

Détermination par spectrométrie gamma des trois principaux radionucléides naturels du sol et de la fève du cacao dans la plaine du Sambirano, Ambanja

Arnoldy ANTONJARA^{1*}, Martin RASOLONIRINA³, Naivo RABESIRANANA³
et Frédéric ASIMANANA²

¹ *Laboratoire de Métrologie Nucléaire et Environnement (LMNE), Université d'Antsiranana, Madagascar*

² *Faculté des Sciences, Université d'Antsiranana, BP 0 201 Antsiranana, Madagascar*

³ *Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar), Antananarivo, Madagascar*

* Correspondance, courriel : anntonjara@gmail.com

Résumé

Ce travail a pour but de déterminer les trois principaux radionucléides naturels qui se trouvent dans le sol et la fève du cacao par la méthode de spectrométrie gamma. Des échantillons du sol et de la fève du cacao ont été prélevés et analysés pour identifier les activités spécifiques du potassium-40, des familles de l'Uranium-238 et du Thorium-232. Ces échantillons ont été analysés dans un laboratoire d'analyse et technique nucléaire sur une chaîne de spectrométrie gamma, muni d'un détecteur NaI (TI) et du logiciel Scinti-vision. Le traitement des spectres a été réalisé en utilisant la méthode de Rybach. Après l'analyse, les résultats suivants ont été obtenus : les activités spécifiques du potassium-40 du sol varient de $(803 \pm 50) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(1249 \pm 64) \text{ Bq.kg}^{-1}$, avec une moyenne de 1025 Bq.kg^{-1} . Et celle de la fève varie de $(407 \pm 49) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(839 \pm 62) \text{ Bq.kg}^{-1}$, avec une valeur moyenne 596 Bq.kg^{-1} . Les activités spécifiques de la famille de l'uranium-238 des échantillons du sol varient de $(10,4 \pm 3,6) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(39,7 \pm 8,37) \text{ Bq.kg}^{-1}$ avec une moyenne de $21,2 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Et celle du cacao, varie de $(60 \pm 3,6) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(147 \pm 8,37) \text{ Bq.kg}^{-1}$ avec une moyenne de 105 Bq.kg^{-1} . Et le troisième radionucléide naturel étudié c'est le thorium -232. Son activité spécifique dans le sol varie de $(153 \pm 7,57) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(218 \pm 8,57) \text{ Bq.kg}^{-1}$, avec une moyenne de 201 Bq.kg^{-1} . L'activité spécifique de la famille du thorium-232 dans la fève du cacao varie de $(173 \pm 21) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(398 \pm 32) \text{ Bq.kg}^{-1}$, avec une moyenne de 314 Bq.kg^{-1} . La teneur en potassium-40 dans les échantillons du sol est plus élevée par rapport à celle de la fève du cacao. Le site d'Ambalavelona à une teneur en uranium et celle du thorium les plus élevés.

Mots-clés : *radionucléide, spectrométrie, fève, activité, teneur, échantillon.*

Abstract

Determination of the three main natural radionuclides from the soil and cocoa bean in the plain of the Sambirano, Ambanja by gamma spectrometry

This work has an aim to determine the three main natural radionuclide that is in soil and the bean of the cocoa by the gamma spectrometry method. The Samples of soil and the bean of the cocoa have been taken and have been analyzed to identify the specific activities of potassium-40, of the families of uranium-238 and the Thorium-232. These samples have been analyzed in a laboratory of analysis and nuclear technical on a gamma spectrometry chain, provided with a detecting NaI (TI) and of the software Scinti-Vision. The treatment of the

specters has been realized while using the method of Rybach. After the analysis, the following results have been gotten : the specific activities of the soil potassium-40 vary of $(803 \pm 50) \text{ Bq.kg}^{-1}$ to $(1249 \pm 64) \text{ Bq.kg}^{-1}$, with an average of 1025 Bq.kg^{-1} . And the one of the bean varies of $(407 \pm 49) \text{ Bq.kg}^{-1}$ to $(839 \pm 62) \text{ Bq.kg}^{-1}$, with a value middle 596 Bq.kg^{-1} . The specific activities of the family of the uranium-238 of the soil samples vary of $(10.4 \pm 3.6) \text{ Bq.kg}^{-1}$ to $(39.7 \pm 8.4) \text{ Bq.kg}^{-1}$ with an average of 21.2 Bq.kg^{-1} . And the one of the cocoa, vary of $(60 \pm 3.6) \text{ Bq.kg}^{-1}$ to $(147 \pm 8.4) \text{ Bq.kg}^{-1}$ with an average of 105 Bq.kg^{-1} . And the third studied natural radionuclide it is the thorium-232. Its specific activity in soil varies of $(153 \pm 7.6) \text{ Bq.kg}^{-1}$ to $(218 \pm 8.6) \text{ Bq.kg}^{-1}$, with an average of 201 Bq.kg^{-1} . The specific activity of the family of the thorium-232 in the bean of the cocoa varies of $(173 \pm 21) \text{ Bq.kg}^{-1}$ to $(398 \pm 32) \text{ Bq.kg}^{-1}$, with an average of 314 Bq.kg^{-1} . The content in potassium-40 in the samples of soil is raised more in relation to the one of the bean of the cocoa. The site of Ambalavelona has a content in uranium and the one of the thorium the most elevated.

Keywords : *radionuclide, spectrometry, bean, activity, content, sample.*

1. Introduction

A Madagascar, la culture du cacao occupe une place très importante pour le développement socio-économique du pays [1]. Depuis quelques temps, les cultivateurs ont remarqués des énormes réductions en termes de production. Le changement climatique peut être l'un de facteur Comme toute spéculation. Il entraîne des pertes économiques pour les cultivateurs alors que sa cause exacte reste encore méconnue. Le but de cette recherche est focalisé sur la détermination des trois principales familles radioactives naturelles dans le sol et la fève du cacao par spectrométrie gamma. Pour y parvenir, nous tenons compte de trois éléments majeurs responsables de la radioactivité du sol et de la fève, à savoir le Potassium-40, la famille de l'uranium-238 et celle du Thorium-232. La radioactivité est omniprésente dans notre environnement. Sa teneur varie d'un milieu à un autre et d'une profondeur à une autre. Cette variation dépend des caractères pédologiques et géologiques du milieu considéré et parfois de l'influence des expériences et accidents nucléaires. L'écorce terrestre est en grande partie responsable de la formation et du support des éléments émetteurs de la radioactivité naturelle, en ce qui concerne les éléments telluriques [2].

2. Matériel et méthodes

2-1. Description et localisation du site

Les prélèvements ont été effectués dans les sites d'Ankatafahely et d'Ambalavelona, commune urbaine d'Ambanja, d'Antanimena commune rural d'Antranokarany. Ces trois sites sont dans le District d'Ambanja. Au total, 19 échantillons ont été. Les échantillons prélevés sont des sols et des fèves de cacao. L'échantillon de sol est découpé chaque 10 cm jusqu' à 40 cm de profondeur. En effet, nous avons 3 sous-échantillons pour chaque point car le premier dix centimètres n'est pas pris en considération pour éviter l'apport de l'autre milieu. Pour le cacao, nous avons faits des prélèvements par rapport à la variété existante dans le milieu. Ainsi, un échantillon représente une variété. Les échantillons sont ensuite mis dans les sachets en plastique afin d'éviter la contamination. Ils sont codés avec leurs coordonnées géographiques respectives. Comme exemple, signification des codes OT1M et AR2T sont les suivantes :

- OT et AR : signe particulier du site par type d'échantillons ;
- 1 ou 2 : Numéro du point de prélèvement ;
- M et T : AntaniMena (lieu du site) et Trinitario (variété du cacao).

Les analyses quantitative et qualitative des échantillons nécessitent une méthodologie adéquate pour de meilleures précisions. Les chaînes de spectrométrie gamma au détecteur NaI (TI) ont des résolutions assez limitées mais qu'elles compensent par une efficacité en énergie d'une très bonne qualité sur tout le spectre. Ce qui leur permet une utilisation indéfectible sur les analyses des échantillons environnementaux.

2-2. Étalonnage

En spectrométrie gamma, il existe deux types d'étalonnage tels que l'étalonnage en énergie et en efficacité.

2-2-1. Étalonnage en énergie [2]

Pour identifier les radionucléides, la chaîne de mesure doit être étalonnée en énergie. Cela consiste à établir une relation entre le numéro de canal et l'énergie déposée du radionucléide. Pour se faire, on utilise les matériaux de références comme étalons. A partir du spectre obtenu, on relève le numéro de canal C représentant le centroïde du pic et son énergie E correspondante. Etant donné que la relation est linéaire, l'Équation est donnée sous forme de :

$$E = aC + b \tag{1}$$

E : Énergie en KeV; C : Numéro du canal; a : Pente de la courbe ou gain en keV/canal; b : Énergie du premier canal.

Les coefficients a et b sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Ainsi, on a une **Formule** de la forme :

$$a = \frac{\sum(C_i - \bar{C})(E_i - \bar{E})}{\sum(C_i - \bar{C})^2} \text{ et } b = \bar{E} - a \cdot \bar{C} \tag{2}$$

D'après les données du **Tableau** suivant, l'Équation d'étalonnage devient :

$$E = 3,83C - 27,349 \tag{3}$$

A l'aide de cette **Équation**, les énergies calculées avec leurs écarts relatives sont aussi présentées dans le **Tableau 1** :

Tableau 1 : Résultat d'étalonnage en énergie

Famille	Radionucléide	Numéro de canal	Energie donnée (keV)	Energie calculée (keV)	Ecart relative (%)
U - 238	^{214}Pb	99	351,9	352,3	0,12
K - 40	^{40}K	388	1461,0	1460,71	0,02
U - 238	^{214}Bi	467	1764,5	1763,68	0,05
Th - 232	^{208}Tl	689	2614,5	2614,5	0,00

2-2-2. Étalonnage en efficacité

L'étalonnage en efficacité utilise la méthode développée par RYBACH, 1971 et 1988. Il a suggéré que la largeur des régions d'intérêt devrait être égale à 10 % de l'énergie du radionucléide caractéristique [3, 4]. La **Figure** suivante illustre les régions d'intérêt s'étendant sur une plage d'énergie allant de 0 KeV à 3000 KeV. Mais

pour bien récupérer la surface du pic entier, nous avons élargies cette région jusqu'à 15 % de l'énergie [2]. Dans ce travail, nous avons exploités quatre(04) régions des radionucléides ^{214}Pb (351,9 keV), ^{40}K (1461,0 keV), ^{214}Bi (1764,5 keV) et ^{208}Tl (2614,5 keV). L'activité de l'uranium est obtenue à partir de la moyenne du ^{214}Pb et du ^{214}Bi et son incertitude est représentée par l'écart-type. L'activité du thorium est donnée par le ^{208}Tl .

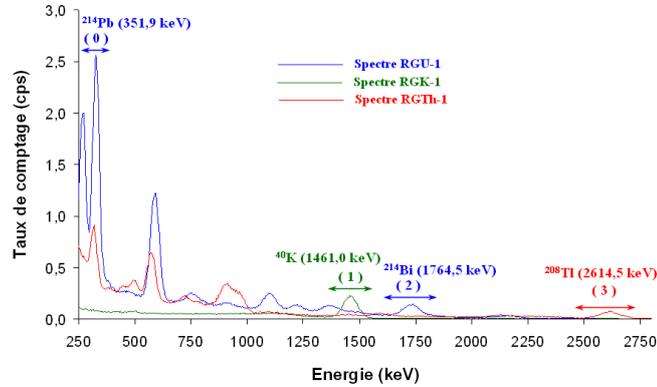


Figure 1 : Spectre d'étalon représentant les 04 régions d'intérêt

La région (0) représente le plomb-214 issu de la famille de l'uranium-238. La région (1) représente le potassium-40. La région (2) est pour le bismuth-214, issu de la famille de l'uranium-238. La région (3) est pour le thallium-208, des séries de désintégration de la famille du thorium-232. Il est noté qu'il y a une contribution des autres radionucléides à l'intérieur de chaque région d'intérêt. Le taux de comptage net $R_{i,j}$ est proportionnel aux activités $A_{k,j}$. Les indices i (0 à 3), j (1 à 3) et k (1 à 3) sont respectivement pour les régions d'intérêt, étalons et radionucléides. Ces étalons sont représentés par les matériaux de référence RGK-1, RGU-1 et RGTh-1. Les radionucléides sont le ^{40}K , l' ^{238}U et le ^{232}Th .

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^3 \varepsilon_{i,k} A_{k,j} \quad (4)$$

avec, $A_{k,j}$: Activités du nucléide k dans la j ème source étalon ; $\varepsilon_{i,k}$: Constante d'étalonnage dans la i ème région d'intérêt pour le radionucléide k ; $R_{i,j}$: Le taux de comptage net pour la i ème région d'intérêt du j ème source étalon, qui est donné par la relation suivante :

$$R_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{t_j} - R_{ib} \quad (5)$$

où, $N_{i,j}$: Nombre de coups enregistré par le détecteur, t_j : Durée de comptage, R_{ib} : Taux de comptage du bruit de fond dans la i ème région d'intérêt.

Les constantes d'étalonnage $\varepsilon_{i,k}$ sont déterminées à partir des activités des matériaux de référence et des taux de comptage des régions d'intérêt spécifiées. Les taux de comptage nets sont obtenus en retranchant du bruit de fond. Ainsi, à l'aide de la relation (1) on obtient un système **d'Équation** linéaire de la forme $i \times j$ (4×3). D'après le **Tableau 2**, les concentrations de l'uranium et du thorium dans le RGK-1 sont négligeables. De même pour les concentrations du potassium et du thorium dans le RGU-1 sont aussi négligeables. Par contre, les concentrations de trois éléments sont considérées dans le RGTh-1. En effet, les douze constantes d'étalonnage $\varepsilon_{i,k}$ sont réduites à 9 et données par les relations (3).

Tableau 2 : Teneurs des éléments K, U et Th dans RGU-1, RGK-1 et RGTh-1

CODE	Elément	Teneurs (ppm)
RGU-1	U	448 000 ± 3000
	K	< 0,001
	Th	< 0,01
RGK-1	U	< 20
	K	< 1
	Th	400 ± 2
RGTh-1	U	200 ± 100
	K	6,3 ± 0,4
	Th	800 ± 16

En utilisant les **Équations** des constantes d'étalonnage $\epsilon_{i,k}$, les taux de comptage net sont donnés par le système **d'Équation (6)**.

$$\begin{cases} R_{U'} = \epsilon_{0,2}A_{U'} + \epsilon_{0,2}A_{Th} \\ R_K = \epsilon_{1,1}A_K + \epsilon_{1,2}A_U + \epsilon_{1,3}A_{Th} \\ R_U = \epsilon_{2,2}A_U + \epsilon_{2,3}A_{Th} \\ R_{Th} = \epsilon_{3,2}A_U + \epsilon_{3,3}A_{Th} \end{cases} \quad (6)$$

avec, $R_{U'}$ et $A_{U'}$: taux de comptage et l'activité de l'uranium-238 (^{214}Pb) dans la région 0, R_K et A_K : taux de comptage et l'activité du potassium-40 (^{40}K) dans la région 1, R_U et A_U : taux de comptage et l'activité de l'uranium-238 (^{214}Bi) dans la région 2, R_{Th} et A_{Th} : taux de comptage et l'activité du thorium-232 (^{208}Tl) dans la région 3.

2-2-2-1. Valeurs des constantes d'efficacité obtenues

Les taux de comptage nets obtenus pour les quatre régions d'intérêt sont récapitulés dans le **Tableau 3**. Les temps d'acquisition sont fixés à 24 heures pour les trois étalons.

Tableau 3 : Nombre de coups nets par seconde des régions d'intérêt

CODE	Région d'Intérêt			
	0	1	2	3
RGU-1		3,312 ± 0,034		
RGK-1	3,587 ± 0,061	0,701 ± 0,058	2,073 ± 0,057	0,007 ± 0,001
RGTh-1	0,795 ± 0,006	0,014 ± 0,009	0,038 ± 0,008	1,693 ± 0,008

Les constantes d'efficacité calculées à l'aide des **Équations (4) à (5)** sont représentées dans le **Tableau 4**.

Tableau 4 : Valeurs calculées des constantes d'efficacité

Désignation	Constade d'efficacité
$\epsilon_{0,2}$	(5,08 ± 0,09). 10 ⁻³
$\epsilon_{0,3}$	(1,69 ± 0,05). 10 ⁻³
$\epsilon_{1,1}$	(2,07 ± 0,06). 10 ⁻³
$\epsilon_{1,2}$	(0,99 ± 0,08). 10 ⁻³

$\varepsilon_{1,3}$	$(0,01 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{2,2}$	$(2,94 \pm 0,08) \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{2,3}$	$(0,02 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{3,2}$	$(0,01 \pm 0,02) \cdot 10^{-3}$
$\varepsilon_{3,3}$	$(3,86 \pm 0,11) \cdot 10^{-3}$

2-2-2-2. Détermination des activités de l'échantillon

En sachant les taux de comptage nets des quatre régions d'intérêt ($R_{U'}$, R_K , R_U et R_{Th}) ainsi que les efficacités du comptage, les activités inconnues du ^{40}K (A_K), de ^{238}U (A_U) et du ^{232}Th (A_{Th}) des échantillons peuvent être calculées à l'aide du système **d'Équation (3)**. Ainsi, les activités sont données par le système **d'Équation (7)**. L'activité de l'uranium est la moyenne de $A_{U'}$ et A_U .

$$\begin{cases} A_{U'} = a_{0,1}R_{U'} & + a_{0,3}R_U + a_{0,4}R_{Th} \\ A_K = & a_{1,1}R_K + a_{1,2}R_U + a_{1,3}R_{Th} \\ A_U = & a_{2,2}R_U + a_{2,3}R_{Th} \\ A_{Th} = & a_{3,2}R_U + a_{3,3}R_{Th} \end{cases} \quad (7)$$

2-3. Incertitude et limite de détection

2-3-1. Calcul des incertitudes

Comme la désintégration radioactive est un phénomène aléatoire dans le temps, le nombre de coup enregistré est variable. En effet, la valeur obtenue est une valeur moyenne de comptage avec son incertitude. Cette incertitude est meilleure si le comptage est suffisant, c'est-à-dire, l'incertitude de mesure est inférieure à 1 %. Ainsi, cette incertitude est nécessaire pour chaque mesure. Dans la statistique, l'incertitude de comptage $\square n$ est définie par la relation

$$\sigma_N = \sqrt{N}$$

Considérant qu'une fonction u dépend de plusieurs variables (x , y , z , etc.). La propagation des incertitudes de cette fonction, en terme du carré de l'écart type est de la forme de :

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \sigma_z^2 \quad (8)$$

2-3-1-1. Somme ou différence

A l'aide de la relation (8), la propagation des incertitudes pour la somme et la différence pour deux variables x et y est donnée par la relation (9).

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (9)$$

2-3-1-2. Multiplication ou division

Supposons la fonction à une variable x multipliée avec une constante u . L'incertitude de cette fonction, en utilisant la relation (8), est donnée par la relation suivant :

$$\sigma_u = u \sigma_x \tag{10}$$

2-3-1-3. Multiplication de deux fonctions

La propagation de l'incertitude d'une fonction produit par deux variables x et y, à l'aide de la relation (8), est donnée par la relation ci-dessous.

$$\sigma_u = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2} \tag{11}$$

2-3-2. Limite de détection

La limite de détection LDn de chaque nucléide n dépend du taux de comptage du bruit de fond, du temps d'acquisition et de la constante d'étalonnage. Elle n'est donc pas la même sur tout le spectre et est donnée par la relation :

$$LDn = \frac{2\sqrt{2}}{\epsilon_{i,k}} \sqrt{\frac{B_i}{t}} \tag{12}$$

2-4. protocole expérimental

Nos analyses ont été effectuées sur une chaîne de spectrométrie gamma au détecteur NaI(Tl) dont la configuration est donnée sur la **Figure 2** [2] :

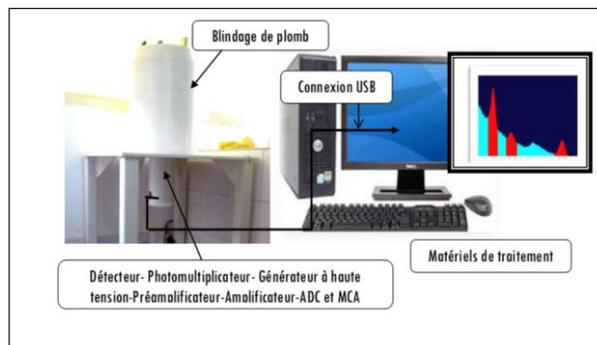


Figure 2 : Schéma de montage de la chaîne de spectrométrie gamma

La chaîne spectrométrie gamma utilisée est composée d'un détecteur NaI (TI) de marque ORTEC et de model 905-4, et qui comporte un photomultiplicateur, un générateur à haute tension, un préamplificateur-amplificateur et un MCA intégrés. Le signal délivré par la chaîne est ensuite véhiculé par un câble USB vers un micro-ordinateur dans lequel est installé le logiciel Scinti-Vision qui sert à dépouiller les données.

3. Résultats et discussion

3-1. Activités spécifiques

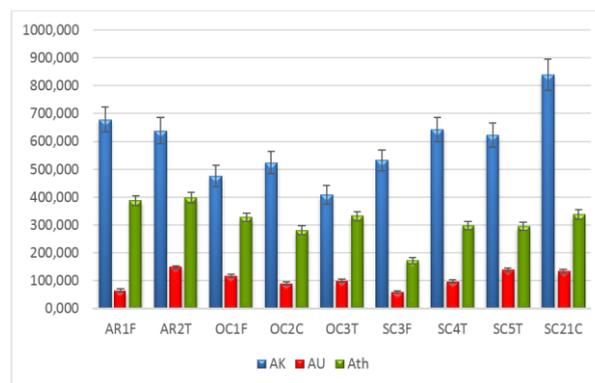
Après avoir tenu compte de ces valeurs pour l'analyse individuelle de chaque échantillon prélevée sur le terrain, les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et de la famille du thorium-232 sont présentées dans le **Tableau 5 et 6**, ainsi que leur limite.

Tableau 5 : Activité et limite de détection du sol dans les quatre zones d'étude

Code	Potassium-40		Famille de l'U-238		Famille du Th-232	
	Activité (Bq.Kg-1)	LDK (Bq.Kg-1)	Activité (Bq.Kg-1)	LDU (Bq.Kg-1)	Activité (Bq.Kg-1)	LDTh (Bq.Kg-1)
OT1M	1225 ± 55	23,30	39,7 ± 3,3	3,11	216 ± 9,3	12,04
OT2M	1249 ± 57	13,79	25,3 ± 2,4	1,84	205 ± 8,30	7,12
OT3M	1034 ± 62	16,94	13,5 ± 2,60	2,26	205 ± 12,6	8,75
SM1F	954 ± 59	28,15	24,2 ± 3,5	3,75	153 ± 7,6	14,54
SS1F	1056 ± 64	18,85	16,4 ± 2,4	2,51	164 ± 6,9	9,73
SS2F	1013 ± 62	26,79	31,3 ± 3,5	3,57	218 ± 9,4	13,84
SS3F	980 ± 60	21,46	15,4 ± 2,8	2,86	204 ± 8,5	11,08
OS1V	941 ± 58	24,81	16,3 ± 2,9	3,31	208 ± 8,2	12,81
OS2V	803 ± 50	25,84	19,5 ± 3,0	3,44	197 ± 8,8	13,45
OS3V	997 ± 61	18,64	10,4 ± 2,5	2,48	214 ± 8,6	9,63

Tableau 6 : Activité et limite de détection des échantillons de fève de cacao dans les trois zones d'étude

CODE	Potassium-40		Famille de l'U-238		Famille du Thorium- 232	
	Activité (Bq.Kg-1)	LD _K (Bq.Kg-1)	Activité (Bq.Kg-1)	LD _U (Bq.Kg-1)	Activité (Bq.Kg-1)	LD _{Th} (Bq.Kg-1)
AR2T	638 ± 62	79,39	147 ± 9,65	21,08	398 ± 28,62	31,80
AR1F	678 ± 59	60,46	65 ± 8,55	16,06	387 ± 27,07	24,22
OC1F	475 ± 68	64,22	117 ± 9,14	17,05	327 ± 25,96	25,72
OC2C	523 ± 65	64,63	88 ± 7,92	17,16	281 ± 24,12	25,89
OC3T	408 ± 54	63,26	99 ± 9,14	16,80	331 ± 26,17	25,34
SC3F	532 ± 49	59,87	59 ± 7,48	15,90	173 ± 24,74	23,98
SC4T	642 ± 50	59,68	97 ± 8,54	15,85	298 ± 22,28	23,91
SC5T	623 ± 49	56,30	138 ± 8,50	14,95	294 ± 20,92	22,55
SC21C	839 ± 69	67,71	134 ± 10,99	17,98	337 ± 28,39	27,2

**Figure 3 : Activité spécifique dans les échantillons de la fève de cacao**

3-1-1. Activités spécifique du potassium-40 dans les échantillons du sol

En se basant sur le **Tableau 5**, la **Figure 4** montre encore plus la variation des activités spécifiques du potassium-40 en comparant les différentes valeurs obtenues. En effet, la valeur minimale de l'activité spécifique du potassium-40 est de (803 ± 50) Bq.kg⁻¹ (OS2V) et le maximal est de (1249 ± 57) Bq.kg⁻¹ (OT2M), avec une moyenne de l'ensemble des échantillons de (1025 ± 54) Bq.kg⁻¹. Cette valeur moyenne est

Supérieure à la valeur moyenne mondiale donnée par la Comité Scientifique des Nations Unis sur l'Etude des Effets des Radiations Atomiques (UNSCEAR 2000), qui est de 400 Bq.kg^{-1} . Par rapport à cette valeur mondiale, tous les échantillons en sont au-dessus.

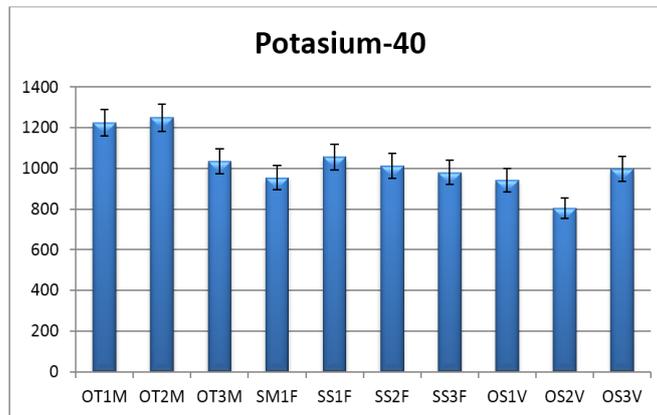


Figure 4 : Activités spécifiques du potassium-40 dans les échantillons de sols analysés

3-1-2. Activités spécifique de la famille de l'uranium-238 dans les échantillons du sol

La **Figure 5** montre la variation de l'activité spécifique calculée dans le **Tableau 5**. On constate que les activités spécifiques de l'uranium-238 varient de $(10,4 \pm 3,0) \text{ Bq.kg}^{-1}$ (OS3V) à $(39,7 \pm 8,4) \text{ Bq.kg}^{-1}$ (OT1M), avec une moyenne de $21,2 \text{ Bq.kg}^{-1}$. Cette valeur moyenne est inférieure à la valeur moyenne mondiale donnée par l'UNSCEAR, qui est de 35 Bq.kg^{-1} . Nous remarquons que la plupart de nos échantillons possèdent des activités bien inférieures à la valeur moyenne mondiale.

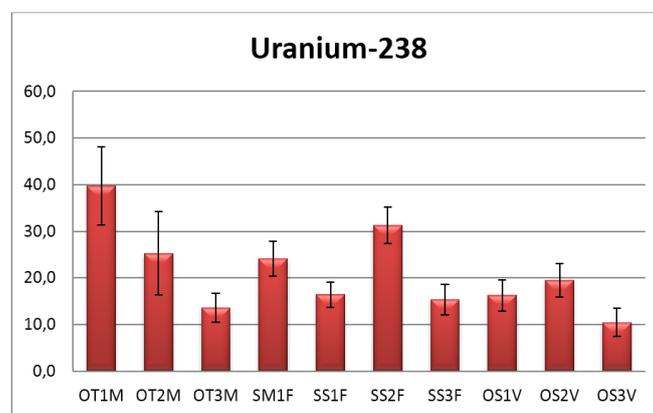


Figure 5 : Activités spécifiques de l'uranium-238 dans les échantillons de sols analysés

3-1-3. Activités spécifique de la famille du thorium-232 dans les échantillons du sol

La **Figure 6** illustre la variation des activités spécifiques calculées de la famille du thorium-232. Les activités varient de $(153 \pm 7,57) \text{ Bq.kg}^{-1}$ (SM1F) à $(231 \pm 8,57) \text{ Bq.kg}^{-1}$ (OT3M), avec une moyenne de 201 Bq.kg^{-1} . Cette valeur moyenne est presque sept fois supérieure à la valeur moyenne mondiale, qui est 30 Bq.kg^{-1} , d'après l'UNSCEAR. Les activités de la famille du thorium-232 trouvées dans la présente étude sont toutes supérieures à celle de la moyenne mondiale.

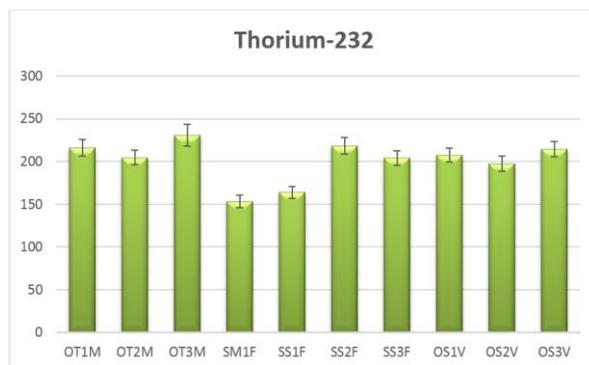


Figure 6 : Activités spécifiques du thorium-232 dans les échantillons de sols analysés

3-1-4. Activités spécifique de trois principaux radionucléides naturels de la fève du cacao

Le Cacao est le fruit du cacaoyer, Les principales variétés de cacao sont : les Criollo, les Forastero et les Trinitario [7]. L'activité spécifique du potassium-40 est les plus abondants par rapport aux autres radionucléides naturels. On n'a constaté que les fèves à forte tendance criollo sur un site d'Ankatafahely (SC21C) à la valeur d'activité spécifique du potassium-40 le plus élevé, qui est $(829,3 \pm 62) \text{ Bq. kg}^{-1}$. De même, Dans tous les sites, les fèves à forte tendance trinitario ont la valeur plus élevé en activité de l'Uranium-238 et du thorium-232.

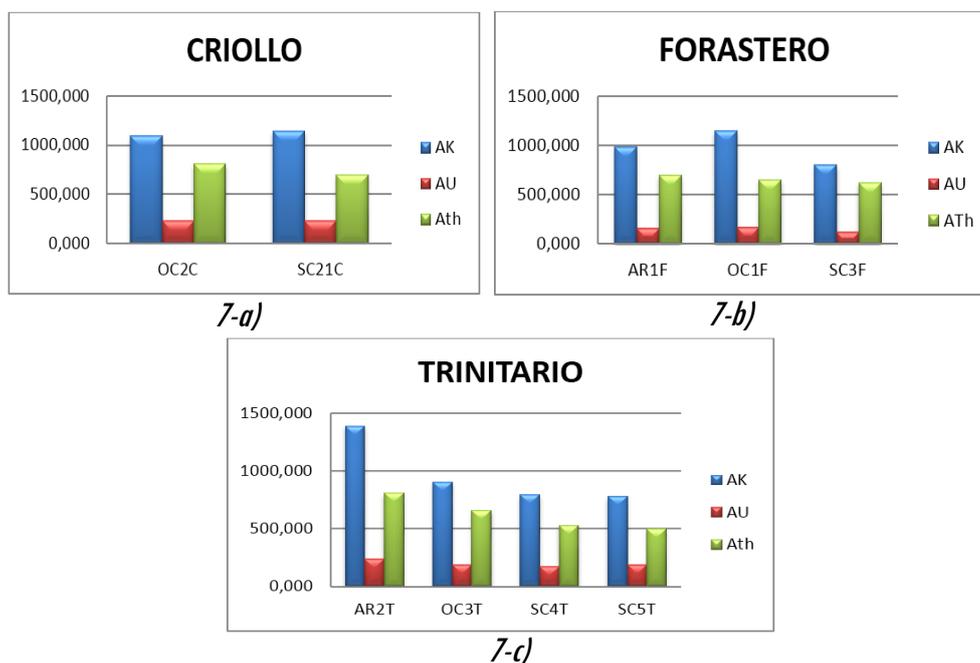


Figure 7 : Activités spécifiques des trois radionucléides naturels dans les échantillons de la fève du cacao analysés

3-2. Teneur et facteur d'enrichissement

3-2-1. Teneur

En considérant les valeurs présentées dans les **Tableaux 5 et 6**, nous avons calculé le coefficient d'enrichissement sur lequel figurent les valeurs des teneurs en ppm de chaque radionucléide naturel présent dans tous les échantillons du sol mesuré.

3-2-2. Facteur d'enrichissement

On envisage ici de déterminer le coefficient d'enrichissement de transfert sol-plante de chaque site, des radionucléides étudiés. Le coefficient de transfert est le rapport d'activité massique (Bq.kg⁻¹) des cacaos sur l'activité massique du sol (Bq.kg⁻¹). Pour le calcul, on a considéré ainsi la moyenne d'activité pour les radionucléides naturels de la famille du thorium-232, de même pour ceux de la famille d'uranium-238 et celle l'activité du potassium-40, présents dans les sols et les plantes.

$$F_{s/c}(\%) = \frac{A_s}{A_c} \times 100 \tag{13}$$

De même, le coefficient d'enrichissement (τ_{enr}) c'est le rapport entre la différence de l'activité du sol et celle du cacao sur l'activité du cacao.

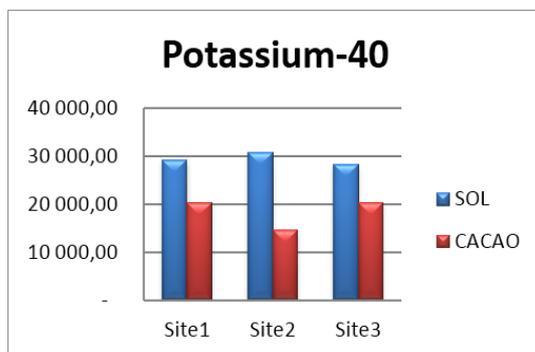
$$\tau_{enr}(\%) = \frac{A_c - A_s}{A_c} \times 100 \tag{14}$$

où, A_c : Moyenne d'activité spécifique du cacao par chaque site de chaque élément ; A_s : Moyenne d'activité spécifique du sol par chaque site de chaque élément, τ_{enr} : Taux d'enrichissement.

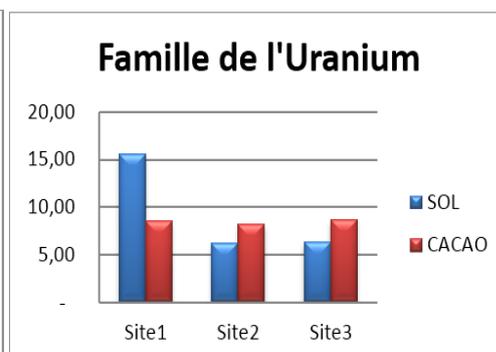
Le **Tableau** suivant montre les valeurs moyennes des teneurs par site de chaque radionucléide et les taux d'enrichissement correspondant.

Tableau 7 : Teneur et le coefficient d'enrichissement par site

Eléments		Teneurs dans le sol (ppm)		Teneurs dans la fève du cacao (ppm)		τ_{enr} (%)
		Valeur moyenne	Intervalle de variation	Valeur moyenne	Intervalle de variation	
Site 1	K-40	29 233	27 095 - 31 371	20 370	19 505- 21 235	30
	U-238	15,57	7,26 - 23,87	8,58	7,44 - 13,31	61
	Th-232	54,97	53,80 - 56,15	96,69	94,86 - 98,53	43
Site 2	K-40	30 770	29 428- 32 111	14 511	12 703 - 16 320	21
	U-238	6,23	5,29 - 7,16	8,22	7,08 - 9,37	24
	Th-232	45,44	38,08 - 52,80	77,21	70,32 - 84,09	41
Site 3	K-40	28 380	25 287 - 31 473	20 398	16 392 - 24 404	53
	U-238	6,40	6,22 - 6,59	8,66	5,68 - 11,64	26
	Th-232	49,39	45,60 - 53,19	67,86	50,32 - 85,41	27



8-a)



8-b)

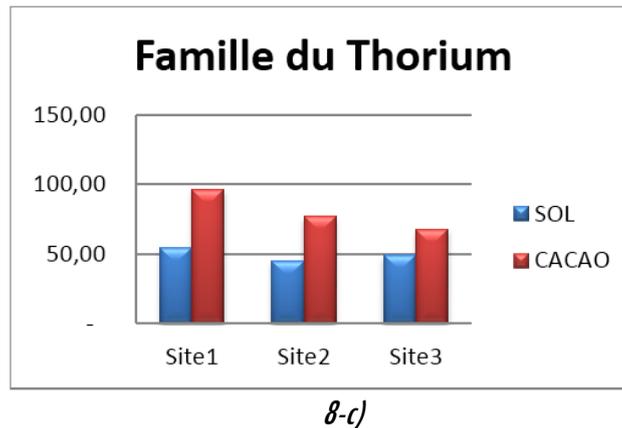


Figure 8 : Teneur en radionucléides naturels dans les échantillons analysés

On n'a constaté que la variation des coefficients d'enrichissement dépend de leur milieu. D'après le **Tableau 7**, le potassium-40 dans les échantillons du sol sont plus abondant dans tous les sites qu'on a étudiés (**Figure 8-a**). De même, la famille du thorium-232 dans les échantillons de la fève de cacao domine tous les sites (**Figure 8-c**). Tandis qu'en famille de l'uranium 238, le site d'Antanimena ayant la valeur du teneur dans les échantillons du sol le plus élevé (**Figure 8-b**).

4. Conclusion

Madagascar est l'un des pays producteur du cacao, ayant la meilleure qualité mais de faible quantité. La présente étude nous a permis d'évaluer le niveau des radionucléides telluriques dans le sol et dans le cacao longeant la plaine du Sambirano et qui regroupe trois localités, dont Ambalavelona, Ankatafahely et Antanimena. Elle a permis de déterminer les activités spécifiques du Potassium-40, de la famille de l'Uranium-238 et celle du Thorium-232. Les analyses quantitatives ont été faites à l'aide d'un spectromètre gamma avec un détecteur NaI (TI) de marque ORTEC, au Département d'Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar. Des mesures de longue durée ont été effectuées pour avoir des résultats suffisamment fiables car les statistiques de comptage influencent beaucoup sur les résultats d'analyse. Les valeurs moyennes des activités spécifiques des trois radionucléides naturels étudiés sont supérieures à la valeur moyenne mondiale. Le flux de potassium joue un rôle important dans le contrôle des mouvements des cellules. C'est celui qui assure l'équilibre acido-basique. Il favorise également la photosynthèse, diminue la transpiration et réduit les risques de flétrissement en cas de sécheresse.

Références

- [1] - BRIANT KALL, THEOGENE TOMBO, Contribution à l'étude de dose due à la radioactivité gamma du sol sur la rive de la baie des Français, Antsiranana, Madagascar. *Afrique SCIENCE*, ISSN 1813-548X, 11, 1 (2015) 122 - 135.
- [2] - L. RYBACH, Radiometric techniques, In : Wainerdi, R. E., Uken, E. A., (Eds), *Modern Methods of Geochemical Analysis*, Plenum Press, New York, (1971).
- [3] - L. Rybach, Determination of the heat production rate, In : R. Haenel, L. Rybach, L. Stegena (Eds), *Handbook of Terrestrial Heat-Flow Density Determination*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, (1988).
- [4] - ANDRIANJAFITRIMO, Etablissement d'un dispositif d'analyse spectrométrique au NaI (TI) : application à la caractérisation de la radioactivité des sols. Thèse de 3^e cycle, Université d'Antananarivo, (2010) 26 - 34 p.

- [5] - FREDERIC ASIMANANA, Détermination des radionucléides dans le repas. Application aux arts culinaire de Madagascar. *Afrique science*, ISSN 1813-548X. Vol. 10, N°3 (2014).
- [6] - NGANGUE LATTA T. ARMAND, Détermination des caractéristiques physicochimique et évaluation des teneurs en poly-phénols totaux des fèves de théobroma cacao de la localité de Mbalmayo, (2011).
- [7] - R. Mehra, M. Singh, Measurement of Radioactivity of ^{238}U , ^{226}Ra , ^{232}Th and ^{40}K in Soil of Different Geological Origins in Northern India, *Journal of Environmental Protection*, (2011) 960 - 966 p.