

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



UNIVERSITE MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA - JIJEL



FACULTE DES SCIENCES EXACTES ET INFORMATIQUE
DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Série :

Mémoire présenté pour obtenir le diplôme de

Master en physique

Spécialité : physique médicale

Par

Djimli Zineb

Amoura Nihed

Intitulé

**Etude de la radioactivité des eaux thermales et
perspectives d'évaluation du risque sanitaire**

Soutenu le : **15 /07 /2021** devant le jury :

Président : N. Ounoughi

M.C.A. Univ. de Jijel

Rapporteur : A. Belafrites

Prof. Univ. de Jijel

Examineur : A. Boukhelout

M.A.A.Univ. de Jijel

Remerciements

Nous tenons à remercier « Allah » le tout puissant pour toute la santé, la force, le courage et la volonté qu'il nous a donné pour l'achèvement de ce travail.

*Nous tenons à remercier particulièrement et avec gratitude notre encadreur Professeure **Abdelfattah Belafrittes** pour ses apports appréciés, ses encouragements et pour tous ses conseils très précieux qui ont étayé notre conduite dans la réalisation de ce mémoire.*

*Nous remercions Monsieur **Nabil Ounoughi** pour ses conseils et pour toute l'aide qu'il nous apporté.*

*Nous exprimons nos remerciements à **Abdelmalek Boukfelout**, d'avoir accepté de faire partie de jury en tant qu'examineur.*

*Nos remerciements s'adressent également au président de ce jury **Nabil Ounoughi** , pour l'honneur qu'il nous ont fait en acceptant de juger nous travail et faire partie de ce jury.*

Nos précieux remerciements vont à tous les membres du département de physique pour la solidarité et la compréhension qu'ils nous accordées.

Et enfin nous adressons nos remerciements à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce travail.

Merci a tous

Dédicace

Je dédie ce manuscrit;

A mes chers parents

*Qui m'ont toujours poussé et motivé dans mes études. Dans eux
je n'aurais certainement pas fait d'études longues*

A mes sœurs

A mes frères

A mes professeurs dans tous les niveaux

A tous mes amies et ma collègue de travail

Nihed

Dédicace

Je dédie ce travail :

A mes très chers parents, source
de vie, d'amour et d'affection

A mes chers frères et sœurs
Source d'espoir et motivation

Ainsi que tous mes amies
Et tous ceux qui ont contribué de près
ou de loin pour que ce projet
soit possible

Et enfin, à moi-même

Zineb..

Table des matières.....	I
Liste des figures.....	I
Liste des tableaux.....	I
Introduction générale.....	1

Chapitre 1

Généralité sur la radioactivité

I.	Introduction.....	3
II.	Définition.....	3
1.	La radioactivité naturelle.....	3
2.	La radioactivité artificielle.....	4
III.	Les rayonnements ionisants.....	5
1.	La radioactivité alpha.....	5
2.	La radioactivité bêta.....	6
3.	La radioactivité gamma.....	8
IV.	Les lois de la radioactivité.....	9
1.	Loi de décroissance.....	9
2.	Activité d'un élément radioactif A.....	10
3.	Période radioactive T.....	11
V.	Filiation radioactive.....	11
1.	Famille du Thorium-232.....	12
2.	Famille de l'Uranium-235.....	12
3.	Famille de l'Uranium-238.....	13
VI.	Notion d'équilibre radioactif ou équilibre séculaire.....	14
VII.	Les principaux éléments radioactifs dans les eaux thermo minérales.....	14
1.	Potassium.....	15
2.	Uranium naturel.....	15
3.	Radium-226.....	15
4.	Radon.....	15
5.	Thorium.....	16

VIII.	Grandeurs dosimétriques.....	16
1.	L'activité A.....	16
2.	La dose absorbée D.....	16
3.	La dose équivalente H.....	17
4.	La dose efficace E.....	18
IX.	Paramètres radiologiques et dose absorbée.....	19
1.	Evaluation de dose.....	19
2.	Les paramètres radiologiques.....	20

Chapitre 2

Interaction rayonnement – matière

I.	Généralités sur les différents rayonnements.....	22
1.	Les différents types de rayonnement.....	22
2.	Les rayonnements électromagnétiques X ou gamma.....	23
II.	Exposition de l'homme aux rayonnements ionisants.....	25
1.	Exposition externe.....	25
2.	Contamination interne.....	25
III.	Effets biologiques des rayonnements ionisants.....	26
1.	Les effets déterministes.....	27
2.	Les effets stochastiques.....	28
IV.	Interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière.....	28
1.	Effet photoélectrique.....	29
2.	Effet Compton.....	30
3.	Effet de production de paires.....	31
4.	Section efficaces totale d'interaction.....	32
5.	L'importance relative entre les 3 interactions.....	33
V.	Loi d'atténuation des photons.....	34
1.	Coefficient d'atténuation.....	34

Chapitre 3

Détection des rayonnements et spectrométrie gamma

I.	Introduction.....	36
II.	Définition et principe.....	36
1.	Analyse de spectres.....	37
2.	Identification des radionucléides.....	38
3.	Activité d'un échantillon.....	38
III.	Généralités sur les détecteurs.....	38
1.	Modes de fonctionnement d'un détecteur.....	39
2.	Principales caractéristiques d'un détecteur.....	41
3.	Détection des rayonnements.....	47
IV.	Présentation d'une chaîne de spectrométrie gamma.....	49
1.	Le préamplificateur.....	50
2.	L'amplificateur.....	51
3.	Le convertisseur analogique – numérique.....	51
4.	L'analyseur multicanaux.....	51
5.	Un PC d'acquisition.....	52
6.	Les pics.....	52
7.	Etalonnage.....	52
V.	Applications de la spectroscopie gamma.....	54

Chapitre 4

Résultats et discussion

I.	Présentation de la zone d'étude.....	55
1.	Le barrage de Hammam Debagh.....	55
2.	Hammam Essalhine (Khenchela).....	56
II.	Préparation des échantillons.....	56
III.	Etalonnage.....	57
IV.	Calibration de la chaîne de mesure.....	57
1.	Etalonnage en énergie.....	57
2.	Etalonnage en efficacité.....	61

V.	Mesure des activités spécifiques des échantillons.....	62
VI.	Estimation des doses.....	64
1.	Débit de dose absorbée.....	64
2.	Dose efficace annuelle.....	64
3.	L'évaluation des effets radiologiques.....	64
4.	Indice représentatif de niveau.....	65
5.	Activité de Radium équivalent.....	65
VII.	Résultats et discussion.....	65
	Conclusion.....	67
	Références.....	69

Figure 1 : Désintégration alpha.....	6
Figure 2 : Désintégration bêta.....	7
Figure 3 : Emission gamma.....	8
Figure 4 : Courbe de décroissance radioactive.....	10
Figure 5 : Ensemble des rayonnements étudiés.....	23
Figure 6 : Domaines de longueurs d'onde des rayons X, γ UV, visible (0,4 :0,8 micron) et infrarouge.....	23
Figure 7 : Pouvoir de pénétration des différents types de rayonnement	25
Figure 8 : Pénétration cutanée selon le type de désintégration.....	25
Figure 9 : Les différents modes d'exposition interne et externe.....	26
Figure 10 : Les effets biologiques de l'exposition aux rayonnements ionisants.....	26
Figure 11 : La radiolyse de l'eau.....	27
Figure 12 : Effet photoélectrique.....	30
Figure 13 : Effet Compton.....	31
Figure 14 : Effet de production de paires.....	32
Figure 15 : Domaines du plan Z, E_γ des sections efficaces d'interaction des photons- matière.....	33
Figure 16 : Coefficients d'atténuation massique en fonction de l'énergie des photons dans l'eau.....	35
Figure 17 : Coefficients d'atténuation massique en fonction de l'énergie des photons dans le plomb.....	35
Figure 18 :exemple d'un Spectre gamma d'une source mono-énergétique.....	37
Figure 19 : Schéma de l'ensemble détecteur-circuit connecté.....	40
Figure 20 : Mode courant.....	41
Figure 21 : Mode impulsion.....	42
Figure 22 : Distribution gaussienne du pic.....	43
Figure 23 : Spectres de rayonnements gamma obtenus par les détecteur Ge(Li) et NaI(Tl).....	44

Figure 24 : L'ensemble source radioactive-détecteur.....	45
Figure 25 : Modes paralysable et non paralysable.....	47
Figure 26 : Schéma de principe des détecteurs à scintillation.....	50
Figure 27 : Schéma de principe d'une chaîne de mesure de spectrométrie γ	51
Figure 28 : Histogrammes donnant le nombre de photons détectés en fonction de nombre de canal.....	53
Figure 29 : Exemple de spectre de radioactivité naturelle obtenu après plusieurs jours de comptage.....	54
Figure 30 : Carte géographique de l'Est de l'Algérie.....	56
Figure 31 : Hammam Debagh.....	56
Figure 32 : Hammam Khenchela.....	57
Figure 33 : Droite d'étalonnage en énergie visualisé par le logiciel origine pro8 (Hammam kenchela).....	60
Figure 34 : Droite d'étalonnage en énergie visualisé par le logiciel origine pro8 (Hammam Debagh).....	60
Figure 35 : Spectre expérimental (Hammam kenchela).....	61
Figure 36 : Spectre expérimental (Hammam Debagh).....	61
Figure 37 : Etalonnage en efficacité visualisé par le logiciel origine pro8 (H. kenchela).....	62
Figure 38 : Etalonnage en efficacité visualisé par le logiciel origine pro8 (H. Debagh).....	63
Figure 39 : les activités spécifiques des ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K dans les deux échantillons.....	65

Tableau 1 : Chaîne naturelle de filiation du Thorium-232.....	12
Tableau 2 : Chaîne naturelle de filiation de l'Uranium-235.....	13
Tableau 3 : Chaîne naturelle de filiation de l'Uranium-238.....	14
Tableau 4 : Unités de grandeurs mesurées en radioprotection.....	16
Tableau 5 : Facteur de pondération radiologique des différents types de radiation en fonction de leurs énergies.....	17
Tableau 6 : Facteur de pondération des différents types de tissus.....	18
Tableau 7 : Effets déterministes en fonction de dose reçue.....	28
Tableau 8 : Résolution de notre détecteur au germanium.....	58
Tableau 9 : Résultat de calibration en énergie.....	59
Tableau 10 : Résultat d'étalonnage en efficacité.....	62
Tableau 11 : Caractéristiques des radionucléides identifiés.....	63
Tableau 12 : Activités spécifiques mesurées pour les deux échantillons par spectrométrie γ	64
Tableau 13 : L'activité spécifique du Thorium-232.....	64
Tableau 14 : Les résultats des Paramètres radiologiques et dose absorbée.....	66

Introduction générale

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 [1].

La radioactivité est un paramètre très important dans l'identification de l'origine profonde des eaux, il permet de confirmer ou d'infirmer l'existence, la mobilité et l'ouverture des fractures profondes. L'identification des radioéléments naturels ou artificiels dans une eau est d'une grande importance. En effet, les différents niveaux d'activité radioactive mesurés dans une eau permettent d'apprécier la qualité de la ressource en eau.

La plus part des eaux thermales sont radioactives. Leur radioactivité peut être permanente ou temporaire. La radioactivité permanente est due aux sels du Radium dissous, tandis que la temporaire est due aux émanations gazeuses des corps radioactifs dont le principal est le Radon à durée de vie courte (3,8 jours) [2].

Ce mémoire s'inscrit dans le contexte de manque de connaissances sur le risque sanitaire lié la radioactivité présente dans les eaux thermales et en particulier le radon. L'objectif de ce mémoire est donc d'étudier et de donner une évaluation de taux de la radioactivité de deux stations thermales en Algérie (Guelma et Khenchla) et possibilité d'estimer leur risque sanitaire, en utilisant la technique de spectrométrie gamma.

Ce mémoire est scindé en quatre chapitres, dans le premier chapitre, est donné un rappel sur les généralités de la radioactivité. Ainsi que les différents types de décroissances radioactives. On y trouve également les origines, naturelle et artificielle, des radioéléments dans l'environnement, suivi d'un rappel sur la notion de dosimétrie.

Le deuxième chapitre détaillera l'interaction des rayonnements avec la matière et plus particulièrement aux différents phénomènes d'interaction du rayonnement gamma comme l'effet photoélectrique, l'effet Compton et la création de paires, ainsi que les effets biologiques des rayonnements ionisants.

Le troisième chapitre est consacré aux principes de détection des rayonnements et la technique d'analyse par spectrométrie gamma suivi d'un rappel sur les détecteurs. Une description la chaîne de mesure de cette technique est également détaillée.

Le dernier chapitre est consacré aux résultats de mesures des activités spécifiques des radionucléides naturels dans les échantillons étudiés. Une estimation des risques radiologiques sur l'homme dus à la radioactivité naturelle provenant des échantillons a été faite par la détermination des paramètres radiologiques.

I. Introduction

La radioactivité, partie intégrante de l'univers, existe sur terre depuis sa formation. Elle provient essentiellement des radionucléides des familles radioactives naturelles de l'uranium et du thorium, ainsi que de l'élément potassium-40. Ces éléments ont une demi-vie d'environ 5 milliard d'années, et sont encore fortement présents en quantité variable dans les roches terrestres [3].

II. Définition

La radioactivité d'un élément est un phénomène de retour à l'équilibre. Elle se traduit par le passage d'un noyau de l'état instable à un état plus stable par désintégration spontanée en libérant une quantité d'énergie sous forme de particules ou de rayonnements électromagnétiques [4]. On distingue deux types de radioactivité :

1. La radioactivité naturelle

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, «The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation» (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 extérieure 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 [1].

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}U), l'uranium-238 (^{238}U) et le thorium-232 (^{232}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}K) et, dans une moindre mesure, le rubidium-87 (^{87}Rb)[5].

2. Radioactivité artificielle

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^{ème} 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}Pu , ^{239}Pu et ^{240}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 [1].

III. Les rayonnements ionisants

Lors des désintégrations des noyaux radioactifs des rayonnements ionisants d'énergie élevée sont émis. Les noyaux radioactifs (quels qu'ils soient) ne peuvent évoluer que selon trois types de radioactivité seulement:

- la radioactivité alpha ou émission de rayonnement alpha
- la radioactivité bêta ou émission de rayonnement bêta
- la radioactivité gamma ou émission de rayonnement gamma.

1. La Radioactivité alpha

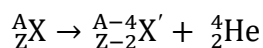
Des atomes dont les noyaux radioactifs sont trop chargés en protons et en neutrons émettent souvent un rayonnement alpha. Ils se transforment en un autre élément chimique dont le noyau est plus léger. Les particules alpha sont des noyaux d'hélium comportant deux protons et deux neutrons (${}^4\text{He}$). Elles sont appelées particules lourdes à cause de leurs masses (environ 7000 fois que celle de l'électron ce qui rend leur parcours rectiligne. Les rayonnements alpha sont peu pénétrants, facilement arrêtés par une feuille de papier et leur trajet ne dépasse pas quelques dizaines de micromètre dans les tissus biologiques.

Parcours d'une particule alpha d'énergie = 5,3 MeV:

- Dans l'air: 5cm
- Dans l'eau: 40 μm

Ces rayonnements sont très ionisants c'est-à-dire qu'ils arrachent facilement des électrons aux atomes des matériaux traversés car ces particules cèdent toute leur énergie sur un faible parcours.

Lors de la désintégration, il y'a éjection des particules alpha chargées positivement. Etant donné la nature de la particule émise, le nombre de masse du noyau A diminue de 4 unités et le nombre de charges Z de 2 unités:



Exemple:

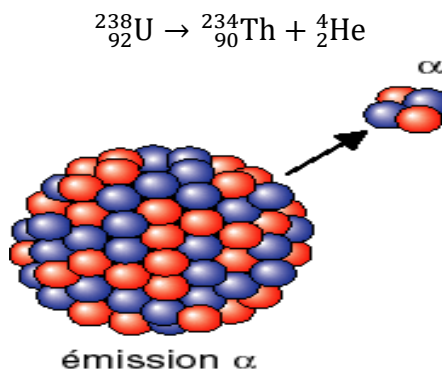


Figure 1 : Désintégration alpha

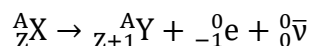
Les particules alpha sont émises avec de très grandes énergies (entre 4 et 8 MeV), spécifiques du radionucléide émetteur. Elles ont toutes la même énergie et le spectre de l'énergie des particules alpha est un spectre de raies.

2. La radioactivité bêta

La radioactivité bêta ou émission bêta est un type de désintégration radioactive au cours de laquelle une particule beta (un électron ou un positron) est émise. On parle de désintégration bêta moins ou bêta plus selon que c'est un électron ou un positron qui est émis.

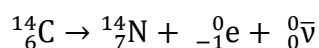
- **La radioactivité β^-**

C'est une radioactivité caractérisée par l'expulsion d'un électron d'un noyau qui possède un excès de neutrons par rapport au nombre de protons, comme le montre le schéma général de la transformation :



L'émission bêta- est caractérisée par l'expulsion d'un électron ${}_{-1}^0\text{e}$. Le noyau fils a donc le même nombre de masse que le noyau père, mais une charge positive en plus.

Exemple :

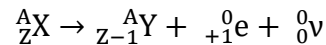


L'émission bêta- n'est pas mono-énergétique comme l'émission alpha. Il y a deux particules : la particule bêta- et l'antineutrino qui se partagent de façon aléatoire l'énergie émise lors de la réaction. On observe donc toujours un spectre continu s'étendant depuis la valeur 0,

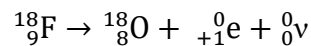
quand l'antineutrino emporte toute l'énergie de la réaction, jusqu'à la valeur maximale E_{\max} quand l'antineutrino n'emporte aucune énergie.

- **La radioactivité β^+**

C'est aussi une radioactivité qui se produit lorsque les noyaux ont un excès de protons par rapport aux neutrons. Il s'agit d'une réaction isobarique puisque le nombre de masse A ne change pas, en effet la réaction s'écrit de façon générale:



Exemple:



Comme dans le cas de l'émission bêta-, on a toujours deux particules qui se partagent de façon aléatoire l'énergie libérée au cours de la réaction : une antiparticule et une particule. On a donc également un spectre continu en ce qui concerne la distribution de l'énergie des positons.

Les rayonnements bêta sont plus pénétrants que les particules alpha, ils sont arrêtés par quelques mètres d'air, une feuille d'aluminium ou par quelques millimètres d'épaisseur dans les tissus biologiques. Ils peuvent donc traverser les couches superficielles de la peau.

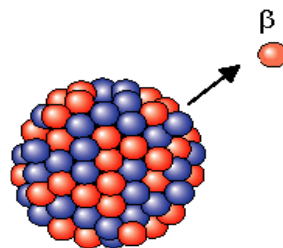


Figure2 : Désintégration bêta

3. La radioactivité gamma

i. Emission gamma

Lors d'une désintégration radioactive alpha, bêta, le noyau instable, donne un noyau

différent, appelé noyau fils. Très souvent, le noyau fils issu de la désintégration du noyau père est dans un état momentanément instable, appelé état excité. Il possède un excédent d'énergie. Le retour à l'état fondamental stable de ce noyau excité s'effectue par libération d'énergie sous forme de rayonnements dont l'origine est nucléaire.

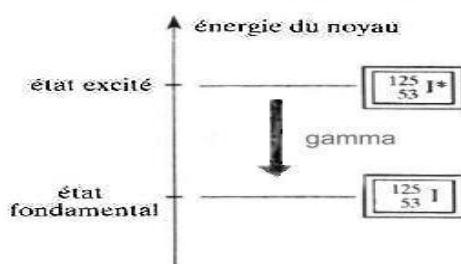
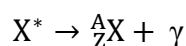


Figure 3 : Emission gamma.

Il s'agit d'énergie «pure», sans support matériel, où la composition du noyau en nucléons n'est pas modifiée par la désexcitation: ce sont les rayons gamma, de nature photonique, qui ne se distinguent pas physiquement des rayons X, si ce n'est que leur production est nucléaire, alors que les rayons X ont une origine électronique.

ii. Les rayons gamma

Les rayons ou photons γ sont des rayonnements électromagnétiques, de même nature que la lumière, mais ils transportent beaucoup plus d'énergie. Ils sont caractérisés par leur énergie E (de 100 keV à 10 MeV) ou leur fréquence ν telles que:

$$E = h \cdot \nu \quad (1-1)$$

$h = 6,663 \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$: constante de Planck

Les rayons gamma ne possèdent ni charge ni masse. Ils ont une portée plusieurs fois supérieure à celle des particules alpha et bêta et peuvent, dans certains cas, traverser plusieurs centimètres de plomb. Les rayons gamma ne portent pas de charge et ne peuvent pas causer d'ionisation aussi facilement que les particules alpha ou bêta.

Un radionucléide émet des rayonnements gamma avec une ou plusieurs énergies bien déterminées et caractéristique du noyau et donc de l'atome référencées dans une bibliothèque de données nucléaires [4].

IV. Les lois de la radioactivité

1. Loi de décroissance

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

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (1-2)$$

Par intégration, on obtient :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (1-3)$$

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 .

Et λ : constante de désintégration propre à chaque isotope, s^{-1} .

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 4).

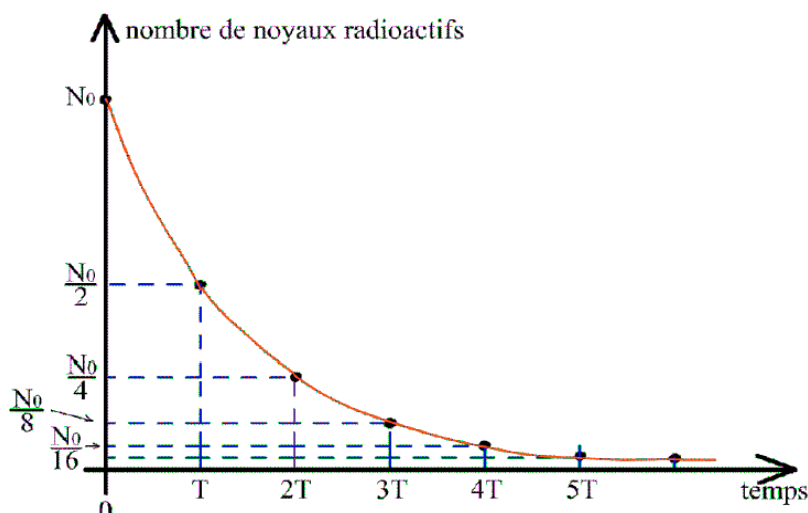


Figure4 : Courbe de décroissance radioactive [1].

2. Activité d'un élément radioactif A

L'activité (A) d'une substance radioactive (radioélément ou isotope radioactif) est le nombre de désintégrations par unité de temps. Elle est exprimée en «becquerel» (Bq) qui, par définition, correspond à une désintégration par seconde. Elle dépend de:

- la quantité de la substance radioactive prise en considération à l'instant donné;
- la constante radioactive λ qui est une caractéristique de chaque élément radioactif [3].

Cette activité radioactive est donnée par la formule de Rutherford et Soddy:

$$A = \lambda \cdot N \quad (1-4)$$

Où

A: activité radioactive (Bq);

N: nombre d'atomes radioactifs;

Et λ : constante radioactive.

L'activité A d'une substance radioactive décroît exponentiellement suivant la loi de décroissance de Rutherford et Soddy:

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (1-5)$$

Où

A: Activité radioactive (Bq);

A₀: Activité radioactive à l'instant t₀ (Bq);

Et λ: constante radioactive.

3. 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:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{1}{2} \quad (1-6)$$

On tire:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (1-7)$$

La période T, comme la constante radioactive λ, 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 [1].

Par exemple:

- Uranium 238, T = 4,5.10⁹ d'années
- Radium 226, T = 1617 années
- Radon 222, T = 3,8 jours
- Polonium 214, T = 1,6.10⁻⁴ seconde.

V.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 l'²³⁸U, ²³⁵U et ²³²Th qui

produisant des séries de descendants radioactifs et qui forment la plupart des éléments radioactifs naturels existant [1].

1. Famille du Thorium-232 (^{232}Th):

Le premier élément de cette famille est le ^{232}Th qui a une demi-vie T égale à $1.405.10^{10}$ ans et une abondance isotopique égale 100%. Cette chaîne radioactive se termine par le ^{208}Pb (stable).

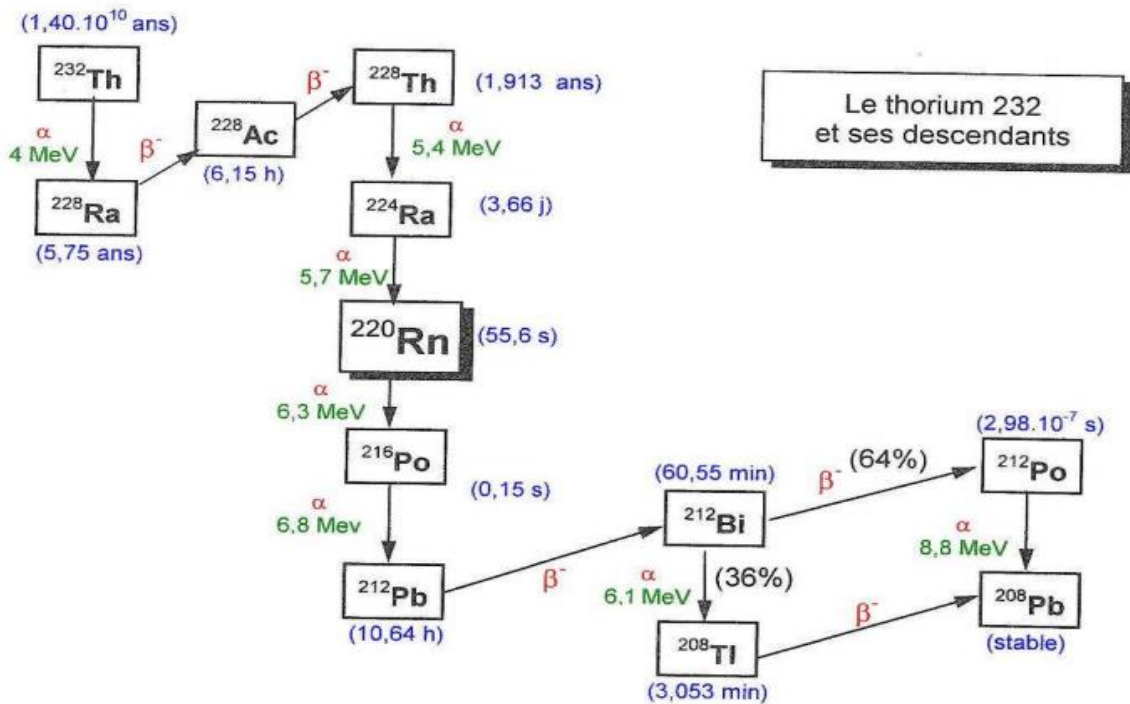


Tableau 1: Chaîne naturelle de filiation du ^{232}Th [6].

2. Famille de l'Uranium-235 (^{235}U):

Cette famille commencer par le radionucléide père ^{235}U avec une demi-vie $T=7,038.10^8$ ans et une abondance isotopique de 0.71%. Le dernier élément de cette famille est le ^{207}Pb (stable).

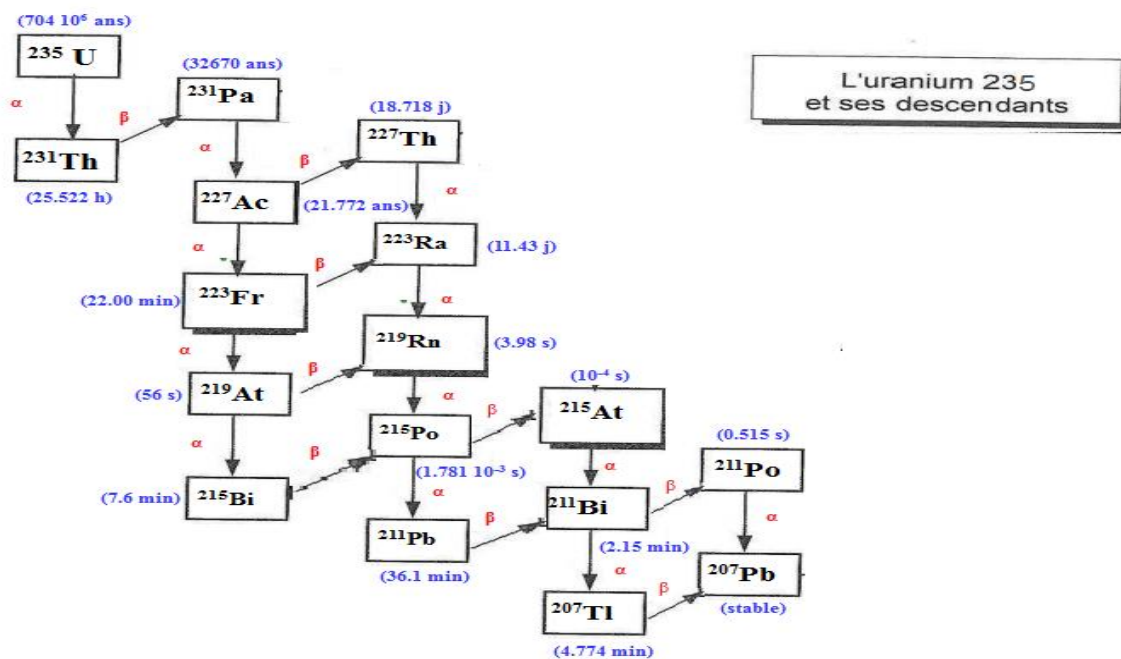
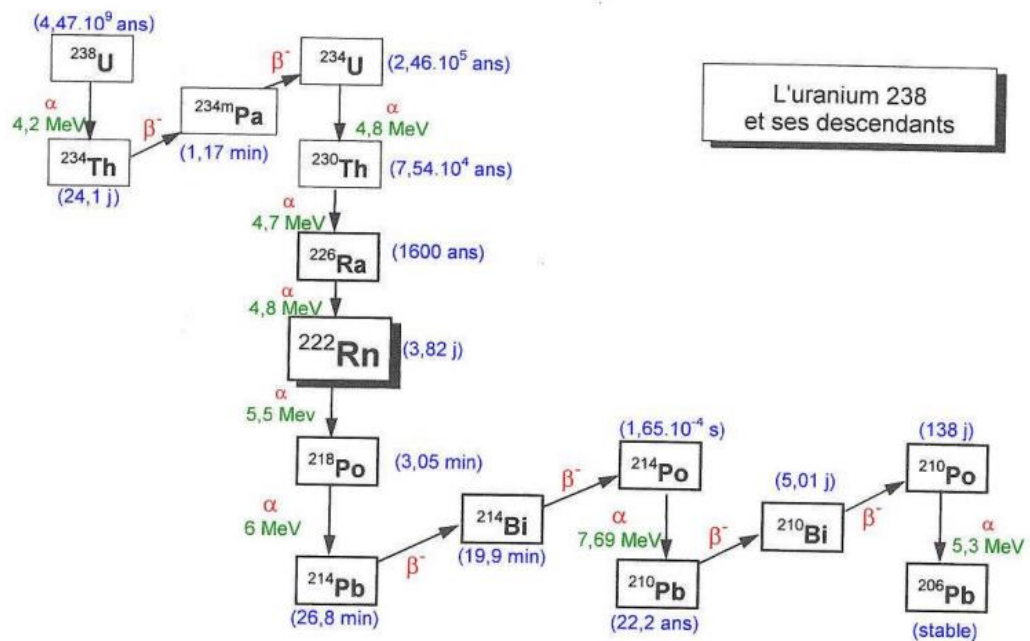


Tableau 2 : Chaîne naturelle de filiation de l' ^{235}U [7].

3. Famille de l'Uranium-238 (^{238}U):

Le premier radionucléide dans cette famille est l' ^{238}U qui a une T égale à $4,5 \cdot 10^9$ ans et une abondance isotopique de 99.3% et elle se termine par le ^{206}Pb (stable) [8].

Tableau 3: Chaîne naturelle de filiation de l' ^{238}U [6].

VI. 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 [9].

VII. Les principaux éléments 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-222 (durée de vie : 3.80 jours).

Les concentrations des éléments radioactifs naturels que contiennent ces eaux thermo-minérales varient en fonction de différents paramètres tels que ; la nature géologique des terrains traversés, temps de contact (âge de l'eau), la 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 [10].

1. Potassium

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).

2. Uranium naturel

La concentration de l'uranium naturel dans les eaux minérales est généralement faible et ne dépasse pas 2 $\mu\text{g/l}$ (50 mBq/l de radioactivité α). Toute fois à l'émergence, certaines eaux minérales peuvent avoir des teneurs dépassant 10 $\mu\text{g/l}$.

3. Radium-226

Ce radioélément, descendant de l'uranium-238, est émetteur α , à coté du radium-226 on rencontre également les deux autres descendants du Thorium-232: le Radium-228 émetteur β et le Radium-224 émetteur α . Les teneurs en Radium-226 dans Radium-228 émetteur β des eaux minérales sont très faibles, de l'ordre du pictogramme; 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.

4. 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 rencontre 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 ou sont située les captages des sources d'eau minérale.

5. Thorium

Le Thorium compte 6 isotopes naturels, le plus abondant étant l'isotope Thorium-232 suivi des isotopes Thorium-228 et Thorium-230. La solubilité du thorium dans les eaux souterraines est très faible et dépasse rarement 1 $\mu\text{g/l}$. A la teneur de 1 $\mu\text{g/l}$ de thorium-232 correspond une radioactivité α de 4 mBq/l [2].

VIII. Grandeurs dosimétriques

La radioprotection est un ensemble de mesures 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 4) 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	Becquerel (Bq)
Dose absorbée (D)	Quantité d'énergie transférée à la matière	Gray (Gy)
Dose équivalente (H_T)	Effet des rayonnements sur l'organisme	Sievert (Sv)

Tableau (4). Unités de grandeurs mesurées en radioprotection [11].

1. L'activité (A)

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

2. La dose absorbée (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 Gy = 100 rad = 1 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 Unit and Measurements (ICRU) (Tableau 5); 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:

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (1-8)$$

Type de rayonnements	Energie (E)	W_R
Photons, électrons	Quelle que soit l'énergie	1
Neutrons	$E \leq 10 \text{ keV}$	1
	$10 \text{ keV} \leq E \leq 100 \text{ keV}$	5
	$100 \text{ keV} < E \leq 2 \text{ MeV}$	20
	$2 \text{ MeV} < E \leq 20 \text{ MeV}$	10
	$E > 20 \text{ MeV}$	5
Protons	$E > 2 \text{ MeV}$	5
Alpha, fragments de fissions, noyaux lourds	Quelle que soit l'énergie	20

Tableau (5). Facteur de pondération radiologique des différents types de radiation en fonction de leurs énergies [12].

Selon les dernières recommandations de la CIPR, W_R des neutrons est donné par la formule suivante :

$$W_R = \left\{ \begin{array}{l} 2,5 + 18,2 e^{-\frac{[\ln(E_n)]^2}{6}} \text{ si } E_n < 1 \text{ MeV} \\ \text{et} \\ 5,0 + 17,0 e^{-\frac{[\ln(2E_n)]^2}{6}} \text{ si } E_n \geq 1 \text{ MeV} \end{array} \right\} \quad (1-9)$$

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:

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \cdot \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (1-10)$$

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 (voire tableau6).

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 6. Facteur de pondération des différents types de tissus [13].

IX. Paramètres radiologiques et dose absorbée

L'objectif principal de la mesure de la radioactivité et d'estimer ses effets radiologiques sur la santé humaine. Pour évaluer ces derniers, il est utile de calculer plusieurs paramètres tels que:

- Les doses de rayonnements susceptibles d'être délivrées au grand public,
- Les paramètres radiologiques [3].

1. Evaluation de dose

a. Débit de Dose Absorbée

Le débit de dose absorbée est la quantité d'énergie cédée par les rayonnements ionisants dans la matière par unité de masse, exprimée en Gray par seconde dans le système international mais l'unité couramment utilisée est le Gray par heure. La contribution des radionucléides naturels au débit de dose absorbée dans l'air (ADR) dépend de la concentration des radionucléides ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K [14]. Si l'activité de ces radionucléides est connue, le débit de dose absorbée dans l'air extérieur à un mètre au-dessus du sol est calculé en utilisant la formule suivante [15]:

$$\text{ADR (nGy/h)} = 0.462A_{\text{Ra}} + 0.621A_{\text{Th}} + 0.0417A_{\text{K}} \quad (1-11)$$

Où A_{Ra} , A_{Th} et A_{K} sont les concentrations de l'activité de ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K .

Selon le rapport UNSCEAR 2000, les facteurs de conversion pour convertir les concentrations, de ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K en débit de dose absorbée dans l'air sont respectivement: 0.462, 0.621 et 0.0417 exprimés en (nGy.h⁻¹ Par Bq⁻¹.kg).

b. Débit de Dose Efficace Annuelle

Pour estimer le débit de dose efficace annuelle (AED) reçue par la population, le facteur de conversion 0,7 Sv.Gy⁻¹ D'une dose absorbée en une dose effective et le facteur de pondération 0,2 (dit aussi facteur d'occupation), qui implique que 20% du temps est dépensé en plein air, sont proposés par UNSCEAR 2000, sont utilisés dans le calcul d'AED par la formule suivante [15]:

$$\text{AED (}\mu\text{Sv/y)} = \text{ADR (nGy/h)} \times 8760\text{h} \times 0.7 \text{ Sv/Gy} \times 10^{-3} \times 0.2 \quad (1-12)$$

2. Les paramètres radiologiques

a) Les indices de risques externe et interne

Afin d'estimer les effets sanitaires de la radioactivité terrestre des radionucléides ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K , on évalue leur activité en une seule quantité appelée indice de risque. L'objectif premier de cet indice est de limiter la dose de rayonnement maximum autorisée à 1mSv/an, pour que le risque de rayonnement d'irradiation soit négligeable [14].

Pour calculer l'indice de risque externe H_{ex} , la relation suivante a été proposée par Beretka et Mathew en 1985 [16] :

$$H_{\text{ex}} = \frac{A_{\text{Ra}}}{370} + \frac{A_{\text{Th}}}{259} + \frac{A_{\text{K}}}{4810} \quad (1-13)$$

Où A_{Ra} , A_{Th} et A_{K} sont respectivement les activités spécifiques des ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K en Bq/kg.

A partir de cette équation, il est supposé que 370 Bq/kg de Ra, 259 Bq/kg de Th et 4810 Bq/kg de K produisent le même débit de dose gamma [17].

❖ L'inhalation des particules alpha émis par les radionucléides gazeux (^{222}Rn et ^{220}Rn) est également dangereuse pour les organes respiratoires. Ce risque peut être contrôlé par l'indice de risque interne H_{in} , donné par la relation suivante [16] :

$$H_{\text{in}} = \frac{A_{\text{Ra}}}{185} + \frac{A_{\text{Th}}}{259} + \frac{A_{\text{K}}}{4810} \quad (1-14)$$

b) Indice représentatif de niveau

Un autre indice de danger d'irradiation appelé indice représentatif de niveau est utilisé pour estimer le niveau de risque aux rayonnements gamma associés aux radionucléides naturels. Il est défini par l'équation suivante [18,19] :

$$I_{\gamma} = \frac{A_{\text{Ra}}}{150} + \frac{A_{\text{Th}}}{100} + \frac{A_{\text{K}}}{1500} \quad (1-15)$$

c) L'activité de radium équivalent

La distribution de radionucléides naturels dans le sol n'est pas uniforme. L'homogénéité par rapport à l'exposition au rayonnement est définie en terme d'activité de Radium équivalent (Ra_{eq}) [16]. Cet indice est calculé par l'équation suivante:

$$Ra_{eq} \left(\frac{\text{Bq}}{\text{kg}} \right) = 0.077A_K + 1.43A_{Th} + A_{Ra} \quad (1-16)$$

Généralités sur les différents rayonnements

L'étude de l'interaction rayonnement – matière a été en grande partie effectuée au vingtième siècle et trouve son origine dans la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel en 1896. Cette découverte a permis des avancées considérables, tant d'un point de vue fondamental que technologique. L'avènement du nucléaire civil à la fin des années 50 a stimulé la recherche des effets des rayonnements sur différents types de matériaux (alliages métalliques, semi-conducteurs, matériaux organiques) [20].

1. Les différents types de rayonnement

Définitions et classifications

Qu'est-ce qu'un rayonnement?

D'une manière générale, on peut définir un rayonnement ou radiation comme un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Les rayonnements ne peuvent être détectés et caractérisés que grâce à leur interaction avec la matière dans laquelle ils se propagent. Ils peuvent céder au milieu qu'ils traversent, la totalité ou une partie de leur énergie au cours de ces interactions. On peut classer les rayonnements selon leur mode d'interaction avec la matière en deux catégories:

- **Rayonnements directement ionisants:** ils sont constitués de particules chargées qui délivrent directement à la matière leur énergie, par le jeu des forces coulombiennes s'exerçant entre elles et les atomes du milieu. Les transferts d'énergie dépendent des masses des particules en mouvement et il y a lieu de distinguer entre particules chargées lourdes (proton, deuton, alpha, ions, lourds) et électrons.
- **Rayonnements indirectement ionisants:** ils sont électriquement neutres et sont susceptibles de transférer une importante fraction ou la totalité de leur énergie en une seule interaction à des particules chargées. Ce sont ensuite ces particules secondaires qui ionisent le milieu. L'ionisation, dans ce cas, se fait donc en deux étapes. Les rayonnements électromagnétiques (x et γ) et les neutrons entrent dans cette catégorie, mais leur mode d'interaction est différent [21].

Enfin, une autre famille de rayonnements vient compléter la liste des rayonnements,

- **Les rayonnements non ionisants:** Ils sont composés des rayonnements électromagnétiques de faible énergie, et peuvent exciter la matière. On y trouve:

- Les basses fréquences (ultrasons médicaux, lignes électriques).
- Les ondes radio (radio AM et FM, imagerie médicale par résonance magnétique, la télévision, les téléphones cellulaires).
- Les micro-ondes (internet sans fil, wifi, fours à micro-ondes).
- Les infrarouges (fibres optiques, laser)
- La lumière visible.

L'ensemble des rayonnements peut être résumé sur le schéma suivant [22] :

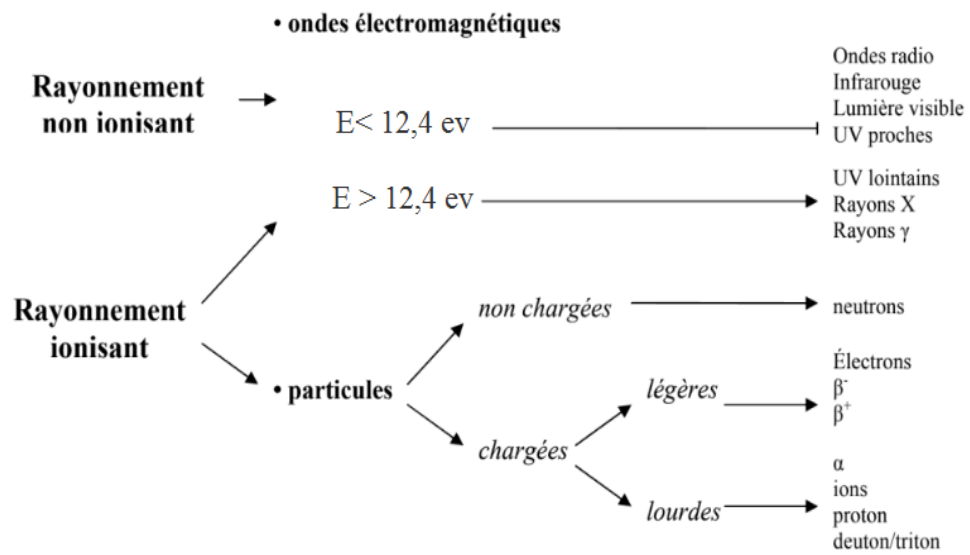


Figure 5: Ensemble des rayonnements étudiés

2. Les rayonnements électromagnétiques X ou gamma (γ)

Ce sont des photons qui ont donc une nature et des propriétés analogues; leur différence réside dans leur origine.

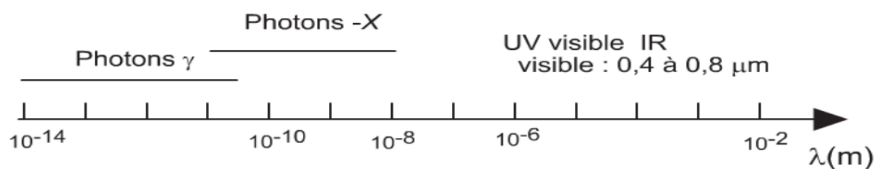


Figure 6: Domaines de longueur d'onde des rayons x et γ , UV, visible (0,4:0,8 micron) et infrarouge [23].

- **Les rayons X:** sont émis lors d'interactions avec des électrons; ils sont obtenus par bombardement d'une cible par un faisceau d'électrons accélérés dans le vide. Les photons X sont produits à l'extérieur du noyau, c'est-à-dire dans le champ électromagnétique qui l'entoure, ou dans son cortège électronique. Les photons présentent des énergies différentes: les rayons X peu pénétrants sont rapidement arrêtés par la peau, tandis que les plus énergétiques vont traverser le corps humain.

Le photon incident interagit avec les électrons périphériques, une partie de l'énergie du photon incident est transférée aux électrons périphériques, l'autre partie est diffusée sous la forme d'un photon: c'est l'effet Compton. Le rayonnement diffusé se fait dans toutes les directions. Les rayons X se propagent en ligne droite.

Le parcours des rayons X est de quelques dizaines de mètres dans l'air et de quelques centimètres dans la matière.

- **Les rayonnements gamma:** sont émis au cours de désintégrations radioactives et ont donc une origine nucléaire. Ils sont émis lors d'un retour à l'état stable d'un noyau excité possédant un trop plein d'énergie. Les photons gamma sont émis depuis un noyau.

Les rayons gamma ont trois actions lorsqu'il existe un parcours dans un tissu et qu'il y a interaction avec les électrons des atomes.

Le parcours des rayons gamma n'est pas précis, il est de quelques dizaines de mètres dans l'air et de quelques centimètres dans la matière. Pour absorber la moitié d'un rayon gamma de 1 MeV, il faut un centimètre de plomb.

Ce sont des rayonnements indirectement ionisants car ils agissent par l'intermédiaire de particules chargées qu'ils mettent en mouvement lors d'interactions avec la matière. Les photons ont des interactions rares et aléatoires avec les électrons des atomes. Ils sont fortement pénétrants mais peu ionisants. Les rayons gamma ont un pouvoir de pénétration plus important que celui des rayons X du fait d'une longueur d'onde plus courte. Ils peuvent traverser des épaisseurs importantes et sont donc très dangereux en exposition externe [24].

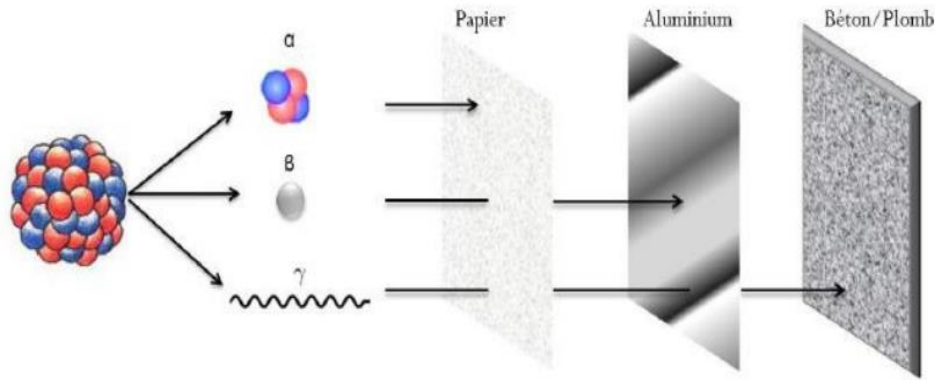


Figure 7: Pouvoir de pénétration des différents types de rayonnements [25].

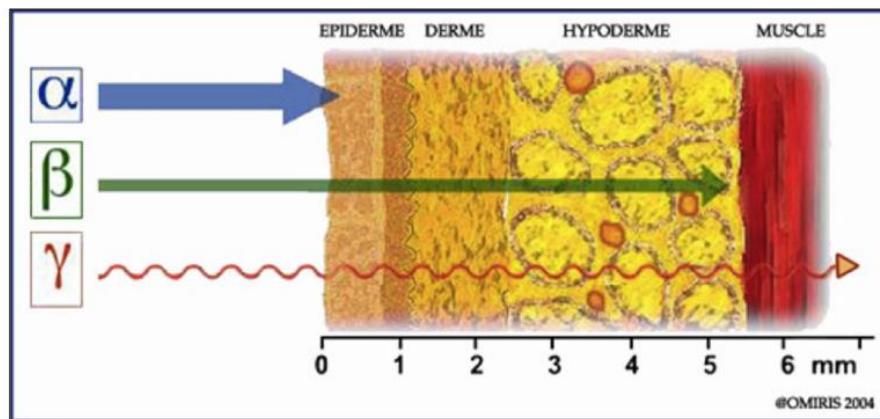


Figure 8: Pénétration cutanée selon le type de désintégration [26].

I.Exposition de l'homme aux rayonnements ionisants

Il existe deux modalités d'exposition aux rayonnements ionisants pour l'homme : une exposition peut être soit **externe**, soit **interne** - on parle alors de contamination.

1.Exposition externe: la source se trouve à l'extérieur du corps. Ces deux modalités sont illustrées sur la figure (9). L'exposition peut être reçue sur le corps entier ou concerner seulement un tissu ou un organe. L'exposition cesse dès que l'organisme n'est plus dans le champ de la source de rayonnements ionisants.

2.Contamination interne: lorsque la source ionisante se trouve à l'intérieur du corps, suite à l'inhalation, l'ingestion ou l'incorporation par voie percutanée (après une blessure par exemple) de radionucléides. Les radionucléides se répartissent alors dans l'organisme. La

contamination interne cesse lorsque les radionucléides incorporés sont éliminés de l'organisme [27].

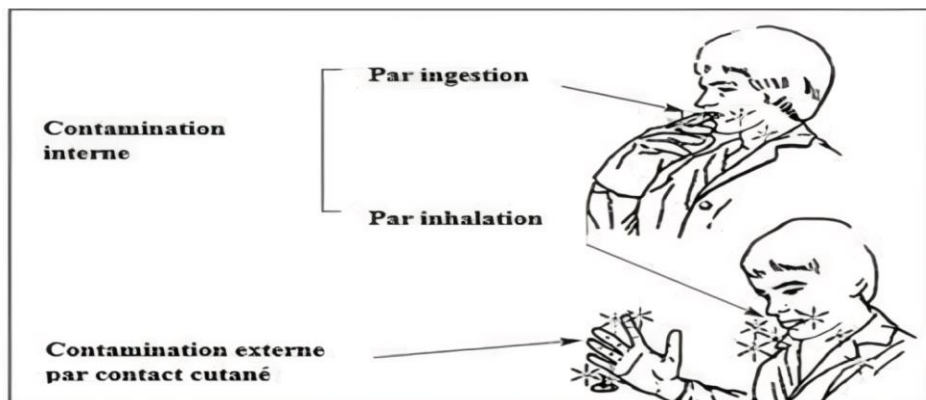


Figure 9: les différents modes d'exposition interne et externe [3].

II. Effets biologiques des rayonnements ionisants

Les effets biologiques sont les effets observés lorsque des radiations ionisantes entrent en contact avec un tissu vivant. En effet, les rayonnements peuvent causer des modifications directes du système biologique, en particulier de l'ADN qui est présente dans le noyau d'une cellule (figure 10) et qui contient toute l'information génétique propre à un individu.

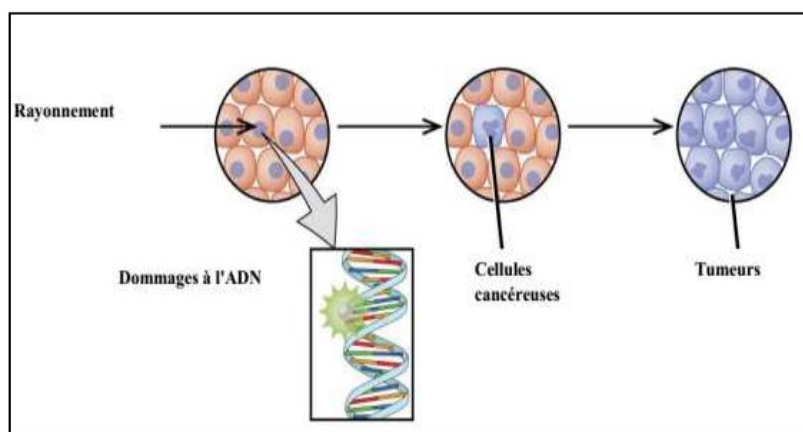


Figure 10: les effets biologiques de l'exposition aux rayonnements ionisants.

La modification de celle-ci entraîne des perturbations au niveau cellulaire puis au niveau de l'organisme. Aussi, les rayonnements peuvent provoquer des effets indirects qui se traduisent par les produits de la radiolyse de l'eau (70% en poids du corps humain).

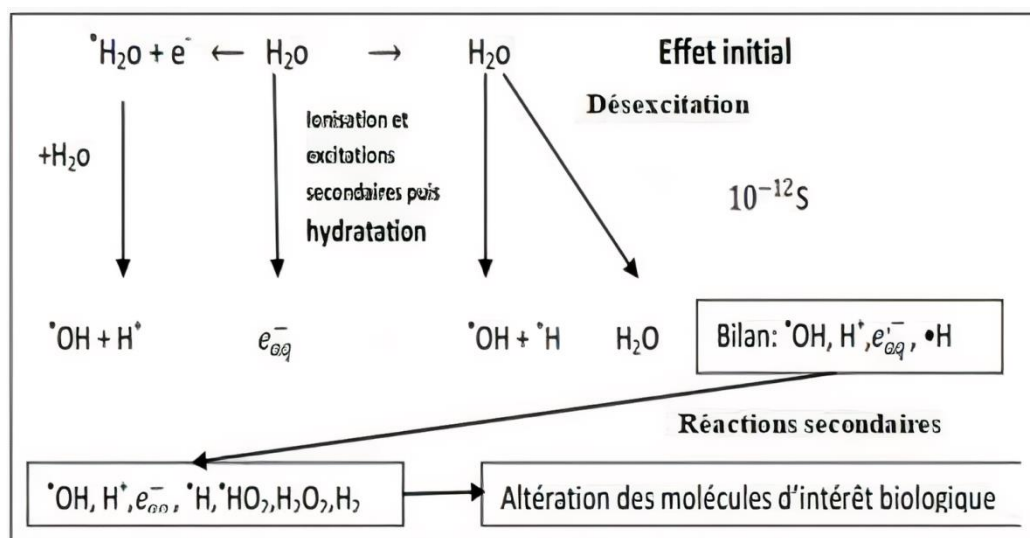


Figure 11: La radiolyse de l'eau.

La gravité des effets biologiques dépend du type de radiation, de la dose absorbée, du temps d'exposition à la source radioactive, de la surface irradiée (localement ou organisme entier) mais également de la radiosensibilité des tissus touchés. Les effets biologiques des rayonnements ionisants sont divisés en deux classes ; les effets déterministes et les effets Stochastiques [3] :

1. Les effets déterministes

Une exposition à de fortes doses de rayonnements ionisants supérieures à un certain seuil résulte en des effets sanitaires précoces qui apparaissent au bout de quelques jours ou quelques semaines après l'irradiation. Ces effets sont dits déterministes car ils sont reproductibles : pour une dose donnée, ils sont prévisibles. Leur gravité augmente avec la dose reçue et leur traitement relève de la médecine d'urgence. Parmi ces effets, on compte des effets précoces tels que l'inflammation des tissus et des effets plus tardifs tels que les brûlures radiologiques, la fibrose ou la nécrose des tissus. Certains des effets déterministes sont décrits dans le tableau 7. En termes de dose équivalente corps entier, le seuil d'apparition de ces effets est estimé à 500 mSv, mais les effets d'une exposition à de fortes doses dépendent également de la répartition de la dose dans le corps. Une dose de plus de 5 Gy reçue sur le corps entier est mortelle une fois sur deux en l'absence de traitement, mais lors de radiothérapies, des doses à l'organe allant jusqu'à 60 Gy peuvent être utilisées pour cibler une tumeur.

Dose reçue sur l'ensemble du corps de façon uniforme	Symptômes
En dessous de 0,25 Gy	Aucun symptôme
De 0,25 à 1 Gy	Nausées, légère chute du nombre de globules blancs
De 1 à 1,25 Gy	Vomissement, modification nette de la formule sanguine
5 Gy	Dose mortelle pour une personne sur deux

Tableau 7: Effets déterministes en fonction de dose reçue.

2. Les effets stochastiques

Une exposition à des doses faibles à moyennes de rayonnements ionisants entraîne des effets dont la fréquence d'apparition augmente avec la dose. L'apparition de ces effets étant aléatoire et non reproductibles, on parle d'effets stochastiques. Ces effets sont dus à des modifications biologiques des cellules exposées, et notamment de l'acide désoxyribonucléique (ADN) cellulaire, induites par l'exposition aux rayonnements ionisants. Ce sont des effets tardifs, qui apparaissent plusieurs années, voire plusieurs décennies après l'exposition. Cette catégorie inclut les cancers (UNSCEAR, 2010). L'épidémiologie permet de caractériser et de quantifier les effets stochastiques d'une exposition aux rayonnements ionisants au sein des populations [27].

III. Interaction des rayonnements électromagnétiques (γ , x) avec la matière

De par leur absence de masse, les rayonnements électromagnétiques sont très pénétrants dans la matière. Cela veut donc dire que leurs interactions avec la matière ont un caractère « rare » ou « aléatoire » par rapport à celles des particules chargées que l'on qualifie souvent d'interactions « obligatoires ». De ce fait, leur parcours sera très important : de l'ordre de plusieurs centaines de mètres dans l'air.

Les rayonnements électromagnétiques sont également appelés « rayonnements indirectement ionisants ». En effet lors de leurs interactions, ils mettent en mouvement des électrons, lesquels vont ioniser la matière selon les phénomènes vus précédemment. [28].

Dans la gamme d'énergie étudiée ici (de 0 à quelques MeV), nous nous limiterons aux trois processus d'interaction suivants entre les rayonnements électromagnétiques et la matière:

- l'effet photoélectrique;
- l'effet Compton;
- l'effet de production de paires.

1.Effet photoélectrique

Le rayonnement incident transfère toute son énergie à un électron atomique de la substance traversée; celui-ci est alors expulsé de son atome avec une certaine énergie cinétique (Figure 12).

La valeur de l'énergie cinétique E_C est donnée par la relation suivante:

$$E_C = E_\gamma - E_I \quad (2-1)$$

Où E_γ est l'énergie du rayonnement électromagnétique incident (ici un rayon γ) et E_I est l'énergie de liaison de l'électron atomique à sa couche électronique.

Sous réserve que l'énergie du rayonnement électromagnétique soit suffisante, plus l'énergie de liaison est grande, plus ce phénomène est probable.

Les effets photoélectriques correspondent donc à des ionisations des couches électroniques très liées (K ou L) des atomes qui se réorganisent en émettant des rayonnements secondaires électromagnétiques X ou électroniques (électrons Auger, «Rayonnements d'origine électrique») [28].

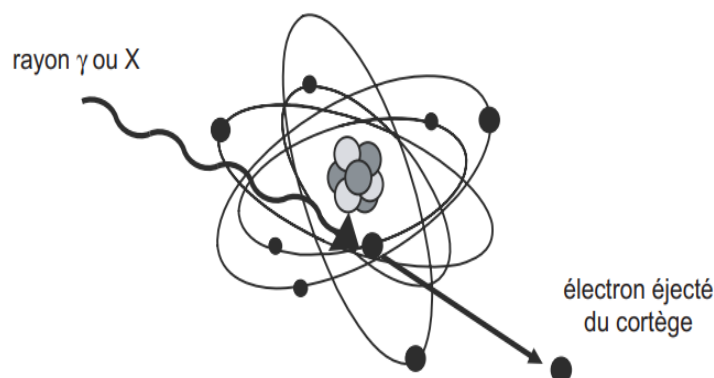


Figure 12: Effet photoélectrique[28].

La section efficace totale de l'effet photoélectrique σ_{ph} dépend du numéro atomique Z de l'atome et de l'énergie du photon incident. Elle est proportionnelle à $Z^5 E_\gamma^{-3.5}$. La contribution de l'effet photoélectrique est cependant sensiblement la même pour des photons d'énergies respectives de 0.15 MeV dans l'aluminium $Z=13$ et 2 MeV dans le plomb $Z=82$ [23].

2. Effet Compton:

L'énergie du rayonnement X ou γ incident (E_γ) est partagée entre l'électron atomique avec lequel ce rayonnement a interagi (E_c) et un rayonnement électromagnétique diffusé ($E_{\gamma'}$) (Figure 13).

$$E_\gamma = E'_{\gamma} + E_c \quad (2-2)$$

Où E_γ est l'énergie du rayonnement électromagnétique incident (ici un rayon γ) et E_c est l'énergie cinétique de l'électron éjecté.

Ce phénomène assimilable à une diffusion est d'autant plus probable que l'énergie de liaison de l'électron atomique est faible ; au contraire de l'effet photoélectrique, l'effet Compton concerne les électrons atomiques appartenant à des couches électroniques peu liées. C'est pour cette raison que l'énergie de liaison E_l a été omise dans la formule ci-dessus [28].

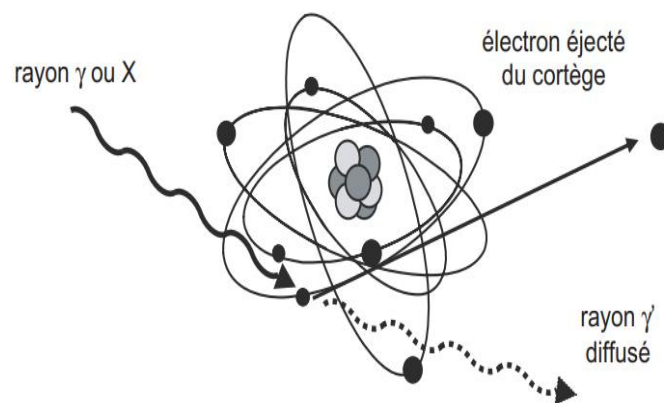


Figure 13: Effet Compton

Vu que l'énergie du photon incident se répartit entre l'énergie cinétique de l'électron Compton et l'énergie du photon diffusé. La section efficace peut se décomposer en une composante absorbée et une composante diffusée.

$$\sigma_c = \sigma_{ab} + \sigma_{dif} \quad (2-3)$$

La section efficace totale de l'effet Compton σ_c dépend linéairement du numéro atomique Z et diminue lorsque l'énergie de photon augmente [29].

$$\sigma_{\infty} \frac{Z}{E\gamma} \quad (2-4)$$

3.Effet de production de paires

Cet effet résulte de l'interaction d'un rayonnement électromagnétique avec les noyaux des atomes de la substance traversée. Le rayonnement incident disparaît et donne naissance à un positon et un négaton (Figure 14). L'énergie nécessaire pour obtenir la matérialisation de cette paire est égale à 1,022 MeV ; au-dessous de cette valeur, la réalisation de cet effet est énergétiquement impossible, au-dessus l'excédent d'énergie ($E_{\gamma} = 1,022$) apparaît sous forme d'énergie cinétique du positon et du négaton.

Il apparaît donc que les rayonnements électromagnétiques, grâce aux trois effets que nous venons de décrire, créent (paire positon-négaton) ou mettent en mouvement (photoélectron, électron Compton) des électrons qui vont ioniser la matière. C'est la raison pour laquelle on les qualifie de rayonnements indirectement ionisants [28].

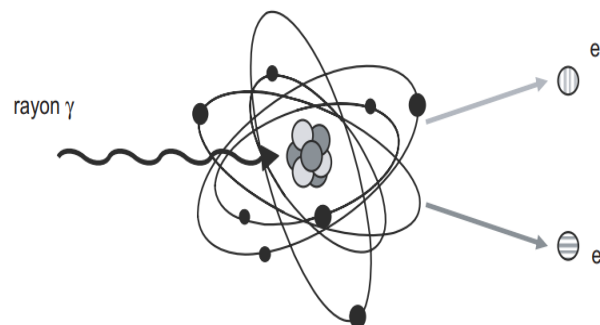


Figure 14: Effet de production de paires.

La section efficace d'interaction σ_{paire} dans le champ coulombien du noyau et dans celui de l'électron varie respectivement en Z^2 et Z [29].

4. Sections efficaces totale d'interaction

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 cm^2 ou en barns. La section efficace de chaque mode d'interaction dépend de l'énergie des photons incidents et du numéro atomique Z du matériau traversé [30]. La figure 15 représente la répartition prépondérante des effets photo-électrique, Compton et création de paires en fonction du numéro atomique et de l'énergie du photon incident.

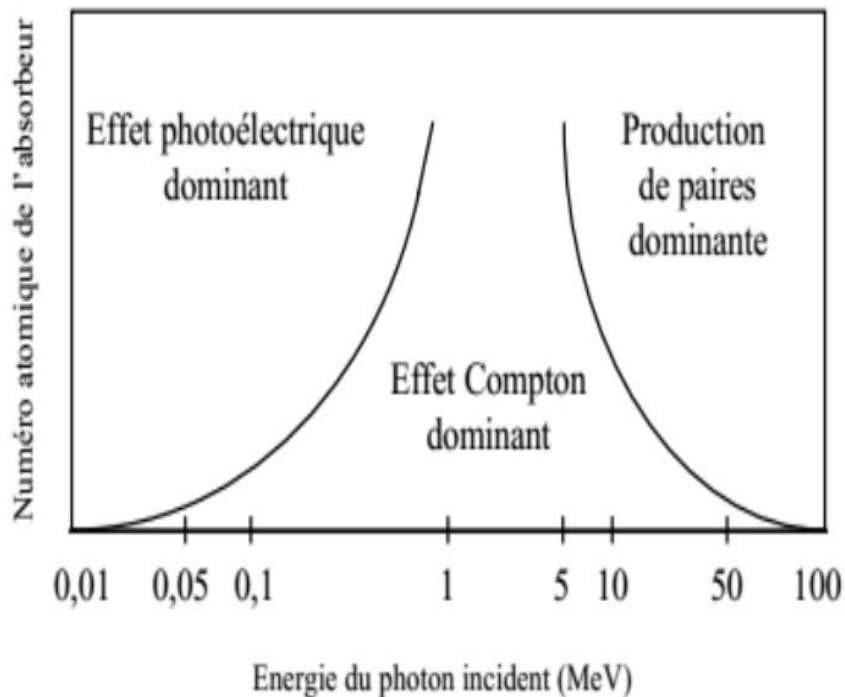


Figure 15: Domaines du plan Z, E_γ des sections efficaces d'interaction des Photons matière

La section efficace totale pour un photon d'énergie donnée correspond à la somme de toutes les sections efficaces des différents processus. Elle est donnée par la relation [3] :

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{ph}} + \sigma_{\text{c}} + \sigma_{\text{paire}} \quad (2-5)$$

5.L'importance relative entre les 3 interactions

L'importance relative entre ces trois phénomènes d'interaction dépend de la nature du matériau et de l'énergie du photon (Figure 15).

On constate que :

- L'effet photoélectrique prédomine à basse énergie et pour les matériaux lourds (Z élevé).
- L'effet Compton est prépondérant pour les énergies intermédiaires (imagerie) et pour les matériaux légers (faible Z).
- La matérialisation est le processus dominant pour les rayonnements d'énergie supérieure à quelques MeV et pour les matériaux lourds [31].

IV.Loi d'atténuation des photons

1.Coefficient d'atténuation

L'absorption des photons dans la matière dépend de la nature du milieu et de l'énergie des photons incidents. Si on désigne par I_0 l'intensité initiale d'un faisceau de photons mono énergétiques en incidence normale, la diminution de l'intensité dans l'épaisseur comprise entre x et $x+dx$ d'un absorbant dépend directement de son coefficient d'atténuation μ :

$$dI = -\mu I dx \quad (2-6)$$

Après intégration, on déduit la loi d'atténuation suivante:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x} = I_0 e^{-nx\sigma_{tot}} \quad (2-7)$$

n : étant le nombre de noyaux ou d'électrons atomiques par cm^3 et σ_{tot} la section efficace totale d'interaction. On appelle couche de demi-atténuation CDA ou épaisseur moitié $x_{1/2}$, l'épaisseur de matériau nécessaire pour atténuer d'un facteur 2 le nombre initial de photons :

$$CDA = X_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu} \text{ et } I(nx_{1/2}) = \frac{I_0}{2^n} \quad (2-8)$$

On définit le libre parcours moyen λ des photons dans un milieu par :

$$\lambda = 1/\mu = 1,44 X_{1/2} \quad (2-9)$$

Les figures 16 et 17 représentent les variations des coefficients d'atténuation massique μ/ρ en fonction de l'énergie gamma dans l'eau et dans le plomb.

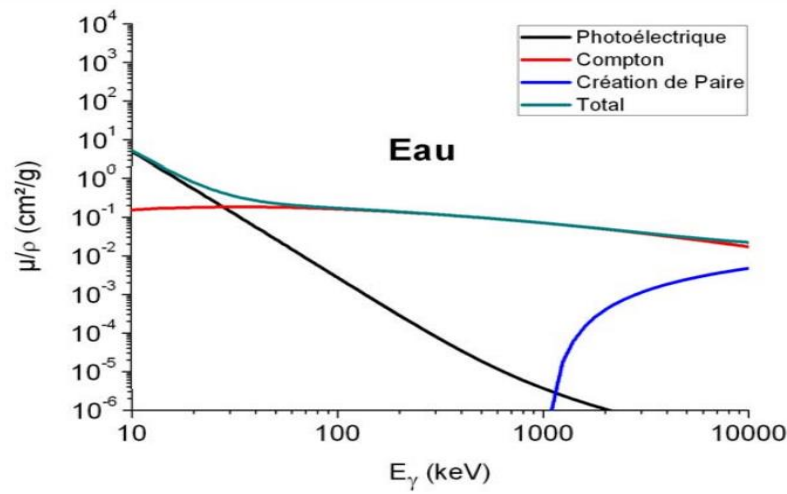


Figure 16 : Coefficients d'atténuation massique en fonction de l'énergie des photons dans l'eau

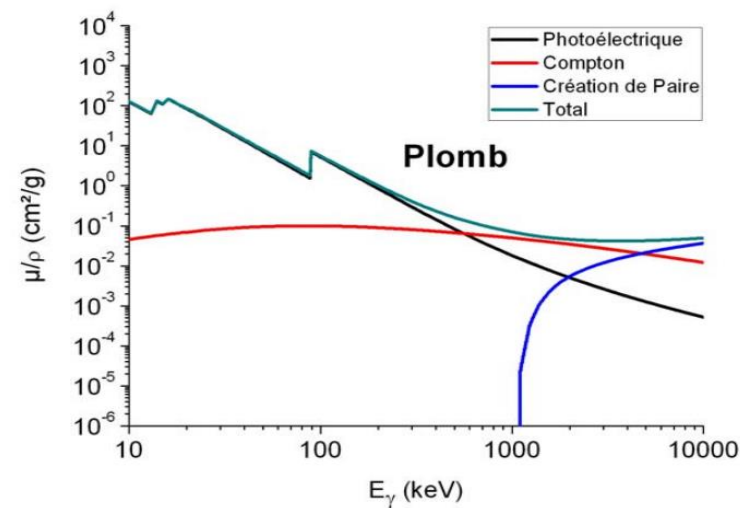


Figure 17 : Coefficients d'atténuation massique en fonction de l'énergie des photons dans le plomb

Les valeurs des coefficients d'atténuation massique μ/ρ exprimés en cm²/g sont données dans la littérature.

Dans le cas d'un milieu hétérogène constitué de n éléments :

$$\mu_{\text{composé}} = \sum_{i=1}^n f_i \mu_i \quad (2-10)$$

f_i : étant la fraction massique du composé i[32].

I.Introduction

Le développement de la spectrométrie γ 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 γ 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 γ est alors devenue un outil d'étude puissant des schémas de désintégration avec lequel des incertitudes de mesure de l'ordre de 10^{-6} (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 [33].

II.La spectrométrie gamma: définition et Principe

La spectrométrie γ est une méthode de mesure rapide, non destructive et multi-élémentaire pour identifier et quantifier les radionucléides émetteurs γ . Les photons γ émis par l'échantillon vont interagir avec le matériau du détecteur en déposant tout ou partie de leur énergie. Les différents événements seront classés dans un histogramme en fonction de l'énergie déposée : il s'agit du spectre à proprement parler [34].

Les mesures par spectrométrie gamma permettent de construire des spectres. 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 [35].

❖ principe

La mesure par cette technique sur une durée convenable permet de construire un spectre: histogramme donnant le nombre de photons détectés en fonction de leur énergie.

A partir du spectre enregistré, il est alors possible d'identifier les différents radioéléments (analyse qualitative) et de déterminer leur concentration (analyse quantitative) dans l'échantillon étudié. La performance d'un spectromètre est liée à sa capacité à détecter des raies peu intenses (efficacité) et de séparer des raies très proches en énergie (résolution). Actuellement la spectrométrie gamma est introduite dans plusieurs domaines: recherche, médecine, géologie, astronomie, archéologie, ... [3]

1) Analyse de spectres

En utilisant la technique de spectrométrie gamma, on peut réaliser une détermination qualitative et quantitative des radionucléides présents dans un échantillon. L'étalonnage en énergie est essentiel dans l'analyse qualitative, alors que l'étalonnage en efficacité est nécessaire pour l'analyse quantitative [3].

La figure 18 représente un exemple de spectre d'une source mono-énergétique, après étalonnage en énergie.

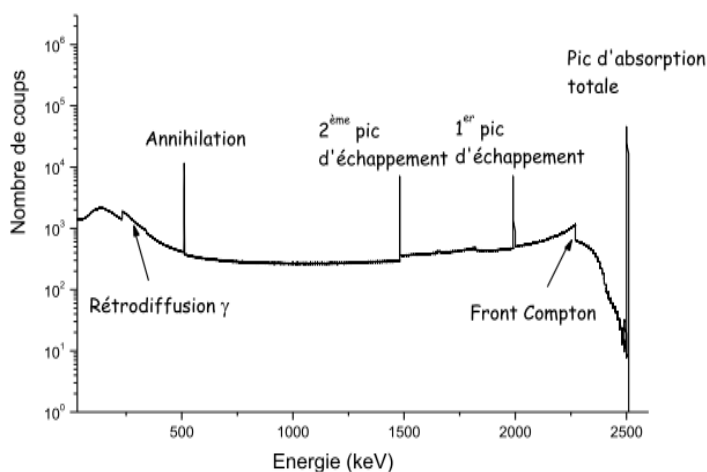


Figure 18: Exemple d'un spectre gamma d'une source mono-énergétique

Pic d'absorption totale: correspondant à l'énergie totale déposée dans la partie sensible du détecteur, soit par l'effet photoélectrique, soit par une combinaison des trois processus.

Continuum Compton: correspondant à des transferts partiels de l'énergie des photons incidents dans le détecteur via une diffusion Compton. Il s'étale entre le pic de rétrodiffusion

($\theta=180^\circ$, transfert maximum à l'électron Compton) et le pic photoélectrique ($\theta=0^\circ$, sans transfert d'énergie).

Pic de rétrodiffusion: correspond à la rétrodiffusion des photons dans le milieu environnant la partie active du détecteur.

Pic d'échappement:(ou les pics de premier et second échappements) positionnés respectivement aux énergies $E_\gamma = 511 \text{ keV}$ et $E_\gamma = 1022 \text{ keV}$. Ils sont dus au photon γ primaire qui subit une matérialisation en une paire électron-positron.

Pic d'annihilation: positionné à une énergie $E = 511 \text{ keV}$ correspond à la détection d'un photon provenant de l'annihilation d'un positron avec un électron du milieu traversé.

Pour les analyses des échantillons environnementaux qui contiennent plusieurs radioéléments, le spectre obtenu est alors un ensemble de pics distribués en énergie. Chaque énergie du pic correspond à l'énergie du photon incident, ce qui permet d'identifier le radioélément émetteur gamma. La surface des pics est alors proportionnelle à l'activité [3].

2) 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 γ 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 γ connues. Une fois les pics repérés, l'analyse quantitative peut être effectuée [1].

3) Activité d'un échantillon

L'activité d'un radioélément est proportionnelle au nombre d'événement sous le pic d'absorption totale. Elle est exprimée en Becquerel par kilogramme (Bq/kg) et est définie par l'équation suivante [3] :

$$A_E = \frac{N_{net}(E_\gamma)}{\varepsilon_{E_\gamma} \times t \times P_{E_\gamma} \times m} \quad (3-1)$$

Avec $N_{net}(E_\gamma)$: Le nombre de coups net dans le pic d'énergie E_γ (coups /s);

P_{E_γ} : La probabilité d'émission d'un rayonnement gamma d'énergie E_γ ;

ε_{E_γ} : L'efficacité de détection pour une énergie E_γ donnée;

m: Masse de l'échantillon en kg;

t: temps de collection.

III. Généralités sur les détecteurs

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. Dans le cas de l'excitation, ces atomes vont se désexciter par émission d'un nombre de photons proportionnels à l'énergie perdue dans le milieu, comme le cas du détecteur à scintillation. Dans le cas de l'ionisation, il y a création d'un nombre donné de paires (e-, ions ou trous) proportionnel à l'énergie déposée dans le détecteur. Sachant que chaque milieu (gaz, solide, . . .) a une valeur propre d'énergie W dite "Energie moyenne d'ionisation". Donc le nombre total de paires créées sera égale à:

$$n = \frac{E}{W} \quad (3-2)$$

La nature du signal délivré par de le détecteur dépend du circuit avec lequel le détecteur est connecté (généralement ce circuit est le préamplificateur). On peut schématiser l'ensemble détecteur-circuit connecté par la figure suivante:

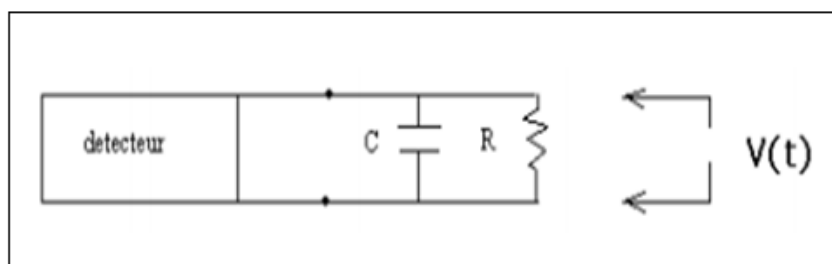


Figure 19: Schéma de l'ensemble détecteur-circuit connecté.

Où R représente la résistance d'entrée du circuit connecté au détecteur, et C représente la capacité équivalente du détecteur lui-même, du câble de connexion entre le détecteur et l'appareil qui vient après (le préamplificateur généralement) et la capacité d'entrée de ce dernier [36].

1. Modes de fonctionnement d'un détecteur

Le détecteur peut fonctionner suivant deux modes:

1.1. Mode courant

1.2 .Mode impulsion

1.1 .Le mode courant:

Dans le fonctionnement en mode courant, le circuit du détecteur est simplement fermé sur un ampèremètre ou un pico-ampèremètre. Le temps de réponse de cet appareil est grand devant le temps de collection de charge. L'intensité du courant mesuré sera une sorte de moyenne des « bouffées » successives. L'intensité de ce courant moyen est fonction de l'énergie perdue par chaque particule, mais aussi du nombre de particules qui traversent le détecteur. Le courant moyen nous renseigne uniquement sur l'énergie perdue par unité du temps dans le détecteur.

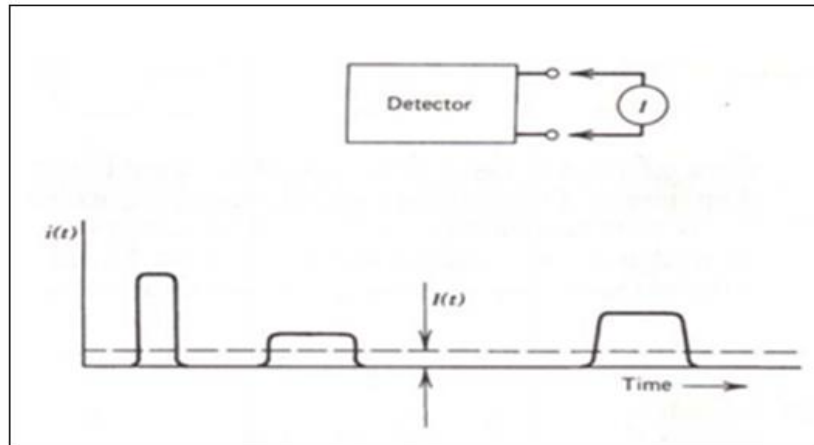


Figure 20: Mode courant

1.2. Le mode impulsion :

On s'attache au contraire à individualiser chaque évènement, la variation de la tension $V(t)$ aux bornes de la résistance de charge donne lieu à une impulsion. La valeur de la constante de temps de collection de charge t_c joue un rôle déterminant dans la forme et l'utilisation de ce signal. On peut envisager deux cas extrême [36]:

$RC \ll t_c$ (RC est Constante de temps) :

Le courant à travers la résistance de charge a pratiquement la même valeur que le courant instantané dans le détecteur. La forme de l'impulsion reflète assez fidèlement la variation du courant dans le détecteur et ce signal peut être utilisé pour avoir la meilleure information sur le temps de passage de la particule dans le détecteur. Ce mode est employé en spectroscopie de temps.

$RC \gg t_c$:

Les charges sont momentanément stockées dans la capacité qui finit par se décharger à son tour dans la résistance. L'impulsion passe par un maximum pour $t = t_c$. Le temps de montée du signal ne dépend que du détecteur, alors que le temps de descente est fixé par la constante de temps du circuit. On peut montrer que pour ce maximum.

$$U = \frac{Q}{C} \quad (3-3)$$

Q : charge laissée dans le détecteur

C: capacité du détecteur

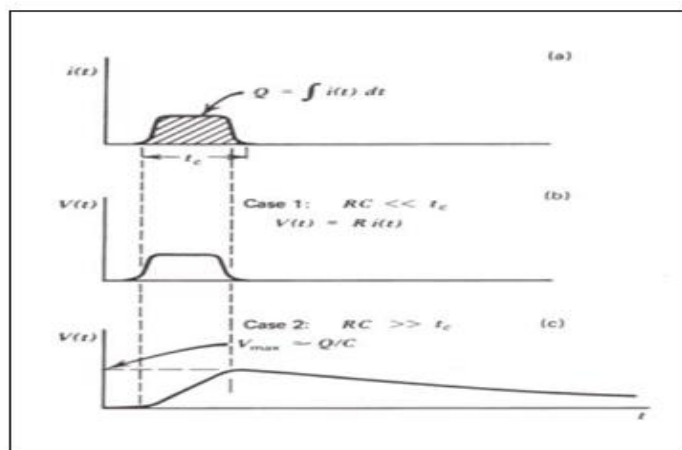


Figure 21 : Mode impulsion

La mesure de la hauteur d'impulsion fournit donc l'information énergie puisque celle-ci est proportionnelle aux charges créées dans le détecteur. Ce mode de fonctionnement est utilisé en spectroscopie énergie.

2. Principales caractéristiques d'un détecteur

Les principales caractéristiques d'un détecteur sont:

- ❖ La résolution
- ❖ L'efficacité de détection
- ❖ Le temps mort

Quel que soit les détecteurs utilisés dans une expérience, le choix de ces derniers se fera selon les trois facteurs précédents :

2.1. Résolution:

En physique nucléaire, beaucoup d'applications consistent à déterminer deux facteurs importants concernant le rayonnement qui sont « l'énergie et le temps ». C'est pourquoi on parle souvent de spectroscopie de rayonnement « Radiation spectroscopy ». Lorsqu'un rayonnement arrive au détecteur, il interagit avec lui, la réponse de ce dernier donne un spectre de distribution gaussienne.

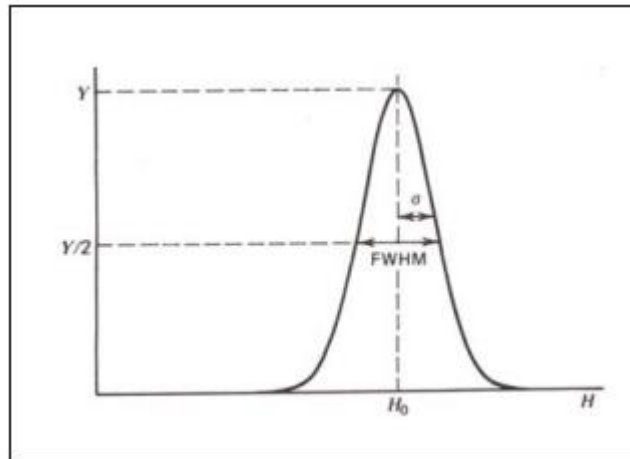


Figure 22: Distribution gaussienne du pic.

La fonction de cette dernière est connue par " fonction de réponse ", où elle est centrée autours d'une valeur moyenne H_0 , l'équation de cette fonction est donnée par la relation :

$$G(H) = \frac{A}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{(H-H_0)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (3-4)$$

Où

A: l'aire du pic (le nombre de charges positives ou négatives)

σ : fluctuation statistique sur le nombre de coups (ou l'aire du pic)

H_0 : la valeur moyenne de la position du pic

Plus la fluctuation statistique σ augmente, plus le pic devient large.

Statistiquement, si l'aire du pic comporte N événements, la fluctuation statistique sur ce nombre est égale à la racine carrée de N :

$$\sigma_N = \sqrt{N} \quad (3-5)$$

Sachant que, chaque milieu (détecteur) a une certaine énergie nécessaire pour créer des paires (e^- , trous) dans les solide, et (e^- , ions) dans les gaz, dite énergie d'extraction W . Donc le nombre de paire n crée dans le détecteur, pour un dépôt d'énergie E du rayonnement, est égale à:

$$n = \frac{E}{W} \quad (3-6)$$

Alors la fluctuation statistique sur le nombre de paires est:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{E}{W}} \quad (3-7)$$

Dans les mesures de spectroscopie nucléaire, on veut toujours avoir la meilleure résolution possible en énergie. La résolution en énergie du détecteur est donnée par la largeur à mi-hauteur du pic enregistré. Elle est notée par FWHM (Full Width at Half Maximum). Plus FWHM est petite, plus la résolution du détecteur est bonne. Pour une courbe gaussienne, la largeur à mi-hauteur FWHM est proportionnelle au fluctuation statistique (déviations standard) σ où :

$$\text{FWHM} = 2,35 \cdot \sigma \quad (3-8)$$

Donc

$$R(\%) = \frac{2,35}{\sqrt{n}} = 2,35 \cdot \sqrt{\frac{W}{E}} \quad (3-9)$$

Expérimentalement, on peut aussi déterminer la résolution du détecteur en pourcentage en divisant FWHM par la valeur de l'énergie du rayonnement H_0 (Ou E):

$$R(\%) = \frac{\text{FWHM}}{H_0} \quad (3-10)$$

La figure 23 montre la réponse de deux détecteurs différents un Ge(Li) et un NaI(Tl) et permet de dire que la résolution du détecteur Ge(Li) est nettement meilleur que celle du NaI(Tl)[36].

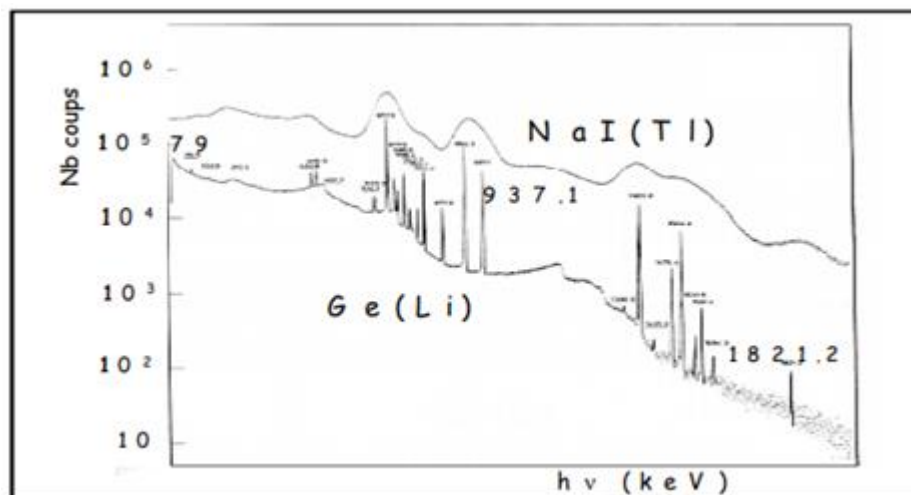


Figure 23: Spectres de rayonnements gamma obtenus par les détecteurs Ge(Li) et NaI(Tl).

2.2. L'efficacité:

Parmi tous les rayonnements émis par une source donnée, il y a seulement une fraction de ce nombre qui est enregistré par le système de mesure (détecteur+électronique associée). On trouve deux efficacités possibles :

❖ Efficacité absolue:

C'est le rapport entre le nombre d'événements enregistrés et le nombre total d'événements sortants de la source (dans toutes les directions).

$$\varepsilon_{\text{abs}} = \frac{\text{nombre d'impulsions comptés}}{\text{nombre de rayonnements issus de la source}} \quad (3-11)$$

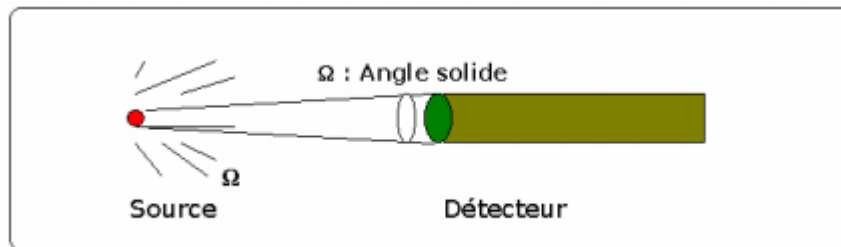


Figure 24: L'ensemble source radioactive-détecteur.

❖ Efficacité Intrinsèque :

C'est le rapport entre le nombre d'événements enregistrés et le nombre d'événements qui arrivent sur le détecteur.

$$\varepsilon_{\text{int}} = \frac{\text{nombre d'impulsions comptés}}{\text{nombre de rayonnements reçus par le détecteur}} \quad (3-12)$$

La relation qui relie les deux efficacités absolue et intrinsèque est :

$$\varepsilon_{\text{int}} = \varepsilon_{\text{abs}} \cdot \frac{4\pi}{\Omega} \quad (3-13)$$

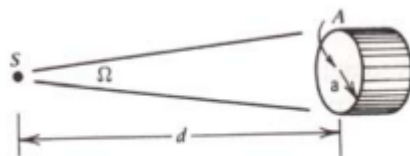
Ω : Angle solide du détecteur.

Pour un détecteur ayant une efficacité intrinsèque ε_{int} bien déterminée et qui a détecté un nombre d'impulsion N , le nombre des rayonnements émis N_0 par une source radioactive sera:

$$N_0 = N \cdot \frac{4\pi}{\varepsilon_{\text{int}} \cdot \Omega} \quad (3-14)$$

Où Ω : est l'angle solide entre la source radioactive (ou l'échantillon) et le détecteur, tel que :

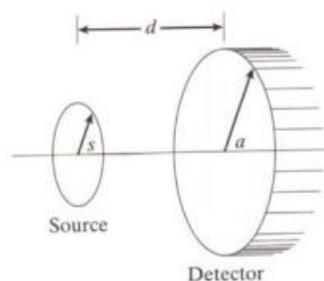
Si la source radioactive est ponctuelle.



L'angle solide est donné par la formule suivante :

$$\Omega = 2\pi \left(1 - \frac{d}{\sqrt{d^2 + a^2}}\right) \quad (3-15)$$

Ce n'est pas le cas si la source radioactive (ou l'échantillon) possède une forme géométrique circulaire[36].



❖ 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 des bruits de fond ont assentiment pour origine le rayonnement cosmique, la radioactivité des radionucléides présents dans les matériaux terrestres (famille Uranium-235 et Uranium-238, Thorium-232) 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 [37].

2.3. Le Temps mort:

Chaque instrument d'une chaîne de mesure (détecteur, électronique associée, . . .) possède un temps nécessaire pour le traitement d'un événement et soit Prêt à distinguer un autre événement successif. Ce temps est connu sous "temps mort".

Il existe deux modes de calcul de ce dernier:

• Mode 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 τ à partir de temps d'arrivée 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:

$$M = N \cdot e^{-N \cdot \tau} \quad (3-16)$$

• Mode non paralysable:

Si un second événement arrive avant que τ 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:

$$M = \frac{N}{1 + N \cdot \tau} \quad (3-17)$$

La Figure suivante illustre les deux modes:

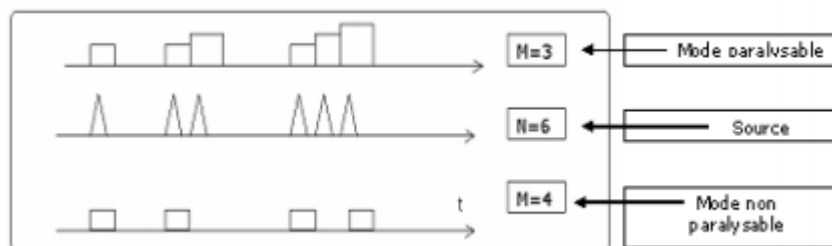


Figure 25: Modes paralysable et non paralysable.

Le temps mort DL (Dead Time) d'une chaîne de mesure peut être mesuré d'une autre façon, en utilisant la relation suivante:

$$DT (s) = RT - LT \quad (3-18)$$

Où le LT (Live Time) est défini par le temps dans lequel la chaîne de mesure est disponible pour acquérir et analyser les différentes impulsions. Le RT (Real Time), c'est le temps total de la mesure. Si on veut mesurer le temps mort en pour cent, on utilise la relation [38] :

$$DT(\%) = \frac{RT-LT}{RT} \times 100 \quad (3-19)$$

3. Détection des rayonnements

En spectrométrie gamma, les deux principaux détecteurs utilisés sont les scintillateurs et les semi-conducteurs.

3.1. Les semi-conducteurs:

Sont basés sur l'ionisation des atomes du milieu détecteur. Le dépôt d'énergie des γ suite à leur interaction se traduit par la création de porteurs de charges (paires électron-trou) au sein du réseau cristallin. Ces charges sont ensuite mobilisées grâce à un champ électrique, produit par une alimentation haute tension continue de l'ordre de quelques milliers de volts, conduisant à la génération d'un courant. Les détecteurs constitués d'un cristal de germanium hyper pur Ge [HP] sont les plus couramment utilisés à ce jour. Ils fonctionnent à basse température (77 K), ce qui assure une insensibilité aux variations de haute tension et de température intérieure, et présentent une excellente résolution en énergie (environ 2 keV à 1332 keV). Selon les objectifs envisagés, différents détecteurs au Ge [HP] peuvent être rencontrés. On distingue :

- les détecteurs planaires : ils sont bien adaptés aux mesures des basses énergies (< 200 keV) grâce à un cristal de grand diamètre (jusqu' à 70 mm) et de faible épaisseur (moins de 30 mm).
- les détecteurs coaxiaux: ils sont utilisés sur une large gamme d'énergie (10 keV à 10 MeV) et permettent une utilisation plus polyvalente. Certaines géométries, de type puits, autorisent également la mesure de faibles activités (< 1 Bq). Pour les besoins de métrologie et d'analyse fine des radionucléides produits lors de réactions nucléaires, le détecteur le plus approprié est le Ge [HP].

Une des caractéristiques fondamentales de ces différents détecteurs est la proportionnalité entre l'énergie du rayonnement et l'amplitude du signal recueilli en sortie. Différents étages sont ensuite employés pour amplifier et mettre en forme ce signal [33].

3.2. Les scintillateurs:

Les premiers détecteurs employés pour faire de la spectrométrie γ étaient des scintillateurs. Ces détecteurs sont basés sur le principe d'excitation et de désexcitation. Lorsqu'un rayonnement gamma rencontre un matériau à scintillation, les électrons des molécules composant le scintillateur passent dans un état excité. La désexcitation des molécules s'effectue par émission de photons de fluorescence ou phosphorescence.

Ces photons lumineux sont guidés, grâce à un guide optique, vers un photomultiplicateur composé d'une photocathode et d'une série de dynodes. La photocathode convertit les photons lumineux en électrons par effet photoélectrique. Le flux électronique est amplifié grâce à la série de dynodes. Le signal électrique est alors proportionnel à l'énergie déposée par les photons incidents dans le scintillateur.

Il existe deux types de détecteurs à scintillation: les scintillateurs organiques et les scintillateurs inorganiques.

Les premiers caractérisés par une réponse très rapide, sont généralement utilisés pour la spectroscopie β et la détection de neutrons tandis que les seconds, possédant un rendement lumineux élevé et une meilleure efficacité (densité et nombre atomique Z élevés), sont préférés pour la spectroscopie gamma.

Ils sont utilisés dans le domaine de l'imagerie médicale, l'astrophysique et le nucléaire. Pour les mesures des rayons gamma, l'iodure de sodium dopé au thallium NaI(Tl) est le détecteur le plus utilisé. Le rayonnement incident est absorbé dans le cristal NaI et donne naissance à des photons lumineux qui interagissent sur la photocathode du photomultiplicateur par effet photoélectrique. Les photoélectrons éjectés sont multipliés et accélérés par un ensemble de dynodes. On recueille à la sortie une impulsion proportionnelle à l'énergie du rayonnement primaire détecté [3].

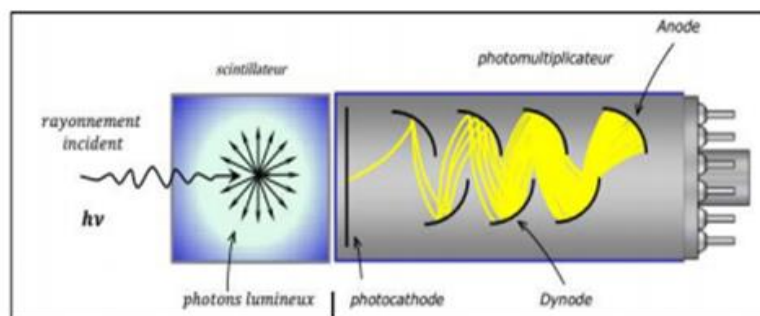


Figure 26: Schéma de principe des détecteurs à scintillation.

IV. Présentation d'une chaîne de spectrométrie γ

La spectrométrie γ a pour but l'analyse qualitative (identification de radionucléides) et quantitative (mesure de l'activité associée) des rayonnements gamma émis spontanément par l'échantillon à caractériser. Le dispositif expérimental consiste à classer en fonction de leur énergie les photons qui interagissent avec le milieu détecteur. Les performances atteintes par la chaîne de mesure dépendent du choix de chacun des étages et des réglages associés. Il est donc nécessaire de bien identifier le fonctionnement et les limitations de chacun afin d'adapter la chaîne de mesure à ses besoins [33].

Tout ce qui sort du détecteur consiste en une quantité de charge, et pour faire l'analyse, il faut transformer cette quantité de charge en un signal électrique traitable afin de retirer l'information nécessaire sur les rayonnements. Le traitement de ce signal nécessite l'utilisation de différents modules électroniques. Nous allons citer quelques uns d'une chaîne de spectrométrie. Mais comme nous avons vu précédemment, chaque détecteur a deux sorties l'une linéaire et l'autre rapide, donc le traitement de signal pour les deux sorties (voies) n'est pas le même, et ceci pour les modules électroniques utilisés et la manipulation elle-même [38].

Chaîne de mesure associée:

La chaîne de mesure en aval du détecteur comporte généralement 4 étages, alimentés en basse tension continue ($\pm 6\text{ V}$, $\pm 12\text{ V}$ ou $\pm 24\text{ V}$) et associés tel que montre la figure suivante:

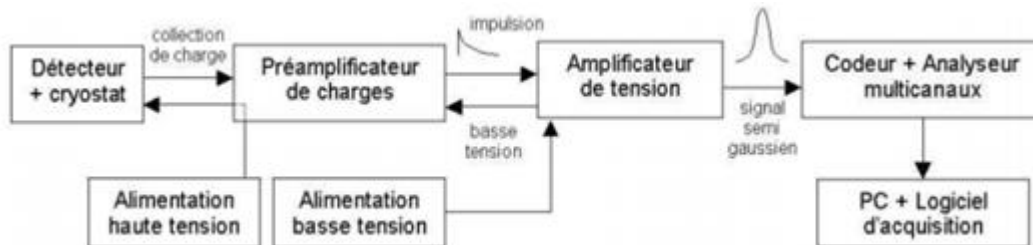


Figure 27: Schéma de principe d'une chaîne de mesure de spectrométrie.

1. Le préamplificateur: est le premier dispositif rencontré en sortie du détecteur. Son rôle est de réaliser une première amplification du signal généré par l'interaction des γ 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. Dans le domaine de la spectrométrie γ de haute résolution, on rencontre essentiellement des préamplificateurs de charges. Il en existe deux principaux types [39] :

-les préamplificateurs à contre-réaction résistive: ce sont les plus classiques. Ils sont constitués d'un étage d'amplification couplé à un circuit de contre-réaction capacitive afin de rendre la tension de sortie indépendante de la capacité du détecteur. Les signaux générés sont constitués d'un front montant rapide (de 100 à 500 ns), fixé par la durée de collection des charges, suivi d'une remise à zéro s'étalant sur une durée plus longue (de 50 à 150 μs).

-les préamplificateurs à contre-réaction pulsée: ce type de préamplificateur ne dispose pas de résistance de contre-réaction afin de limiter le bruit qu'elle génère. En contrepartie, les signaux vont s'empiler par marches successives du fait du temps de décharge infini. Un dispositif de remise à zéro est alors utilisé pour décharger la capacité et permettre un nouveau cycle d'opération. Cette fonction est réalisée soit par une diode à émission lumineuse, soit par un circuit à transistor (plus adapté aux hautes énergies et aux forts taux de comptage).

2. L'amplificateur exploite ensuite les impulsions sortant du préamplificateur. Il adapte tout d'abord l'amplitude du signal incident à une gamme de tension exploitable par l'étage

suisant. 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. On rencontre en général deux types de système [40] :

-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 cm^3) et pour des taux de comptage faibles (quelques 10^4 s^{-1})

-les amplificateurs intégrateurs (ou GI pour GatedIntegrator) : ce type de système est utilisé lorsque des taux de comptage élevés sont rencontrés ($>10^5 \text{ s}^{-1}$) et pour des détecteurs de gros volume (plusieurs centaines de 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.

3. Le convertisseur analogique-numérique (ou ADC pour Analog to Digital Converter) est utilisé pour permettre à l'étage suivant de traiter des signaux logiques plutôt qu'analogiques. On rencontre deux technologies de codage d'adresse:

-les codeurs Wilkinson : le principe est de mesurer, à l'aide d'une horloge interne, le temps de décharge d'un condensateur porté initialement à la tension maximale de l'impulsion. Ils sont caractérisés par un temps de traitement proportionnel à l'amplitude du signal.

-les codeurs à approximations successives (ou à poids) : il s'agit de mesurer la hauteur du signal par une méthode dichotomique, en la comparant à des signaux calibrés en tension. Ce type de codeur se caractérise par un temps de traitement fixe (de 0.8 à 8 μs) et s'avère plus adapté aux mesures à fort taux de comptage [40].

4. L'analyseur multicanaux (ou MCA pour Multi Channel Analyser) permet enfin de trier les impulsions en fonction de leur amplitude. Il est doté de mémoires permettant de stocker ces données dans des canaux correspondant à des intervalles de tension et de les transmettre en

ligne vers un ordinateur. Les enregistrements ainsi obtenus sont des histogrammes qu'on appelle « spectres différentiels de hauteur d'impulsion ». La plupart du temps, le logiciel utilisé pour l'acquisition des données permet également de réaliser une première analyse qualitative et quantitative des spectres [33].

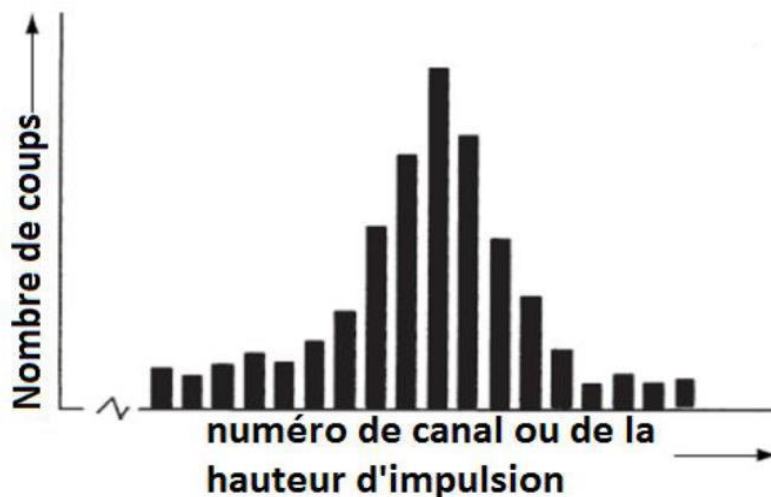


Figure 28: Histogrammes donnant le nombre de photons détectés en fonction de nombre de canal [1].

5. Un PC d'acquisition, associé à un analyseur, enregistre l'énergie de l'événement en incrémentant le canal correspondant. Un spectre est ainsi collecté et analysé par le logiciel GENIE 2000 [3].

6. 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.

7. Etalonnage, le logiciel Genie2000 permet de visualiser en temps réel la sortie de l'analyseur multicanaux, à savoir un spectre avec en abscisse le numéro de canal et en ordonnée le nombre de coups dans ce canal. De manière à pouvoir identifier les désintégrations radioactives mises en jeu, le spectre doit être étalonné en énergie. Cela consiste à établir une relation polynomiale 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 29) [41].

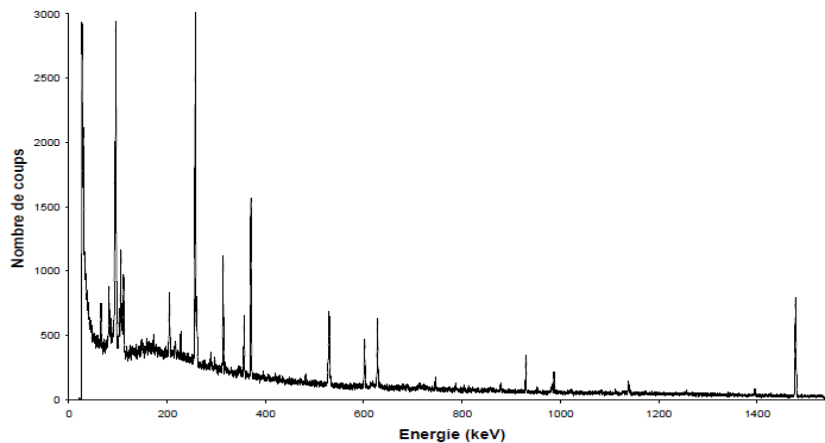


Figure 29 : Exemple de spectre de radioactivité naturelle obtenu après plusieurs jours de comptage [42].

-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 calcul 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.

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 [1].

V. 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 minière. 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}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 Analyses) 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.) [42].

I. Présentation de la zone d'étude

Les ressources géothermiques de l'Algérie sont nombreuses. Ces dernières se manifestent sous forme de sources thermales qui sont très répandues sur tout le territoire Nord algérien. Elles sont réparties d'Est en Ouest, mais elles sont de plus forte concentration en Est, cette zone caractérisée par un gradient géothermique remarquable qui atteint 50°C /Km.

Dans notre expérience les deux régions ont été choisies dans le présent travail de l'Est de l'Algérie (Hammmam Debagh et Hammmam Khenchela).

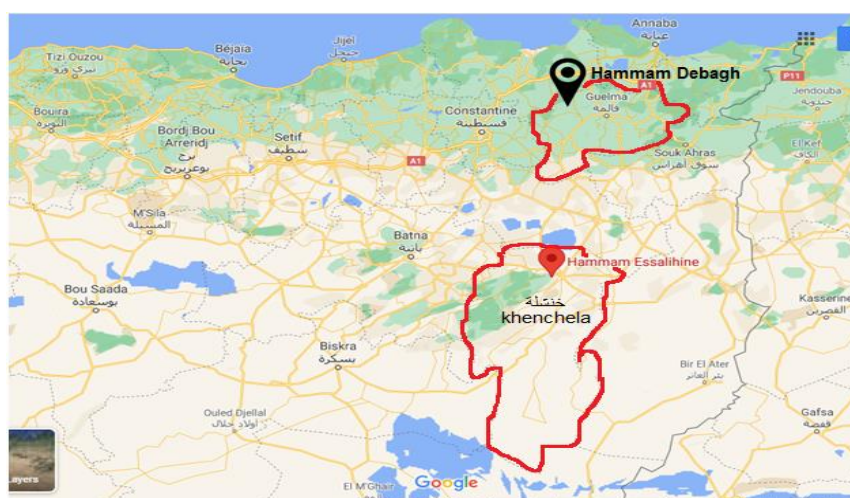


Figure 30: carte géographique de l'Est de l'Algérie

1. Le barrage de Hammam Debagh, situé à 20Km à l'Ouest de la ville de Guelma, est implanté sur l'Oued Bouhamdane à 3Km à l'amont de la localité de Hammam Debagh [43].



Figure 31: Hammam Debagh

L'ensemble des sources thermales de la région de Hammam Debagh émergent dans les travertins déposés par les sources thermales. Les eaux jaillissent à la faveur d'une faille N 20°E, qui traversent les formations calcaires de l'Aptien, les marno-calcaires du sénonien jusqu'à Jurassique dolomitique en profondeur, les caractéristiques organoleptiques sont similaires aux sources de Ouled Ali mais avec des débits importants dont la totalité est égale à **77.5 l/s** [44].

2.Hammam Essalhine (Hammam Khenchela) est un bain romain qui existe depuis 2000 ans. Il est situé dans la commune d'El Hamma, site touristique et thérapeutique. Il est très riche en minéraux, cette eau est si pure qu'elle n'a besoin d'aucun filtrage. Il refroidit naturellement avant d'arriver dans les bassins où il est continuellement brassé [45].



Figure 32: Hammam Khenchela

II. Préparation des échantillons

Deux échantillons d'eau de 500 ml l'un de la station hammam khenchela et l'autre de la station hammam Debagh. Ces échantillons sont préparés pour la spectrométrie gamma.

Les deux échantillons ont été mesurés pendant 80000s avec un détecteur BEGe (Broad Energy Germanium), modèle SG500 de CANBERRA.

Les spectres ont été analysés avec le logiciel GENIE 2000.

La courbe d'efficacité du détecteur a été déterminée avec un échantillon de solution radioactive aqueuse standard à plusieurs éléments.

III. Etalonnage

Pour calculer La résolution de notre détecteur on va utiliser la relation suivante :

$$R(\%) = \frac{\Delta E}{E} \quad (4-1)$$

ΔE : représente la largeur à mi-hauteur LMH (FWHM)

$$R(\%) = \frac{FWHM}{E} \quad (4-2)$$

A partir de spectre obtenu du Hammam Khenchela

On calcule

$$FWHM = 0,144 + 0,045 * E^{\frac{1}{2}} \quad (4-3)$$

A partir de spectre obtenu du Hammam Debagh

$$FWHM = 0,516 + 0,031 * E^{\frac{1}{2}} \quad (4-4)$$

La résolution de notre détecteur est résumée dans la Table suivante :

Eléments	Energie (keV)	Résolution(%)	
		H.Khenchela	H.Debagh
⁵⁷ Co	122	0.005	0.007
⁶⁰ Co	1173.2	0.001	0.001
¹³⁷ Cs	661.7	0.002	0.002

Tableau 8: Résolution de notre détecteur au germanium

IV. Calibration de la chaine de mesure

Les étalonnages en énergie et en efficacité du détecteur ont été effectués à l'aide de 11 sources ponctuelles gamma standard : ²⁴¹Am, ¹⁰⁹Cd, ⁵⁷Co, ¹³⁹Ce, ¹¹³Sn, ⁵¹Cr, ¹¹³Sn, ⁸⁵Sr, ¹³⁷Cs, ⁸⁸Y, ⁶⁰Co, avec des énergies de 59.54 à 1836.05 keV.

1. Etalonnage en énergie:

L'étalonnage en énergie d'une spectrométrie gamma nécessite un certain nombre de sources radioactives émettrices de rayonnement gamma. Les spectres obtenus correspondent aux raies des énergies de ces sources. Les raies d'absorption totale sont classées par leurs amplitudes. Chaque canal est associé à une énergie.

Pour avoir une bonne analyse qualitative, il faut bien calibrer en énergie notre chaîne de spectrométrie gamma, pour cela et pour tracer la droite d'étalonnage en énergie.

Le tableau suivant résume ces sources radioactives et les résultats trouvés en calibration en énergie.

Radionucléides	Energie (keV)	Canal (H. KH)	Canal (H. Debagh)
²⁴¹ Am	59.5	183	180
¹⁰⁹ Cd	88	270	264
⁵⁷ Co	122	374	363
⁵⁷ Co	136.5	418	406
¹³⁹ Ce	165.8	508	492
¹¹³ Sn	255.1	782	754
⁵¹ Cr	320	981	944
¹¹³ Sn	391.7	1201	1154
⁸⁵ Sr	514	1576	1513
¹³⁷ Cs	661.7	2028	1945
⁸⁸ Y	898	2753	2639
⁶⁰ Co	1173.2	3597	3446
⁶⁰ Co	1332.5	4086	3914
⁸⁸ Y	1836	5631	5391

Tableau 9: Résultat de calibration en énergie.

En utilisant le tableau ci dessus, les droites de calibration obtenue sont (Figure 33) et (Figure 34):

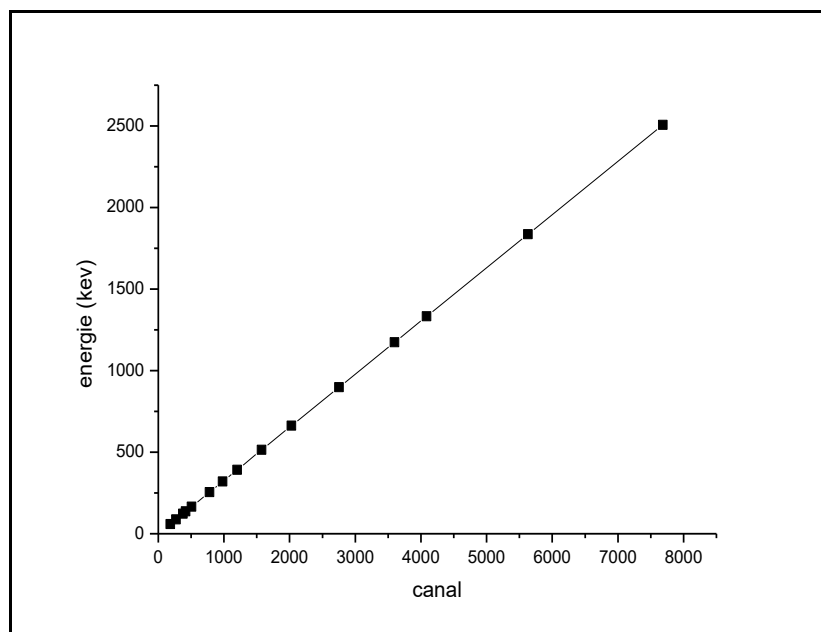


Figure 33: Droite d'étalonnage en énergie visualisé par le logiciel origine pro 8 (H Khenchela)

Le droite de calibration obtenue est: $Energie = A \times Canal + B$, avec:

$$A=0.326\text{keV/canal et } B= 0.355 \text{ keV}$$

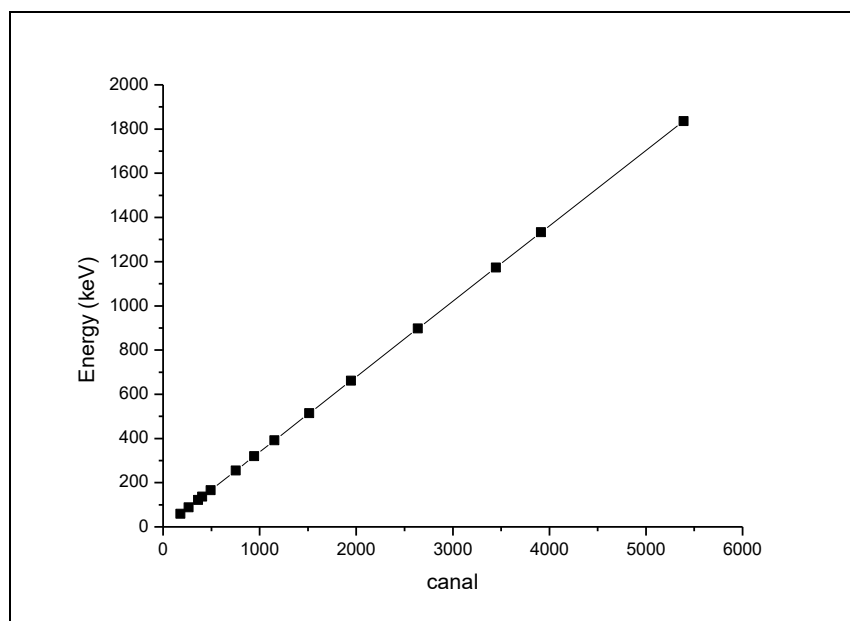


Figure 34: Droite d'étalonnage en énergie visualisé par le logiciel origine pro 8 (H Debagh)

Le droite de calibration obtenue est: $Energie = A \times Canal + B$, avec:

$$A= 0.34\text{keV/canal et } B= -1.76\text{keV}$$

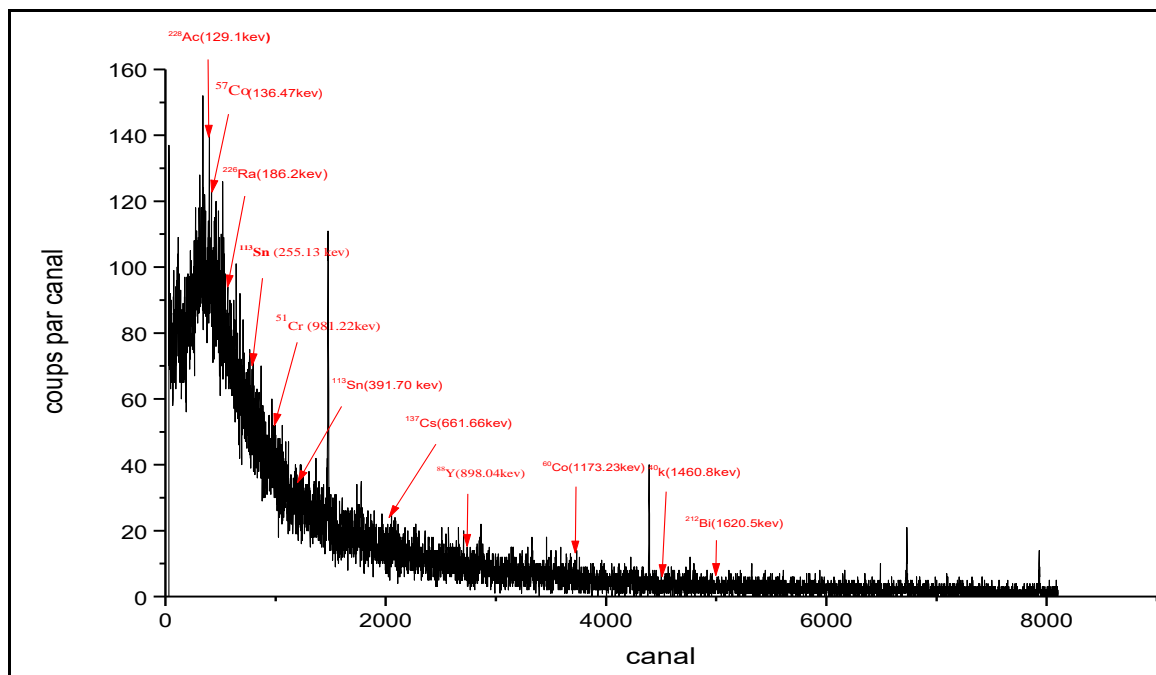


Figure 35: spectre expérimental H kenchela

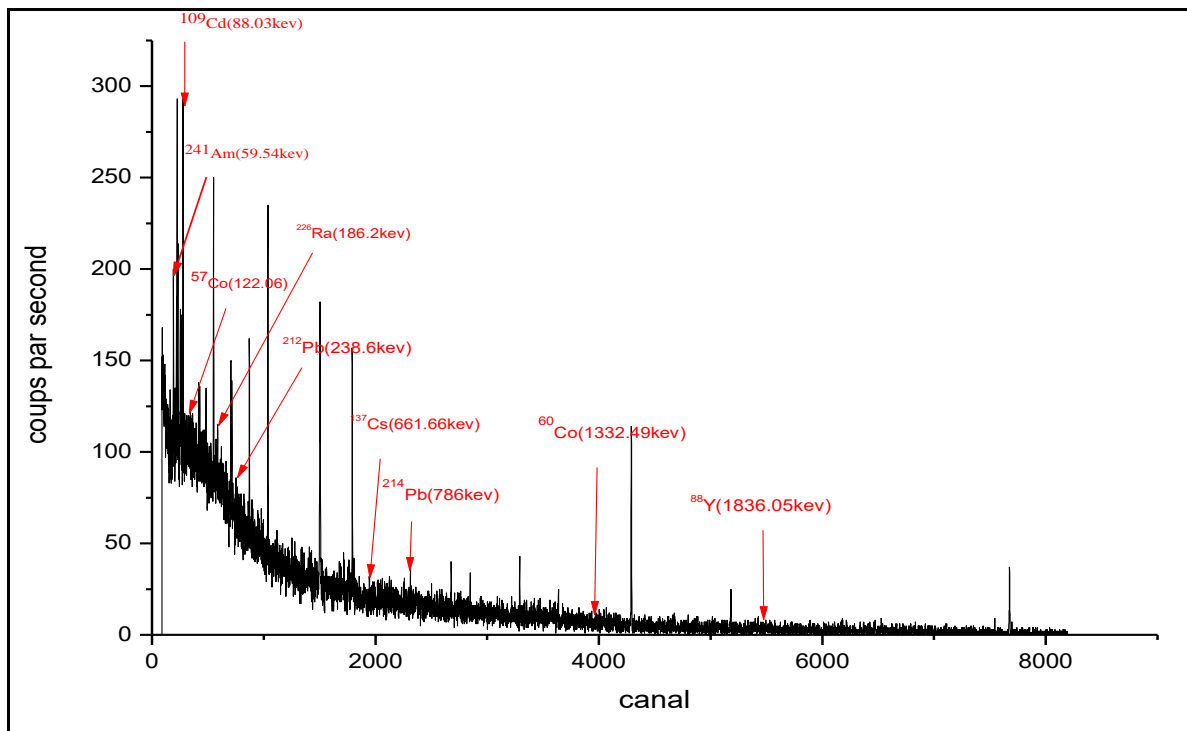


Figure 36: spectre expérimental (H Debagh)

2. Etalonnage en efficacité:

L'étalonnage en efficacité de la chaîne de mesure est fait à partir du calcul de l'efficacité absolue de chaque rayonnement gamma.

Radionucléides	Energie (keV)	Efficacité H. Khenchela	Efficacité H. Debagh
²⁴¹ Am	59.5	$4.1 \cdot 10^{-2} \pm 1.2 \cdot 10^{-3}$	$3.9 \cdot 10^{-3} \pm 1.2 \cdot 10^{-4}$
¹⁰⁹ Cd	88	$4.2 \cdot 10^{-2} \pm 1.3 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2} \pm 3.6 \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	122	$4.1 \cdot 10^{-2} \pm 1.2 \cdot 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2} \pm 4.5 \cdot 10^{-4}$
⁵⁷ Co	136.5	/	$1.5 \cdot 10^{-2} \pm 6.9 \cdot 10^{-4}$
¹³⁹ Ce	165.8	$3.3 \cdot 10^{-2} \pm 10^{-3}$	$1.5 \cdot 10^{-2} \pm 4.6 \cdot 10^{-4}$
¹¹³ Sn	255.1	$2.4 \cdot 10^{-2} \pm 1.4 \cdot 10^{-3}$	$1.1 \cdot 10^{-2} \pm 6.4 \cdot 10^{-4}$
⁵¹ Cr	320	$2 \cdot 10^{-2} \pm 6.2 \cdot 10^{-4}$	$8.8 \cdot 10^{-3} \pm 2.7 \cdot 10^{-4}$
¹¹³ Sn	391.7	$1.8 \cdot 10^{-2} \pm 5.4 \cdot 10^{-4}$	$7.7 \cdot 10^{-3} \pm 2.3 \cdot 10^{-4}$
⁸⁵ Sr	514	$1.3 \cdot 10^{-2} \pm 4 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-3} \pm 1.8 \cdot 10^{-4}$
¹³⁷ Cs	661.7	$1.1 \cdot 10^{-2} \pm 3.4 \cdot 10^{-4}$	$4.8 \cdot 10^{-3} \pm 1.5 \cdot 10^{-4}$
⁸⁸ Y	898	$7.8 \cdot 10^{-3} \pm 2.4 \cdot 10^{-4}$	$3.5 \cdot 10^{-3} \pm 10^{-4}$
⁶⁰ Co	1173.2	$6.5 \cdot 10^{-3} \pm 2 \cdot 10^{-4}$	$2.9 \cdot 10^{-3} \pm 8.8 \cdot 10^{-5}$
⁶⁰ Co	1332.5	$5.9 \cdot 10^{-3} \pm 2.8 \cdot 10^{-4}$	$2.6 \cdot 10^{-3} \pm 7.9 \cdot 10^{-5}$
⁸⁸ Y	1836	$4.3 \cdot 10^{-3} \pm 1.3 \cdot 10^{-4}$	$1.9 \cdot 10^{-3} \pm 5.8 \cdot 10^{-5}$

Tableau 10: résultat d'étalonnage en efficacité.

En utilisant le tableau ci-dessus pour tracer les courbes de l'efficacité (Figure 37) et (Figure 38):

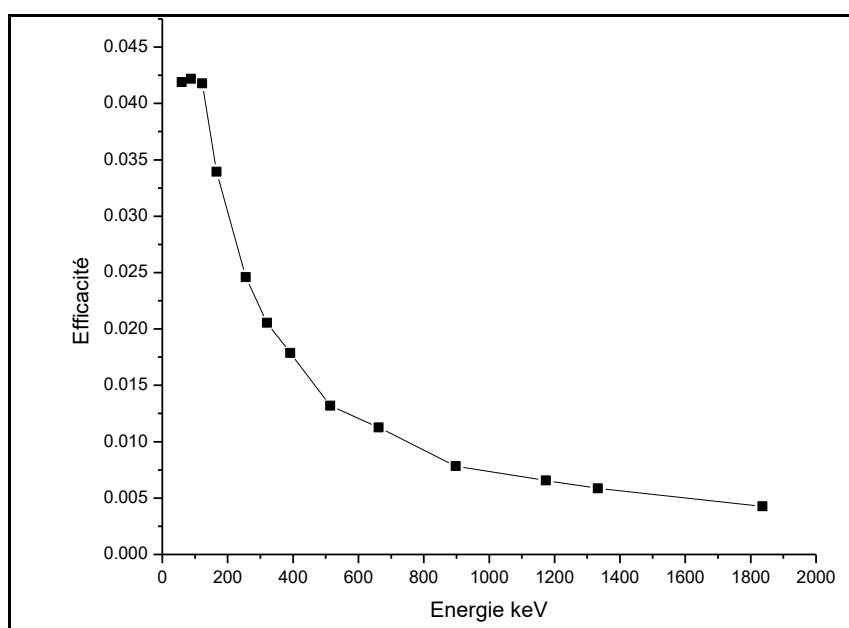


Figure 37: étalonnage en efficacité visualisé par le logiciel origine pro 8 (H khenchela)

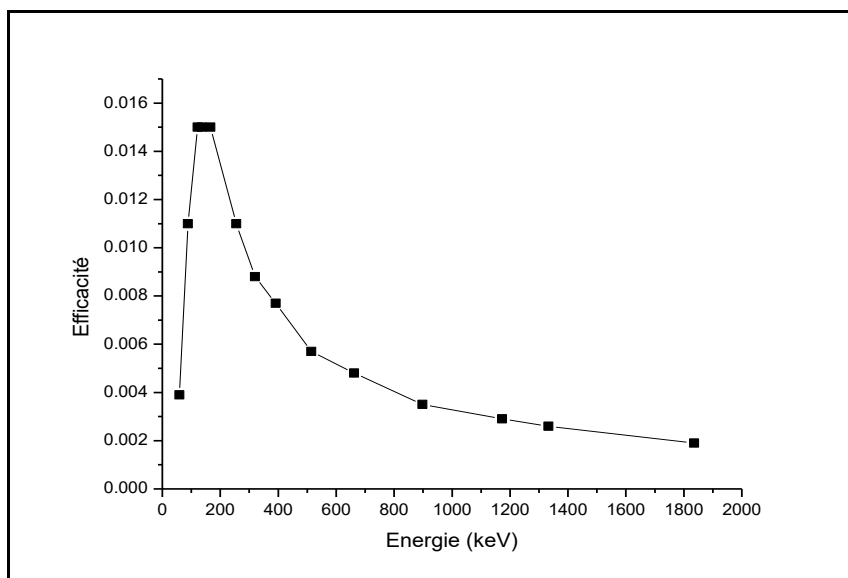


Figure 38: étalonnage en efficacité visualisé par le logiciel origine pro 8 (H Debagh)

V. Mesure des activités spécifiques des échantillons

Le tableau résume l'ensemble des radionucléides des familles naturelles mesurables par la technique de spectrométrie gamma

Famille	Nom de nucléide	Energie (keV)	Emission (%)
^{238}U	^{234}Th	63.3	4.8
	^{226}Ra	186.2	3.59
	^{214}Pb	839	0.59
	^{214}Bi	2118	1.14
	^{210}Pb	46.5	4.10
^{232}Th	^{228}Ac	911.2	25.8
	^{228}Th	84.4	1.22
	^{224}Ra	241	4.10
	^{212}Pb	238.6	43.3
	^{212}Bi	727.3	6.58
^{235}U	^{235}U	185.7	57.28
	^{227}Th	230	12.30
	^{223}Ra	269.5	13.70
^{40}K	^{40}K	1460.8	10.72

Tableau 11: caractéristiques des radionucléides identifiés.

Radioéléments	Activité (Bq/l)H KH	Activité (Bq/l)H Debagh
^{40}K	3.4 ± 3.4	12.3 ± 12.3
^{226}Ra	2.7 ± 2.7	12.1 ± 12.1
^{228}Ac	87.4 ± 0.7	68.4 ± 2.1
^{228}Th	4.6 ± 4.6	28.9 ± 28.9
^{224}Ra	2.5 ± 2.5	7.2 ± 7.2
^{212}Pb	3.3 ± 0.3	8.6 ± 0.7
^{212}Bi	102.1 ± 2.2	264 ± 6.3

Tableau 12: Activités spécifiques mesurées pour les deux échantillons par spectrométrie γ .❖ Calcul de l'activité de ^{232}Th :

Radionucléides	Activité (Bq/l) H Khenchela	Activité (Bq/l)H Debagh
^{228}Ac	87.4 ± 0.7	68.4 ± 2.1
^{212}Pb	3.3 ± 0.3	8.6 ± 0.7
^{228}Th	4.6 ± 4.6	28.9 ± 28.9
^{212}Bi	102.1 ± 2.2	264 ± 6.3
^{224}Ra	2.5 ± 2.5	7.2 ± 7.2
^{232}Th	40 ± 2	75.4 ± 9

Tableau 13: L'activité spécifique du ^{232}Th

• L'activité spécifique de ^{232}Th a été calculée comme la moyenne pondérée de l'activité déterminée en utilisant les raies d'énergie caractéristiques des radioéléments de la famille radioactive naturelle (^{232}Th).

○ Pour hammam khenchela

- ^{228}Ac : 204 keV (0.11%)
- ^{212}Pb : 300.1 keV (3.28%)
- ^{228}Th : 84.4 keV (1.22%)
- ^{212}Bi : 952.1 keV (0.17%)
- ^{224}Ra : 241 keV (4.10%)

○ Pour hammam Debagh

- ^{228}Ac : 726.9 keV (0.62%)
- ^{212}Pb : 238.6 keV (6.10%)
- ^{228}Th : 84.4 keV (1.22%)
- ^{212}Bi : 952.1 keV (0.17%)
- ^{224}Ra : 241 keV (4.10%)

• L'activité spécifique de ^{40}K a été déterminée directement par la mesure de la raie d'énergie caractéristique 1460,8 keV (10,72 %).

- L'activité spécifique de ^{224}Ra a été déterminée directement par la mesure de la raie d'énergie caractéristique 186.2 keV (3.59%).

❖ **Comparaison des activités spécifique des ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K dans les 2 échantillons :**

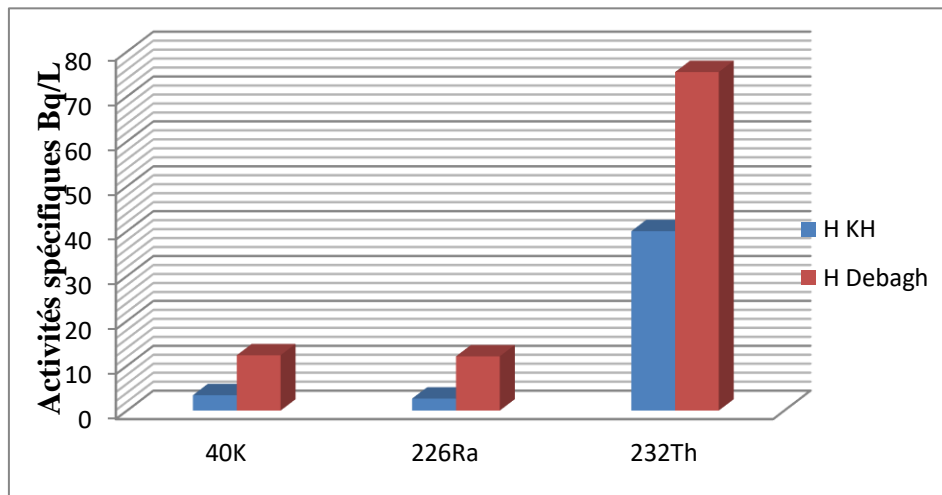


Figure 39 : les activités spécifiques des ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K dans les 2 échantillons.

VI. Estimation des doses

1. Débit de Dose Absorbée

Le débit de dose absorbée pour les deux échantillons a été calculé à partir de la formule (1-11)

2. Dose efficace annuelle E

La dose efficace annuelle a été évaluée en utilisant l'expression (1-12)

3. L'évaluation des effets radiologiques

Pour évaluer les effets radiologiques de ces sources thermales nous allons calculer certaines valeurs :

3-1 Indice de risque externe H_{ex}

L'indice du risque externe est défini et calculé par la relation (1-13)

3-2 Indice de risque interne H_{in}

En plus du risque externe, le radon et ses produits de courte durée sont également dangereux aux organes respiratoires. L'exposition interne au radon et à ses descendants est quantifiée par l'indice du risque interne H_{in} , qui est défini et calculé par la relation (1-14)

4. Indice représentatif de niveau I_γ

un indice utilisé pour estimer le niveau de risque des rayonnements γ associés aux radionucléides naturels, I_γ est défini et calculé par la relation (1-15)

5. Activité de Radium équivalent Ra_{eq}

Ra_{eq} est défini et calculé par la relation (1-16)

Les résultats des doses calculées et les valeurs de risques sont regroupés dans le tableau suivant :

	Hamam Khenchela	Hamam Debagh	Les Norme internationales
ADR (nGy/h)	26 ± 2.6	51.7 ± 11.6	59
E (mSv)	0.03 ± 0.003	0.06 ± 0.01	1
H_{ex}	0.16 ± 0.02	0.3 ± 0.07	1
H_{in}	0.17 ± 0.02	0.4 ± 0.1	1
I_γ	0.4 ± 0.04	0.8 ± 0.2	1
Ra_{eq}	60 ± 5.8	121 ± 26	370

Tableau 14: Les résultats des Paramètres radiologiques et dose absorbée

VII. Résultats et discussion

Cette étude a donc permis de déterminer l'activité des radioéléments naturels dans deux sources thermales, qui appartiennent aux chaînes radioactives naturelles de l'uranium-238 (^{238}U) et du thorium-232 (^{232}Th) avec des concentrations variées.

Les valeurs maximales de l'activité ont été observées pour l'Actinium-228 (^{228}Ac) et le bismuth-212 (^{212}Bi) pour les deux sources respectivement 87.4 Bq/l 68.4 Bq/l avec une moyenne, 102.1 Bq/l 264 Bq/l , avec une moyenne 77.9 Bq/l . Le thorium-232 (^{232}Th) avec une valeur maximale 28.9 Bq/l , le Radium-226 (^{226}Ra) $12,08 \text{ Bq/l}$ et le potassium-40 (^{40}K) est 12.3 Bq/l dans l'eau thermale Debagh. (Tableau 12)

D'après la figure 39 on voit que la variation des activités spécifiques des trois radionucléides ^{40}K , ^{226}Ra et ^{232}Th est la suivante :

L'activité spécifique du Radium-226 (^{226}Ra) mesurée au hammam Debagh 12.1 Bq/l est supérieure 4 fois à celle du Radium-226 (^{226}Ra) au hammam Khenchela 2.7 Bq/l, avec une moyenne 7.4 Bq/l.

Il est également noté que l'activité spécifique du ^{40}K au hammam Debagh (12 Bq/l) est supérieure à celle du ^{40}K au hammam Khenchla 3.4 Bq/l. Pour le ^{232}Th on voit que l'activité spécifique est élevée pour les deux sources mais plus élevée au hammam Debagh 75.4 Bq/l que l'activité au hammam Khenchela 40 Bq/l.

Pour évaluer les effets radiologiques de ces deux échantillons nous avons calculé les Paramètres radiologiques, tels l'activité équivalente du Radium (R_{eq}), les indices de risque externe et interne (H_{ex} , H_{in}), l'indice représentatif de niveau (I_{γ}) et Les doses reçues par le public sont calculées à partir des valeurs des activités spécifiques de ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K . Les résultats sont représentés dans le Tableau 14.

La dose efficace annuelle calculée pour les deux échantillons Hammam Khenchla et Hammam Debagh variait de 0.03 à 0.06 mSv/an avec une moyenne (0.045 mSv/an)

L'indice du risque externe et interne calculées pour les deux échantillons sont respectivement au hammam Debagh 0.3 et 0.4 et au hammam Khenchla 0.16 et 0.17 avec des moyennes 0.23 et 0.29.

L'indice représentatif de niveau I_{γ} est 0.8 au hammam Debagh et 0.4 au hammam Khenchla avec une moyenne 0.6.

Le dernier paramètre qu'on a calculé est l'activité de Radium équivalent R_{eq} , Pour hammam Debagh on a trouvé une activité de 121 Bq/l et 60 Bq/l au hammam Khenchela, avec une moyenne 90.5 Bq/l.

Les valeurs trouvées pour ces paramètres pour les deux échantillons ne dépassent pas les valeurs admissibles par le Comité scientifique des Nations Unies dans l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR).

Conclusion

L'objectif de ce travail est d'étudier et de donner une évaluation de taux de la radioactivité naturelle de deux stations thermales en Algérie, il s'agit de hammam Khenchla et hammam Debagh Guelma, et la possibilité d'estimer leur risque sanitaire, en utilisant la technique de spectrométrie gamma.

Cette dernière a été utilisée pour déterminer la concentration de la radioactivité naturelle de ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U et ^{226}Ra dans les deux stations thermiques. Nous avons constaté à partir des spectres obtenues des deux échantillons, la présence des éléments des trois familles radioactives ^{238}U , ^{232}Th , et ^{235}U et l'élément ^{40}K .

Les activités spécifiques de ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K des eaux de hammam Debagh étaient (12.1 ± 12.1) Bq/l, (75.4 ± 9) Bq/l et (12.3 ± 12.3) Bq/l respectivement, et celles de hammam Khenchla, (2.7 ± 2.7) Bq/l (40 ± 2) Bq/l et (3.4 ± 3.4) Bq/l respectivement. Nous constatons que l'activité du ^{232}Th était la plus élevée dans les eaux des deux stations thermales, Les différences observées de l'activité spécifique des radioéléments ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K entre les deux stations sont dues à des variations locales de la formation rocheuse, et ainsi que aux caractéristiques géologiques de chaque zone.

Afin d'évaluer les risques radiologiques, plusieurs paramètres sont estimés, tels l'activité équivalente du Radium (Ra_{eq}), les indices de risque externe et interne (H_{ex} , H_{in}), l'indice représentatif de niveau (I_{γ}), suivi le calcul du débit de dose efficace annuelle E. ces paramètres sont calculées à partir des valeurs des activités spécifiques de ^{226}Ra , ^{232}Th et ^{40}K et comparés aux valeurs médianes mondiales correspondantes.

Les débits de dose efficace annuelle reçus par un individu (0.03 ± 0.003) mSv.an⁻¹ et (0.06 ± 0.01) mSv.an⁻¹ sont inférieurs à la valeur limite supérieure mondiale de 1 mSv.an⁻¹

Pour les indices de risques H_{ex} , H_{in} et I_{γ} toutes les valeurs sont en accord avec les limites (inférieur à l'unité). Les indices équivalents du radium calculés pour les deux stations thermales sont inférieurs à la valeur de 370 Bq/kg préconisée par le comité scientifique des Nations Unies (UNSCEAR) pour une exploitation et utilisation en toute sécurité.

Toutes les valeurs trouvées pour ces paramètres ne dépassent pas les valeurs admissibles par l'UNSCEAR dans l'étude des effets des rayonnements ionisants. Ça signifie que l'eau de la zone d'étude ne présente aucun risque grave pour la santé de la population

Conclusion

environnementale et considérée comme une utilisation sûre de l'eau pour l'irrigation ou la boisson, thermalisme et d'autres utilisations pour la population.

- [1] Kebir. H. Concentrations de l'uranium-238 dans les eaux thermales à l'est Algérien, thèse pour obtenir de diplôme de doctorat, université Ferhat Abbas- Sétif, soutenue novembre 2017.
- [2] Athamena. M. Etude des ressources thermales de l'ensemble allochtone sud sétifien, thèse de magister université de Batna 2006.
- [3] BOUHILA Gh, Étude de la répartition de radionucléides présents dans les lacs de barrages artificiels. Applications : Barrage de Beni Haroun, thèse de doctorat de l'université frères MentouriConstantine1, Spécialité physique des rayonnements et application, soutenue le 22 avril 2018.
- [4] Ben Tekaya. M. Préparation d'un matériau de référence pour la mesure de la radioactivité naturelle, mémoire de mastère de chimie, physique, CNSTN, soutenue janvier 2010.
- [5] Institut de radioprotection et de sureté nucléaire, IRSN 2015, exposition de la population française aux rayonnements ionisants, p8.
- [6] institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, IRSN 2011, Gestion des sites potentiellement pollués par des substances radioactives.
- [7] Lépy, M.-C., Pierre, S., Van Ammel, R., &Marouli, M. (2017). Photon emission intensities in the decay of U-235. *Applied Radiation and Isotopes*, 126, 150–153.
- [8] Lakehal. Ch. Mesures qualitatives et quantitatives des éléments radioactifs naturels présents dans échantillons l'environnement par spectrométriey, présente pour obtenir le diplôme de magister, université Mentouri Constantine.
- [9] 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.
- [10] Risler. J. J. La radioactivité des eaux thermo-minérales, service géologique régional massif central, 1974, pp1.
- [11] Institut de radioprotection et de sureté nucléaire, IRSN 2007, uranium naturel et environnement, fiche radionucléide.

- [12] Belafrites Abdelfettah cours de Radioprotection 2020.
- [13] Cressier. D. Synthèse et évaluation 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.
- [14] R. Ravisankar et al. "Assessments of radioactivity concentration of natural radionuclides and radiological hazard indices in sediment samples from the East coast of Tamilnadu, India with statistical approach", *Mar. Pollut. Bull.* 97, 419-430 (2015).
- [15] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and Effects of Ionizing Radiation, Report to the General Assembly, (New York: United Nation) (2000).
- [16] J. Beretka, P. J. Mathew, "Natural radioactivity of Australian building materials industrial wastes and by-products". *Health Phys.* 48, 87-95 (1985).
- [17] Z. Morsy, M. Abd El-Wahab, N. El_Faramawy, "Determination of natural radioactive elements in Abo Zaabal, Egypt by means of gamma spectroscopy", *Ann. Nucl. Energy.* 44, 8-11 (2012).
- [18] NEA-OECD, "Exposure to radiation from natural Radioactivity in building materials"; Report by NEA of experts of the Nuclear Energy Agency. OECD, Paris, France (1979).
- [19] E. O. Agbalagba, G. O. Avwiri, Y. E. Chad-Umoreh, "γ -Spectroscopy measurement of natural radioactivity and assessment of radiation hazard indices in soil samples from oil fields environment of Delta State, Nigeria". *J. Environ. Radioactiv.* 109, 64-70 (2012).
- [20] Dominique Corbin. Etude de l'oxydation et de la tenue d'élastomères irradiés conséquences sur l'intégrité des câbles électriques lors d'une situation accidentelle d'un réacteur à eau pressurisée. Physique [physics]. Université de Caen, 2001. Français. tel-00003430

- [21] Abdellatif Nachab. Etudes expérimentales et modélisations Monte Carlo de l'auto-absorption gamma et de la dosimétrie active par capteurs CMOS. Instrumentations et Détecteurs [physics.ins-det]. Université Louis Pasteur - Strasbourg I, 2003. Français.
- [22] Boquet, Arnaud. Physique nucléaire et radioprotection: à l'usage de l'environnement nucléaire. France: EDP sciences, 2019.
- [23] Claude Le Sech, Christian Ngô, Physique nucléaire ; des quarks aux applications ; cours et exercices corrigés (2E Édition), Dunod, 4 juin 2014
- [24] Virginie Huber Gresser, Pathologie professionnelle liée aux rayonnements ionisants, thèse de docteur en médecine de l'université de Henri Poincaré Nancy, soutenue le 22 juin 2004
- [25] Cécile Dubois, Approche intégrée des dommages des rayonnements ionisants chez *Caenorhabditis elegans* : de l'ADN aux protéines, Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'université de Montpellier en Biologie Santé, soutenue Le 28 Novembre 2017.
- [26] M. Pierre Nachon, Mise en place d'un outil informatique d'étude de poste dosimétrique et application à la Tomographie par Emission de Positron (T.E.P) dans un service de médecine nucléaire du CHRU de Lille, mémoire pour le diplôme d'études spécialisées de pharmacie hospitalière et des collectivités, soutenue le 30 juin 2017.
- [27] Lucie Fournier. Effets sanitaires d'une exposition chronique à de faibles doses de rayonnements ionisants : contribution à l'estimation des risques radio-induits de cancers dans une cohorte française de travailleurs du nucléaire. Santé publique et épidémiologie. Université Paris-Saclay, 2017. Français.
- [28] Jimonet, Christine and Métivier, Henri. Principes de radioprotection - Réglementation, Les Ulis: EDP Sciences, 2021.
- [29] YoubbaOuldsalem, étude expérimentale et modélisation Monte Carlo des grandeurs opérationnelles en métrologie des rayonnements ionisants, application à la dosimétrie neutrons par radio photoluminescence, thèse de doctorat de l'université de Strasbourg, spécialité physique, soutenue le 09 septembre 2014

- [30] D. Demir, M. Eroğlu and A. Turşucu, “Studying of characteristics of the HPGe detector for radioactivity measurements”, JINST. 8, 1-11(2013)
- [31] Olivier Caudrelier, interaction rayonnement matière, POLY-PREPAS Centre de Préparation aux Concours Paramédicaux -Sections : L1 Santé
- [32] Jean-Marie Mussini. Mesures expérimentales et simulation Monte Carlo de la fonction de réponse d'un détecteur Si(Li) : application à l'analyse quantitative multi-élémentaire par XRF et PIXE. Physique Nucléaire Théorique [nucl-th]. Université de Strasbourg, 2009. Français
- [33] Pierre Leconte. Développement et optimisation de techniques de mesure par spectrométrie gamma. Maîtrise et réduction des incertitudes associées. Physique Nucléaire Théorique [nucl-th]. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2006. Français. NNT : 2006CLF21684. tel-00703303
- [34] M. Hugues Paradis, Développement de la mesure par spectrométrie en coïncidence, thèse de doctorat de l'université Paris-Saclay préparé a l'université Paris Sud XI, spécialité imagerie médicale et radioactivité, soutenue le 16 septembre 2016
- [35] Cébastien GUEMBOU, Etude des échantillons environnementaux par Spectrométrie gamma : cas des sols des campus I et II de l'Université de Douala, mémoire de master spécialité physique de la matière et du rayonnement, l'université de Douala, 2013
- [36] KNOLL.G. F, Radiation detection and measurement, Second edition, John Wiley&Sons. 1989.
- [37] Lyoussi A., Mesure nucléaire non destructive dans le cycle du combustible, Techniques de l'Ingénieur, 2005.
- [38] G. GILMORE, J. HEMINGWAY, « Practical Gamma-Ray Spectrometry », Editions John Wiley & Sons, 1995.
- [39] P. CHEVALLIER, « Principaux détecteurs utilisés en spectrométrie gamma et X et électronique associée », Cours INSTN « Perfectionnement en spectrométrie gamma », Réf. P049/03/v1, juin 2004.

- [40] CETAMA, « Spectrométrie gamma appliqué aux échantillons de l'environnement », Editions Tec & Doc, 2002.
- [41] Courtine, F., Etalonnage d'un spectromètre gamma en vue de la mesure de la radioactivité naturelle, Mesures expérimentales et modélisation partechniques de Monte-Carlo. Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal France, soutenu mars 2007.
- [42] 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.
- [43] Mouchara Nabil, Impacts des tachées de barrage Hammam Debagh sur la qualité des eaux de la vallée de la seybose dans sa partie amont (Nord-est Algérien), présentée en vue de l'obtention du diplôme de Magister en Hydrogéologie, Université de Annaba 2009.
- [44] Bouaicha Fouad, Le géo thermalisme de la région de Guelma, présenté pour obtenir le diplôme de Doctorat, Université de Constantine 1, 2018.
- [45] tourisme magazine, escale, Khenchela, Hammam Essalihine, Des milliers de curistes.