

Caractérisation De La Radioactivité Gamma Naturelle Des Sols Au Fond De Deux Bassins D'eaux Thermales : Cas De La Commune Rurale De Mangindrano, District De Bealanana, Région Sofia, Madagascar

Milson BEMALAZA¹

¹Madagascar

Corresponding Author : Milson BEMALAZA



Résumé : Contexte : Les eaux thermales peuvent contenir des radionucléides naturels issus des formations géologiques traversées. Ces radionucléides peuvent s'accumuler dans les sols au fond des bassins et émettre des rayonnements gamma susceptibles de contribuer à l'exposition des usagers. Cependant, les données sur la radioactivité naturelle des bassins d'eaux thermales de Mangindrano restent inexistantes. Il est donc nécessaire d'évaluer les niveaux de radioactivité gamma des sols afin d'apprécier les risques radiologiques potentiels. Objectif: Cette recherche vise à évaluer la radioactivité gamma naturelle des sols au fond de deux bassins d'eaux thermales de la commune rurale de Mangindrano (district de Bealanana), en déterminant les activités spécifiques du ^{40}K , ^{238}U et ^{232}Th , afin d'évaluer les principaux indices radiologiques et d'apprécier les risques radiologiques pour les usagers. Méthode : Le traitement des spectres a été effectué selon la méthode de Rybach. Pour ce travail, la spectrométrie gamma a été réalisée au laboratoire du Département d'Analyses et Techniques Nucléaires (ATN) de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN)-Madagascar. Matériel : Les analyses ont été réalisées à l'aide de chaînes de spectrométrie gamma équipées de détecteurs NaI(Tl) et du logiciel Scinti-Vision. Quatorze (14) échantillons ont été collectés et mesurés à l'aide du détecteur NaI(Tl) de marque ORTEC, fournissant des résultats fiables. Résultats : pour le sol au fond du bassin de l'eau thermale situé au nord du village, les activités spécifiques varient de $(575 \pm 23 \text{ à } 759 \pm 27) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le ^{40}K , de $(21 \pm 4 \text{ à } 44 \pm 6) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série de l' ^{238}U et de $(17 \pm 4 \text{ à } 71 \pm 8) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série du ^{232}Th . Pour le sol au fond du bassin de l'eau thermale situé au sud du village, les activités spécifiques sont comprises entre $530 \pm 23 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $612 \pm 24 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le ^{40}K , $25 \pm 5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $68 \pm 8 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série de l' ^{238}U , et $30 \pm 5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $50 \pm 7 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série du ^{232}Th . Les activités spécifiques moyennes du sol au fond du bassin de l'eau thermale du nord sont de $656,29 \pm 25 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le ^{40}K , $36,00 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série de l' ^{238}U et $43,57 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série du ^{232}Th . Celles du bassin situé au sud sont respectivement de $572,43 \pm 39,92 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, $39,71 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $39,71 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Conclusion : Les résultats montrent que, dans les deux sites, le ^{40}K présente les activités spécifiques les plus élevées, devant les séries du ^{232}Th et de l' ^{238}U . En comparant les deux bassins, le site nord présente des activités plus élevées en ^{40}K et en ^{232}Th , tandis que le site sud montre une activité moyenne légèrement plus élevée pour la série de l' ^{238}U .

Mot clés : sol, eaux thermale, radionucléide, spectrométrie gamma.

Abstract: Background: Thermal waters can contain naturally occurring radionuclides derived from the geological formations through which they flow. These radionuclides can accumulate in the sediments at the bottom of the pools and emit gamma radiation that may contribute to user exposure. However, data regarding the natural radioactivity of the thermal water pools in Mangindrano are currently unavailable. It is therefore necessary to assess soil gamma radioactivity levels in order to evaluate potential radiological risks. Objective: This research aims to assess the natural gamma radioactivity of sediments at the bottom of two thermal water pools in the rural commune of Mangindrano (Bealanana district) by determining the specific activities of ^{40}K , ^{238}U , and ^{232}Th , thereby evaluating key radiological indices and assessing radiological risks for users. Method: Spectral processing was carried out using the Rybach method. For this study, gamma spectrometry was performed at the laboratory of the Department of Nuclear Analysis and Techniques (ATN) at the National Institute for Nuclear Science and Technology (INSTN)-Madagascar. Materials: Analyses were performed using gamma spectrometry systems equipped with NaI(Tl) detectors and Scinti-Vision software. Fourteen (14) samples were collected and

measured using an ORTEC-brand NaI(Tl) detector, yielding reliable results. Results: For the soil at the bottom of the thermal water basin located north of the village, specific activities range from $(575 \pm 23 \text{ to } 759 \pm 27) \text{ Bq.kg}^{-1}$ for ^{40}K , from $(21 \pm 4 \text{ to } 44 \pm 6) \text{ Bq.kg}^{-1}$ for the ^{238}U series, and from $(17 \pm 4 \text{ to } 71 \pm 8) \text{ Bq.kg}^{-1}$ for the ^{232}Th series. For the soil at the bottom of the thermal water basin located south of the village, specific activities range from $(530 \pm 23 \text{ to } 612 \pm 24) \text{ Bq.kg}^{-1}$ for ^{40}K , from $(25 \pm 5 \text{ to } 68 \pm 8) \text{ Bq.kg}^{-1}$ for the ^{238}U series, and from $(30 \pm 5 \text{ to } 50 \pm 7) \text{ Bq.kg}^{-1}$ for the ^{232}Th series. The mean specific activities for the soil at the bottom of the northern thermal water basin are $656.29 \pm 25 \text{ Bq.kg}^{-1}$ for ^{40}K , $36.00 \pm 6 \text{ Bq.kg}^{-1}$ for the ^{238}U series, and $43.57 \pm 6 \text{ Bq.kg}^{-1}$ for the ^{232}Th series. The corresponding values for the southern basin are $572.43 \pm 39.92 \text{ Bq.kg}^{-1}$, $39.71 \pm 6 \text{ Bq.kg}^{-1}$, and $39.71 \pm 6 \text{ Bq.kg}^{-1}$, respectively. Conclusion: The results show that, at both sites, ^{40}K exhibits the highest specific activities, followed by the ^{232}Th and ^{238}U series. Comparing the two basins, the northern site shows higher ^{40}K and ^{232}Th activities, whereas the southern site displays a slightly higher average activity for the ^{238}U series.

Keywords: soil, thermal water, radionuclide, gamma spectrometry.

1. INTRODUCTION

La radioactivité naturelle est présente dans tous les compartiments de l'environnement, notamment dans les sols, les roches et les eaux souterraines. Elle provient principalement des radionucléides primordiaux tels que le potassium-40 (^{40}K), l'uranium-238 (^{238}U) et le thorium-232 (^{232}Th), dont les concentrations dépendent de la nature géologique des formations traversées.

Les eaux thermales résultent de la circulation des eaux souterraines à travers des roches profondes. Au cours de ce processus, elles peuvent dissoudre et transporter des radionucléides naturels qui se déposent progressivement dans les sédiments au fond des bassins. L'étude de la radioactivité gamma de ces sols permet ainsi de caractériser la distribution des radionucléides naturels et d'évaluer les niveaux d'exposition aux rayonnements gamma.

Dans la commune rurale de Mangindrano, district de Bealanana, deux bassins d'eaux thermales, situés respectivement au nord et au sud du village, sont largement utilisés par la population locale. Toutefois, les données relatives à la radioactivité naturelle des sols au fond de ces bassins demeurent limitées. Cette étude vise donc à mesurer les activités spécifiques de ^{40}K , de la série de ^{238}U et de la série de ^{232}Th dans les sols des deux bassins, puis à comparer leurs niveaux de radioactivité afin d'évaluer les indices et les risques radiologiques associés.

2. ZONE D'ETUDE

Le site d'étude est localisé sur la côte nord à nord-ouest de Madagascar, dans la région de Sofia, anciennement rattachée à la province de Mahajanga. La zone étudiée s'étend entre la longitude 47° et 49° Est et la latitude 14° et 17° Sud. La Commune Rurale de Mangindrano, appartenant au district de Bealanana, occupe la partie nord et nord-est de la région de Sofia (voir figure 1). Géographiquement, elle est délimitée au nord par le district d'Ambanja, voisin du massif du Tsaratanana, à l'ouest par la Commune Rurale d'Ambararabe-Nord, au sud par la Commune Rurale d'Ambatorihia-Est, et à l'est par le district d'Andapa ainsi que la Commune Rurale d'Ambovononby. Les deux sources thermales étudiées sont situées respectivement à environ 6 km au nord et à 7 km au sud du village de Mangindrano.

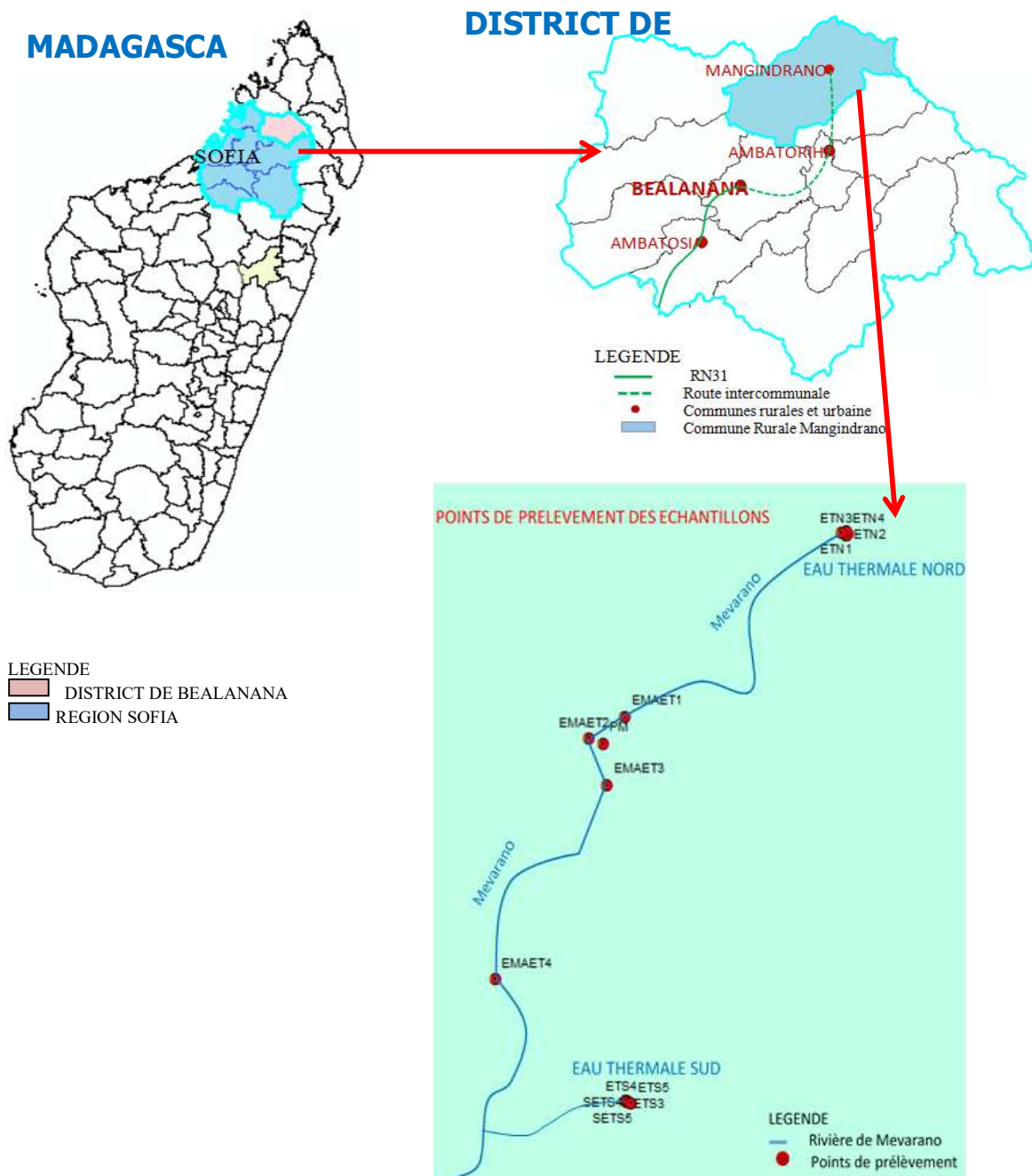


Figure 1 : Site de prélèvement des échantillons

3. MATERIELS ET METHODES

Les échantillons de sol ont été prélevés dans des sachets en plastique d'une capacité de 0,25 kg, soigneusement fermés et étiquetés afin d'éviter toute contamination croisée et de garantir leur traçabilité. Les points de prélèvement ont été répartis de manière homogène sur les deux bassins étudiés. Au total, quatorze (14) échantillons ont été collectés, dont sept (07) au fond du bassin de la source thermique nord et sept (07) au fond du bassin de la source thermique sud.

Avant les analyses, les échantillons ont été séchés, broyés puis tamisés. Ils ont ensuite été transférés dans des porte-échantillons cylindriques en polyéthylène d'un volume de 200 cm³, hermétiquement scellés. Les échantillons ont été conservés pendant trois semaines afin de permettre l'établissement de l'équilibre séculaire entre le ²²⁶Ra et ses descendants.

À l'issue de cette période, les échantillons ont été acheminés au laboratoire du Département d'Analyses et Techniques Nucléaires (ATN) de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) de Madagascar, où ils ont fait l'objet d'analyses par spectrométrie gamma.

3.1. Matériaux de références

Des matériaux de référence certifiés ont été utilisés pour l'étalonnage de la chaîne de mesure préalable à l'analyse des échantillons du sol. Dans le cadre de ce travail, les références RGK-1, RGU-1 et RGTh-1, respectivement représentatives du potassium, de la série de l'uranium et de celle du thorium, ont été employées. Leurs principales caractéristiques sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux de références RGK-1, RGU-1 et RGTh-1 disposés par le département Analyses et Techniques Nucléaires à l'INSTN-Madagascar [3].

Matériaux de		RGK-1	RGU-1	RGTh-1
Volume		100 cm ³	100 cm ³	100 cm ³
Masse		114,03 ± 0,02 (g)	142,85 ± 0,03 (g)	135,04 ± 0,04 (g)
Teneur	K	448000 ± 3000 (µg.g ⁻¹)	< 20 (µg.g ⁻¹)	0,02 ± 0,01%
	U	< 0,001 (µg.g ⁻¹)	400 ± 2 (µg.g ⁻¹)	6,3 ± 0,4 (µg.g ⁻¹)
	Th	< 0,01 (µg.g ⁻¹)	< 1 (µg.g ⁻¹)	800 ± 16 (µg.g ⁻¹)
Nature		Sulfate de potassium extra	Minerai d'Uranium dilué avec de la	Minerai de Thorium dilué avec de la

K: Potassium, U: Uranium et Th: Thorium.

3.2. Chaîne de spectrométrie gamma

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre gamma équipé d'un détecteur scintillateur NaI(Tl). Les matériaux de référence (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) ont servi à l'étalonnage de la chaîne de mesure, aussi bien en énergie qu'en efficacité. Le traitement des spectres a été effectué avec le logiciel Scinti-Vision en appliquant la méthode de Rybach. Cette dernière repose sur l'exploitation de trois (03) régions d'intérêt correspondant aux radionucléides naturels suivants : ⁴⁰K (1461,0 keV) ²³⁸U (1764,5 keV issu du ²¹⁴Pb) et ²³²Th (2614,5 keV issu du ²⁰⁸Tl) (voir figure 2).

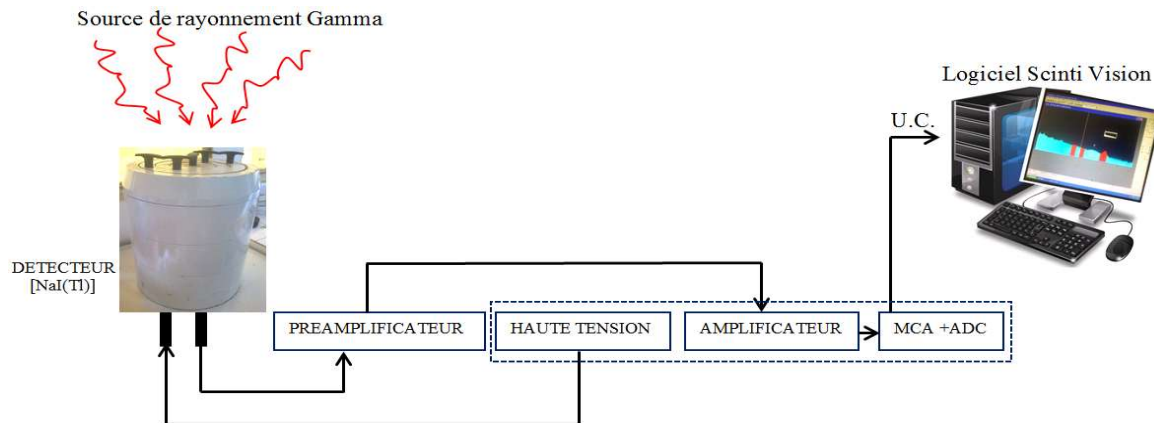


Figure 2 : Dispositif d'analyse au NaI(Tl) du laboratoire de l'INSTN-Madagascar [6].

3. 3. Etalonnage de la chaîne de mesure

3.3.1. Etalonnage en énergie

L'identification des radionucléides nécessite au préalable l'étalonnage en énergie de la chaîne de mesure. Cette opération consiste à établir la relation entre le numéro de canal et l'énergie déposée par le radionucléide. Pour ce faire, des matériaux de référence sont utilisés comme étalons. À partir du spectre enregistré, on détermine le numéro de canal C correspondant au centroïde du pic ainsi que son énergie associée E . La relation étant de nature linéaire, l'équation peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$E = aC + b \quad (1)$$

Les coefficients sont déterminés par la méthode des moindres carrés. Ainsi, on a une formule de la forme :

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

Où E est l'énergie en keV, C est le numéro du canal, a est la pente de la courbe ou gain en keV/canal et b est l'énergie du premier canal.

Les coefficients a et b sont déterminés par la méthode moindres carrés. À l'aide de l'équation (2), les énergies calculées avec leurs écarts relatifs sont aussi présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Energie et leur numéro de canal correspondant.

Radionucléides	Numéro de canal	Energie théorique (keV)	Energie calculée (keV)	Ecart (%)
^{214}Pb	99	351,5	349,9	1%
^{40}K	412	1461	1476,8	1%
^{214}Bi	498	1764,5	1786,4	1%
^{208}Tl	727	2614,5	2610,9	1%

On a utilisé le tableur Microsoft Excel pour réaliser l'étalonnage en énergie. La courbe d'étalonnage est représentée par la figure 3 suivante.

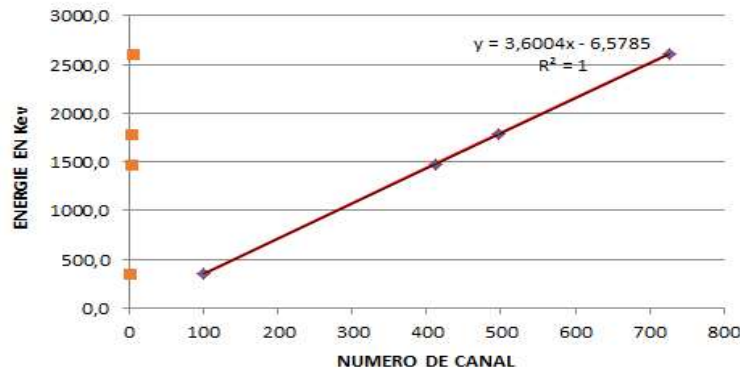


Figure 3 : Droite d'étalonnage obtenue à l'aide de Microsoft Excel pour le détecteur NaI(Tl).

3.3.2. Etalonnage en efficacité

L'ensemble des analyses a été réalisé selon la procédure de mesure directe proposée par Rybach et ultérieurement améliorée par Chiozzi et al.. Cette méthode consiste à sélectionner les régions du spectre de rayonnement centrées sur les pics caractéristiques d'énergie : 1461 keV pour le ^{40}K , 1764,5 keV pour le ^{238}U (via le ^{214}Bi) et 2614,5 keV pour le ^{232}Th (via le ^{208}Tl), correspondant respectivement aux séries de désintégration du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232 (voir figure 4). Pour chaque fenêtre spectrale, une largeur de 15 % autour de l'énergie du radionucléide caractéristique a été retenue comme région d'intérêt.

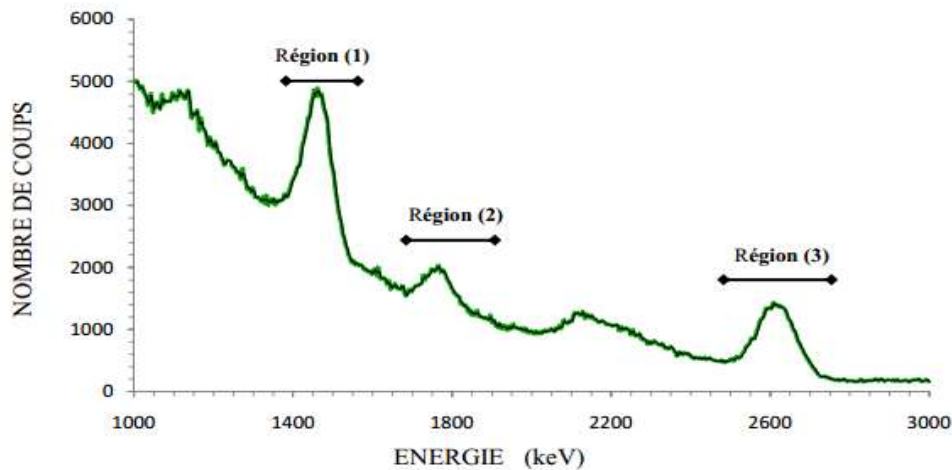


Figure 4 : Fenêtres d'énergie utilisées pour la détermination de l'activité du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232, d'après la description de Rybach [3].

Afin de généraliser la procédure proposée par Rybach pour l'étalonnage en efficacité, les trois régions spectrales centrées respectivement sur 1461 keV, 1764,5 keV et 2614,5 keV sont notées $i = 1, 2$ et 3 . De même, les étalons de potassium, d'uranium et de thorium sont désignés par $j = 1, 2$ et 3 . Le taux de comptage net $R_{i,j}$ enregistré dans la $i^{\text{ème}}$ région pour un étalon j est proportionnel à l'activité $A_{k,j}$ du radionucléide k , conformément à la relation (3).

Le taux de comptage net $R_{i,j}$ dans la région i (avec $i = 1$ à 3 pour les énergies 1461 keV, $1764,5$ keV et $2614,5$ keV) de l'étalon j (avec $j = 1$ à 3 pour les étalons RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) est proportionnel à l'activité $A_{k,j}$ du radionucléide k (^{40}K , ^{238}U et ^{232}Th) selon les équations (3) et (4) :

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

Et
$$R_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{t_j} - B_i \quad (4)$$

Où $N_{i,j}$: nombre de coups enregistrés dans la région i de l'étalon j , t_j : temps de comptage de l'étalon j (s), B_i : taux de comptage du bruit de fond dans la région i (coups. s^{-1}), $\varepsilon_{i,k}$:

constante d'efficacité pour le radionucléide k dans la région i , $A_{k,j}$: activité du radionucléide k dans l'étalon j (Bq) et $R_{i,j}$: taux de comptage net mesuré (coups. s^{-1}).

Le résultat obtenu à partir des équations (3) et (4) est donné dans les tableaux 3 et 4 ci-dessous.

Tableau 3 : Activités des radionucléides dans les étalons ($A_{k,j}$) [6].

i		1	2	3
	Etalons standards	RGK-1	RGU-1	RGTh-1
k	Radionucléides			
1	^{40}K	$A_{11} \neq 0$	$A_{12} = 0$	$A_{13} = 0$
2	^{238}U	$A_{21} = 0$	$A_{22} \neq 0$	$A_{23} \neq 0$
3	^{232}Th	$A_{31} = 0$	$A_{32} = 0$	$A_{33} \neq 0$

Tableau 4 : Constantes d'efficacité ($\varepsilon_{i,k}$) [6].

k		1	2	3
	Radionucléides	^{40}K	^{238}U	^{232}Th
i	Régions d'intérêt			
1	Région (1)	$\varepsilon_{1,1} \neq 0$	$\varepsilon_{1,2} \neq 0$	$\varepsilon_{1,3} \neq 0$
2	Région (2)	$\varepsilon_{2,1} = 0$	$\varepsilon_{2,2} \neq 0$	$\varepsilon_{2,3} \neq 0$
3	Région (3)	$\varepsilon_{3,1} = 0$	$\varepsilon_{3,2} \neq 0$	$\varepsilon_{3,3} \neq 0$

En insérant les valeurs du Tableau 3 et du Tableau 4 dans les équations 3 et 4, et en arrangeant, on obtient les constantes d'efficacité ci-après. Pour le potassium standard RGK-1, on a: en développant l'équation 3 avec les données dans les tableaux 3 et 4, les constantes d'efficacité $\varepsilon_{i,k}$ sont présentées comme suit :

Pour l'étalon RGK-1,

$$\varepsilon_{1,1} = \frac{R_{1,1}}{A_{1,1}} \quad (5)$$

Pour l'étalon RGU-1,

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{R_{1,2}}{A_{1,2}} \quad (26) \quad \text{et} \quad \varepsilon_{2,2} = \frac{R_{2,2}}{A_{2,2}} \quad (6)$$

Pour l'étalon RGTh-1,

$$\varepsilon_{1,3} = \frac{1}{A_{3,3}} \left(R_{1,3} - \varepsilon_{1,2} \frac{A_{2,3}}{A_{2,2}} \right) \quad (7)$$

$$\text{Et } \varepsilon_{2,3} = \frac{1}{A_{3,3}} \left(R_{2,3} - \varepsilon_{2,2} \frac{A_{2,3}}{A_{2,2}} \right) \quad (8)$$

Les constantes $\varepsilon_{3,2}$ et $\varepsilon_{3,3}$ sont déterminées en utilisant les étalons RGU-1 et RGTh-1.

$$\varepsilon_{3,2} = \frac{R_{3,2}}{A_{2,2}} \quad (9)$$

$$\varepsilon_{3,3} = \frac{1}{A_{3,3}} \left(R_{3,3} - \varepsilon_{3,2} \frac{A_{2,3}}{A_{2,2}} \right) \quad (10)$$

Le temps de comptage pour chaque étalon a été fixé à 24 heures. Les taux de comptage nets et les constantes d'étalonnage obtenus sont regroupés dans le tableau 5.

Tableau 5: Taux de comptage net et constant d'étalonnage obtenus

Taux de comptage net (cps)		Constante d'efficacité	
$R_{1,1}$	$1,700 \pm 0,028$	$\varepsilon_{1,1}$	$0,01090 \pm 0,00018$
$R_{1,2}$	$1,375 \pm 0,026$	$\varepsilon_{1,2}$	$0,02425 \pm 0,00049$
$R_{1,3}$	$0,658 \pm 0,022$	$\varepsilon_{1,3}$	$0,01792 \pm 0,00049$
$R_{2,1}$	0	$\varepsilon_{2,1}$	0
$R_{2,2}$	$1,603 \pm 0,025$	$\varepsilon_{2,2}$	$0,02827 \pm 0,00048$
$R_{2,3}$	$0,011 \pm 0,001$	$\varepsilon_{2,3}$	$0,01099 \pm 0,00065$

$R_{3,1}$	0	$\varepsilon_{3,1}$	0
$R_{3,2}$	$0,043 \pm 0,011$	$\varepsilon_{3,2}$	$0,00076 \pm 0,00019$
$R_{3,3}$	$0,634 \pm 0,018$	$\varepsilon_{3,3}$	$0,01781 \pm 0,00087$

4. CALCULS DES ACTIVITES SPECIFIQUES

4.1. Activités des radionucléides naturels dans les étalons et du sol au fond de l'eau thermale

Le but est d'exprimer la formule des activités de chaque radionucléide présent dans chaque région d'intérêt des étalons standard: RGK-1, RGU-1 et RGTh-1. Pour cela, on doit tenir compte des données sur le Tableau 5.

En se référant à l'équation (3), on obtient ainsi la forme matricielle suivante (11) :

$$\begin{pmatrix} R_K \\ R_U \\ R_{Th} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{1,1} & e_{1,2} & e_{1,3} \\ 0 & e_{2,2} & e_{2,3} \\ 0 & e_{3,2} & e_{3,3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} A_K \\ A_U \\ A_{Th} \end{pmatrix} \quad (11)$$

En inversant la matrice sur l'équation (11), les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et la famille du thorium-232 peuvent être déterminées à partir de l'équation (12) ci-après :

$$\begin{pmatrix} A_K \\ A_U \\ A_{Th} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_{1,1} & a_{1,2} & a_{1,3} \\ 0 & a_{2,2} & a_{2,3} \\ 0 & a_{3,2} & a_{3,3} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_K \\ R_U \\ R_{Th} \end{pmatrix} \quad (12)$$

En tenant compte la transformation de la matrice sur l'équation (12) en l'inversant pour avoir la matrice sur l'équation (13), il vient alors :

$$\begin{pmatrix} A_K \\ A_U \\ A_{Th} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{e_{1,3}e_{3,2} - e_{1,2}e_{3,3}}{e_{1,1}(e_{2,2}e_{3,3} - e_{2,3}e_{3,2})} & \frac{e_{1,2}e_{2,3} - e_{1,3}e_{2,2}}{e_{1,1}(e_{2,2}e_{3,3} - e_{2,3}e_{3,2})} \\ 0 & \frac{e_{3,3}}{e_{2,2}e_{3,3} - e_{2,3}e_{3,2}} & \frac{e_{2,3}}{e_{2,3}e_{3,2} - e_{2,2}e_{3,3}} \\ 0 & \frac{e_{3,2}}{e_{2,3}e_{3,2} - e_{2,2}e_{3,3}} & \frac{e_{2,2}}{e_{2,2}e_{3,3} - e_{2,3}e_{3,2}} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} R_K \\ R_U \\ R_{Th} \end{pmatrix} \quad (13)$$

À cet effet, les activités spécifiques de ces radionucléides peuvent être déduites finalement à l'aide de l'équation (14) suivante.

$$\begin{cases} A_K = a_{1,1}R_K + a_{1,2}R_U + a_{1,3}R_{Th} \\ A_U = \quad \quad \quad + a_{2,2}R_U + a_{2,3}R_{Th} \\ A_{Th} = \quad \quad \quad + a_{3,2}R_U + a_{3,3}R_{Th} \end{cases} \quad (14)$$

Avec A_K , A_U et A_{Th} représentent respectivement les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et la famille du thorium-232 ; R_K , R_U et R_{Th} sont les taux de comptage nets enregistrés correspondants respectivement au potassium-40, à la famille de l'uranium-238 et à celle du thorium-232.

4.2. Calcul d'incertitude et limite de détection

4.2.1. Calcul d'incertitude

Comme toute mesure expérimentale, les résultats obtenus sont affectés par des incertitudes, qu'elles soient systématiques (liées aux instruments ou aux procédures) ou aléatoires (variabilité de comptage, bruit de fond, etc.).

Ces incertitudes peuvent apparaître lors de la pesée, du conditionnement des échantillons, de l'analyse spectrale ou de la délimitation des régions d'intérêt. L'écart-type associé à un nombre de comptages N s'exprime alors par :

$$\sigma_N = \sqrt{N} \quad (15)$$

Lorsqu'une fonction u dépend de plusieurs variables $x, y, z, \dots$, l'incertitude combinée s'exprime selon :

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 \times \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 \times \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \times \sigma_z^2 + \dots \quad (16)$$

Cas particuliers:

- Pour une somme ou différence

$$\sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (17)$$

- Pour un produit ou quotient avec une constante ($\lambda \in \mathbb{R}$) :

$$\sigma_u = \lambda \times \sigma_x \quad (18)$$

- Pour un produit ou quotient entre deux variables :

$$\sigma_u = u \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y} \right)^2} \quad (19)$$

4.2.2. Calcul de la limite de détection

La limite de détection (LD) d'un radionucléide n dépend de plusieurs facteurs tels que le taux de comptage du bruit de fond, le temps de mesure et la constante d'étalonnage. Elle n'est donc pas uniforme sur l'ensemble du spectre et doit être calculée spécifiquement pour chaque région d'intérêt selon la formule :

$$LD_n = \frac{2\sqrt{2}}{\varepsilon_{i,n}} \sqrt{\frac{B_i}{t}} \quad (20)$$

- Pour le Potassium-40

$$\sigma_{A_K} = \sqrt{(R_K \sigma_{a_{1,1}})^2 + (a_{1,1} \sigma_{R_K})^2 + (R_U \sigma_{a_{1,2}})^2 + (a_{1,2} \sigma_{R_U})^2 + (R_{Th} \sigma_{a_{1,3}})^2 + (a_{1,3} \sigma_{R_{Th}})^2} \quad (21)$$

- Pour l'Uranium-238

$$\sigma_{AU} = \sqrt{(R_K \sigma_{a_{2,2}})^2 + (a_{2,2} \sigma_{RU})^2 + (R_{Th} \sigma_{a_{2,3}})^2 + (a_{2,3} \sigma_{R_{Th}})^2} \quad (22)$$

□ Pour le Thorium-232

$$\sigma_{A_{Th}} = \sqrt{(R_U \sigma_{a_{1,2}})^2 + (a_{3,2} \sigma_{RU})^2 + (R_{Th} \sigma_{a_{3,3}})^2 + (a_{3,3} \sigma_{R_{Th}})^2} \quad (23)$$

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1. Activités spécifiques des radionucléides naturels du sol au fond du bassin de l'eau thermale nord de Mangindrano

Comme le montre le tableau 4.3, le ^{40}K ainsi que les radionucléides des familles de ^{238}U et du ^{232}Th ont été détectés dans le sol au fond du bassin de l'eau thermale nord de Mangindrano.

Tableau 4.3: Activités spécifiques des trois radionucléides naturels du sol au fond du bassin de l'eau thermale nord

Code	Activités spécifiques des radionucléides naturels (Bq kg ⁻¹)		
	Potassium-40	Uranium-238	Thorium-232
SETN1	644 ± 25	33 ± 5	58±7
SETN2	759 ± 27	21 ± 4	71±8
SETN3	575 ± 23	31 ± 5	70±8
SETN4	712 ± 26	42 ± 6	37±6
SETN5	583 ± 24	44 ± 6	19±4
SETN6	630 ± 25	41 ± 6	33±5
SETN7	691 ± 26	40 ± 6	17±4
Min	575 ± 23	21 ± 4	17±4
Max	759 ± 27	44 ± 6	71±8
Moyenne ± σ	656,29 ± 25	36,00 ± 6	43,57 ± 6
Moyenne Mondiale	400	35	30

SETN : Sol de l'Eau Thermale Nord ; σ ± : écart-type

Les résultats du tableau 4.3 sont synthétisés sous forme de diagrammes dans les figures 4.13, 4.14 et 4.15, correspondant respectivement aux radionucléides potassium-40, uranium-238, thorium-232.

Pour le radionucléide du potassium-40, son activité spécifique est présente dans la figure 4.13 ci-dessous.

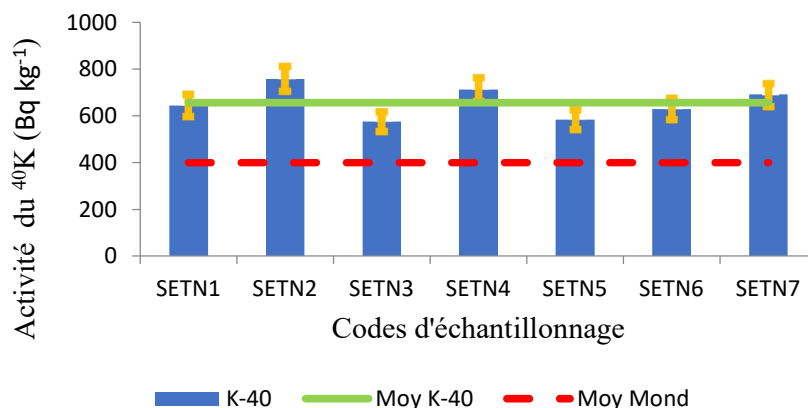


Figure 4.13: Variation des activités spécifiques du potassium-40 du sol de l'eau thermale nord.

Les données du tableau 4.3 sont représentées sous forme de diagrammes dans la figure 4.13, illustrant les résultats pour le radionucléide potassium-40.

Les activités spécifiques du potassium-40 varient entre (575 ± 23) Bq kg⁻¹ et (759 ± 27) Bq kg⁻¹, avec une moyenne de $(656,20 \pm 25)$ Bq kg⁻¹. Aucune valeur ne se situe en dessous de la limite de détection indiquée dans le tableau 4.3. L'activité maximale, correspondant à l'échantillon SETN2, a été relevée au fond du bassin aux coordonnées 14°14'47,53'' S et 48°59'9,12'' E, tandis que l'activité minimale, codée SETN3, a été mesurée aux coordonnées 14°14'48,46'' S et 48°59'9,29'' E. Parmi les sept échantillons analysés, trois présentent une activité supérieure à la moyenne et quatre une activité inférieure. Toutes les valeurs dépassent la limite de référence de 400 Bq kg⁻¹ fixée par l'OMS. Pour le radionucléide de l'uranium-238, son activité spécifique est présentée dans la figure 4.14 ci-dessous.

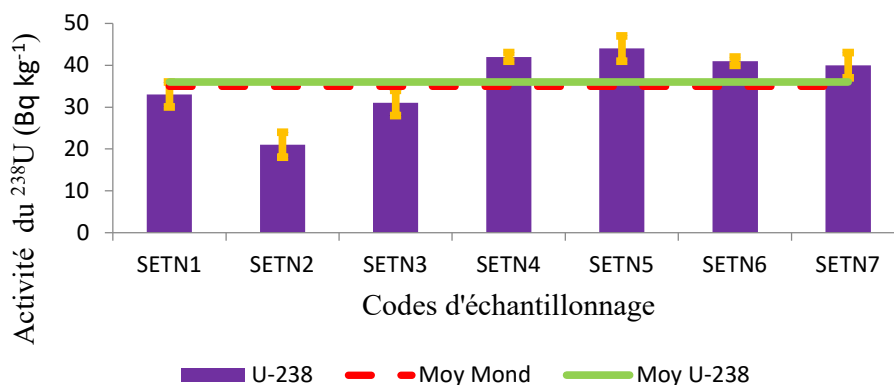


Figure 4.14 : Variation des activités spécifiques de l'uranium-238 du sol de l'eau thermale nord.

Pour la famille de l'uranium-238, les activités spécifiques varient de (21 ± 3) Bq kg⁻¹ à (44 ± 6) Bq kg⁻¹, avec une moyenne de $(36,00 \pm 6)$ Bq kg⁻¹. Toutes les valeurs sont supérieures à la limite de détection (voir tableau 4.3). L'activité maximale, correspondant à l'échantillon SETN5, a été relevée au fond du bassin aux coordonnées 14°18'26,23'' S et 48°57'34,55'' E, tandis que l'activité minimale, codée SETN2, a été mesurée aux coordonnées 14°18'26,18'' S et 48°57'34,50'' E. Parmi les sept échantillons prélevés, quatre présentent une activité supérieure à la moyenne. Comparées à la limite de référence de 35 Bq kg⁻¹

fixée par l'OMS, toutes les activités mesurées sont supérieures. L'activité spécifique du radionucléide de la famille du thorium-232 est illustrée dans la figure 4.15 ci-dessous.

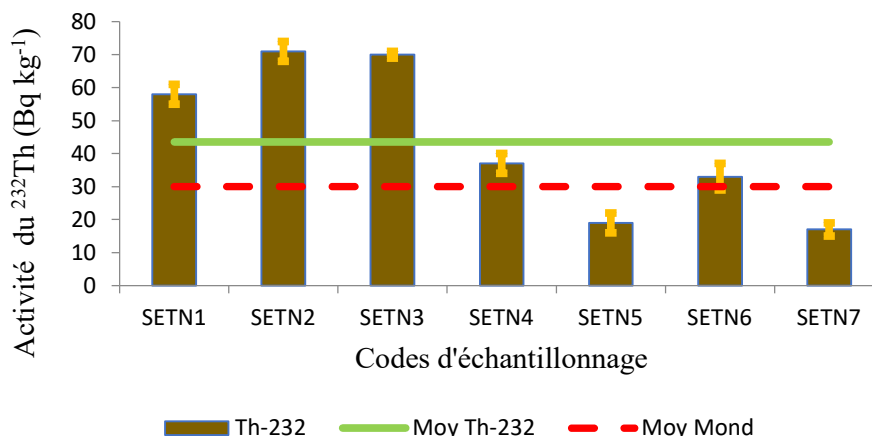


Figure 4.15 : Variation des activités spécifiques du thorium-232 du sol de l'eau thermale nord.

Pour la famille du thorium-232, les activités spécifiques varient de (17 ± 4) Bq kg⁻¹ à (71 ± 8) Bq kg⁻¹, avec une moyenne de $(43,57 \pm 6)$ Bq kg⁻¹. Aucune valeur n'est inférieure à la limite de détection (voir tableau 4.3). L'activité maximale, correspondant à l'échantillon SETN2, a été relevée au fond du bassin aux coordonnées 14°18'26,23'' S et 48°57'34,55'' E, tandis que l'activité minimale, codée SETN7, a été mesurée aux coordonnées 14°18'26,18'' S et 48°57'34,50'' E. Parmi les sept échantillons prélevés, trois présentent une activité supérieure à la moyenne.

Les résultats confirment la présence du potassium-40 ainsi que des radionucléides des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans tous les échantillons analysés. En moyenne, le potassium-40 affiche les niveaux d'activité les plus élevés, suivi par le thorium-232, puis l'uranium-238. Il est également observé que la répartition de ces radionucléides naturels varie selon les points de prélèvement.

Cette variabilité peut être expliquée par les différences géologiques et géographiques des zones étudiées. Comparées à la limite de référence de 30 Bq kg⁻¹ fixée par l'OMS, toutes les activités mesurées dépassent cette valeur.

5.2. Activités spécifiques des radionucléides naturels du sol au fond du bassin de l'eau thermale sud de Mangindrano

Comme le montre le tableau 4.4, le potassium-40 ainsi que les radionucléides des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 ont été détectés.

Tableau 4.4 : Activités spécifiques des trois radionucléides naturels du sol au fond du bassin de l'eau thermale sud

Code	Activités spécifiques des radionucléides naturels (Bq kg ⁻¹)		
	Potassium-40	Uranium-238	Thorium-232
SETS1	612 ± 24	43 ± 6	37 ± 6
SETS2	538 ± 23	27 ± 5	30 ± 5
SETS3	530 ± 23	30 ± 5	36 ± 6
SETS4	570 ± 23	25 ± 5	33 ± 5
SETS5	594 ± 24	40 ± 6	50 ± 7

SETS6	565 ± 23	68 ± 8	45 ± 6
SETS7	598 ± 24	45 ± 6	47 ± 6
Min	530 ± 23	25 ± 5	30 ± 5
Max	612 ± 24	68 ± 8	50 ± 7
Moyenne ±σ	572,43 ± 39,92	39,71 ± 6	39,71 ± 6
Moyenne mondiale	400	35	30

SETS : Sol de l'Eau Thermale Sud ; $\sigma \pm$: écart-type

Les résultats du tableau 4.4 sont synthétisés sous forme de diagrammes dans les figures 4.16, 4.17 et 4.18, correspondant respectivement aux radionucléides potassium-40, uranium-238, thorium-232.

Pour le radionucléide du potassium-40, son activité spécifique est présente dans la figure 4.16 ci-dessous.

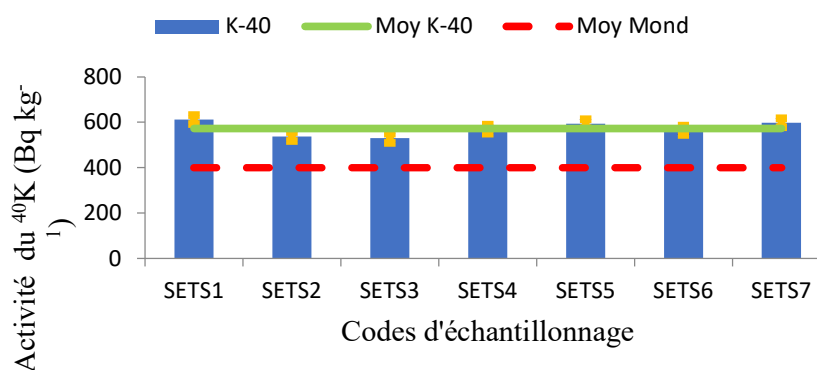


Figure 4.16 : Variation des activités spécifiques du potassium-40 du sol de l'eau thermale nord.

Les données du tableau 4.4 sont représentées sous forme de diagrammes dans la figure 4.16, illustrant les résultats pour le radionucléide potassium-40. Les activités spécifiques du potassium-40 varient entre (530 ± 23) Bq kg⁻¹ et (612 ± 24) Bq kg⁻¹, avec une moyenne de $(572,43 \pm 39)$ Bq kg⁻¹. Aucune valeur ne se situe en dessous de la limite de détection indiquée dans le tableau 4.4. L'activité maximale, correspondant à l'échantillon SETS1, a été relevée au fond du bassin aux coordonnées 14°14'47,53'' S et 48°59'9,12'' E, tandis que l'activité minimale, codée SETS3, a été mesurée aux coordonnées 14°14'48,46'' S et 48°59'9,29'' E.

Parmi les sept échantillons analysés, trois présentent une activité supérieure à la moyenne et quatre une activité inférieure. Toutes les valeurs dépassent la limite de référence de 400 Bq kg⁻¹, fixée par l'OMS.

Pour le radionucléide de l'uranium-238, son activité spécifique est présente dans la figure 4.17 ci-dessous.

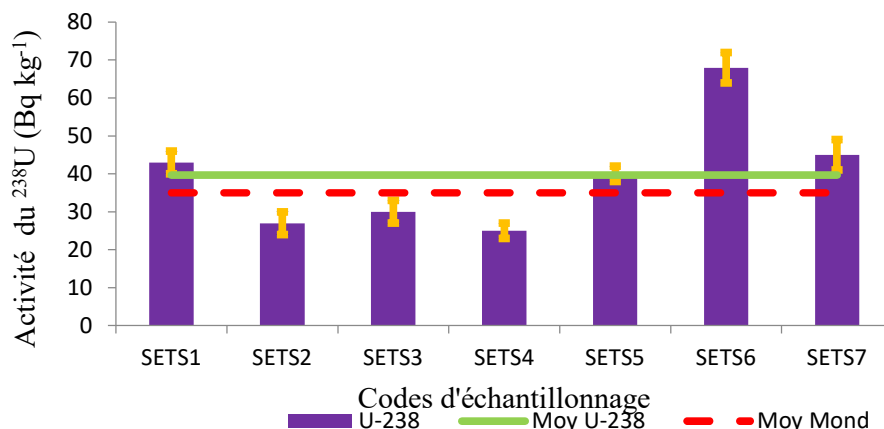


Figure 4.17 : Variation des activités spécifiques de l'uranium-238 du sol de l'eau thermale sud.

Pour la famille de l'uranium-238, les activités spécifiques varient de (25 ± 5) Bq kg⁻¹ à (68 ± 8) Bq kg⁻¹, avec une moyenne de $(39,71 \pm 6)$ Bq kg⁻¹. Aucune valeur n'est inférieure à la limite de détection (voir tableau 4.4). L'activité maximale, correspondant à l'échantillon SETS6, a été relevée au fond du bassin aux coordonnées 14°18'26,23''S et 48°57'34,55''E, tandis que l'activité minimale, codée SETS4, a été mesurée aux coordonnées 14°18'26,18''S et 48°57'34,50''E. Parmi les sept échantillons prélevés, quatre présentent une activité supérieure à la moyenne. Comparées à la limite de référence de 35 Bq kg⁻¹, fixée par l'OMS, quatre activités dépassent cette valeur tandis que trois restent en dessous.

Pour le radionucléide du thorium-232, son activité spécifique est présente dans la figure 4.18 ci-dessous.

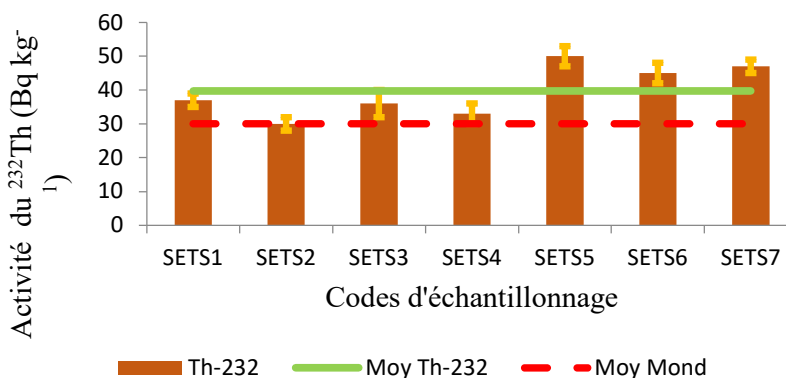


Figure 4.18: Variation des activités spécifiques du thorium-232 du sol de l'eau thermale sud.

Pour la famille du thorium-232, les activités spécifiques varient de (30 ± 5) Bq kg⁻¹ à (50 ± 7) Bq kg⁻¹, avec une moyenne de $(39,71 \pm 6)$ Bq kg⁻¹. Aucune valeur n'est inférieure à la limite de détection (voir tableau 4.4). L'activité maximale, correspondant à l'échantillon SETS5, a été relevée au fond du bassin aux coordonnées 14°18'26,23''S et 48°57'34,55''E, tandis que l'activité minimale, codée SETS2, a été mesurée aux coordonnées 14°18'26,18''S et 48°57'34,50''E. Parmi les sept échantillons prélevés, trois présentent une activité supérieure à la moyenne. En comparant avec la limite de référence de 30 Bq kg⁻¹ fixée par l'OMS, six activités dépassent cette valeur et une se situe au niveau de cette limite.

Les résultats confirment la présence du potassium-40 ainsi que des radionucléides des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans tous les échantillons analysés. En moyenne, le potassium-40 présente les niveaux d'activité les plus élevés, tandis que les activités du thorium-232 et de l'uranium-238 sont équivalentes.

La répartition de ces radionucléides naturels varie selon les points de prélèvement, probablement en raison des différences géologiques et géographiques des zones étudiées.

En comparant le sol au fond du bassin des eaux thermales sud et nord :

- L'activité spécifique du potassium-40 et de l'uranium-238 est en moyenne plus élevée dans le sol au fond du bassin de l'eau thermique sud que dans celui du nord.
- Pour le ^{232}Th , l'activité spécifique est plus élevée dans le sol au fond du bassin de l'eau thermique nord que dans celui du sud.

5.3. Corrélation entre les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232 du sol au fond du bassin de l'eau thermique nord de Mangindrano.

Les figures 4.19, 4.20 et 4.21 illustrent les relations entre les radionucléides mesurés dans les échantillons d'eaux thermales nord de Mangindrano. Des analyses de régression linéaire ont été réalisées afin d'évaluer les corrélations possibles entre ces éléments.

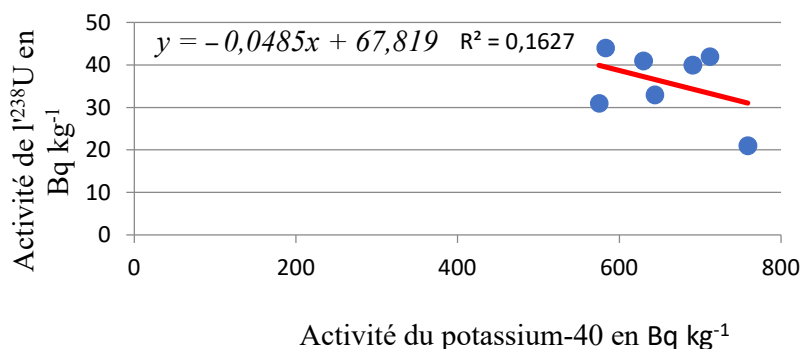


Figure 4.19 : Corrélation entre les activités du potassium-40, de la famille de l' ^{238}U

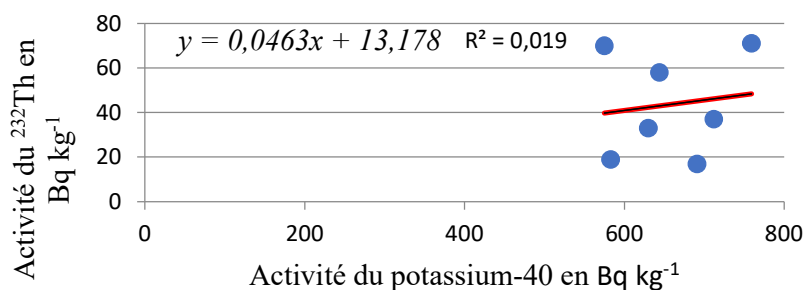


Figure 4.20 : Corrélation entre les activités du potassium-40, de la famille du thorium-232

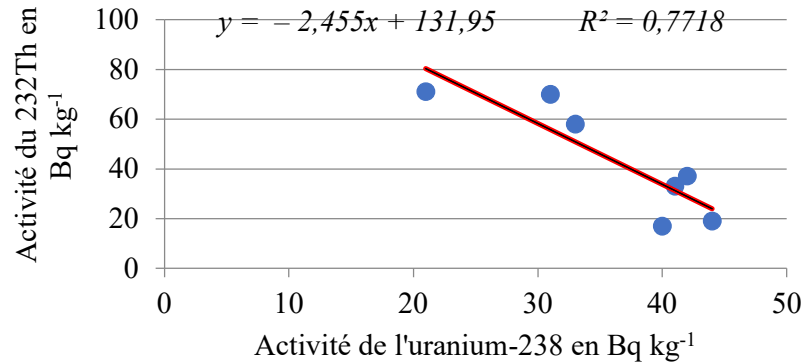


Figure 4.21 : Corrélation entre les activités de la famille de l'uranium-238 et celle de la famille du thorium-232.

Les analyses de régression pour les couples de radionucléides $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$, $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ mettent en évidence de faibles corrélations. Pour le rapport $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$ (Figure 4.19), l'équation de la droite de régression est $y = -0,0485x + 67,819$, $y = -0,0485x + 67,819$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,1627$, $R^2 = 0,1627$, $R^2 = 0,1627$. Pour le rapport $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ (Figure 4.20), l'équation est $y = 0,0463x + 13,178$, $y = 0,0463x + 13,178$, $y = 0,0463x + 13,178$ avec $R^2 = 0,019$, $R^2 = 0,019$, $R^2 = 0,019$, et pour le rapport $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ (Figure 4.21), l'équation est $y = -2,455x + 131,95$, $y = -2,455x + 131,95$ avec $R^2 = 0,7718$, $R^2 = 0,7718$, $R^2 = 0,7718$. Ces faibles coefficients R^2 montrent que les points de données sont largement dispersés autour des droites de régression. Cette variabilité importante suggère que les concentrations de ces couples de radionucléides sont en grande partie indépendantes les unes des autres. En conclusion, l'absence de corrélations fortes indique que la distribution des radionucléides dans les échantillons est probablement influencée par des facteurs géochimiques spécifiques à chaque élément.

5.4. Corrélation entre les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et celle de la famille du thorium-232 du sol au fond du bassin de l'eau thermale sud de Mangindrano.

Les figures 4.22, 4.23 et 4.24 illustrent les relations entre les radionucléides mesurés dans les échantillons de sol de l'eau thermale sud de Mangindrano. Des analyses de régression linéaire ont été réalisées afin d'évaluer les corrélations possibles entre ces éléments.

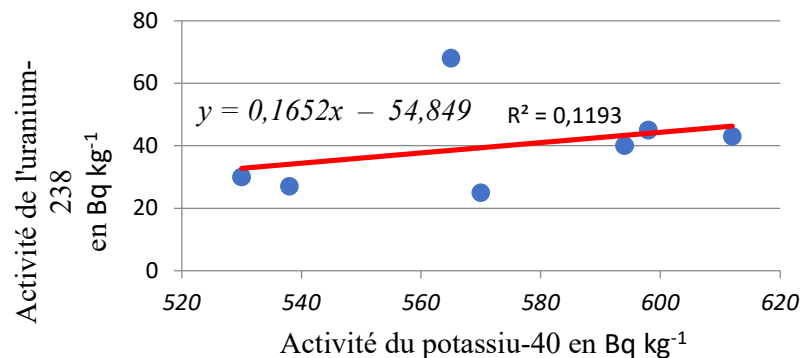


Figure 4.22 : Corrélation entre les activités du ^{40}K , de la famille de l' ^{238}U .

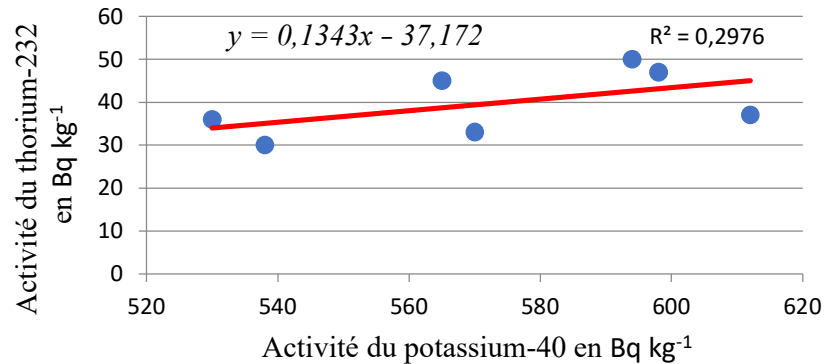


Figure 4.23 : Corrélation entre les activités du potassium-40, de la famille du thorium-232

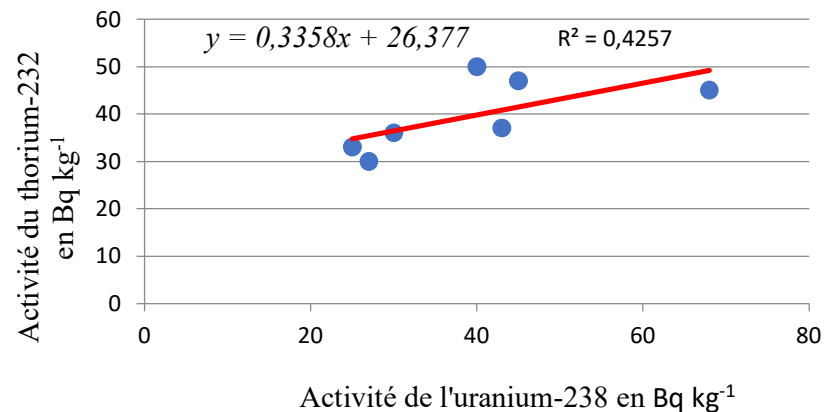


Figure 4.24 : Corrélation entre les activités de la famille de l'uranium-238 et celle de la famille du thorium-232

Les analyses de régression pour les couples de radionucléides $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$, $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ révèlent des corrélations faibles.

Pour le rapport $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$ (Figure 4.22), l'équation de la droite de régression est $y = 0,1652x - 54,849$, $y = 0,1652x - 54,849$, $y = 0,1652x - 54,849$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,1193$, $R^2 = 0,1193$, $R^2 = 0,1193$. Pour le rapport $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ (Figure 4.23), l'équation est $y = 0,1343x - 37,172$, $y = 0,1343x - 37,172$ et $y = 0,1343x - 37,172$ avec $R^2 = 0,2976$, $R^2 = 0,2976$ et $R^2 = 0,2976$, et pour le rapport $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ (Figure 4.24), l'équation est $y = 0,3358x + 26,377$, $y = 0,3358x + 26,377$ et $y = 0,3358x + 26,377$ avec $R^2 = 0,4257$, $R^2 = 0,4257$ et $R^2 = 0,4257$. Ces faibles coefficients R^2 montrent que les points de données sont largement dispersés autour des droites de régression, suggérant que les concentrations de ces couples de radionucléides sont essentiellement indépendantes.

En conclusion, l'absence de corrélations fortes indique que la distribution des radionucléides dans ces échantillons est probablement influencée par des facteurs géochimiques spécifiques à chaque élément.

6. Discussion des activités spécifiques du sol au fond du bassin des eaux thermales

6.1. Sol au fond du bassin de l'eau thermale nord

Globalement, les résultats obtenus dans les sols sous-jacents à l'eau thermale du nord indiquent une activité moyenne de $(656,29 \pm 25)$ Bq kg⁻¹ pour le potassium-40.

Pour la famille de l'uranium-238, l'activité moyenne s'élève à $(36,00 \pm 6)$ Bq kg⁻¹, tandis que celle du thorium-232 est de $(43,57 \pm 6)$ Bq kg⁻¹.

En comparaison avec des études similaires présentées dans le Tableau 7.2, plusieurs constats peuvent être établis :

- L'activité moyenne du potassium-40 observée dans cette étude est largement supérieure à celle rapportée dans le sol ferralitique d'Ewekoro au Nigeria [16], le désert de Riyadh en Arabie Saoudite [42], les sols sédimentaires de Mumbai en Inde [85], Erzincan en Turquie [43], Douala Bassa au Cameroun [44], ainsi que dans les sols ferrugineux/ferralitiques du nord et de l'extrême nord de Madagascar [20 ; 44].
- Elle est environ deux fois plus élevée que celle mesurée dans le sol ferrugineux du Nord-Madagascar (Antsiranana) [45], à Rize en Turquie [3], dans les sols volcaniques de Bibiani au Ghana [46] et de Perak en Malaisie [47].
- Elle est comparable à celle relevée dans le sol argileux d'Aden au Yémen [4] et le sol ferrugineux d'El Sahu en Égypte [14].
- En revanche, elle reste inférieure aux activités observées dans le sol volcanique de Sana'a au Yémen [48] et dans les sols sableux du Lac Qarun en Égypte [49].

Pour la famille de l'uranium-238, l'activité moyenne observée dans cette étude est supérieure à celle relevée dans le sol ferralitique d'Ewekoro au Nigeria, dans le sol d'Erzincan en Turquie [16, 43], dans le désert de Riyadh en Arabie Saoudite, ainsi que dans le sol volcanique de Bibiani au Ghana [42, 46]. Elle dépasse également les résultats rapportés pour le sol sableux près du Lac Qarun en Égypte, le sol de Missan en Irak, le sol de Rize en Turquie, le sol ferralitique de Douala Bassa au Cameroun [2, 3, 44, 49] et l'extrême nord de Madagascar [44].

En revanche, cette activité reste inférieure à celle du sol ferrugineux d'El Sahu en Égypte [93] et du sol ferrugineux/ferralitique du nord de Madagascar [20]. Elle est également plus faible que dans les sols des gouvernorats de Sana'a et Aden au Yémen [4–48], dans le sol argileux d'Itagunmodi au Nigeria [5], le sol ferralitique de Fongo-Tongo au Cameroun [45], le sol de Kemessie en Éthiopie [50], le sol de Perak en Malaisie [47], ainsi que dans les sédiments de Mumbai en Inde [1].

Pour la famille du thorium-232, l'activité moyenne observée dans cette étude est nettement inférieure à celle relevée dans le sol ferralitique de Fongo-Tongo au Cameroun [45], le sol de Perak en Malaisie, ainsi que le sol ferrugineux d'Antsiranana au nord de Madagascar [47, 51]. Elle est légèrement inférieure aux résultats obtenus dans le sol ferralitique de Douala Bassa au Cameroun [44], dans le sol volcanique du gouvernorat de Sana'a et dans le sol argileux du gouvernorat d'Aden au Yémen, ainsi que dans le sol ferrugineux d'El Sahu en Égypte [50, 4, 14] et dans le sol de Rize en Turquie [3]. En revanche, cette activité est supérieure à celle mesurée dans le sol ferralitique d'Ewekoro au Nigeria [16], dans le désert de Riyadh en Arabie Saoudite, dans le sol d'Erzincan en Turquie, dans le sol de Missan en Irak [42, 43, 2], dans les sédiments de Mumbai en Inde, dans le sol volcanique de Bibiani au Ghana, ainsi que dans le sol sableux près du lac Qarun en Égypte [1, 46, 49].

La géologie environnante et le fond du bassin de l'eau thermale nord de Mangindrano se caractérisent par une forte présence de minéraux riches en potassium. Néanmoins, les résultats de cette étude révèlent que les activités du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et du thorium-232 présentent une variation spatiale notable dans les sols autour et au fond du bassin.

6.2. Sol au fond du bassin de l'eau thermale sud

Globalement, les résultats obtenus dans les sols au fond de l'eau thermale du sud indiquent une activité moyenne de $(572,43 \pm 39)$ Bq kg⁻¹ pour le potassium-40, de $(39,71 \pm 6)$ Bq kg⁻¹ pour la famille de l'uranium-238, et de $(39,71 \pm 6)$ Bq kg⁻¹ pour la famille du thorium-232.

En comparaison avec des études similaires présentées dans le Tableau 5.2, plusieurs observations peuvent être faites :

- L'activité moyenne du potassium-40 mesurée ici est largement supérieure à celle relevée dans le sol sédimentaire de Mumbai en Inde [1] et le sol ferralitique d'Ewekoro au Nigeria [16].
- Elle est environ deux fois plus élevée que dans le sol de l'extrême nord de Madagascar [82], le désert de Riyadh en Arabie Saoudite [42] et le sol d'Erzincan en Turquie [34].
- Elle est comparable à celle observée dans le sol argileux d'Itagunmodi au Nigeria [5] et à Kemessie en Éthiopie [50].
- En revanche, elle reste inférieure aux valeurs mesurées dans le sol volcanique de Sana'a au Yémen [48], le sol sableux du Lac Qarun en Égypte [49], le sol argileux d'Aden au Yémen [92], le sol ferrugineux d'El Sahu en Égypte [93], le sol ferrugineux du Nord-Madagascar (Antsiranana) [45] et le sol de Kemessie en Éthiopie [50].

Pour la famille de l'uranium-238, l'activité moyenne observée dans cette étude est supérieure à celle mesurée dans le sol de l'extrême nord de Madagascar [44], le sol ferralitique d'Ewekoro au Nigeria, le sol d'Erzincan en Turquie [16, 43], le désert de Riyadh en Arabie Saoudite, ainsi que le sol volcanique de Bibiani au Ghana [42, 46]. Elle dépasse également les valeurs relevées dans le sol sableux à proximité du lac Qarun en Égypte, le sol de Missan en Irak, le sol de Rize en Turquie et le sol ferralitique de Douala Bassa au Cameroun [44, 2, 3, 49]. Cette activité est proche de celle observée dans le sol ferrugineux/ferralitique du nord de Madagascar [20] et dans les sédiments de Mumbai en Inde [1]. Elle reste toutefois inférieure aux valeurs mesurées à Aden au Yémen [48], dans le sol argileux d'Itagunmodi au Nigeria [5], le sol ferralitique de Fongo-Tongo au Cameroun [45] et le sol ferrugineux d'El Sahu en Égypte [14]. Enfin, elle est nettement plus faible que celles relevées dans les sols de Kemessie en Éthiopie [50], le sol de Perak en Malaisie [47] et le sol ferrugineux d'Antsiranana au nord de Madagascar [51].

Pour la famille du thorium-232, l'activité moyenne mesurée dans cette étude est largement inférieure à celle relevée dans le sol ferralitique de Fongo-Tongo au Cameroun [45], le sol de Perak en Malaisie et le sol ferrugineux d'Antsiranana au nord de Madagascar [47, 51]. Elle est également légèrement inférieure aux résultats obtenus dans le sol de l'extrême nord de Madagascar [46] et dans le sol volcanique de Sana'a au Yémen [48].

En revanche, cette activité dépasse celle relevée dans le sol ferralitique d'Ewekoro au Nigeria [16], le désert de Riyadh en Arabie Saoudite, le sol d'Erzincan en Turquie, le sol de Missan en Irak [42, 43, 2], les sédiments de Mumbai en Inde, le sol volcanique de Bibiani au Ghana, le sol sableux près du lac Qarun en Égypte [1, 46, 49], ainsi que dans le sol argileux d'Itagunmodi au Nigeria [5].

La géologie environnante et le fond du bassin de l'eau thermale sud de Mangindrano se caractérisent également par une abondance de minéraux riches en potassium. Cependant, les résultats de cette étude montrent que les activités du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et du thorium-232 présentent une variation spatiale notable dans les sols autour et au fond du bassin.

Tableau 7.2 : Extraits des activités spécifiques du sol au niveau mondial.

Pays	Type du sol	Activités Spécifiques [min – max] (Bq.kg ⁻¹)			Références
		⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	
Madagascar (Bealanana)	Volcanique	656,29 [575 – 759]]	36 [21– 44]	43,57 [17– 71]	Présente étude
	Volcanique	572,43 [530 – 612]]	39,71 [25 – 68]	39,71 [30 – 50]	
Madagascar (Extrême nord)	Non-mentionné	222,4 [37,7 – 407]	12,8 [7,8 – 17,8]	41,8 [29,4 – 54,1]	[34]
Nord-Madagascar	Ferrugineux / Ferralitique	218 [126 – 327]	44 [14 – 73]	90 [8 – 402]	[20]
Nigeria (Ewekoro)	Ferralitique	16,5 [6,3 – 37,9]	8,1 [4,9 – 13,4]	8,3 [3,6 – 17,6]	[16]
Cameroun (Douala Bassa)	Ferralitique	215,9 [47,4 – 271,8]	24,5 [21,9 – 27,7]	66,7 [52,6 – 78,9]	[44]
Yémen (Sana'a)	Volcanique	939 505 – 1230]	48 [24 – 69]	42 [18 - 53]	[45]
Yémen (Aden)	Argileux	625 [298 – 896]	48 [15 – 88]	58 [30 – 99]	[4]
Cameroun (FongoTongo)	Ferralitique	671 [136 – 1269]	99 [ND – 215]	157 [59 – 272]	[45]
Nord Madagascar (Antsiranana)	Ferrugineux	313 [112 – 565]	139 [77 – 190]	126 [81 – 161]	[51]
Turquie (Rize)	Non-mentionné	344,9 [35,7 – 913,8]	24,5 [7,4 – 79,8]	51,8 [9,5 – 170,8]	[3]
Turquie (Erzincan)	Non-mentionné	281,9 [64,7 – 977,8]	8,9 [1 – 23]	11,4 [1,2 – 29,4]	[43]
Nigeria (Itagunmodi)	Argileux	505,1 [200,5 – 901,2]	55,3 [18,5 – 90,3]	26,4 [12,5 – 52,4]	[5]
Egypte (El Sahu)	Ferrugineux	672,3 [646,9 – 707,4]	44,6 [28,8 – 78,2]	58,6 [55,5 – 66,3]	[14]
Ghana (Bibiani)	Volcanique	380	16	17	[46]

		[20 – 483]	[11 – 23]	[10 – 36]	
Ethiopie (Kemessie)	Non-mentionné	577 [452 – 683]	249 [150 – 354]	60 [22 – 96]	[50]
Egypte (Lac Qarun)	Sableux	933 [410 – 1426]	24 [11 – 44]	16 [5 – 27]	[49]
Inde (Mumbai)	Sédimentaire	194 [51 – 295]	39 [21 – 674]	19 [11 – 44]	[1]
Arabie saoudite (Riyadh)	Sableux (désert)	225 [98 – 320]	15 [11 – 30]	11 [7 – 25]	[42]
Iraq (Missan)	Non-mentionné	454 [373 – 668]	21 [15 – 41]	10 [8 – 16]	[2]
Malaisie (Perak)	Différents types	302 [6 – 2522]	304 [7 – 554]	127 [23 – 1806]	[47]

7. CONCLUSION

Les campagnes de prélèvement ont été effectuées en septembre et octobre 2022, aboutissant à la collecte de quatorze (14) échantillons du sol au fond de l'eau thermale, dont sept (07) issus de la zone nord et sept (07) de la zone sud du village de Mangindrano.

Les mesures ont été réalisées à l'aide d'un spectromètre gamma muni d'un détecteur NaI(Tl), et les spectres exploités selon la méthode de Rybach. L'analyse de la radioactivité gamma naturelle des sols au fond des deux bassins d'eaux thermales de Mangindrano a mis en évidence la présence des radionucléides naturels de ^{40}K , de la série de l' ^{238}U et de la série du ^{232}Th . En termes d'activité spécifique, le potassium-40 présente les valeurs les plus élevées, suivi des radionucléides de la famille du thorium-232, puis de ceux de la famille de l'uranium-238. Par ailleurs, une variation spatiale des concentrations a été constatée entre les différents échantillons, probablement liée aux particularités géologiques et géographiques des sites de prélèvement. Pour le sol au fond du bassin de l'eau thermale situé au nord du village, les activités spécifiques varient de $(575 \pm 23 \text{ à } 759 \pm 27) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le ^{40}K , de $(21 \pm 4 \text{ à } 44 \pm 6) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série de l' ^{238}U et de $(17 \pm 4 \text{ à } 71 \pm 8) \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série du ^{232}Th . Pour le sol au fond du bassin de l'eau thermale situé au sud du village, les activités spécifiques sont comprises entre $530 \pm 23 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $612 \pm 24 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le ^{40}K , $25 \pm 5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $68 \pm 8 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série de l' ^{238}U , et $30 \pm 5 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $50 \pm 7 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série du ^{232}Th . Les activités spécifiques moyennes du sol au fond du bassin de l'eau thermale du nord sont de $656,29 \pm 25 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour le ^{40}K , $36,00 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série de l' ^{238}U et $43,57 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la série du ^{232}Th . Celles du bassin situé au sud sont respectivement de $572,43 \pm 39,92 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$, $39,71 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $39,71 \pm 6 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$. Dans les deux bassins, le ^{40}K présente les activités spécifiques les plus élevées, tandis que celles des séries de l' ^{238}U et du ^{232}Th sont nettement plus faibles. Ces résultats constituent des données de référence sur la radioactivité naturelle des sols des bassins d'eaux thermales de Mangindrano. Ils serviront de base à l'évaluation des indices radiologiques et des risques potentiels liés à l'exposition aux rayonnements gamma, contribuant ainsi à une meilleure connaissance de l'environnement radiologique de ces sites. Les indices radiologiques calculés demeurent supérieurs aux limites de référence internationales, ce qui indique que les sols au fond des deux bassins d'eaux thermales présentent de risque radiologique significatif pour les usagers. Il est nécessaire de mettre en place des mesures de prévention et de gestion du risque radiologique afin de réduire l'exposition des usagers.

REFERENCE

- [1]. Alseroury FA, Almeelb T, Khan A, Barakat MA, Al-Zahrani JH, Alali W. Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water. *J Radiat Res Appl Sci*. 2018; 11:373-8.
- [2]. Almayahi B, Tajuddin A, Jaafar M. Radiation hazard indices of soil and water samples in Northern Malaysian Peninsula. *Appl Radiat Isot*. 2012;70(11):2652-60. doi: 10.1016/j.apradiso.2012.07.021.
- [3]. Alseroury, F.A., Almeelb, T., Aslam Khan, Barakata, M.A., Al-Zahrani, J.H. & Alali, W. (2018). Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11, 373-378.
- [4]. BRGM, juillet 2000, Eau minérale et radioactivité, note technique n° 15.
- [5]. Commission canadienne de sûreté nucléaire, Règlement sur la radioprotection, mai 2000.
- [6]. Felix RANDRIA : Etude de la radioactivité naturelle dans l'eau de consommation et ses effets dosimétriques sur la population du district d'Antsohihy, région sofia. Aout 2025, Université d'Antsiranana, Madagascar.
- [7]. Donne ZAFIZARA. Etude de la radioactivité des eaux de consommation et leur impact dosimétrique sur la population locale d'Antsiranana [dissertation]. Antsiranana : Université d'Antsiranana ; 2021.
- [8]. El-Mageed AIA, El-Gamel AEH, Abbacy AEB, Herb S, Sale II. Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen. *Desalination*. 2013;321:28-31. doi: 10.1016/j.desal.2011.11.022.
- [9]. El-Gamal H, El-Mageed AIA. Natural Radioactivity in Water Samples from Assiut City, Egypt. *Int J Pure Appl Sci Technol*. 2014;22(1):44-52.
- [10]. Harb S, El-Kamel AH, Zahran AM, Abbady A, Ahmed FA. Assessment of Natural Radioactivity in Soil and Water Samples from Aden Governorate South Of Yemen Region. *Int J Recent Res Phys Chem Sci*. 2014;1(1):1-7.
- [11]. Mohammed NK, Mazunga MS. Natural Radioactivity in Soil and Water from Likuyu Village in the Neighborhood of Mkuju Uranium Deposit. *Int J Anal Chem*. 2013; 2013:501856. doi:10.1155/2013/501856.
- [12]. Ndontchueng MM, Simo A, Nguele EJ, Beyala JF, Kryeziu D. Preliminary study of natural radioactivity and radiological risk assessment in some mineral bottledwater produced in Cameroon. *Int J Sci Technol*. 2013 ;3(5):2224-3577. doi: 10.1016/j.jrras.2018.07.004.
- [13]. Panza, F. (2012). Développement de la spectrométrie gamma in situ pour la cartographie de site. Thèse de 3ecycle, Université de Strasbourg, p 23.
- [14]. Pradeep AS, Geremew H, Getachew B. Natural Radio Activity Levels in Water and Soil at Kemessie Hot Spring, North-Eastern Ethiopia. *Radiat Sci Technol*. 2016 ;2(1):1-5. doi: 10.11648/j.rst.20160201.11.
- [15]. Rajomamiandrisoa JR. Etude de la qualité des eaux de puits aux environs d'Ivato Antananarivo Antananarivo: Université d'Antananarivo; 2014.
- [16]. Rahman MM, Mondal A, Kabir MA, Asaduzzaman K. Assessment of Natural Radioactivity Levels and Radiological Significance of Bottled Drinking Water in Bangladesh. *Am J Phys Appl*. 2015;3(6):203-7. doi: 10.11648/j.ajpa.20150306.13.
- [17]. Council of the European Union. Directive 98/83/CE relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine. Brussels: The Council; 1998 Nov 3.
- [18]. Twesigye A, Darko EO, Faanu A, Schandorf C. Dose assessment to public due to exposure to natural radioactivity at the Bibiani gold mine, Ghana. *Radiat Prot Environ*. 2015 ;38(1-2):14-21.

- [19]. Yussuf NM, Hossain I, Wagiran H. Natural radioactivity in drinking and mineral water in Johor Bahru (Malaysia). Sci Res Essays. 2012;7(9):1070-5.
- [20]. Zarabe HH. Évaluation des niveaux de radionucléides naturels dans l'eau potable de Mandritsara (Madagascar): implications pour la sante publique [dissertation]. Madagascar; 2021.