

ÉVALUATION DE LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE (α , β) DANS L'EAU DE DISTRIBUTION DE LA JIRAMA : CAS DE LA COMMUNE URBAINE D'ANTSOHIHY, MADAGASCAR (2023-2024)



ASSESSMENT OF NATURAL RADIOACTIVITY (α , β) IN JIRAMA'S DISTRIBUTION WATER: CASE OF THE URBAN TOWN OF ANTOSHIHY, MADAGASCAR (2023-2024)

| Félix Randria ^{1*} | Milson Bemalaza ¹ | Martin Rasolonirina ² | Jean Rémi Randriantsivery ³ | and | Frédéric Asimanana ¹ |

¹ Faculté des Sciences | Département de physique | Université d'Antsiranana | BP 0-201 Antsiranana | Madagascar |

² Laboratoire de Physique Nucléaire | Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) | Madagascar |

³ Faculté des Sciences | Département de physique | Université d'Antananarivo | Madagascar |

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14566989> | Received December 21, 2024 | Accepted December 26, 2024 | Published January 01, 2025 | ID Article | Félix-Ref4-5-19ajira211224 |

RESUME

Contexte : À Madagascar, l'eau souterraine constitue une source majeure d'eau potable, particulièrement dans la Commune Urbaine d'Antsohihy où la Société Nationale de l'Eau et de l'Électricité (JIRAMA) exploite des forages profonds pour l'approvisionnement public. Les eaux souterraines contiennent naturellement des radionucléides primordiaux, principalement le potassium-40 (40K), ainsi que des radionucléides des chaînes de désintégration de l'uranium-238 (238U) et du thorium-232 (232Th). Ces radionucléides peuvent être mobilisés dans l'eau par des processus géochimiques naturels et des activités anthropiques, affectant potentiellement la santé publique. **Objectif** : Cette étude visait à évaluer les activités spécifiques des radionucléides naturels (40K, 238U et 232Th) dans l'eau de distribution fournie par la JIRAMA dans la Commune Urbaine d'Antsohihy, Madagascar. **Méthodes** : Quinze échantillons d'eau ont été prélevés dans différents Fokontany de la commune d'Antsohihy. Les analyses par spectrométrie gamma ont été réalisées à l'aide d'un détecteur NaI(Tl) 3"×3" ORTEC couplé au logiciel ScintiVision au Département Analyses et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar). La méthode de Rybach a été employée pour analyser les spectres gamma, en se concentrant sur trois régions d'intérêt : 1461 keV (40K), 1764,5 keV (214Bi comme descendant de 238U) et 2614,5 keV (208Tl comme descendant de 232Th). **Résultats** : Les activités spécifiques moyennes (\pm écart-type) mesurées sont : $17,9 \pm 5,0$ Bq.L⁻¹ pour le 40K (intervalle : $11,7 \pm 4,4 - 34,4 \pm 5,1$ Bq.L⁻¹), $6,7 \pm 1,4$ Bq.L⁻¹ pour l'238U (intervalle : $1,7 \pm 0,8 - 14,9 \pm 1,3$ Bq.L⁻¹) et $6,0 \pm 2,4$ Bq.L⁻¹ pour le 232Th (intervalle : $2,1 \pm 0,8 - 8,8 \pm 4,0$ Bq.L⁻¹). **Conclusion** : Bien que la majorité des échantillons d'eau présente des niveaux de radioactivité naturelle dans les limites acceptables, certaines zones montrent des concentrations élevées nécessitant des mesures de radioprotection pour minimiser les risques sanitaires potentiels pour la population locale. Une surveillance régulière et la mise en œuvre de stratégies d'atténuation sont recommandées pour les zones dépassant les niveaux de référence.

Mots-clés : Radioactivité naturelle ; Eau potable ; Spectrométrie gamma ; Activité spécifique ; Radionucléides ; Madagascar

ABSTRACT

Background: In Madagascar, groundwater represents a crucial drinking water source, particularly in the Urban Municipality of Antsohihy where the National Water and Electricity Company (JIRAMA) operates deep wells for public water supply. Groundwater naturally contains primordial radionuclides, primarily potassium-40 (40K), and radionuclides from uranium-238 (238U) and thorium-232 (232Th) decay series. These radionuclides can be mobilized into water through natural geochemical processes and anthropogenic activities, potentially affecting public health. **Objective**: This study aimed to assess the specific activities of natural radionuclides (40K, 238U, and 232Th) in drinking water supplied by JIRAMA in the Urban Municipality of Antsohihy, Madagascar. **Methods**: Fifteen water samples were collected across different Fokontany (administrative districts) of Antsohihy. Gamma spectrometry analysis was performed using a 3"×3" NaI(Tl) ORTEC detector coupled with ScintiVision software at the Department of Nuclear Analysis and Techniques (INSTN-Madagascar). The Rybach method was employed to analyze the gamma-ray spectra, focusing on three regions of interest: 1461 keV (40K), 1764.5 keV (214Bi as 238U progeny), and 2614.5 keV (208Tl as 232Th progeny). **Results**: The mean specific activities (\pm SD) were: 17.9 ± 5.0 Bq.L⁻¹ for 40K (range: $11.7 \pm 4.4 - 34.4 \pm 5.1$ Bq.L⁻¹), 6.7 ± 1.4 Bq.L⁻¹ for 238U (range: $1.7 \pm 0.8 - 14.9 \pm 1.3$ Bq.L⁻¹), and 6.0 ± 2.4 Bq.L⁻¹ for 232Th (range: $2.1 \pm 0.8 - 8.8 \pm 4.0$ Bq.L⁻¹). **Conclusion**: While the majority of water samples exhibited natural radioactivity levels within acceptable ranges, some areas showed elevated concentrations warranting radiological protection measures to minimize potential health risks to the local population. Regular monitoring and implementation of mitigation strategies are recommended for areas exceeding reference levels.

Keywords: Natural radioactivity; Drinking water; Gamma spectrometry; Specific activity; Radionuclides; Madagascar.

1. INTRODUCTION

L'eau, constituant fondamental de la biosphère, joue un rôle central dans tous les processus biologiques et écologiques. Son importance pour la santé humaine est double : elle est indispensable aux fonctions physiologiques vitales, mais peut également véhiculer des contaminants potentiellement dangereux. Dans les pays en

développement, la problématique de l'accès à l'eau potable reste particulièrement aiguë, avec des conséquences sanitaires majeures. Cette situation critique se traduit par plusieurs millions de décès d'enfants chaque année, principalement dus à la consommation d'eau contaminée, au manque d'hygiène ou à la malnutrition [1]. Parmi les contaminants potentiels de l'eau, les radionucléides constituent une préoccupation particulière en raison de leurs effets sur la santé humaine. Contrairement à une perception répandue associant la "naturalité" de l'eau à sa potabilité, la présence de radioéléments, tant naturels qu'artificiels, peut compromettre sa qualité sanitaire. L'exposition à ces radionucléides, que ce soit par ingestion directe ou par inhalation de gaz radioactifs volatilisés, présente des risques sanitaires significatifs qui nécessitent une surveillance attentive des ressources hydriques [1].

La radioactivité naturelle dans les eaux souterraines résulte d'interactions complexes entre l'eau et son environnement géologique. Cette radioactivité est principalement déterminée par la composition géologique des aquifères, le temps de résidence de l'eau dans ces formations, et les conditions physico-chimiques comme la température, le pH et le potentiel redox. La solubilité des minéraux radioactifs joue également un rôle crucial dans ce processus de contamination naturelle [2]. Les variations géologiques induisent des différences significatives dans les niveaux de radioactivité des eaux souterraines. Les zones granitiques, naturellement riches en uranium et thorium, présentent généralement des niveaux de radioactivité plus élevés que les formations sédimentaires [2]. Cette différence s'observe particulièrement dans les eaux souterraines profondes, où les concentrations en radium-226 et radon-222 peuvent atteindre des valeurs considérables. La profondeur joue un rôle déterminant : les eaux profondes présentent typiquement une radioactivité naturelle supérieure à celle des eaux de surface, qu'il s'agisse de rivières, de lacs ou de ruisseaux [3]. Dans ce contexte scientifique et sanitaire, notre étude vise à caractériser qualitativement et quantitativement les niveaux de radioactivité naturelle dans l'eau de distribution de la Commune Urbaine d'Antsohihy. Cette évaluation systématique s'inscrit dans une démarche de santé publique et permettra d'établir des recommandations basées sur des données probantes pour la protection des consommateurs et la gestion durable de la ressource en eau. Les résultats de cette étude fourniront des informations essentielles pour la mise en place de mesures de protection adaptées aux spécificités locales.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Zone d'étude

Antsohihy est un chef-lieu de la région Sofia, se trouve dans le Nord-Ouest de Madagascar et se situe sur la route nationale numéro six (RN 6) reliant Ambondromamy à Antsiranana. Les échantillons ont été collectés dans les secteurs constitués de la Commune Urbaine d'Antsohihy (Figure 1).

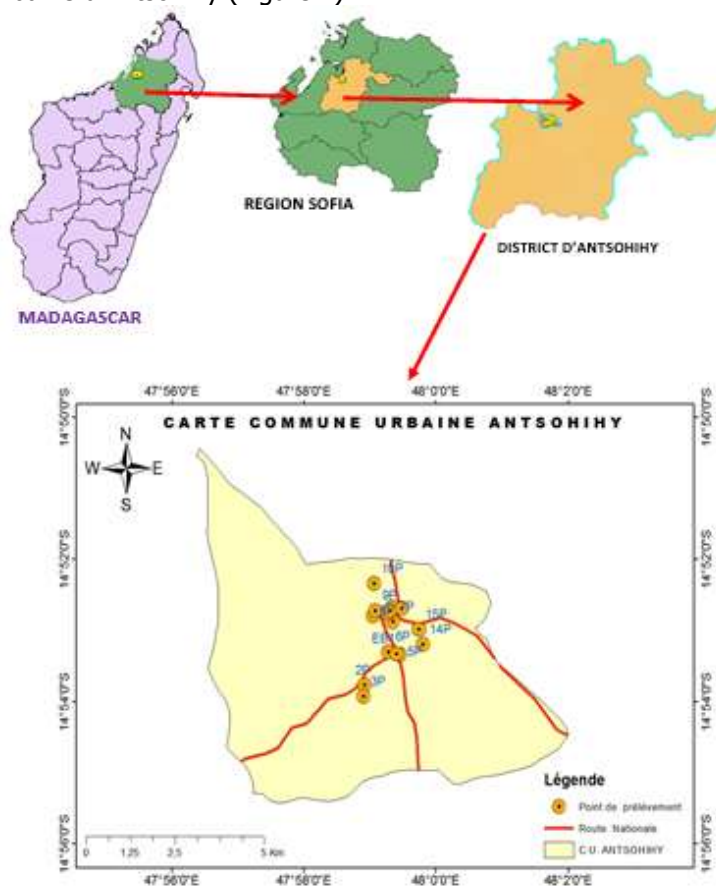


Figure 1 : Points de prélèvements des échantillons

2.2 Échantillonnage et préparation

Des échantillons d'eau (n=15) ont été prélevés du réseau de distribution de la JIRAMA (Société Nationale de l'Eau et de l'Electricité) dans différents Fokontany de la Commune Urbaine d'Antsohihy du 15 au 22 décembre 2022. Les échantillons ont été collectés dans des bouteilles en plastique stériles de 0,5 L, hermétiquement fermées et codées pour éviter toute contamination croisée. Les analyses ont été réalisées au Département Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar.

Les échantillons ont été transférés dans des conteneurs cylindriques en polyéthylène de 200 cm³, scellés hermétiquement et stockés pendant 30 jours pour atteindre l'équilibre séculaire entre le ²²⁶Ra et ses descendants.

2.3 Analyse par spectrométrie gamma

Les mesures ont été effectuées par spectrométrie gamma utilisant un détecteur NaI(Tl) 3"×3" (Ortec). L'étalonnage en énergie et en efficacité a été réalisé avec des matériaux de référence certifiés (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1). L'analyse des spectres a été effectuée via le logiciel ScintiVision selon la méthode de Rybach, exploitant trois régions d'intérêt pour quantifier :

- ⁴⁰K (1461,0 keV)
- ²³⁸U via le ²¹⁴Pb (1764,5 keV)
- ²³²Th via le ²⁰⁸Tl (2614,5 keV)

Note : Le ²¹⁴Pb et le ²⁰⁸Tl sont respectivement des descendants émetteurs gamma de l'²³⁸U et du ²³²Th.

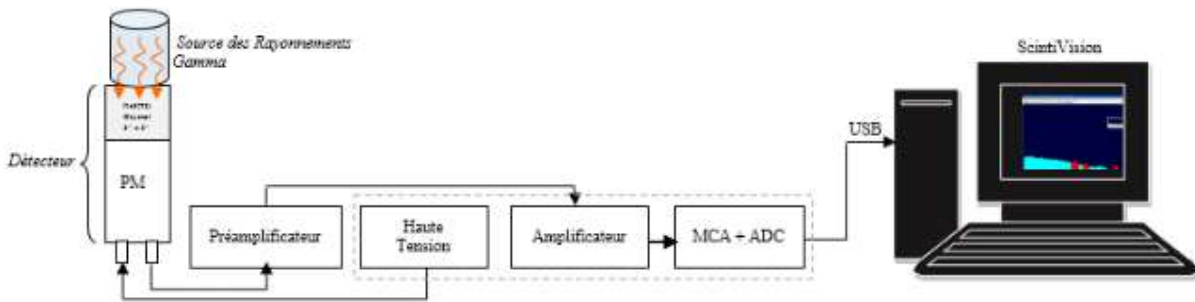


Figure 2 : Schéma simplifié d'une chaîne de spectrométrie gamma, muni d'un détecteur NaI(Tl) [4].

2.4 Etalonnage de la chaîne de mesure

Dans ce travail, deux types d'étalonnage ont été faits : l'étalonnage en énergie et en efficacité. Pour les deux types d'étalonnage, trois matériaux de référence (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) ont été utilisés.

2.4.1. Etalonnage en énergie

Il consiste à établir la corrélation entre une énergie et le numéro de canal du spectre. Il s'agit d'une fonction linéaire de la forme :

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

Où
E : énergie du pic photoélectrique ou pic d'absorption totale (en keV),
C : numéro de canal correspondant au centroïde du pic,
a et b : constantes à déterminer.

La méthode des moindres carrés nous permet d'identifier les constantes *a* et *b* :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})(E_i - \bar{E})}{\sum_{i=1}^n (C_i^2 - \bar{C}^2)} \tag{2}$$

et
$$b = \bar{E} - a\bar{C} \tag{3}$$

où

\bar{C} : valeur moyenne du numéro de canal,

\bar{E} : valeur moyenne des énergies.

Après dépouillement, les numéros de canal et leurs énergies correspondantes sont présentés dans le tableau 1 ci-après.

Tableau 1 : Energie et leur numéro de canal correspondant.

Radionucléides	N° de canal	Energie théorique (keV)	Energie calculée (keV)	Ecart relatif (%)
²¹⁴ Pb	99	351,5	349,9	0%
⁴⁰ K	412	1461,0	1476,8	1%
²¹⁴ Bi	498	1764,5	1786,4	1%
²³² Th	727	2614,5	2610,9	0%

Le Microsoft Excel a été utilisé pour établir la courbe et l'équation d'étalonnage en énergie (Fig. 3).

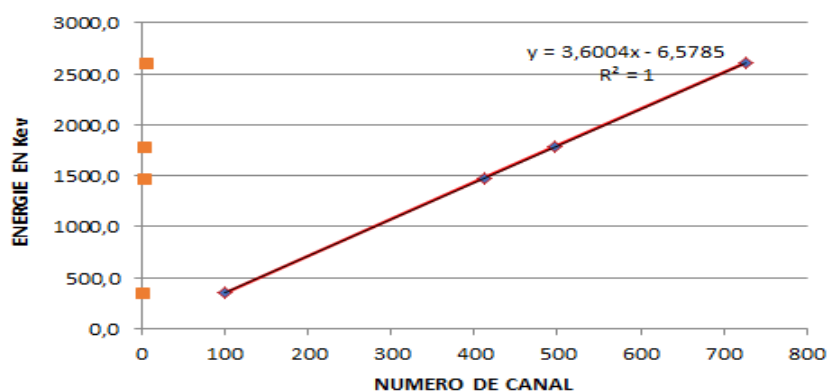


Figure 3 : Courbe d'étalonnage en énergie établie à l'aide du Microsoft Excel.

2.4.2. Etalonnage en efficacité

Dans ce travail, l'étalonnage en efficacité utilise la méthode développée par Rybach et qui a été améliorée par Chiozzi et al. Cette méthode exploite trois régions d'intérêt d'énergie 1461 keV du ⁴⁰K, 1764,5 keV du ²¹⁴Bi et 2614,5 keV du ²⁰⁸Tl. Les deux derniers radionucléides sont émetteurs gamma, descendants de l'²³⁸U et du ²³²Th respectivement. Pour chaque pic, la région d'intérêt utilisée varie de 10 à 15% afin de récupérer la totalité de la surface du pic caractéristique.

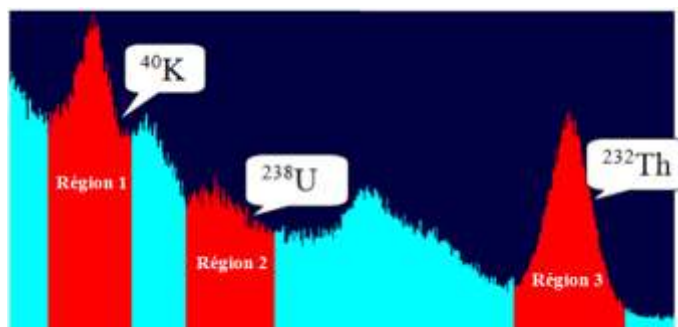


Figure 4 : Régions d'intérêt de ces trois radionucléides.

Le taux de comptage net $R_{i,j}$ dans la région i ($i = 1$ à 3 pour l'énergie 1461 keV, 1764,5 keV et 2614,5 keV respectivement) de l'étalon j ($j = 1$ à 3 pour étalons RGK-1, RGU-1 et RGTh-1 respectivement) est proportionnel à l'activité $A_{k,j}$ de radionucléide k ($k = 1$ à 3 pour le ⁴⁰K, l'²³⁸U et le ²³²Th) selon l'équation 4 et 5 ci-après.

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

et

$$R_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{t_j} - B_i \tag{5}$$

où

- $N_{i,j}$: nombre de coups de l'étalon j dans la région i (coups),
- t_j : temps de comptage de la source étalon j (s),
- B_i : taux de comptage du bruit de fond dans la région i (coups.s⁻¹),
- $\epsilon_{i,k}$: constante d'efficacité du radionucléide k dans la région i ,
- $A_{k,j}$: activité du radionucléide k pour l'étalon j (Bq),
- $R_{i,j}$: taux de comptage net de l'étalon j dans la région i (coups.s⁻¹)

Tableau 2 : Caractéristiques des matériaux de référence RGK-1, RGU-1 et RGTh-1 [4].

Minerais	RGK-1	RGU-1	RGTh-1
Masse de l'échantillon (g)	114,03 ± 0,02	142,85 ± 0,03	135,04 ± 0,04
Volume (cm³)	100	100	100
Teneur (µg.g⁻¹)	K	448000 ± 3000	< 20
	U	< 0,001	400 ± 2
	Th	< 0,01	< 1
Masse atomique (g.mol⁻¹)	K : 39,098	U : 238,029	Th : 232,038
Période	⁴⁰ K : 1,25.10 ⁹ ans	²³⁸ U : 4,47.10 ⁹ ans	²³² Th : 1,41.10 ¹⁰ ans
Nature	Sulfate de potassium extra pur	Minerai d'uranium dilué avec de la silice	Minerai de thorium dilué avec de la silice

D'après tableau 2, les activités spécifiques de ces trois radionucléides (⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th) dans les étalons (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) sont récapitulées dans le tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : Activités spécifiques des radionucléides dans les étalons (A_{k,j}) [4].

i	Etalons standards	1 RGK-1	2 RGU-1	3 RGTh-1
k Radionucléides				
1 ⁴⁰K		A ₁₁ ≠ 0	A ₁₂ = 0	A ₁₃ = 0
2 ²³⁸U		A ₂₁ = 0	A ₂₂ ≠ 0	A ₂₃ ≠ 0
3 ²³²Th		A ₃₁ = 0	A ₃₂ = 0	A ₃₃ ≠ 0

Ainsi, les constantes d'étalonnage sont données dans le tableau 4 ci-après.

Tableau 4 : Constantes d'efficacité (ε_{i,k}) [4].

k	Radionucléides	1 ⁴⁰ K	2 ²³⁸ U	3 ²³² Th
i Régions d'intérêt				
1 Région (1)		ε _{1,1} ≠ 0	ε _{1,2} ≠ 0	ε _{1,3} ≠ 0
2 Région (2)		ε _{2,1} = 0	ε _{2,2} ≠ 0	ε _{2,3} ≠ 0
3 Région (3)		ε _{3,1} = 0	ε _{3,2} ≠ 0	ε _{3,3} ≠ 0

En développant l'équation 4 avec les données dans les tableaux 3 et 4, les constantes d'efficacité ε_{i,k} sont présentées comme suit:

- a) Pour l'étalon RGK-1,

$$\epsilon_{1,1} = \frac{R_{1,1}}{A_{1,1}} \tag{6}$$

- b) Pour l'étalon RGU-1,

$$\varepsilon_{1,2} = \frac{R_{1,2}}{A_{1,2}} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{2,2} = \frac{R_{2,2}}{A_{2,2}} \quad (7)$$

c) Pour l'étalon RGTh-1,

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

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

$$\varepsilon_{3,2} = \frac{R_{3,2}}{A_{2,2}} \quad \text{et} \quad \varepsilon_{3,3} = \frac{1}{A_{3,3}} \left(R_{3,3} - \varepsilon_{3,2} \frac{A_{2,3}}{A_{2,2}} \right) \quad (9)$$

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

Tableau 5: Taux de comptage net calculés à partir de ces trois étalons.

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

2.4.3 Activités spécifiques des étalons

Comme les étalons (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) sont exprimés en teneur, il est donc nécessaire de déterminer les activités spécifiques de ces trois radionucléides pour les calculs à faire. Pour cela, on utilise la relation suivante.

$$A = \frac{I \times N_A \times m \times \ln(2)}{M \times T_{1/2}} \quad (10)$$

Où **A** : activité du radionucléide (Bq),
m : masse d'un élément (g),
M : masse atomique du radionucléide (g.mol⁻¹),
I : abondance du radionucléide,
N_A : nombre d'Avogadro (mol⁻¹),
T_{1/2} : demi-vie du radionucléide (s).

En développant l'équation 4, les taux de comptage net sont donnés par la forme matricielle suivante :

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

En sachant les taux de comptage nets de trois régions d'intérêt et les efficacités de détection, les activités spécifiques de ces trois radionucléides naturels dans un échantillon donné peuvent être calculées à l'aide de la relation 11. Ainsi, ces activités sont données par la forme matricielle ci-après :

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

En développant la relation 12, on obtient le système d'équation 13 ci-après.

$$\begin{cases} A_K = a_{1,1}R_K + a_{1,2}R_U + a_{1,3}R_{Th} \\ A_U = 0 + a_{2,2}R_U + a_{2,3}R_{Th} \\ A_{Th} = 0 + a_{3,2}R_U + a_{3,3}R_{Th} \end{cases} \quad (13)$$

2.5. Calcul de l'incertitude

Quel que soit le mode de détermination d'une grandeur physique, on est toujours conduit à effectuer des mesures qui sont, par nature, entachées d'erreurs ou plutôt d'incertitudes. Ces incertitudes peuvent être d'origine systématique ou d'origine aléatoire. C'est le cas, par exemple, lors de la préparation des échantillons (pesage, conditionnement, etc.), l'analyse des échantillons, la délimitation de l'aire du pic, etc. Plusieurs manières peuvent être utilisées pour déterminer l'incertitude d'une grandeur donnée.

Dans la statistique, l'écart-type pour le comptage N est définie par la relation 14 ci-après :

$$\sigma_N = \sqrt{N} \quad (14)$$

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

$$\sigma_u^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial x}\right)^2 \times \sigma_x^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial y}\right)^2 \times \sigma_y^2 + \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \times \sigma_z^2 + \dots \quad (15)$$

a) Pour une somme ou différence de deux variables

Soit $u = x + y$ ou $u = x - y$

$$\text{Alors } \sigma_u = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_y^2} \quad (16)$$

b) Pour une multiplication ou division avec une constante

Soit $u = \lambda \times x$ avec $\lambda \in \mathbb{R}$

$$\text{Alors } \sigma_u = \lambda \times \sigma_x \quad (17)$$

c) Pour une multiplication ou division de deux variables

Soit $u = \frac{x}{y}$ ou $u = x \times y$

$$\text{Alors } \sigma_u = u \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_x}{x}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_y}{y}\right)^2} \quad (18)$$

2.6. Limite de détection

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

$$LD_n = \frac{2\sqrt{2}}{\epsilon_{i,n}} \sqrt{\frac{B_i}{t}} \tag{19}$$

3. RESULTATS

Les activités spécifiques de ces trois radionucléides (^{40}K , ^{238}U et ^{232}Th) dans leur point de prélèvement respectif sont présentées dans le tableau 6 ci-dessous. La limite de détection (LD) pour chaque échantillon est aussi déterminée et présentée dans ce même tableau.

Tableau 6 : Activités spécifiques des trois radionucléides.

Code	Activité spécifique (Bq.l ⁻¹)						Points d'échantillonnage
	⁴⁰ K	LD _K	²³⁸ U	LD _U	²³² Th	LD _{Th}	
2P	19,6 ± 5,0	0,85	7,1 ± 1,5	0,27	3,8 ± 1,0	1,49	Chez Anaïs Hotel - Fkt Ambalabe Ouest
3P	16,3 ± 5,0	0,77	6,9 ± 1,5	0,27	7,7 ± 3,0	1,90	Chez Station shell - Fkt Ambalabe Ouest
5P	16,0 ± 4,9	0,87	6,8 ± 1,5	0,27	5,5 ± 2,0	2,15	EPP Ambalabe - Fkt Ambalabe Ouest
6P	13,4 ± 5,0	0,79	3,5 ± 1,4	0,27	4,7 ± 2,0	1,96	Ambodimadiro - Fkt Ambalabe Ouest
8P	17,7 ± 5,0	0,85	5,4 ± 1,4	0,27	8,8 ± 4,0	1,49	Antanambezo - Fkt Ambalakida
7P	21,0 ± 5,0	0,78	3,7 ± 1,6	0,35	7,5 ± 3,0	1,92	Bureau Fkt Ambalabe Est
9P	16,1 ± 4,3	0,87	5,8 ± 1,3	0,27	5,7 ± 2,6	1,49	Près Bureau de JIRAMA Fkt Ambalakida
10P	34,4 ± 5,1	0,76	9,6 ± 1,5	0,27	4,5 ± 1,6	1,49	En face Lebojo - Fkt Ankiririky sud
11P	14,9 ± 5,1	0,79	4,1 ± 1,5	0,27	8,3 ± 3,0	1,49	Chez Le Haris Hotel - Fkt Haute Ville
12P	19,5 ± 5,0	0,84	3,0 ± 1,4	0,27	4,6 ± 2,0	1,49	Vavahady stad Fkt Analamanga
13P	13,5 ± 4,5	0,79	6,9 ± 1,3	0,27	7,2 ± 3,0	1,49	Chez DADARA - Fkt Haute Ville
14P	11,7 ± 4,4	0,92	14,9 ± 1,3	0,27	6,1 ± 2,5	1,49	Tsaramandroso - Fkt Ankiririky sud
15P	15,4 ± 7,3	0,84	10,2 ± 2,2	0,27	7,0 ± 3,0	1,49	Ambodimanga telo Fkt Antafiampatsa
EB1	15,9 ± 4,6	0,57	11,2 ± 1,3	0,26	5,8 ± 2,0	1,41	Eau brute de JIRAMA - Fkt Ambalabe Ouest
EB2	22,9 ± 4,4	0,50	1,7 ± 0,8	0,23	2,1 ± 0,8	1,24	Eau brute de JIRAMA - Fkt Haute ville
Min	11,7 ± 4,4		1,7 ± 0,8		2,1 ± 0,8		
Max	34,4 ± 5,1		14,9 ± 1,3		8,8 ± 4,0		
Moy. ± σ	17,9 ± 5,0		6,7 ± 1,4		6,0 ± 2,4		

σ: écart-type ; **Fkt** : Fokontany ; **EPP**: Ecole Primaire Publique ; **JIRAMA** : JIro sy RAno Malagasy.

3.1. Activités spécifiques du ⁴⁰K

La figure 5 ci-après présente la variation des activités spécifiques du ⁴⁰K dans les Fokontany de la Commune Urbaine d'Antsohihy. Ces activités varient de (11,7 ± 4,4) Bq.l⁻¹ à (34,4 ± 5,1) Bq.l⁻¹, d'une valeur moyenne de (17,9 ± 5,0) Bq.l⁻¹. Aucune des activités spécifiques du ⁴⁰ K est n'en-dessous la limite de détection. L'activité maximale se trouve dans le Fokontany Ankiririky sud (en face Chez Lebojo) qui est de (34,4 ± 5,1) Bq.l⁻¹, tandis que l'activité minimale est obtenue dans le Fokontany Ankiririky Sud, secteur Tsaramandroso qui est de (11,7 ± 4,4) Bq.l⁻¹.

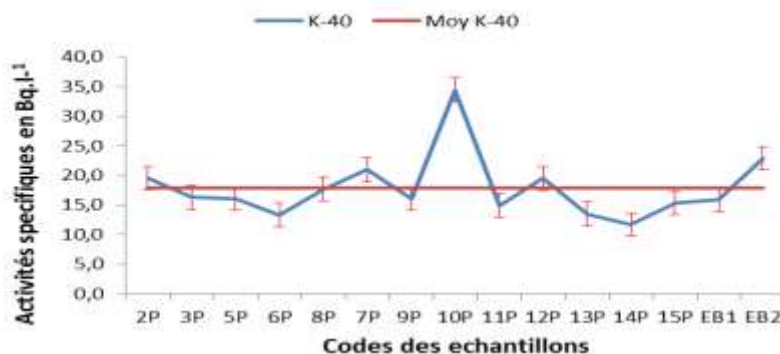


Figure 5 : Variation de l'activité spécifique du ⁴⁰K.

3.2. Activités spécifiques de ^{238}U

D'après les résultats du tableau 6 ci-dessus, les activités spécifiques de ^{238}U varient de $(1,7 \pm 0,8) \text{ Bq.l}^{-1}$ à $(14,9 \pm 1,3) \text{ Bq.l}^{-1}$. La valeur moyenne trouvée est de $(6,7 \pm 1,4) \text{ Bq.l}^{-1}$. Aucune de ces activités spécifiques mesurées n'est aussi en-dessous de la limite de détection. L'activité plus élevés de $(14,9 \pm 1,3) \text{ Bq.l}^{-1}$ est obtenue dans le Fokontany Ankiririky Sud, secteur Tsaramandroso. Tandis que celle de moins élevé est mesurée dans le Fokontany Haute ville qui est de $(1,7 \pm 0,8) \text{ Bq.l}^{-1}$.

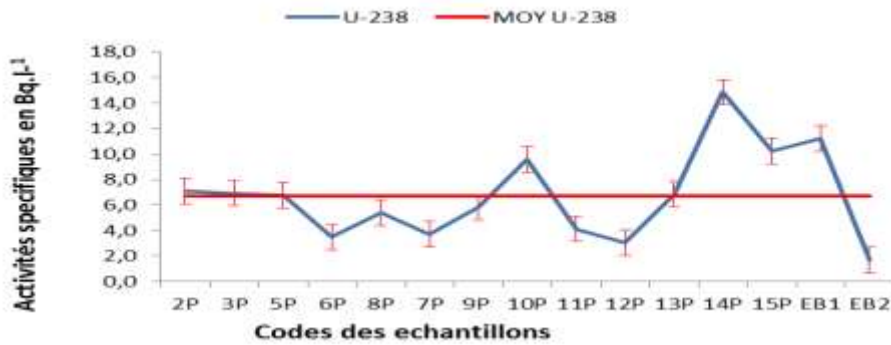


Figure 6 : Variation de l'activité spécifique de ^{238}U

3.3. Activités spécifiques du ^{232}Th

D'après les résultats de mesures présentées dans le tableau 6 ci-dessus, les activités spécifiques du ^{232}Th varient de $(2,1 \pm 0,8) \text{ Bq.l}^{-1}$ à $(8,8 \pm 4,0) \text{ Bq.l}^{-1}$, d'une valeur moyenne de $(6,0 \pm 2,4) \text{ Bq.l}^{-1}$. Similairement aux deux radionucléides précédents, aucune des activités spécifiques du ^{232}Th mesurées est en-dessous de la limite de détection. L'activité maximale se trouve dans le Fokontany Ambalakida, secteur Antanambezo qui est de $(8,8 \pm 4,0) \text{ Bq.l}^{-1}$. Celle de minimale est obtenue dans le Fokontany Haute Ville, qui est de $(2,1 \pm 0,8) \text{ Bq.l}^{-1}$.

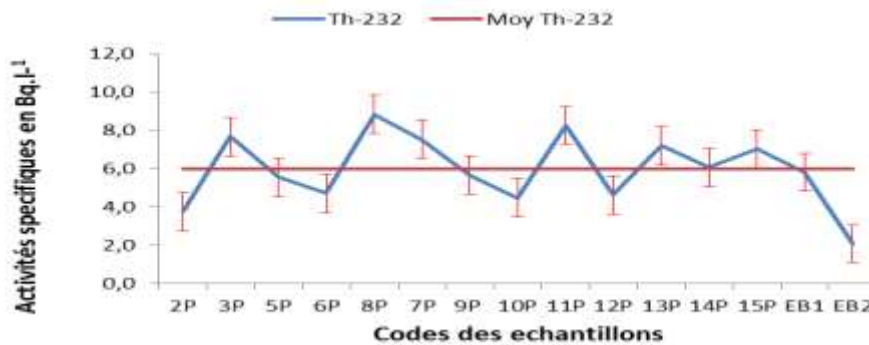


Figure 7 : Variation de l'activité spécifique du ^{232}Th

3.4. Variation des limites de détection pour l'ensemble des échantillons

La figure 8 ci-après présente les limites de détection (LD) de chaque échantillon mesuré pour les trois radionucléides ^{40}K , ^{238}U et ^{232}Th . Cette figure montre que les valeurs trouvées pour ^{238}U et le ^{40}K sont plus stable dans les tous les échantillons analysés par rapport à celles obtenues à partir du ^{232}Th . Celles-ci sont dues aux variations des niveaux des activités spécifiques de ces trois radionucléides dans les eaux étudiées. Ces variations sont confirmées par les coefficients de variation trouvées qui sont de 21%, 28% 40% pour ^{238}U , le ^{40}K et le ^{232}Th respectivement.

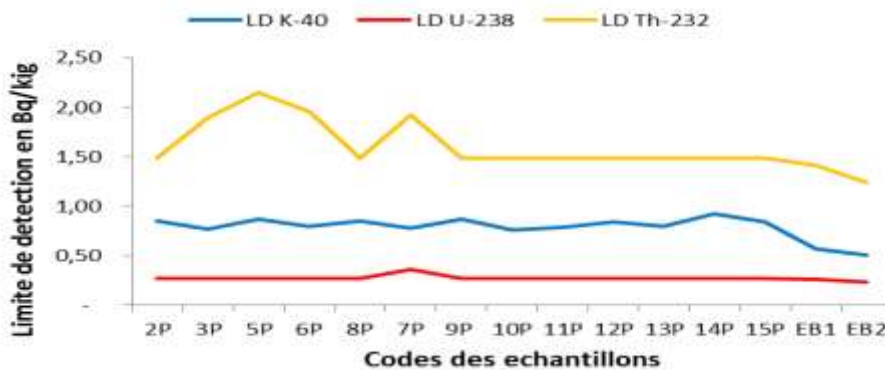


Figure 8 : Variation des limites de détection.

3.5. Analyses des activités spécifiques trouvées

La figure 9 montre la comparaison des activités spécifiques pour les trois radionucléides (⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th) par rapport aux points de prélèvement.

Les activités moyennes trouvées montrent que les eaux de consommation de la Commune Urbaine d'Antsohihy présente en général, des activités spécifiques du ⁴⁰K plus élevées, suivies par l'²³⁸U et le ²³²Th. Néanmoins, ces activités spécifiques restent toujours aux niveaux normaux de la radioactivité naturelle de l'environnement.

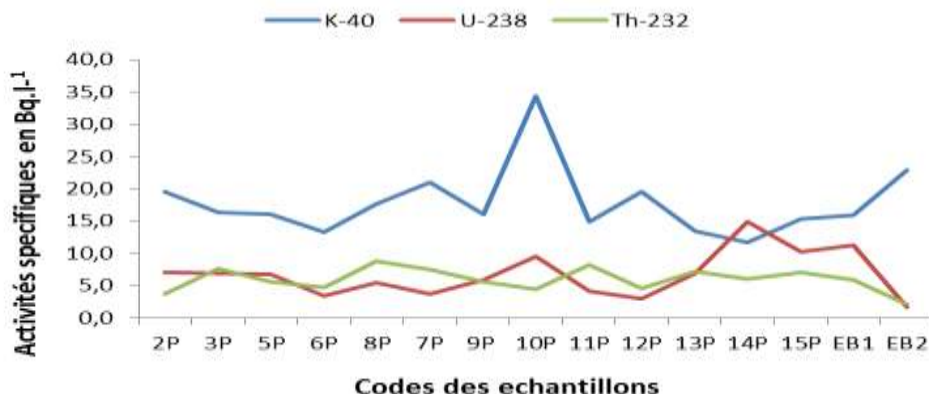


Figure 9 : Comparaison des activités de ces trois radionucléides.

Tableau 7 : Extraits des activités spécifiques dans l'eau au niveau mondial.

Pays	Type d'eau	Activités spécifiques [min – max] (Bq.l ⁻¹)			Références
		⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	
Madagascar		17,9 [11,7 – 34,4]	6,7 [1,7 - 14,9]	6,0 [2,1 - 8,8]	Présente étude
Madagascar	Robinet	4,5 [2,2 - 9,7]	3,4 [1,2 - 9,0]	0,6 [0,3 - 1,0]	[4]
Madagascar	Puits/rivière	17,9 [6,9 - 36,2]	9,2 [0,6 - 19,5]	13,0 [3,4 - 17,7]	[5]
Ethiopie	Thermale	17,7 [10,6 - 24,3]	2,3 [1,2 - 3,9]	1,7 [0,7 - 2,7]	[10]
Bangladesh	Bouteille	18,3 [10,9 - 32,2]	3,3 [1,9 - 5,0]	6,4 [1,4 - 9,7]	[11]
Ghana	Rivière	3,1 [2,8 - 3,1]	0,2 [0,1 - 0,3]	0,38 [0,3 - 0,4]	[12]
Yémen	Irrigation	18,3 [7,9 - 26,0]	1,44 [0,2 - 2,7]	1,20 [0,1 - 3,1]	[13]
Malaisie	Minérale	1,3 [0,1 - 1,4]	0,03 [0 - 0,09]	0,07 [0,02 - 0,1]	[14]
Egypte	Puits	5,3 [2,8 - 8,7]	0,20 [0,1 - 0,5]	0,13 [0,1 - 0,5]	[15]
Madagascar	Lac	10,2 [6,5 - 19,8]	3,8 [1,7 - 5,2]	0,8 [0,6 - 1,3]	[17]
Cameroun	Minérale	0,1 [0 - 0,2]	0,02 [0,01 - 0,04]	0,04 [0,01 - 0,12]	[21]
Arabie saoudite	Souterraine	4,6 [1,5 - 8,9]	0,6 [0,1 - 1,6]	0,2 [0,5 - 0,7]	[24]
Irak	Boisson	129,9 [6,4 - 253,9]	12,9 [1,4 - 55,8]	6,0 [2,2 - 9,7]	[27]
Tanzanie	Rivière	10,1 [9,2 - 11,2]	2,4 [2,2 - 2,5]	1,9 [1,8 - 1,9]	[18]
Madagascar	Robinet	63 [51 - 70]	23 [11 - 33]	39 [21 - 46]	[8]

3.6 Corrélation entre les trois radionucléides naturels

Les Figures 10, 11 et 12 présentent les relations entre différents radionucléides mesurés dans les échantillons d'eau analysés. Les analyses de régression linéaire ont été effectuées pour évaluer les corrélations potentielles entre ces éléments.

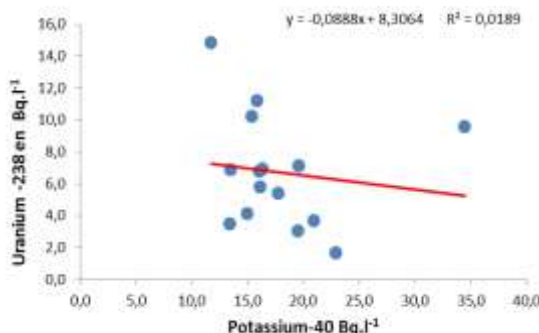


Figure 10 : Corrélation entre les activités spécifiques du ⁴⁰K, de l'²³⁸U et du ²³²Th.

La Figure 10 illustre la relation entre l'Uranium-238 et le Potassium-40. La droite de régression ($y = -0,0888x + 8,3064$) présente un coefficient de détermination $R^2 = 0,0189$, indiquant une très faible corrélation négative entre ces deux radionucléides. La dispersion importante des points autour de la droite de régression suggère que les concentrations de ces deux éléments varient de manière largement indépendante.

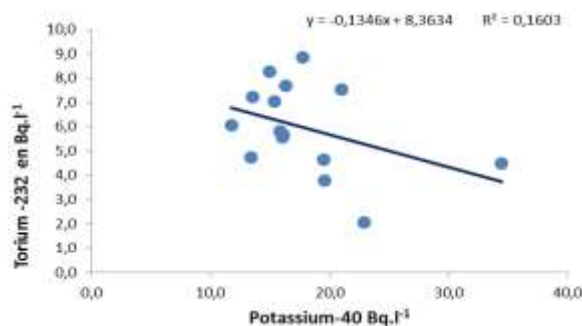


Figure 11 : Corrélation entre les activités spécifiques du ^{40}K , de ^{238}U et du ^{232}Th .

La Figure 11 montre la corrélation entre le Thorium-232 et le Potassium-40. La régression linéaire ($y = -0,1346x + 8,3634$) avec un $R^2 = 0,1603$ révèle une corrélation négative faible mais légèrement plus prononcée que dans la Figure 10. Cette relation inverse suggère une légère tendance à la diminution des concentrations en Thorium-232 lorsque celles du Potassium-40 augmentent.

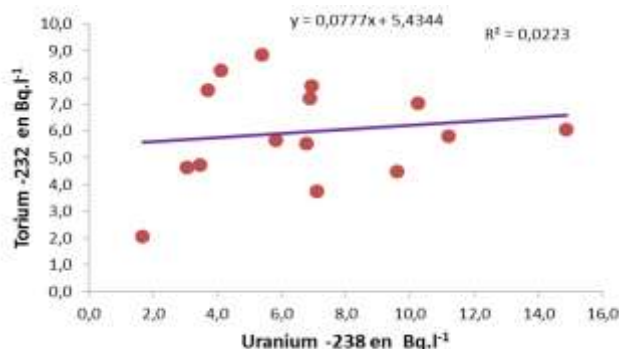


Figure 12 : Corrélation entre les activités spécifiques du ^{40}K , de ^{238}U et du ^{232}Th .

La Figure 12 présente la relation entre le Thorium-232 et l'Uranium-238. L'équation de régression ($y = 0,0777x + 5,4344$) avec un $R^2 = 0,0223$ indique une corrélation positive très faible. La distribution des points montre une variabilité considérable, suggérant que les concentrations de ces deux radionucléides sont essentiellement indépendantes l'une de l'autre.

L'ensemble de ces résultats met en évidence l'absence de corrélations fortes entre les radionucléides étudiés, suggérant que leurs distributions dans les échantillons sont probablement contrôlées par des facteurs géochimiques distincts.

4. DISCUSSIONS

La radioactivité naturelle des eaux fournies par JIRAMA dans la Commune Urbaine d'Antsohihy, Madagascar, a été évaluée, révélant la présence des principaux radionucléides naturels : le potassium-40 (^{40}K), l'uranium-238 (^{238}U) et le thorium-232 (^{232}Th). Ces résultats mettent en évidence des variations significatives dans les activités spécifiques de ces radionucléides, reflétant les influences géologiques et hydrogéologiques locales. Ces données permettent également des comparaisons précieuses avec les niveaux de radioactivité mesurés dans d'autres régions, offrant ainsi une perspective globale sur la radioactivité des ressources en eau.

Potassium-40 (^{40}K)

Les activités spécifiques moyennes mesurées pour le ^{40}K dans les eaux étudiées montrent une certaine similitude avec celles observées dans les eaux de puits et de rivière à Madagascar [5], les eaux thermales en Éthiopie [10], l'eau de consommation du Bangladesh [11] et l'eau d'irrigation au Yémen [13]. Ces résultats reflètent la présence ubiquitaire de ^{40}K dans les roches et les sols, et son transfert vers les eaux souterraines et de surface. Cependant, les activités spécifiques de ^{40}K mesurées à Antsohihy dépassent celles des eaux de robinet de Madagascar [4], des eaux de surface au Ghana, à Madagascar et en Tanzanie [12, 17, 18], ainsi que des eaux minérales en Malaisie et au

Cameroun [14, 21], et des eaux souterraines en Égypte et en Arabie Saoudite [15, 24]. Ces écarts peuvent être attribués à des différences géologiques dans les zones d'échantillonnage et à des processus de dissolution spécifiques des minéraux contenant du potassium. À l'inverse, les activités spécifiques de ^{40}K à Antsohihy sont nettement inférieures à celles mesurées dans l'eau de boisson en Irak [27], une région où des concentrations exceptionnellement élevées de potassium naturel ont été documentées.

Uranium-238 (^{238}U)

Les activités spécifiques moyennes de ^{238}U obtenues dans cette étude montrent des valeurs significativement plus élevées par rapport aux eaux de consommation de Madagascar, du Bangladesh, de Malaisie et du Cameroun [4, 11, 14, 21], ainsi qu'aux eaux d'irrigation au Yémen [13], aux eaux souterraines d'Égypte et d'Arabie Saoudite [15, 24], et aux eaux thermales d'Éthiopie [10]. Ces observations suggèrent que les sources géologiques locales de la région d'Antsohihy sont particulièrement riches en uranium, ce qui pourrait être lié à la présence de minéraux uranifères ou à des processus hydrogéologiques favorisant la mobilisation de cet élément dans les eaux. Par ailleurs, les valeurs mesurées sont supérieures à celles des eaux de surface au Ghana, à Madagascar et en Tanzanie [12, 17, 18], confirmant ainsi une contribution géologique plus importante dans les eaux de cette région. Cependant, les activités spécifiques moyennes de ^{238}U sont inférieures à celles relevées dans les eaux de puits et de rivière à Madagascar [5], ainsi qu'à certaines eaux de consommation à Madagascar et en Irak [8, 27]. Cette disparité reflète la diversité des sources d'eau analysées et la variation des processus géochimiques en fonction des contextes environnementaux.

Thorium-232 (^{232}Th)

Les activités spécifiques moyennes mesurées pour ^{232}Th dans les eaux de JIRAMA montrent des niveaux comparables à ceux des eaux de boisson au Bangladesh et en Irak [11, 27], deux régions où les concentrations naturelles de thorium dans les sols sont relativement modérées. Toutefois, elles se révèlent supérieures à celles des eaux de consommation de Madagascar, de Malaisie et du Cameroun [4, 14, 21], des eaux d'irrigation au Yémen [13], ainsi que des eaux souterraines d'Égypte et d'Arabie Saoudite [15, 24], des eaux thermales d'Éthiopie [10], et des eaux de surface au Ghana et à Madagascar [12, 17]. Cette différence pourrait être attribuée à des conditions géologiques spécifiques dans la région d'Antsohihy, où le thorium est davantage mobilisé dans les eaux. En revanche, les activités spécifiques moyennes mesurées pour ^{232}Th sont inférieures à celles des eaux de puits, de rivière et de robinet à Madagascar [5, 8], ce qui souligne une variabilité importante des concentrations en thorium entre les différents types de sources d'eau.

Ces observations mettent en lumière la complexité des interactions géologiques et hydrologiques influençant les concentrations naturelles de radionucléides dans les eaux. Elles soulignent également l'importance de poursuivre des études comparatives pour mieux comprendre les facteurs déterminant la distribution spatiale et temporelle de ces radionucléides dans les ressources en eau.

Limite de l'Étude

Cette étude comporte certaines limites qui méritent d'être soulignées pour interpréter les résultats avec précaution. Tout d'abord, les échantillons d'eau ont été prélevés à un moment donné, ce qui ne permet pas d'évaluer les variations saisonnières potentielles des concentrations en radionucléides. De plus, les zones d'échantillonnage se limitent à la Commune Urbaine d'Antsohihy, ce qui restreint la généralisation des résultats à l'ensemble du territoire Malgache. Par ailleurs, bien que les activités spécifiques aient été mesurées avec précision, les facteurs géochimiques et hydrologiques sous-jacents responsables des différences observées n'ont pas été explorés en profondeur. Enfin, l'absence d'une évaluation directe des risques sanitaires liés aux niveaux mesurés de radionucléides limite l'application des résultats pour orienter des politiques publiques en matière de santé environnementale. Ces aspects nécessitent des études complémentaires pour approfondir la compréhension des mécanismes impliqués et mieux évaluer les impacts sur la santé des populations.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude révèlent que l'eau distribuée par JIRAMA dans la Commune Urbaine d'Antsohihy présente des activités spécifiques dominantes de ^{40}K , suivies par celles de ^{238}U et ^{232}Th . Les niveaux d'activité varient significativement entre les points de prélèvement, ce qui suggère une influence notable des formations géologiques locales. Cette variation est notamment observée dans les échantillons d'eau brute 1 (EB1) et 2 (EB2), prélevés respectivement à la sortie de l'usine de traitement et à environ 1 km.

Les activités mesurées sont comparables à celles rapportées dans d'autres études nationales et internationales, indiquant que les niveaux de radioactivité sont dans la fourchette des valeurs environnementales normales. Cependant, certaines zones présentent des niveaux plus élevés, justifiant la mise en place de mesures de radioprotection pour minimiser les risques radiologiques associés à une consommation à long terme de ces eaux.

6. REFERENCE

1. Rajomamiandrisoa JR. Etude de la qualité des eaux de puits aux environs d'Ivato Antananarivo [dissertation]. Antananarivo: Université d'Antananarivo; 2014.
2. BRGM. Eau minérale et radioactivité. Note technique n° 15; 2000 Jul.
3. World Health Organization. Radon et cancer. Aide-mémoire N°291; 2005 Jun.
4. Donne Z. Etude de la radioactivité des eaux de consommation et leur impact dosimétrique sur la population locale d'Antsiranana [dissertation]. Antsiranana: Université d'Antsiranana; 2021.
5. Ministère de la Santé (FR). Arrêté du 12 mai 2004 fixant les modalités de contrôle de la qualité radiologique des eaux destinées à la consommation humaine. Paris: Le Ministère; 2004.
6. 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.
7. Direction Générale de la Santé (FR). Note de service n° DGS/EA4/2010/151 relative aux bilans nationaux de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine vis-à-vis des pesticides en 2009 et des radionucléides pour la période 2008-2009; 2010 May 6.
8. Zarabe HH. Évaluation des niveaux de radionucléides naturels dans l'eau potable de Mandritsara (Madagascar): implications pour la sante publique [dissertation]. Madagascar; 2021.
9. Randriamora TH, Razafindramiandra HA, Andriambololona R, Ravelomanantsoa SD, Ralaivelo MAL, Rasolonirina M, et al. Determination of natural radioactivity in the North East Beach Sands of Madagascar. *Am J Phys Appl*. 2017;5(1):6-12. doi:10.11648/j.ajpa.20170501.12
10. 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
11. 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
12. 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.
13. Harb S, El-Kamel AH, Zahrn 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.
14. 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.
15. 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.
16. Donné Z, Rasolonirina M, Djaovagnono HC, Kall B, Rabeseranana N. Study of water radioactivity transfer from telluric origin in the Amber Mountain, Antsiranana, Madagascar. *Sci Afr*. 2021;13:e00902. doi:10.1016/j.sciaf.2021.e00902
17. 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
18. Ndontchueng MM, Simo A, Nguelem EJM, 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.
19. 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. doi:10.1016/j.jrras.2018.07.004
20. Yehia M, Baghdady A, Howaric FM, Awad S, Gad A. Natural radioactivity and groundwater quality assessment in the northern area of the Western Desert of Egypt. *J Hydrol Reg Stud*. 2017;12:331-44. doi:10.1016/j.ejrh.2017.06.002
21. 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
22. Al-Mashhadani AH, Saleh AM. Assessment of radioactivity and associated hazards in drinking water in Al-Sadar City, Baghdad. *Int J Geol Agr Environ Sci*. 2014;2(4):1-4.
23. 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



How to cite this article: Félix Randria, Milson Bemalaza, Martin Rasolonirina, Jean Rémi Randriantsivry et Frédéric Asimanana. ÉVALUATION DE LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE (α , β) DANS L'EAU DE DISTRIBUTION DE LA JIRAMA : CAS DE LA COMMUNE URBAINE D'ANTSOHIHY, MADAGASCAR (2023-2024). *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2025;20(1): 1-13. [DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14566989>]

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/>