



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**UNIVERSITÉ ABOU-BEKR BELKAID - TLEMCEM**

# THÈSE LMD

Présentée à la

FACULTE DES SCIENCES – DÉPARTEMENT DE CHIMIE

Pour l'obtention du diplôme de :

**DOCTORAT**

Spécialité : Chimie Physique et Analytique

Par

**BENAISSA Khalida épouse BENTEYEB**

Sur le thème

---

*Evaluation du risque radiologique dans les aliments importés  
par la spectrométrie Gamma  
avec le détecteur NaI(Tl) 2\*2 pouce*

---

Soutenue publiquement le 02 /10 / 2021 à Tlemcen devant le jury composé de :

Pr. BOUCHAOUR Tewfik	Professeur	Université de Tlemcen	Président
Pr. KADUM Abdulerrahman	Professeur	Université de Tlemcen	Directeur
Pr. DAHMANI Benamar	Professeur	Université de Tlemcen	Co-encadreur
Pr. BENAMAR Mohamed El Amine	Professeur	Université de Tamenrasset	Examinateur
Dr HAMIDATOU Lylia	Chercheur Expert	DR CRN Birine	Examinatrice

*Laboratoire de Recherche : Spectrochimie et Pharmacologie Structurale (LSPS)  
BP 119, 13000 Tlemcen - Algérie*

# **REMERCIEMENTS**

## Remerciements

En tout premier lieu, je remercie le bon Dieu pour toutes ces bénédictions qu'il m'a offertes, ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés.

Le travail de thèse présenté dans ce manuscrit a été réalisé dans le Laboratoire de Recherche de Spectrochimie et pharmacologie structurale (LSPS), du département de chimie de la faculté des sciences de l'Université de Tlemcen.

J'adresse ma profonde reconnaissance et ma gratitude à mon directeur de thèse monsieur KADUM Abdurrahmane, Professeur à l'Université de Tlemcen, pour la confiance qu'il m'a accordée en acceptant d'encadrer ce travail doctoral, Il a su me guider dans un sujet riche tout en m'accordant ses compétences et son enthousiasme scientifiques, ont été des sources permanentes de soutien et de motivation.

Je souhaite exprimer aussi ma plus sincère reconnaissance à mon co-directeur de thèse monsieur Benamar DAHMANI, professeur à l'université de Tlemcen et directeur de laboratoire de recherche de Spectrochimie et pharmacologie structurale (LSPS), qui a dirigé mon travail et pour m'avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, sa constante disponibilité et sa patience.

Je remercie monsieur BOUCHAOUR Tewfik, professeur à l'université de Tlemcen qui m'a fait l'honneur de présider le jury de ce travail.

J'adresse l'expression de ma gratitude et respect aux membres de jury monsieur BENAMAR Mohamed El Amine, professeur à l'université de Tamanrasset, et madame HAMIDATOU Lyliya chercheur expert au Centre de Recherche Nucléaire de Birine, pour m'avoir fait l'honneur de consacrer de leur temps précieux à la lecture de ce manuscrit et qui ont bien voulu juger et critiquer ce travail.

Je tiens à adresser mes vifs remerciements à Wissam et Hamdi pour leur aide précieux, leurs conseils.

Un immense merci à Kawther, Nadia, tous mes collègues et membres de laboratoire LSPS, leur bonne humeur à créer un cadre de travail agréable.

Je dédie ce travail à :

*Mes chers parents, en témoignage de ma reconnaissance pour leur patience, leur sacrifice et leur soutien tout au long de mes études, je vous remercie énormément.*

*La seconde de maman, tante Fatna, pour tout ce qu'elle a fait pour moi.*

*Mes sœurs : Fatima Zohra, Amel, Chaimaa, Rihem et mon frère Abdelhak, pour leur soutien permanent.*

*Mon mari Abdelwahed pour la compréhension dont il a fait preuve et son soutien dans des moments que j'avoue parfois très difficiles, et ma princesse, douceur de ma vie, Norhen Ranim.*

*Toute ma famille, ma belle-famille, mes proches et mes amis (es).*

*Khalida BENAÏSSA*

يشهد اليوم	النوية	يتسبب
للبيئة والمحيطات،	طبيعية. وتشير جميع	سيزيوم 137 وغيرها من
النويدات	تقدير قيمها مهم .	
الجديدة	الطبيعية فيما يتعلق	اليورانيوم 238
والبوتاسيوم 40	إليها النويدات	الرئيسية ( سيزيوم 137 )
النوية .		
هذه	الطبيعي	به
الطبيعي	قياس النويدات	البئر يورديد
يتميز		
تحليل هذه العينات	تقنية قياس طيف	أطياف العينة وقياسها
قياس لهذا	48	24
	24)	لتحليل العينة).
بأكملها؛	التوهين.	
عليها	القياس	النويدات
9 بيكريل /	11.1-0.83 بيكريل /	0.52-
2.73-0.32 بيكريل /	11.84-0.37 بيكريل /	40
للعينات	أفريقيا وأستراليا،	الثوريوم 232 والبوتاسيوم 40
للبيكريل /	2.09-0.36 بيكريل /	25.61-0.13 بيكريل
للبيكريل /	12.31-0.02 بيكريل /	للبيكريل /
4.27-0.053 بيكريل /	40.08-0.22 بيكريل /	40
للبيكريل /	17.05-0.12 بيكريل /	الثوريوم 238 والبوتاسيوم 40
للبيكريل /	8.6-0.28 بيكريل /	55.05-0.07 بيكريل /
الثوريوم 232 والبوتاسيوم 40	للبيكريل /	تقدير الإشعاعية لعينات
هذه.		
التحليل،	بكتير	استهلاك هذه
يتم بأمان	قيمة التخليص	
قيود.		

المفتاحية: النويدات، الغذائية، الإشعاعية.

## ***Résumé***

Aujourd'hui, le monde assiste au pic de radioactivité résultant des essais nucléaires et des explosions de réacteurs, qui provoquent une pollution nucléaire de l'environnement et des océans, en plus de la présence de radiations naturelles. Toutes les études indiquent que le  $^{137}\text{Cs}$  et d'autres radionucléides sont présents dans les denrées alimentaires et que l'estimation de leurs valeurs est donc très importante.

Les nouvelles études s'intéressent à la détermination des activités des radionucléides naturels par rapport aux principaux éléments tels que  $^{238}\text{U}$ , et le  $^{232}\text{Th}$ , ainsi que le  $^{40}\text{K}$ , auxquels on peut ajouter les radionucléides artificiels (tel que  $^{137}\text{Cs}$ ) résultant de divers accidents nucléaires.

Cette étude a pour but la détermination du niveau de radioactivité naturelle et le risque radiologique associé causé par la radioactivité naturelle dans les denrées alimentaires importées en Algérie. Les radionucléides ont été mesurés à l'aide de détecteur de puits NaI (TI) 2x2 (Canberra Inc.), possédant un rendement lumineux élevé et une meilleure efficacité.

Ces échantillons ont été analysés à l'aide de la technique de spectrométrie gamma. Les spectres d'échantillons ont été collectés et mesurés à l'aide d'un analyseur multicanal (MCA) connecté à un système de mesures à cet effet ; en puits avec un temps d'analyse de 48 heures (24 heures pour le fond et 24 heures pour l'échantillon).

L'efficacité a été calculée dans toute la gamme d'énergie ; en utilisant les coefficients d'atténuation.

Les résultats obtenus nous ont permis de révéler la quantification des radionucléides avec des gammes d'activités variées: 0,52-9Bq/kg, 0,32-2,73Bq/kg, et 0,83-11,1 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Afrique-Australie, 0,37-11,84Bq/kg, 0,36-2,09Bq/kg, et 0,13-25,61 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Amérique, 0,02-12,31Bq/kg, 0,053-4,27Bq/kg, et 0,22-40,08 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Europe, 0,12-17,05Bq/kg, 0,28-8,6Bq/kg, et 0,07-55,05 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Asie. De plus, les paramètres radiologiques de ces échantillons d'aliments ont été estimés.

Après l'analyse, il est devenu clair que ces valeurs étaient bien inférieures à la valeur d'autorisation internationale. Ainsi, la consommation de ces marques des denrées alimentaires se fait en toute sécurité sans aucune restriction.

**Mots clés :** Radionucléides, Activité Gamma, Rayons Gamma, Denrées Alimentaires, Risques Radiologique.

## *Abstract*

The world is now witnessing the peak of radioactivity resulting from nuclear tests and reactor explosions, which cause nuclear pollution to the environment and oceans, in addition to the presence of natural radiation. All studies report  $^{137}\text{Cs}$  and other radionuclides in foodstuffs, so estimating their values is very important.

The new studies are interested in determination of the activities of natural radionuclides in relative to main elements such as  $^{238}\text{U}$ , and  $^{232}\text{Th}$ , as well as  $^{40}\text{K}$ , to which can be added artificial radionuclides (such as  $^{137}\text{Cs}$ ) resulting from various nuclear accidents.

The purpose of this study is to determine the level of natural radioactivity and the associated radiological risk caused by natural radioactivity in foodstuffs imported into Algeria. Radionuclides were measured using NaI (TI) 2x2 well detectors (Canberra Inc.), which has a high light output and better efficiency.

These samples were analyzed using the gamma spectrometry technique. The sample spectra were collected and measured using a multichannel analyzer (MCA) connected to a measurement system for this purpose; in wells with an analysis time of 48 hours (24 hours for the bottom and 24 hours for the analysis of the sample).

Efficiency has been calculated across the entire energy range; using the attenuation coefficients.

The results obtained allowed us to reveal the quantification of radionuclides with varying ranges of activities: 0.52-9Bq/kg, 0.32-2.73Bq/kg, and 0.83-11.1 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for the samples from Africa-Australia , , 0.37-11.84Bq/kg, 0.36-2.09Bq/kg, and 0.13-25.61 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for samples from America, 0.02-12.31Bq/kg, 0.053-4.27Bq/kg, and 0.22-40.08 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for samples from Europe, 0.12-17.05Bq/kg, 0.28-8.6Bq/kg, and 0.07-55.05 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for samples from Asia. In addition, the radiological parameters of these food samples were estimated.

After the analysis, it became clear that these values were well below the international clearance value. Thus, consumption of these brands of food is done safely without any restriction.

**Keywords:** Radionuclides, Activity Gamma, Gamma Rays, Foodstuffs, Radiological Risks.

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I. 1:</b> Vallée de stabilité des noyaux .....	6
<b>Figure I. 2:</b> Rayonnement ionisant et non ionisant.....	8
<b>Figure I. 3:</b> Rayonnements ionisants : particules alpha, particules bêta et gamma .....	11
<b>Figure I. 4:</b> Schéma de chaîne de désintégration de $^{238}\text{U}$ .....	13
<b>Figure I. 5:</b> Schéma de chaîne de désintégration de $^{232}\text{Th}$ .....	14
<b>Figure I. 6:</b> Schéma de désintégration de $^{40}\text{K}$ .....	14
<b>Figure I. 7:</b> Effet biologique de rayonnement ionisant .....	20
<b>Figure I. 8:</b> Équilibre séculaire ( $T_1 = T_2$ ) .....	23
<b>Figure I. 9:</b> Equilibre de régime .....	23
<b>Figure II. 1:</b> Effet photoélectrique .....	26
<b>Figure II. 2:</b> Effet Compton.....	26
<b>Figure II. 3:</b> Effet production de pair. ....	27
<b>Figure II. 4:</b> Types d'interaction prépondérante suivant l'énergie du photon et le numéro atomique $Z$ .....	28
<b>Figure II. 5:</b> Structure des bandes.....	29
<b>Figure II. 6:</b> Principe de fonctionnement d'un détecteur semi-conducteur .....	30
<b>Figure II. 7:</b> Structure des bandes d'un scintillateur .....	32
<b>Figure II. 8:</b> Schéma de tube Photomultiplicateur(PMT).....	33
<b>Figure II. 9:</b> Un cristal d'iodure de sodium dopé au thallium .....	34
<b>Figure II. 10:</b> Assemblage d'un détecteur de NaI(Tl). ....	34
<b>Figure II. 11:</b> Définition de la résolution pour un pic gaussien.....	40
<b>Figure III. 1:</b> Dispositif expérimental.....	47
<b>Figure III. 2:</b> Courbe d'étalonnage en énergie .....	49
<b>Figure III. 3:</b> Efficacité du détecteur NaI (Tl) 2x2.....	50
<b>Figure III. 4:</b> Spectre de bruit de fond (LSPS). ....	52
<b>Figure III. 5:</b> Exemple de spectre d'échantillon d'aliment .....	53
<b>Figure IV. 1:</b> Activités $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{137}\text{Cs}$ avec leur incertitude pour 12 échantillons de lait en poudre pour nourrissons.....	60
<b>Figure IV. 2:</b> Activités $^{40}\text{K}$ avec incertitude pour 12 échantillons de lait en poudre pour nourrissons .....	61

<b>Figure IV. 3:</b> L'apport quotidien d'activité des radionucléides avec leur incertitude via la consommation de lait infantile en poudre .....	65
<b>Figure IV. 4:</b> L'activité moyenne de $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ , et $^{137}\text{Cs}$ dans les échantillons de céréales. ....	68
<b>Figure IV. 5:</b> Comparaison de la dose efficace totale de l'ingestion de ces radionucléides dans des échantillons de céréales avec celles des autres pays du monde.....	71
<b>Figure IV. 6:</b> L'apport quotidien d'activité des radionucléides avec leur incertitude via la consommation des céréales (pCi) .....	71
<b>Figure IV. 7:</b> Activité spécifique moyenne de $^{238}\text{U}$ des échantillons étudiés dans les unités deBq/kg. ....	73
<b>Figure IV. 8:</b> Activité spécifique moyenne de $^{232}\text{Th}$ des échantillons étudiés dans les unités deBq/kg. ....	74
<b>Figure IV. 9:</b> Activité spécifique moyenne de $^{40}\text{K}$ des échantillons étudiés dans les unités deBq/kg. ....	74
<b>Figure IV. 10:</b> activité de $^{238}\text{U}$ des échantillons étudiés dans l'unité de ppm .....	75
<b>Figure IV. 11:</b> activité de $^{238}\text{Th}$ des échantillons étudiés dans l'unité de ppm.....	76
<b>Figure IV. 12:</b> activité de $^{40}\text{K}$ des échantillons étudiés dans l'unité de ppm .....	76
<b>Figure IV. 13:</b> L'indice de radium équivalent (Raeq) des échantillons étudiés .....	77
<b>Figure IV. 14:</b> L'indice de danger (HI) des échantillons étudiés .....	78
<b>Figure IV. 15:</b> Les activités des radionucléides naturels $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ dans les légumes et les fruits étudiés. ....	79
<b>Figure IV. 16:</b> les apports quotidiens de $^{226}\text{Ra}$ , $^{228}\text{Ra}$ et $^{40}\text{K}$ dans les fruits et les légumes étudiés. ....	82
<b>Figure IV. 17:</b> les apports annuels de $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ , et $^{40}\text{K}$ dans les fruits et les légumes étudiés. ....	83
<b>Figure IV. 18:</b> Dose d'ingestion d'adultes provenant de la consommation de radionucléides $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ , fruits et légumes. ....	84
<b>Figure IV. 19:</b> Corrélation entre les activités de ( $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ ) pour chaque continent.....	92
<b>Figure IV. 20:</b> Corrélation entre activités de les ( $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ ) pour chaque continent.....	92
<b>Figure IV. 21:</b> Corrélation entre les activités de ( $^{226}\text{Ra}$ , $^{40}\text{K}$ ) pour chaque continent. ....	93

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I. 1:</b> Caractéristiques radiologiques de quelque nucléides cosmogéniques .....	12
<b>Tableau I. 2:</b> Activité des radionucléides dans les engrais (Bq/kg).....	17
<b>Tableau I. 3:</b> Activités spécifiques des radionucléides naturels dans l'alimentation dans différents pays.....	18
<b>Tableau II. 1:</b> Caractéristiques des principaux semi-conducteurs .....	30
<b>Tableau II. 2:</b> Coefficients d'atténuation linéaire et de masse de NaI et Al .....	38
<b>Tableau III 1:</b> Liste des échantillons .....	43
<b>Tableau III 2:</b> Numéros de canaux correspondants aux énergies gammas du spectre de la source $^{152}\text{Eu}$ .....	48
<b>Tableau III 3:</b> Efficacité énergétique des radionucléides du détecteur NaI (TI) 2x2 puits (Canberra Inc.) .....	51
<b>Tableau IV 1:</b> Les activités des radionucléides dans le lait infantile en (Bq/kg) .....	59
<b>Tableau IV 2:</b> Activités spécifiques de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ dans le lait en poudre pour certains pays et ses valeurs dans les pays d'où il est importé (Bq/kg). .....	62
<b>Tableau IV 3:</b> Coefficients de dose efficace pour l'ingestion de radionucléides chez les nourrissons (Sv / Bq) .....	63
<b>Tableau IV 4:</b> Dose efficace annuelle dans le lait infantile en poudre pour ingestion ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{an}^{-1}$ ) .....	63
<b>Tableau IV 5:</b> Dose d'ingestion annuelle due à l'apport de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ , $^{40}\text{K}$ et $^{137}\text{Cs}$ ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{an}^{-1}$ ) dans les échantillons de lait en poudre pour nourrissons pour chaque catégorie d'âge par rapport aux données publiées dans différents pays .....	64
<b>Tableau IV 6:</b> Évaluation des risques dus aux radionucléides présents dans les échantillons de lait en poudre pour nourrissons.....	66
<b>Tableau IV 7:</b> Activités spécifiques des échantillons de céréales enBq/kg. ....	67
<b>Tableau IV 8:</b> Activités de radionucléides dans les céréales dans différents pays (Bq.kg <sup>-1</sup> ). .....	69
<b>Tableau IV 9:</b> Facteurs de conversion pour le nombre de doses efficaces par ingestion de radionucléides (Sv / Bq) et la dose efficace annuelle totale D ( $\mu\text{Sv}\cdot\text{an}^{-1}$ ). .....	70
<b>Tableau IV 10:</b> Évaluation des risques dus aux radionucléides présents dans les échantillons de céréales pour différents âges. ....	72
<b>Tableau IV 11:</b> Les activités des radionucléides naturels $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ présents dans les échantillons .....	73
<b>Tableau IV 12:</b> Les activités des radionucléides naturels $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ dans les légumes et les fruits.....	80

---

<b>Tableau IV 13:</b> L'activité mesurée, A (Bq/kg) dans les légumes et les fruits par rapport aux valeurs rapportées précédentes .....	81
<b>Tableau IV 14:</b> Activité de activité mesurée de $^{238}\text{U}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ dans certains aliments (Bq/kg) .....	85
<b>Tableau IV 15:</b> Indice équivalent de radium et indice de danger des échantillons étudiés....	87
<b>Tableau IV 16:</b> Les activités des radionucléides mesurés, et les paramètres radiologiques des échantillons étudiés pour chaque continent. ....	88
<b>Tableau IV 17:</b> Statistiques descriptives des activités des radionucléides et des paramètres radiologiques pour chaque continent. ....	91
<b>Tableau IV 18:</b> Corrélation de Pearson entre les radionucléides présents dans les échantillons et les paramètres radiologiques associés.....	93

# **TABLE DES MATIERES**

**TABLE DES MATIERES**

INTRODUCTION GENERALE .....	1
-----------------------------	---

**CHAPITRE I: LA RADIOACTIVITE**

I.1 La stabilité d'un noyau.....	6
I.2 Classification de rayonnement.....	7
I.2.1 Rayonnement non ionisant.....	7
I.2.2 Rayonnement ionisant.....	9
I.2.2.1 Rayonnement alpha.....	9
I.2.2.2 Rayonnement bêta.....	9
I.2.2.3 Le rayonnement photonique.....	10
I.3 Sources naturelles de rayonnement ionisant.....	12
I.3.1 La radioactivité naturelle.....	12
I.3.2 Sources artificielles de rayonnement ionisant.....	14
I.4 Radioactivité tellurique.....	15
I.5 Radioactivité dans l'air.....	16
I.6 Radioactivité dans l'eau.....	16
I.7 La radioactivité dans les aliments.....	17
I.8 Effets du rayonnements ionisants sur la santé de l'homme.....	19
I.9 Filiations radioactives et équilibre radioactif.....	21

**CHAPITRE II : INTERACTION PHOTON-MATIERE ET DETECTION**

II.1 Interaction photon-matière.....	25
II.1.1 Effet photoélectrique.....	25
II.1.2 Effet Compton.....	26
II.1.3 Effet de matérialisation (la création de pair électron-positon).....	26

II.2 La détection : La spectrométrie gamma .....	28
II.2.1 Fonctionnement des spectromètres gamma .....	28
II.2.1.1 Les semi-conducteurs .....	29
II.2.1.2 Détecteurs à scintillations .....	31
II.2.1.3 Photomultiplicateur .....	32
II.2.2. Le détecteur NaI(Tl) .....	33
II.2.3 Coefficient d'atténuation d'un rayon gamma .....	36
II.2.4 Propriétés d'un détecteur .....	37

### **CHAPITRE III:**

#### ***DETERMINATION DE LA RADIOACTIVITE ISSUE***

##### ***DES ALIMENTS ETUDIES***

III.1 Introduction .....	43
III.2 Procédure expérimentale .....	43
III.3 Méthode de calcul .....	48
III.3.1 Étalonnage en energie.....	48
III.3.2 Calcul de l'efficacité totale .....	49
III.4 Identification des radionucléides.....	52
III.5 activité d'activité.....	54
III.6 Estimation des incertitudes.....	55
III.7 Calcul de la dose efficace annuelle .....	55
III.8 Apport quotidien de radioactivité via la consommation de denrées alimentaires .....	56
III.9 Risque radiologique.....	56
III.10 Les paramètres radiologiques .....	56

**CHAPITRE IV: RESULTATS ET DISCUSSIONS**

IV.1. Présentation des résultats obtenus et discussions.....	59
IV.1.1. Évaluation des radionucléides dans le lait infantile en poudre importé consommé en Algérie et indices de risque radiologique .....	59
IV.1.2 Mesure de la radioactivité naturelle dans les céréales consommées en Algérie et estimation de la dose efficace annuelle correspondante et du risque de cancer .....	66
IV.1.3 Etude des activités de radionucléides naturels et indice de risque de rayonnement dans certains laits en poudre, café et thé consommés en Algérie.....	72
IV.1.4 Evaluation des risques radiologiques de l'apport de légumes et fruits en Algérie	78
IV.1.5 Évaluation des indices de danger radiologique résultant de la teneur en radionucléides de certaines denrées alimentaires en Algérie .....	84
IV.2 Analyse statistique .....	88
VI.2.2 Étude de corrélation entre les radionucléides naturels .....	91
IV.2.3 Corrélations de Pearson.....	93
CONCLUSION GENERALE.....	95
REFERENCES BIBLIOGRAPGIQUES .....	98
ANNEXE .....	104

# ***INTRODUCTION GENERALE***

**L**e développement des utilisations de la technologie nucléaire militaire et civile, et l'augmentation constante des applications des radio-isotopes ont conduit à l'émergence de maladies dangereuses, telles que les tumeurs cancéreuses, les lésions du système immunitaire, les malformations fœtales, l'infertilité et d'autres maladies qui résultent de la transmission des rayonnements aux humains de diverses manières, principalement des aliments contaminés par ces rayonnements, en raison de la pollution de l'air, de l'eau et des sols agricoles par des déchets d'expériences ou d'activités nucléaires ou atomiques, ce qui nécessite l'intérêt des autorités concerné à connaître les méthodes d'estimation des éléments radioactifs et de mesurer la radioactivité dans les aliments solides, liquide, et les moyens de réduire la contamination des aliments par des matériaux radioactifs.

Les matériaux radioactifs diffèrent selon le degré de leur concentration dans les aliments et leurs effets à l'intérieur du corps humain, ainsi que le temps qu'il faut pour perdre leur rayonnement, et cette période de temps pour perdre leur rayonnement est scientifiquement appelée (demi-vie), qui indique la réduction de l'effet radiatif de moitié.

Certains éléments radioactifs, comme le césium, ne disparaissent de l'atmosphère qu'après 30 ans, tandis qu'une autre substance radioactive, comme l'iode, disparaît en moins de trois mois. La demi-vie des isotopes radioactifs varie de quelques secondes à des milliards d'années.

En outre, la multiplicité des termes et unités utilisés pour décrire et mesurer le rayonnement dans les aliments augmentent la difficulté et la complexité de la surveillance du niveau de rayonnement, y compris Rem, qui est une unité de mesure de l'étendue des dommages biologiques résultant de l'exposition au rayonnement, en plus d'autres unités de mesure, telles que Röntgen, qui mesurent l'étendue de l'ionisation issue du passage des rayons à travers un milieu. Il y a aussi le Rad, qui mesure la dose de rayonnement absorbée.

Dans le cas où des matériaux radioactifs tombent sur les cultures agricoles pendant la période de récolte, leurs dommages seront plus graves, car cela conduit au dépôt de matériaux radioactifs à la surface des plantes, et elles sont absorbées par les feuilles ou les racines plus tard, et lorsque la pollution est superficielle, les plantes vertes à larges feuilles sont plus dangereuses pour l'homme, Comme la laitue et les épinards, et les fruits qui ne pèlent pas lorsqu'ils sont consommés, comme les raisins et les abricots.

La contamination radioactive est transmise des cultures aux êtres humains directement par la nourriture ou par un milieu tel que les animaux qui se nourrissent de plantes. Les matières radioactives sont déposées dans leur corps, puis transférées aux humains en mangeant leur viande ou leur lait.

La contamination des denrées alimentaires par de l'eau et du sol contaminés est moins dangereuse que la contamination directe des plantes par des retombées radioactives. Les animaux et les poissons peuvent être contaminés par des radiations si la quantité d'eau est petite et limitée, tandis que le risque de pollution des mers, des océans, des rivières et des grands lacs sont moindres.

Dans le cas où le sol est contaminé par des matériaux radioactives, il protège à court terme les tubercules tels que les pommes de terre, les radis, les carottes et les oignons de la contamination immédiate. Si la demi-vie de la matière radioactive est courte, elle disparaîtra avant d'atteindre le système racinaire ou les eaux souterraines. Le degré de contamination de la chaîne alimentaire à travers les eaux souterraines et le système racinaire varie selon le type de matière. Si des matières radioactives restent dans le sol, les cultures suivantes seront fortement polluées.

Le risque d'aliments contaminés radio activement augmente pour les enfants et les personnes âgées, ainsi que pour les fœtus s'ils sont exposés à des radiations, même à petites doses, et la raison de la sensibilité des fœtus aux polluants est due à la division rapide des cellules fœtales pendant la grossesse. La sensibilité du fœtus aux radiations est à son maximum au cours du premier trimestre de la grossesse, période pendant laquelle le processus d'organogenèse a lieu. Des études ont montré que les enfants qui sont exposés à un rad pendant le premier trimestre de la grossesse, l'incidence du cancer est d'environ 5%, et l'incidence augmente à 1,5% s'ils sont exposés par la suite à un rad. Après le premier trimestre de la grossesse, le rayonnement entraîne une petite taille de la tête, un retard mental et une distorsion des mains et des pieds du nouveau-né, surtout si les doses de rayonnement dépassent 25 rads.

De plus, les aliments contaminés par les radiations entraînent de nombreux types de tumeurs cancéreuses, et des études ont montré que les rayons peuvent provoquer divers types de cancer dans la plupart des tissus du corps, et que l'effet des radiations chez les animaux est très similaire à leur effet chez l'homme.

Et lorsque des cas de contamination alimentaire sont découverts, ces aliments doivent être détruits immédiatement, ce qui entraîne bien sûr des pertes économiques importantes pour les producteurs, mais l'alternative est de tromper le consommateur et de le laisser manger des aliments impropres à la consommation et de l'infecter de maladies graves.

Afin de protéger les aliments contre les risques de contamination radioactive, davantage de recherches doivent être menées sur la façon dont le rayonnement est transmis à différents aliments et sur les moyens d'éviter les matériaux radioactifs, les citoyens doivent être informés des risques de fuite radioactive et développer des systèmes pour surveiller la contamination radioactive aux niveaux international et national, et adopter des normes uniformes pour évaluer les dangers nucléaires liés à la contamination nucléaire des aliments.

Sans les nombreux avantages que les êtres humains récoltent et retirent des matières radioactives et des rayonnements qu'ils émettent, la production de ces matières ne serait ni justifiée ni acceptable. Pendant des décennies, les matières radioactives naturelles et industrielles ont largement contribué à l'évolution et au progrès de l'homme et à l'amélioration de son niveau de vie. Le sujet des rayonnements est un sujet important et souvent abordé, où de nombreuses personnes ont une grande crainte pour leur santé et celle de leurs enfants et petits-enfants, en particulier lorsqu'ils parlent des effets à long terme des rayonnements. Parlant de la possibilité d'accidents dans les réacteurs nucléaires à proximité ou de loin et du transit de leurs effets aux frontières et du transfert de matières radioactives vers le sol, l'eau, les animaux, les plantes et les personnes, parlant des déchets nucléaires et de l'enfouissement dans les pays pauvres et de la possibilité de contamination des eaux souterraines et de la propagation des polluants radioactifs résultant de l'utilisation normale des réacteurs nucléaires, sans parler de nombreux termes compréhensibles et incompréhensibles, armes nucléaires, bombes à hydrogène, bombes à neutrons, bombes propres, armes sales et armes radiologiques, tout cela fait que l'un d'entre nous souhaite qu'il puisse migrer dans l'espace pour échapper avec sa vie de ce danger imminent qui le fait vivre dans un tourbillon de peur, de terreur, d'anxiété et peut-être d'oppression.

Dans ce travail nous nous sommes intéressés à la mesure de la radioactivité dans les aliments importés en Algérie. Les principaux objectifs de cette étude, amélioration d'une méthode de calcul d'efficacité du détecteur NaI (TI) 2\*2 pouce et validation de la méthode par une étude générale de la radioactivité dans la nourriture, peuvent être résumés comme suit :

- Détermination des activités spécifiques des radionucléides (naturels  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ )

et anthropogénique<sup>137</sup>Cs) dans les aliments importés.

- Évaluation des risques sanitaires pour l'homme avant toute contamination artificielle, recherche de liens entre la radioactivité et la pollution issue de l'activité humaine et industrielle
- Comparaison des résultats avec les données publiées à l'échelle internationale.
- Contribution à l'établissement d'une base de référence de l'exposition à la radioactivité du grand public suite à l'ingestion de denrées alimentaires.

Cette thèse comporte quatre chapitres.

Dans le premier chapitre, nous présenterons la radioactivité en général, dans l'environnement, celle du sol, de l'eau, de l'air, ... Nous citerons les différents types de rayonnements qui existent dans les transformations nucléaires et les sources naturelles et artificielles de rayonnement ionisant et en exposant les différentes chaînes de désintégration des radio-isotopes. Ses effets sur la santé.

Le second chapitre rend compte d'une description des différents processus d'interaction des rayonnements gamma avec la matière, ainsi que les principes de leur détection.

Les techniques de mesure, la méthode de calculs de l'efficacité ainsi que la méthode de préparation des échantillons seront données dans le troisième chapitre.

Le quatrième 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 d'aliments a été faite par la détermination des paramètres radiologiques. Enfin, des analyses statistiques ont été effectuées pour évaluer la distribution spatiale des radionucléides et des paramètres radiologiques associés.

# **CHAPITRE I**

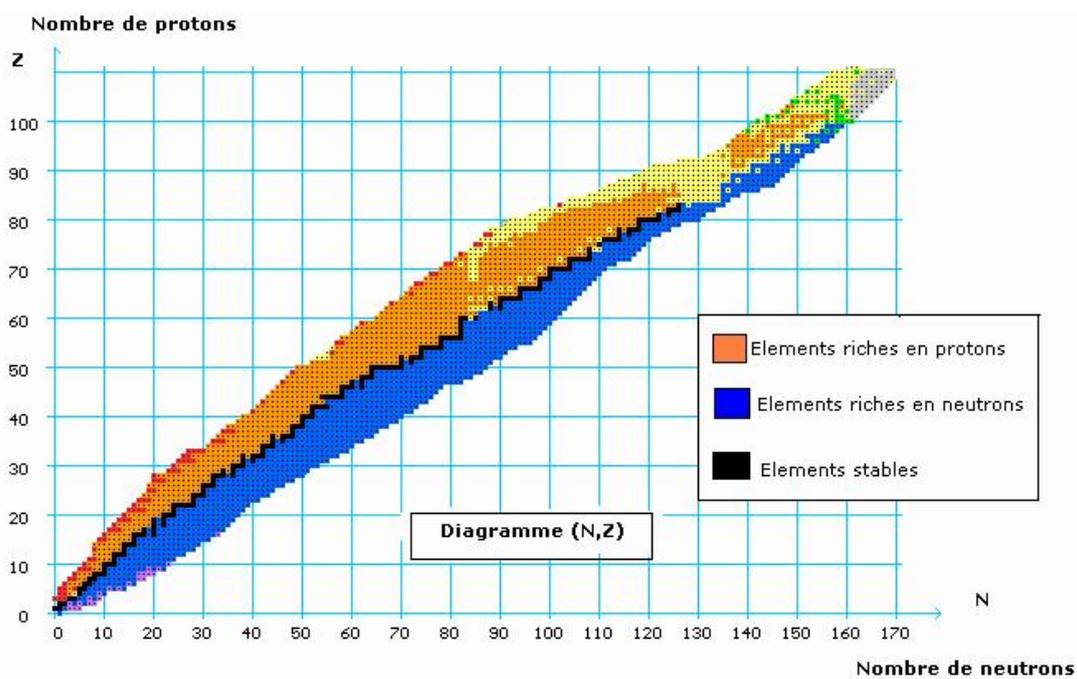
## ***LA RADIOACTIVITE***

Pour comprendre pourquoi et comment une matière peut être radioactive, il faut découvrir un minimum de notions sur la structure de la matière. Tout élément de notre univers, qu'il soit solide, liquide ou gazeux, est composé d'atomes.

### I.1 La stabilité d'un noyau

Les atomes sont constitués d'un noyau composé de nucléons (protons et neutrons) et des électrons. Chaque atome est caractérisé par son numéro atomique  $Z$  (nombre de protons qui est égal au nombre d'électrons à l'état non ionisé) et son nombre de masse  $A$  (nombre de nucléons égal à la somme des nombres de protons et de neutrons du noyau atomique).

Les isotopes sont des atomes qui possèdent le même nombre d'électrons et donc de protons, pour rester neutre, mais un nombre différent de neutrons. On connaît actuellement environ 325 isotopes naturels et 1200 isotopes créés artificiellement. Les isotopes d'un même élément ont des propriétés chimiques identiques mais des propriétés physiques différentes (stables ou radioactifs notamment).



*Figure I. 1: Vallée de stabilité des noyaux [1]*

Ce graphique (Figure I-1) montre que la région de stabilisation du noyau (domaine en noir) est confondue, lorsque  $N = Z$  par rapport au noyau léger ( $A < 20$ ), alors qu'elle s'écarte spécifiquement de cette zone pour le noyau lourd ( $A > 20$ ) qui a besoin de plus de neutrons que de protons pour rester stable. Pour les noyaux instables, ceux qui ont un excès de protons, apparaissent en orange et pour les noyaux avec un excès de neutrons sont en bleu. Ces noyaux subissent une transformation nucléaire spontanée (désintégration radioactive) pour atteindre la stabilité

Pour acquérir une meilleure stabilité, ces derniers expulsent à un moment donné une quantité d'énergie, sous forme de rayonnement et/ou de particules, dite radionucléide ou radio isotope, si l'isotope d'un élément donné est radioactif, tel que l'uranium 238( $^{238}\text{U}$ ), l'iode 131( $^{131}\text{I}$ ) ...

## **I.2 Classification de rayonnement**

Le rayonnement est un transfert d'énergie sous forme d'ondes et de faisceaux de particules, qui peut être classé en deux grandes catégories suivant leur nature, et aussi selon leur induction sur la matière. En rayonnements non-ionisants et rayonnements ionisants [2].

### **I.2.1 Rayonnement non ionisant**

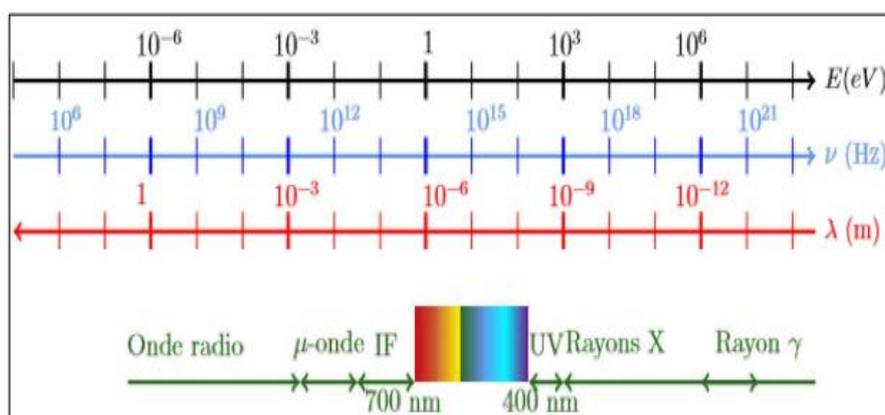
Le rayonnement non ionisant est une onde électromagnétique qui n'a pas assez d'énergie pour ioniser les atomes, en raison de sa très faible énergie, il n'endommage pas l'ADN. Chaque jour, les êtres humains sont y exposer à des sources de rayonnement non ionisant comme l'indique la Figure (I.2).

Le rayonnement optique comme le soleil émet de la lumière visible. Cette lumière est dotée d'une énergie moyenne, sans danger. Mais l'astre du jour nous envoie aussi des rayons ultraviolets (UV) invisibles. Plus énergétiques, les UV peuvent occasionner des dégâts à la peau ou aux yeux. C'est pourquoi il est important de ne pas trop s'exposer au soleil et de bien se protéger. Un excès de rayonnement UV peut provoquer des brûlures et augmente le risque de cancer de la peau.

Les infrarouges IR ne provoquent pas d'ionisation ni de rupture des liaisons chimiques parce que l'énergie des particules, est trop faible pour cela. Pour la même raison, les réactions photochimiques ne deviennent importantes qu'aux longueurs d'onde plus courtes du visible et de l'ultraviolet. Les différents effets des IR sur la santé découlent principalement des propriétés

optiques des tissus dépendant de la longueur d'onde, comme l'absorption spectrale des tissus oculaires [3].

Les ondes radio comme les fours à micro-ondes, les systèmes de positionnement global (GPS), les téléphones, les stations de télédiffusion, la radio FM et AM, les interphones pour bébés, les téléphones sans fil, le champ magnétique terrestre, ainsi que le champ magnétique à proximité des lignes de transmission, des câbles et appareils électriques ménagers. Les effets biologiques d'une exposition aux radiofréquences ont été étudiés chez divers animaux. Les chercheurs semblent être d'accord sur un point : la grande majorité des effets d'une exposition aux radiofréquences et aux micro-ondes, à l'exception des effets d'une exposition à des champs modulés à très basse fréquence, est de nature thermique. Cette affirmation, cependant, ne doit pas être prise de façon simpliste. Les effets du réchauffement produit par des radiofréquences diffèrent nettement des effets causés par d'autres types de réchauffement. Le réchauffement provoqué par les radiofréquences et les micro-ondes à trois caractéristiques particulières : la variation de la profondeur de pénétration, l'existence de "points chauds" internes et la rapidité de réchauffement. L'introduction de variations ponctuelles de la température de diverses parties du cerveau peut provoquer des changements dont l'étendue et les conséquences ne sont pas encore bien connues [4].



**Figure I. 2:** Rayonnement ionisant et non ionisant [5]

Au laboratoire, d'autres sources électromagnétiques méritent un traitement particulier. Il s'agit des appareils qui produisent des champs magnétiques de fortes intensités à des fins analytiques, dans le domaine des sciences, il y a la résonance magnétique nucléaire (RMN), résonance paramagnétique électronique (RPE) et Champs hautes fréquences, quant à la médecine, on trouve imagerie médicale par résonance magnétique (IRM) (appareil

diagnostique sur l'anatomie) et spectroscopie par résonance magnétique (SRM) (appareil diagnostique du métabolisme).

## I.2.2 Rayonnement ionisant

Un rayonnement ionisant est une particule ou une onde électromagnétique dont l'énergie est suffisante pour éjecter les électrons de leur orbite autour des atomes et perturber l'équilibre entre électrons et protons. Les molécules et les atomes chargés électriquement portent le nom d'ions. Un rayonnement est considéré comme ionisant lorsque son énergie est supérieure ou égale à 10keV qui provient de sources naturelles et artificielles [6]. Les formes les plus courantes de rayonnements ionisants sont des particules alpha, particules bêta et gamma (Figure I-4)

### I.2.2.1 Rayonnement alpha

Lorsqu'un atome subit une désintégration alpha, il émet une particule composée de deux protons et de deux neutrons provenant directement de son noyau. Ce type de désintégration se déroule majoritairement dans les noyaux des éléments les plus lourds. Le radium, le radon, l'uranium et le thorium comptent parmi les émetteurs de particules alpha. De plus, ce sont des particules relativement grosses et massives, et ils sont arrêtée par une simple feuille de papier[7].

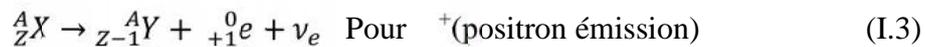


Toutefois, lorsque des substances nucléaires émettant du rayonnement alpha sont absorbées dans le corps (par voie oral ou respiratoire), l'énergie du rayonnement alpha est complètement absorbée dans les tissus corporels. Pour cette raison, le rayonnement alpha est seulement un danger interne. Un exemple d'une substance nucléaire qui subit une désintégration alpha est le radon  ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ , qui se désintègre en polonium  ${}^{218}_{84}\text{Po}$ .

### I.2.2.2 Rayonnement bêta

La désintégration bêta est un type de désintégration radioactive caractérisée par l'émission de particules  $\beta^+$  (les nucléides présentant un excès de protons) ou  $\beta^-$  (les nucléides présentant un excès de neutrons). Dans la désintégration bêta de base, un neutron se transforme en proton et un électron est émis par le noyau. Avec augmentation du numéro atomique, mais la masse ne diminue que légèrement. Le strontium  ${}^{90}_{38}\text{Sr}$ , le tritium( ${}^3\text{H}$ ), le carbone 14 ( ${}^{14}\text{C}$ )

et le soufre 35 ( $^{35}\text{S}$ ) comptent parmi les émetteurs de particules bêta pures. Si bien qu'elles sont plus pénétrantes. Il est néanmoins possible de les arrêter avec une protection minimale, comme une feuille de plastique.



Avec  $\bar{\nu}_e$  est un électron antineutrino et  $\nu_e$  est un électron neutrino, le positron a la même masse de l'électron mais la charge électrique est de signe opposé.

Lorsque la source de rayonnement est à l'extérieur du corps, le rayonnement bêta a une énergie suffisante pour pénétrer la couche externe morte de la peau et déposer son énergie à l'intérieur de cellules actives de la peau. Cependant, la capacité de pénétration du rayonnement bêta dans les tissus profonds et les organes est très limitée. Les substances nucléaires qui émettent du rayonnement bêta peuvent aussi être dangereuses si elles sont absorbées par le corps. Le tritium est un exemple de substance nucléaire qui produit des émissions bêta ( $^3\text{H}$ ) et qui se désintègre en hélium 3 ( $^3\text{He}$ )[8].

### ***1.2.2.3 Le rayonnement photonique***

Le rayonnement photonique est un rayonnement électromagnétique. Il existe deux types de rayonnement photonique : le rayonnement gamma ( $\gamma$ ) et les rayons X.

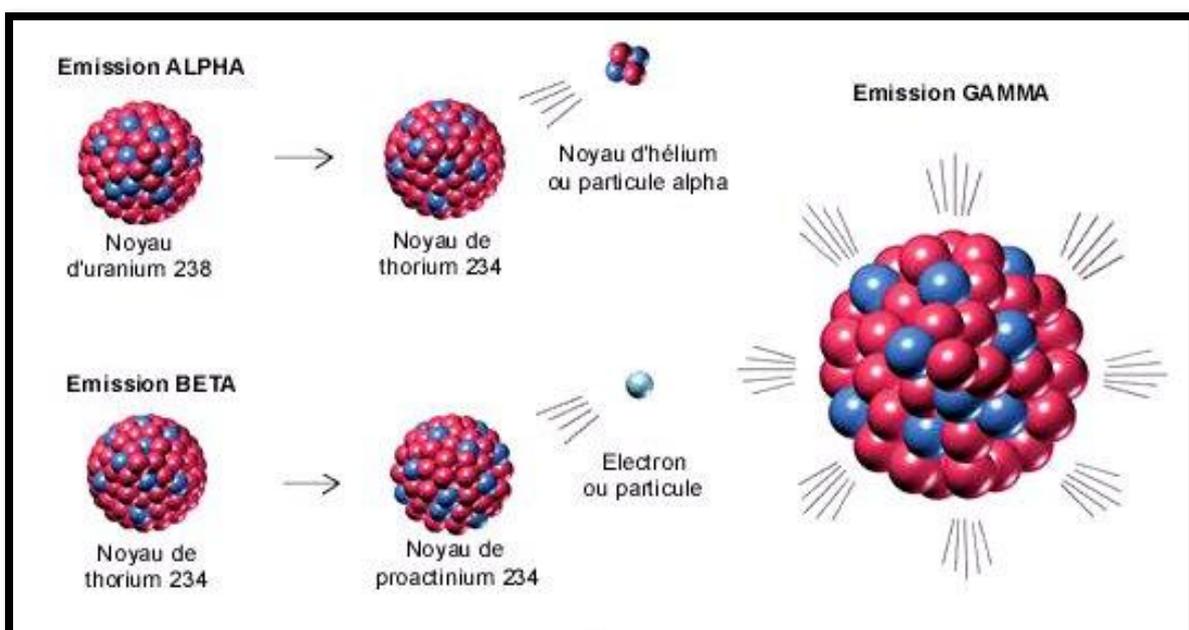
Les rayons X sont des photons qui proviennent de l'extérieur du noyau, et ils sont généralement plus faibles en énergie que le rayonnement gamma, ils sont essentiellement produits par des moyens artificiels plutôt que par des substances radioactives.

Les rayons gamma sont des photons, que ne sont pas constitués de particules, mais seulement d'énergie, ils sont émis par le noyau d'un atome excité, après une désintégration alpha ou bêta, ou après la capture des neutrons (un type de réaction nucléaire) dans un réacteur nucléaire. Afin de revenir à un état moins excité et conséquemment plus stable. La désintégration gamma n'affecte généralement pas la masse ni le numéro atomique du radio-isotope [9].

Les rayons ou photons  $\gamma$  sont 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  $\nu$  telles que :

$$E = h\nu \quad (I.4)$$

Les rayons gamma ont généralement des énergies plus élevées que les rayons-x et les deux peuvent pénétrer la matière plus loin que toutes les particules. Ils peuvent aller de 1 à plusieurs centaines de mètres dans l'air et peuvent facilement passer à travers un tissu humain et les organes corporels lorsque la source de rayonnement est à l'extérieur du corps. Le rayonnement photonique peut aussi être dangereux si les substances nucléaires émettant les photons sont incorporées, ils peuvent être appelés « rayonnement pénétrant », par exemple de certains atomes émettant des rayons  $\gamma$  tels que ; l'iode 131 ( $^{131}\text{I}$ ), cobalt 60 ( $^{60}\text{Co}$ ) et le césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ).



*Figure I. 3: Rayonnements ionisants : particules alpha, particules bêta et gamma [10]*

### I.3 Sources naturelles de rayonnement ionisant

Depuis la naissance de l'Univers, la radioactivité est présente de façon naturelle dans notre environnement et dans nous-même. Tout est naturellement radioactif : le sol, l'atmosphère, l'eau et les aliments, notre corps lui-même est radioactif

#### I.3.1 La radioactivité naturelle

La radioactivité naturelle est très répandue dans l'environnement terrestre et existe dans diverses formations géologiques dans le sol, les roches, les plantes, l'eau et l'air, la nourriture, la construction et tout qui autour de nous sont radioactives et contiennent différents types de radionucléides. Bien qu'ils soient radioactifs, ils peuvent néanmoins être considérés comme un niveau de base permettant à l'homme et à toute l'espèce vivante de vivre au sein de ce niveau, à moins qu'un effet sur l'environnement n'augmente ce niveau en tant qu'activité humaine.[11]

Il existe deux grands groupes de radionucléides naturels :

- ✓ *Les rayons cosmiques* qui proviennent du soleil et d'autres sources de la galaxie, qui sont des particules chargées d'énergie, bombardent la terre et interagissent avec l'atmosphère. La majorité des rayons cosmiques sont des particules de noyaux atomiques, mais ils incluent également des électrons, des positons et autres particules subatomiques (sont des composants de la matière. Elles ont une taille inférieure à celle d'un atome). Parmi les radionucléides cosmogoniques :  ${}^7\text{Be}$ ,  ${}^{22}\text{Na}$ ,  ${}^3\text{H}$ ,  ${}^{14}\text{C}$  [12].

**Tableau I. 1:** Caractéristiques radiologiques de quelque nucléides cosmogéniques [13].

Nucléides	Désintégration	Demi-vie	Source
${}^{14}\text{C}$	$\beta^-$	5700 ans	Interactions des rayons Cosmiques ${}^{14}\text{N}$ (n,p) ${}^{14}\text{C}$
${}^3\text{H}$	$\beta^-$	12.32 ans	Interactions des rayons Cosmiques avec N et O, la Spallation des rayons cosmiques, ${}^6\text{Li}$ (n, alpha) ${}^3\text{H}$
${}^7\text{Be}$	Capture d'électrons	53.22 J	Interactions des rayons Cosmiques avec N et O

La majorité des radionucléides cosmogénèse est produite dans trois types principaux de réactions nucléaires impliquant des particules cosmiques : spallation, capture de neutrons et capture de muon. Les réactions de spallation sont de loin le mode de production de radionucléides le plus courant dans l'atmosphère. Les radionucléides cosmogénèse contribuent pour moins de 1% à la dose efficace moyenne annuelle provenant de radionucléides naturels,

le radiocarbone ( $^{14}\text{C}$ ) étant le principal contributeur représentant près de 100% de cette dose[14].

Selon le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR), la dose efficace annuelle moyenne mondiale (altitude moyenne et latitude) due aux rayons cosmiques est d'environ  $460 \mu\text{Sv}/\text{an}$  et de  $120 \mu\text{Sv}/\text{an}$  à  $460 \mu\text{Sv}/\text{an}$  est due aux neutrons. Les personnes vivant à une altitude de 2 à 3 km au-dessus du niveau de la mer pourraient obtenir une dose efficace annuelle de rayons cosmiques allant jusqu'à  $2\,000 \mu\text{Sv}/\text{an}$  [15].

- ✓ *Les radionucléides primitifs* font partie de la croûte terrestre et se forment depuis 4 à 5 milliards d'années. Ils ont une longue demi-vie et sont présents au début de la formation de la Terre. Le  $^{238}\text{U}$ , le  $^{235}\text{U}$  et le  $^{232}\text{Th}$  sont les radionucléides naturels les plus importants. De plus, ils produisent en permanence des radionucléides secondaires radioactifs qui se décomposent en leurs produits et peuvent être considérés comme une chaîne de désintégration radioactive. le produit final de chaque série est un isotope stable du plomb [14]. Le premier membre de chaque série a une très longue demi-vie autour de  $10^{10}$  ans ou plus [16].

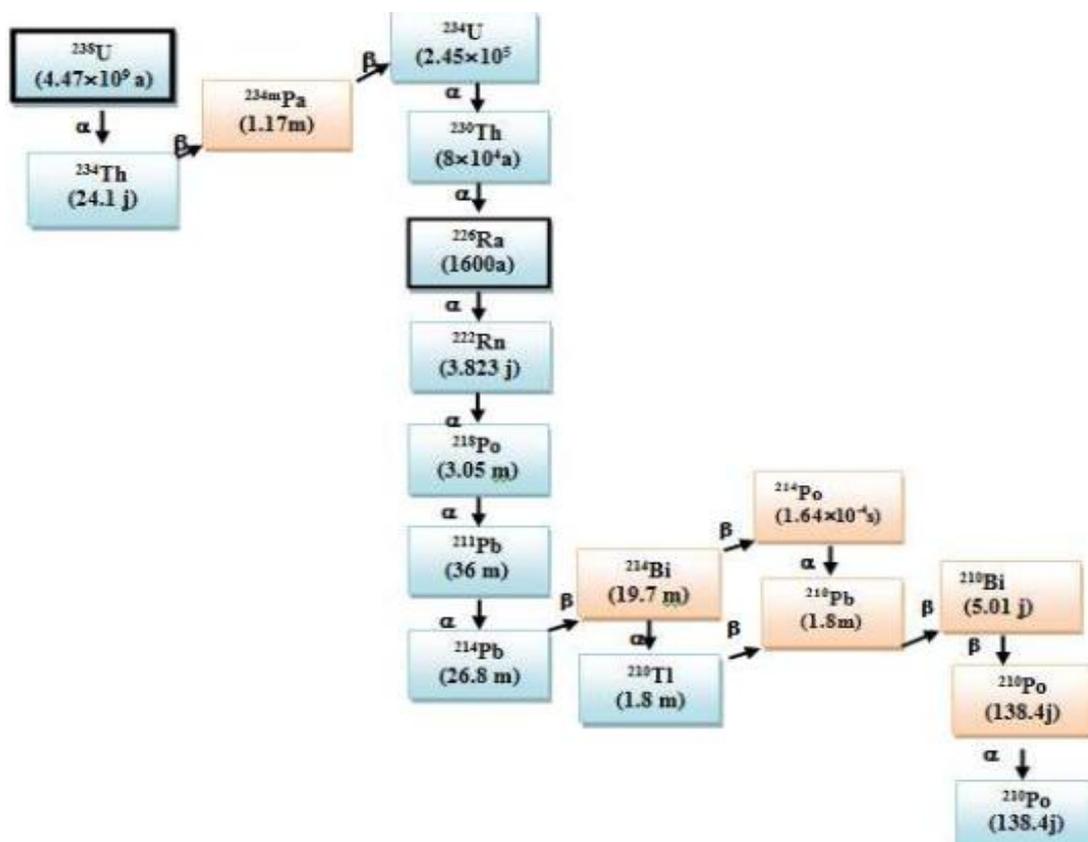


Figure I. 4: Schéma de chaîne de désintégration de  $^{238}\text{U}$  [17]

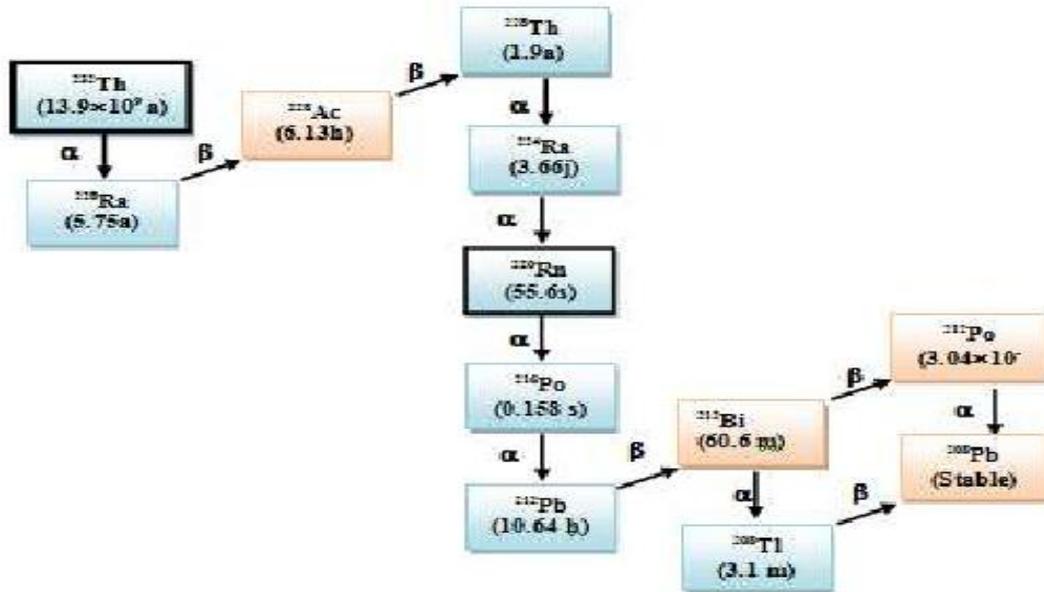


Figure I. 5: Schéma de chaîne de désintégration de  $^{232}\text{Th}$  [17]

Il contribue à environ 83% à la dose efficace moyenne totale reçue par la population mondiale. En plus, il y a l'isotope naturel radioactif du potassium  $^{40}\text{K}$ , qui contribue avec environ 16% de la dose efficace annuelle reçue par la population mondiale [17].

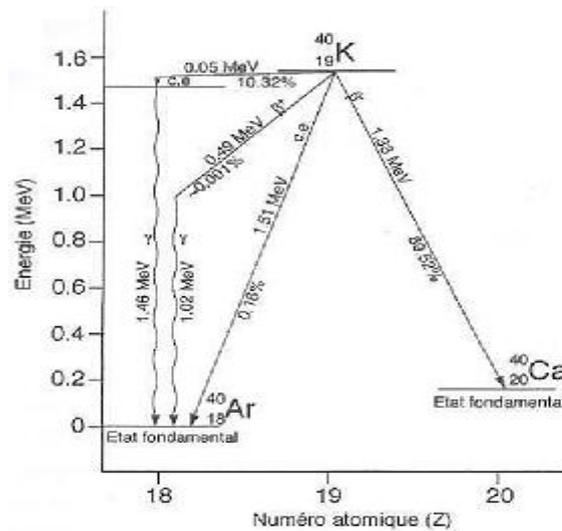


Figure I. 6: Schéma de désintégration de  $^{40}\text{K}$  [18]

### I.3.2 Sources artificielles de rayonnement ionisant

Les armes nucléaires ainsi que les centrales nucléaires produisent de grandes quantités de radionucléides en fission de l'uranium et d'autres métaux lourds et en activant divers éléments, et par conséquent ces radionucléides se désintègrent dans l'environnement.

Les personnes sont également exposées à des radiations artificielles lors de traitements médicaux et d'activités impliquant des substances radioactives, telles que : des appareils à rayons X. La médecine nucléaire utilise les radio-isotopes pour diagnostiquer et traiter des maladies telles que le cancer, la gamma-caméra, la biochimie, la fabrication et l'agriculture. Sans oublier les catastrophes liées aux explosions de réacteurs nucléaires, qui constituent l'une des plus importantes sources de radionucléides artificiels, telles que les catastrophes de Tchernobyl 1986 et Fukushima 2011.

Des exemples de radionucléides anthropiques pouvant être présents dans l'environnement sont le  $^{137}\text{Cs}$ , le  $^{90}\text{Sr}$  et plusieurs isotopes du plutonium. Ces radionucléides ont une demi-vie plus courte, mais certaines n'ont pas encore achevé leur désintégration.

#### **I.4 Radioactivité tellurique**

L'écorce terrestre contient des atomes radioactifs qui sont la source d'une radioactivité naturelle : le  $^{232}\text{Th}$ , l' $^{235}\text{U}$  et l' $^{238}\text{U}$ . Dotés de très longues durées de vie (de l'ordre du milliard ou de plusieurs milliards d'années), ils sont encore loin d'avoir disparu et font pour cette raison partie intégrante de notre environnement. Outre ces trois familles naturelles radioactives, existent d'autres radionucléides dont la désintégration conduit à des éléments stables, le plus important d'entre eux est le potassium  $^{40}\text{K}$  [19].

Les radionucléides primordiaux et secondaires se désintègrent en émettant des rayonnements : en tout lieu, tout être humain sans exception est exposé à ce rayonnement appelé "tellurique".

Les minerais contenant du thorium, de l'uranium et leurs descendants, restés prisonniers dans la roche, sont radioactifs. L'exposition est due aux rayons gamma qui s'échappent. L'uranium, étant un élémentaire, son teneur est de l'ordre du pour cent dans les minerais usuels. La teneur est beaucoup plus faible dans des roches comme le granit.

Des traces de ces minéraux sont également présentes dans les matériaux de construction, de sorte que l'exposition aux rayonnements naturels peut avoir lieu à l'intérieur comme à l'extérieur.

Une tonne de terre contient en moyenne 5 g de potassium, 3 g d'uranium et 10 g de thorium. Les activités semblent faibles, mais les quantités sont énormes à l'échelle d'un pays.

## I.5 Radioactivité dans l'air

Le radon est un gaz radioactif incolore et inodore, qui trouve son origine dans les sols où il est formé par désintégration des atomes de radium (l'uranium). La quantité produite est donc liée à la teneur de la roche en radium. Seule une fraction dépendant de la porosité du sol, de la taille des grains et de l'humidité réussit à s'échapper et atteindre l'atmosphère. Le thoron est un gaz radioactif produit par la désintégration du thorium. Une fois libérés dans l'air, ces gaz sont normalement dilués à des niveaux inoffensifs dans l'atmosphère, mais parfois ils sont piégés et ils s'accumulent à l'intérieur des bâtiments et sont inhalés par les occupants. Le radon constitue un risque pour la santé. En général, il est la principale source d'exposition au rayonnement naturel [20].

## I.6 Radioactivité dans l'eau

La radioactivité naturelle de l'eau est faible. Elle est due à la présence dans la ressource en eau de certains radionucléides naturels. Mais, les mauvaises manipulations médicales ou industrielles peuvent également expliquer une radioactivité de l'eau.

Les eaux de surface sont très peu radioactives (moins de  $1 \text{ Bq. L}^{-1}$ ), les eaux minérales sont plus (de 2 à  $4 \text{ Bq. L}^{-1}$ ). On y retrouve  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$  et quelques-uns de ses descendants :  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{210}\text{Pb}$  et  $^{210}\text{Po}$ . Le thorium, très peu soluble, est presque toujours absent.

Tous les radionucléides naturels sont présents dans l'eau de mer. Les sédiments marins, sables des plages, vases des ports, contiennent en plus ou moins grande abondance du  $^{40}\text{K}$  et des éléments du groupe uranium-thorium ainsi que leurs descendants. La radioactivité naturelle des sédiments est de l'ordre de 40 à  $1\,000 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Les algues contiennent entre 100 et  $450 \text{ Bq.kg}^{-1}$  frais de potassium  $^{40}\text{K}$ , les crustacés et mollusques entre 50 et  $200 \text{ Bq.kg}^{-1}$  frais et les poissons entre 20 et  $400 \text{ Bq.kg}^{-1}$  frais. L'eau de mer au large contient  $12 \text{ Bq. L}^{-1}$  de  $^{40}\text{K}$ [10].

## I.7 La radioactivité dans les aliments

Les activités des radionucléides dans les produits alimentaires sont faibles par rapport aux différents milieux de l'environnement. Les radionucléides migrent plus ou moins dans les chaînes alimentaires, généralement sans se concentrer. Les niveaux de base de radionucléides dans les aliments varient et dépendent de plusieurs facteurs, en incluant le type de nourriture et de la région géographique où la nourriture a été produite, et la roche de phosphate utilisée pour l'engrais comme indique le tableau I.2.

**Tableau I. 2:** Activité des radionucléides dans les engrais (Bq/kg)[21].

<b>Produits</b>	<b><sup>238</sup>U</b>	<b><sup>226</sup>Ra</b>	<b><sup>232</sup>Th</b>
<i>Acide phosphorique</i>	1200-1500	300	-
<i>Superphosphate normal</i>	520-1100	110-960	15-44
<i>Superphosphate triple</i>	800-2160	230-800	44-48
<i>Phosphate mono-ammonium</i>	2000	20	63
<i>Le phosphate di-amonique</i>	2300	210	<15
<i>Di calcium de phosphate</i>	-	740	<37
<i>Engrais PK</i>	410	370	<15
<i>Engrais NP</i>	920	310	<30
<i>Engrais NPK</i>	440-470	210-270	<15

Les radionucléides communs dans les aliments sont le potassium  $40(^{40}\text{K})$ , le radium 226 ( $^{226}\text{Ra}$ ) et l'uranium 238 ( $^{238}\text{U}$ ) et leur descendant associé. En général,  $^{40}\text{K}$  est le radio-isotope naturel le plus fréquent.

Lorsque de grandes quantités de radio-isotopes sont rejetées dans l'environnement, ils peuvent influencer sur les aliments soit en tombant sur la surface des aliments comme les fruits et légumes ou aliments pour animaux ou à partir de l'air ou par l'eau de pluie ou de neige contaminée. Bien que de nombreux types de radionucléides peuvent être évacués à la suite

d'une urgence nucléaire majeure, certains sont de très courte durée et d'autres ne se transfèrent pas facilement dans la nourriture: l'hydrogène radioactif ( $^3\text{H}$ ), le carbone ( $^{14}\text{C}$ ), le technétium ( $^{99}\text{Tc}$ ), le soufre ( $^{35}\text{S}$ ), le cobalt ( $^{60}\text{Co}$ ), le strontium ( $^{89}\text{Sr}$  et  $^{90}\text{Sr}$ ), le ruthénium ( $^{103}\text{Ru}$  et  $^{106}\text{Ru}$ ), l'iode ( $^{131}\text{I}$  et  $^{129}\text{I}$ ), l'uranium ( $^{235}\text{U}$ ), le plutonium ( $^{238}\text{Pu}$  et  $^{240}\text{Pu}$ ), le césium ( $^{134}\text{Cs}$  et  $^{137}\text{Cs}$ ), le cérium ( $^{103}\text{Ce}$ ), l'iridium ( $^{192}\text{Ir}$ ), et de l'américium ( $^{241}\text{Am}$ ) [22].

Des traces de minéraux radioactifs se trouvent naturellement dans la nourriture et l'eau potable. Par exemple, les légumes sont généralement cultivés dans du sol et avec des eaux souterraines qui contiennent des minéraux radioactifs. Une fois ingérés, ces minéraux entraînent l'exposition interne aux rayonnements naturels [23].

**Tableau I. 3:** Activités spécifiques des radionucléides naturels dans l'alimentation dans différents pays [24]

Pays	Échantillon	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$
Référence	Produits de viande	-	-	0,015	0,001
Référence	Produits céréaliers	-	-	0,080	0,003
Référence	Produits laitiers	-	-	0,005	$3 \times 10^{-4}$
Russie	Beurre	-	14	-	-
Russie	Viandes	-	6	-	-
Espagne	Bœuf	130,0±10,4	<0,11	3,1±0,8	-
Espagne	Poulet	14,0±0,3	<0,47	2,9±0,3	-
Venezuela	Lait en poudre	401,7±32,1	1,55±0,4	-	-
Hong Kong	Bœuf	84,0±2,1	0,13±0,03	<0,020	<0,06
Ukraine	Bœuf	62,0±3,1	140,00±1	-	$1,2 \times 10^{-3} \pm 1,1 \times 10^{-4}$
Ukraine	Légumes	90,1±2,1	20,60±0,2	-	$0,006 \pm 1,8 \times 10^{-4}$
Ukraine	Lait	43,7±0,5	53,70±1,4	-	$3,9 \times 10^{-3} \pm 1,6 \times 10^{-5}$
Hong Kong	Bœuf	91,0	0,12	0,006	-
Hong Kong	Poulet	76,0	0,07	0,006	-
Hong Kong	Riz	15,0	0,26	0,006	-
Syrie	Céréale	56-382	-	-	-
Brésil	Bœuf	80,0	<0,04	<0,10	-
Brésil	Poulet	53,5	<0,07	<0,17	-
Brésil	Haricot	434	<0,29	1,43	-
Brésil	Riz	14,7	<0,04	<0,11	-
Inde	Thé	453,3-024,1		0,320-3,632	
Brésil	Poulet	-	-	0,057	0,031**
Brésil	Bœuf	-	-	0,019	0,107**

Brésil	Lait	-	-	0,108	0,028**
Angleterre	Riz	-	-	$3,7 \times 10^{-3}$	-
FAO / OMS	Denrées alimentaires	-	1000	-	-
Angleterre	Viandes	-	-	0,014	-
Angleterre	Viandes	-	-	0,014	-
Angleterre	Sucre	-	-	0,024	-
Angleterre	Thé	-	-	0,005-15	-
Taiïwan	Riz	-	-	$0,08 \pm 0,002$	-
Taiïwan	Poulet	-	-	$0,17 \pm 0,007$	-
Etats-Unis	Riz	-	-	$0,007 \pm 1,4 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4} \pm 1,3 \times 10^{-4}$
Etats-Unis	Haricots secs	-	-	$0,057 \pm 0,003$	$0,027 \pm 0,002$
Etats-Unis	Viandes	-	-	$0,002 \pm 3,2 \times 10^{-4}$	$0,002 \pm 1,8 \times 10^{-4}$
Japon	Riz	-	-	-	$4,6 \times 10^{-4} \pm 6,4 \times 10^{-5}$
Japon	Sucres	-	-	-	$1,6 \times 10^{-3} \pm 1,6 \times 10^{-5}$
Japon	Produits de haricots	-	-	-	$2,9 \times 10^{-3} \pm 1,8 \times 10^{-4}$
Japon	Viandes	-	-	-	$4,0 \times 10^{-4} \pm 2,2 \times 10^{-5}$
Japon	Haricots	-	-	-	0,002
Japon	Céréales	-	-	-	0,001
Brésil	Blé	-	-	0,119	-
EC*	Aliments pour bébé	-	400	-	-
EC*	Les produits laitiers	-	1000	-	-
EC*	Aliments liquides	-	-	-	-

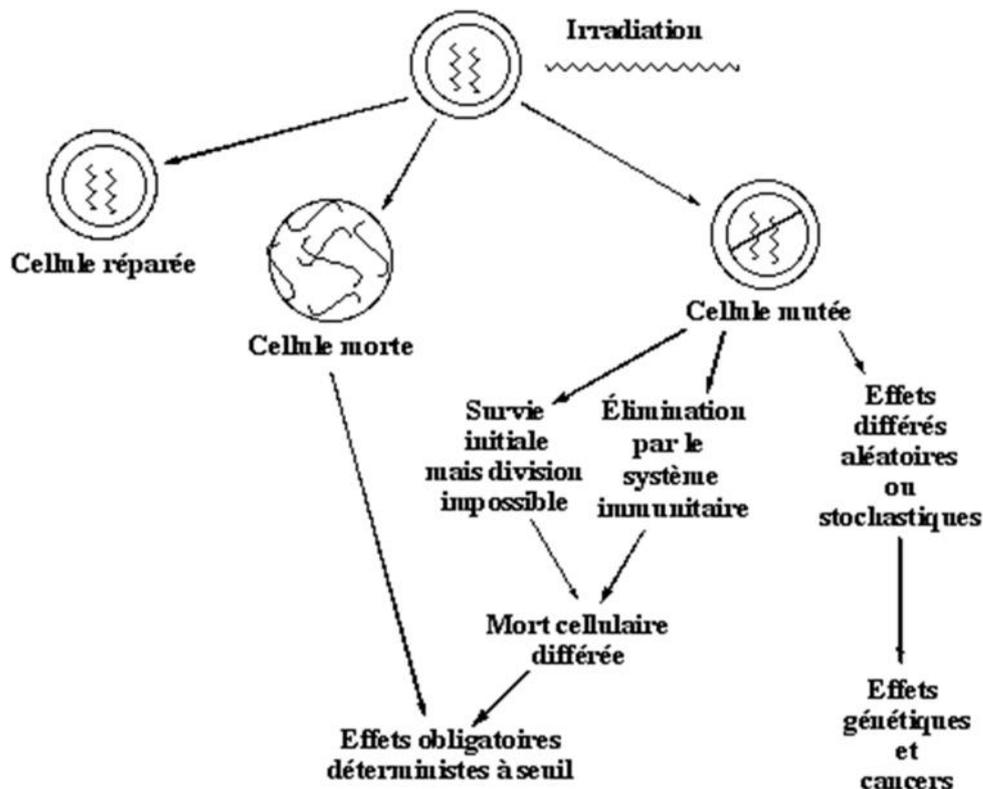
\*EC : les communautés européennes

## I.8 Effets du rayonnement ionisants sur la santé de l'homme

L'évaluation de la dose de rayonnement gamma a une importance particulière, parce que c'est le plus important contributeur aux doses externe et interne de la population mondiale. La consommation d'aliments contaminés va augmenter la quantité de radioactivité chez une personne et donc augmenter son exposition aux radiations, ce qui pourrait augmenter les risques pour la santé associée à l'exposition aux rayonnements. Les effets précis sur la santé dépendent de la quantité et des radionucléides qui ont été ingérés.

L'exposition aux rayonnements peut endommager les cellules vivantes, causant la mort de certains d'entre eux et en modifier d'autres. La plupart des organes et tissus du corps ne sont pas affectés par la perte d'un nombre encore considérable de cellules. Toutefois, si le nombre perdu est assez grand, le mal sera observable aux organes et peut conduire à la mort.

Ce type de dommage se produit chez les individus qui sont exposés à des radiations au-delà d'un niveau de seuil plus élevé. D'autres dégâts d'irradiation peuvent également se produire dans des cellules qui ne sont pas mortes, mais modifiées ces dégâts sont généralement réparés. Si la réparation n'est pas parfaite, la modification résultante sera transmise à d'autres cellules et peut éventuellement conduire au cancer. Si les cellules modifiées sont celles dont l'information héréditaire est transmise pour les descendants de l'individu exposé, les troubles héréditaires peuvent survenir (Figure I.4) [25].



**Figure I. 7:** Effet biologique de rayonnement ionisant [26].

Il existe deux types d'effets biologiques :

*Les effets immédiats (ou déterministes) :* Une forte irradiation par des rayonnements a des effets immédiats sur les organismes vivants comme, par exemple, des brûlures plus ou moins importantes. En fonction de la dose et selon l'organe touché, le délai d'apparition des symptômes varie de quelques heures (nausées, radiodermite) à plusieurs mois.

*Des effets secondaires :* ils peuvent même être observés après une irradiation : fibroses, cataracte. Les effets à long terme (effets aléatoires ou stochastiques). Les expositions à des doses plus ou moins élevées d'ionisants peuvent avoir des effets à long terme sous les cancers et de

leucémies. Troubles de la peau. On peut aussi observe des effets mutagènes mutation de l'ADN transmis à la descendance) [27].

### I.9 Filiations radioactives et équilibre radioactif

Une *filiation* radioactive est le processus de stabilisation d'un noyau, appelé *père* (ou bien *mère*), en une succession de désintégrations.  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ , et  $^{232}\text{Th}$  qui ont été mentionnés précédemment sont les filiations radioactives principales dans la nature dont le temps de vie est de l'ordre du milliard d'années. Ces noyaux se désintègrent en des noyaux *filis* qui s'ils sont lui-même radioactif conduisent à un nouveau noyau, et ainsi de suite jusqu'à aboutir à un noyau stable.

Le taux de désintégration du radionucléide décrit par sa désintégration qui est le nombre d'atomes de désintégration par unité de temps et c'est un processus spontané où les parents désintègrent les radionucléides de leurs filles par des particules d'émission.

L'activité diminue de façon exponentielle avec le temps, si le nombre d'atomes de radionucléides (N) dans un échantillon à un certain moment (t), alors la variation dN du nombre d'atomes pendant un temps court dt est proportionnelle à N et  $\lambda$  est la constante de la proportionnalité

$$dN = -\lambda N dt \quad (\text{I.5})$$

Le signe négatif à cause de la diminution de N avec l'augmentation de t, alors on peut écrire

Equation (I.5)

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (\text{I.6})$$

Où A est l'activité et  $\lambda$  est la constante de décroissance, en intégrant les deux côtés de (I.6)

$$\ln N = -\lambda t + c \quad (\text{I.7})$$

Et si l'on considère  $N_0$  le nombre d'atome à  $t = 0$ , alors  $c = \ln N_0$ , en souscrivant à (I.7)

$$\ln N = -\lambda t + \ln N_0 \quad (\text{I.8})$$

$$\ln \frac{N}{N_0} = -\lambda t \quad (\text{I.9})$$

$$\frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \quad (\text{I.10})$$

L'équation (I.10) décrit la loi de décroissance radioactive exponentielle et puisque l'activité (A) et le nombre d'atomes sont proportionnels, l'activité diminuera en suivant le même taux de décroissance des atomes, donc

$$\frac{A}{A_0} = e^{-\lambda t} \quad (\text{I.11})$$

Où A est l'activité actuelle,  $A_0$  l'activité initiale,  $\lambda$  est la constante de décroissance ( $s^{-1}$ ) et t est le temps.

Lorsque l'activité diminue d'un facteur la moitié de la désintégration des noyaux, le temps appelé demi-vie pendant lequel le nombre d'origine des atomes chute ou se réduit à la moitié, donc :

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t} \quad (\text{I.12})$$

Prendre le logarithme naturel des deux côtés

$$\ln \frac{1}{2} = -\lambda t \quad (\text{I.13})$$

$$-\lambda t = \ln \frac{1}{2} = -\ln 2 \quad (\text{I.14})$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (\text{I.15})$$

La demi-vie est différente entre chaque radionucléide et elle varie entre quelques secondes et des milliards d'années.

Becquerel (Bq) est l'unité SI de l'activité définie comme une désintégration par seconde, et curie (Ci) est l'activité attribuée à 1 g de l'ancienne unité  $^{226}\text{Ra}$ , cette unité est l'ancienne unité.

Il existe trois cas particuliers selon que la demi-vie du parent est supérieure ou inférieure à la demi-vie de la fille.

➤ **Équilibre séculaire ( $T_1 \gg T_2$ )**, si la demi-vie du nucléide parent est très longue par rapport à la demi-vie de la fille,  $T_1 \gg T_2$ ; alors l'activité de la fille atteindra un niveau qui est essentiellement identique au parent et l'activité ne montrera aucun changement significatif pendant de nombreuses demi-vies de la fille. Il est atteint après un temps égal à environ 6 fois la période la plus longue de la chaîne de décroissance, comme l'indique la Figure I.5.

$$\frac{A_1}{A_2} \sim 1 \quad (\text{I.16})$$

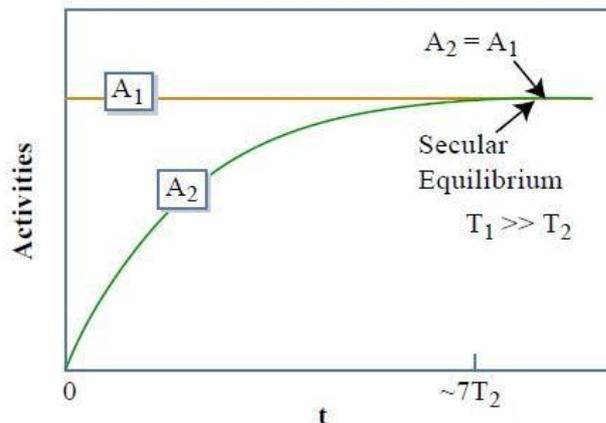


Figure I. 8: Équilibre séculaire (T<sub>1</sub> >> T<sub>2</sub>) [28]

➤ **L'équilibre de régime** est établi après environ 10 demi-vies du nucléide fille. L'activité de la fille augmentera jusqu'à ce qu'elle dépasse l'activité du parent, puis la fille se décomposera avec une demi-vie identique à la demi-vie du parent. (Figure I.6)

$$\frac{A_1}{A_2} \sim \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (I.17)$$

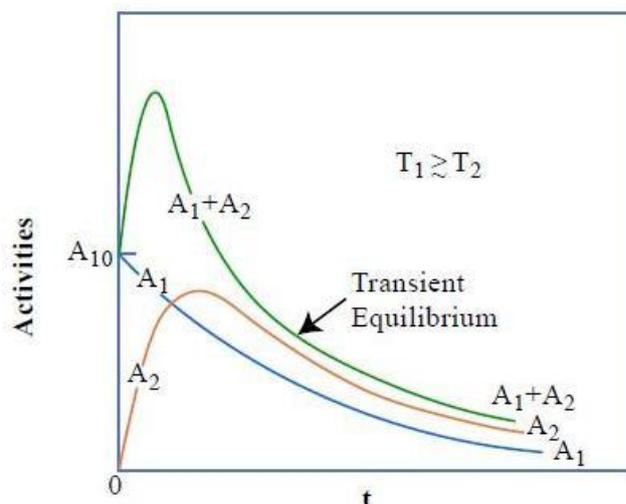


Figure I. 9: Equilibre de régime [28]

➤ **L'équilibre idéal** est atteint lorsque les activités des noyaux fils et père sont égales.

# **Chapitre II**

***INTERACTION PHOTON-MATIERE ET DETECTION***

## II.1 Interaction photon-matière

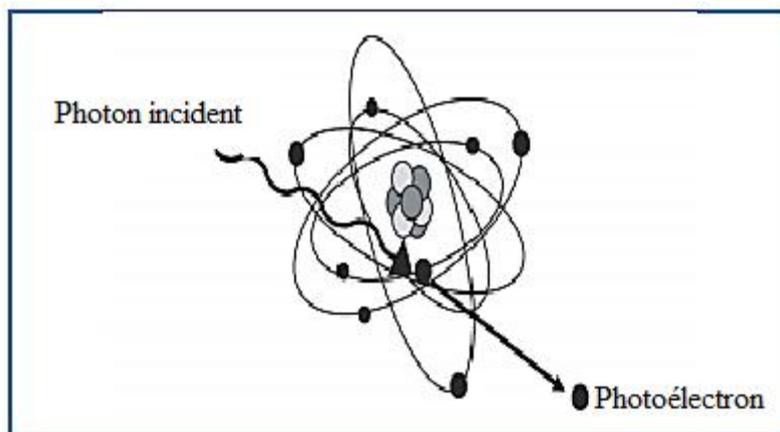
Il est important de rappeler quelques bases sur l'émission des photons et les interactions de ces rayonnements avec la matière. Le rayonnement gamma est un rayonnement électromagnétique qu'est semblable à la lumière visible et les rayons X dans sa nature c'est-à-dire qui se déplacent à la vitesse de la lumière ordinaire et ne sont pas affectés par le champ électrique ou magnétique, qu'ils ne portent pas de charge. Les photons gamma interagissent avec le détecteur de rayonnement dans divers phénomènes, ce qui est nécessaire pour comprendre les concepts de la technique de détection gamma. Qui sont représentés en trois modes :

- L'effet photoélectrique : prédominant à basse énergie
- L'effet Compton : domine aux énergies intermédiaires
- L'effet de matérialisation : important à haute énergie

Les différentes probabilités d'interaction avec la matière (interaction avec les électrons atomiques) selon ces trois effets dépendent de l'énergie  $E$  de rayonnement émis et des caractéristiques de la matière (nombre de masse  $A$  et numéro atomique  $Z$ )

### II.1.1 Effet photoélectrique

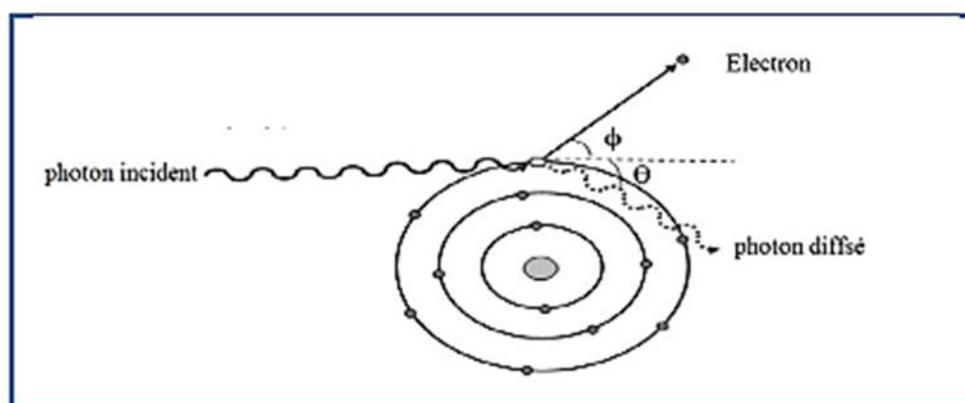
C'est un processus par lequel le photon incident, d'énergie  $E$ , cède toute son énergie à un électron d'énergie  $E_1$  des couches profondes de faible niveau d'énergie, qui est alors éjecté de l'atome sous forme de photoélectron d'énergie cinétique  $E-E_1$  : il y a absorption totale du photon et ionisation de l'atome (Figure II.1). Ensuite l'atome qui a perdu un de ses électrons internes se trouve dans un état excité ; alors il réorganise son cortège électronique par un comblement de la place vacante de l'électron éjecté par un électron de couche plus externe provoquant ainsi l'émission d'un photon de fluorescence. Cet effet est produit lorsque l'énergie du gamma est de l'ordre des énergies de liaisons des électrons des couches profondes des atomes rencontrés avec  $E > E_1$ , donc il est prédominant pour les faibles énergies et favorisé dans les matériaux lourds [29].



*Figure II. 1: Effet photoélectrique [30]*

### II.1.2 Effet Compton

Le photon incident, d'énergie  $E$ , cède une partie de son énergie à un électron des couches périphériques de l'atome (électron quasi libres), qui est éjecté (électron Compton d'énergie cinétique  $E-E'$ ), et l'autre partie d'énergie est émise sous forme d'un nouveau photon diffusé d'énergie  $E' < E$ . Il y a donc diffusion du photon incident et ionisation de l'atome (Figure II.2) et l'électron reculant selon l'angle  $\theta$ . Cet effet est produit lorsque l'énergie du gamma est de l'ordre des énergies de liaisons des électrons des couches périphériques des atomes rencontrés avec  $E \gg E_1$ , donc il est prédominant pour les énergies moyennes plus fortes à celles d'effet photoélectrique.[29]

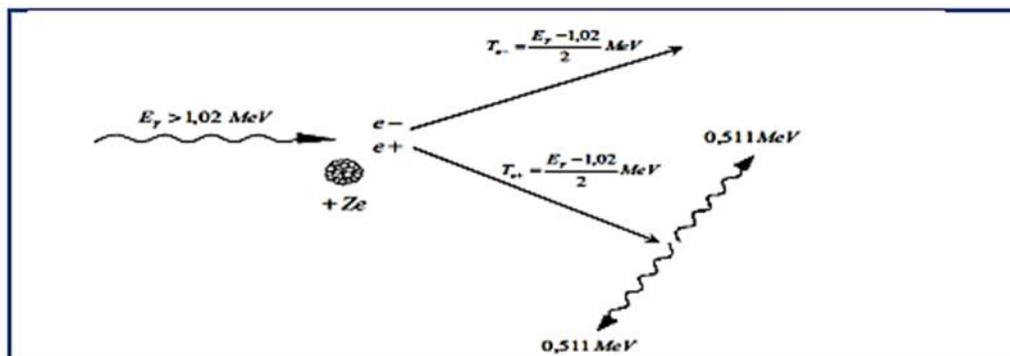


*Figure II. 2: Effet Compton [30]*

### II.1.3 Effet de matérialisation (la création de pair électron-positon)

C'est un processus par lequel le photon incident d'énergie disparaît, son énergie  $E$ , se matérialise pour donner naissance à une paire électron-positon ( $e^-$ ,  $e^+$ ) de même masse  $m_0$  et de mêmes énergies cinétiques  $E' = 2m_0c^2$  (Figure II.3). La durée de vie du positron est brève,

celui-ci s'annihile avec un électron libre du milieu et leur énergie de masse est convertie en énergie électromagnétique sous la forme de deux photons de 511keV émis à 180° l'un de l'autre[29]



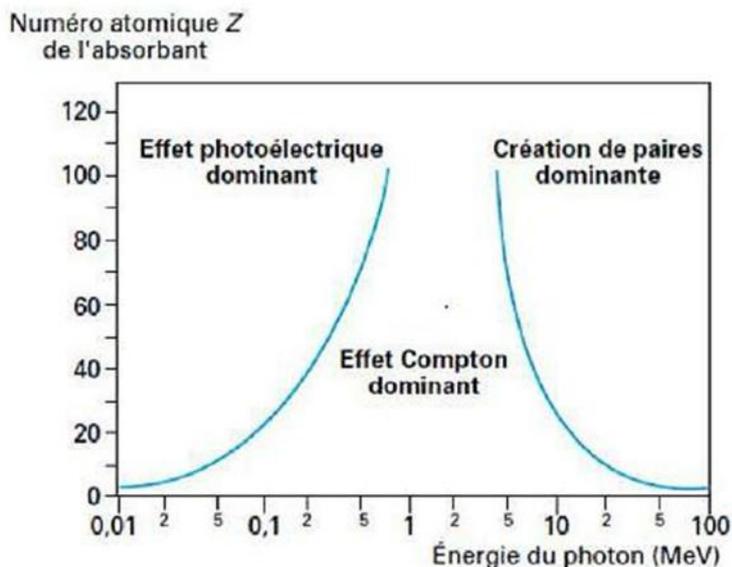
**Figure II. 3:** Effet production de pair [30]

Les lois de conservation du moment cinétique font que ces deux photons sont émis dans des directions opposées (figure II. 3). La conservation de l'énergie s'écrit par l'équation (II.1):

$$E = 2m_0c^2 + E_{c-} + E_{c+} \quad (\text{II.1})$$

$E_{c-}$ ,  $E_{c+}$  sont respectivement les énergies cinétiques de l'électron et du positon.

La figure (II.4) nous montre clairement l'importance relative de l'effet photoélectrique, effet Compton et effet de création de pair et cela en fonction de l'énergie des photons incidents et numéro atomique  $Z$  du matériau atténuant. Ce graphe permet de voir l'interaction qui prédominera suivant l'énergie du photon incident et le  $Z$  du matériau. A très basse énergie, il existe un quatrième effet, la diffusion du photon sur un électron du milieu sans perte d'énergie. Cette diffusion peut être appelée diffusion de Thomson si elle est faite sur un électron libre ou diffusion de Rayleigh si elle est effectuée sur un électron lié.



**Figure II. 4:** Types d'interaction prépondérante suivant l'énergie du photon et le numéro atomique  $Z$  [31]

## II.2 La détection : La spectrométrie gamma

La spectrométrie gamma est une technique non destructive de mesure nucléaire très utilisée pour identifier et quantifier les radionucléides émetteurs  $\gamma$ . Les photons  $\gamma$  émis par l'échantillon vont interagir avec le matériau du détecteur en déposant tout ou partie de leur énergie. 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 activité (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)[17]. On retrouve différents types de détecteurs utilisés en spectrométrie  $\gamma$ .

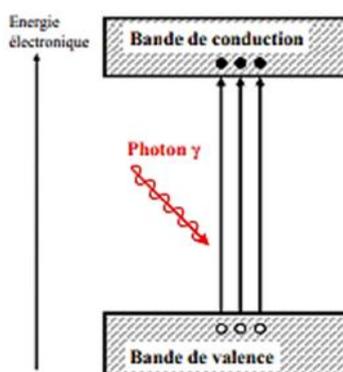
### II.2.1 Fonctionnement des spectromètres gamma

Le principe de la détection d'un photon gamma repose sur la mesure de l'énergie qu'il a cédée (partiellement ou totalement) au matériau sensible via un des mécanismes d'ionisation considérés précédemment. Cette section présente les deux principaux types de détecteurs utilisés en spectrométrie gamma dans le domaine d'énergie de quelque keV à 10 MeV : *les scintillateurs et les semi-conducteurs*. Un aperçu général est également donné de la chaîne électronique permettant de traiter le signal, de l'impulsion électrique générée dans la partie sensible à l'acquisition du spectre gamma [2].

### II.2.1.1 Les semi-conducteurs

#### a) Structure des bandes

Dans un solide cristallin, les électrons ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie situés à l'intérieur de bandes permises comme les bandes de valence et de conduction (Figure II.5). Par définition, le passage des électrons de la bande de valence à celle de conduction est systématique pour un conducteur et impossible pour un isolant ; dans le cas intermédiaire, dit semi-conducteur, cette transition n'a lieu que pour donner suite à une excitation (agitation thermique ou particule ionisante). L'écart entre bandes de valence et de conduction, noté  $E_g$ , est typiquement de l'ordre de l'électronvolt pour un semi-conducteur qui possède un faible gap entre sa bande de valence et sa bande de conduction qui peut être franchi par les électrons sous l'action d'un champ électrique [32, 33].

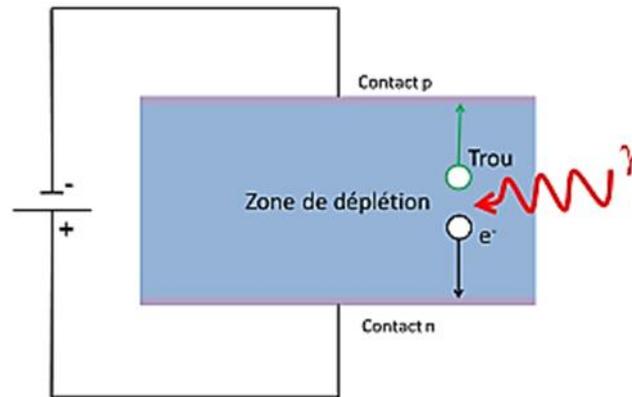


**Figure II. 5:** Structure des bandes [34]

#### b) Principe de détection

L'application du champ électrique va créer une zone de déplétion à l'intérieur du semi-conducteur dans laquelle il n'y a plus de porteurs de charges libres. L'augmentation de la différence de potentiel permet d'agrandir la zone de déplétion du semi-conducteur. Les photons incidents vont mettre en mouvement des électrons qui vont eux-mêmes créer dans la zone de déplétion des paires électron-trou qui seront collectées sur les contacts n et p. La collecte des charges engendre un courant électrique proportionnel au dépôt d'énergie du photon incident (Figure II.6) [32, 35].

L'apparition des détecteurs à base de matériau semi-conducteurs, a permis de résoudre le problème de la résolution en énergie.



**Figure II. 6:** Principe de fonctionnement d'un détecteur semi-conducteur[36]

Il existe différents matériaux semi-conducteurs : le silicium, le germanium ou encore l'arséniure de gallium

**Tableau II. 1:** Caractéristiques des principaux semi-conducteurs [17].

Matériau	Si	Ge	AsGa	CdTe	HgI <sub>2</sub>
Nombre atomique Z	14	32	31,33	48,52	80,53
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2,33	5,32	5,328	6,06	6,3
Longueur d'atténuation $x_{1/2}$ (cm) à 662keV	3,83	1,83	1,82	1,50	1,20
Énergie de la bande interdite $E_g$ (eV)	1,12	0,66	1,424	1,56	2,13
Énergie par électron-trou $W_{eh}$ (eV)	3,61	2,98	4,8	4,43	4,22
Masse effective des électrons $m_e^*/m_e$	0,26	0,12	0,067	0,11	0,002
Masse effective des trous $m_h^*/m_e$	0,36	0,21	0,45	0,40	0,6
Mobilité des électrons $\mu_e$ (cm <sup>2</sup> /V/s)	1500	3900	8500	1050	15000
Mobilité des trous $\mu_h$ (cm <sup>2</sup> /V/s)	450	1900	400	100	8000

Toutes les valeurs indiquées correspondent à la température ambiante (300°K), à l'exception du germanium pour lequel T=80°K.

### ***II.2.1.2 Détecteurs à scintillations***

Un détecteur à scintillations également appelé compteur à scintillations ou plus souvent scintillateur est un instrument composé d'un matériau qui émet de la lumière par suite d'un dépôt d'énergie par interaction d'un rayonnement.

Il existe deux grandes familles de scintillateurs : des scintillateurs organiques (à base de composés benzéniques : anthracène, naphthalène, etc.) que l'on retrouve sous forme de plastiques ou en solution liquide et des scintillateurs inorganiques qui sont utilisés en monocristaux ou en poudre (principalement des halogénures alcalins)[37].

#### **a) Scintillateurs organiques**

Ils peuvent se trouver sous la forme plastique, liquide ou cristalline. Leur mécanisme de fluorescence est associé aux états excités des molécules. La scintillation est basée sur les électrons  $\pi$  des liaisons carbone-carbone.

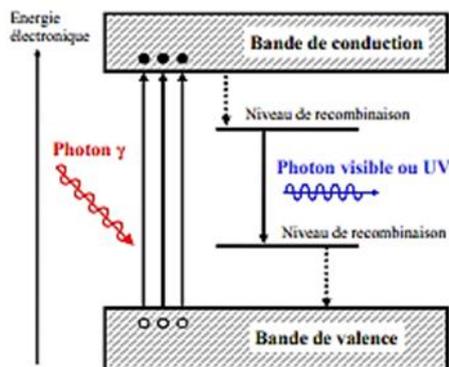
Les scintillateurs organiques plastiques ou liquide sont constitués de deux composants fondamentaux : un solvant et un (ou plusieurs) soluté. Le solvant absorbe l'énergie et son excitation est transférée au(x) soluté(s) qui émet la lumière [38].

Les scintillateurs organiques ayant un faible numéro atomique moyen (ils sont composés essentiellement d'atomes de carbone et d'hydrogène), ils ont une faible efficacité de détection des photons gamma. Ils sont sensibles presque uniquement à l'effet Compton. Ils sont généralement utilisés pour la spectroscopie et la détection de neutrons [39, 40]. Une propriété remarquable des scintillateurs organiques est leur réponse très rapide (Quelques nanosecondes).

#### **b) Scintillateurs inorganiques**

Ils sont sous forme de monocristaux possédant un rendement lumineux élevé et une meilleure efficacité, sont préférés pour la spectroscopie gamma. Certains matériaux de scintillation inorganiques courants sont l'iodure de sodium (NaI) l'iodure de césium (CsI) le sulfure de zinc (ZnS) et de l'iodure de lithium (LiI) (Ce sont principalement des halogénures alcalins, possédant généralement un numéro atomique ( $Z$ ) élevé, dopés par des impuretés) ou bien des composés minéraux comme CsF<sub>2</sub>, BGO, BaF<sub>2</sub>, ZnS, CaWO<sub>4</sub>, CdWO<sub>4</sub>, LaBr<sub>3</sub>(Ce), etc.[41]. Sensibilité aux neutrons inférieurs emporte sur des considérations de résolution en énergie. Le mécanisme de scintillation dans des matériaux inorganiques dépend des états d'énergie spécifiée par le réseau cristallin du matériau (il est lié à la présence des états

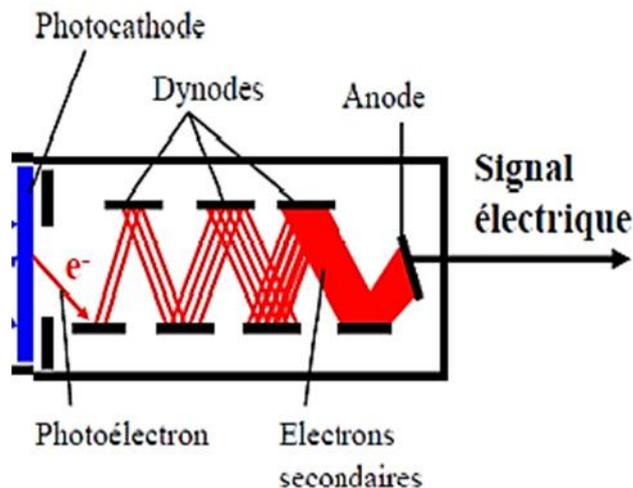
intermédiaires qui apparaissent à travers la présence d'impuretés). Les électrons ont disponibles seules bandes discrètes d'énergie dans les matériaux classés comme isolants ou semi-conducteurs. La bande inférieure, appelée la bande de valence, représente les électrons qui sont principalement liés sur les sites du réseau, ainsi que la bande de conduction représente les électrons qui ont convenablement énergie pour être libre de migrer à travers le cristal. Il existe une bande intermédiaire énergies, appelées la bande interdite, dans lequel les électrons ne peuvent jamais être trouvés dans le plus pur (Figure II.7). Absorption d'énergie peut se traduire par l'élévation d'un électron à partir de sa position normale dans la bande de valence à travers l'espace dans la bande de conduction, ce qui laisse un trou dans la bande remplie de valence. Dans le cristal pur, le rendement de l'électron de la bande de valence avec l'émission d'un photon est un processus inefficace. En outre, largeurs de fente typiques sont de telle sorte que le photon résultant serait d'une énergie trop élevée pour se situer dans la gamme visible [42].



*Figure II. 7: Structure des bandes d'un scintillateur [34]*

### II.2.1.3 Photomultiplicateur

L'utilisation généralisée du comptage par scintillation dans la détection et la spectroscopie des rayonnements était impossible sans la disponibilité de périphériques qui transforment la lumière émise par le scintillateur en électrons qui viendront former le signal utile (courant). Ces transformateurs de lumière sont appelés photomultiplicateurs, ils produisent des électrons à partir de la lumière et jouent un rôle d'amplificateur de ces électrons, qui sont produits initialement en très faible nombre[43].



*Figure II. 8: Schéma de tube Photomultiplicateur(PMT) [34]*

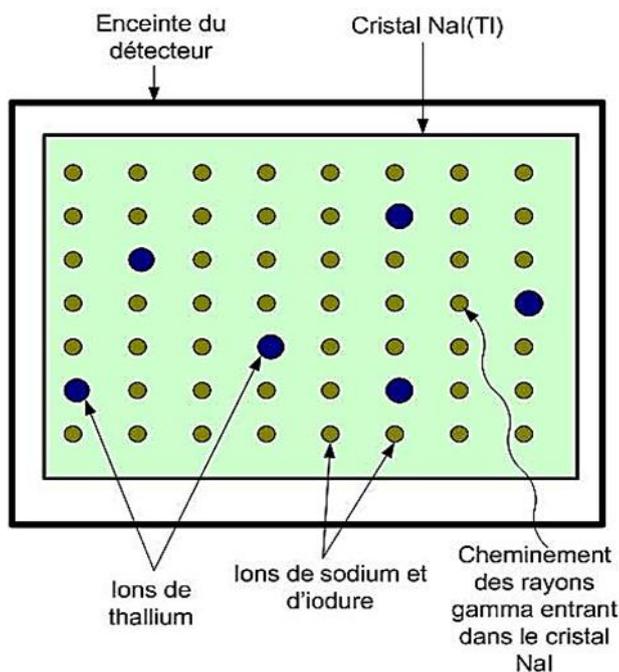
Le principe physique est l'effet photo-électrique, produit avec la photocathode, qui est en général une mince couche d'un alliage métallique alcalin.

Derrière la photocathode se trouve une série d'électrodes appelées dynodes (pouvant aller de dix à quatorze). Les photoélectrons émis par la photocathode sont accélérés et focalisés sur la première dynode, en arrachant 2 à 5 électrons par photoélectron, amplifiant ainsi le signal électrique. Le même mécanisme d'amplification se reproduit sur chacune des dynodes successives, produisant un gain pouvant atteindre  $10^7$  après 14 étages.

La figure II.8 représente les composantes d'un photomultiplicateur et l'interaction des électrons entre dynodes.

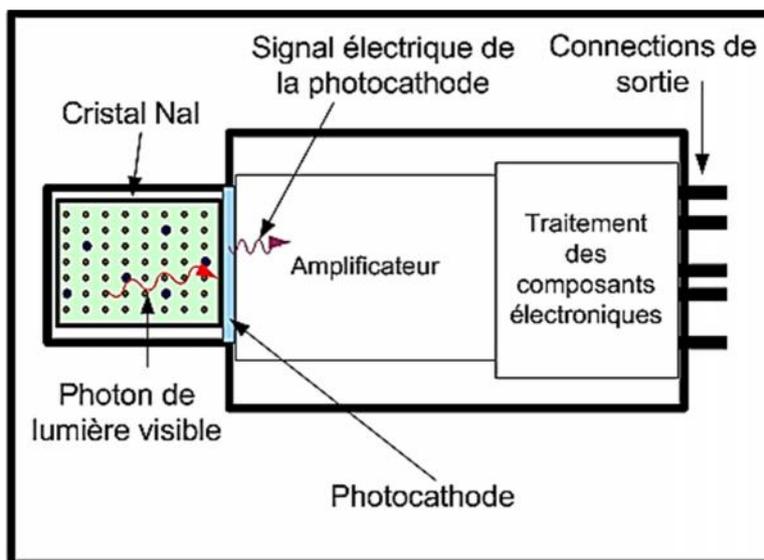
### II.2.2. Le détecteur NaI(Tl)

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 [44]. Ces interactions peuvent causer qu'un électron sorte de l'atome et voyage de courtes distances dans le cristal. Le thallium (Tl) est utilisé comme dopant du NaI du fait qu'il contribue à accroître le nombre de photons visibles émis par le cristal et contribue aussi à améliorer la transparence du cristal aux photons émis afin qu'ils puissent être mesurés à l'aide du matériel à l'extérieur du cristal comme l'illustre la figure II.9.



**Figure II. 9:** Un cristal d'iodure de sodium dopé au thallium

La lumière visible est émise du cristal en conséquence de l'interaction avec les rayons gamma, qu'est convertie en un signal électrique par la photocathode. Ce signal électrique est amplifié par le photomultiplicateur et ensuite est traité dans un seul spectre par l'analyseur multicanaux[45].



**Figure II. 10:** Assemblage d'un détecteur de NaI(Tl)

Il nous faut un détecteur dont la densité soit suffisante pour arrêter le rayonnement gamma ; le matériau servant à la détection doit posséder une section efficace importante d'effet photoélectrique. Notre choix s'est porté sur le détecteur à scintillations NaI (TI).

Les matériaux scintillants possèdent la propriété de *luminescence*. Lorsqu'ils sont exposés à une certaine forme d'énergie (lumière, chaleur, radiation etc...). Ils l'absorbent et puis la réémettent sous la forme de lumière visible. Si cette réémission se produit après l'absorption ou plus précisément endéans les  $10^{-8}$ sec (temps d'une transition atomique), le processus ainsi défini, est appelé *fluorescence*.

Les photons déposés seront détectés par un ordinateur sur la base de l'enregistrement et de la visualisation en temps réel afin de déterminer les mesures à chaque fois et d'atteindre des niveaux d'incertitude acceptables.

Le traitement et l'analyse du signal sont effectués par le logiciel Genie2000, qui permet de visualiser en temps réel la sortie de l'analyseur multicanal, à savoir un spectre avec en abscisse le numéro de canal et en ordonnée le nombre de traits dans cette chaîne. Afin d'identifier les dégradations radioactives mises en jeu.

On obtient un spectre qui présente un ensemble de pics distribués dans l'énergie qui ajoute à une substance. L'énergie de la pointe correspond à l'énergie du photon incident, ce qui vous permet d'identifier l'émetteur radioélectrique gamma. Les pics sont en réalité les gaussiens dont la largeur à la mi-hauteur varie avec l'énergie. Ceci est dû à une déformation par le détecteur. La surface des pics est alors proportionnelle à l'activité. Afin d'évaluer l'activité de l'échantillon, il est nécessaire de pouvoir, pour chacun des pics, localiser le centre de l'image ainsi que les limites de ce dernier. La recherche de pointe et le calcul des surfaces peuvent se faire manuellement ou en utilisant les algorithmes utilisés par Genie2000.

Les pics observés dans les spectres gamma proviennent souvent de l'état fondamental d'un nucléide et sa descendance. Lorsque le parent et ses filles nucléides ne sont pas en équilibre, une correction doit être appliquée à signaler les propres activités des nucléides.

Le logiciel d'analyse du « Génie 2000 » comprend un algorithme qui applique une correction sur la base d'un certain temps d'analyse, le temps de début d'acquisition écoulé directement et les informations des nucléides parent/fille contenues dans la bibliothèque installée et utilisée pour l'analyse (*GENIE 2000, manuel d'utilisation*).

Ces algorithmes fournissent une analyse complète des spectres de rayons gamma obtenus à partir de tout type de détecteur de rayons gamma. Ils sont accessibles à partir de l'environnement « Génie 2000 » interactif.

L'exécution de l'analyse utilise les données résidant dans la méthode d'accès de configuration (CAM) des structures de données pour les systèmes de la famille « Génie ».

Les résultats de chaque algorithme sont également stockés dans des fichiers CAM, ce qui permet de revoir les données résultantes d'un dossier complet de toute l'analyse. Cette méthode unique de stockage de données simplifie grandement l'administration système, le transfert de données, l'archivage de données, et toute nouvelle analyse nécessite l'archivage des spectres à une date ultérieure.

Le « Génie gamma » permet de réaliser les opérations suivantes :

- Une analyse spectrale interactive.
- Une correction d'efficacité.
- Une bibliothèque de corrélation NID bien localisée.
- Une correction des interférences et des calculs d'activité moyenne pondérée.
- La soustraction du bruit de fond permet la correction sur les pics de référence.

### II.2.3 Coefficient d'atténuation d'un rayon gamma

Lorsque les rayons gamma sont combinés en un faisceau étroit, le détecteur entre en collision après avoir passé un dispositif d'absorption avec une épaisseur ( $t$ ), et le résultat est une légère atténuation des rayons gamma, chaque réaction (production de paires, diffusion Compton et photoélectricité) supprimera le photon des rayons gamma des faisceaux par absorption ou diffusion éloignée de la direction du détecteur. La somme de ces probabilités qui se produisent à la longueur de l'unité d'absorption qui élimine les rayons gamma est appelée coefficient d'atténuation linéaire et exprimée par l'équation suivante[29] :

$$\mu(\text{total}) = \mu(\text{Photoélectrique}) + \mu(\text{Compton}) + \mu(\text{Production de paires}) \quad (\text{II.2})$$

Et pour calculer le degré d'atténuation du faisceau étroit de photon gamma, l'expression suivante est utilisée

$$I = I_0 e^{-\mu t} \quad (\text{II.3})$$

Où  $t$  est l'épaisseur de l'absorbeur,  $\mu$  est le coefficient d'atténuation,  $I_0$  est l'intensité de rayon gamma sans absorbeur et  $I$  est l'intensité du rayon gamma à une énergie spécifique après atténuation [29].

#### a) Le coefficient d'atténuation linéaire

La fraction de photons retirés d'un faisceau mono- énergétique (photons incidents atténués) par unité d'épaisseur de matériau est appelée : le coefficient d'atténuation linéaire ( $\mu_l$ ). Son complément est la partie transmise du faisceau. Il est exprimé numériquement en unités de  $\text{cm}^{-1}$  [46].

#### b) Le coefficient d'atténuation massique

La normalisation du coefficient d'atténuation linéaire par densité unitaire d'une matière produisant est le coefficient d'atténuation massique qui est constante pour un élément donné[46].

$$\mu_m = \mu_l / \rho \quad (\text{II.4})$$

Où  $\rho$  est la densité de milieu.

Pondérée on utilise l'équation :

$$\mu_m = \sum \mu_i w_i \quad (\text{II.5})$$

Si l'absorbeur est un composé chimique ou un mélange. Où  $w_i$  est la fraction en poids de la  $i^{\text{ème}}$  constituant atomique [47].

En utilisant la théorie et plusieurs tableaux et graphes du coefficient d'atténuation des rayons gamma (voir les annexes), et en comparant entre eux, ensuite nous avons calculé ces coefficients  $\mu$  par l'utilisation de  $\mu$  (massique et linéaire) par l'utilisation de la sommation de toutes les formules entre elles, ensuite la valeur moyenne de chaque énergie des radiations gamma est résumée dans le nouveau tableau suivant (voir Tableau II.2).

**Tableau II. 2:** Coefficients d'atténuation linéaire et de masse de NaI et Al

Radio-Isotopes	Energie Gamma,keV	Probabilité	$w_1=0,153$	$w_2=8,146$	$\mu_m = \mu_i w_i$	Reference (NIST)	$\mu_m (NaI)$ Moyen	$\mu_l(NaI)=\mu_m =3,67$ g/cm <sup>3</sup>	$\mu_l(NaI)$ Pour les basses énergies références	$\mu_l(Al), \text{cm}^{-1}$ (NIST)	$\mu_l(Al), \text{cm}^{-1}$ moyen
<b>(A)</b>											
<b><sup>238</sup>U parent</b>											
<sup>226</sup> Ra	186,10	3,51	0,123	0,500	0,4188	0,425	0,420	1,541	1,450	0,343	0,343
	241,98	7,12	0,110	0,250	0,2173	0,278	0,245	0,899	0,860	3,10	3,10
	295,21	18,15	0,102	0,163	0,1486	0,153	0,151	0,554	,0629	0,290	0,290
	351,92	3,51	0,095	0,130	0,1151	0,130	0,122	0,448	0,480	0,260	0,260
	609,31	44,10	0,77	0,079	0,0762	0,078	0,077	0,283		0,205	0,205
	768,63	4,76	0,069	0,070	0,0675	0,068	0,068	0,249		0,188	0,188
<sup>214</sup> Pb	295,10	19,24	0,102	0,160	0,1456	0,153	0,149	0,547	0,629	0,290	0,280
	325,00	37,20	0,099	0,145	0,1331	0,142	0,138	0,506	0,530	0,280	0,270
	351,93	35,34									
<sup>214</sup> Bi	609,30	46,36	0,077	0,079	0,0762	0,078	0,077	0,283		0,205	0,205
	1764,5	15,80	0,046	0,043	0,0420	0,043	0,043	0,158		0,126	0,126
	1120,3	15,10	0,057	0,053	0,0520	0,051	0,051	0,187		0,156	0,156
<sup>235</sup> U	185,70	57,25	0,125	0,510	0,4360	0,425	0,430	1,578	1,460	0,345	0,345
	142,70	10,96	0,128	0,600	0,5096	0,516	0,510	1,872	2,400	0,385	0,385
<b>(B)</b>											
<b><sup>232</sup>Th parent</b>											
<sup>228</sup> Ac	338,30	11,40	0,097	0,151	0,1379	0,140	0,139	0,510	0,500	0,274	0,265
	911,20	27,70	0,065	0,060	0,0589	0,062	0,060	0,220		0,174	0,174
	969,80	5,20	0,062	0,058	0,0565	0,059	0,058	0,213		0,171	0,171
<sup>212</sup> Bi	727,00	11,80	0,075	0,072	0,0709	0,071		0,257		0,197	0,193
<sup>212</sup> Pb	115,18	0,62	0,146	1,800	1,4913	1,500	1,495	5,487	4,300	0,430	0,430
	300,09	3,40	0,101	0,162	0,1475	0,153	0,150	0,550	0,600	0,285	0,275
	238,60	43,60	0,117	0,150	0,2200	0,190	0,202	0,752	0,866	0,293	0,300
<sup>208</sup> Tl	583,20	84,50	0,079	0,080	0,0731	0,081	0,077	0,283		0,215	0,215
	2651,0	99,79	0,038	0,039	0,0378	0,038	0,038	0,140		0,054	0,054
<sup>228</sup> Ra	338,32	11,26	0,097	0,151	0,1372	0,140	0,139	0,510	0,500	0,274	0,274
	911,07	26,60	0,065	0,060	0,0589	0,062	0,060	0,220		0,175	0,175
	969,11	16,23	0,062	0,058	0,0565	0,059	0,058	0,213		0,172	0,172

<b>(C)</b>											
<sup>60</sup> Co	1173,0	100,0	0,057	0,055	0,0527	0,054	0,0530	0,195		0,156	0,156
<sup>60</sup> Co	1332,0	100,0	0,052	0,050	0,0488	0,050	0,0495	0,182		0,145	0,145
<sup>134</sup> Cs	604,70	97,10	0,077	0,079	0,763	0,079	0,078	0,286		0,210	0,210
	795,50	85,40	0,067	0,065	0,0649	0,065	0,065	0,239		0,183	0,183
<sup>137</sup> Cs	661,60	85,00	0,070	0,075	0,0720	0,075	0,0735	0,270		0,196	0,196
<b>(D)</b> <sup>40</sup> K	1460,8	10,66	0,050	0,045	0,0384	0,042	0,040	0,1468		0,137	0,137

## II.2.4 Propriétés d'un détecteur

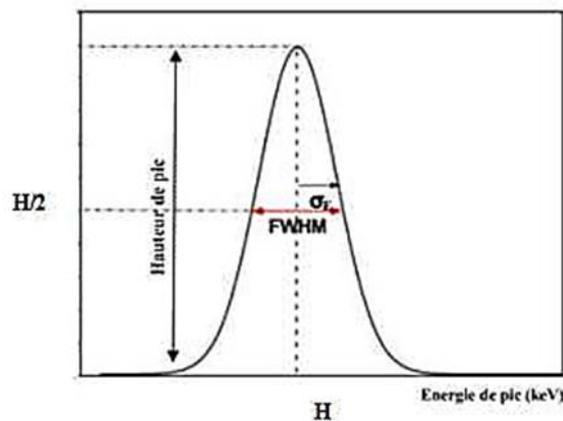
### a) La résolution en énergie

La qualité d'une chaîne de spectrométrie est donnée par sa résolution, c'est-à-dire sa possibilité de différencier entre 2 types d'énergies voisines. La résolution est définie par la largeur de l'impulsion à mi-hauteur (FWHM : Full Width at Half Maximum) et dépend du type de détecteur ainsi que de l'énergie considérée (figure II.11) [29]. Dans le cas idéal, la forme du pic est parfaitement gaussienne, et la résolution est liée à l'écart-type  $\sigma_E$  de la distribution, comme indiquée dans l'équation :

$$\delta E = \sqrt{8 \ln 2} \cdot \sigma_E = 2,35 \cdot \sigma_E \quad (\text{II.6})$$

Notons qu'il est d'usage de définir une résolution relative  $R$  (exprimée en %) comme étant le rapport de la résolution FWHM à l'énergie du pic (Équation II. 7)

$$R = \frac{\delta E}{E} \quad (\text{II.7})$$



**Figure II. 11:** Définition de la résolution pour un pic gaussien

La résolution  $\delta E$  varie avec l'énergie des photons gamma. Pour les scintillateurs ou les détecteurs à semi-conducteurs, la résolution est la somme de plusieurs contributions comme la fluctuation statistique, le bruit électronique, et la dispersion dans la collecte des charges (semi-conducteur) ou des photons (scintillateur), etc. ... comme indiqué dans l'équation (II.8) [29].

$$(\text{FWHM})_{\text{totale}}^2 = (\text{FWHM})_{\text{statistique}}^2 + (\text{FWHM})_{\text{bruit}}^2 + (\text{FWHM})_{\text{dispersion}}^2 + \dots \quad (\text{II.9})$$

**b) L'efficacité (ou rendement de détection)**

Parmi toutes les particules émises par la source, une fraction seulement arrive dans le détecteur, et parmi celles-ci, toutes n'interagissent pas dans son volume utile (cas des photons en particulier). Pour accéder au nombre de particules émises par la source, il faut donc connaître l'efficacité du détecteur utilisé pour les particules détectées.

L'efficacité d'un instrument définit sa capacité à délivrer un signal par rapport à la quantité de particules présentes dans le champ de radiations.

L'efficacité de détection dépend également de la géométrie du détecteur et de sa forme, elle dépend aussi de la distance entre la source et le détecteur, et de l'angle solide sous-tendu par le détecteur vu depuis la source.

# **Chapitre III**

***DETERMINATION DE LA RADIOACTIVITE ISSUE  
DES ALIMENTS ETUDIES***

### III.1 Introduction

Les mesures de la radioactivité dans l'environnement et dans les denrées alimentaires sont extrêmement importantes pour contrôler les niveaux de rayonnement auxquels l'humanité est directement ou indirectement exposée.

Un autre fait important est que l'importation d'aliments contaminés de toute région ayant subi un accident nucléaire peut avoir des effets indirects sur la santé des personnes dans le monde.

### III.2 Procédure expérimentale

Quatre-vingt-trois échantillons de différents types des aliments importés ont été recueillies à partir des marchés locaux dont lesquels on a :

- Lait infantile
- Les céréales
- Lait en poudre.
- Café et thé
- Les fruits secs et frais
- Les légumes
- Viande et poisson
- Les épices
- Et d'autres aliments provenant de différents pays et marques.

Les 83 échantillons sont répertoriés dans le tableau suivant :

**Tableau III 1:** Liste des échantillons

N° Ordre	Marque	Pays d'origine
<i>Lait Infantile</i>		
S1	Aptamil 1	France
S2	Aptamil 2	France
S3	Biomil	Belgique
S4	Celia Expr	France
S5	Celia Dvlp	France
S6	France Lait	France

S7	France Baby	France
S8	Gastrofix	Belgique
S9	Guigoz	France
S10	Modilac	Espagne
S11	Nactalia	France
S12	Nursie	France
<i>Les Céréales</i>		
S13	Biomil Céréales (Riz+Maïs+Dattes)	Belgique
S14	Biomil Céréales (08 Céréales)	Belgique
S15	Biomil Céréales (Blé)	Belgique
S16	Riz Star	Chine
S17	Riz	Thaïlande
S18	Riz Basmati	Inde
S19	Pois Chiche Dylia	Espagne
S20	Pois Chiche	Mexico
S21	Haricots Blanc Gold	Espagne
S22	Haricots	Canada
S23	Lentilles Borjot	Nouvelle-Zélande
S24	Lentilles	Canada
S25	Lentilles Orange	Turquie
S26	Blé Dur	Italie
S27	Blé Dur	France
S28	Blé Dur	Italie
S29	L'orge	France
S30	Indomie	Indonésie
S31	Orge	France
S32	Maïs Doux Doré Delmonte	Thaïlande
S33	Maïs Sweet Princess Anne	Hongrie
S34	Maïs	Argentine
S35	Cacahouète	Chine
<i>Lait En Poudre</i>		
S36	Nestlé Gloria	Nouvelle-Zélande
S37	Celia	France

S38	Loya	Suisse
S39	Candia	France
S40	Borjot	Nouvelle-Zélande
S41	Fassmil	Argentine
<i>Café</i>		
S42	Nescafé Classique	France
S43	Nescafé 3en1 Crème	Suisse
S44	Carte Noire	France
S45	Maxwell House	France
<i>The</i>		
S46	Barari	Sri Lanka
S47	El Marawan	Chine
S48	El Marawan Targui	Chine
S49	El Rakim	Chine
S50	Aigle	Chine
<i>Fruits Secs</i>		
S51	Raisins Secs	Inde
S52	Raisins Secs	Iran
S53	Raisins Secs	Sud-Afrique
S54	Pruneaux	France
S55	Abricots Séchés Akram	Turquie
S56	Abricots Séchés Melika	Turquie
S57	Noix De Coco	Indonésie
S58	Noix De Coco	Vietnam
<i>Fruits Frais</i>		
S59	Kiwi	Italie
S60	Banane	Équateur
S61	Pomme	Italie
S62	Ananas En Tranche Délicias	Thaïlande
<i>Légumes</i>		
S63	Purée Vico	France
S64	Petit Poids Villazar	Espagne
S65	Petit Poids	Turquie

S66	Champignons De Paris Kingtom	Chine
S67	Champignons Blanchaud	France
S68	Ail	Chine
<i>Viande Et Poisson</i>		
S69	Viande	Brésil
S70	Bâtonnet De Poisson	Chine
S71	Fruits De Mer	Chine -France
S72	Thon À L'huile Végétale	Espagne
<i>Les Epices</i>		
S73	Safran	Inde
S74	Poivre Noir	Espagne
S75	Cannelle	Indonésie
S76	Gingembre	Inde
S77	Curcuma	Inde
S78	Additif Alimentaire	Espagne
<i>Autre Aliment</i>		
S79	Pâte A Tartiner	France
S80	Ketchup	Espagne
S81	Moutarde	France
S82	Levure Instantanée	Turquie
S83	Levure Instantanée	Turquie

Tous les échantillons sont séchés dans une étuve à une température allant de 80 à 110 °C pour assurer l'élimination complète de l'humidité pendant 24 heures. Le temps de séchage, en revanche, dépendait du type et de la quantité de matériel où il était supérieur à une journée pour certains des échantillons. Après refroidissement complet, ils sont broyés afin de les réduire en particules fines (état poudre). Cette étape est nécessaire pour analyser avec précision qualitativement et quantitativement les échantillons.

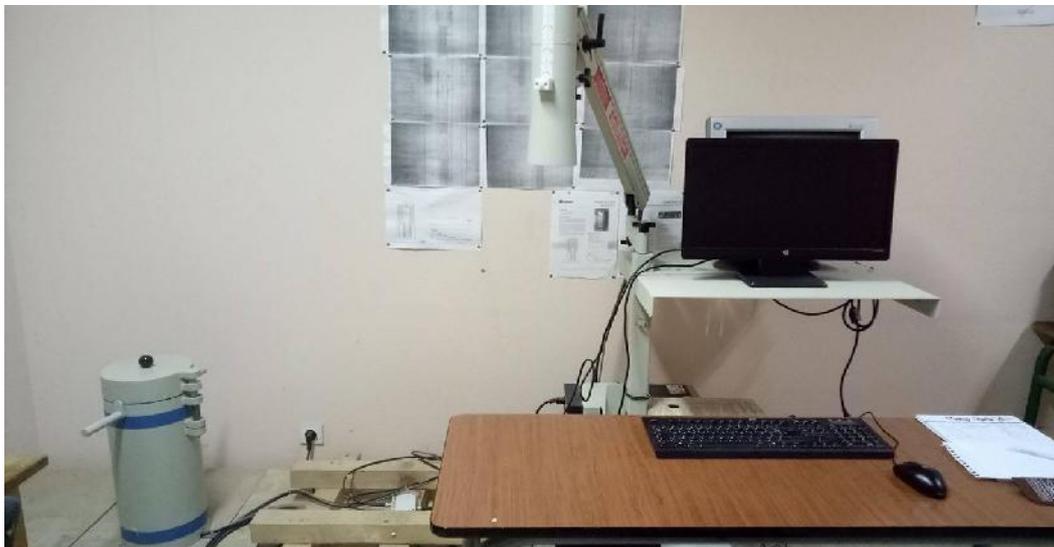
Concernant les échantillons de la viande et les poissons (matière biologique) ont été traité par lyophilisateur pour retirer l'eau (l'humidité), à l'aide de la surgélation puis une évaporation sous vide de la glace sans la faire fondre.

Les échantillons pondérés ont été placés dans des flacons en polyéthylène, chacun de 350 cm<sup>3</sup> de volume. Les flacons ont été complètement fermés pendant 4 semaines pour atteindre l'équilibre séculaire où le taux de déclin des filles devient égal à celui des parents.

Les mesures spectrométriques gamma ont été effectuées avec un détecteur de puits NaI (Tl) 2x2 pouces avec ses circuits électroniques (Canberra Inc.) (Figure III.1), et les documents du logiciel de vision Genie 2000[48].

Avant de déterminer l'activité des radionucléides dans les échantillons, un récipient cylindrique vide a été analysé pendant 24 heures sous une géométrie similaire, pour mesurer le spectre de fond dans le laboratoire de mesure. Ce spectre est nécessaire pour établir un niveau de contexte élevé utilisé pour déterminer les activités spécifiques des échantillons. Pour déterminer l'activité des radionucléides dans les échantillons de denrées alimentaires, Chaque échantillon a été placé sur un détecteur sous une forme bien préparée pour le même temps d'analyse (24 heures) et son spectre a été stocké dans un analyseur multicanal. Des mesures radiologiques ont été effectuées pour l'identification qualitative ainsi que pour la détermination quantitative des radionucléides présents dans les denrées alimentaires.

Tous les échantillons à l'étude ont été mesurés en trois poids différents pour chaque échantillon afin d'obtenir un processus analytique précis, ainsi que dans le même tube vide et dans les mêmes conditions.



*Figure III. 1: Dispositif expérimental*

L'accent était mis sur la détermination de l'activité de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{137}\text{Cs}$ . Les radionucléides filles indiqués dans les éléments naturels de la désintégration radioactive sont les suivants : pour  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ) sont  $^{214}\text{Pb}$  et  $^{214}\text{Bi}$ , pour  $^{232}\text{Th}$  sont  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ ,  $^{212}\text{Pb}$  et  $^{228}\text{Ac}$ , et un seul pic photo (1460 keV) est mesuré directement pour  $^{40}\text{K}$ , les  $^{137}\text{Cs}$  mesurés via la raie

d'énergie (662 keV). Dans la série de l'uranium, le segment de chaîne de désintégration à partir du radium (Ra) est radiologique le plus important et, par conséquent, il est souvent fait référence au radium au lieu de l'uranium.

### III.3 Méthode de calcul

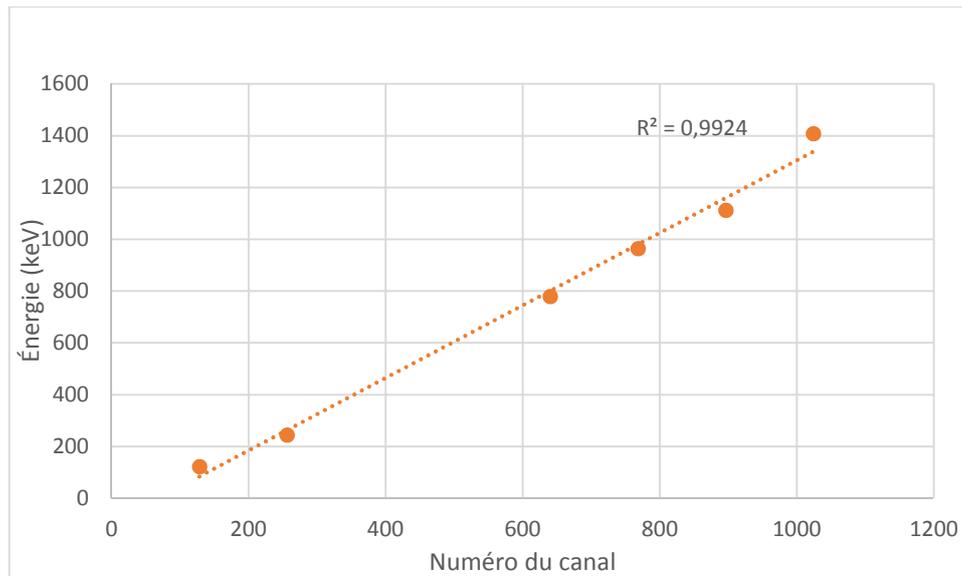
Deux étapes avant toutes les mesures sont nécessaires : l'étalonnage en énergie pour les analyses qualitatives et l'étalonnage de l'efficacité pour les analyses quantitatives.

#### III.3.1 Étalonnage en énergie

L'étalonnage de l'énergie a pour objet d'obtenir une relation entre le pic du spectre et l'énergie des rayons gamma correspondante. L'étalonnage de l'énergie est accompli en mesurant le spectre d'une source émettant des rayons gamma d'énergie connue avec précision et en comparant la position de crête mesurée avec l'énergie. Quelle que soit la source utilisée, elle doit couvrir toute la plage sur laquelle le spectromètre doit être utilisé. La source standard de  $^{152}\text{Eu}$  avec une activité de 4001kBq et une demi-vie de 13,542 ans a été utilisée pour l'étalonnage de l'énergie ; le spectre a été mesuré pendant un temps suffisamment long (86 400 s) pour obtenir de bons pics de précision statistique utilisés pour l'étalonnage. Le processus d'étalonnage consiste alors à fournir une liste de pics d'étalonnage à utiliser avec l'énergie réelle tableau III.2.

**Tableau III 2:** Numéros de canaux correspondants aux énergies gammas du spectre de la source  $^{152}\text{Eu}$

<b>Énergie (keV)</b>	121,78	244,7	778,90	964,079	1112,08	1408,01
<b>Numéro du canal</b>	128	256	640	768	896	1024



**Figure III. 2:** Courbe d'étalonnage en énergie

### III.3.2 Calcul de l'efficacité totale

Pendant le processus d'étalonnage pour trouver l'efficacité du détecteur, la plupart des études ont utilisé un radionucléide  $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$  ou  $^{241}\text{Am}$  ; ces radionucléides ont une ou deux photo piques pour l'étalonnage. Alors que les radionucléides filles énumérés ci-dessus ont des lignes d'énergie (pic photoélectriques) éloignées du site des lignes d'énergie des radionucléides utilisées pour l'étalonnage.

En général, la plupart des études ont utilisé pour le spectre d'énergie des rayons gamma dans la gamme, de 40 keV à 2651 keV ( $^{208}\text{Tl}$ ), la différence entre  $^{137}\text{Cs}$  (662 keV) et  $^{208}\text{Tl}$  (2651 keV) est d'environ (1989 keV), d'autre part, la différence d'efficacité est de 0,20 à 0.90. Ainsi, pour des étalonnages précis, des étalons multi-radionucléides doivent être utilisés pendant l'étalonnage ou la méthode de calcul de l'efficacité doit être utilisée en utilisant les formules suivantes[49] :

$$\xi = G \cdot M \cdot I \quad (\text{III.1})$$

$$1 - G = (\pi r^2) / (4\pi R^2) \quad (\text{III.2})$$

Où,  $G$  est la fraction de l'espace que subit le détecteur (à moins que le détecteur entoure complètement la source, le facteur d'angle géométrique solide est inférieur à 1),  $r^2$  est la zone du trou dans la face du détecteur, et  $4 R^2$  est la zone de la sphère avec un rayon égal à la distance de la source au trou (pour le détecteur de forme de puits).

$$1 - G = (\pi \times 0,375 \text{ pouce} \times 0,375 \text{ pouce}) / (4 \times \pi \times 1,44 \text{ pouce} \times 1,44 \text{ pouce}) \\ = 0,017, \text{ and } G = 0,983$$

$$I = \exp - (\mu_1 \times d) \quad (\text{III.3})$$

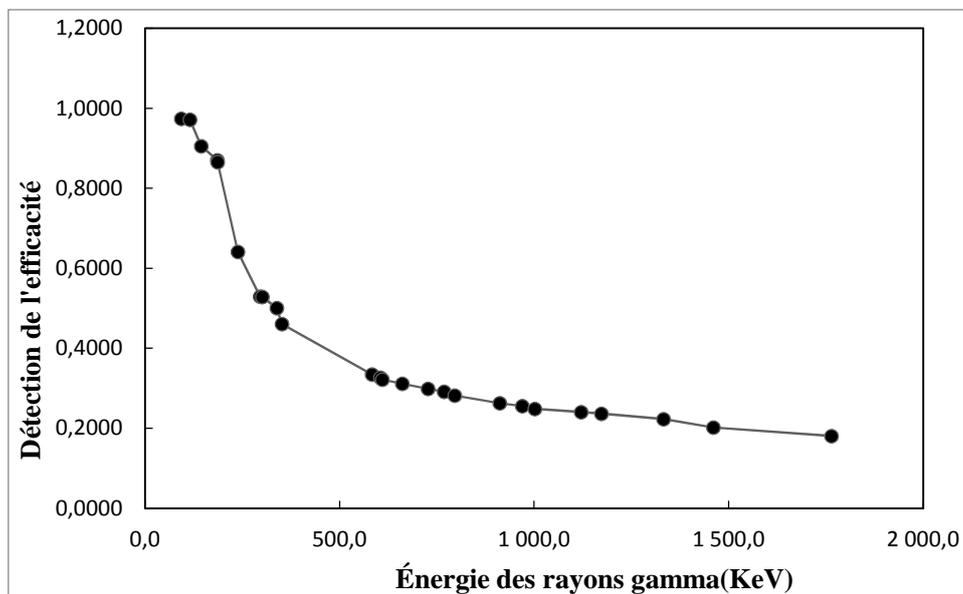
Où, I est fraction des photons transmis par les matériaux intermédiaires qui atteignent la surface du détecteur,  $\mu_1$  est le coefficient d'atténuation linéaire pour les rayons gamma dans l'aluminium et  $d = 0,025 \text{ cm}$  (0,010 pouce), l'épaisseur du récipient en aluminium.

La fraction des photons absorbés par le détecteur M est calculée en soustrayant de 1 la fraction qui traverse le détecteur :

$$M = 1 - \exp - (\mu_2 \times d) \quad (\text{III.4})$$

Où,  $\mu_2$  est le coefficient d'atténuation linéaire pour les rayons gamma dans NaI (cristal), et  $d = 1,422 \text{ cm}$  (0,56 pouce), la distance minimale parcourue dans NaI (Tl) au fond du puits, en utilisant les coefficients d'atténuation de masse des littératures[50].

Le calcul des valeurs  $\mu_1$  et I, M ont été effectués et présentés dans le tableau (III.3), où,  $G = 0,983$  comme elle est indiquée ci-dessus, et nous avons finalement effectué les efficacités de comptage du détecteur en fonction de l'énergie de pic photoélectrique de chaque radionucléide présenté dans cette étude, comme illustré dans la figure III.1 et le tableau III.2.



**Figure III. 3:** Efficacité du détecteur NaI (Tl) 2x2[51]

**Tableau III 3:** Efficacité énergétique des radionucléides du détecteur NaI (TI) 2x2 puits (Canberra Inc.)

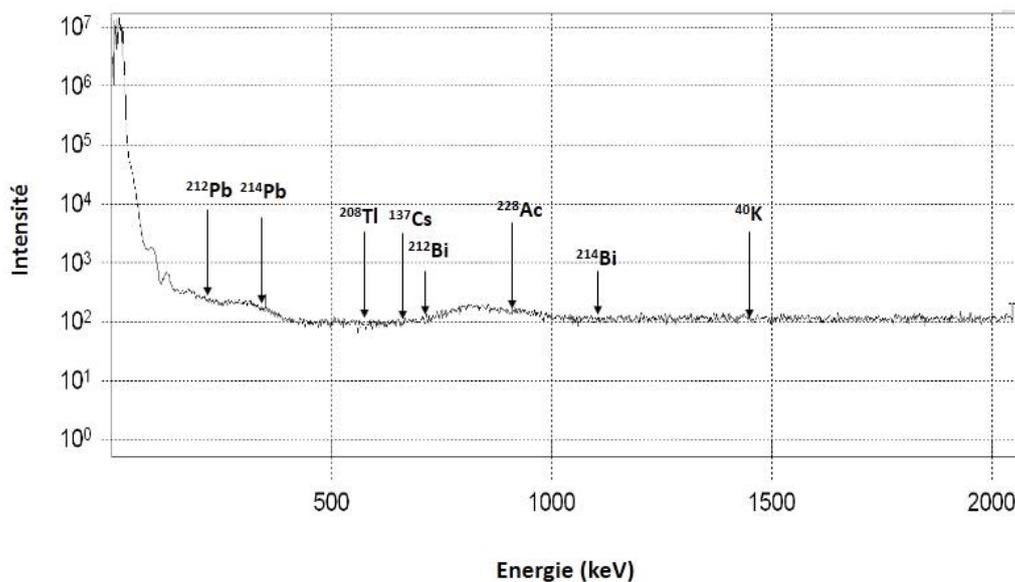
Radionucléides	Energie (keV)	%	=G*M*I
<b><sup>214</sup>Pb</b>	242	0,07120	0,632
	295,2	0,19240	0,529
	351,9	0,35100	0,357
	785,9	0,00110	0,284
<b><sup>214</sup>Bi</b>	768	0,04760	0,29
	609,3	0,46300	0,322
	806	0,0123	0,272
	934	0,0321	0,26
	1120	0,0169	0,241
	1238	0,0594	0,223
	1281	0,0147	0,22
	1378	0,0411	0,216
	1385	0,0078	0,215
	1401	0,0139	0,214
	1408	0,0248	0,213
	1509	0,0219	0,205
	1661	0,015	0,197
	1729	0,0305	0,194
	1765	0,159	0,192
	1847	0,012	0,178
<b><sup>212</sup>Bi</b>	727	0,11800	0,302
	785	0,002	0,284
	1620	0,0275	0,201
<b><sup>212</sup>Pb</b>	115	0,00620	0,97
	239	0,03310	0,64
<b><sup>228</sup>Ac</b>	129	0,01290	0,93
	209	0,044	0,78
	270	0,036	0,58
	328	0,032	0,51
	338	0,11300	0,48
	410	0,0213	0,35
	795	0,046	0,279
	912	0,27700	0,263
	965	0,052	0,258

	969	0,16200	0,255
$^{208}\text{Tl}$	583,2	0,84500	0,324
$^{40}\text{K}$	1460,8	0,1066	0,212
$^{137}\text{Cs}$	661,6	0,85000	0,31200
$^{60}\text{Co}$	1173,00	0,99900	0,23000
	1332,00	0,99982	0,218

### III.4 Identification des radionucléides

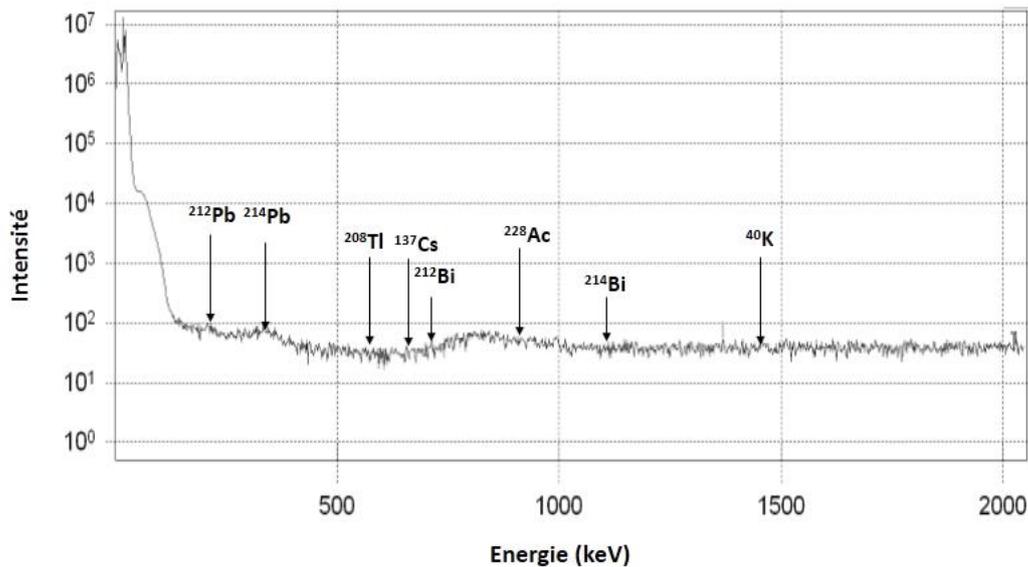
L'analyse des spectres gamma nécessite également des informations sur les radiations de fond. Ces mesures ont été effectuées avant que les mesures des échantillons aient été lancées et évaluées par rapport aux précédentes mesures de fond. L'identification et la détermination des activités pour différents radionucléides doivent également inclure la connaissance de ce que le pic dans les spectres fiables et comment on doit se comporter afin d'obtenir des mesures précises du plus grand nombre possible de radionucléides apparentés.

La Figure III.4 ci-dessus, montre le spectre de bruit de fond obtenu au niveau de notre laboratoire de Spectrochimie et pharmacologie structural (LSPS), la mesure du bruit de fond à l'intérieur du château pour la détermination de la limite de détection. La plupart des radioéléments présents dans le spectre sont les descendants des familles radioactives naturelles  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , avec le radionucléide  $^{40}\text{K}$ .



*Figure III. 4: Spectre de bruit de fond (LSPS).*

L'analyse de chaque échantillon par spectrométrie gamma donne naissance à un spectre donnant le nombre de coups enregistrés par seconde en fonction de l'énergie des rayons gamma émis par les radionucléides (figure III.5). Après la mesure et la soustraction du bruit de fond, l'activité de chaque radionucléide dans les échantillons mesurés est quantifiée en (Bq/kg) en utilisant la relation (III. 5).



*Figure III. 5: Exemple de spectre d'échantillon d'aliment*

#### ▪ Mesure de $^{238}\text{U}$ par spectrométrie gamma

En raison  $^{238}\text{U}$  est un émetteur gamma très pauvre, des mesures directes de celle-ci sont impossibles dans les échantillons environnementaux. Il est habituellement déterminé par ses descendants après équilibre. Les descendants les plus utilisés sont  $^{234}\text{Th}$  et  $^{234\text{m}}\text{Pa}$ .

$^{234}\text{Th}$  est presque toujours en équilibre avec  $^{238}\text{U}$ , il émet des photons de faible énergie avec une faible probabilité d'émission : 63,29keV (3.8%), 92,35keV (2,72%) et 92,78keV (2,69%), à la raie 92,5keV on a un pic doublet est souvent perturbé par rayons X, qui dans la plupart des cas, il est fiable pour des mesures absolues. Pour l'analyse des photons de la raie 63,29keV de faible énergie, nécessite l'utilisation des techniques de simulation de Monte Carlo (ils ont montré comment il est possible de contrôler l'auto-absorption pour ce pic) et des détecteurs spéciaux [52, 53].

- **Mesure de  $^{226}\text{Ra}$  par spectrométrie gamma**

$^{226}\text{Ra}$  est un émetteur gamma avec sa raie principale de gamma à 186,1keV. Bien que la probabilité d'émission soit assez faible, 3,516%, sans prétraitement de l'échantillon, mais le problème est l'interférence entre cette raie et la raie 185,7keV avec une probabilité d'émission de 57,25% de  $^{235}\text{U}$ , de sorte que ces lignes ne peuvent pas être utilisées pour des mesures absolues.

Pour cette raison, on utilise une méthode indirecte, elle consiste à mesurer les descendants du  $^{222}\text{Rn}$  fille qu'est un gaz très mobile avec une demi-vie de 3,8235 jours. Lors de la préparation de l'échantillon, il est inévitable que certaines au moins  $^{222}\text{Rn}$  est perdu, ce qui signifie que tout l'équilibre séculaire possible est perturbé. Par conséquent, il est nécessaire de laisser les échantillons pour environ quatre semaines avant que les mesures soient prises afin d'assurer que l'équilibre séculaire est établi dans l'échantillon [53]. Ceci est important parce que les descendants du radon  $^{214}\text{Pb}$  et  $^{214}\text{Bi}$  fournissent la meilleure façon de mesurer avec précision l'activité  $^{226}\text{Ra}$  dans un échantillon.

- **Mesure de  $^{232}\text{Th}$  par spectrométrie gamma**

Le  $^{232}\text{Th}$  est mesuré à l'aide des raies du  $^{228}\text{Ra}$ , que ne peut pas être mesuré directement, mais grâce à sa fille  $^{228}\text{Ac}$ , et  $^{228}\text{Th}$  a un petit pic dans la région des rayons X (84.37keV), ce qui rend impossible de mesurer directement, il est toutefois possible d'accéder à l'activité  $^{228}\text{Th}$  par les filles, comme ( $^{208}\text{Tl}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ) ces radionucléides sont les descendants de  $^{220}\text{Rn}$  (Thoron) qui a une courte période de désintégration de 56s, ce qui rend l'équilibre séculaire atteint rapidement pour la famille de  $^{232}\text{Th}$ .

$^{232}\text{Th}$  a une petite raie de gamma (63,81keV), qui, cependant, est recouverte par la ligne 63.28keV gamma de  $^{234}\text{Th}$ . Cela peut causer des incertitudes dans la mesure du  $^{238}\text{U}$ , car il est difficile de compenser la contribution du  $^{232}\text{Th}$ .

Le  $^{40}\text{K}$  ainsi que le  $^{137}\text{Cs}$  sont déterminés en utilisant les raies 1460,80 keV (10,72%) et 661.6 keV (85,1%) respectivement.

### III.5 Calcul des activités gamma

Après avoir déterminé que les efficacités de comptage pour le détecteur dans les raies énergétiques appartiennent aux radionucléides présentés dans le tableau III.3, l'étape suivante consiste à obtenir les activités des éléments radioactifs en utilisant l'équation suivante :

$$A \text{ (Bq/kg)} = N / (\xi \cdot T \cdot I\gamma \cdot M) \quad (\text{III.5})$$

Où, A est l'activité, N comptes de pics nets (fond soustrait), l'efficacité de comptage du détecteur, T est le temps mesuré (Sec.), I est le rapport de branchement de l'émission gamma pour le mode de désintégration et M est la masse de l'échantillon (kg).

l'activité minimale détectable d'activité (MDA) pour les différents radionucléides est définie par [54, 55] :

$$\text{MDA (Bq/kg)} = \frac{2.71+4.65\sqrt{\text{NBG}}}{(\xi \cdot T \cdot I\gamma \cdot M)} \quad (\text{III.6})$$

Où NBG est le compte de fond dans la région considérée d'un radionucléide donné et les autres paramètres sont définis dans l'équation III.5. Dans le présent travail, toute activité inférieure à la MDA a été considérée comme inférieure à la limite de détection.

### III.6 Estimation des incertitudes

Dans les analyses de spectrométrie gamma, un résultat général peut être obtenu pour l'incertitude attendue associée à une grandeur donnée calculée en fonction d'un nombre quelconque de variables indépendantes. Si x, y, z, ..., sont des grandeurs mesurées directement ou liées aux variables connues, ..., alors l'écart type de toutes les quantités u dérivée de ces grandeurs peut être calculée par la relation :

$$\delta u^2 = \left(\frac{\delta u}{\delta x}\right)^2 \delta x^2 + \left(\frac{\delta u}{\delta y}\right)^2 \delta y^2 + \left(\frac{\delta u}{\delta z}\right)^2 \delta z^2 + \dots \quad (\text{III.7})$$

Où u = u, x, y, z, ...\_ représente la quantité dérivée, qu'ils doivent choisies indépendantes afin d'éviter l'effet de corrélation [29].

### III.7 Calcul de la dose efficace annuelle

Pour calculer la dose efficace annuelle due à l'ingestion de radionucléides naturels par les aliments consommés, nous avons utilisé la formule suivante [56] :

$$D = AIE \quad (\text{III.8})$$

Où, D est la dose efficace annuelle (Sv.an<sup>-1</sup>) à un individu en raison de l'ingestion de radionucléides, A l'activité des radionucléides dans l'échantillon ingéré (Bq.kg<sup>-1</sup>), I l'apport

annuel de chaque aliment ( $\text{kg}\cdot\text{an}^{-1}$ ) qui dépend d'un âge donné [57] et E du facteur de conversion de dose ingéré pour les radionucléides ( $\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$ ).

### III.8 Apport quotidien de radioactivité via la consommation de denrées alimentaires

L'apport quotidien est calculé en utilisant la relation donnée ci-dessous :

$$D_{\text{int}} = \frac{A \times I}{t} \quad (\text{III.9})$$

Où  $D_{\text{int}}$  est l'apport quotidien d'activité des radionucléides via la consommation des aliments, A est l'activité du radionucléide, I est la consommation annuelle moyenne de denrées alimentaires pour différentes catégories d'âge et t représente les jours d'une année, soit 365.

### III.9 Risque radiologique

Le risque radiologique est une quantité utilisée pour identifier les dangers pour la santé humaine dus à l'exposition aux radiations. Elle est directement liée à la dose efficace et estime la probabilité d'apparition d'un cancer au cours de la vie d'un individu exposé. Pour calculer le risque radiologique, nous avons utilisé l'équation suivante [58].

$$\text{Risk} = D_{\text{int}} \times \text{SF} \times t \quad (\text{III.10})$$

Où  $D_{\text{int}}$  est la consommation quotidienne moyenne d'un aliment exprimée en pico-Curie (pCi:  $1 \text{ Bq} = 27 \text{ pCi}$ ), SF est le facteur de pente (coefficient de risque de morbidité) exprimé en activité / risque (risque / pCi) et il est spécifique pour chaque radionucléide et t (365 jours) est la durée d'exposition.

### III.10 Les paramètres radiologiques

#### III.10.1 Les indices de risques externe et interne

Afin d'estimer les effets sanitaires de la radioactivité des radionucléides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , et  $^{40}\text{K}$ , leur activité est évaluée en une seule grandeur appelée indice de risque. Pour calculer l'indice de risque externe HI, l'objectif principal de cet indice est de limiter la dose de rayonnement maximale autorisée à  $1 \text{ mSv} / \text{an}$ , de sorte que le risque de rayonnement d'irradiation soit négligeable. L'indice de danger (HI) est calculé à partir de l'équation [59] :

$$\text{HI} = A_{\text{Ra}}/370 + A_{\text{Th}}/259 + A_{\text{K}}/4810 \quad (\text{III.11})$$

À partir de cette équation, il est supposé que 370Bq/kg de  $^{226}\text{Ra}$ , 259Bq/kg de  $^{232}\text{Th}$  et 4810Bq/kg de  $^{40}\text{K}$  produisent le même débit de dose gamma [17].

L'indice de risque interne ( $H_{in}$ ) est l'exposition interne au radon cancérigène et à sa descendance éphémère ( $^{222}\text{Rn}$  et  $^{220}\text{Rn}$ ), donné par la relation suivante [60] :

$$H_{in} = A_{Ra}/185 + A_{Th}/259 + A_K/4810 \quad (\text{III.12})$$

### III.10.2 Indice équivalent de radium ( $Ra_{eq}$ )

Le concept d'activité équivalente au radium ( $Ra_{eq}$ ) permet à un seul indice ou nombre de décrire la sortie gamma de différents mélanges de  $^{238}\text{U}$  (c'est-à-dire,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ ) dans un matériau [61]. Pour chaque échantillon en Bq/kg, est calculé en utilisant la formule suivante proposée par UNSCEAR en Bq/kg [62].

$$Ra_{eq} = A_{Ra} + 1,43 A_{Th} + 0,077 A_K \quad (\text{III.13})$$

### III.10.3 Indice représentatif de niveau

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 [63] :

$$I_\gamma = A_{Ra}/150 + A_{Th}/100 + A_K/1500 \quad (\text{III.14})$$

Où,  $A_{Ra}$ ,  $A_{Th}$ , et  $A_K$  en Bq/kg sont l'activité de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ , respectivement.

# **Chapitre IV**

## ***RESULTATS ET DISCUSSIONS***

## IV.1. Présentation des résultats obtenus et discussions

Tous les échantillons des aliments importés ont été analysés par spectrométrie gamma selon les procédures de préparation et d'acquisition décrites dans le chapitre précédent. Les résultats que nous avons obtenus et leurs interprétations sont exposés dans ce chapitre.

### IV.1.1. Évaluation des radionucléides dans le lait infantile en poudre importé consommé en Algérie et indices de risque radiologique

Les activités spécifiques des radionucléides, naturels sont calculées à partir de leur descendants, émetteurs de gamma ayant des probabilités d'émission significatives comme nous l'avons montré dans le chapitre III, et artificielles. Seules les activités supérieures à la limite de détection de la chaîne d'analyse sont prises en considération. Les activités spécifiques des descendants de  $^{238}\text{U}$  de  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{137}\text{Cs}$  ainsi que l'activité du radionucléide primordiale  $^{40}\text{K}$  pour les différents échantillons de lait infantiles sont donnés dans le tableau IV.1. Les valeurs résumées dans ce tableau permettent de comparer les radionucléides mentionnés ci-dessus.

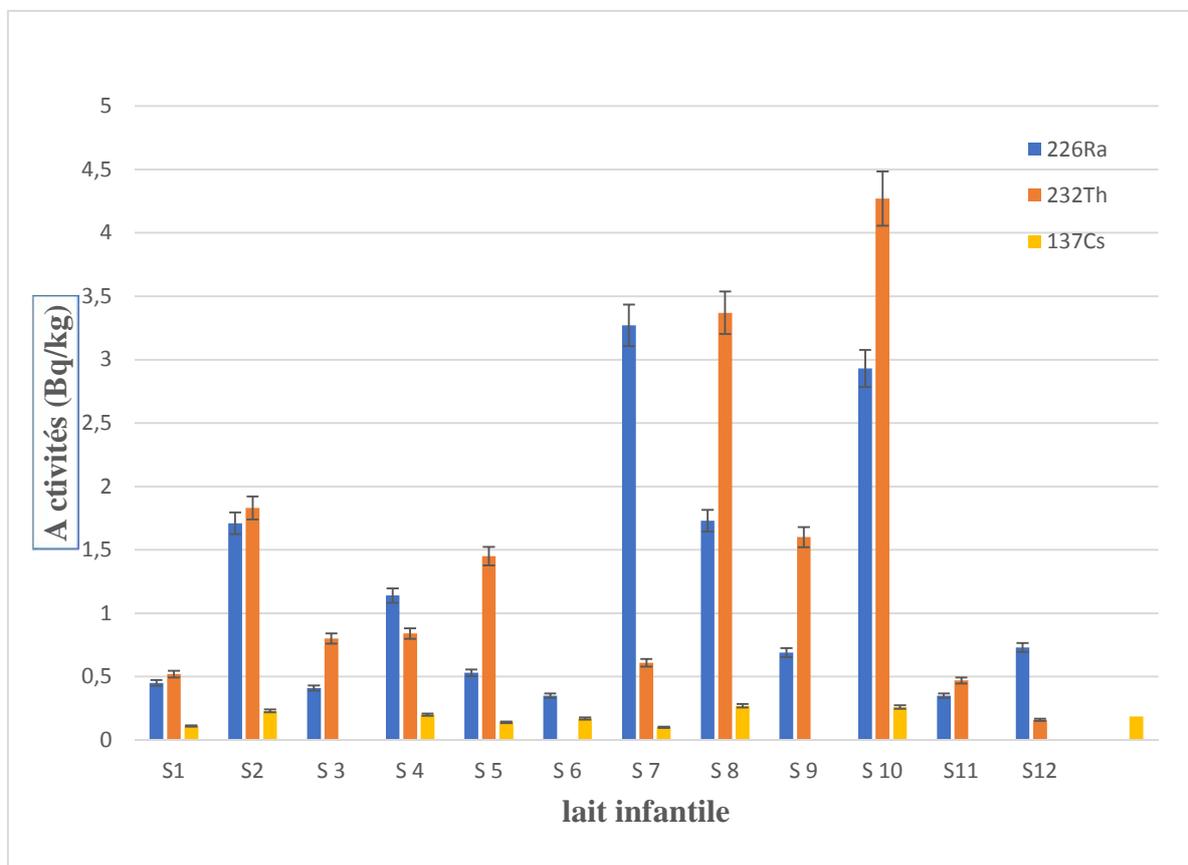
**Tableau IV 1:** Les activités des radionucléides dans le lait infantile en (Bq/kg)

Echantillons	Les activités spécifiques (Bq/kg)			
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$
<b>Lait infantile</b>				
<b>S1</b>	0,45 ± 0,02	0,52 ± 0,03	15,4 ± 0,77	0,11 ± 0,01
<b>S2</b>	1,71 ± 0,09	1,83 ± 0,09	19,3 ± 0,97	0,23 ± 0,01
<b>S3</b>	0,41 ± 0,02	0,8 ± 0,04	17,9 ± 0,90	-
<b>S4</b>	1,14 ± 0,06	0,84 ± 0,04	11,75 ± 0,59	0,2 ± 0,01
<b>S5</b>	0,53 ± 0,03	1,45 ± 0,07	29,4 ± 1,45	0,14 ± 0,01
<b>S6</b>	0,35 ± 0,02	-	-	0,17 ± 0,01
<b>S7</b>	3,27 ± 0,16	0,61 ± 0,03	-	0,1 ± 0,01
<b>S8</b>	1,73 ± 0,09	3,37 ± 0,17	17,6 ± 0,88	0,27 ± 0,01
<b>S9</b>	0,69 ± 0,03	1,6 ± 0,08	18,22 ± 0,91	-
<b>S10</b>	2,93 ± 0,15	4,27 ± 0,21	20,77 ± 1,04	0,26 ± 0,01
<b>S11</b>	0,35 ± 0,02	0,47 ± 0,02	12,33 ± 0,62	-
<b>S12</b>	0,73 ± 0,04	0,16 ± 0,01	-	-
<b>Moyenne</b>	1,19 ± 0,81	1,45 ± 0,96	18,07 ± 3,42	0,19 ± 0,06

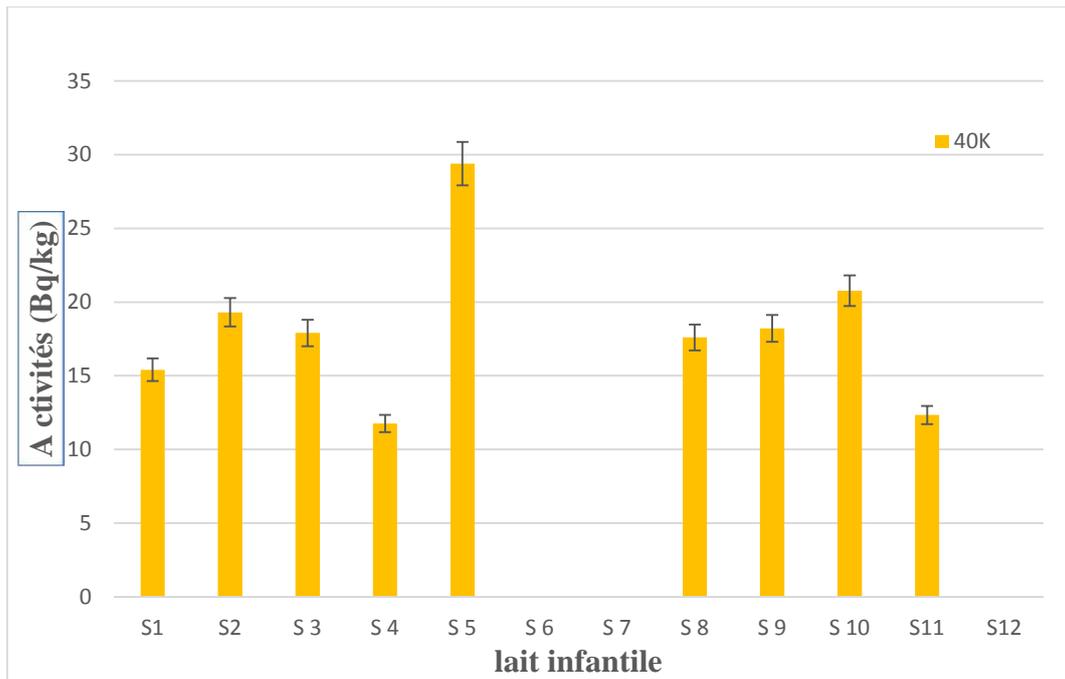
Les résultats des mesures et de l'analyse de douze échantillons de lait en poudre pour nourrissons ont été présentés sur les figures IV.1 et IV.2, qui incluent la valeur la plus élevée des activités correspondant aux radionucléides utilisés dans les calculs. Les valeurs d'activité de  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$  ont été considérées comme la valeur moyenne pour les activités indiquées de leur fille, tandis que pour  $^{40}\text{K}$  et  $^{137}\text{Cs}$  de sa valeur unique.

La teneur en  $^{137}\text{Cs}$  dans tous les échantillons est de l'ordre de la trace donc il ne présente aucun risque aux nourrissons.

Sur la figure IV.1, on peut voir que les activités du  $^{226}\text{Ra}$  dans cette étude étaient toujours détectables (au-dessus de la MDA).



**Figure IV. 1:** Activités  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{137}\text{Cs}$  avec leur incertitude pour 12 échantillons de lait en poudre pour nourrissons.



**Figure IV. 2:** Activités  $^{40}\text{K}$  avec incertitude pour 12 échantillons de lait en poudre pour nourrissons.

Ces valeurs d'activité moyennes sont de  $1,19 \pm 0,81 \text{ Bq. Kg}^{-1}$ ,  $1,45 \pm 0,96 \text{ Bq. Kg}^{-1}$ ,  $18,07 \pm 3,42 \text{ Bq. Kg}^{-1}$  et  $0,18 \pm 0,06 \text{ Bq. Kg}^{-1}$  pour  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{137}\text{Cs}$ , respectivement. Pour plus de détails, chaque valeur ci-dessus en tant que moyenne pour trois fois comptant dans différentes masses d'échantillons,  $^{40}\text{K}$  dans tous les échantillons présente les quelques niveaux d'activités spécifiques par rapport à ces valeurs dans les études présentées dans le tableau IV.2.

**Tableau IV 2:** Activités spécifiques de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  dans le lait en poudre pour certains pays et ses valeurs dans les pays d'où il est importé (Bq/kg).

Région	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	Les références
<b>Algérie</b>	$1,19 \pm 0,81$	$1,45 \pm 0,96$	$18,45 \pm 3,42$	<b>L'étude actuelle</b>
<b>Arabie Saoudite</b>	0,46	0,35	234	[64]
<b>Koweït</b>	0,33 – 0,98	0,33 -0,61	189 - 269	[65]
<b>Iran</b>	0,05	0,142	434	[66]
<b>Syrie</b>	-	-	129-435	[67]
<b>Jordan</b>	0,5-2,14	0,78-1,28	349-392	[68]
<b>Egypte</b>	0,44	-	47,25	[69]
<b>Nouvelle-Zélande</b>	0,149-0,186	0,147-1,66	594-605	[66]
<b>France</b>	0,05	0,142	434 ,1	[66]
<b>Malaisie</b>	$3,05 \pm 1,84$ (1,36 7,06)	2,55 (0,31 8,57)	99,1 (40,3 254)	[70]
<b>Arabie Saoudite</b>	9,64	6,77	74,5	[71]
<b>Nigeria</b>	$23,07 \pm 7,75$	$4,35 \pm 2,06$	831,66 54,83	[72]
<b>Inde</b>	$2,5 \pm 1,2$	$1,48 \pm 0,4$	$34,35 \pm 5,2$	[73]
<b>Arabie Saoudite</b>	$0,52 \pm 0,087$	$0,51 \pm 0,062$	$371,98 \pm 3,68$	[74]

Pour  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{232}\text{Th}$ , il a été constaté que certaines marques dépassaient un Bq. Kg<sup>-1</sup> (S2, S4, S5, S7, S8, S9, S10) tandis que d'autres marques ont moins d'un Bq. Kg<sup>-1</sup>, les niveaux d'activité sont plus élevés que ceux indiqués dans le tableau IV.2, mais l'activité du  $^{137}\text{Cs}$  dans certains échantillons est absente et dans les autres échantillons, elle est bien inférieure aux valeurs des autres pays et à la limite maximale autorisée.

La principale activité gamma détectée découle de  $^{40}\text{K}$  pour tous les échantillons de lait en poudre, comme le montre la figure IV.2. L'activité minimale de  $^{40}\text{K}$  est de  $11,75 \pm 0,59$  Bq.kg<sup>-1</sup> (S4) et la valeur maximale est de  $29,40 \pm 1,47$  Bq.kg<sup>-1</sup> (S5)

La dose efficace moyenne annuelle (D) a été calculée à l'aide de l'équation III.8 et des informations de la figure IV.2, IV.3 et les facteurs de conversion de dose pour les nourrissons ont été résumés dans le tableau IV.3, pour les nourrissons de moins d'un an et d'un an, pour  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{137}\text{Cs}$  respectivement, les valeurs des facteurs de conversion de dose référencées avec précision dans (ICRP-119 , 2012) [75], illustré dans le tableau F1, annexe F1.

La consommation de lait est le principal facteur d'estimation de la valeur de la dose d'ingestion efficace annuelle, les résultats sont présentés dans le tableau IV.4.

**Tableau IV 3:** Coefficients de dose efficace pour l'ingestion de radionucléides chez les nourrissons (Sv / Bq)

Age des nourrissons	Consommation du lait	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$
1 an	22,58 kg/an	$5,7 \times 10^{-6}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$5,2 \times 10^{-8}$	$1,1 \times 10^{-8}$
1-2 ans	33,87kg/an	$9,6 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$

**Tableau IV 4:** Dose efficace annuelle dans le lait infantile en poudre pour ingestion ( $\mu\text{Sv}/\text{an}$ )

Âge des nourrissons	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$
<b>D 1 an</b>	153,16	48,05	15,92	0,030
<b>D 1-2 ans</b>	38,69	20,27	19,29	0,049

La dose efficace moyenne totale due à l'ingestion annuelle de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{137}\text{Cs}$  provenant de l'ingestion de lait en poudre pour les nourrissons de moins d'un an ont été estimés à  $153,16 \pm 7,66 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ ,  $48,05 \pm 2,40 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ ,  $15,92 \pm 0,80 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$  et  $0,030 \pm 0,0015 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ . Pour les nourrissons d'un an, les valeurs étaient de  $38,69 \pm 1,93 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ ,  $20,27 \pm 1,01 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ ,  $19,29 \pm 0,96 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$  et  $0,049 \pm 0,0024 \mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ .

Le tableau IV.5 résume le D total pour chaque catégorie d'âge : 1 an et 1-2 ans, en comparaison avec les données publiées dans différents pays. Ces valeurs sont en accord avec les données publiées, car la plupart des valeurs chevauchent la plage des valeurs publiées. Les valeurs totales de D se situent également bien dans l'intervalle mondiale typique de D en raison de l'ingestion de sources de rayonnement entièrement naturelles signalées par l'UNSCEAR (= 200–800  $\mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ ). Ils sont également inférieurs au niveau recommandé par la CIPR pour D (= 1000  $\mu\text{Sv}.\text{an}^{-1}$ ) avec un rapport de 0,22 et 0,078 pour 1 an, 1–2 ans respectivement.

**Tableau IV 5:** Dose d'ingestion annuelle due à l'apport de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{137}\text{Cs}$  ( $\mu\text{Sv}/\text{an}$ ) dans les échantillons de lait en poudre pour nourrissons pour chaque catégorie d'âge par rapport aux données publiées dans différents pays

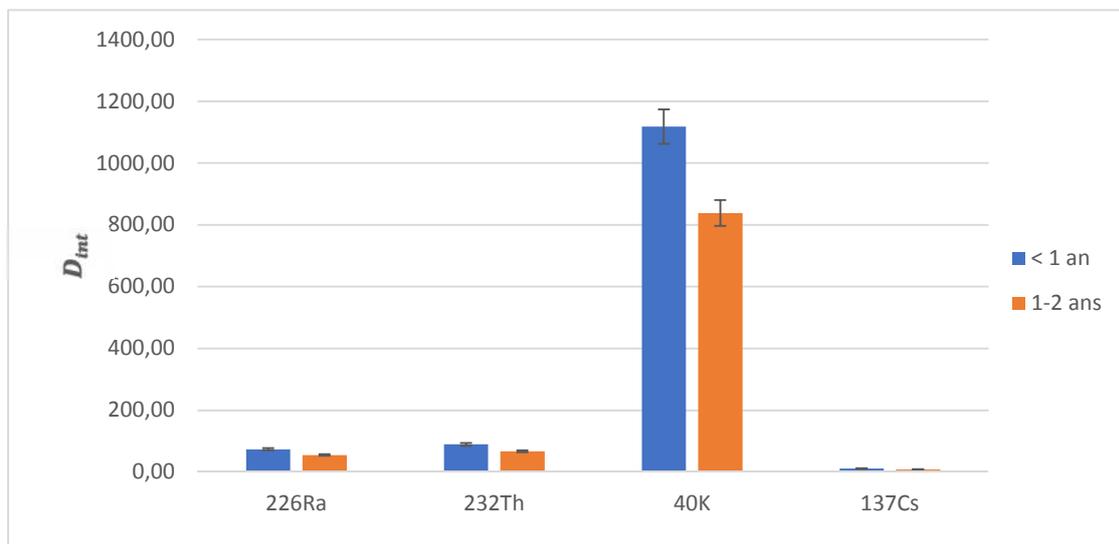
Âge (année)	$D$ ( $\mu\text{Sv an}^{-1}$ )					Pays	Littérature
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	Total		
1	48	36	325		409	Arabie Saoudite	[64]
	273,51	28,58	167,8		469,89	Malaisie	[76]
			223,36	1,08	224,44	Tunisie	[58]
	54	53	52		159	Arabie Saoudite	[74]
	153,16	48,05	15,92	0,03	217,16	Algérie	<b>L'étude actuelle</b>
1-2	15,84	9,45	44,42		69,71	Italie	[77]
	7	2	148		157	Arabie Saoudite	[64]
	23,22	56,64	128,47		208,33	Malaisie	[76]
			101,32	0,4	101,72	Tunisie	[58]
	70	34	230		334	Arabie Saoudite	[74]
	38,69	20,27	19,29	0,049	78,299	Algérie	<b>L'étude actuelle</b>

Dans le cas du calcul de la dose efficace moyenne totale, la quantité de lait ingérée par le bébé joue le rôle principal et doit alors être pris en compte lors de la détermination de la quantité de lait consommée. À cette fin, cette étude a divisé le volume de la bouteille (250 ml) en huit parties, chacune de 30 cc en volume, lorsqu'elle est remplie de lait en poudre ; le poids équivalent obtenu est de 2,24 g.

Le département de nutrition des services de nutrition infantile de l'hôpital de Tlemcen et le département du contrôle de la nutrition infantile ont recommandé que quatre doses de 30 cc

dans chaque biberon et sept tétées par jour soient suffisantes pour les nourrissons la première année, et six (30 cc) doses pour les enfants d'environ 1 an.

Ensuite, l'apport annuel pour les nourrissons de moins d'un an est de (2,24 g x 4 doses (120 cc) x 7 repas par jour x 360 jours = 22,579 kg). Ce montant pour la consommation annuelle de lait en poudre par les nourrissons est proche du montant qui a été approuvé par UNSCEAR 2000 et FAO/OMS [78],[79] et [80] tandis que pour les nourrissons d'un an; ce montant est de 33,868 Kg par an avec six doses. Lorsque le nourrisson atteint l'âge d'un an, la qualité de la nutrition change et généralement l'enfant prend un autre aliment et le nombre de biberons est divisé par deux, ce qui signifie que la nouvelle quantité ingérée est de 33,86 kg / 2 = 16,93 kg/an. Ce montant est également proche du montant approuvé par les organisations précitées (15 Kg/an).



**Figure IV. 3:** L'apport quotidien d'activité des radionucléides avec leur incertitude via la consommation de lait infantile en poudre (mBq).

Tel que présenté, les apports quotidiens de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$  et  $^{137}\text{Cs}$  sont de  $73,67 \pm 50,28$ ,  $89,53 \pm 60,69$ ,  $1118,14 \pm 450,56$  et  $11,44 \pm 5,46$  mBq pour l'âge 1 an, et  $55,23 \pm 37,7$ ,  $67,13 \pm 45,51$ ,  $838,36 \pm 337,82$  et  $8,57 \pm 4,1$  mBq pour les âges 1-2 ans, respectivement comme le montre la figure IV.4. L'apport de  $^{40}\text{K}$  est le plus élevé avec une valeur annuelle de 408,12 et 306 Bq pour l'âge : 1, 1-2 ans, respectivement, ce qui ne causer des inquiétudes du point de vue de la physique de la santé. En effet, le potassium est un élément essentiel de l'organisme et il est contrôlé de manière homéostatique par le métabolisme humain. En conséquence, la teneur en corps de  $^{40}\text{K}$  est largement déterminée par les caractéristiques

physiologiques et non par l'apport. Cependant, les apports annuels de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{137}\text{Cs}$  sont très faibles par rapport à ceux rapportés et bien adaptés à l'apport annuel UNSCEAR [78].

En utilisant l'apport quotidien moyen (pCi), nous avons calculé le risque radiologique sur la santé du nourrisson dû à la consommation du lait en poudre étudié. Le tableau IV.6 montre les valeurs estimées qui sont égales à  $8,73 \times 10^{-7}$  et  $6,54 \times 10^{-7}$  pour les nourrissons de moins de 1 an et les nourrissons de 1 à 2 ans respectivement. Ces valeurs sont conformes à la recommandation de l'excès de risque radiologique à vie mentionné dans le tableau IV.6 et qui est inférieur à la ligne directrice sur le risque de cancer pour la durée de vie excédentaire de  $1 \times 10^{-6}$  et  $1 \times 10^{-4}$  selon l'US EPA [81].

**Tableau IV 6:** Évaluation des risques dus aux radionucléides présents dans les échantillons de lait en poudre pour nourrissons

	Âge (an)	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	Risque Total
Apport quotidien moyen (pCi)	1	1,99	2,42	30,19	0,31	
	1-2	1,49	1,81	22,63	0,23	
Facteur de pente (risque / pCi)	-	$5,14 \times 10^{-10}$	$1,33 \times 10^{-10}$	$3,43 \times 10^{-11}$	$3,74 \times 10^{-11}$	
Risque	1	$3,73 \times 10^{-7}$	$1,17 \times 10^{-7}$	$3,78 \times 10^{-7}$	$4,22 \times 10^{-9}$	$8,73 \times 10^{-7}$
	1-2	$2,80 \times 10^{-7}$	$8,80 \times 10^{-8}$	$2,83 \times 10^{-7}$	$3,16 \times 10^{-9}$	$6,54 \times 10^{-7}$

#### IV.1.2 Mesure de la radioactivité dans les céréales consommées en Algérie et estimation de la dose efficace annuelle correspondante et du risque de cancer

Les 23 échantillons de céréales d'aliments importés ont été collectés sur les marchés locaux. Le tableau IV.6 présente les activités de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  dans les échantillons de céréales et représenté graphiquement sur la Figure IV.4. La détermination de  $^{232}\text{Th}$  a été effectuée via ses filles  $^{228}\text{Ac}$ , et pour  $^{238}\text{U}$  a été effectuée via ses filles  $^{214}\text{Bi}$  et  $^{226}\text{Ra}$ . L'activité de  $^{40}\text{K}$  a été déterminée via l'énergie à 1460,8 keV.

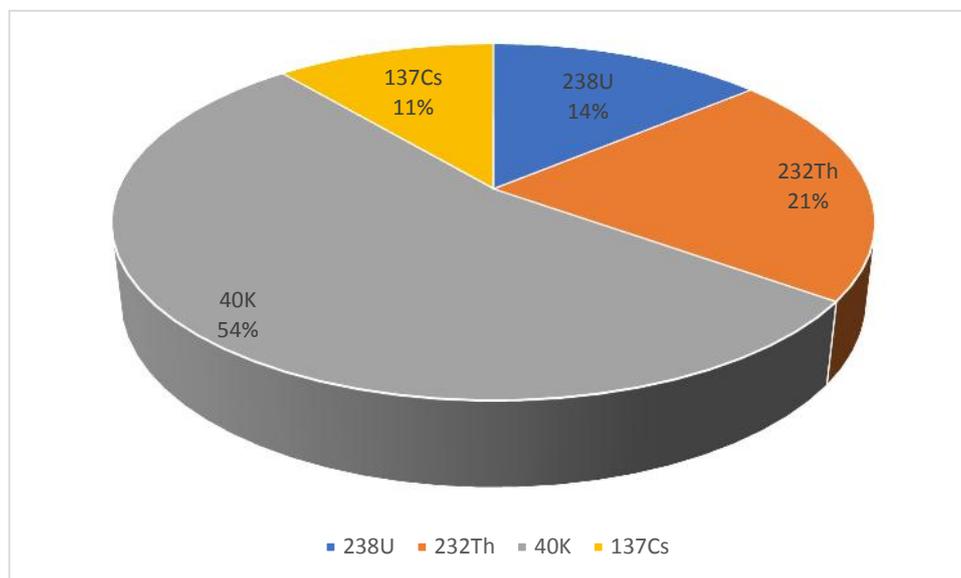
**Tableau IV 7:** Activités spécifiques des échantillons de céréales en Bq/kg.

N° Order	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs
<b>S13</b>	0,35 ± 0,02	0,53 ± 0,03	1,36 ± 0,07	0,28 ± 0,01
<b>S14</b>	0,36 ± 0,02	0,053 ± 0,03	1,64±0,08	0,13 ± 0,01
<b>S15</b>	0,60 ± 0,03	0,63 ± 0,01	1,19 ± 0,06	0,33 ± 0,02
<b>S16</b>	0,10 ± 0,004	0,32 ± 0,01	1,82 ± 0,09	0,15 ± 0,01
<b>S17</b>	-	0,28 ± 0,01	0,57 ± 0,03	0,16 ± 0,01
<b>S18</b>	0,36 ± 0,02	0,28 ± 0,02	0,58 ± 0,03	-
<b>S19</b>	0,02 ± 0,001	0,52 ± 0,03	1,02 ± 0,05	-
<b>S20</b>	0,27 ± 0,01	0,44 ± 0,03	0,77 ± 0,04	0,19 ± 0,01
<b>S21</b>	0,31 ± 0,01	0,63 ± 0,04	1,47 ± 0,07	0,18 ± 0,01
<b>S22</b>	0,43 ± 0,02	0,67 ± 0,03	0,13±0,006	0,28 ± 0,01
<b>S23</b>	0,52 ± 0,03	0,75 ± 0,04	0,83 ± 0,04	0,11 ± 0,01
<b>S24</b>	0,37 ± 0,02	0,36 ± 0,02	1,47 ± 0,07	0,15 ± 0,01
<b>S25</b>	-	0,83 ± 0,04	0,28 ± 0,01	0,12 ± 0,01
<b>S26</b>	-	0,70 ± 0,03	1,75 ± 0,09	0,24 ± 0,01
<b>S27</b>	0,24 ± 0,01	0,74 ± 0,04	-	0,33 ± 0,02
<b>S28</b>	0,24 ± 0,01	0,54 ± 0,03	0,22 ± 0,01	0,35 ± 0,02
<b>S29</b>	0,72 ± 0,03	1,59 ± 0,08	1,66 ± 0,08	-
<b>S30</b>	-	0,44 ± 0,02	1,02 ± 0,05	-
<b>S31</b>	-	1,23 ± 0,06	1,79 ± 0,09	0,35 ± 0,02
<b>S32</b>	-	0,385 ± 0,02	0,073 ± 0,004	0,17 ± 0,01
<b>S33</b>	-	0,29 ± 0,01	1,46 ± 0,07	0,24 ± 0,01
<b>S34</b>	-	0,44 ± 0,02	1,02 ± 0,05	0,19 ± 0,01
<b>S35</b>	0,26 ± 0,1	1,36 ± 0,07	0,29 ± 0,01	0,20 ± 0,01
<b>Moyenne</b>	0,34 ± 0,13	0,61 ± 0,24	1,08 ± 0,48	0,22 ± 0,07

La teneur des céréales en radionuclides est de 14%, 21%, 54%, et 11% pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , et  $^{137}\text{Cs}$  respectivement comme illustre la figure IV.4.

Tous les échantillons se sont révélés contenir une teneur détectable de  $^{40}\text{K}$  dans une plage de  $0,073 \pm 0,004$  à  $1,82 \pm 0,09 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Le  $^{226}\text{Ra}$  et le  $^{232}\text{Th}$  étaient détectables dans la plupart des échantillons.

L'activité minimale détectable de  $^{226}\text{Ra}$  était de  $0,02 \pm 0,001 \text{ Bq.kg}^{-1}$  dans S19 et le maximum était de  $0,72 \pm 0,03 \text{ Bq.kg}^{-1}$  dans l'échantillon S29. L'activité minimale détectable de  $^{232}\text{Th}$  a été trouvée à  $0,053 \pm 0,03 \text{ Bq.kg}^{-1}$  dans S14 et maximale était de  $1,59 \pm 0,08 \text{ Bq.kg}^{-1}$  dans l'échantillon S29. Pour le  $^{137}\text{Cs}$  est non détectable dans les échantillons S18, S19, S29, et S30, tandis que les autres échantillons contenir une teneur de  $0,11 \pm 0,01$  à  $0,35 \pm 0,02 \text{ Bq. Kg}^{-1}$ .



**Figure IV. 4:** L'activité moyenne de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , et  $^{137}\text{Cs}$  dans les échantillons de céréales.

Afin de comparer nos résultats avec ceux des autres pays, les activités des mêmes céréales dans différents pays sont présentées dans le tableau IV.7.

Les activités de  $^{40}\text{K}$  dans les céréales importées mentionnées en Algérie sont inférieures à celles des autres pays. Les activités de  $^{226}\text{Ra}$  dans certaines denrées alimentaires (maïs, haricots et orge) sont supérieures aux valeurs déclarées dans différents articles. Les activités de  $^{232}\text{Th}$  semblent être supérieures aux valeurs déclarées. De plus, ces résultats sont supérieurs aux valeurs qui ont été déclarées comme valeurs de référence [82].

**Tableau IV 8:** Activités de radionucléides dans les céréales dans différents pays (Bq.kg<sup>-1</sup>).

<i>Pays</i>	<i>Échantillon</i>	<sup>40</sup> K	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<i>Ref,</i>
<i>Valeur de référence</i>	Produits céréaliers	-	0,080	0,003	[82]
<i>Algérie</i>	Céréale	1,05 ± 0,48	0,35 ± 0,13	0,57 ± 0,24	L'étude actuelle
<i>Hong Kong</i>	Riz	15,0	0,006	-	[83]
<i>Syrie</i>	Céréale	56-382	-	-	[84]
<i>Brésil</i>	Riz	14,7	<0,11	-	[66]
<i>Angleterre</i>	Riz	-	3,7×10 <sup>-3</sup> -0,067	-	[66]
<i>Taiwan</i>	Riz	-	0,08±0,002	-	[85]
<i>Etats-Unis</i>	Riz	-	0,007±1,4×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup> ± 1,3×10 <sup>-4</sup>	[86]
<i>Etats-Unis</i>	Haricots secs	-	0,057±0,003	0,027±0,002	[86]
<i>Japon</i>	Riz	-	-	4,6×10 <sup>-4</sup> ±6,4×10 <sup>-5</sup>	[87]
<i>Japon</i>	Produits de haricots	-	-	2,9×10 <sup>-3</sup> ±1,8×10 <sup>-4</sup>	[87]
<i>Japon</i>	Céréales	-	-	0,001	[88]
<i>Brésil</i>	Blé	-	0,119	-	[89]
<i>Pakistan</i>	Riz	49,6±1,5	0,042±0,020	0,056±0,031	[66]
<i>Pakistan</i>	Riz	45,0±1,4	0,054±0,011	0,086±0,016	[66]
<i>Thaïlande</i>	Riz	22,2±0,9	0,217±0,065	0,204±0,061	[66]
<i>Thaïlande</i>	Riz	22,8±1,1	0,575±0,063	<0,027	[66]
<i>Pakistan</i>	Riz	7,1±0,4	0,134±0,021	<0,026	[66]
<i>Irak</i>	Riz	37,6±2,6	<0,018	<0,027	[66]
<i>Allemagne</i>	Orge	124,6±2,5	0,432±0,048	<0,037	[66]
<i>France</i>	Blé	146,3±7,3	0,570±0,057	<0,035	[66]
<i>Kazakhstan</i>	Blé	99,4±2,0	1,100±0,176	<0,035	[66]
<i>Etats-Unis</i>	Blé	87,0±2,6	0,210±0,057	0,195±0,055	[66]
<i>Etats-Unis</i>	Blé	9,3±0,5	0,147±0,025	<0,035	[66]
<i>Pakistan</i>	Riz	31,7±1,0	0,112±0,016	0,073±0,015	[66]
<i>France</i>	Riz	218,70 ± 3,75	0,34 ± 0,05	0,54 ± 0,07	[90]
<i>Italie</i>	Riz	103,15 ± 2,09	-	-	[90]
<i>Liban</i>	Blé	19,86 ± 0,96	-	0,45 ± 0,06	[90]
<i>Liban</i>	Riz	91,62 ± 1,99	0,39 ± 0,041	0,39 ± 0,06	[90]
<i>Liban</i>	Blé	31,69 ± 1,12	-	-	[90]
<i>Royaume-Uni</i>	Blé	38,12 ± 1,31	0,89 ± 0,15	0,49 ± 0,08	[90]
<i>Espagne</i>	Riz	46,62 ± 1,5	0,67 ± 0,13	0,29 ± 0,05	[90]
<i>Allemagne</i>	Blé	96,22 ± 2,18	0,32 ± 0,06	0,31 ± 0,04	[90]
<i>Allemagne</i>	Blé	13,89 ± 0,76	0,34 ± 0,06	-	[90]
<i>Allemagne</i>	Blé	22,93 ± 0,98	0,57 ± 0,09	0,40 ± 0,04	[90]
<i>Arabie Saoudite</i>	Graines de céréales	141,03	5,53	3,38	[91]
<i>Ghana</i>	Maïs	0,0167	0,0071	0,0014	[92]
<i>Mexique</i>	Haricot	51	-	-	[93]
<i>Inde</i>	Céréale	1639 ± 75,55	13,08 ± 1,31	41,53 ± 3,77	[94]

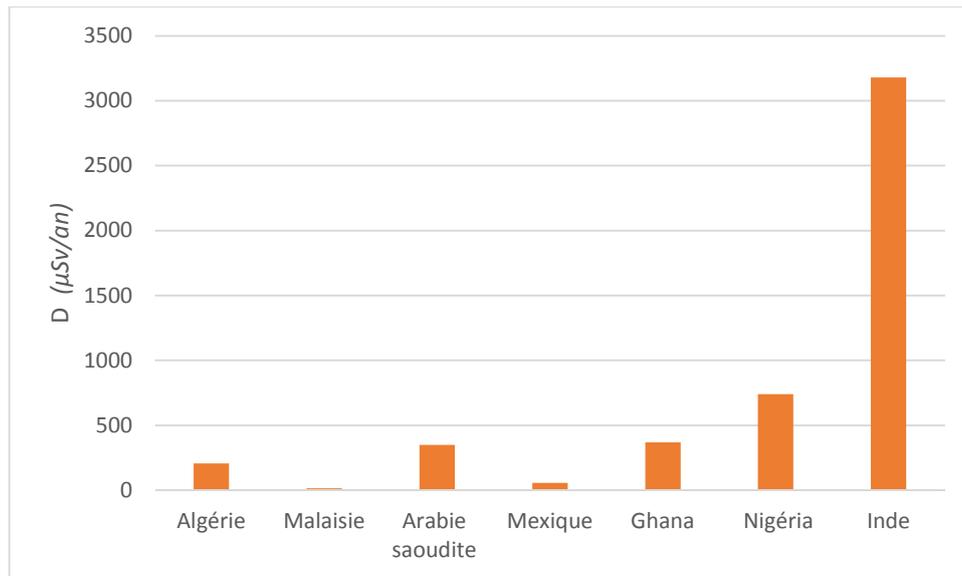
Le calcul de la dose efficace annuelle D est effectué séparément pour les trois groupes d'âge. Les valeurs de E (tableau IV.8) sont sélectionnées en fonction des classifications de la CIPR [95], à savoir adulte, enfant (5,10, et 15 ans) et nourrisson (1 an). D'un autre côté, les valeurs de I sont considérées comme étant de 140, 90 et 45 Kg an<sup>-1</sup> pour les groupes d'âge des adultes, des enfants et des nourrissons, respectivement, conformément à l'UNSCEAR [82]. Les résultats de la dose efficace annuelle D (μSv / an) sont présentés dans le tableau IV.8. L'activité A utilisée pour calculer le tableau IV.8 est la moyenne de chaque radionucléide pour chaque groupe d'âge.

**Tableau IV 9:** Facteurs de conversion pour le nombre de doses efficaces par ingestion de radionucléides (Sv / Bq) et la dose efficace annuelle totale D (μSv / an).

	<sup>238</sup> U	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K	<sup>137</sup> Cs	D (μSv/an)
<i>Nourrissons 1 an</i>	$9,6 \times 10^{-7}$	$4,5 \times 10^{-7}$	$4,2 \times 10^{-8}$	$1,2 \times 10^{-8}$	29,21
<i>Enfants 5 ans</i>	$6,2 \times 10^{-7}$	$3,5 \times 10^{-7}$	$2,1 \times 10^{-8}$	$9,6 \times 10^{-9}$	40,46
<i>Enfants 10 ans</i>	$8 \times 10^{-7}$	$2,9 \times 10^{-7}$	$1,3 \times 10^{-8}$	$1 \times 10^{-8}$	42,00
<i>Enfants 15 ans</i>	$1,5 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-7}$	$7,6 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-8}$	61,01
<i>Adultes</i>	$2,8 \times 10^{-7}$	$2,3 \times 10^{-7}$	$6,2 \times 10^{-9}$	$1,3 \times 10^{-8}$	34,35

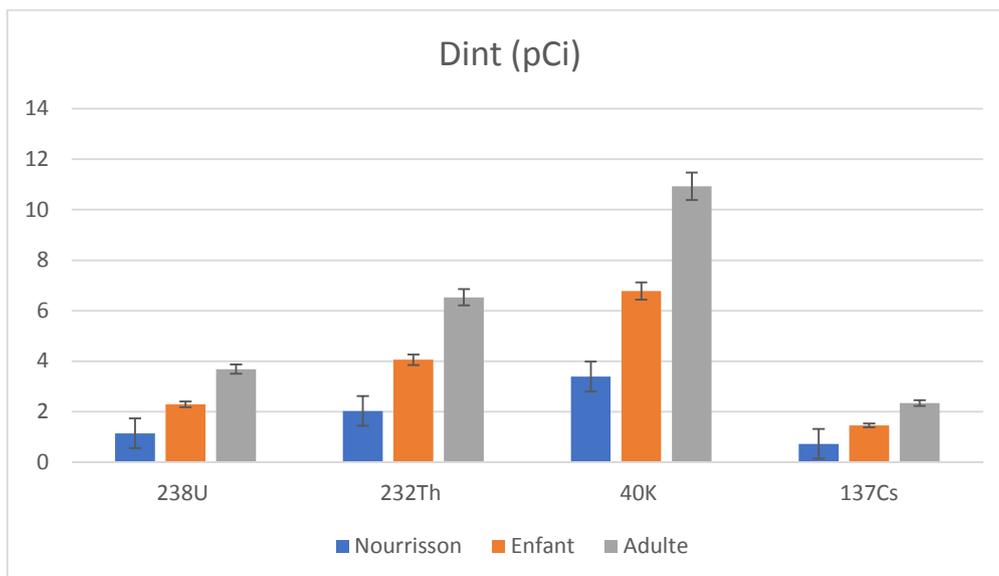
Le tableau IV.8 résume le D total pour chaque catégorie d'âge. On peut voir que le D total pour toutes les catégories d'âge variait de 29,21 à 61,01 μSv / an. Ces valeurs sont en accord avec les données publiées car la plupart des valeurs se chevauchent avec le domaine des valeurs publiées. Les valeurs totales de D se situent également bien dans l'intervalle mondiale typique de D en raison de l'ingestion de toutes les sources de rayonnement naturel signalées par l'UNSCEAR. (= 200–800 μSv /an).

La dose efficace totale estimée en raison de l'ingestion de ces radionucléides dans des échantillons de céréales était de 207,03 μSv / an, par rapport aux données publiées dans différents pays, ce qui peut être comparé à 15,39 μSv / an en Malaisie [96], 348,83 μSv / an en Arabie saoudite [97], 58,1 μSv / an en Mexique [93], 370 μSv / an en Ghana [98], 740 μSv / an en Nigéria [99], et 3180 μSv / an en Inde [94]. Il convient de noter que la valeur de dose efficace reste à l'intérieur de ces valeurs de dose comme illustre la figure IV.5. Il est important de savoir que la quantité de <sup>40</sup>K à l'intérieur du corps humain est assez constante en raison de son homéostasie contrôlée quelle que soit la quantité ingérée [100, 101]. Cette régulation physiologique diminue tout problème de santé en ce qui concerne les doses efficaces relativement élevées de <sup>40</sup>K.



**Figure IV. 5:** Comparaison de la dose efficace totale de l'ingestion de ces radionucléides dans des échantillons de céréales avec celles des autres pays du monde.

Par conséquent, les doses efficaces annuelles estimées de tous les radionucléides ciblés pour tous les groupes d'âge ne sont pas alarmantes. Ces doses sont toujours inférieures à la limite recommandée par la CIPR de 1,0 mSv ( $D=1000 \mu\text{Sv}/\text{an}$ ) [95]. Il est à noter que les valeurs d'apport I [82], utilisées dans les calculs de dose pour cette étude, incluent toutes sortes de céréales consommées par la personne moyenne, comme le pain, les pâtisseries, les pâtes, etc. où les céréales ne sont qu'une seule sorte. Par conséquent, en utilisant ces valeurs d'apport toutes sortes pour estimer les doses à partir de la consommation d'un seul type uniquement.



**Figure IV. 6:** L'apport quotidien d'activité des radionucléides avec leur incertitude via la consommation des céréales (pCi)

Le troisième paramètre calculé dans le présent travail est le risque total sur la santé du différent âge à la consommation de céréales en utilisant l'apport quotidien moyen (pCi) (figure IV.6). Le tableau IV.9 montre les valeurs estimées qui sont égales à  $3,65 \times 10^{-7}$ ,  $7,30 \times 10^{-7}$ , et  $1,18 \times 10^{-6}$  pour les nourrissons, les enfants et les adultes respectivement. Ces valeurs sont dans la recommandation de la durée de vie radiologique excédentaire risque mentionner dans le tableau IV.9 avec un risque total de  $2,27 \times 10^{-6}$  et qui se situe entre  $1 \times 10^{-6}$  et  $1 \times 10^{-4}$  selon l'US EPA [81].

**Tableau IV 10:** Évaluation des risques dus aux radionucléides présents dans les échantillons de céréales pour différents âges.

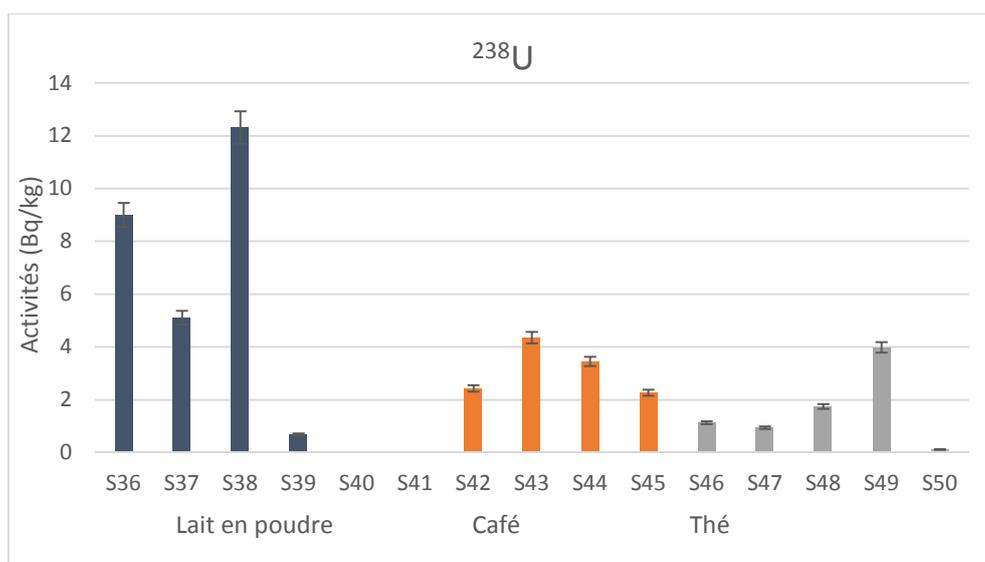
	Âge (an)	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$^{137}\text{Cs}$	Risque Total
Apport quotidien moyen (pCi)	<i>Nourrissons</i>	1,14	2,03	3,39	0,73	
	<i>Enfants</i>	2,29	4,05	6,78	1,45	
	<i>Adultes</i>	3,68	6,53	10,93	2,34	
Facteur de pente (risque / pCi)	-	$5,14 \times 10^{-10}$	$1,33 \times 10^{-10}$	$3,43 \times 10^{-11}$	$3,74 \times 10^{-11}$	
Risque	<i>Nourrissons</i>	$2,18 \times 10^{-7}$	$9,29 \times 10^{-8}$	$4,39 \times 10^{-8}$	$9,97 \times 10^{-9}$	$3,65 \times 10^{-7}$
	<i>Enfants</i>	$4,36 \times 10^{-7}$	$1,86 \times 10^{-7}$	$8,78 \times 10^{-8}$	$1,99 \times 10^{-8}$	$7,30 \times 10^{-7}$
	<i>Adultes</i>	$7,03 \times 10^{-7}$	$2,99 \times 10^{-7}$	$1,41 \times 10^{-7}$	$3,21 \times 10^{-8}$	$1,18 \times 10^{-6}$

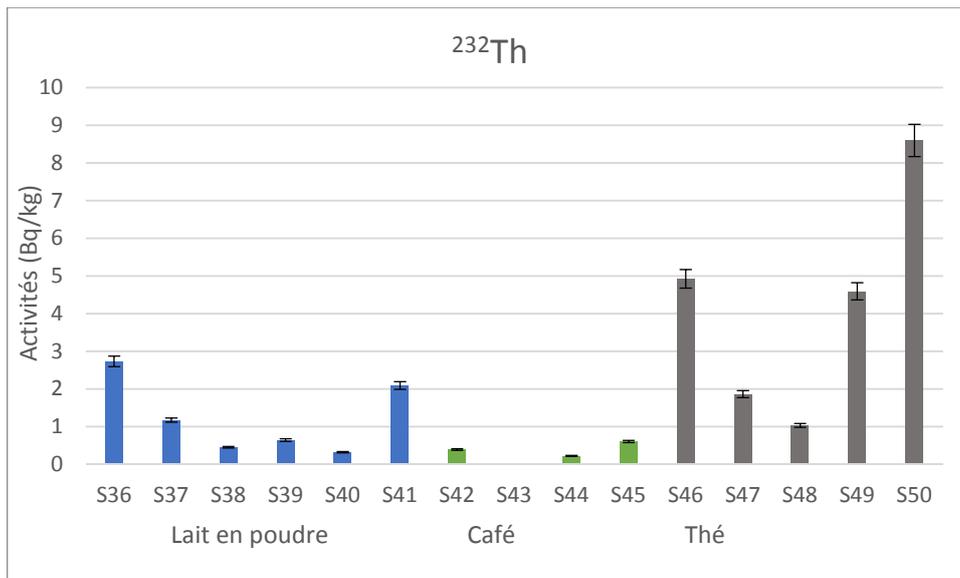
### IV.1.3 Etude des activités de radionucléides naturels et indice de risque de rayonnement dans certains laits en poudre, café et thé consommés en Algérie

Quinze échantillons de différents types d'aliment importés et consommés en Algérie ont été analysés, dont les quelles on a 06 lait en poudre 04 café, et 05 thé, à l'aide de rayons gamma système de spectroscopie avec toujours le même détecteur NaI (TI). Les activités des radionucléides naturels  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  présents dans les échantillons étudiés ont été mesurées comme l'indique dans le tableau IV.10 et les figures (IV.7, IV.8, et IV.9) en Bq/kg.

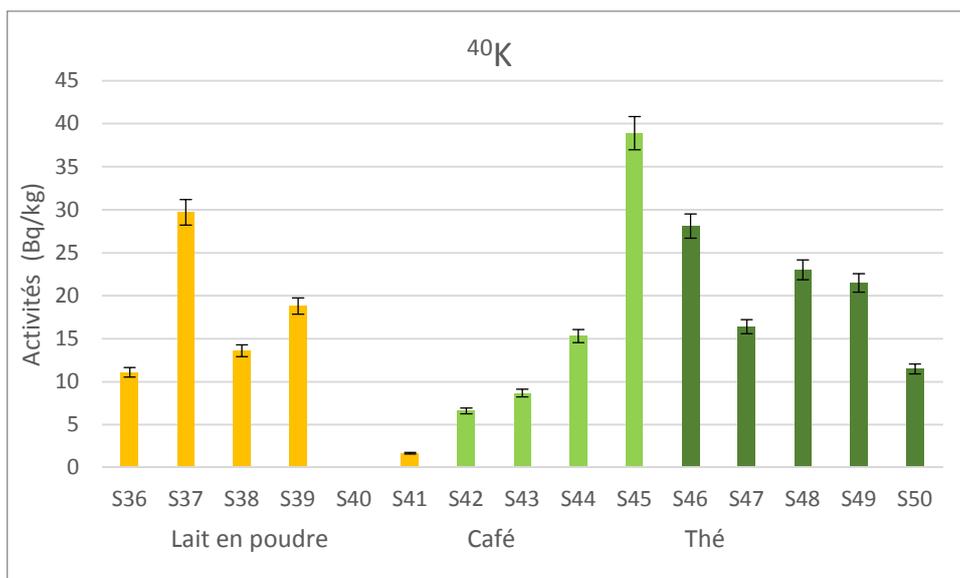
**Tableau IV 11:** Les activités des radionucléides naturels  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  présents dans les échantillons

N° order	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
<b>Lait en poudre</b>			
S36	$9.000 \pm 0.450$	$2.730 \pm 0.137$	$11.100 \pm 0.555$
S37	$5.110 \pm 0.256$	$1.170 \pm 0.059$	$29.700 \pm 1.485$
S38	$12.310 \pm 0.616$	$0.450 \pm 0.023$	$13.600 \pm 0.680$
S39	$0.690 \pm 0.035$	$0.640 \pm 0.032$	$18.800 \pm 0.940$
S40	-	$0.320 \pm 0.016$	-
S41	-	$2.090 \pm 0.105$	$1.700 \pm 0.085$
<b>Café</b>			
S42	$2.430 \pm 0.122$	$0.390 \pm 0.020$	$6.600 \pm 0.630$
S43	$4.350 \pm 0.218$	-	$8.700 \pm 0.435$
S44	$3.450 \pm 0.173$	$0.220 \pm 0.011$	$15.320 \pm 0.766$
S45	$2.270 \pm 0.114$	$0.600 \pm 0.030$	$38.900 \pm 1.945$
<b>Thé</b>			
S46	$1.130 \pm 0.057$	$4.920 \pm 0.246$	$28.100 \pm 1.405$
S47	$0.940 \pm 0.047$	$1.860 \pm 0.093$	$16.400 \pm 0.820$
S48	$1.750 \pm 0.088$	$1.030 \pm 0.052$	$23.000 \pm 1.150$
S49	$3.980 \pm 0.199$	$4.590 \pm 0.230$	$21.500 \pm 1.075$
S50	$0.116 \pm 0.006$	$8.600 \pm 0.430$	$11.500 \pm 0.575$

**Figure IV. 7:** Activité spécifique moyenne de  $^{238}\text{U}$  des échantillons étudiés dans les unités de Bq/kg.



**Figure IV. 8:** Activité spécifique moyenne de  $^{232}\text{Th}$  des échantillons étudiés dans les unités de Bq/kg.



**Figure IV. 9:** Activité spécifique moyenne de  $^{40}\text{K}$  des échantillons étudiés dans les unités de Bq/kg.

En utilisant l'équation de  $A_{Rn} = A_{Ra}$  à l'équilibre séculaire, l'activité fille est égale à celle du parent. En termes de nombre d'atomes du parent ( $N_P$ ) et de la fille ( $N_F$ ), l'équilibre séculaire peut également être exprimé comme [102] :

$$N_P \lambda_P = N_F \lambda_F \quad (IV.1)$$

Où  $\lambda_P$  et  $\lambda_F$  sont respectivement la constante de désintégration du parent et de la fille.

Ainsi, l'activité du parent  $m$  peut être calculée dans l'échantillon à partir de la relation [61]

$$m = \frac{N_P}{N_{av}} \times M \quad (\text{IV.2})$$

Où  $N_{av}$  est le numéro d'Avogadro ( $6,022 \times 10^{23}$  atome / mol),  $M$  est le nombre de masse du noyau parent.

Au-dessus de deux équations IV.1 et IV.2, et en substituant les valeurs des demi-vies, nous obtenons les activités des radio-isotopes dans l'unité de  $\text{mg} / \text{kg} = 1$  partie par million (ppm), comme suit :

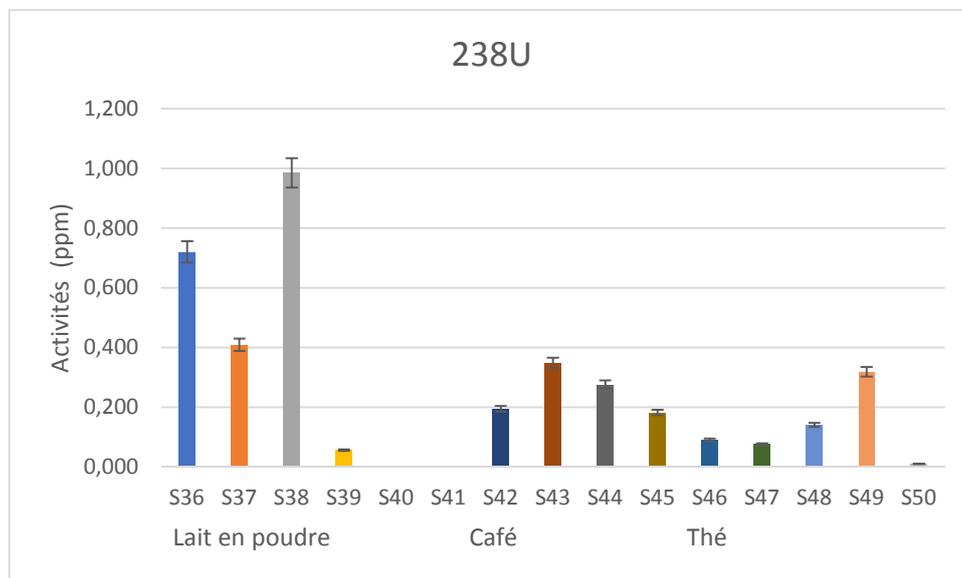
$$m(^{238}\text{U}) = 0,08 \times A_U \quad (\text{IV.3})$$

$$m(^{232}\text{Th}) = 0,245 \times A_{Th} \quad (\text{IV.4})$$

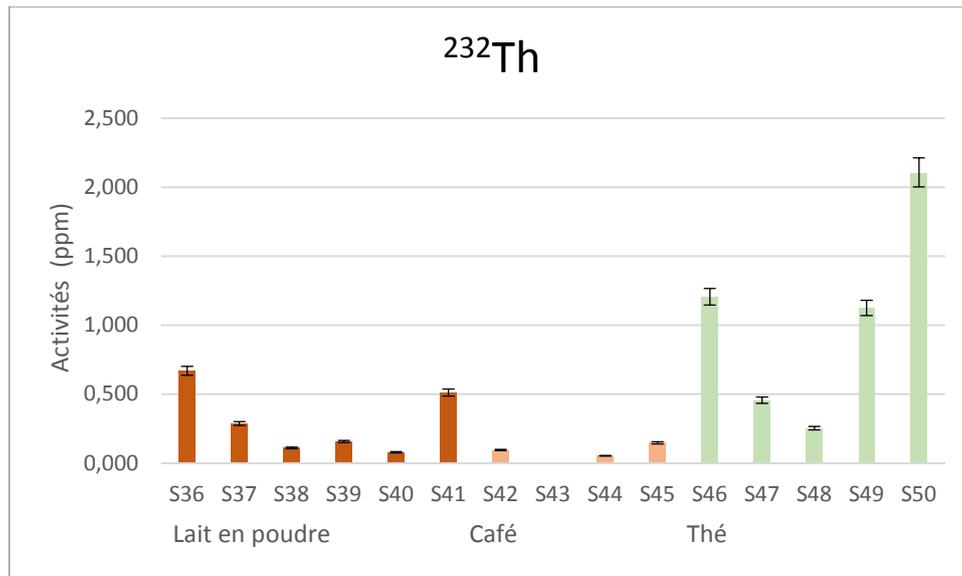
$$m(^{40}\text{K}) = 0,038 \times A_K \quad (\text{IV.5})$$

Où  $m$  est l'activité des nucléides parents dans l'unité de ppm,  $A$  est l'activité spécifique dans l'unité de Bq/kg.

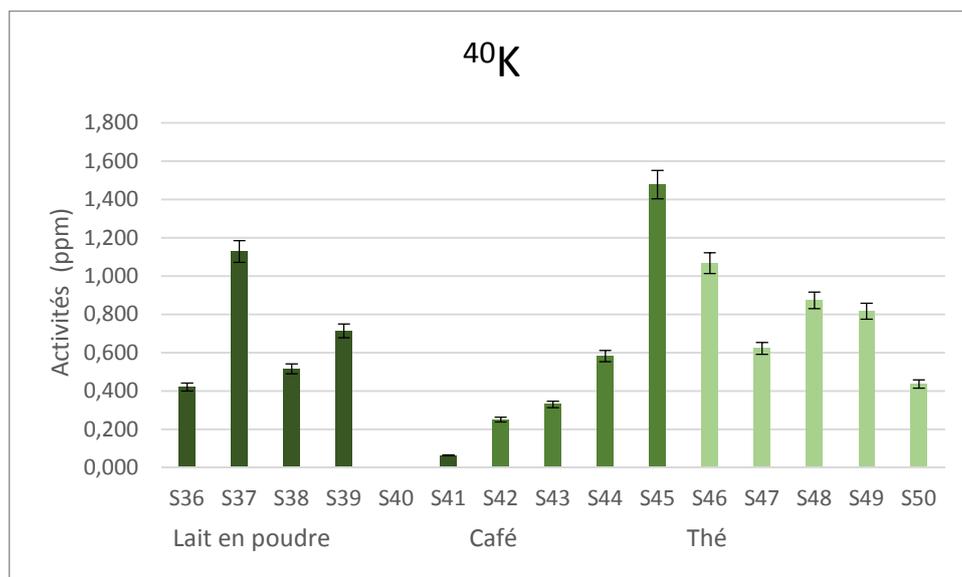
Sur la figure IV.10, la figure IV.11 et la figure IV.12, l'activité des nucléides parents de la série radioactive naturelle pour chaque échantillon a été calculée en unité de ppm.



**Figure IV. 10:** Activité de  $^{238}\text{U}$  des échantillons étudiés dans l'unité de ppm



**Figure IV. 11:** Activité de  $^{232}\text{Th}$  des échantillons étudiés dans l'unité de ppm



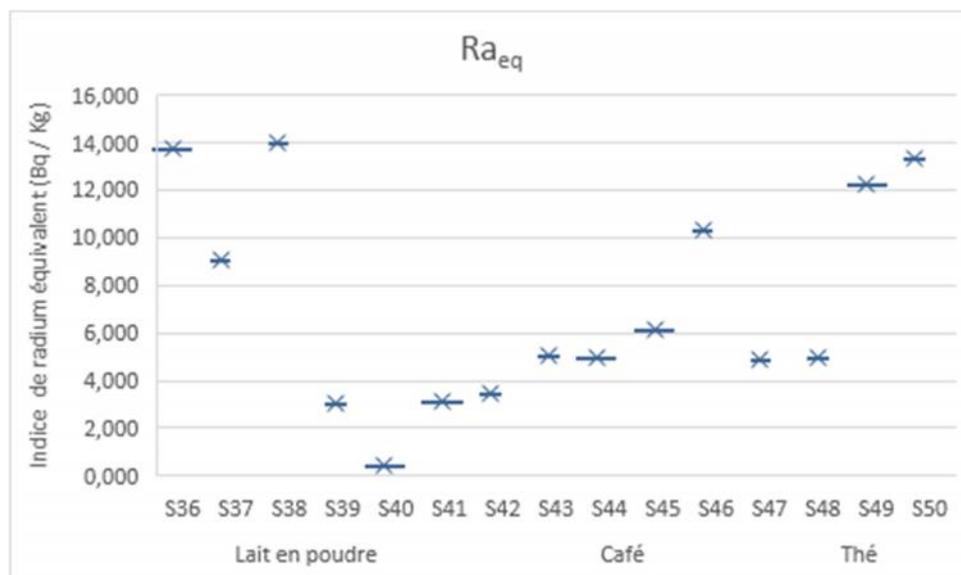
**Figure IV. 12:** Activité de  $^{40}\text{K}$  des échantillons étudiés dans l'unité de ppm

Les activités moyennes de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  étaient de l'ordre de :  $0,361 \pm 0,018$ ,  $0,302 \pm 0,015$ ,  $0,474 \pm 0,024$  ppm pour le lait en poudre,  $0,250 \pm 0,013$ ,  $0,074 \pm 0,004$ ,  $0,660 \pm 0,033$  ppm pour le café, et  $0,764 \pm 0,038$ ,  $1,029 \pm 0,051$ ,  $0,764 \pm 0,038$  ppm pour le thé, respectivement. L'activité de  $^{238}\text{U}$  variait de  $0,009 \pm 0,0005$  pour l'échantillon de thé (S50), à  $0,985 \pm 0,049$  ppm pour l'échantillon de lait en poudre (S38). En général, les valeurs d'activité mesurées de  $^{238}\text{U}$  sont un peu plus élevées que les valeurs acceptables  $8 \times 10^{-5}$ -  $3,3 \times 10^{-2}$  ppm, comme indiqué dans [56] sauf l'activité de l'échantillon S39 se situe dans les limites autorisés. L'activité la plus élevée de  $^{232}\text{Th}$  ( $2,107 \pm 0,105$ ) ppm a été trouvée dans l'échantillon

S50, tandis que l'activité la plus faible ( $0,054 \pm 0,003$ ) ppm a été trouvée dans l'échantillon S44. Un résultat des mesures de l'activité de  $^{232}\text{Th}$  dans tous les échantillons sont plus élevés que la valeur acceptable, qui devrait être inférieure à 0,02 ppm pour une utilisation sûre [56]. La valeur maximale de l'activité de  $^{40}\text{K}$  a été trouvée dans S45 avec une valeur de  $1,478 \pm 0,074$  ppm. L'activité la plus faible était trouvée dans S41 avec une valeur de  $0,065 \pm 0,03$  ppm. L'activité de  $^{40}\text{K}$  est comparable aux résultats d'autres chercheurs et se situe dans la valeur acceptable, qui est inférieure à 133 ppm pour une consommation sûre.

### Indice équivalent de radium ( $R_{\text{eq}}$ )

L'activité équivalente au radium ( $R_{\text{eq}}$ ), est calculé en utilisant la formule (III.13) proposée par UNSCEAR en Bq/kg[62].



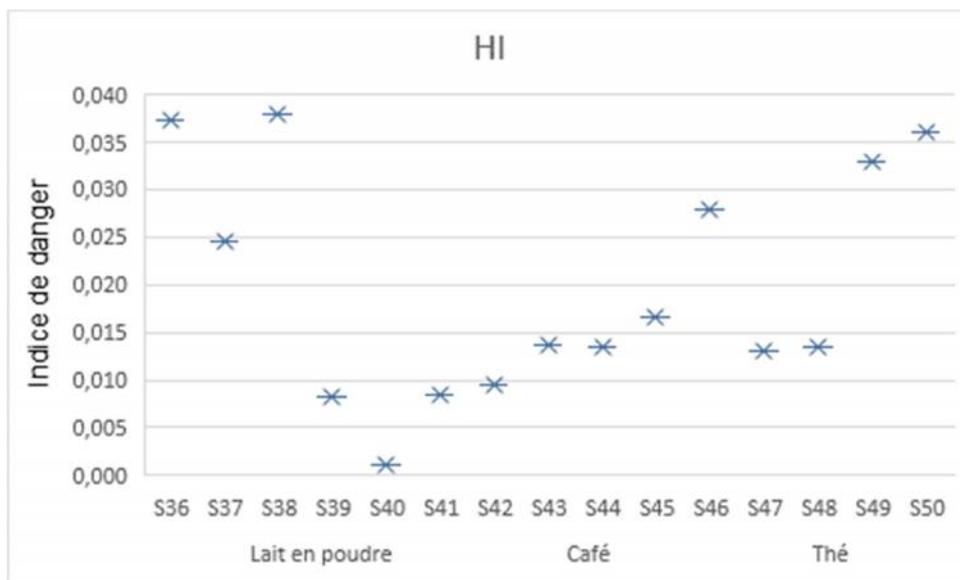
**Figure IV. 13:** L'indice de radium équivalent ( $R_{\text{eq}}$ ) des échantillons étudiés

La figure IV.12 illustre les valeurs calculées de  $R_{\text{eq}}$  correspondant au nombre d'échantillons, les valeurs de  $R_{\text{eq}}$  variant entre 0,458 et 14,001 Bq/kg. Sur les 15 échantillons mesurés dans cette étude, le lait en poudre S36 et S38, le thé S49 et S50, semblaient avoir les activités les plus élevées de  $R_{\text{eq}}$  13,759, 14,001, 12,199 et 13,300 Bq/kg respectivement. Alors que, le lait en poudre S40 présente l'activité la plus faible qui est 0,458 Bq/kg. L'activité moyenne de radioactivité de  $R_{\text{eq}}$  s'est avérée être de 7,248 Bq/kg, il est clair que les valeurs de dans tous les échantillons étaient bien inférieures à la valeur sûre 370 Bq/kg [61].

## Indice de danger

Cet indice est utilisé pour estimer le niveau de risque de rayonnement  $\gamma$  associé aux radionucléides naturels dans les échantillons. L'indice de danger (HI) est calculé à partir de l'équation III.11[59].

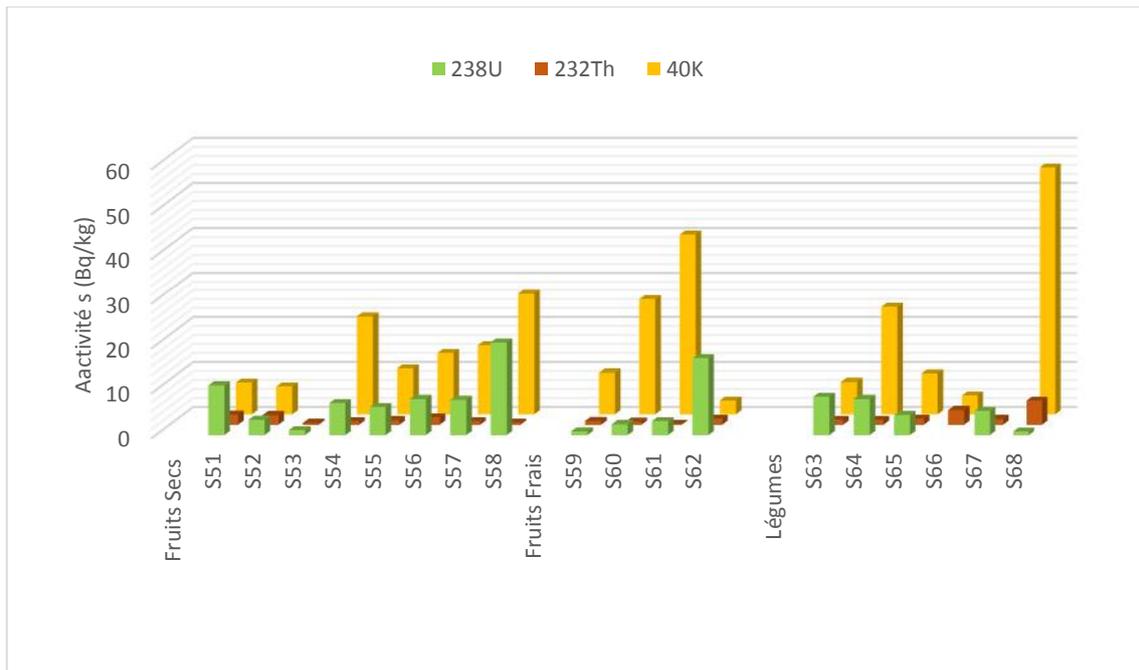
Comme le montre la figure IV.13, l'HI variait entre 0,001 et 0,038. Il est évident que les valeurs de HI étaient bien inférieures à la valeur de sécurité, qui devrait être inférieure à 1



*Figure IV. 14: L'indice de danger (HI) des échantillons étudiés*

### IV.1.4 Evaluation des risques radiologiques de l'apport de légumes et fruits en Algérie

Dix-huit échantillons différents de fruits (secs, frais) et légumes couramment consommés ont été collectés. Tous les échantillons sont importés de différents pays du monde. Les activités des radionucléides naturels  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  dans les légumes et les fruits consommés en Algérie ont été mesurées par spectrométrie gamma.



**Figure IV. 15:** Les activités des radionucléides naturels  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  dans les légumes et les fruits étudiés.

L'activité mesurée, A de  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ ),  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  dans six échantillons de légumes et douze échantillons de fruits (huit secs et quatre frais) comme illustre la figure IV.14, leurs intervalles et leurs valeurs moyennes ont été présentées dans le tableau IV.12. Il a été montré que l'activité dans certains échantillons de légumes et de fruits n'était pas détectable. Pour les fruits, l'activité de  $^{226}\text{Ra}$  détectée variait de  $1,09 \pm 0,05$  (S53) à  $20,60 \pm 1,03$  (S58) avec une valeur moyenne de  $7,38 \pm 4,60$ , l'activité de  $^{232}\text{Th}$  variait de  $0,21 \pm 0,07$  (S61) à  $2,25 \pm 0,11$  (S51) avec une valeur moyenne de  $1,01 \pm 0,54$  et l'activité de  $^{40}\text{K}$  variait de  $3,07 \pm 0,15$  (S62) à  $40,08 \pm 2,00$  (S61) avec une valeur moyenne de  $16,28 \pm 8,95$ , le tout en Bq/kg.

Pour les légumes, l'activité détectée variait de  $0,79 \pm 0,04$  (S68) à  $8,52 \pm 0,43\text{Bq/kg}$  (S63) pour  $^{226}\text{Ra}$ ,  $1,03 \pm 0,05$  (S64) à  $5,33 \pm 0,27$  Bq/kg (S68) pour  $^{232}\text{Th}$  et  $4,18 \pm 0,21$  (S66) à  $55,05 \pm 2,75\text{Bq/kg}$  (S68) pour  $^{40}\text{K}$ . L'activité moyenne de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  s'est avérée être de  $5,42 \pm 2,29$ ,  $2,18 \pm 1,40$  et  $19,88 \pm 15,68$  Bq/kg respectivement.

**Tableau IV 12:** Les activités des radionucléides naturels  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  dans les légumes et les fruits

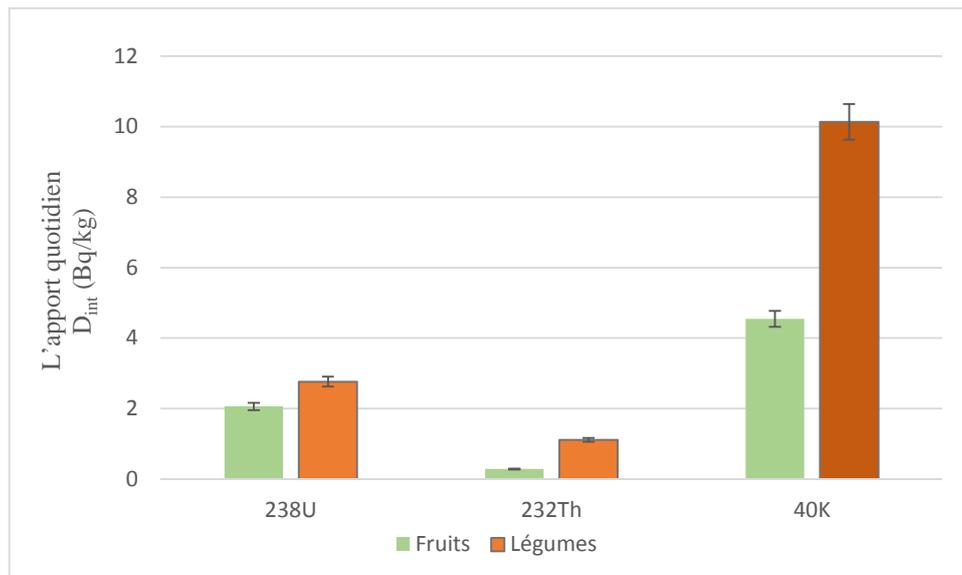
N° order	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
<b>Fruits Secs</b>			
S51	11,01 ± 0,55	2,25 ± 0,11	7,04 ± 0,35
S52	3,41 ± 0,17	2,08 ± 0,10	6,14 ± 0,31
S53	1,09 ± 0,05	0,36 ± 0,02	-
S54	7,10 ± 0,35	0,75 ± 0,04	21,77 ± 1,09
S55	6,16 ± 0,31	0,93 ± 0,05	10,24 ± 0,51
S56	8,05 ± 0,40	1,67 ± 0,08	13,65 ± 0,68
S57	7,81 ± 0,39	0,71 ± 0,03	15,36 ± 0,77
S58	20,60 ± 1,03	0,44 ± 0,02	26,89 ± 1,34
<b>Fruits Frais</b>			
S59	0,85 ± 0,04	0,83 ± 0,04	9,21 ± 0,46
S60	2,37 ± 0,43	0,63 ± 0,01	25,61 ± 1,28
S61	3,09 ± 0,15	0,21 ± 0,07	40,08 ± 2,00
S62	17,05 ± 0,85	1,33 ± 0,05	3,07 ± 0,15
Moyenne	7,38 ± 4,60	1,01 ± 0,54	16,28 ± 8,95
Intervalle	1,09-20,60	0,21-2,25	3,07-40,08
<b>Légumes</b>			
S63	8,52 ± 0,43	1,02 ± 0,05	7,17 ± 0,36
S64	8,05 ± 0,40	1,03 ± 0,05	23,90 ± 1,19
S65	4,42 ± 0,22	1,27 ± 0,06	9,10 ± 0,45
S66	-	3,23 ± 0,16	4,18 ± 0,21
S67	5,33 ± 0,27	1,23 ± 0,06	-
S68	0,79 ± 0,04	5,33 ± 0,27	55,05 ± 2,75
<b>Moyenne</b>	5,42 ± 2,29	2,18 ± 1,40	19,88 ± 15,68
<b>Intervalle</b>	0,79-8,52	1,03-5,33	4,18-55,05

Pour les deux types d'échantillon, l'activité la plus élevée s'est avérée être de  $^{40}\text{K}$ , suivie de  $^{238}\text{U}$ . Nombreux travaux antérieurs, comme le montre le tableau IV.13, ont été signalés par une activité d'activité pour les échantillons de légumes variait de 0,049 à 48,80, de 0,001 à 25,36 et de 0,79 à 1190,45 Bq/kg pour le  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement. Pour les échantillons de fruits, ils variaient de 0,009 à 8,15, 0,001 à 32,30 et 20,94 à 439,53 Bq/kg pour  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement. Par rapport à ce domaine, les résultats actuels sont en accord avec les résultats précédents. En effet, toute la valeur moyenne des résultats actuels se situe clairement dans le domaine des résultats précédents sauf pour l'activité de  $^{40}\text{K}$  qu'est un peu inférieur.

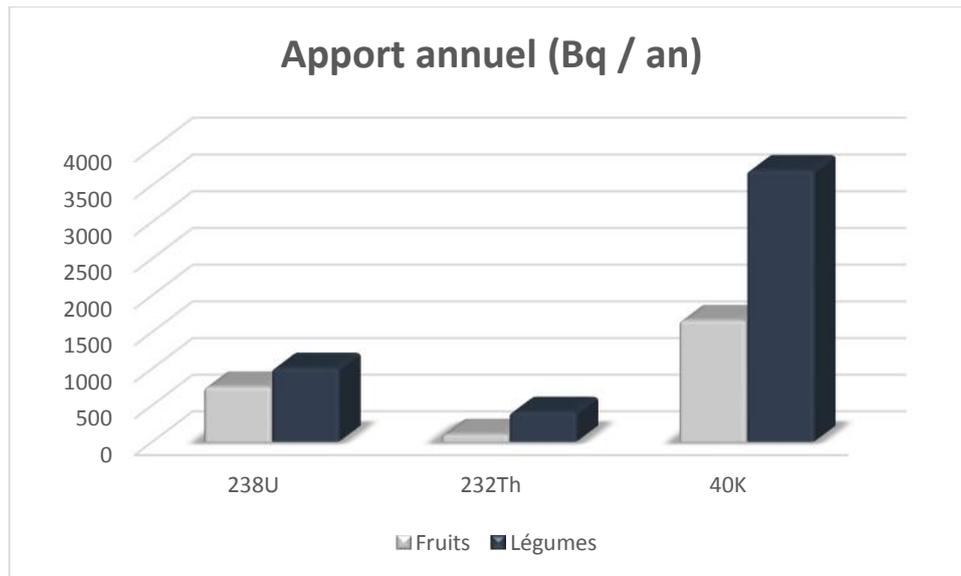
**Tableau IV 13:** L'activité mesurée, A (Bq/kg) dans les légumes et les fruits par rapport aux valeurs rapportées précédentes

	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$		$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	<i>Pays</i>
<b>Légumes</b>	5,42	2,18	19,88	<b>Fruits</b>	7,38	1,01	16,28	Algérie Étude actuelle
	-	-	93,29		-	-	86,93	Espagne [103]
	5,27	6,31	123,12		-	-	-	Arabie Saoudite [97]
	-	-	0,79		-	-	34,91	Syrie [67]
	0,18	0,20	48,15		-	-	-	Iran [66]
	1,00	-	116,04		0,74	-	42,00	Egypte [69]
	0,075	0,012			0,027	0,001	-	Chine [104]
	-	-	74,30		-	-	52,90	Liban [105]
	0,049	0,001	68,39		0,009	0,001	20,94	Corée [106]
	-	-	-		5,30	0,80	43,78	Inde [107]
	0,51	1,33	57,64		0,46	1,62	69,88	Inde [73]
	1,90	2,40	80,30		-	-	-	Inde [108]
	2,60	2,92	163,40		1,30	1,56	111,00	Italie [77]
	7,67	20,24	75,47		8,15	32,30	75,55	Indonésie [109]
	1,22	1,95	1190,45		1,61	1,22	439,53	Malaisie [110]
	48,80	25,36	1017,94		-	-	-	Malaisie [111]
	2,07	2,12	791,51		2,44	1,54	28,63	Malaisie [112]

Le taux de consommation moyen utilisé dans cette étude est tiré de la base de données de l'Office National des Statistiques, Algérie, pour l'alimentation et l'agriculture,  $I = 101,9$  (Fruits) et  $186,1$  (Légumes) kg/habitant/an[113]. Tel que présenté à la figure IV.14, les apports quotidiens de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  et  $^{40}\text{K}$  sont respectivement de  $2,06$ ,  $0,28$  et  $4,54$  Bq pour les fruits et  $2,76$ ,  $1,11$  et  $10,14$  Bq pour les légumes. L'apport de  $^{40}\text{K}$  est le plus élevé avec une valeur annuelle de  $1658,75$  et  $3699,67$  Bq pour les fruits et les légumes respectivement, ce qui ne pose aucun problème du point de vue de la physique de la santé. En effet, le potassium est un élément essentiel de l'organisme et il est contrôlé de manière homéostatique par le métabolisme humain. En conséquence, la teneur en corps de  $^{40}\text{K}$  est largement déterminée par les caractéristiques physiologiques et non par l'apport. Cependant, les apports annuels de  $^{226}\text{Ra}$  ( $752,28$ ,  $1009,03$  Bq) et  $^{232}\text{Th}$  ( $103,21$ ,  $406,63$  Bq) pour les fruits et les légumes respectivement comme indique la figure IV.15.



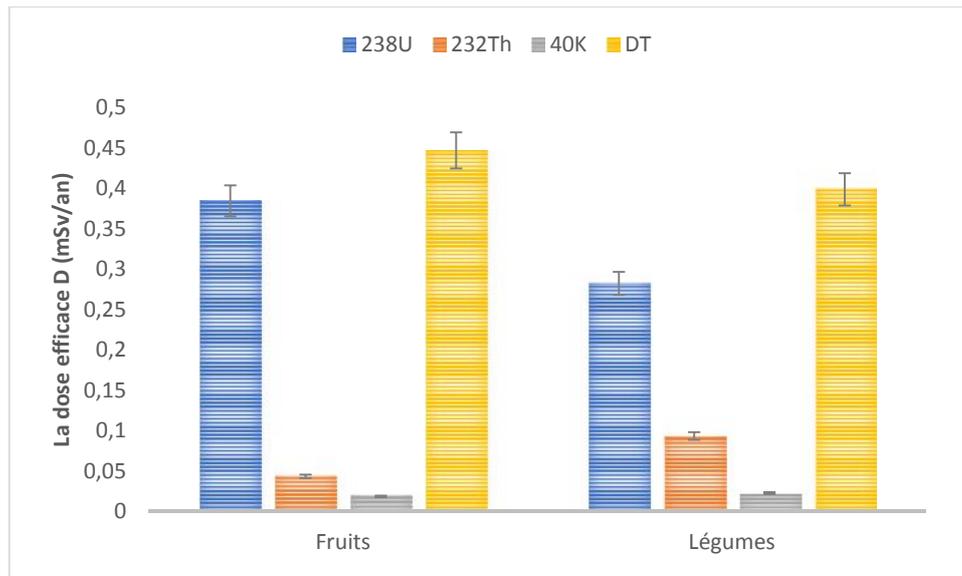
**Figure IV. 16:** les apports quotidiens de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  et  $^{40}\text{K}$  dans les fruits et les légumes étudiés.



**Figure IV. 17:** les apports annuels de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ , et  $^{40}\text{K}$  dans les fruits et les légumes étudiés.

En comparant ces deux valeurs, il a été constaté que pour les fruits : le D dû à la consommation de  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  (0,043 et 0,019 mSv/an respectivement) pour la catégorie d'âge étudiée (adulte) était inférieur à la dose d'ingestion annuelle UNSCEAR. Par conséquent, il était automatiquement inférieur à la dose annuelle de rayonnement provenant de sources naturelles, seul le D dû à l'apport de  $^{238}\text{U}$  (0,384 mSv/an) était plus élevé à la dose d'ingestion annuelle UNSCEAR. Cependant, elle est toujours inférieure à la valeur de la dose annuelle de rayonnement provenant de sources naturelles, le  $D_T$  dû à l'apport total de trois radionucléides pour les adultes (0,447 mSv/an) est plus élevé que la dose d'ingestion annuelle UNSCEAR d'un facteur de 1,54, tandis qu'ils sont toujours inférieurs à la valeur de la dose annuelle de rayonnement provenant de sources naturelles.

Les résultats de la comparaison pour les légumes : le D dû à l'apport de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  (0,282, 0,093 et 0,023 mSv/an) était inférieur à la dose d'ingestion annuelle UNSCEAR. Par conséquent, il était automatiquement inférieur à la dose annuelle de rayonnement provenant de sources naturelles, le  $D_T$  (0,399 mSv/an) dû à l'apport total de trois radionucléides était plus élevée d'un facteur de 1,37 à la dose d'ingestion annuelle UNSCEAR. Cependant, elle reste inférieure à la valeur de la dose annuelle de rayonnement provenant de sources naturelles. Pour fournir une meilleure compréhension de ces résultats, la comparaison des doses a été présentée à la figure IV.16.



**Figure IV. 18:** Dose d'ingestion d'adultes provenant de la consommation de radionucléides <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th et <sup>40</sup>K, fruits et légumes.

Le risque de cancer « R » peut être estimé à partir de :

$$R = D \times L \times RF \quad (IV.8)$$

La dose apportée par les trois radionucléides <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th et <sup>40</sup>K a été additionnée pour obtenir la dose totale, D. La durée de vie d'un individu moyen, L, est d'environ 70 ans. Le facteur de risque de cancer pour de faibles doses, RF est  $5 \times 10^{-5}$  (1 / mSv)[76].

Le risque de cancer R de  $1,56 \times 10^{-3}$  et  $1,39 \times 10^{-3}$  ont été estimés correspondant à la dose totale d'ingestion adulte de 0,447 et 0,399 mSv / an pour les fruits et les légumes respectivement. Ces risques sont nettement inférieurs au risque estimé par l'UNSCEAR à partir de la dose totale de rayonnement naturel de 2,4 mSv / an, soit  $8,4 \times 10^{-3}$ . La réduction d'un facteur de 5,37 et 6,01 respectivement pour les fruits et les légumes en déduit que les légumes et les fruits en Algérie sont sans danger pour la consommation humaine.

#### **IV.1.5 Évaluation des indices de danger radiologique résultant de la teneur en radionucléides de certaines denrées alimentaires en Algérie**

Un total de quinze échantillons d'aliments représentant différents types, y compris la viande et poisson (04 échantillons), les épices (06 échantillons) et d'autre aliments (05 échantillons).

L'activité de  $^{238}\text{U}$  ( $^{226}\text{Ra}$ )  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  en Bq/kg présente dans les échantillons est donnée dans le tableau IV.13. Les activités moyennes de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  pour les viandes et poissons étaient de  $7,77 \pm 2,03$ ,  $2,78 \pm 2,02$  et  $19,29 \pm 3,88$  Bq/kg, pour les épices étaient  $3,82 \pm 2,18$ ,  $1,13 \pm 0,77$  et  $12,11 \pm 1,58$  Bq/kg et pour les autres aliments étaient de  $0,47 \pm 0,14$ ,  $1,97 \pm 0,94$  et  $11,78 \pm 6,56$  Bq/kg respectivement.

**Tableau IV 14:** Activité spécifique mesurée de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  dans certains aliments (Bq/kg)

N° Ordre	$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$
<b>Viande et Poisson</b>			
S69	$11,84 \pm 0,59$	$0,36 \pm 0,02$	$19,63 \pm 0,98$
S70	$6,48 \pm 0,32$	$2,57 \pm 0,13$	$20,41 \pm 1,02$
S71	$7,10 \pm 0,35$	$6,83 \pm 0,34$	$11,52 \pm 0,58$
S72	$5,68 \pm 0,28$	$1,36 \pm 0,07$	$25,61 \pm 1,28$
<b>Les épices</b>			
S73	$5,68 \pm 0,28$	$0,54 \pm 0,03$	$12,44 \pm 0,62$
S74	$3,24 \pm 0,16$	$0,46 \pm 0,02$	$13,22 \pm 0,66$
S75	$2,32 \pm 0,12$	-	$14,64 \pm 0,73$
S76	$8,52 \pm 0,43$	$0,48 \pm 0,02$	$9,39 \pm 0,47$
S77	$0,71 \pm 0,03$	$1,67 \pm 0,08$	-
S78	$2,48 \pm 0,12$	$2,52 \pm 0,13$	$10,88 \pm 0,54$
<b>Autre aliment</b>			
S79	$0,77 \pm 0,04$	$1,11 \pm 0,05$	$5,12 \pm 0,26$
S80	$0,52 \pm 0,03$	$0,91 \pm 0,04$	$14,51 \pm 0,72$
S81	$0,21 \pm 0,01$	$2,91 \pm 0,14$	$23,90 \pm 1,19$
S82	$0,42 \pm 0,02$	$3,38 \pm 0,17$	$13,31 \pm 0,66$
S83	$0,42 \pm 0,02$	$1,53 \pm 0,08$	$2,04 \pm 0,10$

L'activité de  $^{238}\text{U}$  variait de  $(5.68 \pm 0.28$  à  $11.84 \pm 0.59$  Bq/kg) pour les Viandes et Poissons, de  $(0.71 \pm 0.03$  à  $8.52 \pm 0.43$  Bq/kg) pour les épices et de  $(0.21 \pm 0.01$  à  $0.77 \pm 0.04$  Bq/kg) pour les autres aliments. L'activité la plus élevée de  $^{238}\text{U}$  a été trouvée dans S69 (viande), tandis que l'activité la plus faible a été trouvée dans S81. L'activité de  $^{238}\text{U}$  est comparable aux résultats d'autres chercheurs [77, 97, 114, 115] et se situe dans la valeur acceptable, qui est inférieure à 20 Bq/kg pour une consommation sûre, comme cela a été rapporté dans (UNSCEAR 2000) [56]. L'activité  $^{232}\text{Th}$  variait de  $0.36 \pm 0.02$  à  $6.83 \pm 0.34$  Bq/kg. Les résultats ont indiqué que l'absorption maximale de  $^{232}\text{Th}$  s'est produite principalement dans S71 et le minimum dans S69. Il a également été observé que les activités de  $^{232}\text{Th}$  étaient inférieures aux activités de  $^{238}\text{U}$  dans la plupart des échantillons. En général, les valeurs d'activité mesurées de  $^{232}\text{Th}$  se situent dans les valeurs acceptables telles que rapportées par UNSCEAR (2000). Le potassium est un élément très soluble et un élément essentiel du métabolisme des organismes vivants. L'activité de  $^{40}\text{K}$  variait de  $2.04 \pm 0.10$  à  $25.61 \pm 1.28$  Bq/kg. L'activité la plus élevée de  $^{40}\text{K}$  a été trouvée dans thon à l'huile végétale (S72) ( $25.61 \pm 1.28$  Bq/kg), suivi par la moutarde (S81) ( $23.90 \pm 1.19$  Bq/kg) et le bâtonnet de poisson (S70) ( $20.41 \pm 1.02$  Bq/kg). L'activité la plus faible a été trouvée dans la levure instantanée (S83) avec une valeur de  $2.04 \pm 0.10$  Bq/kg. Les niveaux détectés dans cette étude étaient inférieurs à ceux publiés par UNSCEAR (2000), qui varient de 170 à 430 Bq/kg [56].

### **Indice équivalent de radium ( $R_{\text{eq}}$ )**

Le tableau IV.14 illustre les valeurs calculées de  $R_{\text{eq}}$  qui se situait entre 2.75 et 17.75 Bq/kg. De tous les 15 échantillons mesurés dans cette étude, les Viandes et Poissons ont les activités les plus élevées de  $R_{\text{eq}}$  17.75, 13.87 et 11.73 Bq/kg, tandis que les autres aliments ont montré l'activité la plus faible 2.75 Bq/kg (S79). L'activité moyenne de radioactivité de  $R_{\text{eq}}$  s'est révélée être de 6.09 Bq/kg. Toutes les valeurs de  $R_{\text{eq}}$  se situaient dans les limites de sécurité recommandées par UNSCEAR (2000).

**Tableau IV 15:** Indice équivalent de radium et indice de danger des échantillons étudiés.

<b>N° Ordre</b>	<b>Ra<sub>eq</sub></b>	<b>HI</b>
<b>Viande et Poisson</b>		
S69	13.87	0.037
S70	11.73	0.032
S71	17.75	0.048
S72	9.60	0.026
<b>Les épices</b>		
S73	7.41	0.020
S74	4.91	0.013
S75	3.45	0.009
S76	9.92	0.027
S77	3.10	0.008
S78	6.92	0.019
<b>Autre aliment</b>		
S79	2.75	0.007
S80	2.94	0.008
S81	6.21	0.017
S82	6.28	0.017
S83	2.76	0,007

**Indice de danger**

Comme le montre le tableau IV.14, le HI variait entre 0,007 et 0.048. Il est évident que les valeurs de HI étaient bien inférieures à la valeur de sécurité, qui est de 1.

## IV.2 Analyse statistique

Une étude statistique a été faite afin de déterminer les caractéristiques statistiques des activités des radionucléides analysés dans les échantillons étudiés.

Comme nous l'avons mentionné précédemment, les échantillons étudiés sont des échantillons importés de différents pays du monde. Pour une étude statistique, nous avons réparti les échantillons selon le continent d'où ils sont importés pour étudier la propagation des radiations.

Les résultats du comportement statistique des radionucléides mesurés, et les paramètres radiologiques  $Ra_{eq}$ ,  $HI$ ,  $Hin$ , et  $I_{\gamma}$  qu'ont été calculé à partir des équations (III.13), (III.11), (III.12), et (III.14) (Tableau IV.15) des échantillons étudiés sont présentés dans le tableau IV.16.

**Tableau IV 16:** Les activités des radionucléides mesurés, et les paramètres radiologiques des échantillons étudiés pour chaque continent.

Continent	Aliment	Pays	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$Ra_{eq}$	$HI$	$Hin$	$I_{\gamma}$
Afrique	<i>Raisins secs</i>	Sud-Afrique	1,09	0,36	-	1,605	0,004	0,007	0,011
	<i>Nestlé gloria</i>	Nouvelle-Zélande	9	2,73	11,1	13,759	0,037	0,062	0,092
Australie	<i>Borjot</i>	Nouvelle-Zélande	-	0,32	-	0,458	0,001	0,001	0,003
	<i>Lentilles Borjot</i>	Nouvelle-Zélande	0,52	0,75	0,83	1,656	0,004	0,006	0,011
Amérique	<i>Pois chiche</i>	Mexico	0,27	0,44	0,77	0,958	0,003	0,003	0,006
	<i>Haricots blancs</i>	Canada	0,43	0,67	0,13	1,398	0,004	0,005	0,009
	<i>Lentilles</i>	Canada	0,37	0,36	1,47	0,998	0,003	0,004	0,007
	<i>Maïs</i>	Argentine	-	0,44	1,02	0,708	0,002	0,002	0,005
	<i>Fassmil</i>	Argentine	-	2,09	1,7	3,120	0,008	0,009	0,021
	<i>Banane</i>	Équateur	2,37	0,63	25,61	5,243	0,014	0,021	0,035
	<i>Viande</i>	Brésil	11,84	0,36	19,63	13,866	0,037	0,069	0,093
Europe	<i>Aptamil 1</i>	France	0,45	0,52	15,4	2,379	0,006	0,008	0,016
	<i>Aptamil 2</i>	France	1,71	1,83	19,3	5,813	0,016	0,020	0,039
	<i>Biomil</i>	Belgique	0,41	0,8	17,9	2,932	0,008	0,009	0,020
	<i>Celia expr</i>	France	1,14	0,84	11,75	3,246	0,009	0,012	0,022
	<i>Celia dvlp</i>	France	0,53	1,45	29,4	4,867	0,013	0,015	0,033
	<i>France lait</i>	France	0,35	-	-	0,350	0,001	0,002	0,002

<i>France baby</i>	France	3,27	0,61	-	4,142	0,011	0,020	0,028
<i>Gastrofix</i>	Belgique	1,73	3,37	17,6	7,904	0,021	0,026	0,053
<i>Guigoz</i>	France	0,69	1,6	18,22	4,381	0,012	0,014	0,029
<i>Modilac</i>	Espagne	2,93	4,27	20,77	10,635	0,029	0,037	0,071
<i>Nactalia</i>	France	0,35	0,47	12,33	1,972	0,005	0,006	0,013
<i>Nursie</i>	France	0,73	0,16	-	0,959	0,003	0,005	0,006
<i>Céréales biomil (riz + maïs + dattes)</i>	Belgique	0,35	0,53	1,36	1,213	0,003	0,004	0,008
<i>Céréales biomil (08 céréales)</i>	Belgique	0,36	0,053	1,64	0,562	0,002	0,002	0,004
<i>BIOMIL Céréales (blé)</i>	Belgique	0,6	0,63	1,19	1,593	0,004	0,006	0,011
<i>Pois chiche Dylia</i>	Espagne	0,02	0,52	1,02	0,842	0,002	0,002	0,006
<i>Haricots blancs Gold</i>	Espagne	0,31	0,63	1,47	1,324	0,004	0,004	0,009
<i>Lentilles orange</i>	Turquie	-	0,83	0,28	1,208	0,003	0,003	0,008
<i>Blé dur</i>	Italie	-	0,7	1,75	1,136	0,003	0,003	0,008
<i>Blé dur</i>	France	0,24	0,74		1,298	0,004	0,004	0,009
<i>Blé dur</i>	Italie	0,24	0,54	0,22	1,029	0,003	0,003	0,007
<i>Blé dur</i>	France	0,72	1,59	1,66	3,122	0,008	0,010	0,021
<i>Orge</i>	France	-	1,23	1,79	1,897	0,005	0,005	0,013
<i>Maïs Sweet Princess Anne</i>	Hongrie	-	0,29	1,46	0,527	0,001	0,001	0,004
<i>Celia</i>	France	5,11	1,17	29,7	9,070	0,025	0,038	0,061
<i>Loya</i>	Suisse	12,31	0,45	13,6	14,001	0,038	0,071	0,094
<i>Candia</i>	France	0,69	0,64	18,8	3,053	0,008	0,010	0,020
<i>Nescafé classique</i>	France	2,43	0,39	6,6	3,496	0,009	0,016	0,023
<i>Nescafé 3en1 Crème</i>	Suisse	4,35	-	8,7	5,020	0,014	0,025	0,034
<i>Carte noire</i>	France	3,45	0,22	15,32	4,944	0,013	0,023	0,033
<i>Maxwell house</i>	France	2,27	0,6	38,9	6,123	0,017	0,023	0,041
<i>Pruneaux</i>	France	7,1	0,75	21,77	9,849	0,027	0,046	0,066
<i>Abricots séchés Akram</i>	Turquie	6,16	0,93	10,24	8,278	0,022	0,039	0,055
<i>Abricots séchés Melika</i>	Turquie	8,05	1,67	13,65	11,489	0,031	0,053	0,077
<i>Kiwi</i>	Italie	0,85	0,83	9,21	2,746	0,007	0,010	0,018
<i>Pomme</i>	Italie	3,09	0,21	40,08	6,476	0,017	0,026	0,043
<i>Purée Vico</i>	France	8,52	1,02	7,17	10,531	0,028	0,052	0,071
<i>Petit poids Villazar</i>	Espagne	8,05	1,03	23,9	11,363	0,031	0,053	0,076

	<i>Petit poids</i>	Turquie	4,42	1,27	9,1	6,937	0,019	0,031	0,046
	<i>Champignons Blanchaud</i>	France	5,33	1,23		7,089	0,019	0,034	0,047
	<i>Thon À l'huile Végétale</i>	Espagne	5,68	1,36	25,61	9,597	0,026	0,041	0,064
	<i>Poivre noir</i>	Espagne	3,24	0,46	13,22	4,916	0,013	0,022	0,033
	<i>Additif alimentaire</i>	Espagne	2,48	2,52	10,88	6,921	0,019	0,026	0,046
	<i>Pâte à tartiner</i>	France	0,77	1,11	5,12	2,752	0,007	0,010	0,018
	<i>Ketchup</i>	Espagne	0,52	0,91	14,51	2,939	0,008	0,009	0,020
	<i>Moutarde</i>	France	0,21	2,91	23,9	6,212	0,017	0,017	0,042
	<i>Levure instantanée</i>	Turquie	0,42	3,38	13,31	6,278	0,017	0,018	0,042
	<i>Levure instantanée</i>	Turquie	0,42	1,53	2,04	2,765	0,007	0,009	0,019
<b>Asie</b>	<i>Riz</i>	Thaïlande	-	0,28	0,57	0,444	0,001	0,001	0,003
	<i>Riz basmati</i>	Inde	0,36	0,28	0,58	0,805	0,002	0,003	0,005
	<i>Blé dur</i>	Indonésie	-	0,44	1,02	0,708	0,002	0,002	0,005
	<i>Maïs doux doré Delmonte</i>	Thaïlande	-	0,385	0,073	0,556	0,002	0,002	0,004
	<i>Cacahouète</i>	Chine	0,26	1,36	0,29	2,227	0,006	0,007	0,015
	<i>Barari</i>	Sri Lanka	1,13	4,92	28,1	10,329	0,028	0,031	0,069
	<i>El Marwan</i>	Chine	0,94	1,86	16,4	4,863	0,013	0,016	0,033
	<i>El Marwan targui</i>	Chine	1,75	1,03	23	4,994	0,013	0,018	0,033
	<i>El Rakim</i>	Chine	3,98	4,59	21,5	12,199	0,033	0,044	0,082
	<i>Aigle</i>	Chine	0,116	8,6	11,5	13,300	0,036	0,037	0,089
	<i>Raisins secs</i>	Inde	11,01	2,25	7,04	14,770	0,040	0,070	0,099
	<i>Raisins secs</i>	Iran	3,41	2,08	6,14	6,857	0,019	0,028	0,046
	<i>Noix de Coco</i>	Indonésie	7,81	0,71	15,36	10,008	0,027	0,048	0,067
	<i>Noix de Coco</i>	Vietnam	20,6	0,44	26,89	23,300	0,063	0,119	0,156
	<i>Ananas en tranche Délicias</i>	Thaïlande	17,05	1,33	3,07	19,188	0,052	0,098	0,129
	<i>Champignons de paris Kingtom</i>	Chine	-	3,23	4,18	4,941	0,013	0,013	0,033
	<i>Ail</i>	Chine	0,79	5,33	55,05	12,651	0,034	0,037	0,085
	<i>Bâtonnet de poisson</i>	Chine	6,48	2,57	20,41	11,727	0,032	0,049	0,079
	<i>Fruits de mer</i>	Chine - France	7,1	6,83	11,52	17,754	0,048	0,067	0,119
	<i>Safran</i>	Inde	5,68	0,54	12,44	7,410	0,020	0,035	0,050
	<i>Cannelle</i>	Indonésie	2,32	-	14,64	3,447	0,009	0,016	0,023
	<i>Gingembre</i>	Inde	8,52	0,48	9,39	9,929	0,027	0,050	0,066
<i>Indomie</i>	Indonésie	-	0,44	1,02	0,708	0,002	0,002	0,005	

<i>Riz Star</i>	Chine	0,10	0,32	1,82	0,698	0,002	0,002	0,005
-----------------	-------	------	------	------	-------	-------	-------	-------

**Tableau IV 17:** Statistiques descriptives des activités des radionucléides et des paramètres radiologiques pour chaque continent.

		$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$Ra_{eq}$	$HI$	$Hin$	$I\gamma$
<b>Afrique</b>		1,09	0,36	-	1,605	0,004	0,007	0,011
	<i>Moyenne</i>	3,54	1,04	5,96	5,48	0,015	0,024	0,038
<b>Australie</b>	<i>Maximum</i>	9	2,73	11,1	13,76	0,037	0,062	0,092
	<i>Minimum</i>	0,52	0,32	0,83	0,46	0,001	0,001	0,03
	<i>Ecart-type</i>	3,64	0,85	5,14	4,69	0,01	0,02	0,03
<b>Amérique</b>	<i>Moyenne</i>	3,06	0,71	7,19	4,63	0,013	0,021	0,032
	<i>Maximum</i>	11,84	2,09	25,61	13,87	0,037	0,069	0,093
	<i>Minimum</i>	0,37	0,36	0,13	0,71	0,002	0,003	0,006
	<i>Ecart-type</i>	3,51	0,39	8,82	3,31	0,01	0,02	0,02
<b>Europe</b>	<i>Moyenne</i>	2,57	1,10	12,83	5,14	0,014	0,021	0,037
	<i>Maximum</i>	12,31	4,27	40,08	14	0,038	0,071	0,094
	<i>Minimum</i>	0,02	0,053	0,22	0,35	0,001	0,001	0,004
	<i>Ecart-type</i>	2,27	0,64	8,16	2,93	0,01	0,01	0,02
<b>Asie</b>	<i>Moyenne</i>	5,23	2,19	12,17	9,30	0,025	0,039	0,065
	<i>Maximum</i>	17,05	8,6	55,05	23,30	0,063	0,098	0,156
	<i>Minimum</i>	0,10	0,28	0,07	0,44	0,001	0,001	0,003
	<i>Ecart-type</i>	4,46	1,81	9,34	5,37	0,01	0,02	0,04

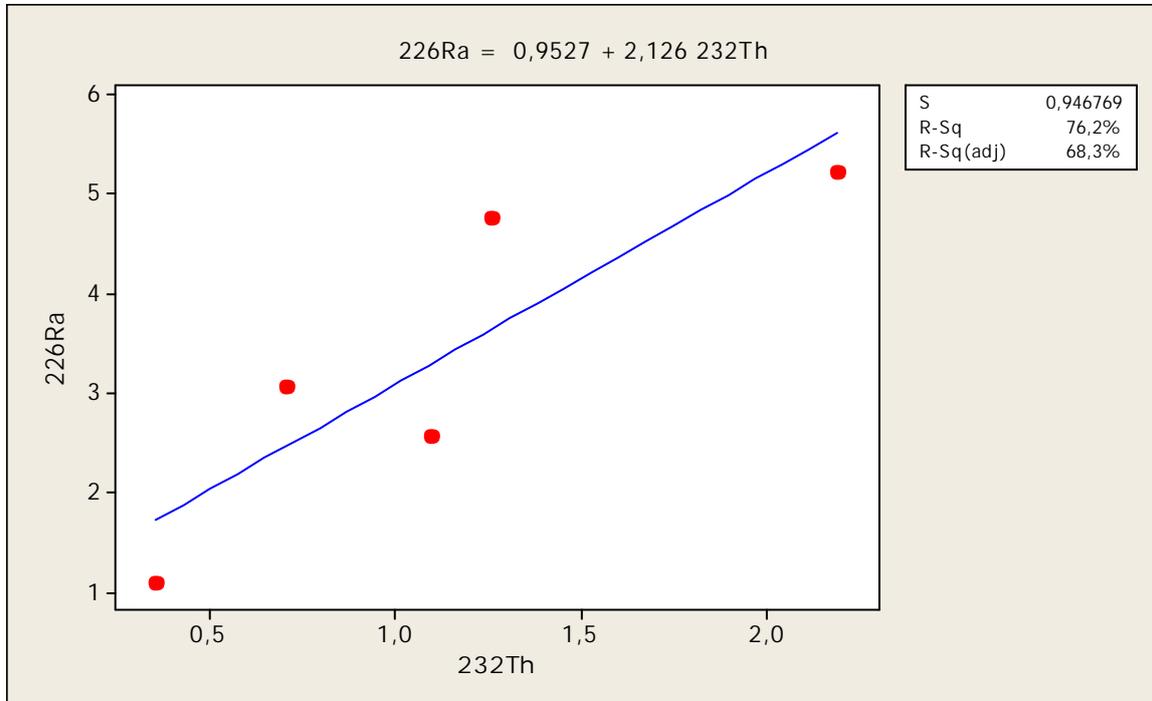
Les valeurs de l'écart-type de tous les radionucléides et les paramètres radiologiques sont plus faibles que leurs valeurs moyennes. Cela indique un degré d'uniformité dans leur distribution.

### VI.2.2 Étude de corrélation entre les radionucléides naturels

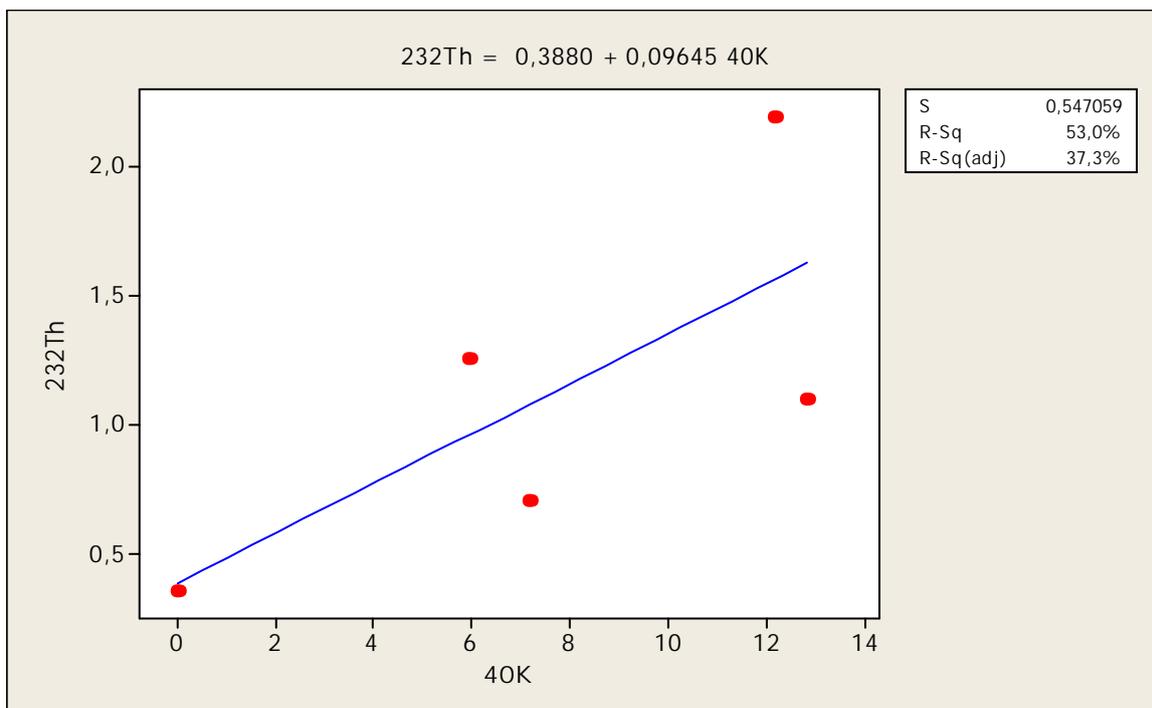
Afin d'examiner s'il existait une association entre les radionucléides, des études de corrélation entre chaque paire de radionucléides ont été réalisées.

Les figures IV.17 (a, b, et c) montrent clairement : Une bonne corrélation entre ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) avec une valeur de 0,76. Cette forte corrélation indique que le résultat individuel d'un radionucléide donné est un bon prédicateur pour l'activité de l'autre composant de la paire.

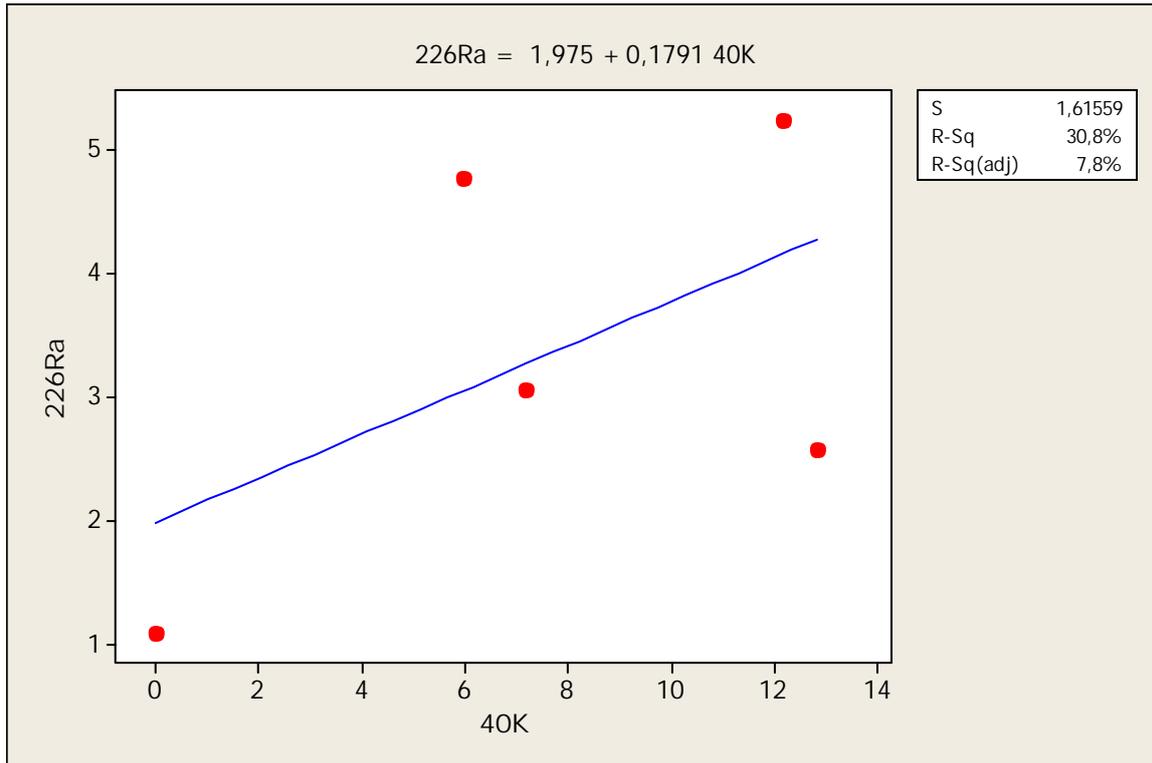
Cependant, une faible corrélation entre les paires ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) et ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) où les coefficients de corrélation sont 0,31 et 0,53 respectivement. Ce qui indique qu'ils peuvent avoir la même origine mais que leurs comportements dans l'environnement sont différents.



**Figure IV. 19:** Corrélation entre les activités de ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) pour chaque continent



**Figure IV. 20:** Corrélation entre les activités de ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) pour chaque continent.



**Figure IV. 21:** Corrélation entre les activités de ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) pour chaque continent.

### IV.2.3 Corrélations de Pearson

Le tableau VI.16 résume la relation d'association linéaire des radionucléides et les paramètres radiologiques associés, qu'a été établie par le coefficient de Pearson.

**Tableau IV 18:** Corrélation de Pearson entre les radionucléides présents dans les échantillons et les paramètres radiologiques associés.

	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	$Ra_{eq}$	$HI$	$Hin$	$I\gamma$
$^{226}\text{Ra}$	1,000						
$^{232}\text{Th}$	0,914	1,000					
$^{40}\text{K}$	0,341	0,675	1,000				
$Ra_{eq}$	0,960	0,990	0,586	1,000			
$HI$	0,960	0,990	0,586	1,000	1,000		
$Hin$	0,983	0,973	0,506	0,995	0,995	1,000	
$I\gamma$	0,951	0,993	0,610	1,000	1,000	0,992	1,000

Les trois radionucléides ont un coefficient de corrélation positif  $> 0,80$  avec les paramètres radiologiques, c'est-à-dire qu'il existe une forte corrélation entre les radionucléides et les paramètres radiologiques.

Ce résultat de corrélation montre que les trois radionucléides contribuent de manière significative à l'émission de rayons gamma et par conséquent à la propagation du rayonnement dans le monde.

## ***CONCLUSION GENERALE***

## Conclusion générale

Le corps humain rayonne de l'intérieur à travers l'air qu'il respire et la nourriture et l'eau qui atteint son atmosphère, l'air est la principale source de la dose radiologique naturelle qui atteint le corps humain. En outre, la nourriture que les humains et l'eau principale de ces matières radioactives dans une plante sont le sol à partir duquel les plantes absorbent ces matières avec d'autres matières naturelles et entrent dans leur construction. Une partie de la poussière qui tombe sur la plante contient des traces de ces matières radioactives, et les matières radioactives atteignent le corps humain en mangeant des plantes ou de la viande animale qui se nourrissent de plantes.

Nous avons déterminé dans cet étude les niveaux d'activité des radionucléides naturels et artificiels pour des échantillons des aliments importés consommés en Algérie, en utilisant la technique de la spectrométrie . La dose efficace moyenne totale, le risque radiologique sur la santé sont également estimés et les paramètres radiologiques échantillons afin d'évaluer les risques provoqués, en estimant plusieurs paramètres radiologiques, tels l'activité équivalente du Radium ( $Ra_{eq}$ ), les indices de risque externe et interne ( $H_i$ ,  $H_{in}$ ) et l'indice représentatif de niveau ( $I_v$ )

La détection et la mesure des radionucléides dans les 83 échantillons d'aliments importés de différentes catégories ont été réalisés à l'aide d'un spectromètre à rayons avec un détecteur de puits NaI (Tl)  $2 \times 2$  (Canberra) et le logiciel de vision GENIE 2000.

L'efficacité du détecteur a été calculée par une méthode simplifiée en utilisant la valeur exacte pour chaque ligne d'énergie et non pour un intervalle d'énergie, évitant ainsi l'utilisation de sources radioactives pour l'étalonnage du détecteur dans chaque analyse et diminuant donc l'exposition au rayonnement.

Les résultats obtenus montrent que les radionucléides naturels des séries  $^{226}\text{Ra}$  ( $^{238}\text{U}$ ) et  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  sont présents dans tous les échantillons, avec des activités inférieures aux limites autorisées identifiées par UNSCEAR 2000. Tandis que, le radionucléide anthropogénique  $^{137}\text{Cs}$  a été trouvé de faible activité.

Du point de vue radioprotection, les activités des radionucléides naturels mesurées dans l'ensemble des échantillons sont comparables aux données établies dans la plupart des régions du monde, ce qui prouve que les activités des radioéléments ne présentent pas une pollution radioactive significative qui pourrait inquiéter le public.

L'étude de la corrélation entre chaque paire de radionucléides a été faite afin de trouver l'étendue de la coexistence de ces radionucléides. À partir des résultats obtenus, nous avons constaté que le comportement de paires ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) et ( $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ ) dans les échantillons est très différent. Par contre, une bonne corrélation a été observée entre les séries de ( $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ) qui indique que ces deux éléments ont la même origine. Une forte corrélation a été observée entre les radionucléides naturels dans les échantillons.

La présente étude est la première au niveau national à étudier la radioactivité des aliments. On constate que la consommation de ces types de denrées alimentaires est sans danger pour tous les groupes d'âge étudiés. Les résultats de ces travaux aideront à établir une base de référence de l'exposition à la radioactivité du grand public suite à l'ingestion de denrées alimentaires.

La sensibilisation et l'inquiétude du public quant à l'impact de la contamination radioactive ont atteint un niveau élevé qui conduira sans aucun doute à de nouvelles réglementations concernant l'importation, l'exportation et la fabrication de produits alimentaires dans de nombreux pays.

## ***REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES***

## Références

1. Ksouri, A., *Radioactivity Measurement in the Detergent Products by Gamma Spectrometry*.
2. Lyoussi, A., *Détection de rayonnements et instrumentation nucléaire* 2012: EDP sciences.
3. LES CHAMPS ÉLECTRIQUES, E.M. and E.S. LA SANTÉ, *Chapitre 49-Les rayonnements non ionisants*.
4. COURTES, D.À.O., D.R.À. LA, and A.R. DE L'EXPOSITION, *CODE DE SÉCURITÉ-25*.
5. Dziri, S., *Etudes expérimentales et simulations Monte Carlo en spectrométrie  $\gamma$ : Correction des effets de cascade et de matrice pour des mesures environnementales*, 2013, Université de Strasbourg.
6. OULD ZOHRA, S., *Evaluation de la concentration de l'activité naturelle des fruits importés par spectrométrie gamma*, 12-11-2017.
7. Baatout, S., *La Radioactivité*. Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège, 2018.
8. EL BRAHMI, Y., *Les accidents d'irradiation dans le monde et leurs conséquence sur la sante de l'homme (vers une meilleure prise en charge des personnes irradiées)*, 2008.
9. DU, M.D.I.E.F. and R. ÉLECTROMAGNÉTIQUES, *Chapitre IV: Interaction des rayonnements ionisants avec la matière*. Feuillet de radiologie, 2002. **42**(5): p. 437-441.
10. DJAMILA, H., *MESURE DES RADIATIONS NATURELLES DES SÉDIMENTS ET DE SOL DE HAMMAM BOUGHRARA «OUED MOUILLAH»*, 2015.
11. IAEA, I., *Safety Glossary Terminology Used in Nuclear Safety and Radiation Protection 2007 Edition*. IAEA, Vienna, 2007.
12. Dunai, T.J., *Cosmogenic Nuclides: Principles, concepts and applications in the Earth surface sciences* 2010: Cambridge University Press.
13. Reguigui, N., *Sources de radioactivités dans l'environnement*, 2009, CNSTN.
14. Dinh Chau, N., et al., *Natural radioactivity in groundwater—a review*. Isotopes in Environmental and Health Studies, 2011. **47**(4): p. 415-437.
15. UNSCEAR, *Effects of ionizing radiation: UNSCEAR 2006 report to the general assembly, with scientific annexes*. Vol. 2. 2008: United nations publications.
16. Ahmed, M.E., et al., *The Presence and Distribution of Radioactivity and Radionuclides in Kuwait Wastewater Treatment Plants*. Arabian Journal for Science and Engineering, 2019. **44**(10): p. 8779-8786.
17. Bouhila, G. and F. Benrachi, *Étude de la répartition de radionucléides présents dans les lacs de barrages artificiels*, 2018, Université Frères Mentouri - Constantine 1.
18. Pedro, C. *La chaîne panafricaine du Nord-Ouest de l'Angola : Etude pétrostructurale, géochimique et géochronologique. Implications géodynamiques*. 2012.
19. Kebir, H., *CONCENTRATIONS DE L'URANIUM-238 DANS LES EAUX THERMALES A L'EST ALGÉRIEN*, 2018.
20. Tirmarche, M., et al., *Évaluation du risque de cancer lié à l'inhalation de radon*. Rev l'ACOMEN, 1998. **4**(11-18).
21. BOURADA, S., *Evaluation de la concentration de l'activité naturelle des céréales du blé et de l'orge importés par spectrométrie gamma*, 19-12-2017.
22. Organization, W.H., *Report of the first global meeting of the International Food Safety Authorities Network (INFOSAN), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 14-16 December 2010*. 2011.
23. Raven, P.H., L.R. Berg, and D.M. Hassenzahl, *Environnement* 2009: De Boeck.
24. Tahereh, H., et al., *Measurement of natural and artificial radionuclide concentrations in imported foodstuffs in Iran*. 2007.
25. Marano, F., R. Barouki, and D. Zmirou, *Toxique? Santé et environnement: de l'alerte à la décision* 2015: Buchet/Chastel.
26. Bertin, M. and F. Dardé, *Les effets biologiques des rayonnements ionisants* 1987: Sodel.

27. DOUDOUH, A., Y. OUFROUKHI, and A. BIYI, *Effets des rayonnements ionisants sur la santé de l'homme*. Espérance médicale, 2009. **16**(164): p. 577-581.
28. Turner, J.E., *Atoms, Radiation, and Radiation Protection*. Completely Revised and Enlarged Edition ed. Vol. Third. 2007: Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
29. Knoll, G., *Radiation Detection and Measurement* 3rd edition John Wiley and Sons. New York, 2000.
30. Benali, A.-H., *INTERACTION RAYONNEMENT – MATIERE*, 2016. p. 11.
31. Vanstalle, M., *Dosimétrie électronique et métrologie neutrons par capteur CMOS à pixels actifs*, 2011, Université de Strasbourg.
32. Sze, S.M., *Semiconductor devices: physics and technology* 2008: John Wiley & Sons.
33. Sze, S.M. and K.K. Ng, *Physics of semiconductor devices* 2006: John Wiley & Sons.
34. Lutz, G., *Semiconductor radiation detectors*. Vol. 40. 1999: Springer.
35. Linder, S., *Power semiconductors* 2006: EPFL press.
36. Paradis, H., *Développement de la mesure par spectrométrie gamma en coïncidence*, 2016, Université Paris-Saclay.
37. Gordon, R.G. and O. Hemingway John, *Practical Gamma-ray spectrometry*. Sussex, ENGLAND: Wiley, 2008.
38. Horrocks, D., *Applications of liquid scintillation counting* 2012: Elsevier.
39. Birks, J.B., *The theory and practice of scintillation counting: International series of monographs in electronics and instrumentation*. Vol. 27. 2013: Elsevier.
40. Bell, Z.W., et al. *Organic scintillators for neutron detection*. in *X-Ray and Gamma-Ray Detectors and Applications IV*. 2003. International Society for Optics and Photonics.
41. Sackscatter, I., 2. *GAMMA-RAY DETECTORS I*. ATOMIC ENERGY COMMISSION CONTRACT W-740 S-ENG. 36: p. 12.
42. Weber, M.J., *Inorganic scintillators: today and tomorrow*. Journal of Luminescence, 2002. **100**(1-4): p. 35-45.
43. Gilmore, G., *Practical gamma-ray spectroscopy* 2011: John Wiley & Sons.
44. Rodnyi, P.A., *Physical processes in inorganic scintillators*. Vol. 14. 1997: CRC press.
45. Crouthamel, C.E., F. Adams, and R. Dams, *Applied gamma-ray spectrometry*. Vol. 41. 2013: Elsevier.
46. Bushberg, J.T. and J.M. Boone, *The essential physics of medical imaging* 2011: Lippincott Williams & Wilkins.
47. Hubbell, J., *Photon cross sections, attenuation coefficients and energy absorption coefficients*. National Bureau of Standards Report NSRDS-NBS29, Washington DC, 1969.
48. GENIE-, *Basic Spectroscopy (Standalone) V1. 2A Copyright (c)*, 1997, Canberra Industries.
49. Bicorn, S.G.C., *Detector counting efficiency, data sheets*. 2004.
50. Hubbell, J.H. and S.M. Seltzer, *Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements Z= 1 to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest*, 1995, National Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United ....
51. Kadum, A. and B. Dahmani, *Efficiency Calculation Of Nai (TI) 2x2 Well Detector*. INTERNATIONAL JOURNAL OF TECHNOLOGY ENHANCEMENTS AND EMERGING ENGINEERING RESEARCH, 2014. **2**(6): p. 45.
52. Al-Hamarneh, I., *Radiometric investigation of uranium isotopic ratio in the Jordanian environment*. Dirasat, Pure sciences, 2006. **33**(1): p. 49-59.
53. Reguigui, R., et al., *Radionuclide levels and temporal variation in phosphogypsum*. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 2005. **264**(3): p. 719-722.
54. Desimoni, J., et al., *Activity levels of gamma-emitters in Argentinean cow milk*. Journal of Food Composition and Analysis, 2009. **22**(3): p. 250-253.
55. Samat, S. and C. Evans, *Statistics and nuclear counting—theory, problems and solutions*. Univerisiti Pertanian Malaysia Press, Serdang, 1992.

56. Radiation, U.N.S.C.o.t.E.o.A., *Sources and effects of ionizing radiation: sources*. Vol. 1. 2000: United Nations Publications.
57. ICRP, I.C.o.R. Protection, and I.C.o.R. Units, *ICRP Publication 74: Conversion Coefficients for Use in Radiological Protection Against External Radiation*. Vol. 23. 1996: Elsevier Health Sciences.
58. El Mestikou, R., et al., *Determination of the activity level in powdered milk available in Tunisia and assessment of the radiological risks*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018. **317**(2): p. 991-996.
59. Tufail, M., M. Iqbal, and S. Mirza, *Radiation doses due to the natural radioactivity in Pakistan marble*. Radioprotection, 2000. **35**(3): p. 299-310.
60. Agbalagba, E.O., H.O. Agbalagba, and G.O. Avwiri, *Cost-benefit analysis approach to risk assessment of natural radioactivity in powdered and liquid milk products consumed in Nigeria*. Environmental Forensics, 2016. **17**(3): p. 191-202.
61. Tawalbeh, A., et al., *A study of natural radionuclide activities and radiation hazard index in some grains consumed in Jordan*. Malaysian Journal of Analytical Sciences, 2011. **15**(1): p. 61-69.
62. Yasir, M.S., A. Ab Majid, and R. Yahaya, *Study of natural radionuclides and its radiation hazard index in Malaysian building materials*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2007. **273**(3): p. 539-541.
63. Agbalagba, E., G. Avwiri, and Y. Chad-Umoreh,  *$\gamma$ -Spectroscopy measurement of natural radioactivity and assessment of radiation hazard indices in soil samples from oil fields environment of Delta State, Nigeria*. Journal of environmental radioactivity, 2012. **109**: p. 64-70.
64. Al-Zahrani, J., *Natural radioactivity and heavy metals in milk consumed in Saudi Arabia and population dose rate estimates*. Life Science Journal, 2012. **9**(2): p. 651-656.
65. Alrefae, T., T. Nageswaran, and T. Al-Shemali, *Radioactivity of long lived gamma emitters in breakfast cereal consumed in Kuwait and estimates of annual effective doses*. world, 2012. **4**: p. 11.
66. Hosseini, T., et al., *Assessment of radionuclides in imported foodstuffs in Iran*. 2006.
67. Al-Masri, M., et al., *Natural radionuclides in Syrian diet and their daily intake*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2004. **260**(2): p. 405-412.
68. Ababneh, Z.Q., et al., *Measurement of natural and artificial radioactivity in powdered milk consumed in Jordan and estimates of the corresponding annual effective dose*. Radiation protection dosimetry, 2009. **138**(3): p. 278-283.
69. Saleh, I.H., et al., *Radiological study on soils, foodstuff and fertilizers in the Alexandria region, Egypt*. Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences, 2007. **31**(1): p. 9-17.
70. Uwatse, O.B., et al., *Measurement of natural and artificial radioactivity in infant powdered milk and estimation of the corresponding annual effective dose*. Environmental Engineering Science, 2015. **32**(10): p. 838-846.
71. Alamoudi, Z.M., *Assessment of natural radionuclides in powdered milk consumed in Saudi Arabia and estimates of the corresponding annual effective dose*. J Am Sci, 2013. **9**(6): p. 267-273.
72. Osibote, O., et al., *Radioactivity in milk consumed in Nigeria 10 years after Chernobyl reactor accident*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 1999. **422**(1-3): p. 778-783.
73. Shanthi, G., et al., *Natural radionuclides in the South Indian foods and their annual dose*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 2010. **619**(1-3): p. 436-440.
74. Jemii, E. and T. Alharbi, *Measurements of natural radioactivity in infant formula and radiological risk assessment*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2018. **315**(2): p. 157-161.

75. Protection, I.C.o.R., *Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60: ICRP Publication 119*. Ann. ICRP, 2012. **41**(Suppl).
76. Priharti, W., et al., *Assessment of radiation hazard indices arising from natural radionuclides content of powdered milk in Malaysia*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2016. **307**(1): p. 297-303.
77. Desideri, D., et al., *Natural radionuclides in Italian diet and their annual intake*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014. **299**(3): p. 1461-1467.
78. UNSCEAR, S., *effects of Ionizing Radiation*. United Nations, New York, 2000: p. 453-487.
79. Eckerman, K., et al., *ICRP publication 119: compendium of dose coefficients based on ICRP publication 60*. Annals of the ICRP, 2012. **41**: p. 1-130.
80. FAO/WHO, *Codex Alimentarius: general requirements, in Codex Alimentarius: . general requirements*, 1995.
81. Agency, U.S.E.P. 2011. Available from: <https://www.epa.gov/iris>.
82. UNSCEAR, *Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation in United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation*, U. Nations, Editor (2000), Report: New York. p. 94.
83. Yu, K. and S. Mao, *Assessment of radionuclide contents in food in Hong Kong*. Health physics, 1999. **77**(6): p. 686-696.
84. Venturini, L. and G. Sordi, *Radioactivity in and committed effective dose from some Brazilian foodstuffs*. Health physics, 1999. **76**(3): p. 311-313.
85. Kuo, Y.-C., et al., *Activity concentrations and population dose from radium-226 in food and drinking water in Taiwan*. Applied radiation and isotopes, 1997. **48**(9): p. 1245-1249.
86. Fisenne, I.M., et al., *The daily intake of 234,235,238 U, 228,230,232 Th and 226,228 Ra by New York City residents*. Health physics, 1987. **53**(4): p. 357-363.
87. Shiraishi, K., et al., *Contributions of 18 food categories to intakes of 232Th and 238U in Japan*. Health physics, 2000. **78**(1): p. 28-36.
88. Shiraishi, K. and M. Yamamoto, *Dietary 232 Th and 238 U intakes for Japanese as obtained in a market basket study and contributions of imported foods to internal doses*. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 1995. **196**(1): p. 89-96.
89. Vasconcellos, L., et al., *Uptake of 226Ra and 210Pb by food crops cultivated in a region of high natural radioactivity in Brazil*. Journal of environmental radioactivity, 1987. **5**(4): p. 287-302.
90. Alrefae, T., T.N. Nageswaran, and T. Al-Shemali, *Radioactivity of long lived gamma emitters in breakfast cereal consumed in Kuwait and estimates of annual effective doses*. J. Radiat. Res, 2012. **10**.
91. Al-Zahrani, J., *Natural Radioactivity and Heavy Metals Measurement in Rice and Flour Consumed by the Inhabitants in Saudi Arabia*. Advance Journal of Food Science and Technology, 2016. **12**(12): p. 698-704.
92. Acquah, G.F. and M. Pooko-Aikins, *Foodstuffs and cancer: analysis of radionuclides and its radiation levels in common Ghanaian maize*. Int. J. Sci: Basic Appl. Res, 2013. **12**: p. 1-7.
93. Martinez, T., et al., *Potassium concentrations and annual effective dose of the customary food stuffs in Mexico*. Journal of radioanalytical and nuclear chemistry, 2014. **299**(1): p. 835-838.
94. Kumari, R., et al., *Activity concentration and annual effective ingestion dose assessment due to natural radionuclides present in cereal samples consumed by inhabitants of India*. International Journal of Low Radiation, 2015. **10**(2): p. 155-168.
95. Jackson, P., *Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: part 5 compilation of ingestion and inhalation dose coefficients (ICRP Publication 72)*, 1996, IOP Publishing.
96. Olatunji, M.A., et al., *Radiological study on newly developed composite corn advance lines in Malaysia*. Physica Scripta, 2014. **89**(12): p. 125002.
97. Baz, S.S. and Z.M. Alamoudi, *Naturally occurring radioactive nuclides from cereal grains, legumes and some foodstuffs consumed in Saudi Arabia*. Life Science Journal, 2017. **14**(7).

98. Awudu, A., et al., *Preliminary studies on <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>228</sup>Th and <sup>40</sup>K concentrations in foodstuffs consumed by inhabitants of Accra metropolitan area, Ghana*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2012. **291**(3): p. 635-641.
99. Jibiri, N., I. Farai, and S. Alausa, *Estimation of annual effective dose due to natural radioactive elements in ingestion of foodstuffs in tin mining area of Jos-Plateau, Nigeria*. Journal of Environmental Radioactivity, 2007. **94**(1): p. 31-40.
100. Jibiri, N. and A. Okusanya, *Radionuclide contents in food products from domestic and imported sources in Nigeria*. Journal of Radiological Protection, 2008. **28**(3): p. 405.
101. Eisenbud, M. and T.F. Gesell, *Environmental radioactivity from natural, industrial and military sources: from natural, industrial and military sources*1997: Elsevier.
102. Turner, J., *Radiation dosimetry*. Atoms, radiation, and radiation protection. 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995: p. 368-370.
103. Hernandez, F., et al., *Activity concentrations and mean annual effective dose of foodstuffs on the island of Tenerife, Spain*. Radiation protection dosimetry, 2004. **111**(2): p. 205-210.
104. Quan, W., et al., *Re-estimation of internal dose from natural radionuclides for Chinese adult men*. Radiation Protection Dosimetry, 2008. **130**(4): p. 434-441.
105. Nasreddine, L., et al., *Activity concentrations and mean annual effective dose from gamma-emitting radionuclides in the Lebanese diet*. Radiation protection dosimetry, 2008. **131**(4): p. 545-550.
106. Choi, M.-S., et al., *Daily intakes of naturally occurring radioisotopes in typical Korean foods*. Journal of environmental radioactivity, 2008. **99**(8): p. 1319-1323.
107. Patra, A., et al., *Assessment of ingestion dose due to radioactivity in selected food matrices and water near Vizag, India*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2014. **300**(3): p. 903-910.
108. Khandaker, M.U., P.J. Jojo, and H.A. Kassim, *Determination of primordial radionuclides in natural samples using HPGe gamma-ray spectrometry*. APCBEE Procedia, 2012. **1**: p. 187-192.
109. Syarbaini, S., A. Warsona, and D. Iskandar, *Natural radioactivity in some food crops from Bangka-Belitung islands, Indonesia*. Atom Indonesia, 2014. **40**(1): p. 27-32.
110. Tawalbeh, A., S. Samat, and M.S. Yasir, *Radionuclides level and its radiation hazard index in some drinks consumed in the central zone of Malaysia*. Sains Malaysiana, 2013. **42**(3): p. 319-323.
111. Saeed, M., et al., *Measurements of natural radionuclides in vegetables by gamma spectrometry*. Journal of Applied Spectroscopy, 2014. **81**(3): p. 541-545.
112. Priharti, W. and S.B. Samat, *Radiological risk assessment from the intake of vegetables and Fruits in Malaysia*. Malaysian Journal of Analytical Sciences, 2016. **20**(6): p. 1247-1253.
113. The National Office of Statistics, A. 2017; Available from: <https://knoema.fr/atlas/sources/National-Statistics-Office-Algeria>.
114. Aloraini, D.A., et al., *Evaluation of the activity of gamma-emitting natural radionuclides in seafood and estimation of the annual effective dose for different age groups in KSA*. Radiation protection dosimetry, 2018. **178**(2): p. 193-200.
115. Al-Ghamdi, A., *Activity concentrations and mean annual effective dose of spices food consumed by inhabitants of Saudi Arabia*. Journal of American Science, 2014. **10**(11): p. 164-168.

# ***ANNEXE***

## Annexe A

### $\mu/$ de sodium

<b>Sodium</b>			
<b>Z = 11</b>			
	<b>Energie(MeV)</b>	<b><math>\mu/</math> (<math>cm^2/g</math>)</b>	<b><math>\mu_{en}/</math> (<math>cm^2/g</math>)</b>
	1,00000E-03	6,542E+02	6,522E+02
	1,03542E-03	5,960E+02	5,941E+02
	1,07210E-03	5,429E+02	5,410E+02
<b>K</b>	1,07210E-03	6,435E+03	6,320E+03
	1,50000E-03	3,194E+03	3,151E+03
	2,00000E-03	1,521E+03	1,504E+03
	3,00000E-03	5,070E+02	5,023E+02
	4,00000E-03	2,261E+02	2,238E+02
	5,00000E-03	1,194E+02	1,178E+02
	6,00000E-03	7,030E+01	6,915E+01
	8,00000E-03	3,018E+01	2,941E+01
	1,00000E-02	1,557E+01	1,499E+01
	1,50000E-02	4,694E+00	4,313E+00
	2,00000E-02	2,057E+00	1,759E+00
	3,00000E-02	7,197E-01	4,928E-01
	4,00000E-02	3,969E-01	2,031E-01
	5,00000E-02	2,804E-01	1,063E-01
	6,00000E-02	2,268E-01	6,625E-02
	8,00000E-02	1,796E-01	3,761E-02
	1,00000E-01	1,585E-01	2,931E-02
	1,50000E-01	1,335E-01	2,579E-02
	2,00000E-01	1,199E-01	2,635E-02

3,00000E-01	1,029E-01	2,771E-02
4,00000E-01	9,185E-02	2,833E-02
5,00000E-01	8,372E-02	2,845E-02
6,00000E-01	7,736E-02	2,830E-02
8,00000E-01	6,788E-02	2,760E-02
1,00000E+00	6,100E-02	2,669E-02
1,25000E+00	5,454E-02	2,549E-02
1,50000E+00	4,968E-02	2,437E-02
2,00000E+00	4,282E-02	2,249E-02
3,00000E+00	3,487E-02	1,997E-02
4,00000E+00	3,037E-02	1,842E-02
5,00000E+00	2,753E-02	1,743E-02
6,00000E+00	2,559E-02	1,675E-02
8,00000E+00	2,319E-02	1,595E-02
1,00000E+01	2,181E-02	1,552E-02
1,50000E+01	2,023E-02	1,508E-02
2,00000E+01	1,970E-02	1,496E-02

## Annexe B

### $\mu/ d'$ Aluminium

<b>Aluminium</b>			
<b>Z = 13</b>			
	<b>Energie(MeV)</b>	<b><math>\mu/</math> (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b><math>\mu_{en}/</math> (cm<sup>2</sup>/g)</b>
	1,00000E-03	1,185E+03	1,183E+03
	1,50000E-03	4,022E+02	4,001E+02
	1,55960E-03	3,621E+02	3,600E+02
<b>K</b>	1,55960E-03	3,957E+03	3,829E+03
	2,00000E-03	2,263E+03	2,204E+03
	3,00000E-03	7,880E+02	7,732E+02
	4,00000E-03	3,605E+02	3,545E+02
	5,00000E-03	1,934E+02	1,902E+02
	6,00000E-03	1,153E+02	1,133E+02
	8,00000E-03	5,033E+01	4,918E+01
	1,00000E-02	2,623E+01	2,543E+01
	1,50000E-02	7,955E+00	7,487E+00
	2,00000E-02	3,441E+00	3,094E+00
	3,00000E-02	1,128E+00	8,778E-01
	4,00000E-02	5,685E-01	3,601E-01
	5,00000E-02	3,681E-01	1,840E-01
	6,00000E-02	2,778E-01	1,099E-01
	8,00000E-02	2,018E-01	5,511E-02
	1,00000E-01	1,704E-01	3,794E-02
	1,50000E-01	1,378E-01	2,827E-02
	2,00000E-01	1,223E-01	2,745E-02
	3,00000E-01	1,042E-01	2,816E-02
	4,00000E-01	9,276E-02	2,862E-02
	5,00000E-01	8,445E-02	2,868E-02
	6,00000E-01	7,802E-02	2,851E-02
	8,00000E-01	6,841E-02	2,778E-02
	1,00000E+00	6,146E-02	2,686E-02
	1,25000E+00	5,496E-02	2,565E-02
	1,50000E+00	5,006E-02	2,451E-02

---

2,00000E+00	4,324E-02	2,266E-02
3,00000E+00	3,541E-02	2,024E-02
4,00000E+00	3,106E-02	1,882E-02
5,00000E+00	2,836E-02	1,795E-02
6,00000E+00	2,655E-02	1,739E-02
8,00000E+00	2,437E-02	1,678E-02
1,00000E+01	2,318E-02	1,650E-02
1,50000E+01	2,195E-02	1,631E-02
2,00000E+01	2,168E-02	1,633E-02

---

## Annexe C

### $\mu/$ d'Iodine

<b>Iodine</b>			
<b>Z = 53</b>			
	<b>Energie (MeV)</b>	<b><math>\mu/</math> (cm<sup>2</sup>/g)</b>	<b><math>\mu_{en}/</math> (cm<sup>2</sup>/g)</b>
	1,00000E-03	9,096E+03	9,078E+03
	1,03542E-03	8,465E+03	8,448E+03
	1,07210E-03	7,863E+03	7,847E+03
<b>M1</b>	1,07210E-03	8,198E+03	8,181E+03
	1,50000E-03	3,919E+03	3,908E+03
	2,00000E-03	1,997E+03	1,988E+03
	3,00000E-03	7,420E+02	7,351E+02
	4,00000E-03	3,607E+02	3,548E+02
	4,55710E-03	2,592E+02	2,537E+02
<b>L3</b>	4,55710E-03	7,550E+02	7,121E+02
	4,70229E-03	7,123E+02	6,724E+02
	4,85210E-03	6,636E+02	6,270E+02
<b>L2</b>	4,85210E-03	8,943E+02	8,375E+02
	5,00000E-03	8,430E+02	7,903E+02
	5,18810E-03	7,665E+02	7,198E+02
<b>L1</b>	5,18810E-03	8,837E+02	8,283E+02
	6,00000E-03	6,173E+02	5,822E+02
	8,00000E-03	2,922E+02	2,777E+02
	1,00000E-02	1,626E+02	1,548E+02
	1,50000E-02	5,512E+01	5,208E+01
	2,00000E-02	2,543E+01	2,363E+01
	3,00000E-02	8,561E+00	7,622E+00
	3,31694E-02	6,553E+00	5,744E+00
<b>K</b>	3,31694E-02	3,582E+01	1,188E+01
	4,00000E-02	2,210E+01	9,616E+00
	5,00000E-02	1,232E+01	6,573E+00
	6,00000E-02	7,579E+00	4,518E+00
	8,00000E-02	3,510E+00	2,331E+00
	1,00000E-01	1,942E+00	1,342E+00

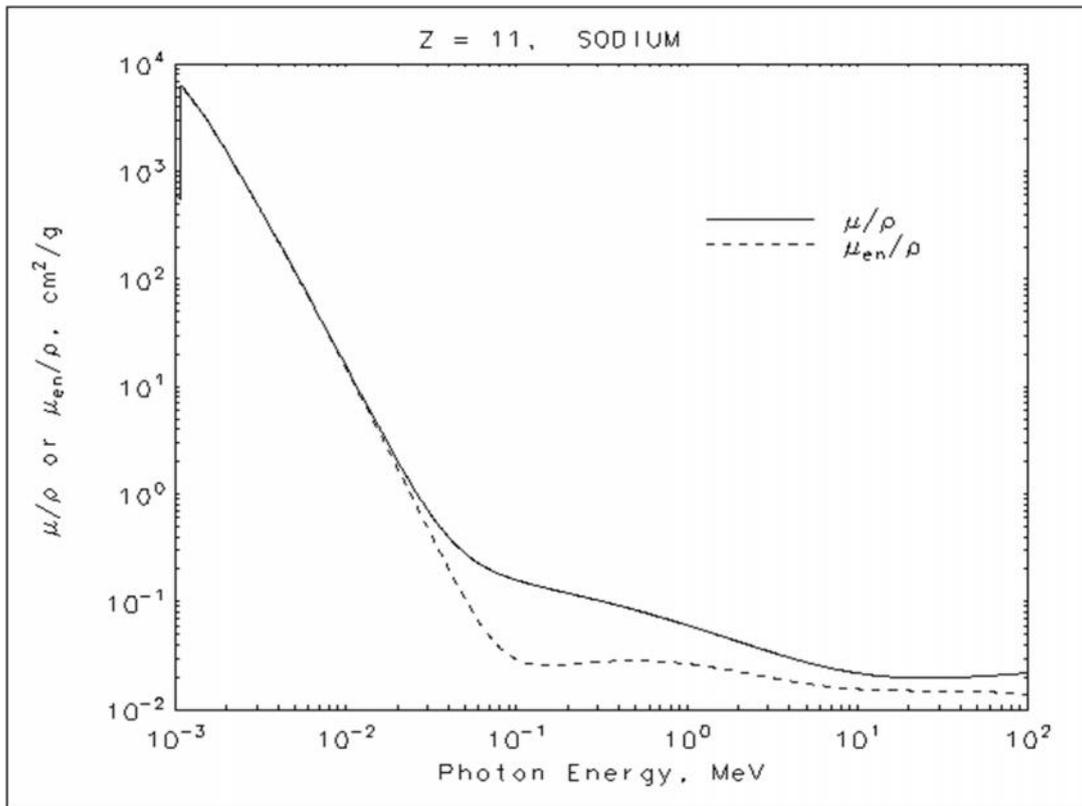
---

1,50000E-01	6,978E-01	4,742E-01
2,00000E-01	3,663E-01	2,295E-01
3,00000E-01	1,771E-01	9,257E-02
4,00000E-01	1,217E-01	5,650E-02
5,00000E-01	9,701E-02	4,267E-02
6,00000E-01	8,313E-02	3,598E-02
8,00000E-01	6,749E-02	2,962E-02
1,00000E+00	5,841E-02	2,646E-02
1,25000E+00	5,111E-02	2,399E-02
1,50000E+00	4,647E-02	2,243E-02
2,00000E+00	4,124E-02	2,092E-02
3,00000E+00	3,716E-02	2,059E-02
4,00000E+00	3,607E-02	2,142E-02
5,00000E+00	3,608E-02	2,250E-02
6,00000E+00	3,655E-02	2,357E-02
8,00000E+00	3,815E-02	2,553E-02
1,00000E+01	4,002E-02	2,714E-02
1,50000E+01	4,455E-02	2,980E-02
2,00000E+01	4,823E-02	3,101E-02

---

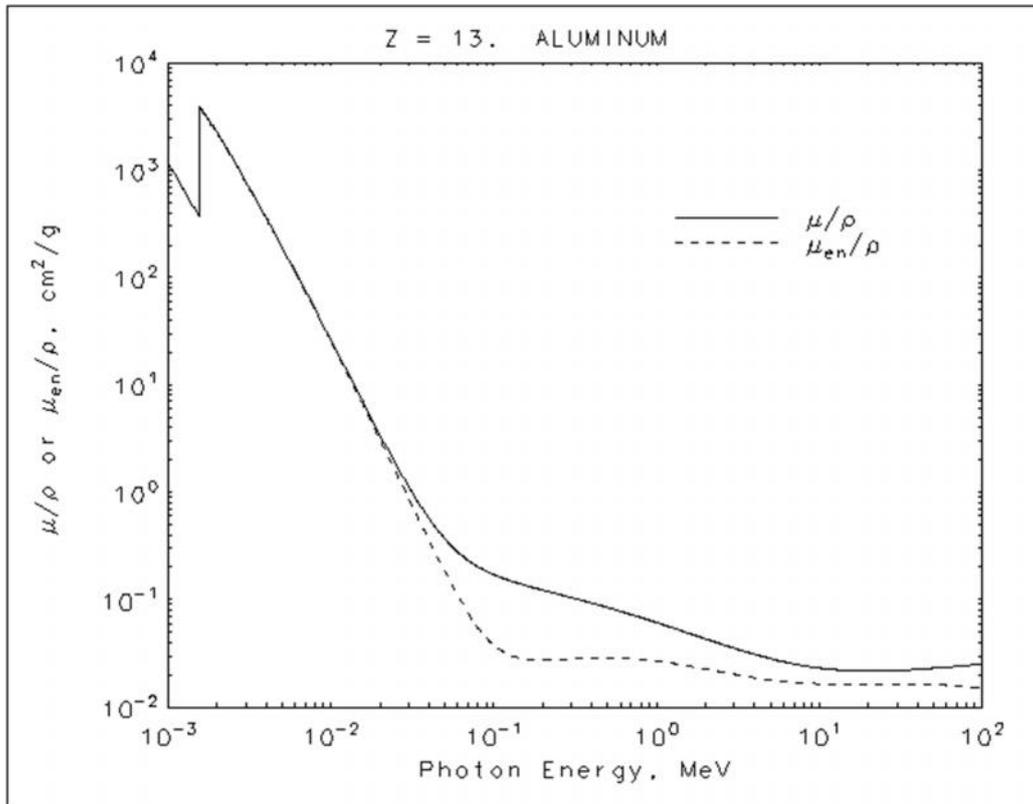
## Annexe D

### Le graphe $\mu/$ de Sodium



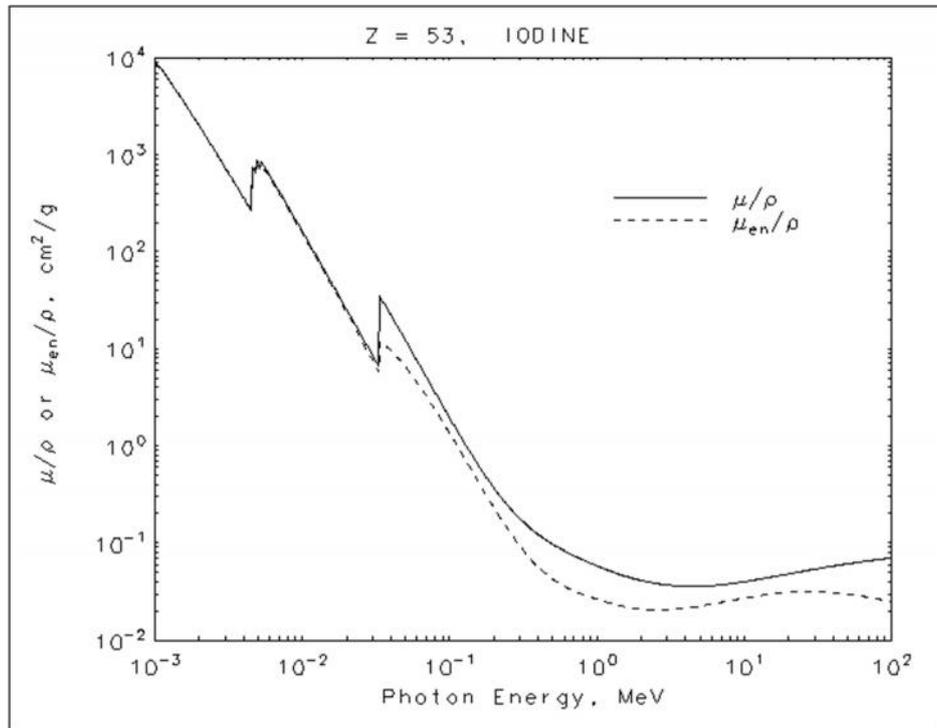
## Annexe E

### Le graphe $\mu/$ d'Aluminium



## Annexe F

### Le graphe $\mu/$ d'Iodine



# Radionuclide Assessment in Imported Powdered Infant Milk Consumed in Algeria and Radiation Hazard Indices

K. Benaissa<sup>a,\*</sup>, L. N. Seladji<sup>a</sup>, A. Kadum<sup>a</sup>, and B. Dahmani<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Spectrochemistry and Structural Pharmacology Research Laboratory, Department of Chemistry, College of Sciences, University of Tlemcen, Tlemcen, 13000 Algeria

\*e-mail: khalida-bent@hotmail.fr

Received September 30, 2019; revised September 30, 2019; accepted November 8, 2019

**Abstract**—The radioactivity concentration in powdered infant milk consumed in Algeria, mainly imported from different countries, some of which had suffered from the propagation of the radiation effect after explosions of nuclear reactors, was evaluated. Milk samples were analyzed using a conducted NaI(Tl) 2×2 well detector (Canberra) and a  $\gamma$ -ray spectrometer using GENIE 2000 software. Twelve samples from different producers and countries were examined, and the average values of their activity concentrations were  $1.19 \pm 0.81$ ,  $1.45 \pm 0.96$ ,  $18.07 \pm 3.42$ , and  $0.18 \pm 0.06$  Bq kg<sup>-1</sup> for <sup>226</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>40</sup>K, and <sup>137</sup>Cs, respectively. The average total effective total dose due to the annual ingestion of the above four radionuclides from the ingestion of imported milk powder for infants of age under one year was estimated at  $153.16 \pm 7.66$ ,  $48.05 \pm 2.40$ ,  $15.92 \pm 0.80$ , and  $0.030 \pm 0.0015$   $\mu$ Sv year<sup>-1</sup>. For one-year-old infants, the values were  $38.69 \pm 1.93$ ,  $20.27 \pm 1.01$ ,  $19.29 \pm 0.96$ , and  $0.049 \pm 0.0024$   $\mu$ Sv year<sup>-1</sup>. These values are significantly lower than the international authorization value. Thus, these imported brands of powdered milk can be consumed safely and without any restrictions.

**Keywords:** radionuclides, activity concentration, gamma rays, powdered milk, radiological risk

DOI: 10.1134/S106636222005015X

## INTRODUCTION

The Earth's radiation is derived from two sources: (1) natural radiation (NORM) coming mainly from <sup>226</sup>Ra and <sup>232</sup>Th decay series and from <sup>40</sup>K and (2) radiation of artificial origin (<sup>134</sup>Cs, <sup>137</sup>Cs, <sup>131</sup>I, <sup>89</sup>Sr, <sup>90</sup>Sr, etc.). These elements in the atmosphere contaminate plants, soil, water, and food and actually contaminate the entire environment. Thus, radionuclides are also present in our diet.

In general, natural and artificial radionuclides enter into a human body by inhalation and ingestion [1–4]. One of the important foods for human nutrition is milk, which has been an important food for our body since birth; it contains several macronutrients such as fats, carbohydrates, proteins, vitamins, and many useful elements such as phosphate, magnesium, zinc, calcium, and selenium [5, 6].

Therefore, the estimation of the radionuclide abundances is very important. This importance is evident from numerous studies [7–21].

Breastfeeding is the main source of nutrition for infants according to the available data [22, 23]; less than 40% of infants worldwide under six months are exclusively breastfed. The diets of infants who are not exclusively breastfed are supplemented or completely comprised of powdered milk, which is a special synthetic supplement designed to provide the necessary nutrients for the normal development of infants [24].

We have determined in this paper the activity levels of natural and artificial radionuclides for samples of powdered infant milk consumed in Algeria, using the technique of  $\gamma$ -ray spectrometry. The total average effective dose and the radiological risk on the infant health due to the milk consumption are also estimated.

The detector efficiency was calculated by a simplified method using the exact value for each energy line and not for an energy interval, thus avoiding the use of radioactive sources for the calibration of the detector in each analysis and decreasing therefore the exposure to radiation.

يشهد اليوم	طبيعية. وتشير جميع	النوية سيزيوم 137 وغيرها من النويدات	يتسبب	للبيئة والمحيطات، الغذائية
تقدير قيمها مهم	الجديدة	الطبيعية فيما يتعلق	الرئيسية اليورانيوم 238	الثوريوم 232 واليوتاسيوم 40
يمكن	تحديد النويدات الاصطناعية ( سيزيوم 137 )	الطبيعية ( سيزيوم 137 )	النوية الإشعاعية	الطبيعي
الغذائية	هذه النويدات هو تحديد	الطبيعي	البنر يوريد الصوديوم	به يتميز
تحليل هذه العينات	تقنية قياس طيف	أطياف العينة وقياسها		قياس لهذا
48	24	24		
بأكملها؛	عليها	التوهين.		
بيكريل / 11.1-0.83	لليورانيوم 238	الثوريوم 232 واليوتاسيوم 40	للعينات	أفريقيا وأستراليا، 11.84-0.37
بيكريل / 2.09-0.36	بيكريل / 25.61-0.13	بيكريل / 40.08-0.22	بيكريل / 40	للعينات أمريكا، 12.31-0.02
بيكريل / 4.27-0.053	بيكريل / 8.6-0.28	بيكريل / 55.05-0.07	بيكريل / 40	للعينات أمريكا، 17.05-0.12
بيكريل / 17.05-0.12	بيكريل / 8.6-0.28	بيكريل / 55.05-0.07	بيكريل / 40	للعينات أمريكا، 17.05-0.12
للعينات من آسيا.	تقدير الإشعاعية لعينات هذه.	استهلاك هذه	يتم بأمان	قيود.
التحليل،	هذه القيم	بكتير قيمة التخليص	الإشعاعية.	
المفتاحية: النويدات	الغذائية،	الغذائية،		

### Résumé

Aujourd'hui, le monde assiste au pic de radioactivité résultant des essais nucléaires et des explosions de réacteurs, qui provoquent une pollution nucléaire de l'environnement et des océans, en plus de la présence de radiations naturelles. Toutes les études indiquent que le  $^{137}\text{Cs}$  et d'autres radionucléides sont présents dans les denrées alimentaires et que l'estimation de leurs valeurs est donc très importante.

Les nouvelles études s'intéressent à la détermination des activités des radionucléides naturels par rapport aux principaux éléments tels que  $^{238}\text{U}$ , et le  $^{232}\text{Th}$ , ainsi que le  $^{40}\text{K}$ , auxquels on peut ajouter les radionucléides artificiels (tel que  $^{137}\text{Cs}$ ) résultant de divers accidents nucléaires.

Cette étude a pour but la détermination du niveau de radioactivité naturelle et le risque radiologique associé causé par la radioactivité naturelle dans les denrées alimentaires importées en Algérie. Les radionucléides ont été mesurés à l'aide de détecteurs de puits NaI (TI) 2x2 (Canberra Inc.), possédant un rendement lumineux élevé et une meilleure efficacité.

Ces échantillons ont été analysés à l'aide de la technique de spectrométrie gamma. Les spectres d'échantillons ont été collectés et mesurés à l'aide d'un analyseur multicanal (MCA) connecté à un système de mesures à cet effet ; en puits avec un temps d'analyse de 48 heures (24 heures pour le fond et 24 heures pour l'échantillon).

L'efficacité a été calculée dans toute la gamme d'énergie ; en utilisant les coefficients d'atténuation.

Les résultats obtenus nous ont permis de révéler la quantification des radionucléides avec des gammes d'activités variées: 0,52-9Bq/kg, 0,32-2,73Bq/kg, et 0,83-11,1 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Afrique-Australie, 0,37-11,84Bq/kg, 0,36-2,09Bq/kg, et 0,13-25,61 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Amérique, 0,02-12,31Bq/kg, 0,053-4,27Bq/kg, et 0,22-40,08 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Europe, 0,12-17,05Bq/kg, 0,28-8,6Bq/kg, et 0,07-55,05 pour  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement pour les échantillons d'Asie. De plus, les paramètres radiologiques de ces échantillons d'aliments ont été estimés.

Après l'analyse, il est devenu clair que ces valeurs étaient bien inférieures à la valeur d'autorisation internationale. Ainsi, la consommation de ces marques des denrées alimentaires se fait en toute sécurité sans aucune restriction.

**Mots clés :** Radionucléides, Activité Gamma, Rayons Gamma, Denrées Alimentaires, Risques Radiologique.

### Abstract

The world is now witnessing the peak of radioactivity resulting from nuclear tests and reactor explosions, which cause nuclear pollution to the environment and oceans, in addition to the presence of natural radiation. All studies report  $^{137}\text{Cs}$  and other radionuclides in foodstuffs, so estimating their values is very important.

The new studies are interested in determination of the activities of natural radionuclides in relative to main elements such as  $^{238}\text{U}$ , and  $^{232}\text{Th}$ , as well as  $^{40}\text{K}$ , to which can be added artificial radionuclides (such as  $^{137}\text{Cs}$ ) resulting from various nuclear accidents.

The purpose of this study is to determine the level of natural radioactivity and the associated radiological risk caused by natural radioactivity in foodstuffs imported into Algeria. Radionuclides were measured using NaI (TI) 2x2 well detectors (Canberra Inc.) which has a high light output and better efficiency.

These samples were analyzed using the gamma spectrometry technique. The sample spectra were collected and measured using a multichannel analyzer (MCA) connected to a measurement system for this purpose; in wells with an analysis time of 48 hours (24 hours for the bottom and 24 hours for the analysis of the sample).

Efficiency has been calculated across the entire energy range; using the attenuation coefficients.

The results obtained allowed us to reveal the quantification of radionuclides with varying ranges of activities: 0.52-9Bq/kg, 0.32-2.73Bq/kg, and 0.83-11.1 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for the samples from Africa-Australia, , 0.37-11.84Bq/kg, 0.36-2.09Bq/kg, and 0.13-25.61 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for samples from America, 0.02-12.31Bq/kg, 0.053-4.27Bq/kg, and 0.22-40.08 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for samples from Europe, 0.12-17.05Bq/kg, 0.28-8.6Bq/kg, and 0.07-55.05 for  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and  $^{40}\text{K}$  respectively for samples from Asia. In addition, the radiological parameters of these food samples were estimated.

After the analysis, it became clear that these values were well below the international clearance value. Thus, consumption of these brands of food is done safely without any restriction.

**Keywords:** Radionuclides, Activity Gamma, Gamma Rays, Foodstuffs, Radiological Risks.