signal, de l'impulsion électrique générée dans la partie sensible à l'acquisition du spectre gamma.

### a. Les semi-conducteurs

Dans un solide cristallin, les électrons ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie situés à l'intérieur de bandes permises comme les bandes de valence et de conduction. Par définition, le passage des électrons de la bande de valence à celle de conduction est systématique pour un conducteur et impossible pour un isolant ; dans le cas intermédiaire, dit semi-conducteur, cette transition n'a lieu que suite à une excitation (agitation thermique ou particule ionisante). L'écart entre bandes de valence et de conduction, noté  $E_g$ , est typiquement de l'ordre de l'électronvolt pour un semi-conducteur [Pirard, 2006].

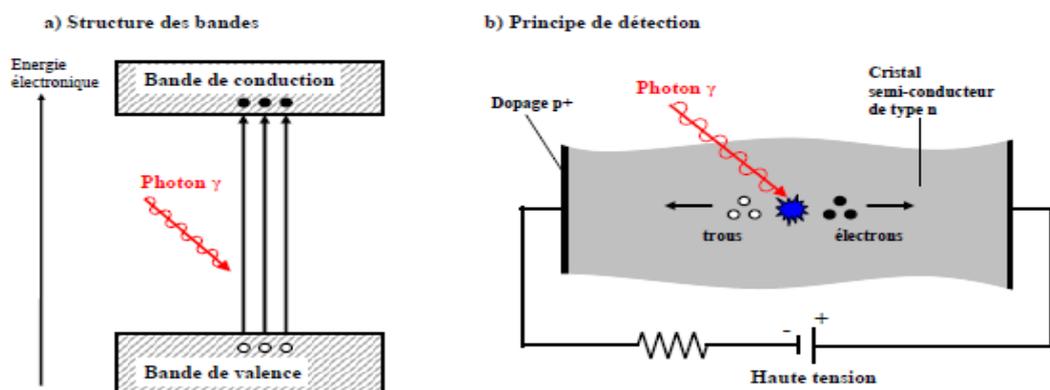


Figure 11. Principe du semi-conducteur : structure des bandes et fonctionnement [Pirard, 2006].

Si un champ électrique est appliqué dans le semi-conducteur, les électrons présents dans la bande de conduction (et les trous correspondants dans la bande de valence) deviennent mobiles et créent un courant. Le dépôt d'une quantité d'énergie  $E$  par un rayonnement ionisant peut se traduire par la création d'un nombre proportionnel de paires électrons-trous:

$$N_{eh} = \frac{E_{\gamma}}{W_{eh}} \quad (2.7)$$

Où  $W_{eh}$  est l'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou. Afin de drainer les porteurs de charge jusqu'aux bornes du semi-conducteur (électrodes de collecte) sans recombinaison, il est nécessaire de former une zone désertée de tout porteur libre. Ce type de zone, dite zone de déplétion, est obtenue avec les semi-conducteurs par une polarisation inverse des jonctions PN. Parmi les principales propriétés des semi-conducteurs les plus couramment utilisés, le germanium possède la bande interdite la plus étroite et permet de créer le plus grand nombre de porteurs de charge pour un dépôt d'énergie donné, minimisant ainsi la fluctuation statistique dans la mesure. Par ailleurs, seul le germanium peut être utilisé avec des volumes importants (plusieurs dizaines de  $\text{cm}^3$ ). Sa densité et son nombre atomique élevés en font le semi-conducteur le plus approprié pour la détection des rayonnements ionisants dans une plage d'énergie allant de la dizaine de keV à la dizaine de MeV [Pirard 2006].

Matériau	Ge	Si
Nombre atomique $Z$	32	14
Masse volumique $\rho$ [ $\text{g}/\text{cm}^3$ ]	5.32	2.33
Énergie de la bande interdite $E_g$ [eV]	0.66	1.12
Energie par électron-trou $W_{eh}$ [eV]	2.98	3.61
Mobilité des électrons $\mu_e$ [ $\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$ ]	3900	1500
Mobilité des trous $\mu_h$ [ $\text{cm}^2/\text{V}/\text{s}$ ]	1900	450

Toutes les valeurs indiquées correspondent à la température ambiante ( $300^\circ \text{K}$ ), à l'exception du germanium pour lequel  $T = 80^\circ \text{K}$ .

Tableau 6. Propriétés du semi-conducteur Ge, Si.

Si une faible largeur de bande interdite permet de mesurer l'énergie de la particule incidente avec le plus de précision, elle requiert cependant une température de fonctionnement suffisamment basse afin de minimiser les effets dus à l'agitation thermique comme le bruit sur le signal et l'augmentation du courant de fuite [Pirard, 2006].

Semi-conducteur	Largeur de la bande interdite $E_g$ (à 300 K)	Énergie de création de paire
Si	1.12 eV	3.61 eV (300 K)
Ge	0.67 eV	2.96 eV (90 K)
Diamant C	5.47 eV	13.2 eV (300K)
GaAs	1.43 eV	4.27 eV
CdTe	1.5 eV	4.43 eV (300 K)
HgI <sub>2</sub>	2.1 eV	4.15 eV

Tableau 7. Récapitulatif des largeurs de gap et de l'énergie de création de paire pour différents matériaux semi-conducteurs [Hustache Ottini et al. 2001].

### b. Détecteurs semi-conducteur couramment utilisés

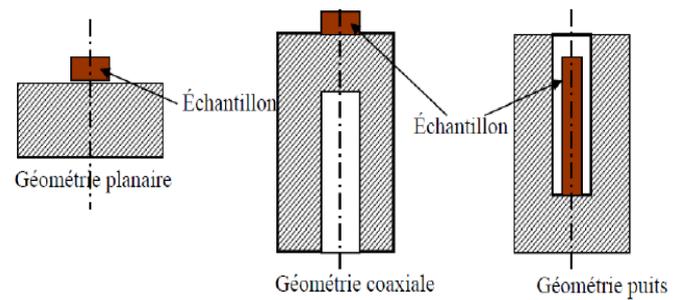
En physique nucléaire, les semi-conducteurs sont couramment utilisés pour la construction des différents types de détecteurs. Pour la détection des photons les germaniums sont les plus appropriés que silicium grâce à leurs bonnes caractéristiques (Z élevé).

Vis-à-vis des scintillateurs, les germaniums ont une excellente résolution en énergie, indispensable pour les mesures de spectrométrie-gamma car les pics correspondants aux différents photons gamma seront bien séparés, mais l'inconvénient de détecteur semi-conducteur par rapport à celui de scintillateur est que le Z élevé (53) de l'iode assure l'absorption totale de l'énergie d'un grand nombre de photons et le rapport pic d'énergie totale sur fond est plus favorable que dans les germaniums. Ainsi, l'efficacité d'absorption totale dans un NaI (Tl) peut être supérieure d'un ordre de grandeur à celle d'un détecteur au germanium. Les détecteurs semi-conducteurs les plus célèbres sont :

### c. Détecteurs germanium

Le germanium est largement utilisé en physique nucléaire pour la détection de photons. Avec ce matériau, il est possible d'obtenir des profondeurs de déplétion et donc de détection plus importantes qu'avec le silicium et donc des détecteur plus efficaces. Son Z plus élevé le rend, de plus, plus approprié. Les diverses configurations géométriques possibles de détecteurs au germanium sont présentées dans la figure 12.

Figure 12. Les différentes configurations géométriques des détecteurs germanium [Tsoulfanidis, 1995].



#### d. Détecteurs germanium de haute pureté HPGe

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  $\text{cm}^3$ , 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 de détecteur de  $400 \text{ cm}^3$  de volume et des épaisseurs déplétées de plusieurs centimètres. Étant donné le très faible gap du germanium (0,7 eV), à température ambiante, la génération thermique de porteurs induits un courant trop élevé lorsque de détecteur est polarisé. Ce type de détecteur fonctionne à la température de l'azote. L'avantage, par rapport aux Ge (Li) qu'ils ont tendance à supplanter, est que les HPGe n'ont pas besoin d'être refroidi en dehors des périodes d'utilisation. L'avantage majeur du germanium vis à vis des scintillateurs est son excellente résolution en énergie, indispensable pour les expériences dans lesquelles les spectres comportent un grand nombre de raies [Hustache Ottini et al. 2001].

*CHAPITRE III*

*SPECTROMÉTRIE  $\gamma$*

## **I. Introduction**

Le développement de la spectrométrie  $\gamma$  a débuté avec l'essor des sciences et des technologies nucléaires afin de répondre aux besoins de contrôle, de caractérisation et d'analyse des matières radioactives. Cette technique de mesure exploite une propriété fondamentale observée par la plupart des noyaux instables : l'émission de rayonnements consécutifs au processus de désintégration nucléaire. Elle est donc dite « non-destructive » car elle permet de respecter l'intégrité de l'objet à analyser.

L'intérêt de la spectrométrie  $\gamma$  n'a cessé de croître depuis des années, tant du point de vue métrologique que du point de vue des applications. Cet essor a été rendu possible grâce à une meilleure compréhension du processus d'interaction des photons avec la matière et surtout grâce à l'apparition des détecteurs semi-conducteurs dans les années 60. La spectrométrie  $\gamma$  est alors devenue un outil d'étude puissant des schémas de désintégration avec lequel des incertitudes de mesure de l'ordre de 10 (en relatif) peuvent être atteintes. Elle est aujourd'hui utilisée dans des secteurs très divers (exemples : datation, climatologie, astrophysique, médecine) et dans pratiquement toutes les étapes du cycle du combustible [Leconte, 2006].

## **II. La spectroscopie gamma : principe et applications**

La spectroscopie de rayonnement gamma consiste à mesurer l'énergie et à compter le nombre de photons émis d'un échantillon de manière naturelle (radioactivité) ou artificielle (durant ou après une irradiation par des neutrons ou des protons) pendant une durée donnée. A partir de l'histogramme enregistré ou spectre, il est alors possible d'identifier différents radioéléments (analyse qualitative) et de déterminer leur concentration (analyse quantitative) dans l'échantillon étudié [Pirard, 2006].

La figure 13 montre un spectre de radioactivité naturelle d'une durée de 1000 secondes enregistré au laboratoire avec un détecteur de germanium ultra-pur. Les différentes raies observées proviennent toutes directement ou indirectement de la désintégration du potassium  $^{40}\text{K}$ , de l'uranium  $^{238}\text{U}$  et du thorium  $^{234}\text{Th}$ .

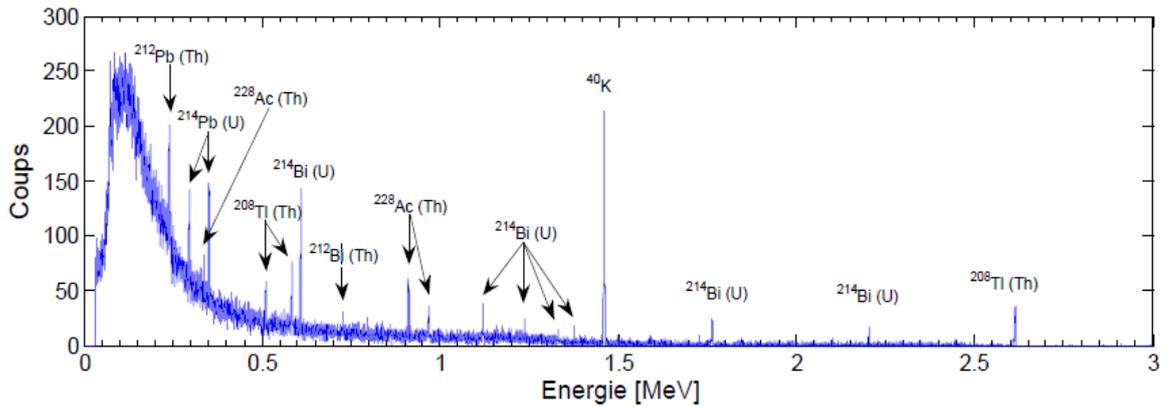


Figure 13. Spectre gamma de 1000 s enregistré sans source de calibration avec un détecteur HPGe coaxial. Toutes les raies observées (ainsi que le continuum) proviennent de la radioactivité naturelle, c'est-à-dire de la désintégration des éléments K, U et Th présents dans l'environnement du détecteur (essentiellement le sol et les murs).

### III. Présentation d'une chaîne de spectrométrie gamma

#### 1. L'ensemble de détection

L'ensemble de détection permet de mesurer un signal issu de l'interaction des rayonnements ionisants avec le cristal de germanium, de l'amplifier et de le mettre en forme en vue d'une analyse ultérieure. La chaîne d'acquisition est composée de cinq parties (Figure 14) : le détecteur (dont la partie sensible est un cristal de germanium), le préamplificateur, l'amplificateur, le convertisseur analogique-numérique (ADC) ainsi que l'analyseur multi canaux (MCA).

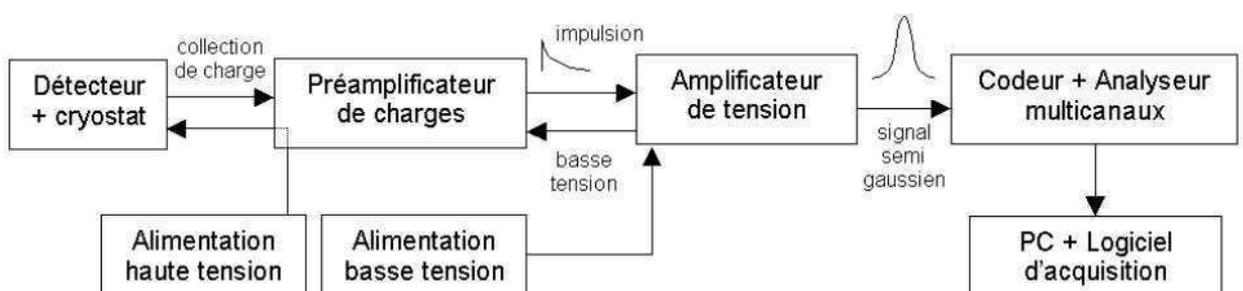


Figure 14. Schéma de principe d'une chaîne de mesure de spectrométrie  $\gamma$  [Leconte, 2006].

#### 2. Electronique associée

Le rôle essentiel de l'électronique est d'assurer l'amplification, la mise en forme et l'acquisition du signal délivré par le spectromètre gamma.

### a. Le préamplificateur

C'est le premier dispositif rencontré en sortie du détecteur. Pour diminuer le bruit électronique, le préamplificateur doit être placé le plus près possible du détecteur et il est solidaire du cryostat. Le rôle principal du préamplificateur est de réaliser une première amplification du signal généré par l'interaction des  $\gamma$  avec le cristal. Il joue également le rôle d'adaptateur d'impédance entre la sortie du détecteur et l'entrée de l'étage suivant. Il est en général placé à proximité du cristal sous le même capot. De cette manière, les composants sensibles à la température sont refroidis et le bruit thermique minimisé [Leconte, 2006].

### b. L'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. L'amplification est toujours réalisée le plus tôt possible afin de limiter le bruit généré par le module de mise en forme. Les amplificateurs sont fournis avec une sortie unipolaire et bipolaire, le rapport optimal signal sur bruit est obtenu en sélectionnant la sortie unipolaire (voire la figure 15).

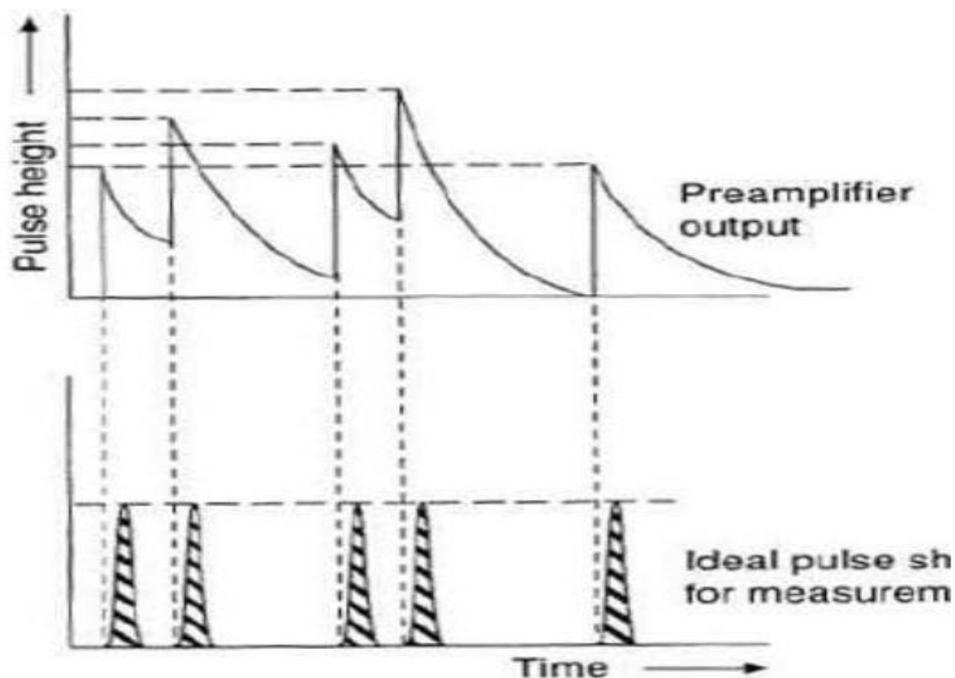


Figure 15. L'amplificateur.

On rencontre en général deux types de système :

**b. 1. Les amplificateurs à mise en forme CR-RC** : il s'agit de l'amplificateur le plus couramment rencontré. Il utilise un circuit intégrateur CR suivi d'un circuit différentiateur RC, séparés par un amplificateur opérationnel pour éliminer toute interférence de l'un sur l'autre, et réalise une mise en forme pseudo-gaussienne. Le réglage de la constante de temps du système permet d'optimiser la capacité de traitement ou la résolution selon ses besoins. Ce type d'amplificateur est bien adapté pour des détecteurs de petit volume (quelques dizaines de  $\text{cm}^3$ ) et pour des taux de comptage faibles (quelques  $10^4 \text{ s}^{-1}$ ).

**b. 2. Les amplificateurs intégrateurs** (ou *GI pour Gated Integrator*): ce type de système est utilisé lorsque des taux de comptage élevés sont rencontrés ( $>10 \text{ s}$ ) et pour des détecteurs de gros volume (plusieurs centaines de  $\text{cm}^3$ ). En effet, l'utilisation de constantes de mise en forme courtes sur des amplificateurs CR-RC introduit des défauts balistiques liés à une collection incomplète de charges. On utilise alors un circuit qui intègre sur une capacité le signal issu du préamplificateur pendant une durée suffisamment longue. Le système s'avère très performant à haut taux de comptage et permet de gagner un facteur 3 à 4 sur la résolution en énergie [Courtine, 2007].

**c. Le convertisseur analogique-numérique** (ou ADC pour *Analog to Digital Converter*) 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  $\mu\text{s}$  (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.

**d. L'analyseur multicanaux** (ou MCA pour *Multi Channel Analyser*) 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 comme indiqué dans la figure 16. La plupart du temps, le logiciel utilisé pour l'acquisition des données permet également de réaliser une première analyse qualitative et quantitative des spectres. Cette opération nécessite entre 1,5 et 3  $\mu\text{s}$  (Canberra).



Figure 16. Histogrammes donnant le nombre de photons détectés en fonction de nombre de canal.

#### e. Le logiciel de traitement et d'analyse du signal

Le logiciel utilisé dans l'équipe est Genie2000, logiciel commercialisé par la société Canberra (Canberra) qui identifiera automatiquement l'élément, puis calculera son activité et l'incertitude sur la base de la bibliothèque. Tous les résultats seront finalement résumés et cotés sur un rapport (voir annexe 1).

#### f. Les pics

Par la position des pics (ou énergie des photons), on entreprend l'analyse qualitative du spectre. Par la surface des pics (ou nombre d'impulsions), on entreprend l'analyse quantitative du spectre : on détermine pour chaque radioélément (présent dans l'échantillon) son activité en Becquerels ramenée à la masse ou au volume de l'échantillon. (Bq/kg ou Bq/l). En général, la forme du pic est parfaitement gaussienne.

#### g. Etalonnage

Le logiciel Genie2000 permet de visualiser en temps réel la sortie de l'analyseur multi-canaux, à savoir un spectre avec en abscisse le numéro de canal et en ordonnée le nombre de coups dans ce canal. De manière à pouvoir identifier les désintégrations radioactives mises en jeu, le spectre doit être étalonné en énergie. Cela consiste à établir une relation polynômiale entre le numéro de canal et l'énergie déposée dans le cristal. Le spectre obtenu est alors un ensemble de pics distribués en énergie se rajoutant à un fond (Figure 17).

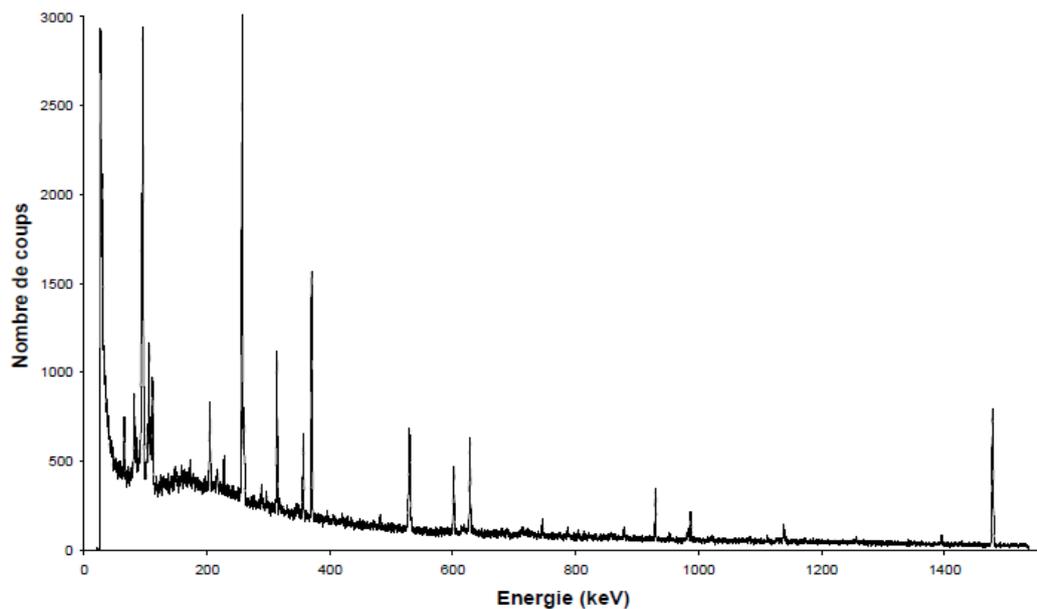


Figure 17. Exemple de spectre de radioactivité naturelle obtenu après plusieurs jours de comptage [Courtine, 2007].

L'énergie du pic correspond à l'énergie du photon incident, ce qui permet d'identifier le radioélément émetteur gamma. Les pics sont en réalité des gaussiennes dont la largeur à mi-hauteur varie avec l'énergie. Ceci étant dû à une déformation par le détecteur. La surface des pics est alors proportionnelle à l'activité. De manière à évaluer l'activité de l'échantillon, il faut pouvoir, pour chacun des pics localiser le centre du pic ainsi que les limites de celui-ci ; la surface du pic sera calculée entre ces limites (les algorithmes utilisés par Genie2000 pour la recherche de pics et le calcul des surfaces sont détaillés dans l'annexe 1 « Algorithmes d'analyses utilisés par le logiciel Genie2000 »). Il est nécessaire d'avoir effectué au préalable un étalonnage en résolution<sup>3</sup> du spectre (la résolution entrant de manière indirecte dans le calcul de la surface des pics). Celui-ci consiste à faire une correspondance entre la résolution et l'énergie avec une relation dont la forme dépend du logiciel utilisé : dans Genie2000 la résolution augmente comme la racine carrée de l'énergie. L'étalonnage en énergie et l'étalonnage en résolution se font en une seule étape mais il existe plusieurs méthodes pour le réaliser :

- ❖ En visualisant le spectre à étalonner, il faut placer le curseur sur le sommet d'un pic. Le logiciel calcule automatiquement le centre du pic et la résolution en canaux. Il faut alors rentrer la correspondance en énergie
- ❖ Sur le spectre, il faut placer des marqueurs qui entourent le pic servant à l'étalonnage.

Comme précédemment, le logiciel calcule le centre du pic et sa résolution en canaux et il faut entrer l'énergie correspondante du pic.

- ❖ Il y a aussi la possibilité de faire une recherche automatique de pics. Le logiciel fournit une liste de pics avec leur centre et leur résolution exprimés en canaux. Il faut indiquer l'énergie de chacun des pics.

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 et en résolution a été fait. Une fois ceci effectué, l'analyse sort une liste de pics avec leurs surfaces respectives. Il est possible au logiciel d'identifier le radioélément responsable d'un pic en comparant avec des tables et de calculer directement l'activité. Cela nécessite d'avoir réalisé un étalonnage en efficacité. Ce module n'étant pas très performant, par la suite nous ne l'avons pas utilisé [Courtine, 2007].

### 3. Caractérisation des performances d'un spectromètre

La qualité d'un spectromètre gamma est liée à sa capacité d'une part à détecter des raies parfois peu intenses (critère d'efficacité) et d'autre part à les distinguer entre elles (critère de résolution). Cette section présente les différents critères généralement utilisés pour caractériser et comparer les performances des spectromètres [Pirard, 2006].

#### a. Traitement des données brutes de mesure

L'exploitation d'un spectre  $\gamma$  permet de dégager des informations sur la présence de certains radionucléides dans l'échantillon et de déterminer leur activité individuelle à partir du comptage des événements qui contribuent au spectre total. L'analyse du spectre obtenu lors de l'interaction d'une raie  $\gamma$  monoénergétique avec le détecteur se décompose en plusieurs composantes (Figure 18) :

***pic d'absorption total*** : il correspond à un dépôt d'énergie total du photon incident, obtenu soit par effet photoélectrique, soit par combinaison des trois modes d'interaction possibles.

***fond Compton*** : il est créé par interaction Compton du photon avec le cristal. Sa hauteur relative au pic d'absorption totale est d'autant plus faible que le détecteur est grand.

***pics d'échappement*** : ils apparaissent pour des énergies incidentes élevées ( $>1.022$  MeV) et pour des petits détecteurs. Ils correspondent à l'absence de détection d'un ou des deux photons obtenus par annihilation du positon de création de paire avec un négaton du réseau cristallin.

*pic de production de paires* : il apparaît à l'énergie de 511 keV et correspond à la seule détection du négaton obtenu par création de paire.

*fond Bremsstrahlung* : il apparaît à basse énergie ( $E < 500$  keV) pour des émetteurs  $\beta$  d'énergie supérieure à 1 MeV. Des écrans en cuivre ou en cadmium peuvent être utilisés pour en limiter la contribution.

Un spectre réel fait souvent intervenir un grand nombre de raies  $\gamma$  pour lesquelles ces différentes composantes vont se superposer. L'analyse consistera donc à identifier les différents radionucléides présents et à les quantifier à partir de leur pic d'absorption totale [Leconte, 2006].

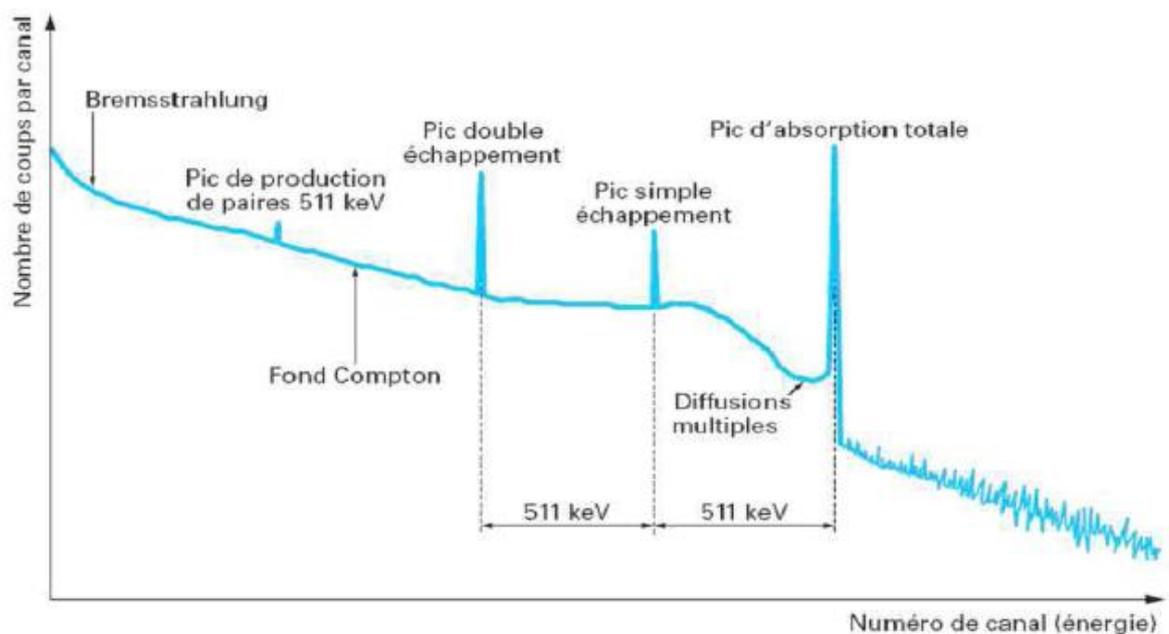


Figure 18. Spectre  $\gamma$  type.

## b. Identification des radionucléides

La première étape consiste à déterminer une relation entre l'échelle en canal et l'énergie. Cette calibration est réalisée à l'aide d'étalons dont les raies d'émission  $\gamma$  principales sont connues avec une excellente précision (énergie calibrée à environ 10 %).

On utilise la plupart du temps l'euporium 152, le baryum 133 et le cobalt 56 qui sont des références multi gamma émettant un grand nombre de raies (au moins 10). Ils permettent de couvrir une gamme allant de quelques dizaines de keV à 3.5 MeV avec une incertitude suffisante pour la plupart des applications (de l'ordre de 100 eV). Le logiciel d'analyse est

ensuite en mesure de réaliser la correspondance entre l'énergie des pics du spectre et les radionucléides potentiellement présents à partir d'une bibliothèque qui référence toutes les raies X et  $\gamma$  connues. Une fois les pics repérés, l'analyse quantitative peut être effectuée.

### c. Mesure d'activité

L'activité d'un radionucléide est déterminée à partir du nombre d'événements contribuant au pic d'absorption totale par unité de temps. Le taux de comptage correspondant représente, à un facteur multiplicatif près, l'activité du radionucléide. Pour cela, il est nécessaire de soustraire la contribution du fond continu, créé par l'interaction des photons d'énergie supérieure et par le rayonnement ambiant. Cette opération constitue la mesure de la surface nette du pic. La forme des pics d'absorption totale obtenus à partir de détecteurs au Ge[HP] est proche d'une gaussienne, présentant une traîne aux énergies inférieures.

Dans une certaine mesure, le logiciel est également capable de séparer deux voire plusieurs pics voisins présentant des domaines de recouvrement.

Ensuite, différents facteurs correctifs du taux de comptage mesuré doivent être appliqués pour déduire l'activité du radionucléide, notamment :

*la probabilité d'émission de la raie  $\gamma$*  : il s'agit du nombre de photons d'énergie  $E$  émis pour 100 désintégrations du radionucléide. Elle est notée  $I_\gamma(E)$ . Cette grandeur est une donnée nucléaire de base qu'on peut extraire de bibliothèques telles que EFFJ, ENDF/B, JENDL, ENSDF ou NUCLEIDE.

*le rendement d'absorption totale*: il s'agit de la probabilité pour un photon d'énergie  $E$  émis par la source de déposer l'intégralité de son énergie dans le détecteur. On le note  $R^P(E)$ . Cette grandeur est le plus souvent mesurée. On établit pour cela une courbe à partir de sources étalons calibrées en activité (ou en flux d'émission photonique), pour une géométrie de mesure donnée. Un facteur correctif est ensuite appliqué pour tenir compte de différents phénomènes (exemples : géométrie de l'échantillon différente de la source d'étalonnage, phénomène d'autoabsorption  $\gamma$ , présence d'écrans).

En notant  $N(E)$  la surface nette du pic et  $t$  la durée de la mesure, l'activité  $A$  du radionucléide est obtenue à partir de la relation suivante :

$$A = \frac{N(E)}{I_\gamma(E) R^P(E)t} \quad (3.1)$$

#### **d. Temps mort électronique**

L'électronique peut introduire des limitations sur le taux de comptage à cause des effets de temps mort et des problèmes liés à la collection de charge [Courtine, 2007]. Quel que soit le détecteur (et l'électronique associée), il faut un temps minimal entre deux événements successifs pour que l'on puisse réellement observer deux signaux. Ce temps est appelé temps mort  $\tau$  du compteur. Le temps mort correspond au temps minimal pour séparer deux événements qui vont être transformés en deux signaux électriques distincts. Deux cas extrêmes sont à considérer.

**d. 1. Compteur paralysable** : Si un second événement arrive avant que le temps mort se termine, cet événement ne sera pas pris en compte. Donc il ne sera pas détecté, et en plus, on aura une augmentation de temps mort du système par un temps égale à  $\tau$  à partir de temps d'arriver de ce dernier événement. Le nombre de particules comptées  $M$ , par unité de temps, en fonction du nombre de particules arrivants au détecteur  $N$  par unité de temps, est donné par l'équation (3. 2) :

$$M = Ne^{-N\tau} \quad (3.2)$$

**d. 2. Compteur non paralysable** : Si un second événement arrive avant que  $\tau$  se termine, cet événement ne sera pas pris en compte mais il n'y aura pas l'augmentation du temps mort du système de détection, tel que:

$$M = \frac{N}{1 + N\tau} \quad (3.3)$$

La (Figure 19) présente une séquence particulière d'événements et la réponse des deux types de compteurs. Elle montre aussi la variation de  $M$  en fonction de  $N$  pour  $t = 10 \mu\text{s}$ . On remarque en particulier que, pour des taux de comptage faibles, la réponse des deux compteurs est linéaire. En revanche, dans le cas du compteur paralysable, pour une valeur  $M$  mesurée, il y a toujours deux valeurs possibles de  $N$ , l'une correspondant à un faible taux de comptage, l'autre au contraire à un très fort taux de comptage. C'est un piège redoutable qui peut conduire à de grosses erreurs.

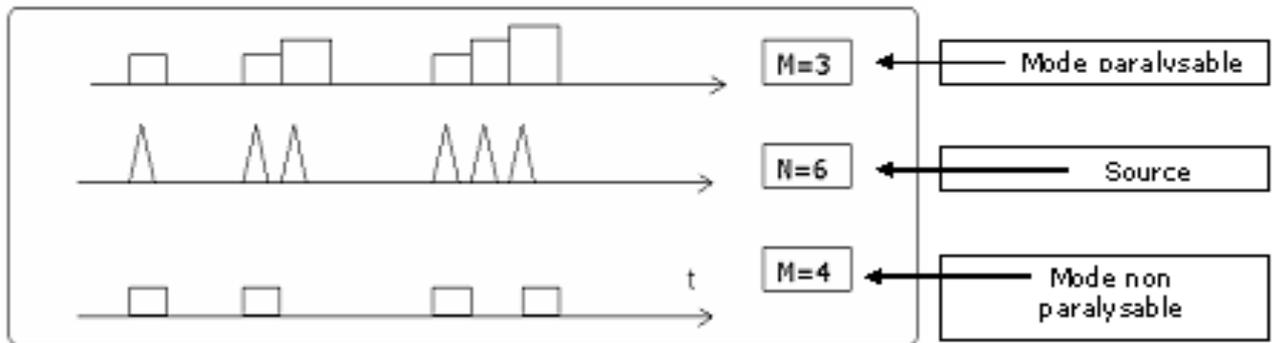


Figure 19. Temps mort d'un compteur (Modes paralysable et non paralysable).

### e. Résolution en énergie

La réponse d'un détecteur à une source monoénergétique permet de déterminer entre autre, la résolution en énergie de ce détecteur. La résolution en énergie détermine la capacité d'un détecteur à séparer les raies. Elle est définie par :

$$R(\%) = \frac{\Delta E}{E} \times 100 \quad (3.4)$$

Où  $\Delta E$  représente la largeur à mi-hauteur LMH (ou Full Width at HALF Maximum, FWHM en anglais) de la distribution du signal correspondant à l'absorption de l'énergie  $E$  dans le détecteur. Dans le cas idéal, la forme du pic est parfaitement gaussienne (Figure 20), et la résolution est liée à l'écart-type  $\sigma(E)$  de la distribution est donc [Wilhelm, 2006]:

$$\delta E = \sqrt{8 \ln 2} \cdot \sigma_E = 2.35 \sigma_E \quad (3.2)$$

Notons qu'il est d'usage de définir une résolution relative  $R$  (exprimée en %) comme étant le rapport de la résolution FWHM à l'énergie du pic :

$$R(E) = \delta \frac{\Delta E}{E} \quad (3.3)$$

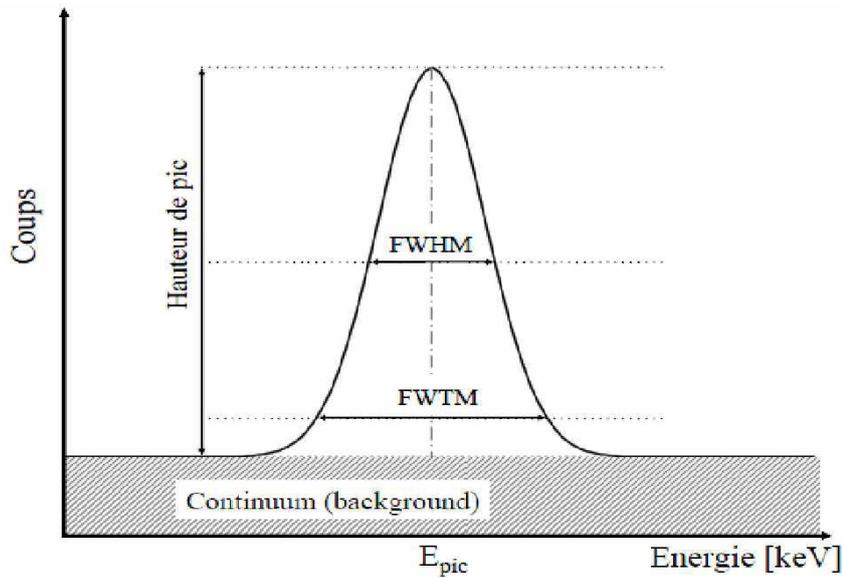


Figure 20. Définition de la résolution pour un pic parfaitement gaussien.

Tout comme l'efficacité, la résolution  $\sigma E$  varie avec l'énergie des photons gamma. Que ce soit pour les scintillateurs ou les semi-conducteurs, la résolution est la somme de plusieurs contributions comme la fluctuation statistique, le bruit de l'électronique, la dispersion dans la collecte des charges (semi-conducteur) ou des photons (scintillateur), etc. Afin de caractériser la forme du pic, il est également d'usage de spécifier la pleine largeur au dixième de la hauteur du pic, notée *FWTM* (full width at tenth maximum). Dans le cas d'un pic gaussien, la résolution *FWTM* est liée à l'écart-type  $\sigma(E)$  et à la résolution *FWHM* par :

$$FWTM = \sqrt{8 \ln 10} \cdot \sigma(E) = 1.823 \delta E \quad (3.4)$$

Notons enfin que dans la pratique la forme des pics n'est pas toujours parfaitement gaussienne.

Dans ce cas, la mesure du rapport  $\frac{FWHM}{FWTM}$  permet de juger de l'écart par rapport à la gaussienne parfaite (Pirard, 2006). Pour le Ge, les résolutions sont de l'ordre de 2 keV pour une énergie de 1, 33 MeV (Raie d'une source de  $^{60}\text{Co}$ ) [Coulon, 2010]. La résolution en énergie dépend du niveau d'intensité du signal (impulsion de courant qui résulte de la collecte des charges) par rapport au bruit (fluctuations décorréliées de l'interaction) du détecteur.

Ainsi, l'amplitude du signal issue de l'interaction doit être élevée par rapport à la composante de bruit du signal. Le bruit provient principalement de la nature discrète de la production des porteurs de charge ou des photons de fluorescence et de l'écart-type statistique qui leur est associé. Dans le détecteur, une autre composante de bruit vient s'ajouter : le bruit d'origine électronique. En effet, le signal produit par les interactions est un flux aléatoire d'impulsions de très faible intensité (quelques pC). Le signal est préamplifié de manière à rendre les impulsions produites par l'interaction des rayonnements avec le détecteur analysables par l'électronique de traitement du signal. Le bruit du signal préamplifié est la somme de différentes contributions de bruit produit principalement par les éléments actifs du premier étage amplificateur (perturbation électromagnétique, bruit thermique...) [Coulon, 2010]. Afin de supprimer le bruit électronique, il est important d'utiliser des composants électroniques de haute qualité, d'assurer la bonne compatibilité électromagnétique de l'ensemble (blindage), et de mettre en œuvre un débruitage performant du signal. Il convient donc de trouver un compromis entre la diminution de la capacité de traitement et l'amélioration de la résolution. Une fois maîtrisées ces différentes limitations technologiques de la chaîne de mesure, il est nécessaire d'identifier les problèmes liés à l'analyse des spectres  $\gamma$  et à l'extraction des surfaces nettes. Une comparaison entre les résolutions des deux détecteurs (NaI) et (GeHP) présenté dans la figure 21.

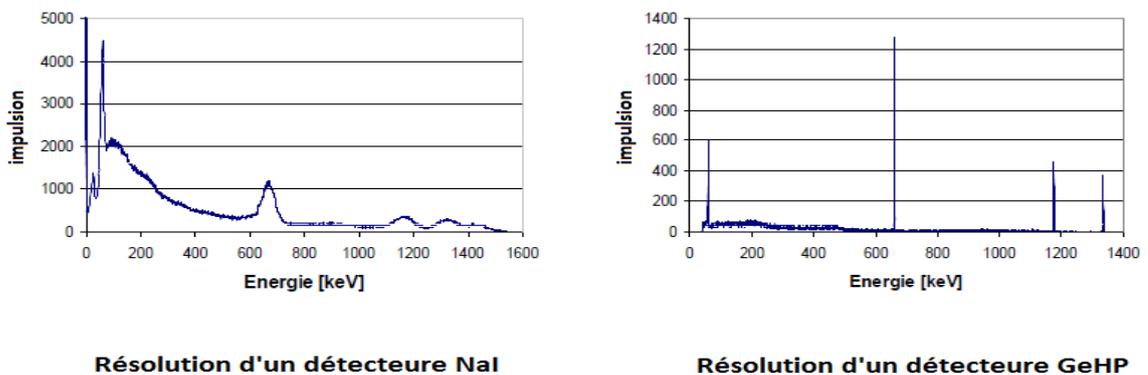


Figure 21. Comparaison entre les résolutions des deux détecteurs NaI et GeHP.

#### f. Efficacité de détection- Réponse en énergie

En général la géométrie des détecteurs ne permet pas de mesurer la totalité des rayonnements émis. En effet d'une part les détecteurs couvrent rarement un angle solide suffisant et d'autre part une partie des rayonnements traverse le détecteur sans interagir ou bien s'atténue partiellement avant de quitter la zone utile de détection. On a donc introduit la notion

d'efficacité de détection qui traduit la capacité d'un dispositif à détecter un rayonnement donné d'une énergie donnée [Lyoussi, 2010]. Deux types d'efficacités sont ainsi définis: L'efficacité absolue ou rendement d'un détecteur est le rapport des rayonnements mesurés sur les rayonnements émis par la source. L'efficacité est souvent exprimée en pourcentage du nombre de rayonnements incidents. Pour les compteurs de particules, on a :

$$\epsilon_{abs} = \frac{\text{nombre d impulsions comptés}}{\text{nombre de rayonnements issus de la source}} \quad (3.5)$$

L'efficacité intrinsèque ne prend en compte que les rayonnements ayant traversé le détecteur.

$$\epsilon_{int} = \frac{\text{nombre d impulsions comptés}}{\text{nombre de rayonnements reçus par le détecteur}} \quad (3.6)$$

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

$$\epsilon_{abs} = \frac{\Omega}{4\pi} \epsilon_{int} \quad (3.7)$$

Où  $\Omega$  est l'angle solide défini par la surface du détecteur vue de la source (Figure 3.6).

$$\Omega = 2\pi \left( 1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}} \right) \quad (3.8)$$

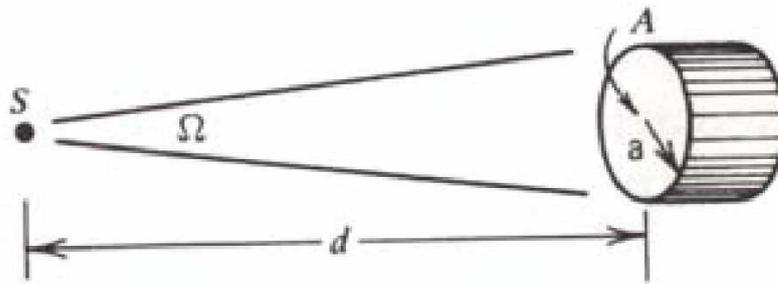


Figure 22. Notion élémentaire d'angle solide.

#### **g. Le bruit de fond**

C'est le comptage ou l'enregistrement d'un spectre dans des conditions normales d'utilisation de la chaîne de mesure en l'absence de la source dont on veut mesurer le rayonnement on définit aussi comme étant le spectre enregistré à partir d'un détecteur, seul ou avec un conteneur vide ou contient de l'eau pure la connaissance de ce bruit de fond est utile pour améliorer la justesse des résultats de mesure de l'activité notamment dans le cas des traces. Les composantes du bruit de fond ont assentiment pour origine le rayonnement cosmique, la radioactivité des radionucléides présents dans les matériaux terrestres (familles  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$ ) et la radioactivité artificielle qui est présentée dans les matériaux constituant le spectromètre ou dans son environnement immédiat. Après l'ajustement des pics, il est nécessaire de soustraire la contribution du bruit de fond dans le pic et d'en tenir compte dans le calcul d'incertitude globale [Lyoussi, 2010].

#### **IV. Applications de la spectroscopie gamma**

La spectroscopie gamma est aujourd'hui utilisée pour identifier et quantifier les éléments radioactifs dans de nombreuses applications, pas uniquement dans la physique des hautes énergies. Citons en particulier :

\* La cartographie et la prospection de gisements en géophysique. Depuis les années 70, la spectroscopie gamma est systématiquement utilisée dans des levés aériens ou in situ pour la cartographie géologique et la prospection minérale. La méthode repose sur la mesure des abondances absolues et relatives des radioéléments K, U et Th. Au départ utilisée exclusivement pour la recherche de gisements uranifères, la technique sert aujourd'hui à la prospection de nombreux autres minerais. Les trois radioéléments K, U et Th jouent en effet le rôle d'indicateurs géochimiques en étant associés aux éléments recherchés de manière directe (U, Th, Sn, W, Nb, Zr et terres rares) ou indirecte (minéralisation de Au, Ag, Hg, Co, Ni, Bi, Cu, Mo, Pb ou Zn).

\* La protection de l'environnement. De la même manière, la spectroscopie gamma permet d'analyser et de cartographier la pollution produite par des sites nucléaires (stockage de déchets, centrales, etc.) ou à la suite d'essais ou d'incidents nucléaires (fusion du réacteur de Tchernobyl en 1986, écrasement de la sonde soviétique Cosmos 954 à propulsion nucléaire en 1978 dans le nord du Canada).

\* La datation d'échantillons. La désintégration du césium  $^{137}\text{Cs}$  ( $E=661\text{ keV}$ ,  $T_{1/2}= 30\text{ ans}$ ) provenant des activités nucléaires (retombées radioactives à la suite d'essais ou d'accidents depuis les années 50) peut être utilisée pour la datation d'échantillons sur de courtes durées. Requérant un spectromètre de haute résolution et un très faible niveau de bruit de fond, cette technique est couramment utilisée dans l'étude de la sédimentation, de l'érosion des sols.

\* L'analyse non destructive de la composition chimique. Les méthodes NAA (Neutron Activation Analysis) et PIGE (Proton Induced Gamma Emission) permettent de mesurer de manière non destructive les concentrations de plusieurs dizaines d'éléments chimiques dans divers matériaux (roches, minéraux, sols, produits industriels, etc.) [Pirard, 2006].

# *CHAPITRE IV*

*LES SOURCES THERMALES*

*GUERGOUR ET OULED*

*TEBBEN*

## **I. Introduction**

La croûte terrestre de l'Algérie est couverte de roches de phosphate sédimentaires qui rendent les sources d'aquifères, qui proviennent des précipitations de neige et de pluie, pendant l'hiver. Ces sources sont riches en  $^{238}\text{U}$  et leurs descendants. On peut les trouver dissous ou en suspension dans l'eau.

Le nord de l'Algérie est situé à la limite de la plaque entre l'Eurasie et l'Afrique, et c'est l'une des régions les plus sismiquement actives de la Méditerranée [Buform et al. 1995; Stich et al. 2003, 2006]. L'évolution tectonique de cette région résulte de la convergence entre les plaques européenne et africaine [Argus et al. 1989], marqué par la naissance d'un orogène de type alpin qui limite l'Afrique du Nord [Auzende et al. 1973], à savoir les montagnes Rif et Tell-Atlas. Aujourd'hui, cette zone subit une déformation contractionnelle à vitesse lente répartie sur une zone relativement large [Frizon de Lamotte et al., 2000, Serpelloni et al., 2007]. Le taux de convergence de l'Eurasie et de l'Afrique est d'environ 5 mm par an à la longitude d'Alger et augmente jusqu'à 8 mm par an près de la Tunisie [Calais et al., 2003]. Les eaux souterraines présentant une anomalie de radioactivité naturelle sont situées dans les régions à activité tectonique.

## **II. Paramètres géologiques et hydrogéologiques**

Le Nord de l'Algérie peut être divisé en trois zones structurales ; L'Atlas Tellian, les hauts plateaux et l'Atlas Saharien. La zone étudiée, région de Sétif, appartient à l'Atlas Tellian.

L'Atlas Tellian est constitué de chaînes orogénétiques formées par la superposition de couches qui dérivent de trois grands champs géographiques pâles. Le Domaine des Interns qui fait partie de la plaque d'Alboran, qui se compose d'un fond cristallophyllien et d'une couverture sédimentaire paléozoïque avec secteur tertiaire. Cette couverture peut être séparée de sa base et se former sur des plis de poussée dont les niveaux carbonatés (Du Trias à l'Eocène) constituent les Chaînes de Calcaire [Fabre, 1976]. Le Domaine Flyschs, ces formations sédimentaires (Crétacé à Oligo-Miocène) constituent la nuque mauretanienne, les massyliennes et la couche numidienne, qui comprend une formation pélitique avec alternance d'ailes et d'argiles burdigaliens. Le Domaine Externe; Série pélitique et grès - pélitique avec des pélites de Trais, dolomites et calcaires de Lias et de Dogger inférieurs et marno-calcaires que les ammonites. Les unités du domaine interne recouvrent les Flysch, qu'elles chevauchent également vers le sud, des unités dans le champ externe. Cette dernière phase de l'orogénèse alpine a été suivie par l'activité volcanique le

long du littoral pendant la période Miocène.

Deux régions ont été choisies dans le présent travail de l'Est de l'Algérie, comme le montre la figure 23.

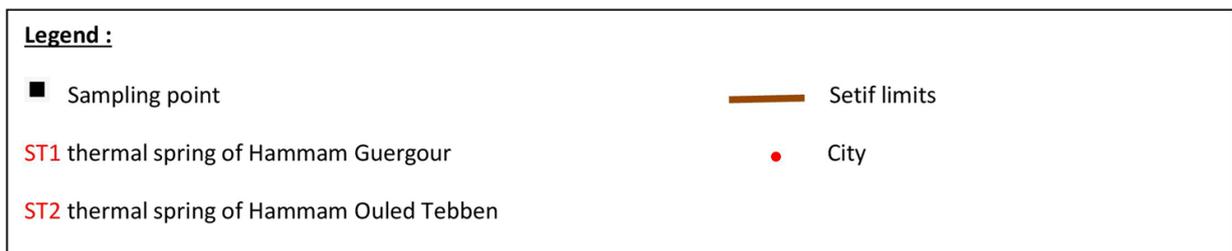
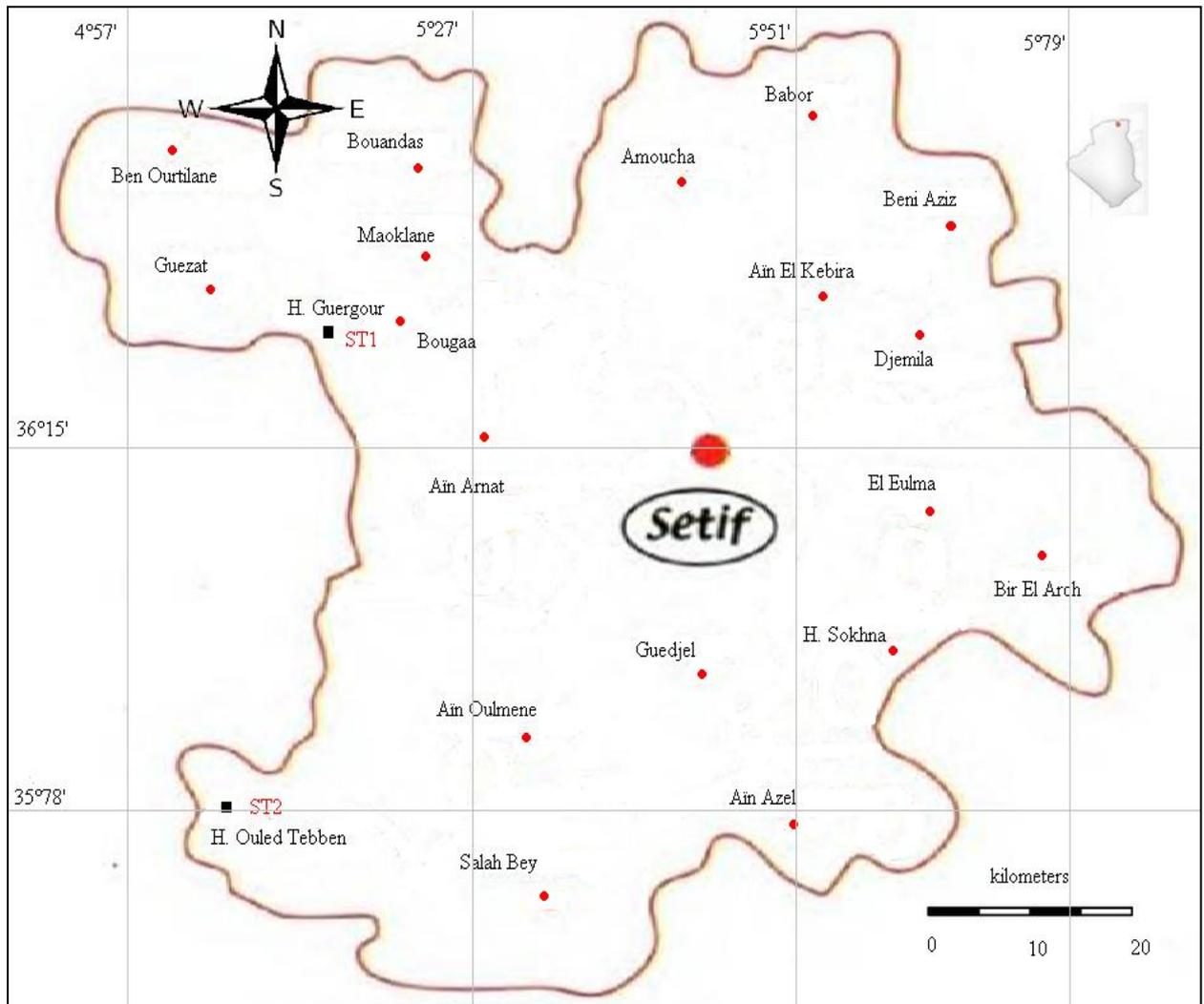


Figure 23. Localisation des deux sources thermales étudiées dans la région de Sétif Est de l'Algérie.

### 1. La source thermale de Guergour (étude 1938)

En ce qui concerne l'origine géologique des eaux, on ne trouve pas beaucoup d'études sur la région; néanmoins, M. le Professeur J.SAVORNIN a écrit : " Il n'est pas douteux que l'eau thermale est due, ici encore, ' non seulement au système de failles, mais surtout au pointement triasique voisin. Elle contient des chlorures et sulfates avec prédominance de ces derniers. La proportion des carbonates et la teneur en magnésie sont aussi plus fortes, à cause du voisinage de la dolomie infranéocamienne et des calcaires intéressées par les fractures" [Savornin, 1920].

Eaux minérales radio-actives	pays	Radioactivité en nanocrocuries
Source Neuquelle	Brembach (Allemagne)	305
Source Wemerlauf	Jachimov(Tchécoslovaquie)	240
Source Altromishe	Ile d'Ischia (Italie)	193
Source Hammam Chof ou Chifa	Guergour (Algérie)	122
Source Grabenbackergelle	Castein (Autriche)	80
Source Arénas	Acnas Lerez (Espagne)	65
Source Riettquelle	Baden Baden (Allemagne)	56.5
Source Indigène	Guergour (Algérie)	44.2
Source Lepape	Luchon (France)	41.5
Source	Luso (Portugal)	33.6
Source 207	Colorado (Etats-Unis)	30.5
Source Hammam Cherbal	Guergour (Algérie)	28.8
.....	Teplitz Schonau (Roumanie)	28.72
Source du Pont	Bou-Ifenifia (Algérie)	27

*Tableau 8. Classement des Eaux minérales les plus riches de France et de l'Etranger selon la taux de radioactivité (radon) en 1938.*

Des travaux, conduisant des sources jaillissant à plus haute altitude, ont augmenté ce début; si bien que M<sup>lle</sup> Simone GUIGUE, Chimiste-Principal du Service des Mines et de la carte

géologique de l'Algérie, après les travaux ayant abouti au captage définitif, rassemblant Onze Sources (2 avril 1950), pouvait écrire:

" Ces travaux ont porté le débit de ces sources qui était primitivement de 700 litres/minute, à 2500 litres/minute, et ont conserve la radioactivité qui se trouve désormais répartie entre un volume d'eau thermique quadruple, directement utilisable et un débit très appréciable de gaz à haute radioactivité ".

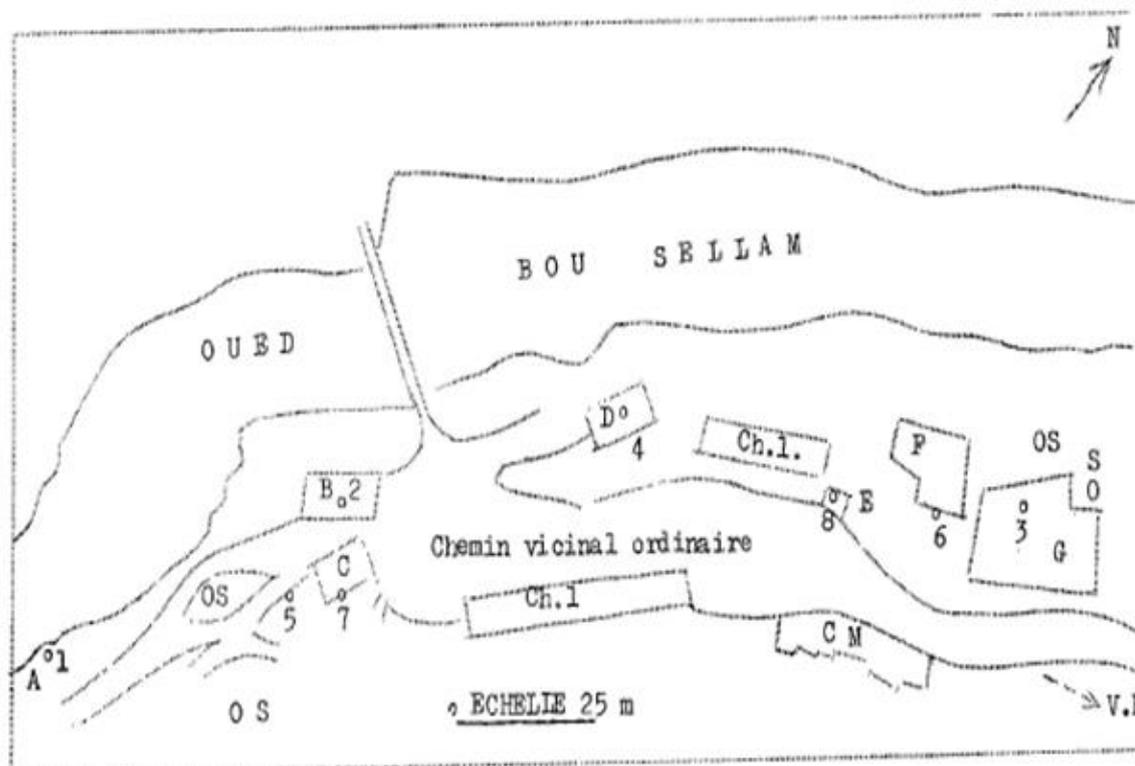


Figure 24. Plan des sources de Guergour [Mostefai, 1956].

Quant à la composition chimique, selon HANRIOT, ces eaux étaient classées parmi les, eaux sulfatées calciques. En 1938, M. BASEILHAC, Ingénieur des Mines, après de nouvelles mesures de la radioactivité, classait " l'Ain Chof " au 4<sup>ème</sup> rang des Sources Mondiales radioactives (voir tableau 8). C'est en 1950 que fut implanté le poste d'observation crénothérapique du Guergour. Depuis cette époque, peu de perfectionnements ont été apportés, dans l'attente de décisions gouvernementales ayant trait à l'hygiène de la zone des sources. Malgré ces conditions, et jusqu'au 27 Avril 1955 :

1407 malades ont été traités, d'une façon complète. En particulier s'inscrivent parmi les indications majeures :

- Les affections rhumatismales,
- Les affections neurologiques,
- Les affections dermatologiques,
- Les affections gynécologiques.

Il s'agit donc bien d'une richesse médicale, et il faut souhaiter que la mise en exploitation rationnelle se réalise bientôt pour le plus grand bien des populations Algériennes.

### Légende du plan

S : Sources privées non aménagées.	D : Bains des femmes (Sidi Bachir)
Ch.1 : Chambres des Indigènes.	E : Hammam Delloula
CM: Café-Maure.	F : Bain du Palmier
A : Hammam Chof	G : Hammam Cherbal
B : Bains des Indigènes	V. R : Direction des vestiges romains
C : Bain-douches	N : Direction du Nord.

Tableau 9. Points noirs numérotés (1 à 8): Sources étudiées ou utilisées [Mostefai, 1956].

## 2. La source thermale de Guergour actuellement

### a. Situation géographique

- La première zone d'étude est Hammam Guergour (ou Hammam Sidi El Djoudi) (figure 23) situé à 55 km au nord de la capitale de Sétif, à l'Est de l'Algérie, dans la région de la daïra Hammam Guergour Sétif. Son débit d'eau est d'environ 8 litres par seconde. L'origine principale de cette source d'eau provient des précipitations de neige et de pluie en hiver. Ces sources d'eau thermale sont classées parmi les sources ayant le plus haut niveau de radioactivité dans le monde derrière celles de Jachimov (Tchécoslovaquie) et de Brembach (Allemagne).

### b. Conditions géologiques

Selon le professeur J. Savornin (1920), l'eau thermale est due non seulement au système de failles mais surtout au pointement triasique voisin. Elle contient des chlorures et des sulfates, la teneur en magnésium est également importante liée au voisinage de la dolomie infranéocomienne et des calcaires.

### **c. Propriétés physico-chimiques**

La température de l'eau varie entre 42.1 °C et 44°C. La conductivité de l'eau varie entre 4600 et 4890 micromhs/cm. La radioactivité des eaux (radon) est de 155 nanocuries par litre. Les eaux sont sulfatées calciques avec :  $r \text{SO}_4 > r \text{Cl} > r \text{HCO}_3 = r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na}$ .

### **d. Caractéristiques thérapeutiques**

Les eaux sont utilisées en gynécologie, rhumatologie, pour l'appareil digestif, les voies biliaires, le foie et les affections cutanées. La station thermale de Hammam Guergour est dotée d'un équipement moderne et d'une équipe médicale.

## **3. La source thermale d'Ouled Tebben**

### **a. Situation géographique**

La deuxième zone d'étude est **Hammam Ouled Tebben**. Cette source thermale est un ancien bain et prend son vrai nom de Sidi Mansour, qui est situé dans le sud-ouest de la province de Sétif à l'Est de l'Algérie. Elle émerge sur la rive droite de l'oued bou Guerma (figure 25).

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 Tebben. Ces deux zones sont d'importants sites de tourisme thérapeutique en Algérie.

### **b. Conditions géologiques**

L'eau sort au niveau des calcaires massifs et des calcaires dolomitiques du Barrémien très fracturé. La source émerge à la faveur d'une faille N 20 E (figure 26).

### **c. Propriétés physico-chimiques**

La température de l'eau est de 46 ° C. La minéralisation de l'eau est de 3230 mg/ l. L'eau est sulfatée calcique riche en chlorures avec  $r \text{SO}_4 > r \text{Cl} > r \text{HCO}_3$  et  $r \text{Ca} > r \text{Mg} > r \text{Na}^+ \text{K}$ .

### **d. Qualités thérapeutiques**

L'eau thermale ne présente aucune spécificité au point de vue chimique, mais l'hyperthermalité des eaux (46° C) agit sur les douleurs rhumatismales et les affections dermatologiques.

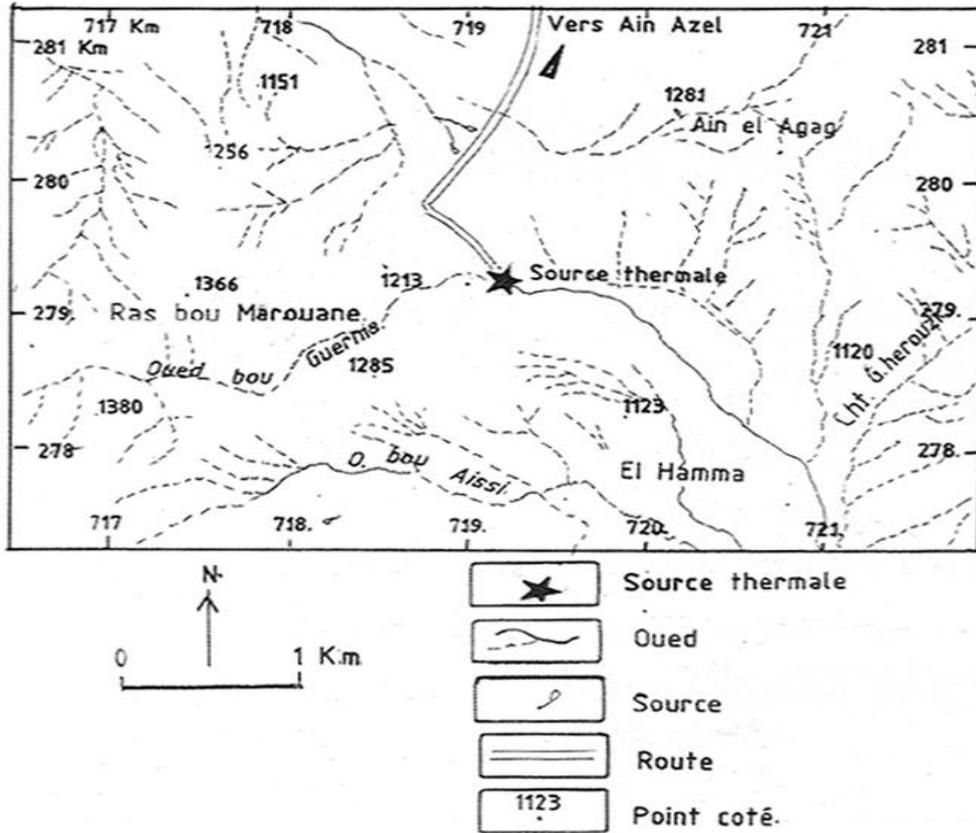


Figure 25. Carte de situation de la source chaude de Hammam Ouled Tebben. Source : extrait des cartes topographiques Ras El Oued et Souk Ouled Nadja (feuille n°142 et 169).

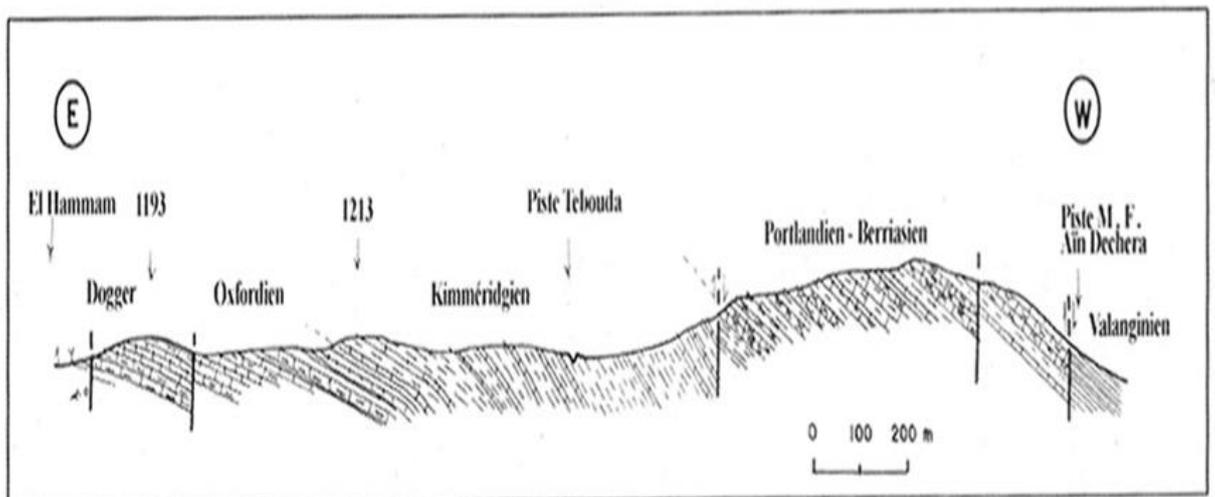


Figure 26. Coupe schématique du Jurassique et du Crétacé basal à l'Ouest de Hammam Ouled Tebben [Guiraud, 1990].

#### **4. L'eau potable de la population est loin de la source thermale**

Il est également nécessaire de prélever des échantillons d'eau souterraine froide près des sources thermales pour étudier sa radioactivité, si l'eau souterraine est la principale source d'eau potable pour la population. Les sources chaudes peuvent avoir la possibilité de se mélanger avec l'eau froide au cours de leur écoulement des aquifères profonds, mais dans ;

**Le village de Guergour**, l'eau froide du robinet est loin de la source thermale de Hammam Guergour aux plans élevés du village aggloméré, source à l'abri de l'eau thermale radioactive. Ces eaux thermales coulent dans la rivière Oued Boussalem. Les autorités locales devraient prendre les mesures de protection nécessaires pour l'être humain, la sécurité des animaux et la préservation de l'environnement avec des systèmes de canalisation d'égout dûment bloqués et en maintenant l'eau thermale utilisée à une distance respectée de cette rivière vitale.

**Le village d'Ouled Tebben** est situé dans le haut niveau et à une distance suffisante de la source thermales d'Ouled Tebben. Ceci empêche l'eau domestique de se mélanger avec des sources thermales radioactives. Bien que l'eau évacuée coule dans la direction opposée du village d'Ouled Tebben, les autorités locales devraient prendre les mesures adéquates pour la sécurité des personnes, des animaux, de la végétation et de l'espace général de l'environnement. La réserve d'eau souterraine provient de la région orientale de l'Algérie suite aux précipitations de pluie et de neige pendant l'hiver à côté des sources superficielles des rivières et des lacs.

# *CHAPITRE V*

## *RESULTATS ET DISCUSSION*

## I. Méthodes de mesure

## II. Préparation des échantillons

Au sein de chacune des deux stations thermales choisies Guergour et Ouled Tebben du territoire Algérien, Deux échantillons d'eau ont été pris de la région de Sétif et recueillis dans des bouteilles en plastique de 1,5 L étiquetées et hermétiquement fermées (en appliquant la méthode source-fermée). L'étiquetage comprenait la date, l'heure, la température, le site de prélèvement et le code d'échantillon (HG ou HOT). Une quantité de 450 ml de chaque échantillon d'eau est transféré dans un flacon de type Becher Marinelli 0,5 litre scellé et conservé pendant une durée de trente cinq (35) jours avant le comptage par spectrométrie gamma (figure 27), Afin d'atteindre l'équilibre séculaire où l'activité sera sensiblement identique pour chacun des radionucléides de la chaîne naturelle de l'uranium 238 [Singh, 2005].



Figure 27. Matériel utilisé pour préparation de l'eau.

## 1. Etalonnage

Une quantité aliquote de 450 ml de chaque échantillon d'eau est analysée par spectrométrie gamma utilisant un détecteur à semi-conducteur Germanium de haute pureté ayant les spécifications suivantes : 0.89 keV et 1.79 keV de résolution respectivement pour les raies gamma de 122 keV du  $^{57}\text{Co}$  et de 1332.5 keV du  $^{60}\text{Co}$  et une efficacité relative de 40 % à 1.33 MeV du  $^{60}\text{Co}$ .

Le détecteur est placé dans une enceinte blindée à bas bruit de fond et relié à une électronique intégrée InInspector 2000 Canberra pilotée par ordinateur à l'aide du logiciel GENIE 2000 Canberra permettant l'acquisition de spectres gamma continus.

Le temps d'acquisition du spectre gamma de chaque échantillon d'eau est de 24 heures. Le spectre est traité à l'aide du logiciel « GENIE 2000 Canberra » pour identifier les radionucléides présents dans l'échantillon (analyse qualitative) et calculer pour chaque radionucléide, l'activité spécifique et l'incertitude associée (analyse quantitative) et la limite de détection. Après la mesure et la soustraction du bruit de fond, les concentrations d'activité ont été estimées. La concentration de l'  $^{238}\text{U}$  a été calculée comme la moyenne pondérée de l'activité déterminée en utilisant :

- ✓ Les raies gamma 295.21 (19.2 %) et 351.92 (37,20 %) keV du  $^{214}\text{Pb}$  ;
- ✓ Les raies spécifiques du  $^{214}\text{Bi}$  : 609.31 (46.30 %), 1120.29 (15.10 %) keV et 1764.49 keV (15.10 %).

## 2. Calibration de la chaîne de mesure

L'étalonnage est réalisé par de nombreuses sources « étalon » adaptées à la géométrie de mesure de l'échantillon (Marinelli Beaker de 500 ml). Les étalons multi-gamma servent à l'étalonnage en énergie et en efficacité des détecteurs utilisés pour les mesures de faible niveau d'activité. Ils sont conçus essentiellement pour l'étalonnage des détecteurs gamma (GeLi, Ge hyper pur, etc.) dans le domaine des mesures environnementales. Ils couvrent une gamme d'énergies de 30 à 400 KeV pour le Baryum 133 et de 122 à 1408 KeV pour l'Europium 152. Les différents pics caractéristiques des sources étalons utilisées sont :

$^{133}\text{Ba}$  30,8 - 35,1 - 53,2 - 80,9 - 276,4 - 302,9 - 356,0 – 383,9 keV.

$^{152}\text{Eu}$  121,8 - 244,7 - 344,3 - 411,1 - 444,0 - 867,4 - 963,5 - 964,1 - 1085,8 - 1089,7 - 1112,1 - 1212,9 - 1299,1 - 1408,0 keV.

### a. Calibration en énergie

L'étalonnage en énergie (analyse qualitative) consiste à faire correspondre à chaque canal de l'analyseur multicanaux une énergie correspondante afin d'avoir une fonction entre l'énergie et le numéro du canal. Il permet d'identifier les radionucléides qui existent dans l'échantillon à analyser. En utilisant les données des sources étalons, la droite de calibration obtenue est :

$$\text{Energie} = A \times \text{Canal} + B \Rightarrow \begin{cases} A = 0.323 \text{ keV / Canal} \\ B = 1.718 \text{ keV} \end{cases} \Rightarrow \text{Energie} = 0.323 \times \text{Canal} + 1.718$$

L'étalonnage en énergie de la chaîne de spectrométrie gamma est obtenu à partir d'un spectre de  $^{152}\text{Eu}$ .

### b. Calibration en efficacité

Pour établir la relation entre l'efficacité et l'énergie, il est nécessaire d'acquérir un spectre calibré en énergie des sources radioactives standards connues, pendant un temps suffisamment long pour obtenir des pics avec une petite incertitude. L'étalonnage en efficacité absolue est établi à partir de spectres d'étalons de radioactivité de  $^{133}\text{Ba}$  et de  $^{152}\text{Eu}$  contenus dans des flacons type Beaker Marinelli de 0.5 litre sous forme de matrice résine de densité égale à 1.15 dont l'activité est donnée en équivalents eau (densité  $\approx 1$ ). Une fois l'acquisition terminée, on détermine le nombre net des coups sur chaque pic de la source, caractérisé par une énergie spécifique, l'efficacité absolue est calculée à partir du modèle APOLOG du logiciel 2000 Canberra qui utilise deux (02) courbes séparées par un point de croisement (La courbe de gauche pour les basses énergies et celle de droite pour les hautes énergies). La figure 28 illustre le tracé de l'efficacité absolue en fonction de l'énergie :

Les équations obtenues pour :

$$\text{Les basses énergies : } \ln(\text{Eff}) = -126,2 + 7,321 \cdot \ln(E) - 14,4 \cdot \ln(E)^2 + 0,9364 \cdot \ln(E)^3 \quad (5.1)$$

$$\text{Les hautes énergies : } \ln(\text{Eff}) = 1,328 - 0,967 \cdot \ln(E) + 0,02654 \cdot \ln(E)^2 \quad (5.2)$$

$E_{\text{ff}}$  est l'efficacité, les valeurs (1.262, 7.321, ... et 1.328, 0.9670, ...) sont des constantes d'étalonnage pour la géométrie utilisée et E est l'énergie du rayonnement gamma.

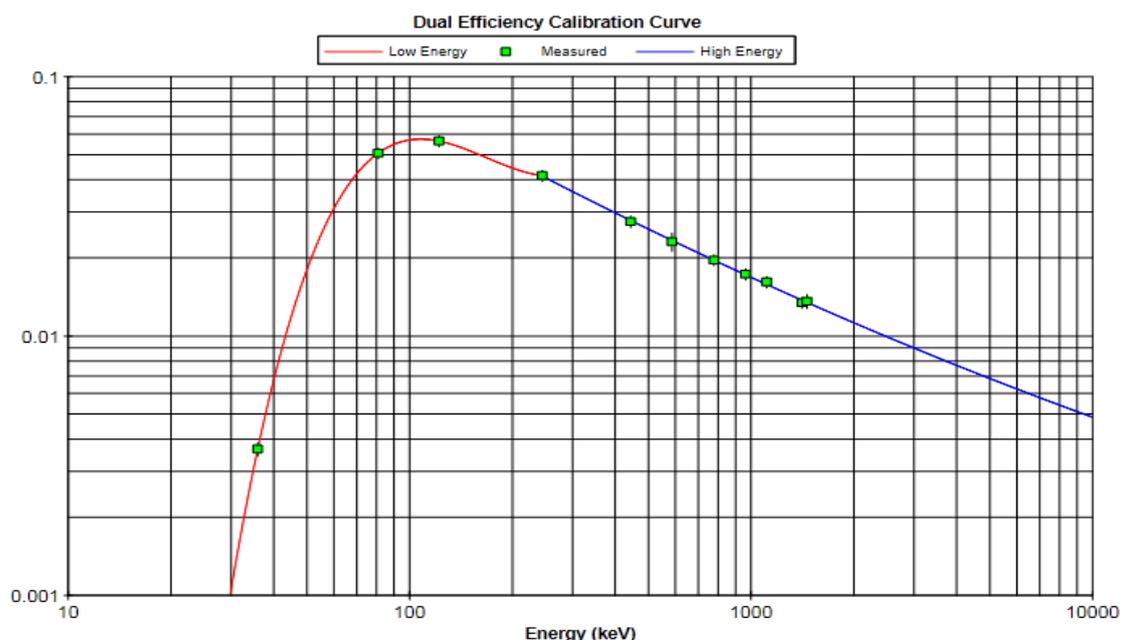


Figure 28. Courbe de l'efficacité absolue en fonction de l'énergie d'un rayon gamma.

### 3. L'activité minimale détectable

L'activité minimale détectable (MDA) des radionucléides  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{234}\text{PA-M}$ ,  $^{234}\text{Th}$  et  $^{235}\text{U}$  pour les échantillons d'eau, est donnée dans le tableau 10.

Radionucléide	MDA (Bq/L) (HG)	MDA (Bq/L) (HOT)
$^{40}\text{K}$	1.67	1.70
$^{232}\text{Th}$	0.54	0.58
$^{210}\text{Pb}$	6.41	6.49
$^{226}\text{Ra}$	2.92	3.03
$^{234}\text{PA-M}$	15.8	15.2
$^{234}\text{Th}$	2.57	2.56
$^{235}\text{U}$	0.18	0.19

Tableau 10. Activités minimales détectables (MDA) dans les deux sources thermales.

### III. Résultats et discussion

#### IV. Mesure des activités spécifiques des échantillons

La bibliothèque du Génie 2000 contient des radioéléments et les énergies de leurs gammas correspondants. En s'aidant de cette option, on peut identifier les différents radioéléments qui existent dans les échantillons.

## V. Radionucléides identifiés dans les deux échantillons d'eau

La méthode permet la détermination de l'activité massique (ou volumique) des radioéléments émetteurs gamma dans des échantillons par comptage des photons donnant naissance à un phénomène photoélectrique. Seuls les radioéléments émetteurs gamma présentant des raies d'émission sur la plage énergétique étalonnée peuvent être quantifiés (tableau 11).

Famille	Raie spécifique (keV)	Intensité (%)	Radionucléide identifié	Activité spécifique (Bq/L) HG/HOT
$^{238}\text{U}$	63,28	4,80	$^{234}\text{Th}$	<MDA
	92,37	4,00	$^{234}\text{Th}$	
	92,79	2,70	$^{234}\text{Th}$	
	186,21	3,28	$^{226}\text{Ra}$	
	295,21	19,20	$^{214}\text{Pb}$	$0.46 \pm 0.19 - 1.21 \pm 0.21$
	351,92	37,20	$^{214}\text{Pb}$	
	609,31	46,30	$^{214}\text{Bi}$	$0.65 \pm 0.21 - 1.04 \pm 0.20$
	1120,29	15,10	$^{214}\text{Bi}$	
	1764,49	15,10	$^{214}\text{Bi}$	
$^{232}\text{Th}$	911,6	27,70	$^{228}\text{Ac}$	<MDA
	583,2	84,40	$^{208}\text{Tl}$	
	2614,53	99,75	$^{208}\text{Tl}$	
	238,60	44,60	$^{212}\text{Pb}$	
$^{235}\text{U}$	143,76	10,50	$^{235}\text{U}$	<MDA
$^{40}\text{K}$	1460,82	10,67	$^{40}\text{K}$	<MDA

Tableau 11. Caractéristiques des radionucléides identifiés.

A partir de la surface (nombre d'impulsions) des pics, on détermine l'activité de ces radionucléides. Seules les activités supérieures à la limite de détection de la chaîne d'analyse sont exprimées ; dans le cas contraire, la limite de détection précédée du signe « < » est rapportée. L'activité de chaque radioélément présent dans l'échantillon est donnée en

becquerel par becquerel par litre (Bq/L). Le calcul des concentrations d'activité des différents radioéléments présents dans les échantillons a été fait manuellement.

## VI. Analyse du spectre des deux sources thermales Guergour et Ouled Tebben

Radionucléides	Energie	Echantillon (HG)		Echantillon (HOT)	
	keV	Bq/ L		Bq/ L	
K-40	1460.82	<MDA	1.67	<MDA	1.70
TL-208	583.19	<MDA	0.16	<MDA	0.16
	2614.53				
PB-210	46.54	<MDA	6.41	<MDA	6.49
BI-212	727.17	<MDA	1.76	<MDA	1.90
PB-212	238.63	<MDA	0.28	<MDA	0.28
BI-214	609.31	0.65	0.21	1.04	0.20
	1120.29				
	1764.49				
PB-214	295.21	0.46	0.19	1.21	0.21
	351.92				
RA-226	186.21	<MDA	2.92	<MDA	3.03
AC-228	911.6	<MDA	0.53	<MDA	0.51
PA-234M	1001.03	<MDA	15.8	<MDA	15.2
TH232		<MDA	0.54	<MDA	0.58
TH-234	63.28	<MDA	2.57	<MDA	2.56
	92.37				
	92.79				
U-235	143.76	<MDA	0.18	<MDA	0.19

Tableau 12. Activités spécifiques et MDA (Activité Minimale Détectable) des radioéléments identifiés dans les deux sources thermales HG et HOT.

## VII. Calcul des activités spécifiques et doses annuelles effectives avec leurs erreurs correspondantes des deux échantillons d'eau thermales étudiés

Les activités spécifiques du  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$  et  $^{238}\text{U}$  ont été déterminées pour les deux échantillons HG et HOT, la concentration de l' $^{238}\text{U}$  et la dose annuelle effective ainsi que les erreurs respectives des radionucléides naturels cités ci-dessus sont présentés dans le tableau 13.

Sample	$^{214}\text{Bi}$ Activité (Bq/L)	$^{214}\text{Pb}$ Activité (Bq/L)	$^{238}\text{U}$ Activité (Bq/L)	$^{238}\text{U}$ Concentration ( $\mu\text{g/L}$ )	Dose annuelle effective ( $\mu\text{Sv}$ )
HG	$0.65 \pm 0.21$	$0.46 \pm 0.19$	$0.56 \pm 0.20$	$45 \pm 16$	$9.20 \pm 3.3$
HOT	$1.04 \pm 0.20$	$1.21 \pm 0.21$	$1.13 \pm 0.20$	$91 \pm 16$	$18.56 \pm 3.3$

*Tableau 13. Activités spécifiques des radionucléides présents dans les échantillons d'eau, concentration et dose annuelle effective des deux échantillons étudiés.*

Dans les deux échantillons d'eau, on retrouve les radioéléments ( $^{214}\text{Bi}$  et  $^{214}\text{Pb}$ ) de la famille radioactive naturelle ( $^{238}\text{U}$ ).

- ✓ L'activité spécifique du  $^{214}\text{Bi}$  est calculée sous la raie gamma de 609,3 keV (46,30 %), 1120,29 keV (15,10 %), 1764,49 keV (15,10 %).
- ✓ L'activité spécifique du  $^{214}\text{Pb}$  est calculée sous la raie gamma de 351,92 keV (37,20 %), 295,21 keV (19,20 %),
- ✓ L'activité spécifique de  $^{238}\text{U}$  est la moyenne des précédentes;

Selon la référence [IRSN, 2007], l'équivalent de 1 Bq/litre de  $^{238}\text{U}$  est de 80,4  $\mu\text{g/L}$ . La concentration de l'activité de  $^{238}\text{U}$  des échantillons varie de 0,045 mg pour HG et 0,091 mg/L pour HOT avec une moyenne de 0,068 mg/litre, respectivement. La consommation des eaux contaminées en uranium engendre un danger à long terme pour la santé de l'individu en considérant l'estimation de la dose liée à la teneur en uranium dans les eaux de source.

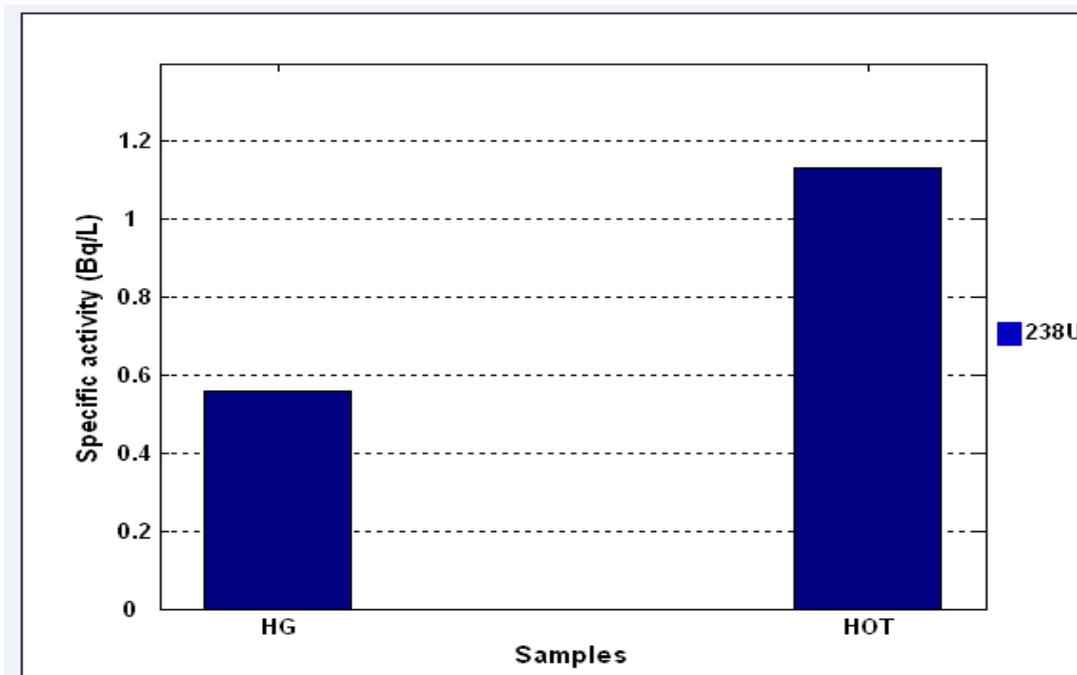


Figure 29. Activité spécifique de l'uranium (Bq/ L) dans les sources thermales de (Guergour et Ouled Tebben).

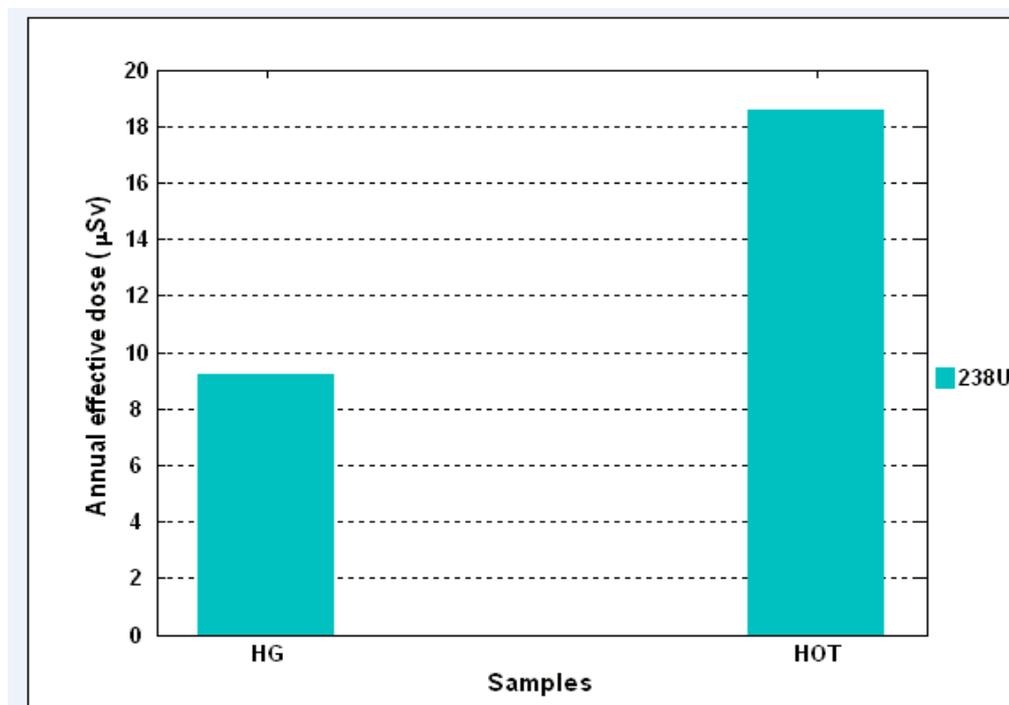


Figure 30. Dose efficace annuelle en uranium 238 (Hammam Guergour et Hammam Ouled Tebben).

Radionucléides	Echantillon « HG » Bq/litre	Echantillon « HOT » Bq/litre
Potassium 40	1,7	1,7
Thallium 208	0,1	0,1
Plomb 210	6,4	6,5
Bismuth 212	1,3	1,4
Plomb 212	0,2	0,2
Bismuth 214	0,4	0,4
Plomb 214	0,4	0,4
Radium 226	3	3
Actinium 228	0,4	0,4
Protactinium 234	16	15
Thorium 234	2,6	2,6
Uranium 235	0,2	0,2

Tableau 14. La limite de détection LD radionucléides présents dans les spectres des échantillons d'eau.

Les limites de détection des radionucléides présents dans les spectres des échantillons d'eau avec bruit de fond sont dans le tableau 14.

On a calculé la concentration d'activité spécifique en Bq/L de  $^{40}\text{K}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{234}\text{Pa-m}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$  dans les deux échantillons d'eau de source thermale en utilisant la relation suivante:

$$As = \frac{N}{P \times \epsilon \times T \times M} \quad (5.3)$$

Où ;

N est le comptage net corrigé en arrière-plan du radionucléide dans l'échantillon,

P est la probabilité d'émission de rayons gamma (rendement gamma),

ε est l'efficacité de comptage totale du système détecteur,

T est le temps de comptage de l'échantillon,

M est la masse (kg) ou le volume (L) de l'échantillon.

La limite de détection minimale (MDL) pour chaque activité a été calculée en utilisant l'équation suivante [Palmer, 1994]:

$$MDL = 3.3 \times \frac{A}{N_C} \times \sqrt{B} \quad (5.4)$$

Lorsque  $N_C$  est le nombre de coup net pour un échantillon d'activité  $A$  en Bq/L, et  $B$  est le bruit de fond en dessous du radionucléide. On a calculé les concentrations d'activité de  $^{238}\text{U}$  dans 1 mg/L des échantillons (HG) et (HOT). Les valeurs de dose efficaces annuelles provenant de l'eau de source potable ne sont pas représentatives d'une exposition réelle. Les eaux thermales considérées ici ne conviennent pas à l'eau potable en raison du degré important de minéralisation. La dose estimée dans une cure de boisson a été calculée sur la base des recommandations de la CIPR à condition qu'au cours d'une cure d'eau de quatre semaines, le patient consomme 1 L/jour. La dose équivalente annuelle engagée,  $H_{ing}(W)$ , a été calculée à partir de l'expression:

$$H(\mu Sv)_{ing} = DFC_{ing} (Sv/Bq) \times A_{sp}(Bq/L) \times I_w(L/an) \quad (5.5)$$

Où

$DFC_{ing}$  est le facteur de conversion de la dose d'ingestion des radionucléides en Sv/Bq, pour  $^{238}\text{U}$ . Le facteur de conversion de la dose d'ingestion pour les radionucléides naturels chez les adultes est de  $4,5 \times 10^{-8}$  Sv/Bq [WHO, 2011, Chau, 2009].

$A_{sp}$  est la concentration d'activité spécifique des radionucléides dans les échantillons d'eau en Bq/L,

-  $I_w$  est la consommation annuelle d'eau en litres par an. En supposant une prise d'eau moyenne de 1 L par jour, soit 365 L/an.

La concentration des activités spécifiques dans les deux échantillons d'eau thermale de l'Est Algérien a été mesurée par spectroscopie gamma, en utilisant un détecteur de germanium hyper pur. Comme le montre le tableau 12, seules les activités des radionucléides  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  sont supérieures à la limite MDA (Activité détectable minimale). Les activités des radionucléides  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$ ,  $^{40}\text{K}$  sont inférieures à l'Activité Détectable Minimum (MDA).

Il est également noté que dans l'échantillon HOT, la concentration de  $^{214}\text{Bi}$  ( $1,04 \pm 0,20$ ) Bq / L est inférieure à celle de  $^{214}\text{Pb}$  ( $1,21 \pm 0,21$ ) Bq/L dans l'échantillon HG alors que la concentration de  $^{214}\text{Bi}$  ( $0,65 \pm 0,21$ ) Bq/L est supérieur à celui de  $^{214}\text{Pb}$  ( $0,46 \pm 0,19$ ) Bq/L.

L'activité spécifique de  $^{238}\text{U}$  en Bq/L pour les deux échantillons d'eau a été déterminée en prenant l'activité moyenne de deux photo pics distincts de nuclides fils:  $^{214}\text{Pb}$  à 351,92 (37,2 %) keV et  $^{214}\text{Bi}$  à 609,31 (45 %) keV. La concentration d'activité de la série  $^{238}\text{U}$  dans l'échantillon HOT est plus élevée ( $1,13 \pm 0,20$  Bq/L) que celle de l'échantillon HG ( $0,56 \pm 0,20$  Bq/L) avec une moyenne de 0,845 Bq/L (figure 29).

La présence du Plomb 214 et du Bismuth 214 (Famille radioactive naturelle de l'uranium 238) dans les eaux thermales de Hammam Guergour et Hammam Ouled Tebben indiquent que ces eaux thermales passent à travers des couches géologiques granitiques. Mais les variations des concentrations de  $^{238}\text{U}$  d'un site à l'autre indiquent que l'origine de ces eaux thermales est la même, elles viennent de différentes profondeurs. La concentration d'activité de  $^{238}\text{U}$  pour les échantillons HG et HOT variait de 0,045 mg/L à 0,091 mg/L respectivement, avec une moyenne de 0,068 mg/L.

La dose efficace annuelle calculée pour Hammam Guergour et Hammam Ouled Tebben variait de 9,20 à 18,56  $\mu\text{Sv}$  (figure 30), soit une moyenne de 13,88  $\mu\text{Sv}$ . Selon les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique CIPR [ICRP, 1991], la limite d'exposition du public est de 0,1 mSv/an. La dose reçue par une personne adulte suite à la consommation de l'eau thermale de Hammam Ouled Tebben est environ deux fois plus élevée que celle consommée à Hammam Guergour, mais néanmoins elles demeurent nettement inférieures à la dose tolérée par la CIPR.

### VIII. Concentrations des activités (Bq/L) de $^{226}\text{Ra}$ , $^{238}\text{U}$ , $^{210}\text{Pb}$ et $^{40}\text{K}$ et paramètres physico-chimiques des eaux thermale et potable dans différents pays.

PAYS	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{238}\text{U}$ (Bq/L)	$^{210}\text{Pb}$ (Bq/L)	$^{40}\text{K}$ (Bq/L)	T(°C)	Mineralisation (TDS)(mg/L)	Références
Algérie	< 2.92 - 3.03	0.56 - 1.13	< 6.41-6.49	< 1.67-1.70	44-46	1.920-3230	Présent travail
Egypte	< 0.28-3.64	0.035-0.09	0.003-0.026	< 1.00-13.65	72-89	7296-14561	Khater (2003)
Jordan	3.80-6.81	2.10-5.95	–	23.23-34.80	–	–	Saqan et al. (2001)
Tunisie	0.034-3.9 0.2198-1.160	0.002-0.043 0.0123-0.0416	– –	< 2.40-3.90 –	19-54 48-54	8890-18760 982-18760	Labidi et al. (2002, 2010)
Yémen	2.25-3.25	–	–	26.73-43.37	–	–	Abd El-Mageed et al. (2013)
France Massif Central	0.588 - 2.287	–	–	–	16-41	–	Rihs (2002)

*Tableau 15. Concentrations des activités du  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{40}\text{K}$  et paramètres physico-chimiques des eaux thermales et potables dans différents pays.*

Les concentrations d'activité (Bq/ L) de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{40}\text{K}$  dans les eaux thermales de différents pays sont données dans le Tableau 15. Comme le montre ce tableau, la radioactivité dans les eaux thermales varie d'un pays à l'autre. Les concentrations d'activité U et Ra sont faibles et semblables à celles publiées pour d'autres régions du monde.

Il est important de souligner que ces valeurs ne sont pas des valeurs représentatives pour les pays mentionnés, mais pour la région d'où les échantillons ont été prélevés. La minéralisation varie de 1.920 à 18760 mg/L, pour le point hydrologique, il ya quatre types d'eau,  $\text{SO}_4^{2-}\text{-Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^- \text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^- \text{Na}^+$ , les températures des échantillons d'eau varient de 44 à 89 °C en fonction des sources thermales.

L'eau thermale de Hammam Guergour contient le chlorure et le sulfate ;  $r \text{SO}_4 \geq r \text{Cl} \geq r \text{HCO}_3 = r \text{Ca} \geq r \text{Mg} \geq r \text{Na}$ , la teneur en magnésium est également importante en rapport avec la dolomie infra-néocomienne et le calcaire. La température moyenne annuelle de l'air est d'environ 13,90 °C. Sa conductivité varie entre 4600 et 4890 microhms/cm. La température de l'eau varie de 42,1 °C à 44 °C avec une minéralogie d'environ 1.920 mg/L (tableau 15). Ce type d'eau est utilisé en gécologie, rhumatisme, appareils digestifs, canaux biliaires, traitements du foie et infections dermatologiques. La station d'eau thermale de Hammam Guergour est dotée d'équipements modernes et d'un personnel médical qualifié.

La source thermale de Hammam Ouled Tebben coule des roches de calcaire et de dolomites de lit de Baramian très craqué, Il émerge à la faveur du point N 20 E. Sa température est d'environ 46 °C avec une minéralogie d'environ 3230 mg/L. L'eau est un sulfaté calcique;  $r \text{SO}_4 \geq r \text{Cl} \geq r \text{HCO}_3 \geq r \text{Ca} \geq r \text{Mg} \geq r \text{Na}$ . Ce type d'eau thermale ne présente aucune substance chimique spécifique, mais l'hyperthermalité de 46°C pourrait être bénéfique pour les traitements rhumatisants douloureux ainsi que les traitements dermatologiques infections. L'eau thermale doit son existence à l'écoulement naturel des eaux souterraines profondes par la conduite de canaux linéaires dans les strates rocheuses. Cela se produit généralement sous un gradient géothermique normal. La concentration d'activité des radionucléides naturels dans les eaux thermales varie dans les régions étudiées. Elle dépend de l'origine de l'eau et de la chimie, de l'interaction eau-roche et de leur comportement chimique. Les concentrations les plus élevées d'activité de  $^{238}\text{U}$  se retrouvent dans la source thermale d'Ouled Tebben par rapport à celles du Guergour. Lorsque les eaux contenant de l'uranium sont consommées, l'incorporation d'uranium entraîne un effet dangereux à long terme.

Lors de l'estimation de la dose liée à la teneur en uranium des eaux de source consommées, il doit être entendu que ce type d'eau ne fait pas partie de l'approvisionnement permanent en eau potable. Il est utilisé à des fins médicales pour une période limitée et avec des quantités bien définies. L'application thérapeutique prend habituellement plusieurs semaines et des doses quotidiennes de 0.2 - 2 L.

La dose annuelle efficace reçue par les individus en cure thermale a été calculée à partir des taux de consommation de 1 L d'eau par jour, soit 365 L/an. Les valeurs sont inférieures à la dose de référence de 0,1 mSv par an [Rusconi, 2004].

Les processus hydrochimiques permettent de mieux comprendre les contributions de l'interaction roche-eau et les influences anthropiques sur la qualité des eaux souterraines. Ces processus géochimiques sont responsables des variations saisonnières et spatiales de la chimie des eaux souterraines [Matthes, 1982, Kumar, 2006]. Les eaux souterraines évoluent chimiquement en interagissant avec les minéraux de l'aquifère ou le mélange interne entre différentes nappes phréatiques le long des voies d'écoulement dans la sous-surface [Domenico, 1972, Schuh, 1997]. Cela indiquait que l'augmentation des concentrations de solutés dans les eaux souterraines était causée par une recharge spatialement variable, régie par des contrôles microtopographiques. De plus, l'altération des minéraux primaires et secondaires contribue également aux cations et à la silice dans le système [Freeze, 1979, Jacks, 1973, Bartarya, 1993]. La concentration moyenne de  $^{238}\text{U}$  dans nos échantillons HG et HOT est de 0,068 mg/L tandis que la concentration de  $^{238}\text{U}$  varient 0,17 à 0,48 mg/litre avec une moyenne de 0,26 mg/litre dans les eaux thermales en Jordanie [Saqan, 2001].

Dans l'Est Algérien, nous constatons que l'activité moyenne de  $^{226}\text{Ra}$  est inférieure à 2,92 et 3,03 Bq/L dans les échantillons HG et HOT respectivement. Dans les eaux thermales tunisiennes, les activités de  $^{226}\text{Ra}$  se situent entre 0,002 et 1,63 Bq/L [Labidi, 2002, 2010]. Dans les eaux thermales France Massif Central, les activités de  $^{226}\text{Ra}$  se situent entre 0,588 et 2,287 Bq/L [Rihs, 2002]. Les concentrations d'activité  $^{226}\text{Ra}$  les plus élevées se trouvent dans les eaux de source les plus chaudes. L'activité moyenne du  $^{226}\text{Ra}$  dans les échantillons d'eau thermale dans la région d'Yémen se situe entre 2.25 et 3.25 Bq/L [Abd El-Mageed et al. 2013]. Les activités moyennes du  $^{226}\text{Ra}$  dans les échantillons d'eau thermale dans les trois régions d'Égypte (Golfe de Suez, Le Caire et Oasis de Bahariya) sont de 0,70 Bq/L (moins de 0,28 - 0,77).

Les concentrations moyennes d'activité de  $^{40}\text{K}$  dans les échantillons HG et HOT sont inférieures à 1,69 Bq/L. L'activité maximale du  $^{40}\text{K}$  dans les sources d'eau thermales d'Égypte est 5.78 Bq/L. À Ain El Sira en Égypte, la source est une eau du lac salé et l'activité du  $^{40}\text{K}$  est 13.7 Bq/L. L'activité maximale de  $^{40}\text{K}$  en Tunisie est de 3,9 Bq/L [Labidi, 2010]. Les valeurs les plus importantes du  $^{40}\text{K}$  des sources thermales de la région d'Yémen sont situent entre 26.73 et 43.37 Bq/L [Abd El-Mageed et al. 2013].

Le Thorium-232 n'a pas été détectable (moins de 0,54 - 0,58 Bq/L), dans les échantillons d'eaux thermales de l'Algérie HG et HOT. Le thorium est un élément particulièrement insoluble dans les eaux naturelles et est généralement associé aux solides [Labidi, 2010].

# *CONCLUSION*

## CONCLUSION

En Algérie, l'eau thermale doit son existence à la hausse de l'eau souterraine profondément par linéaments de conduits dans les strates de la roche. Cela prend généralement lieu sous gradient géothermique normal. La concentration de l'activité des radionucléides naturels dans les eaux thermales varie dans les régions étudiées. Elle dépend de l'origine de l'eau et de sa composition chimique. Elle dépend aussi de l'interaction entre l'eau et la roche et de leur comportement chimique.

Ce travail avait pour objectif la mise en œuvre d'une procédure analytique efficace et sensible pour déterminer qualitativement et quantitativement la radioactivité des échantillons d'environnement et particulièrement celle d'origine naturelle en utilisant la techniques de la spectrométrie gamma qui apparaît comme une technique de mesure puissante et pluridisciplinaire. Sa mise en œuvre pratique est simple, ce qui explique son utilisation universelle pour la caractérisation de matières nucléaires et d'objets irradiants. Elle nécessite cependant une bonne connaissance des principaux phénomènes limitatifs auxquels l'utilisateur est susceptible d'être confronté.

La concentration la plus élevée en uranium 238 est celle de Hammam Ouled Tebben (Région de Sétif) où la température est plus élevée. Il est fortement recommandé de mesurer le taux de radioactivité dans les eaux thermales et leur environnement. Ainsi nous pourrions estimer l'exposition aux rayonnements ionisants émanant des eaux thermales concernant les personnes du public et les travailleurs au sein des stations thermales.

Les concentrations en uranium 238 des deux sites étudiés sont différentes. La différence enregistrée dépend probablement de l'origine de l'eau, de sa profondeur et la voie de son cheminement à travers les couches de l'écorce terrestre.

Les radionucléides très nocifs comme l'uranium 235, le radium 226, le thorium 234, le thorium 232 et le potassium 40 n'ont pas été détecté par la chaîne de spectrométrie gamma. Nous nous pourrions exclure leur présence dans les eaux thermales des sites considérés, mais néanmoins, nous dirons qu'ils présentent une activité inférieure à la limite de détection relative à chacun d'eux.

La consommation des denrées alimentaires par les personnes vivant autour des sources thermales présente un risque d'irradiation et contamination faible. Selon les recommandations de la CIPR (1991), la limite d'exposition pour les personnes du public est de 1 mSv/an (dose efficace). Les doses obtenues concernant les eaux thermales Hammam Guergour et Hammam Ouled Tebben de l'Est Algérien sont nettement inférieures à la dose recommandée.

Nous dirons que les eaux thermales peuvent être utilisées sans restriction (Baignade, boisson, traitement médical, loisir et cure thermique). Ce travail permet de connaître la contribution radioactive pour l'élaboration de la cartographie des eaux thermales à l'Est Algérien.

# *REFERENCES*

## REFERENCES

- [Abd El-Mageed, 2013] Abd El-Mageed, AI., El Kamel, AEH., Abd El-Bast, A., Abbady, AEB., Saleh, II., 2013. Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen. *Desalination* 321, 28–31.
- [ACRO, 1994] ACRO Association pour le contrôle de la radioactivité dans l'Ouest, *les rayonnements et la santé*, Extrait de l'ACRONique du nucléaire n° 27, décembre 1994.
- [Argus, 1989] Argus, DF., Gordon, RG., DeMets, C., Stein, S., 1989. Closure of the Africa–Eurasia–North America plate motions circuit and tectonic of the Gloria fault. *J Geophys Res* 94, 5585–5602.
- [Auzende, 1973] Auzende, JM., Bonnin, J., Olivet, JL., 1973. The origin of the western Mediterranean Basin. *J Geol Soc Lond* 129, 607–620.
- [Bartarya, 1993] Bartarya, SK., 1993. Hydrochemistry and rock weathering in a subtropical lesser Himalayan river basin in Kumaun. *India. J Hydrol* 146, 149–174.
- [Buforn, 1995] Buforn, E., Sanz de Galdeano, C., Udias, A., 1995. Seismotectonics of the Ibero-Maghrebian region. *Tectonophysics* 248, 247–261.
- [Buket, 2010] Buket, C., Füsün Caml, N., Günseli, Y., Osman, C., 2010. Natural radioactivity ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$ ) and assessment of radiological hazard in the Kestanbol granitoid, Turkey. *Radiat Prot Dosim* 141, 192–198.
- [Calais, 2003] Calais, E., Demets, C., Nocquet, JM., 2003. Evidence for a post—3.16 Ma change in Nubia–Eurasia plate motion? *Earth Planet Sci Lett* 216, 81–92.
- [Chau, 2009] Chau, ND., Michalec, B., 2009. Natural radioactivity in the bottled natural spring mineral and therapeutic waters in Poland. *J Radioanal Nucl Chem* 279, 121–129.
- [Coequyt, 2005] Coequyt, S., *effets biologiques des rayonnements non-ionisants, faculté de médecine de Lille. Cours page 49, 2005. [http://www.biophysique.fr/Radiobiologie\\_files/radiobio0649-82.pdf](http://www.biophysique.fr/Radiobiologie_files/radiobio0649-82.pdf)*
- [Coulon, 2010] Coulon, M. R., *Spectrométrie gamma haute résolution et hauts taux de comptage sur primaire de réacteur de type génération 4 au sodium liquide. Thèse de doctorat de l'université de Caen, spécialité : génie des procédés, soutenue novembre 2010.*

- [Courtine, 2007] Courtine, F., *Etalonnage d'un spectromètre gamma en vue de la mesure de la radioactivité naturelle, Mesures expérimentales et modélisation par techniques de Monte-Carlo*. Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal France, soutenu mars 2007.
- [Cressier, 2010] Cressier D., *Synthèse et Evaluation de Nouveaux Dérivés Organiques et Organométalliques Contre les Effets des Rayonnements Ionisants*. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, spécialité : Chimie, Biologie, Santé, soutenue Octobre 2010.
- [Cuvier, 2015] Cuvier A., *Accumulation et sources de l'uranium, de ses descendants et des éléments traces métalliques dans les zones humides autour des anciens sites miniers uranifères*. Thèse de doctorat de l'Université de Toulouse, Spécialité : Hydrologie, Hydrochimie, Sol, Environnement, soutenue novembre 2015.
- [DNEMT, 2000] Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales. DNEMT 2000. *Eau Minérale et Radioactivité*. Note technique n° 15.
- [Domenico, 1972] Domenico, PA., *Concepts and models in groundwater hydrology. International series in the earth and planetary sciences*, 1<sup>st</sup> edn. McGraw-Hill Inc, US, 1972.
- [Drubay, 2015] Drubay, D., *Analyse de la relation dose-réponse pour les risques de mortalité par cancer et par maladie de l'appareil circulatoire chez les mineurs d'uranium*, Thèse de doctorat de l'université Paris-Sud, Spécialité Santé Publique-Epidémiologie, Soutenue février 2015.
- [El-Taher, 2007] El-Taher, A., Uosif, MAM., Orabi, AA., 2007. Natural radioactivity levels and radiation hazard indices in granite from Aswan to Wadi El-Allaqi southeastern desert, Egypt. *Radiat Prot Dosim* 124, 148–154.
- [Fabre, 1976] Fabre J., *Introduction à la géologie de l'Algérie et des régions voisines*. Société Nationale d'édition et de Diffusion, Alger, 1976.
- [Firestone, 1996] Firestone, RB., Shirley, VS., Baglin, CM., Chu, SYF., Zipkin, J., 1996. The 8th edition of the Table of Isotopes. Wiley, New York.
- [Frelin, 2006] Frelin, A M., développement du dosimap :instrument de dosimétrie pour le contrôle qualité en radiothérapie,Thèse de doctorat de l'université de CAEN, Spécialité Constituants élémentaires, Soutenue octobre 2006.

- [Freeze, 1979] Freeze, RA., Cherry, JA., *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1979.
- [Frizon, 2000] Frizon de Lamotte, D., Saint Bezar, B., Brace`ne, R., Mercier, E., 2000. The two main steps of the Atlas building and geodynamics of the western Mediterranean. *Tectonics* 19, 740–761.
- [Gascoyne, 1992] Gascoyne M., *Geochemistry of the actinides and their daughter.*, in: *Uranium Series Disequilibrium*, Oxford, 1992.
- [Gainon, 2008] Gainon, F., *Les isotopes radioactifs de la série de l'uranium-238 (<sup>222</sup>Rn, <sup>226</sup>Ra, <sup>234</sup>U et <sup>238</sup>U) dans les eaux thermales de Suisse Sites d'Yverdon-les-Bains, Moiry, Loèche-les-bains, Saxon, Val d'Illiez, Bad Ragaz, Delémont, Lavey-les-Bains, Brigerbad et Combioula*, Thèse de doctorat sciences de l'université de Neuchâtel, Soutenue août 2008.
- [Guiraud, 1990] Guiraud R., *Evolution post-triasique de l'avant-pays de la chaîne alpine en Algérie : d'après l'étude du Bassin du Hodna et des régions voisines*, Office National de la Géologie, 1990.
- [Hustache Ottini et al. 2001] Hustache Ottini S., Buskalic D., Bouchez J., Nappi E., Savajols H., Guidal M., Pouthas J., Duchêne G., Pussieux T., Loiselet M., Salati P., *De la Mesure à la Grandeur Physique*, Physique nucléaire instrumentale, Ecole internationale Joliot-Curie, France, 2001.
- [ICRP, 1991]. *1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection*. ICRP Publication 60 (Users Edition).
- [IRSN, 2015] Institut de Radioprotection et de sureté Nucléaire, IRSN 2015, *Exposition de la population française aux rayonnements ionisants*, p 8.
- [IRSN, 2007] Institut de Radioprotection et de sureté Nucléaire, IRSN 2007, Uranium naturel et environnement, fiche radionucléide.
- [Jacks, 1973] Jacks, G., 1973. Chemistry of groundwater in a district in southern India. *J Hydrol* 18,185–200.
- [Jimonet, 2007] Jimonet, C., Metivier, H., *Personne compétente en radioprotection principes de radioprotection-réglementation*, CEA INSTN, Sciences France. 2007.
- [Khater, 2003] Khater, AEM., 2003. Radiological aspects of some Egyptian thermomineral springs. *J Environ Monit* 5,414–418.

- [Kumar, 2006] Kumar, M., Ramanathan, AL., Rao, MS., Kumar, B., 2006. Identification and evaluation of hydrogeochemical processes in the groundwater environment of Delhi, India. *J Environ Geol* 50,1025–1039.
- [Labidi, 2002] Labidi, S., Dachraoui, M., Mahjoubi, H., Lemaitre, N., Ben Salah, R., Mtimet, S., 2002. Natural radioactive nuclides in some Tunisian thermo-mineral springs. *J Environ Radioact* 62, 87–96.
- [Labidi, 2010] Labidi, S., Mahjoubi, H., Essafi, F., Ben Salah, R., 2010. Natural radioactivity levels in mineral, therapeutic and spring waters in Tunisia. *Radiat Phys Chem* 79,1196–1202.
- [Leconte, 2006] Leconte, P., *Développement et optimisation de techniques de mesure par spectrométrie Gamma*, Thèse de doctorat de l'université Clermont-Ferrand II, Spécialité : Physique des réacteurs, Soutenue octobre 2006.
- [Lefort, 1969] Lefort M., *Les radiations nucléaires* (troisième édition), Presses Universitaires de France, paris, 1969.
- [Lyoussi, 2005] Lyoussi A., *Mesure nucléaire non destructive dans le cycle du combustible*, Techniques de l'Ingénieur, 2005.
- [Matthes, 1982] Matthes, G., *The properties of groundwater*. Wiley, New York, 1982.
- [Mostefai, 1956] Mostefai A., *Le poste d'observation crénotherapique du Guergour*, thèse de doctorat en médecine de l'université d'Alger, soutenue Janvier 1956.
- [Palmer, 1994] Palmer, BM., McInerney, JJ., 1994. Optimization of energy window limits for photopeak detection system. *Appl Radiat Isot* 45, 5–9.
- [Pirard, 2006] Pirard, B., *Etude et validation d'un spectromètre gamma pour la mesure de la composition chimique des surfaces planétaires- Application à une mission vers Mercure*, thèse de Doctorat de l'Université Toulouse III, Spécialité : Instrumentation Spatiale, soutenue décembre 2006.
- [Rihs, 2002] Rihs, S., Condomines, M., 2002. An improved method for Ra isotope (<sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>224</sup>Ra) measurements by gamma spectrometry in natural waters: application to CO<sub>2</sub>-rich thermal waters from the French Massif Central. *Chem Geol* 182,409–421.
- [Risler, 1974] Risler, J. J. *la radioactivité des eaux thermo-minérales*, service géologique régional massif central, 1974, pp1.

- [Rusconi, 2004] Rusconi, R., Forte, M., Abbate, G., Gallini, R., Sgorbat, G., 2004. Natural radioactivity in the bottled mineral waters: a survey in Northern Italy. *J Radioanal Nucl Chem* 260, 421–427.
- [Sanders, 2006] Sanders, L., les eaux thermales en traitement adjuvant dermatologique et dermo-cosmotologique *exemple de l'Eau thermale d'Avène*, thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, Spécialité : Sciences pharmaceutiques, soutenue novembre 2006.
- [Savornin, 1920] Savornin, J., Etude Géologique de la Région du Hodna et du Plateau Sétifien 1920, page 447.
- [Saqan, 2001] Saqan, A., Kullab, M., Ismail, AM., 2001. Radionuclides in hot mineral spring waters in Jordan. *J Environ Radioact* 52, 99–107.
- [Schuh, 1997] Schuh, WM., Klinekebiel, DL., Gardner, JC., Meyar, RF., 1997. Tracer and nitrate movements to groundwater in the norruem great plains. *J Environ Qual* 26, 1335–1347.
- [Sellès, 2006] Sellès O., *Halogénures de lanthane dopés cérium Des scintillateurs rapides pour l'imagerie médicale*, thèse de Doctorat de l'université Paris VI, Spécialité : Sciences des Matériaux, soutenue décembre 2006.
- [Singh, 2005] Singh, S, Rani, A., Kumar Mahajan, R., 2005. 226Ra, 232Th and 40K analysis in soil samples from some areas of Punjab and Himachal Pradesh, India using gamma ray spectrometry. *Radiat Meas* 39, 431–439.
- [Singh, 1996] Singh, P., Rana, NPS., Azam, A., Naqvi, AH., Srivastava, DS., 1996. Levels of uranium in wars from some Indian cities determined by fission track analysis. *Radiat Meas* 26, 683–687.
- [Serpelloni, 2007] Serpelloni, E., Vannucci, G., Pondrelli, S., Argnani, A., Casula, G., Anzidei, M., Baldi, P., Gasperini, P., 2007. Kinematics of the western Africa–Eurasia plate boundary from focal mechanisms and GPS data. *Geophys J Int* 169, 1180–1200.
- [Stich, 2003] Stich, D., Ammon, CJ., Morales, J., 2003. Moment tensor solutions for small and moderate earthquakes in the Ibero-Maghreb region. *J Geophys Res* 108, 2148.
- [Stich, 2006] Stich, D., Serpelloni, E., Mancilla, FL., Morales, J., 2006. Kinematics of the Iberia-Maghreb plate contact from seismic moment tensors and GPS observations. *Tectonophysics* 426, 295–317.

- [Tsoulfanidis, 1995] Tsoulfanidis, N., *Measurement and detection of radiation*, 2nd edition (1995).
- [WHO, 2011] World Health Organization, *Guidelines for drinkingwater quality*, 4th edn, Geneva, 2011.
- [Wilhelm, 2016] Wilhelm, É., *Développement d'algorithmes de détection et d'identification gamma : application à la spectrométrie gamma embarquée*, thèse de Doctorat de l'Université de Strasbourg, Spécialité : Physique, soutenue novembre 2016.
- [Yannick, 2009] Yannick A., *Phy 113 : Cours de radioactivité*, page 13, 2009. <https://lpsc.in2p3.fr/schien/PHY113a/Cours%20radioactivite%202009-2010.pdf>.

# *ANNEXES*

# ANNEXE 1

EAU-01D40

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* G A M M A S P E C T R U M A N A L Y S I S \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

```

Report Generated On      : 29/12/13 15:34:50
Sample Title            : Hammam Guergour
Spectrum Description    :
Sample Identification    : EAU - 01
Sample Type             : Eau thermale
Sample Geometry         : Marinelli 450 ml

Peak Locate Threshold   : 3.00
Peak Locate Range (in channels) : 1 - 65535
Peak Area Range (in channels) : 1 - 8192
Identification Energy Tolerance : 2.000 keV

Sample Size             : 4.500E-001 L
Sample Taken On        : 06/11/13 09:26:00
Acquisition Started    : 06/11/13 09:26:40

Live Time              : 86400.0 seconds
Real Time              : 86426.0 seconds
  
```

Energy Calibration Used Done On : 30/09/13  
 Efficiency Calibration Used Done On : 22/11/13

Interference Corrected Activity Report 29/12/13 15:34:53 Page 1

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* N U C L I D E I D E N T I F I C A T I O N R E P O R T \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Sample Title: Hammam Guergour  
 Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\STDLIB.NLB

IDENTIFIED NUCLIDES

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /L )	Activity Uncertainty
PB-210	1.000	46.54*	4.10	3.86651E+002	9.11433E+001
BI-214	0.530	609.31*	46.30	1.04757E+000	2.21594E-001
		768.36	5.04		
		806.17	1.23		
		934.06	3.21		
		1120.29*	15.10	9.90543E-001	7.40053E-001
		1155.19	1.69		
		1238.11	5.94		
		1280.96	1.47		
		1377.67	4.11		
		1385.31	0.78		
		1401.50	1.39		
		1407.98	2.48		
		1509.19	2.19		
		1661.28	1.15		
		1729.60	3.05		
PB-214	0.533	1764.49*	15.80	1.45791E+000	7.16806E-001
		1847.44	2.12		
		2118.54	1.21		
		74.81	6.33		
		77.11	10.70		
		87.20	3.70		

EAU-02D40  
 \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* G A M M A S P E C T R U M A N A L Y S I S \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Report Generated On : 30/12/13 09:31:58

Sample Title : Eau Hammam Ouled Tebane  
 Spectrum Description :  
 Sample Identification : EAU - 02  
 Sample Type : Eau thermale  
 Sample Geometry : Marinelli

Peak Locate Threshold : 3.00  
 Peak Locate Range (in channels) : 1 - 65535  
 Peak Area Range (in channels) : 1 - 8192  
 Identification Energy Tolerance : 2.000 keV

Sample size : 4.500E-001 L

Sample Taken On : 07/11/13 13:45:00  
 Acquisition Started : 07/11/13 13:45:04

Live Time : 86400.0 seconds  
 Real Time : 86418.8 seconds

Energy Calibration Used Done On : 30/09/13  
 Efficiency Calibration Used Done On : 22/11/13

Interference Corrected Activity Report 30/12/13 09:31:59 Page 1

\*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\* N U C L I D E I D E N T I F I C A T I O N R E P O R T \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

Sample Title: Eau Hammam Ouled Tebane  
 Nuclide Library Used: C:\GENIE2K\CAMFILES\STDLIB.NLB

..... IDENTIFIED NUCLIDES .....

Nuclide Name	Id Confidence	Energy (keV)	Yield (%)	Activity (Bq /L )	Activity Uncertainty
K-40	0.987	1460.81*	10.67	1.07117E+000	2.95927E-001
TL-208	0.829	583.19*	84.50	1.51747E+001	4.97625E+000
		860.56	12.42		
		2614.53*	99.16	6.49514E+001	2.33276E+001
PB-210	0.999	46.54*	4.10	1.36519E+002	3.42056E+001
BI-214	0.529	609.31*	46.30	9.71205E-001	1.21230E-001
		768.36	5.04		
		806.17	1.23		
		934.06	3.21		
		1120.29*	15.10	6.50260E-001	1.49457E-001
		1155.19	1.69		
		1238.11	5.94		
		1280.96	1.47		
		1377.67	4.11		
		1385.31	0.78		
		1401.50	1.39		
		1407.98	2.48		
		1509.19	2.19		
		1661.28	1.15		
		1729.60	3.05		
		1764.49*	15.80	1.26552E+000	3.15617E-001
		1847.44	2.12		

## ANNEXE 2

### Spécifications

Modèle PCS61R

Numéro de série 1168

Spécification et données de performance de ce détecteur

Efficacité relative 40%

Résolution 1.8 keV (FWHM) à 1.33 MeV

Description du cryostat ou son numéro Vertical Disptic, type 7500L

### Caractéristiques physiques

Géométrie coaxial one open end, closed and facing window

Diamètre 51 mm

Longueur 37 mm

Diamètre à partir de la fenêtre 5 mm

### Caractéristiques électriques

Voltage (+) 2000 V

Voltage recommande pris à partir (+) 2500 V

Fuit de courant recommandé à 0.1 nA

Voltage du point de test préamplificateur au voltage recommandé -1.0 V

### Résolution et efficacité

Avec un temps constant 4 $\mu$ s





Figures1. Dose efficace annuelle en uranium 238 (Hammam Guergour et Hammam Ouled Tebben).

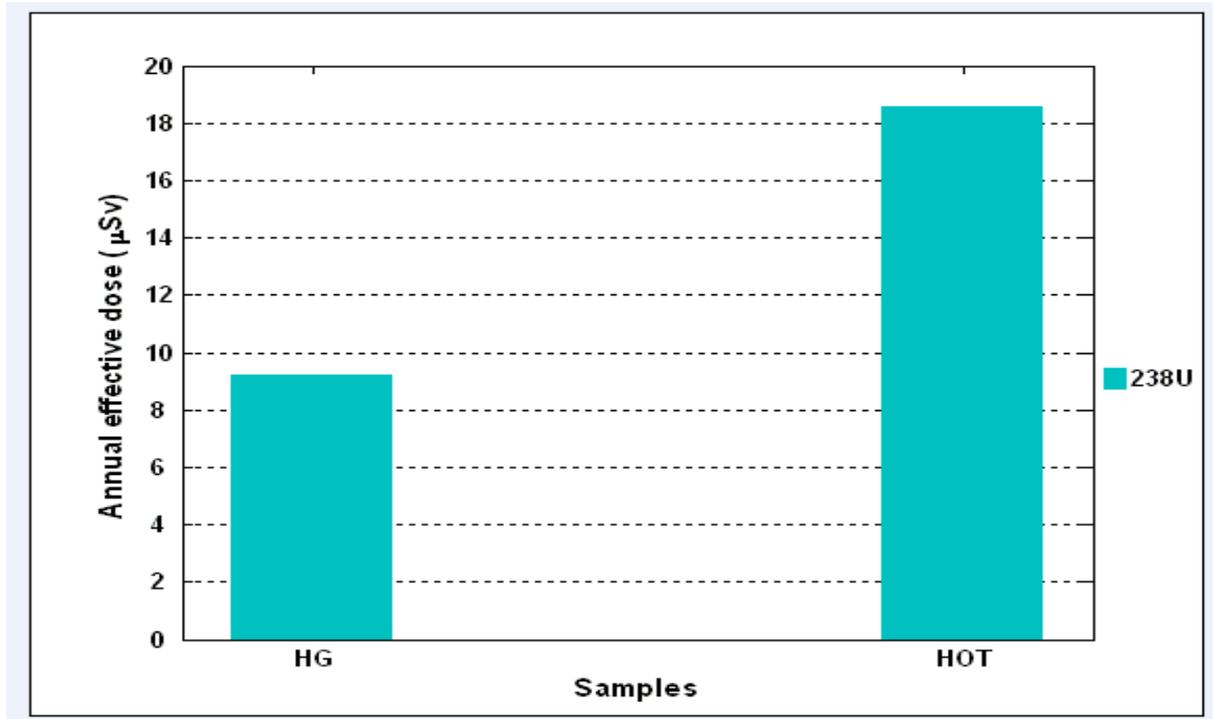
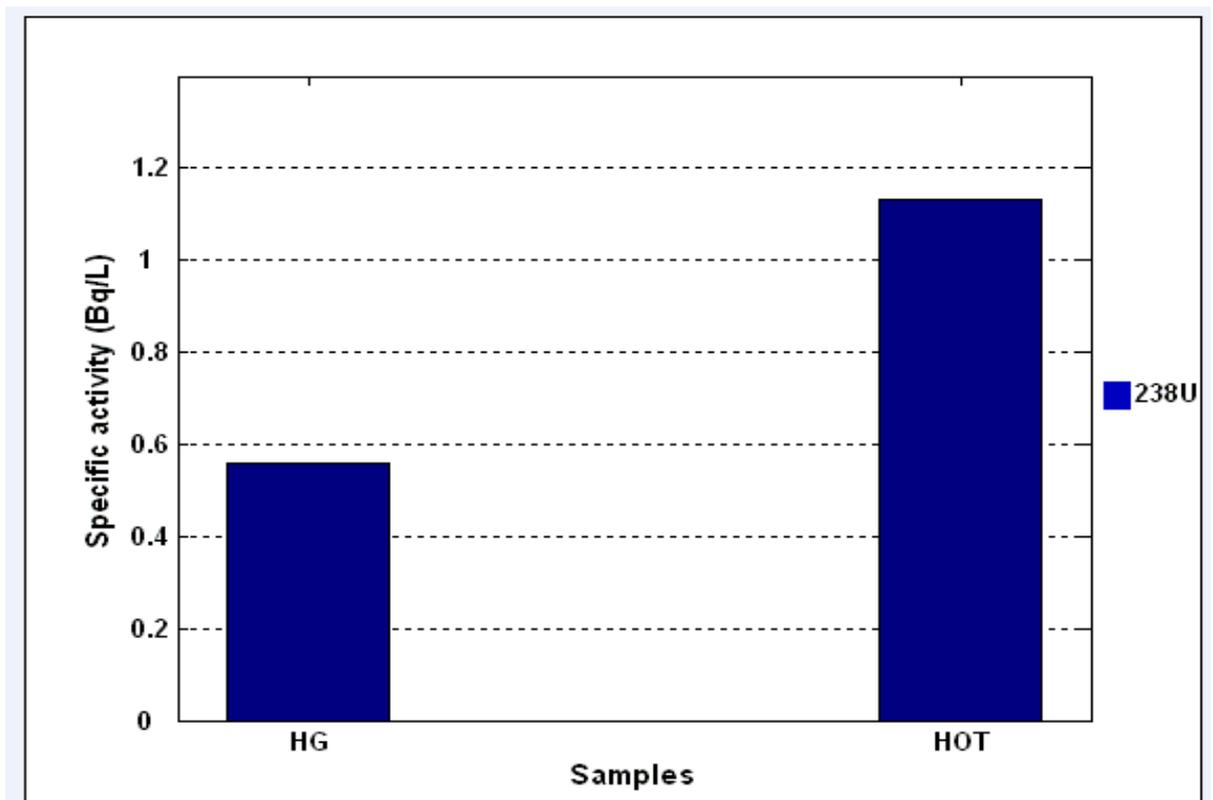


Figure 2. Activité spécifique de l'uranium (Bq/L) dans les sources thermales (Guergour et Ouled Tebben).



## ANNEXE 4

### GLOSSAIRE

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

**Radioélément (*radioelement*):** élément chimique dont tous les isotopes sont radioactifs.

**Radionucléides (*radionuclide*):** atomes d'éléments radioactifs naturels ou artificiels.

**Lithophile (*lithophile*):** qui présente une affinité avec la phase minérale

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

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

**DNEMT :** Division Nationale des Eaux Minérales et Thermales.

**CNSC ou CCSN :** Commission Canadienne de Sécurité Nucléaire (**Canadian Nuclear Safety Commission**)

**1nGy=1Sv**

**Adsorption (*adsorption*):** processus à l'origine d'une accumulation nette d'une substance à l'interface entre deux phases contiguës, selon un arrangement en deux dimensions (Sposito, 1989).

**Demi-vie (*half-life*):** durée nécessaire à la diminution de la moitié de l'activité d'un radionucléide.

**Equilibre séculaire (*secular equilibrium*):** situation où la quantité d'un radio isotope reste constante du fait d'un taux de production égal au taux de désintégration.

**Filiation radioactive (ou chaîne de désintégration) (*radioactive decay chain*):** suite de désintégrations issues de la transformation spontanée d'un radioisotope instable et permettant d'aboutir à un élément chimique de noyau atomique stable. Le plomb est généralement le point stable auquel les chaînes de désintégration s'arrêtent.

**Isotopes (*isotope*):** nucléides d'un élément partageant le même nombre de protons mais un nombre de neutrons différent.

**Élément trace (*trace element*):** élément chimique dont la concentration dans la croûte terrestre est inférieure à 1‰.

**IRSN** : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire.

**CIPR** : Commission Internationale de Protection Radiologique.

**Jurassique** : Période géologique qui s'étend de 200-145 Ma.

**Crétacé** : est une période géologique qui s'étend de  $\approx$  145,0 à 66,0 Ma. Elle se termine avec la disparition des dinosaures non aviens et de nombreuses autres formes de vie. Cette période est la troisième et dernière de l'ère Mésozoïque ; elle suit le Jurassique et précède le Paléogène.

**Ma** : Millions d'années.

**Dolomite** : est une roche sédimentaire carbonatée ou une espèce minérale formée de carbonate de calcium et de magnésium de formule chimique  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$  avec des traces de Fe, Mn, Co, Pb, Zn.

**Oxfordien** : est le premier étage stratigraphique du Jurassique supérieur (Malm). Il s'étend de -163,5 à 157 millions d'années. Sa durée est d'environ 6 millions d'années.

**Dogger**: aussi connu sous le nom de Jurassique moyen, est une époque de la période géologique du Jurassique. Cette époque s'étend de 175,6 à -161,2 Ma.

**Trias**: est un système géologique, subdivision de l'ère Mésozoïque comprise entre 252,2 -201,3 millions d'années.

**Kimméridgien**: est le deuxième étage stratigraphique du Jurassique supérieur (Malm). Il s'étend de -157,3 à -152,1 millions d'années. Sa durée est d'environ 5 millions d'années.

**Roche Kimméridgien** : une roche qui a pour particularité d'avoir un aspect feuilleté.

**La résistivité**: C'est une mesure servant à évaluer la quantité d'éléments dissous dans l'eau. L'eau chimiquement pure est très mauvaise conductrice du courant électrique, si elle contient des sels minéraux elle laisse davantage passer le courant. Elle est généralement exprimée en ohm/cm

**Conductivité** (Inverse de la résistivité) : Elle permet d'évaluer rapidement mais approximativement la minéralisation globale de l'eau et d'en suivre l'évolution

**Facteur de conversion (mSv/Bq)**: Le facteur de dose ou le facteur de conversion (mSv/Bq) nous permet de connaître la dose efficace reçue en millisieverts (mSv) à partir de l'activité inhalée ou ingérée (Bq).

## Résumé

Le développement de la spectrométrie  $\gamma$  a débuté avec l'essor des sciences et des technologies nucléaires afin de répondre aux besoins de contrôle, de caractérisation et d'analyse des matières radioactives. Elle est dite « non-destructive » car elle permet de respecter l'intégrité de l'objet à analyser.

Le but de cette étude est de déterminer qualitativement et quantitativement la radioactivité naturelle des deux sources thermales qui sont Guergour et Ouled Tebben (régions de Sétif) de l'Est Algérien, en utilisant la technique de la spectrométrie gamma. Nous dirons que les eaux thermales étudiées peuvent être utilisées sans restriction (Baignade, traitement médical, loisir et cure thermique). Ce travail permet de connaître la contribution radioactive pour l'élaboration de la cartographie des eaux thermales à l'Est Algérien.

## Abstract

The development of gamma spectrometry began with the development of nuclear science and technology in order to meet the requirements for the control, characterization and analysis of radioactive materials. It is called 'non-destructive' because it allows to respect the integrity of the object to be analyzed.

The aim of this study is to determine qualitatively and quantitatively the natural radioactivity of the two thermal springs that are Guergour and Ouled Tebben (Setif regions) of East Algeria, using gamma-ray spectrometry technique. We will say that the thermal waters studied can be used without restriction (Bathing, medical treatment, leisure and spa treatment). This work makes it possible to know the radioactive contribution for the development of the mapping of the thermal waters in East Algeria.

## ملخص

بدأ تطوير تقنية طيف غاما بتطوير العلوم والتكنولوجيا النووية من أجل تلبية متطلبات مراقبة وتحليل المواد المشعة. تسمى هذه التقنية 'غير مدمرة' لأنها تختتم سلامة العينة التي يتم تحليلها. الهدف من هذه الدراسة هو تحديد نوعيا وكميا النشاط الإشعاعي الطبيعي للينابيع الحرارية في منطقتي قرقور وأولاد تبليين في منطقة سطيف شرق الجزائر وذلك باستخدام تقنية طيف غاما. إن المياه الحرارية المدروسة يمكن استخدامها دون قيود (الاستحمام، العلاج الطبي والترفيه...). هذا العمل يساهم في تطوير رسم الخرائط للمياه الحرارية في شرق الجزائر.