

ORIGINAL ARTICLE

CARACTÉRISATION DE LA RADIOACTIVITÉ GAMMA DES EAUX THERMALES DE DEUX BASSINS DE MANGINDRANO, DISTRICT DE BEALANANA (MADAGASCAR)



CHARACTERIZATION OF GAMMA RADIOACTIVITY OF THERMAL WATERS FROM TWO BASINS OF MANGINDRANO, DISTRICT OF BEALANANA (MADAGASCAR)

| Milson BEMALAZA ^{1*} | Felix RANDRIA ² | Jean Rémi RANDRIANTSIVERY ³ | Martin RASOLONIRINA ⁴ | Frédéric ASIMANANA ⁵ |

^{1,2} Faculté des Sciences | Département de physique | Université d'Antsiranana | BP 0-201 Antsiranana | Madagascar |

³ Laboratoire de Physique Nucléaire | Université d'Antananarivo | Madagascar | Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) | Madagascar | Laboratoire Analyse et Technique Nucléaire (ATN) | Université d'Antananarivo | Madagascar |

| DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.17909360> | Received November 18, 2025 | Accepted December 03, 2025 | Published December 10, 2025 | ID Article | Milson-Ref7-5-21ajiras181125 |

RESUME

Contexte : Madagascar dispose d'importantes ressources en eau, qu'il s'agisse des précipitations, des eaux de surface (rivières et lacs) ou encore des eaux souterraines (puits et sources). Dans la Commune Rurale de Mangindrano, deux bassins d'eau thermale existent : l'un situé au nord du village et l'autre au sud. Ces eaux sont utilisées quotidiennement par la population, aussi bien pour la consommation que pour le bain, et sont considérées comme sacrées en raison de leurs vertus supposées de guérison. De ce fait, elles font l'objet de pratiques culturelles. Toutefois, les usagers ignorent souvent que ces sources peuvent contenir des éléments radioactifs naturels, tels que le potassium-40, le radium-226, le radium-228, l'uranium-234, l'uranium-238 ou encore le plomb-210, issus des chaînes de désintégration du thorium et de l'uranium. Ces radionucléides peuvent être présents à des concentrations élevées, soit en raison de phénomènes naturels, soit par des processus biologiques. **Objectif :** Cette étude vise à mesurer les niveaux de radioactivité naturelle contenus dans les eaux thermales de la commune rurale de Mangindrano. **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 :** Les activités mesurées dans les deux sites permettront d'évaluer les risques radiologiques liés à l'utilisation de ces eaux et de faciliter l'interprétation des résultats obtenus. Pour l'eau thermale située au nord du village, les activités varient de $(68 \pm 8 \text{ à } 88 \pm 9) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le potassium-40, de $(16 \pm 4 \text{ à } 35 \pm 5) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour la série de l'uranium-238 et de $(13 \pm 3 \text{ à } 29 \pm 5) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour la série du thorium-232. Pour l'eau thermale du sud, les activités mesurées s'étendent de $(54 \pm 7 \text{ à } 87 \pm 9) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le potassium-40, de $(10 \pm 3 \text{ à } 17 \pm 4) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour la série de l'uranium-238 et de $(19 \pm 4 \text{ à } 31 \pm 5) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour la série du thorium-232. **Conclusion :** Il a été observé que, dans les deux sites, la concentration en potassium-40 est supérieure à celle des séries de l'uranium-238 et du thorium-232. En comparant les deux sites, l'eau thermale du nord présente des activités plus élevées que celle du sud pour le potassium-40 et la série de l'uranium-238, tandis que les niveaux de thorium-232 restent comparables. Pour l'eau thermale du nord, les activités moyennes sont de $77,14 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour le potassium-40, $23,71 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour la série de l'uranium-238 et $23,29 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ pour la série du thorium-232. Pour l'eau thermale du sud, elles sont respectivement de $74,29 \pm 8 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$, $14,86 \pm 4 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ et $24 \pm 5 \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$.

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

ABSTRACT

Background: Madagascar has significant water resources, including rainfall, surface water (rivers and lakes), and groundwater (wells and springs). In the Rural Commune of Mangindrano, there are two thermal water pools: one located to the north of the village and the other to the south. These waters are used daily by the population, both for drinking and bathing, and are considered sacred due to their supposed healing properties. As a result, they are the subject of religious practices. However, users are often unaware that these springs may contain naturally occurring radioactive elements, such as potassium-40, radium-226, radium-228, uranium-234, uranium-238, and lead-210, resulting from the decay chains of thorium and uranium. These radionuclides can be present in high concentrations, either due to natural phenomena or through biological processes. **Objective:** This study aims to measure and analyze the levels of natural radioactivity contained in the thermal waters of the rural commune of Mangindrano. **Method:** The spectra were processed using the Rybach method. For this work, gamma spectrometry was performed at the laboratory of the Department of Nuclear Analysis and Techniques (ATN) of the National Institute of Nuclear Sciences and Techniques (INSTN)-Madagascar. **Material:** The analyses were carried out using gamma spectrometry chains equipped with NaI(Tl) detectors and Scinti-Vision software. Fourteen (14) samples were collected and measured using the ORTEC brand NaI(Tl) detector, providing reliable results. **Results:** The activities measured at the two sites will make it possible to assess the radiological risks associated with the use of these waters and facilitate the interpretation of the results obtained. For the thermal water located north of the village, the activities vary from $(68 \pm 8 \text{ to } 88 \pm 9) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ for potassium-40, from $(16 \pm 4 \text{ to } 35 \pm 5) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ for the uranium-238 series and from $(13 \pm 3 \text{ to } 29 \pm 5) \text{ Bq} \cdot \text{l}^{-1}$ for the thorium-232 series. For the southern thermal water,

the measured activities range from $(54 \pm 7 \text{ to } 87 \pm 9) \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ for potassium-40, from $(10 \pm 3 \text{ to } 17 \pm 4) \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ for the uranium-238 series and from $(19 \pm 4 \text{ to } 31 \pm 5) \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ for the thorium-232 series. **Conclusion:** It was observed that in both sites the potassium-40 concentration is higher than that of the uranium-238 and thorium-232 series. Comparing the two sites, the northern thermal water has higher activities than the southern one for potassium-40 and the uranium-238 series, while the thorium-232 levels remain comparable. For the northern thermal water, the average activities are $77.14 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ for potassium-40, $23.71 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ for the uranium-238 series and $23.29 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ for the thorium-232 series. For the southern thermal water, they are $74.29 \pm 8 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$, $14.86 \pm 3 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ and $24 \pm 4 \text{ Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ respectively.

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

1. INTRODUCTION

L'accès à une eau potable saine constitue un droit humain fondamental et un déterminant majeur de la santé publique à l'échelle mondiale. Selon l'Organisation Mondiale de la Santé, plus de 2 milliards de personnes utilisent des sources d'eau contaminées, exposant les populations vulnérables à des risques sanitaires multiples, dont certains demeurent insuffisamment caractérisés. Parmi ces risques émergents, l'exposition chronique aux radionucléides naturels présents dans l'eau de consommation retient de plus en plus l'attention de la communauté scientifique internationale, particulièrement dans les régions géologiquement riches en éléments radioactifs (Almayahi et al., 2012; Alseroury et al., 2018).

La radioactivité naturelle des eaux résulte principalement de la dissolution de minéraux uranifères et thorifères contenus dans les formations géologiques traversées par les nappes souterraines. Les radionucléides impliqués—notamment le potassium-40 (^{40}K), l'uranium-238 (^{238}U) et le thorium-232 (^{232}Th) ainsi que leurs descendants—peuvent s'accumuler à des concentrations préoccupantes dans certaines eaux, particulièrement les sources thermales qui, par leurs températures élevées, favorisent la dissolution accrue des minéraux radioactifs (Pradeep et al., 2016; El-Mageed et al., 2013). L'ingestion chronique d'eau contenant ces radionucléides peut conduire à une exposition interne significative, avec des risques potentiels à long terme pour la santé (Almayahi et al., 2012). Les eaux thermales occupent une place particulière dans cette problématique. Utilisées depuis des millénaires à des fins thérapeutiques dans de nombreuses cultures, elles font l'objet d'une exploitation intensive tant pour leurs propriétés médicinales supposées que pour la consommation domestique dans certaines régions. À Madagascar, archipel caractérisé par un socle cristallin précambrien riche en formations granitiques, plusieurs dizaines de sources thermales sont recensées à travers le territoire, notamment dans les régions d'Itasy, Vakinankaratra, Menabe, Sofia et Diana. Ces sources revêtent une importance culturelle et spirituelle majeure pour les communautés locales, qui leur attribuent des vertus curatives et les considèrent souvent comme sacrées. Toutefois, la caractérisation radiologique de ces eaux demeure largement incomplète, créant une lacune préoccupante entre usage traditionnel intensif et connaissance des risques potentiels.

Dans la région de Sofia, district de Bealanana, la Commune Rurale de Mangindrano abrite deux bassins d'eau thermale—l'un situé au nord du village, l'autre au sud—utilisés quotidiennement par la population locale pour la consommation, l'hygiène corporelle et des pratiques rituelles. Malgré cette utilisation généralisée, aucune étude radiologique de ces sources n'avait été conduite jusqu'à présent. Le contexte géologique de la région, dominé par des roches magmatiques et métamorphiques du socle précambrien potentiellement enrichies en uranium et thorium, suggère une probabilité élevée de concentrations substantielles en radionucléides naturels dans ces eaux thermales. Cette lacune dans les connaissances soulève des interrogations légitimes en matière de radioprotection et de santé publique. Quelle est l'ampleur réelle de la radioactivité naturelle dans ces eaux ? Les concentrations mesurées excèdent-elles les valeurs guides internationales établies par l'OMS (World Health Organization, 2011) ? Quels sont les mécanismes géochimiques responsables de ces concentrations ? Existe-t-il des variations spatiales significatives entre les différents bassins et au sein d'un même bassin ? Et surtout, quelles sont les implications pour les populations utilisatrices et quelles mesures de gestion peuvent être envisagées pour concilier exploitation traditionnelle et impératifs de radioprotection ?

Pour répondre à ces questions, nous avons conduit la première caractérisation radiologique détaillée des eaux thermales de Mangindrano, visant à : mesurer les activités spécifiques du ^{40}K , de ^{238}U et du ^{232}Th dans quatorze échantillons prélevés sur les deux bassins thermaux, comparer ces concentrations avec les données internationales disponibles et les valeurs guides de l'OMS, analyser les variations spatiales et identifier d'éventuelles corrélations entre radionucléides, et enfin évaluer les implications pour la santé publique et formuler des recommandations appropriées pour une gestion durable de cette ressource. Cette étude s'inscrit dans un effort plus large de cartographie de la radioactivité naturelle des ressources en eau à Madagascar, tout en contribuant à la base de connaissances mondiale sur les eaux thermales en contexte granitique tropical.

3. MATERIELS ET METHODES

3.1 zone d'étude

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'Ambatoriha-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.

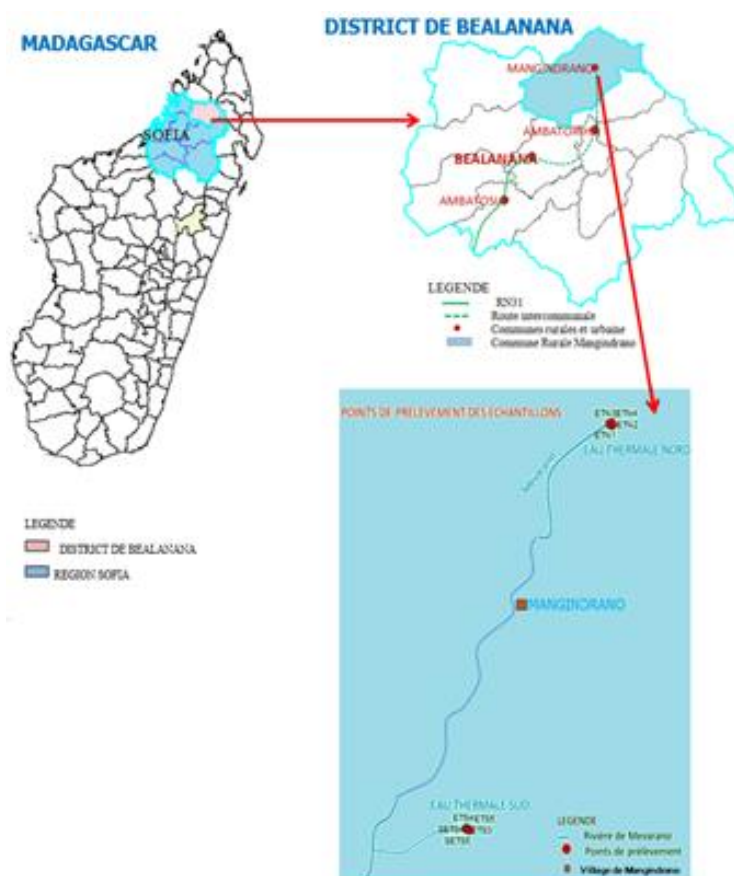


Figure 1 : Site de prélèvement des échantillons.

3.1 Echantillonnage

Les échantillons d'eau ont été collectés dans des bouteilles en plastique de 0,5 litre, soigneusement fermées et étiquetées 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 recueillis, dont sept (07) provenant de la source thermique nord et sept (07) de la source thermique sud. Avant les analyses, chaque échantillon a été transféré dans un porte-échantillon cylindrique en polyéthylène de 200 cm³, hermétiquement scellé. Les échantillons ont ensuite été conservés pendant trois semaines afin de permettre l'établissement de l'équilibre séculaire entre le ²²⁶Ra et ses descendants. Une fois cette étape achevée, ils ont été acheminés au laboratoire du Département d'Analyses et Techniques Nucléaires (ATN) de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) à Madagascar pour les analyses spectrométriques.

3.2. 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 d'eau. 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 disposés par le département Analyses et Techniques Nucléaires à l'INSTN-Madagascar [Alseroury et al., (2018)].

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	Minerai d'Uranium dilué avec de	Minerai de Thorium dilué avec de

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

3.3. 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 ScintiVision 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).

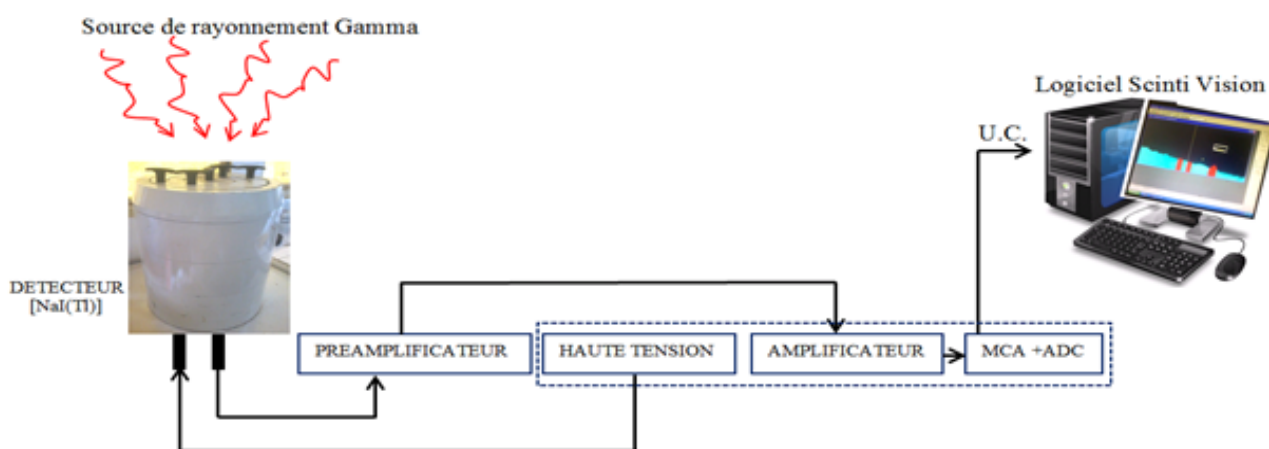


Figure 2 : Dispositif d'analyse au NaI(Tl) du laboratoire de l'INSTN-Madagascar (Felix R., 2025).

3. 4. Etalonnage de la chaîne de mesure

3.4.1. 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 moindre carrée.

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.

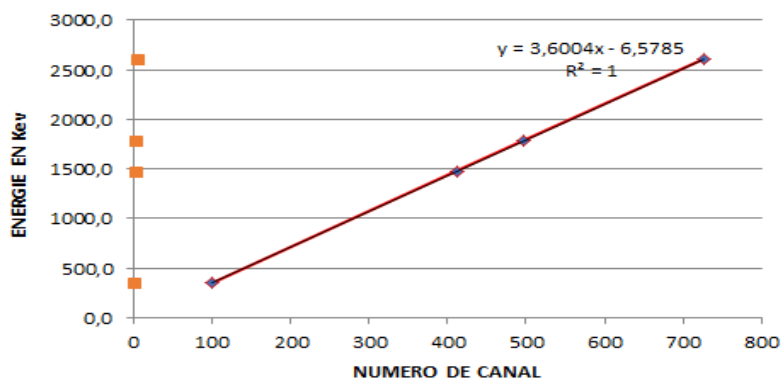


Figure 3 : Droite d'étalonnage obtenue à l'aide de Microsoft Excel pour le détecteur NaI(Tl).

3.4.2. 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 ⁴⁰K, 1764,5 keV pour le ²³⁸U (via le ²¹⁴Bi) et 2614,5 keV pour le ²³²Th (via le ²⁰⁸Tl), 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.

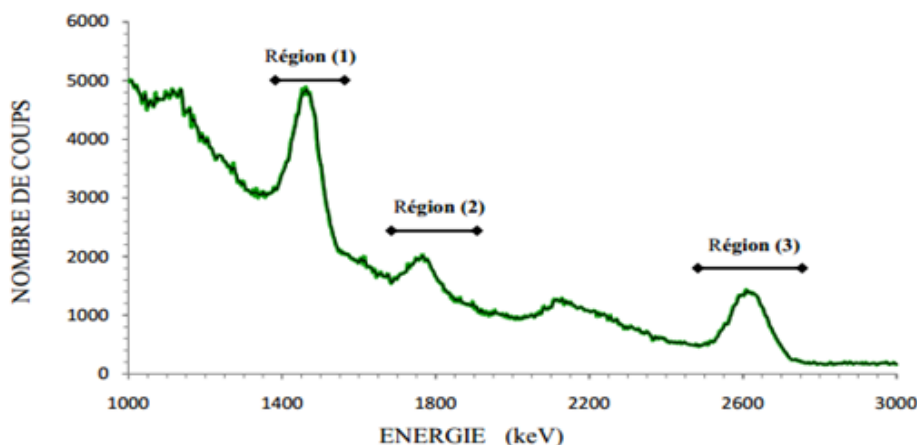


Figure 4 : Fenêtres d'énergie utilisées pour la détermination de l'activité du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232, d'après la description de Rybach (Alseroury et al., 2018).

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 (⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th) selon les équations (3) et (4) :

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

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

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 ($A_{k,j}$) (Felix R., 2025)

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 ($\varepsilon_{i,k}$) (Felix R., 2025).

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,

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

Pour l'étalon RGTh-1,

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

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

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 activités spécifiques

4.1. Activités des radionucléides naturels dans les étalons

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.

4.1.1. Déterminations des activités spécifiques de chaque radionucléide naturel de l'eau thermique

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 :

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

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

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

? Pour le Thorium-232

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

5. RESULTS

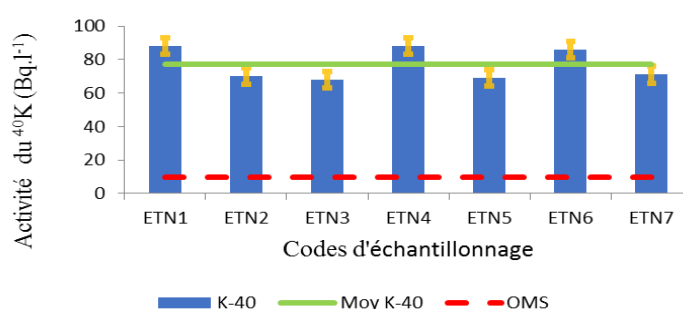
5.1. Résultat de mesure des activités spécifiques de l'eau thermale nord

Après prise en compte de ces paramètres dans l'analyse individuelle de chaque échantillon prélevé sur le terrain, les activités spécifiques du ^{40}K , de la série de l' ^{238}U et de la série du ^{232}Th sont présentées dans le Tableau 6. Les résultats obtenus pour l'eau thermale située au nord du village de Mangindrano y sont notamment détaillés.

Tableau 6 : Activité des échantillons d'eau thermique nord du village de Mangindrano pour les 7 points de prélèvements.

Codes	Activité spécifique (Bq. l ⁻¹)					
	⁴⁰ K	LD _K	²³⁸ U	LD _U	²³² Th	LD _{Th}
ETN1	88±9	16	25±5	5	21±4	13
ETN2	70±8	15	31±5	5	13±3	12
ETN3	68±8	15	19±4	5	28±5	13
ETN4	88±9	15	35±6	5	26±5	12
ETN5	69±8	15	20±4	5	29±5	13
ETN6	86±9	13	20±4	4	25±5	11
ETN7	71±8	15	16±4	5	21±4	13
Min	68±8		16±4		13±3	
Max	88±9		35±6		29±5	
Moy(±σ)	77,14 ± 8		23,71 ± 4		23,29 ± 4	

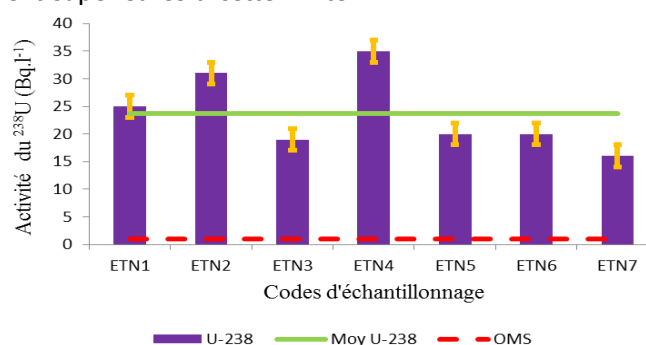
Min : Valeur minimale ; *Max* : Valeur maximale ; *Moy* : Valeur moyenne (±σ).

**Figure 5** : Variation des activités spécifiques du ⁴⁰K de l'eau thermique nord.

Les données du Tableau 6 sont représentées sous forme graphique dans les figures 5, 6 et 7, correspondant respectivement aux radionucléides ⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th. Les résultats obtenus permettent de dégager les constats suivants :

Les activités du ⁴⁰K varient entre (68 ± 8) Bq.l⁻¹ et (88 ± 9) Bq.l⁻¹, avec une valeur moyenne de (77,14 ± 8) Bq.l⁻¹. Aucune mesure d'activité du ⁴⁰K ne se situe en dessous de la limite de détection, comme le confirme le Tableau 6.

L'activité maximale enregistrée pour l'eau thermique nord correspond à la coordonnée géographique 14°14'47,53" S et 48°59'9,12" E, tandis que l'activité minimale a été relevée en 14°14'48,46" S et 48°59'9,29" E. Parmi les sept (07) échantillons analysés, trois (03) présentent une activité spécifique supérieure à la moyenne, tandis que quatre (04) se situent en dessous de celle-ci. En comparaison avec la valeur de référence fixée à 10 Bq.l⁻¹ par l'OMS, toutes les activités mesurées sont largement supérieures à cette limite.

**Figure 6** : Variation des activités spécifiques de la famille de l'²³⁸U de l'eau thermique nord.

Concernant la série de l'²³⁸U, les activités spécifiques s'échelonnent entre (16 ± 4) Bq.l⁻¹ et (35 ± 6) Bq.l⁻¹, avec une valeur moyenne de (23,71 ± 4) Bq.l⁻¹. Aucune mesure n'est inférieure à la limite de détection (voir tableau 6). L'activité maximale a été enregistrée pour l'échantillon codé ETN4, localisé aux coordonnées 14°14'47,53" S et 48°59'9,12" E, tandis que l'activité minimale, observée dans l'échantillon ETN7, a été relevée à des coordonnées situées à l'opposé, du nord vers le sud. Parmi les sept (07) échantillons analysés, trois (03) présentent une activité

supérieure à la moyenne, tandis que quatre (04) se situent en dessous. En comparaison avec la valeur de référence fixée par l'OMS à 1 Bq.l^{-1} , toutes les activités mesurées se révèlent très largement supérieures à cette limite.

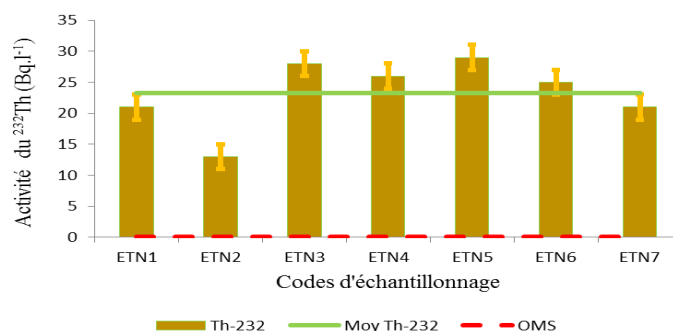


Figure 7 : Variation des activités spécifiques de la famille de ^{232}Th de l'eau thermique nord.

Pour la série du ^{232}Th , les activités spécifiques varient entre $(13 \pm 3) \text{ Bq.l}^{-1}$ et $(29 \pm 5) \text{ Bq.l}^{-1}$, avec une moyenne de $(23,29 \pm 4) \text{ Bq.l}^{-1}$. Toutes les valeurs obtenues sont supérieures à la limite de détection (voir tableau 6). L'activité maximale a été relevée dans l'échantillon ETN5, localisé aux coordonnées $14^{\circ}14'47,53'' \text{ S}$ et $48^{\circ}59'9,12'' \text{ E}$, tandis que l'activité minimale, correspondant à l'échantillon ETN2, a été mesurée en $14^{\circ}14'47,46'' \text{ S}$ et $48^{\circ}59'9,39'' \text{ E}$, situées de manière diamétralement opposée est-ouest. Sur les sept (07) échantillons analysés, quatre (04) présentent une activité spécifique supérieure à la moyenne, tandis que trois (03) se situent en dessous. En comparaison avec la valeur de référence fixée par l'OMS à $0,1 \text{ Bq.l}^{-1}$, l'ensemble des activités mesurées se révèle très largement supérieur à cette limite.

5.2. Résultat de mesure des activités spécifiques de l'eau thermique sud

Pour l'eau thermique au sud du village de Mangindrano, on a le résultat présenté dans le tableau 7 ci-après.

Tableau 7 : Activité des échantillons d'eau thermique sud du village de Mangindrano pour les 7 points de prélèvements.

Codes	Activité spécifique (Bq. l ⁻¹)					
	^{40}K	LD_K	^{238}U	LD_U	^{232}Th	LD_Th
ETS 1	60 ± 7	14	13 ± 3	4	22 ± 4	11
ETS 2	86 ± 9	13	14 ± 3	4	28 ± 5	11
ETS 3	87 ± 9	13	17 ± 4	4	31 ± 5	10
ETS 4	54 ± 7	15	10 ± 3	5	19 ± 4	12
ETS 5	79 ± 8	16	16 ± 4	5	21 ± 4	13
ETS 6	80 ± 8	13	17 ± 4	4	22 ± 4	10
ETS 7	74 ± 8	12	17 ± 4	4	25 ± 5	10
Min	54 ± 7		10 ± 3		19 ± 4	
Max	87 ± 9		17 ± 4		31 ± 5	
Moy($\pm\sigma$)	$74,29 \pm 8$		$14,86 \pm 3$		24 ± 4	

Min : Valeur minimale, *Max* : Valeur maximale, *Moy* : Valeur moyenne ($\pm\sigma$).

Les résultats du tableau 7 sont synthétisés sous forme de diagrammes dans les figures 8, 9 et 10, correspondant respectivement aux radionucléides potassium-40, uranium-238 et thorium-232.

Pour le radionucléide du potassium-40, son activité spécifique est présente dans la figure 8 ci-dessous.

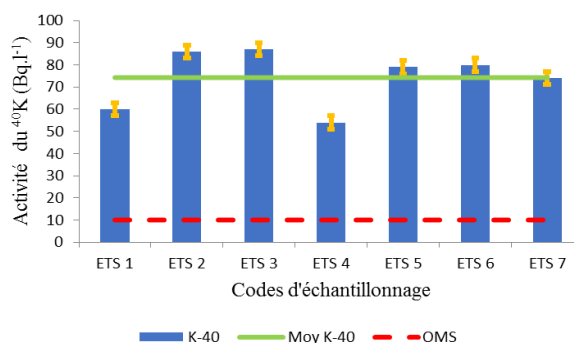


Figure 8 : Variation des activités spécifiques du ^{40}K de l'eau thermique sud.

Les activités spécifiques du ^{40}K varient entre $(54 \pm 7) \text{ Bq.l}^{-1}$ et $(87 \pm 9) \text{ Bq.l}^{-1}$, avec une valeur moyenne de $(74,29 \pm 8) \text{ Bq.l}^{-1}$. Aucune des mesures ne se situe en dessous de la limite de détection (voir tableau 7). L'activité maximale, correspondant à l'échantillon ETS3, a été enregistrée aux coordonnées $14^{\circ}18'26,23'' \text{ S}$ et $48^{\circ}57'34,55'' \text{ E}$, au fond du bassin, tandis que l'activité minimale, issue de l'échantillon ETS4, a été relevée au même emplacement mais à la surface de l'eau thermique. Parmi les sept (07) échantillons collectés, quatre (04) présentent une activité spécifique supérieure à la moyenne et trois (03) inférieures. En comparaison avec la valeur de référence de 10 Bq.l^{-1} prescrite par l'OMS, toutes les activités mesurées sont très largement supérieures à cette limite.

Pour le radionucléide de la famille de l'uranium-238, son activité spécifique est présentée dans la figure 9 ci-dessous.

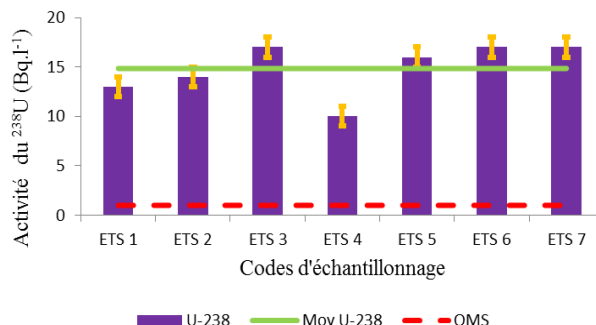


Figure 9 : Variation des activités spécifiques de la famille de l' ^{238}U de l'eau thermique sud.

Pour la série de ^{238}U , les activités spécifiques s'échelonnent entre $(10 \pm 3) \text{ Bq.l}^{-1}$ et $(17 \pm 4) \text{ Bq.l}^{-1}$, avec une moyenne de $(14,86 \pm 3) \text{ Bq.l}^{-1}$. Aucune valeur n'est inférieure à la limite de détection (voir tableau 7). L'activité maximale a été enregistrée pour l'échantillon ETS3, prélevé au fond du bassin ($14^{\circ}18'26,23'' \text{ S}$; $48^{\circ}57'34,55'' \text{ E}$), tandis que l'activité minimale a été observée pour l'échantillon ETS4, collecté à la surface de l'eau thermique ($14^{\circ}18'26,18'' \text{ S}$; $48^{\circ}57'34,50'' \text{ E}$). Sur les sept (07) échantillons analysés, quatre (04) présentent une activité spécifique supérieure à la valeur moyenne, contre trois (03) inférieures.

Pour le radionucléide de la famille du thorium-232, son activité spécifique est présentée dans la figure 10 ci-dessous.

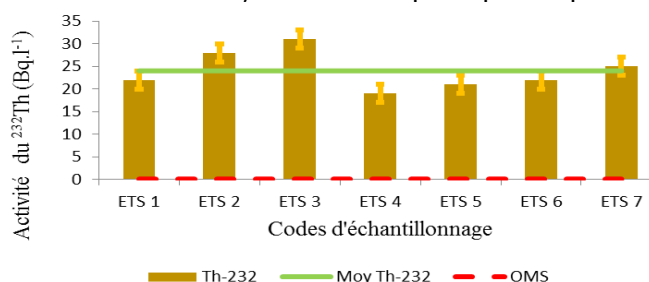


Figure 10 : Variation des activités spécifiques de la famille de ^{232}Th de l'eau thermique sud.

Concernant la famille du ^{232}Th , les activités spécifiques comprise entre $(19 \pm 4) \text{ Bq.l}^{-1}$ et $(31 \pm 5) \text{ Bq.l}^{-1}$ avec une valeur moyenne de $(24 \pm 4) \text{ Bq.l}^{-1}$.

Aucune des activités n'est inférieure à la limite de détection (voir tableau 7). Pour la série du ^{232}Th , les activités spécifiques varient entre $(19 \pm 4) \text{ Bq.l}^{-1}$ et $(31 \pm 5) \text{ Bq.l}^{-1}$, avec une valeur moyenne de $(24 \pm 4) \text{ Bq.l}^{-1}$. Aucune mesure n'est inférieure à la limite de détection (voir Tableau 7). L'activité maximale a été enregistrée pour l'échantillon ETS3, prélevé au fond du bassin ($14^{\circ}18'26,23'' \text{ S}$; $48^{\circ}57'34,55'' \text{ E}$), tandis que la valeur minimale correspond à l'échantillon ETS4, collecté en surface ($14^{\circ}18'26,18'' \text{ S}$; $48^{\circ}57'34,50'' \text{ E}$). Parmi les sept (07) échantillons analysés, quatre (04) présentent une activité spécifique supérieure à la moyenne.

Les résultats confirment la présence du ^{40}K ainsi que des radionucléides issus des séries de ^{238}U et du ^{232}Th dans l'ensemble des échantillons étudiés. En termes de concentration, le ^{40}K présente les niveaux d'activité les plus élevés, suivi des radionucléides de la série du ^{232}Th , puis de ceux de la série de ^{238}U . Il apparaît également que la répartition de ces radionucléides varie en fonction des points d'échantillonnage, ce qui peut être attribué aux différences géologiques et géographiques des zones étudiées.

La comparaison entre les deux bassins révèle que :

- Les activités spécifiques moyennes du ^{40}K et de la série de ^{238}U sont plus élevées dans l'eau thermique nord que dans l'eau thermique sud ;
- En revanche, les activités spécifiques de la série du ^{232}Th sont supérieures dans l'eau thermique sud.

Pour ce dernier bassin, il est en outre observé que les activités augmentent avec la profondeur, de la surface vers le fond. Dans tous les cas, les activités mesurées dépassent les seuils de référence établis par l'OMS, soit 10 Bq.l⁻¹ pour le ⁴⁰K, 1 Bq.l⁻¹ pour l'²³⁸U et 0,1 Bq.l⁻¹ pour le ²³²Th. L'échantillon ETS3, prélevé au fond du bassin (14°18'26,23" S ; 48°57'34,55" E), présente l'activité spécifique maximale, tandis que l'échantillon ETS4, collecté en surface au même point géographique (14°18'26,18" S ; 48°57'34,50" E), affiche la valeur minimale. Sur les sept (07) échantillons étudiés, quatre (04) présentent une activité spécifique supérieure à la moyenne de (24 ± 4) Bq.l⁻¹.

Les analyses confirment la présence du ⁴⁰K ainsi que des radionucléides des séries de l'²³⁸U et du ²³²Th dans l'ensemble des échantillons. En termes de concentration, le ⁴⁰K demeure le radionucléide dominant, suivi par ceux de la série du ²³²Th, puis de l'²³⁸U. La distribution de ces radionucléides varie toutefois en fonction des points d'échantillonnage, ce qui peut être relié aux différences géologiques et géographiques propres aux sites étudiés.

La comparaison entre les eaux thermales nord et sud met en évidence que :

- Les activités spécifiques moyennes du ⁴⁰K et de l'²³⁸U sont plus élevées dans l'eau thermique nord ;
- En revanche, la série du ²³²Th est plus concentrée dans l'eau thermique sud.

Pour cette dernière, il est en outre observé que l'activité radioactive augmente avec la profondeur, de la surface vers le fond. Dans tous les cas, les niveaux mesurés pour les trois radionucléides excèdent largement les valeurs guides de l'OMS, fixées à 10 Bq.l⁻¹ pour le ⁴⁰K, 1 Bq.l⁻¹ pour l'²³⁸U et 0,1 Bq.l⁻¹ pour le ²³²Th.

5.3. Corrélation entre les activités spécifiques des radionucléides trouvées dans l'eau thermique nord

Les corrélations entre les concentrations des trois radionucléides dans les eaux thermales du nord et du sud du village de Mangindrano sont présentées dans les figures 11, 12 et 13. Ces relations ont été examinées au moyen d'analyses de régression linéaire.

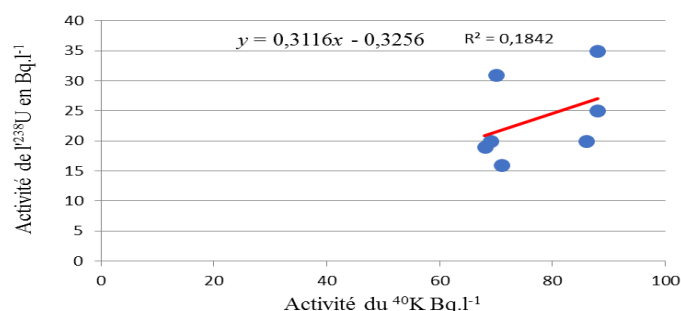


Figure 11 : Corrélation entre les activités spécifiques de l'²³⁸U et du ⁴⁰K.

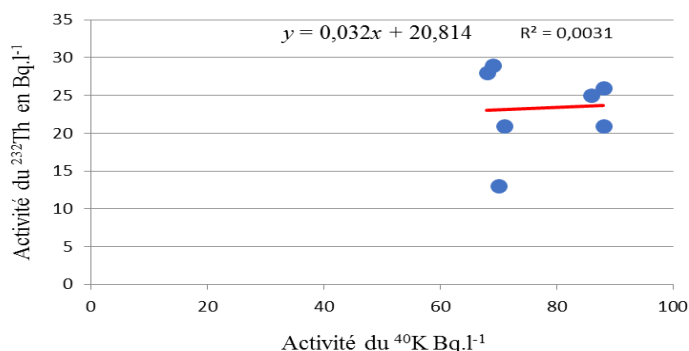


Figure 12 : Corrélation entre les activités du ⁴⁰K celles de la famille du ²³²Th.

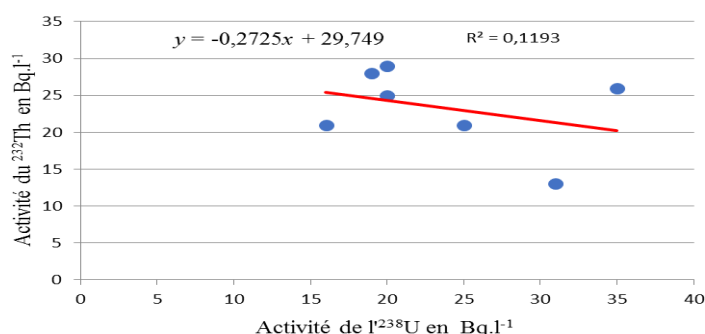


Figure 13 : Corrélation entre les activités spécifiques de la famille de l'²³⁸U et celle du ²³²Th.

Les régressions linéaires établies entre les couples de radionucléides $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$, $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ donnent des coefficients de détermination (R^2) respectifs de 0,1842, 0,0031 et 0,1193 (voir Figures 11, 12 et 13). Ces faibles valeurs traduisent l'absence de corrélations significatives entre ces radionucléides dans l'eau thermale nord du village de Mangindrano. La forte dispersion observée des points illustre une variabilité marquée des concentrations, suggérant que chaque radionucléide suit une dynamique propre. Ainsi, la distribution du ^{40}K , de ^{238}U et du ^{232}Th semble principalement gouvernée par des facteurs géochimiques indépendants liés aux particularités du milieu local.

5.4. Corrélation entre les activités spécifiques des radionucléides trouvées dans l'eau thermale sud

Les corrélations entre les concentrations des trois radionucléides dans les eaux thermales nord et sud du village de Mangindrano sont présentées dans les figures 14, 15 et 16. Ces relations ont été examinées au moyen d'analyses de régression linéaire.

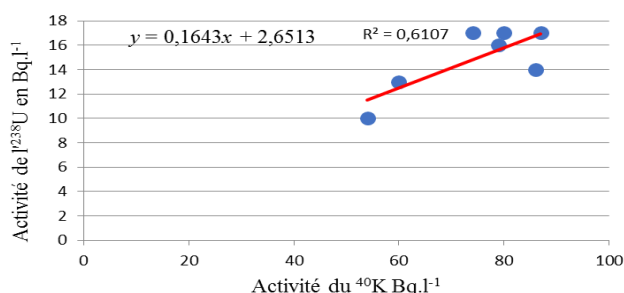


Figure 14 : Corrélation entre les activités spécifiques de ^{238}U et du ^{40}K .

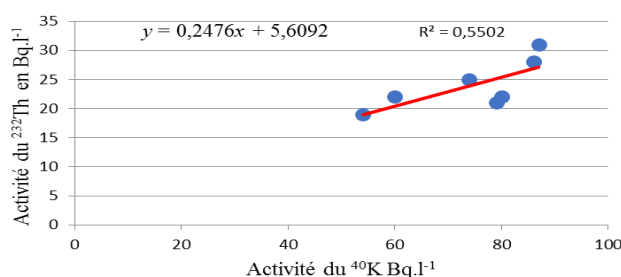


Figure 15 : Corrélation entre les activités du ^{40}K celles de la famille du ^{232}Th .

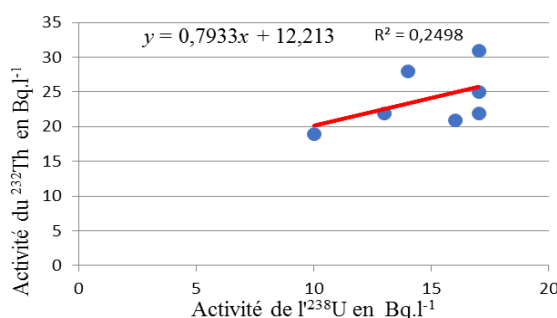


Figure 16 : Corrélation entre les activités spécifiques de la famille de ^{238}U et celle du ^{232}Th .

Les régressions linéaires établies entre les couples de radionucléides $^{40}\text{K}/^{238}\text{U}$, $^{40}\text{K}/^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}/^{232}\text{Th}$ donnent des coefficients de détermination (R^2) respectifs de 0,6107, 0,5502 et 0,2498 (voir Figures 14, 15 et 16).

Ces résultats indiquent des corrélations modérées pour les couples impliquant le ^{40}K et plus faibles pour celui reliant ^{238}U et le ^{232}Th . La dispersion notable des points témoigne néanmoins d'une variabilité significative des concentrations, traduisant une relative indépendance entre ces radionucléides. Globalement, la distribution des activités semble principalement conditionnée par des facteurs géochimiques spécifiques à chaque élément plutôt que par une origine commune.

5.5. Comparaison des activités spécifiques avec les données internationales

Le Tableau 8 présente une synthèse comparative des activités spécifiques mesurées dans cette étude avec celles rapportées dans la littérature scientifique pour différents types d'eaux à l'échelle mondiale. Pour les eaux thermales de Mangindrano, les activités moyennes du site nord s'établissent à 77,14 Bq.l⁻¹ pour le ^{40}K (fourchette : 68-88

Bq·l⁻¹), 23,71 Bq·l⁻¹ pour l'²³⁸U (fourchette : 16-35 Bq·l⁻¹) et 23,29 Bq·l⁻¹ pour le ²³²Th (fourchette : 13-29 Bq·l⁻¹). Pour le site sud, les valeurs moyennes sont respectivement de 74,29 Bq·l⁻¹ (fourchette : 54-87 Bq·l⁻¹), 14,86 Bq·l⁻¹ (fourchette : 10-17 Bq·l⁻¹) et 24 Bq·l⁻¹ (fourchette : 19-31 Bq·l⁻¹). Les données comparatives montrent que les activités du ⁴⁰K mesurées à Mangindrano dépassent celles rapportées pour les eaux de robinet malgaches (4,5 Bq·l⁻¹), les eaux de puits et rivières de Madagascar (17,9 Bq·l⁻¹), les eaux thermales éthiopiennes (17,7 Bq·l⁻¹), les eaux en bouteille du Bangladesh (18,3 Bq·l⁻¹), les eaux d'irrigation yéménites (18,3 Bq·l⁻¹), et les eaux de rivière ghanéennes (3,1 Bq·l⁻¹). En revanche, elles demeurent inférieures aux valeurs maximales relevées dans certaines eaux de boisson irakiennes (129,9 Bq·l⁻¹) et sont comparables à celles de l'eau de robinet de Mandritsara, Madagascar (63 Bq·l⁻¹).

Concernant l'²³⁸U, les activités mesurées à Mangindrano sont supérieures à celles documentées pour les eaux lacustres malgaches (3,8 Bq·l⁻¹), les eaux thermales éthiopiennes (2,3 Bq·l⁻¹), les eaux d'irrigation yéménites (1,44 Bq·l⁻¹), les eaux souterraines égyptiennes (0,20 Bq·l⁻¹) et saoudiennes (0,6 Bq·l⁻¹), les eaux minérales camerounaises (0,02 Bq·l⁻¹) et malaisiennes (0,03 Bq·l⁻¹), ainsi que les eaux de surface ghanéennes (0,2 Bq·l⁻¹) et tanzaniennes (2,4 Bq·l⁻¹). Elles se situent également au-dessus des valeurs rapportées pour les eaux de boisson irakiennes (12,9 Bq·l⁻¹) et les eaux de puits malgaches (9,2 Bq·l⁻¹), mais restent inférieures aux concentrations mesurées dans l'eau de robinet de Mandritsara (23 Bq·l⁻¹).

Pour le ²³²Th, les activités observées à Mangindrano excèdent celles rapportées pour l'ensemble des autres sources citées dans la littérature : eaux de puits malgaches (13,0 Bq·l⁻¹), eaux en bouteille du Bangladesh (6,4 Bq·l⁻¹), eaux de boisson irakiennes (6,0 Bq·l⁻¹), eaux de rivière tanzaniennes (1,9 Bq·l⁻¹), eaux thermales éthiopiennes (1,7 Bq·l⁻¹), eaux d'irrigation yéménites (1,20 Bq·l⁻¹), eaux lacustres malgaches (0,8 Bq·l⁻¹), eaux de rivière ghanéennes (0,38 Bq·l⁻¹), eaux souterraines saoudiennes (0,2 Bq·l⁻¹) et égyptiennes (0,13 Bq·l⁻¹), eaux minérales malaisiennes (0,07 Bq·l⁻¹) et camerounaises (0,04 Bq·l⁻¹). Seule l'eau de robinet de Mandritsara, Madagascar, présente des valeurs supérieures (39 Bq·l⁻¹) à celles mesurées dans les eaux thermales de Mangindrano.

Tableau 8 : Extraits des activités spécifiques dans l'eau au niveau mondial.

Pays	Type d'eau	Activités spécifiques [min – max] (Bq.l ⁻¹)		
		⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th
	Thermale nord	77,14 [68 – 88]	23,71 [16- 35]	23,29 [13 - 29]
Madagascar	Thermale sud	74,29 [54 – 87]	14,86 [10 - 17]	24 [19 - 31]
Madagascar	Robinet	4,5 [2,2 - 9,7]	3,4 [1,2 - 9,0]	0,6 [0,3 - 1,0]
Madagascar	Puits/rivière	17,9 [6,9 - 36,2]	9,2 [0,6 - 19,5]	13,0 [3,4 - 17,7]
Ethiopie	Thermale	17,7[10,6 - 24,3]	2,3 [1,2 - 3,9]	1,7 [0,7 - 2,7]
Bangladesh	Bouteille	18,3 [10,9- 32,2]	3,3 [1,9 - 5,0]	6,4 [1,4 - 9,7]
Ghana	Rivière	3,1 [2,8 - 3,1]	0,2 [0,1 - 0,3]	0,38 [0,3 - 0,4]
Yémen	Irrigation	18,3 [7,9 - 26,0]	1,44 [0,2 - 2,7]	1,20 [0,1 - 3,1]
Malaisie	Minérale	1,3 [0,1 - 1,4]	0,03 [0 - 0,09]	0,07 [0,02 - 0,1]
Egypte	Puits	5,3 [2,8 - 8,7]	0,20 [0,1 - 0,5]	0,13 [0,1 - 0,5]
Madagascar	Lac	10,2 [6,5 - 19,8]	3,8 [1,7 - 5,2]	0,8 [0,6 - 1,3]
Cameroun	Minérale	0,1 [0 - 0,2]	0,02 [0,01 - 0,04]	0,04 [0,01 - 0,12]
Arabie saoudite	Souterraine	4,6 [1,5 - 8,9]	0,6 [0,1 - 1,6]	0,2 [0,5 - 0,7]
Irak	Boisson	129,9[6,4-253,9]	12,9 [1,4 - 55,8]	6,0 [2,2 - 9,7]
Tanzanie	Rivière	10,1 [9,2 - 11,2]	2,4 [2,2 - 2,5]	1,9 [1,8 - 1,9]
Madagascar	Robinet	63 [51 - 70]	23 [11 - 33]	39 [21 - 46]

6. DISCUSSION

6.1. Principaux résultats et implications

Cette étude représente la première caractérisation détaillée de la radioactivité naturelle des eaux thermales de Mangindrano, district de Bealanana, à Madagascar. Nos résultats révèlent la présence systématique de trois radionucléides naturels (⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th) dans tous les échantillons analysés, avec des activités spécifiques moyennes substantiellement supérieures aux valeurs guides de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) : 10 Bq·l⁻¹ pour le ⁴⁰K, 1 Bq·l⁻¹ pour l'²³⁸U et 0,1 Bq·l⁻¹ pour le ²³²Th (World Health Organization, 2011). L'ordre de prédominance observé (⁴⁰K > ²³²Th ≈ ²³⁸U) dans les deux sites étudiés est cohérent avec les caractéristiques géochimiques typiques des eaux thermales issues de contextes granitiques. Le potassium-40, radionucléide primordial présent naturellement dans la croûte terrestre avec une demi-vie de 1,25 × 10⁹ ans, constitue environ 0,012% du potassium total et demeure le contributeur majeur à la radioactivité naturelle des eaux (Almayahi et al., 2012). Sa forte mobilité en milieu aqueux et sa solubilité élevée expliquent les concentrations importantes mesurées dans nos échantillons.

6.2. Contexte géologique et mécanismes d'enrichissement radiologique

La région de Sofia, où se situe Mangindrano, présente une géologie dominée par des formations du socle cristallin précambrien, caractérisées par des roches magmatiques et métamorphiques riches en uranium et thorium. Ces formations géologiques constituent le principal réservoir des radionucléides naturels retrouvés dans les eaux thermales étudiées. Les températures élevées de ces eaux (généralement supérieures à 40°C) favorisent la dissolution accrue des minéraux radioactifs présents dans les roches encaissantes, un phénomène bien documenté dans la littérature scientifique (El-Mageed et al., 2013).

Le gradient vertical observé dans le site sud, où les activités augmentent avec la profondeur, suggère une stratification thermique et chimique du bassin. Ce phénomène peut résulter de plusieurs processus : (1) la convection thermique ascendante apportant des eaux plus chargées en radionucléides depuis les profondeurs géologiques, (2) la décantation gravitaire des particules en suspension porteuses de radionucléides, et (3) l'évaporation préférentielle en surface conduisant à une dilution relative des concentrations (Pradeep et al., 2016). L'absence de corrélations significatives entre les radionucléides dans le site nord ($R^2 < 0,20$) contraste avec les corrélations modérées observées dans le site sud ($R^2 = 0,55-0,61$ pour les couples impliquant le ^{40}K). Cette différence suggère des dynamiques géochimiques distinctes entre les deux sites. Dans le site nord, chaque radionucléide semble suivre une cinétique de dissolution et de transport indépendante, probablement influencée par la diversité lithologique locale et les variations de pH, température et conditions redox. En revanche, dans le site sud, les corrélations modérées suggèrent une origine géologique partiellement commune ou des processus de mobilisation couplés (Mohammed & Mazunga, 2013).

6.3. Comparaison avec les eaux thermales internationales

Nos résultats s'inscrivent dans la fourchette haute des concentrations rapportées dans la littérature scientifique internationale pour les eaux thermales. Le Tableau 8 présente une synthèse comparative exhaustive avec différents types d'eaux à l'échelle mondiale. Pour le ^{40}K , les activités moyennes mesurées à Mangindrano (77,14 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le nord et 74,29 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le sud) sont nettement supérieures à celles rapportées dans les eaux thermales d'Éthiopie (17,7 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$) par Pradeep et al. (2016), mais restent inférieures aux valeurs maximales observées dans certaines eaux de boisson en Irak (129,9 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$). Cette variabilité inter-régionale reflète principalement les différences de contextes géologiques et de temps de résidence souterrain des eaux.

Concernant la série de ^{238}U , nos résultats (23,71 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le nord et 14,86 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le sud) dépassent significativement les concentrations mesurées dans les eaux thermales éthiopiennes (2,3 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$), les eaux d'irrigation yéménites (1,44 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$), et les eaux souterraines égyptiennes (0,20 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$) et saoudiennes (0,6 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$) (El-Gamal & El-Mageed, 2014). Cette forte concentration en uranium peut s'expliquer par la présence probable de minéralisations uranifères dans le socle cristallin de la région, hypothèse qui mériterait d'être confirmée par des investigations géologiques complémentaires. Pour la série du ^{232}Th , les activités mesurées (23,29 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le nord et 24 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le sud) sont remarquablement élevées comparativement aux données publiées : 1,7 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ en Éthiopie, 1,20 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ au Yémen, 0,13 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ en Égypte (Harb et al., 2014). Le thorium, généralement considéré comme peu mobile en raison de sa faible solubilité, peut néanmoins être transporté sous forme colloïdale ou complexé avec des ligands organiques dans les eaux thermales riches en matière organique dissoute.

Il est particulièrement intéressant de noter que nos valeurs sont également supérieures à celles rapportées dans d'autres eaux malgaches : eaux de robinet d'Antsiranana (4,5 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le ^{40}K , 3,4 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le ^{238}U), eaux de puits et rivières (17,9 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le ^{40}K), et eaux lacustres (10,2 $\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$ pour le ^{40}K). Cette observation suggère une spécificité géochimique de la région de Mangindrano, probablement liée à un enrichissement naturel du substratum rocheux en éléments radioactifs.

6.4. Implications pour la santé publique et gestion des risques

L'utilisation quotidienne de ces eaux thermales par la population locale, tant pour la consommation que pour l'hygiène, soulève des préoccupations légitimes en matière de radioprotection. L'ingestion chronique d'eau contenant des radionucléides naturels peut conduire à une exposition interne par incorporation, avec des effets potentiels à long terme sur la santé (Almayahi et al., 2012). La dose efficace annuelle due à l'ingestion d'eau peut être estimée selon la formule recommandée par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) : $D = A \times C \times \text{DCF}$, où A représente l'activité volumique ($\text{Bq}\cdot\text{l}^{-1}$), C la consommation annuelle d'eau (typiquement 730 $\text{l}\cdot\text{an}^{-1}$ pour un adulte), et DCF le coefficient de dose ($\text{Sv}\cdot\text{Bq}^{-1}$). En considérant les coefficients de dose recommandés par la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR), les doses efficaces résultant de l'ingestion chronique de ces eaux thermales pourraient dépasser la dose de référence de 0,1 $\text{mSv}\cdot\text{an}^{-1}$ établie par l'OMS pour les radionucléides dans l'eau de boisson (World Health Organization, 2011).

Cependant, il convient de noter que la présence de radioactivité naturelle dans les eaux thermales n'est pas systématiquement synonyme de danger immédiat. Le risque réel dépend de plusieurs facteurs : la durée et la fréquence d'exposition, les volumes d'eau consommés, les voies d'exposition (ingestion, inhalation de radon émané,

contact cutané), et la sensibilité individuelle des populations exposées. Des études dosimétriques complémentaires, incluant des mesures de radon dans l'air ambiant des bassins et une évaluation de l'exposition externe par rayonnement gamma, seraient nécessaires pour quantifier précisément le risque radiologique global.

6.5. Recommandations et perspectives

Face à ces résultats, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

- Premièrement, une campagne de sensibilisation des populations locales s'impose pour les informer sur la nature et l'origine de la radioactivité mesurée dans ces eaux. Cette démarche doit éviter l'alarmisme tout en favorisant une utilisation plus raisonnée de cette ressource.
- Deuxièmement, la mise en œuvre de procédés de traitement adaptés pourrait permettre de réduire les concentrations en radionucléides. Plusieurs technologies ont démontré leur efficacité : l'osmose inverse (taux de rétention > 95% pour l'uranium), l'échange d'ions (efficace pour le radium et l'uranium), l'adsorption sur hydroxyde ferrique (pour l'uranium et le thorium), ou encore l'aération forcée couplée à la filtration (pour l'élimination du radon et de ses descendants) (Alseroury et al., 2018). Le choix de la technologie devrait être guidé par une analyse coût-bénéfice tenant compte du contexte socio-économique local.
- Troisièmement, une surveillance radiologique régulière de ces sources thermales devrait être instituée, idéalement avec une fréquence semestrielle ou annuelle, afin de détecter d'éventuelles variations temporelles des concentrations qui pourraient résulter de modifications hydrogéologiques (saisons, précipitations, activité sismique).

Du point de vue scientifique, plusieurs axes de recherche mériteraient d'être approfondis :

- une caractérisation isotopique complète incluant le radon-222, le radium-226 et le radium-228 pour mieux comprendre les processus de dissolution et de transport,
- une étude hydrogéologique détaillée pour identifier les aquifères sources et les circulations souterraines,
- une investigation géochimique des roches encaissantes pour cartographier les zones d'enrichissement en radionucléides,
- une étude épidémiologique prospective sur les populations utilisatrices pour évaluer d'éventuels effets sanitaires à long terme. Enfin, il serait pertinent d'étendre cette caractérisation radiologique à l'ensemble des sources thermales malgaches, notamment celles des régions d'Itasy, Vakinankaratra, Menabe et Diana mentionnées dans l'introduction. Une telle cartographie nationale permettrait d'identifier les sites prioritaires nécessitant des mesures de gestion et contribuerait à une meilleure compréhension de la distribution spatiale de la radioactivité naturelle dans le contexte géologique malgache.

6.6. Forces et limites de l'étude

Cette étude présente plusieurs forces méthodologiques : l'utilisation d'un détecteur NaI(Tl) calibré avec des matériaux de référence certifiés (RGK-1, RGU-1, RGTh-1), l'application rigoureuse de la méthode de Rybach éprouvée pour l'analyse spectrométrique gamma, et l'échantillonnage spatial systématique couvrant deux bassins distincts avec plusieurs points de prélèvement. Néanmoins, certaines limites doivent être reconnues. Premièrement, l'échantillonnage a été réalisé à un instant donné (septembre-octobre 2021), ne permettant pas d'évaluer les variations temporelles potentielles liées aux saisons ou aux fluctuations hydrogéologiques. Deuxièmement, bien que la méthode de Rybach soit largement utilisée, elle repose sur des hypothèses d'équilibre séculaire qui peuvent ne pas être systématiquement respectées dans tous les environnements aqueux. Troisièmement, notre étude s'est concentrée sur la spectrométrie gamma, sans mesure directe du radon-222 dissous, qui peut constituer un contributeur important à l'exposition radiologique, particulièrement lors de l'utilisation des bassins en espaces confinés.

6.7. Conclusion de la discussion

En conclusion, cette étude démontre que les eaux thermales de Mangindrano présentent des niveaux de radioactivité naturelle significativement élevés, excédant les valeurs guides internationales et se situant dans la fourchette haute des concentrations rapportées mondialement pour ce type de ressource. L'origine de cette radioactivité est clairement géogénique, liée au contexte géologique particulier du socle cristallin de la région de Sofia. Si le caractère naturel de cette radioactivité doit être souligné, l'utilisation quotidienne de ces eaux par la population locale justifie néanmoins la mise en place d'une gestion raisonnée visant à concilier l'exploitation traditionnelle de cette ressource à valeur culturelle et spirituelle avec les impératifs de radioprotection. La dimension sacrée attribuée à ces sources thermales, ancrée dans les pratiques culturelles locales, devra être respectée dans toute démarche d'intervention, privilégiant une approche participative associant les communautés locales aux décisions de gestion. Cette recherche ouvre la voie à des investigations complémentaires, tant sur le plan fondamental (compréhension des processus géochimiques) qu'appliqué (évaluation dosimétrique précise et développement de solutions de traitement adaptées au contexte local). Elle souligne également l'importance d'une surveillance environnementale systématique des ressources en eau

dans les régions géologiquement riches en éléments radioactifs naturels, particulièrement dans les pays en développement où ces enjeux demeurent souvent méconnus.

6. CONCLUSION

Les campagnes de prélèvement ont été effectuées en septembre et octobre 2021, aboutissant à la collecte de quatorze (14) échantillons d'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.

Les analyses mettent en évidence la présence du potassium-40 ainsi que des radionucléides appartenant aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans l'ensemble des échantillons étudiés. 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.

Les activités spécifiques du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232 varient selon les sites d'échantillonnage. Dans l'eau thermale nord, elles s'étendent respectivement de (68 ± 8) à (88 ± 9) Bq·l⁻¹ pour le ⁴⁰K, de (16 ± 4) à (35 ± 5) Bq·l⁻¹ pour la famille de l'²³⁸U et de (13 ± 3) à (29 ± 5) Bq·l⁻¹ pour celle du ²³²Th, avec des moyennes de $(77,14 \pm 8)$, $(23,71 \pm 4)$ et $(23,29 \pm 4)$ Bq·l⁻¹ respectivement. Dans l'eau thermale sud, les valeurs varient de (54 ± 7) à (87 ± 9) Bq·l⁻¹ pour le ⁴⁰K, de (10 ± 3) à (17 ± 4) Bq·l⁻¹ pour la famille de l'²³⁸U et de (19 ± 4) à (31 ± 5) Bq·l⁻¹ pour celle du ²³²Th, avec des moyennes respectives de $(74,29 \pm 8)$, $(14,86 \pm 3)$ et (24 ± 4) Bq·l⁻¹.

Dans l'ensemble, les moyennes d'activités spécifiques obtenues pour ces trois radionucléides dépassent les seuils de référence de l'OMS, ce qui suggère un risque potentiel d'exposition radiologique interne pour les usagers de ces eaux thermales. En conclusion, afin de garantir une utilisation durable des eaux thermales comme source de consommation, il est nécessaire de mettre en place des mesures correctives visant à assurer une qualité radiologique conforme aux normes sanitaires. Des procédés tels que la filtration ou d'autres techniques de traitement pourraient contribuer à réduire les niveaux d'activité des trois radionucléides naturels identifiés. Il est ainsi recommandé aux populations utilisatrices de recourir à des méthodes de purification adaptées avant toute consommation. Parallèlement, une gestion intégrée et durable des ressources en eau thermale s'impose pour répondre aux besoins de la population. Enfin, dans une perspective de recherche, il serait pertinent d'élargir cette étude à d'autres sources thermales afin de comparer les niveaux de radioactivité naturelle et d'évaluer leurs impacts potentiels sur la santé publique.

7. REFERENCE

- Almayahi, B., Tajuddin, A., & Jaafar, M. (2012). Radiation hazard indices of soil and water samples in Northern Malaysian Peninsula. *Applied Radiation and Isotopes*, 70(11), 2652-2660. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.07.021>
- Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water. *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11, 373-378.
- El-Gamal, H., & El-Mageed, A. I. A. (2014). Natural radioactivity in water samples from Assiut City, Egypt. *International Journal of Pure and Applied Sciences and Technology*, 22(1), 44-52.
- El-Mageed, A. I. A., El-Gamal, A. E. H., Abbacy, A. E. B., Herb, S., & Sale, I. I. (2013). Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen. *Desalination*, 321, 28-31. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.11.022>
- Gunduz, O., & Akin, M. (2012). Chemical and microbiological quality of thermal waters in Turkey. *Environmental Earth Sciences*, 67(8), 2375-2384. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1681-0>
- Harb, S., El-Kamel, A. H., Zahran, A. M., Abbady, A., & Ahmed, F. A. (2014). Assessment of natural radioactivity in soil and water samples from Aden Governorate South of Yemen region. *International Journal of Recent Research in Physics and Chemical Sciences*, 1(1), 1-7.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2021). Climate change 2021: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report. Cambridge University Press.
- Mohammed, N. K., & Mazunga, M. S. (2013). Natural radioactivity in soil and water from Likuyu Village in the neighborhood of Mkuju uranium deposit. *International Journal of Analytical Chemistry*, 2013, 501856. <https://doi.org/10.1155/2013/501856>
- Nédélec, A., Ralison, B., Bouchez, J. L., & Grégoire, M. (2003). Structure and metamorphism of the granitic basement around Antananarivo: A key to the Pan-African history of central Madagascar and its Gondwana connections. *Tectonics*, 22(4), 1041. <https://doi.org/10.1029/2002TC001419>
- Pradeep, A. S., Geremew, H., & Getachew, B. (2016). Natural radioactivity levels in water and soil at Kemessie Hot Spring, North-Eastern Ethiopia. *Radiation Science and Technology*, 2(1), 1-5. <https://doi.org/10.11648/j.rst.20160201.11>
- Pradeep, A. S., Geremew, H., & Getachew, B. (2016). Natural radioactivity levels in water and soil at Kemessie Hot Spring, North-Eastern Ethiopia. *Radiation Science and Technology*, 2(1), 1-5. <https://doi.org/10.11648/j.rst.20160201.11>
- Rahman, M. M., Mondal, A., Kabir, M. A., & Asaduzzaman, K. (2015). Assessment of natural radioactivity levels and radiological significance of bottled drinking water in Bangladesh. *American Journal of Physics and Applications*, 3(6), 203-207. <https://doi.org/10.11648/j.ajpa.20150306.13>
- Randria, F. (2025). Etude de la radioactivité naturelle dans l'eau de consommation et ses effets dosimétriques sur la population du district d'Antsohihy, région Sofia [Thèse de doctorat]. Université d'Antsiranana.
- Rasolofosaon, P. N. J., Rakoto, H., & Bardintzeff, J. M. (2008). Geochemistry and petrogenesis of basalts from the Maevarano Basin (Northwestern Madagascar). *Journal of African Earth Sciences*, 52(1-2), 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2008.03.003>
- Twesigye, A., Darko, E. O., Faanu, A., & Schandorf, C. (2015). Dose assessment to public due to exposure to natural radioactivity at the Bibiani gold mine, Ghana. *Radiation Protection and Environment*, 38(1-2), 14-21.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. (2020). Sources, effects and risks of ionizing radiation: UNSCEAR 2020 Report. United Nations.

- World Health Organization & UNICEF. (2021). Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: Five years into the SDGs. World Health Organization.
- World Health Organization. (2011). Guidelines for drinking-water quality (4th ed.). WHO Press.
- Yussuf, N. M., Hossain, I., & Wagiran, H. (2012). Natural radioactivity in drinking and mineral water in Johor Bahru (Malaysia). *Scientific Research and Essays*, 7(9), 1070-1075.
- Zafizara, D. (2021). Etude de la radioactivité des eaux de consommation et leur impact dosimétrique sur la population locale d'Antsiranana [Mémoire de Master]. Université d'Antsiranana.



How to cite this article: Milson BEMALAZA, Félix RANDRIA, Jean Rémi RANDRIANTSIVERY, Martin RASOLONIRINA et Frédéric ASIMANANA. CARACTÉRISATION DE LA RADIOACTIVITÉ GAMMA DES EAUX THERMALES DE DEUX BASSINS DE MANGINDRANO, DISTRICT DE BEALANANA (MADAGASCAR). *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025; 5(21): 1-18. DOI : 10.5281/zenodo.17909360

This is an Open Access article distributed in accordance with the Creative Commons Attribution Non Commercial (CC BY-NC 4.0) license, which permits others to distribute, remix, adapt, build upon this work non-commercially, and license their derivative works on different terms, provided the original work is properly cited and the use is non-commercial. See:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>