

ORIGINALE ARTICLE

ÉVALUATION DES NIVEAUX DE RADIONUCLÉIDES NATURELS DANS L'EAU POTABLE DE MANDRITSARA (MADAGASCAR) : IMPLICATIONS POUR LA SANTE PUBLIQUE



ASSESSMENT OF NATURAL RADIONUCLIDE LEVELS IN DRINKING WATER IN MANDRITSARA (MADAGASCAR): IMPLICATIONS FOR PUBLIC HEALTH

| Hansi Hertz Zarabe ^{1*} | Martin Rasolonirina ² | et | Frédéric Asimanana ¹ |

¹. Université d'Antsiranana | Département physique | Laboratoire de Métrologie Nucléaire et Environnement | Diégo-Suarez | Madagascar |

². Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires | Département Analyses et Techniques Nucléaires | Antananarivo | Madagascar |

| DOI: 10.5281/zenodo.13732593 | | Received August 29, 2024 | | Accepted September 4, 2024 | | Published September 09, 2024 | | ID Article | Hansi-Ref01-3-19ajiras290824 |

RESUME

Contexte : La population de la ville de Mandritsara utilise les eaux souterraines et de surface comme sources d'eau potable. Cependant, la qualité de ces eaux soulève de grandes inquiétudes en raison des activités agricoles et minières présentes, qui peuvent les contaminer avec divers polluants, tels que les radionucléides. **Objectifs** : Cette étude vise à évaluer les niveaux de radioactivité naturelle dans l'eau du robinet de la Commune Urbaine de Mandritsara. **Méthodes** : Treize échantillons d'eau de robinet ont été collectés dans les 13 Fokontany de la ville. Ces échantillons ont été placés dans des bouteilles en plastique de 500 mL, puis analysés au laboratoire de l'INSTN-Madagascar à l'aide de la spectrométrie gamma, afin de déterminer les activités spécifiques du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232. **Résultats** : Les résultats indiquent que les activités spécifiques varient de (51 ± 5) Bq.L⁻¹ à (70 ± 8) Bq.L⁻¹, avec une moyenne de (63 ± 6) Bq.L⁻¹ pour le potassium-40, de (11 ± 2) Bq.L⁻¹ à (33 ± 6) Bq.L⁻¹, avec une moyenne de (23 ± 4) Bq.L⁻¹ pour l'uranium-238, et de (21 ± 4) Bq.L⁻¹ à (46 ± 8) Bq.L⁻¹, avec une moyenne de (39 ± 6) Bq.L⁻¹ pour le thorium-232. **Conclusions** : Les résultats montrent que les niveaux de ces trois radionucléides naturels dans les échantillons analysés sont dominés principalement par le potassium-40, suivi du thorium-232 et de l'uranium-238. Les activités spécifiques varient d'un endroit à l'autre, ce qui peut être attribué à des facteurs géologiques et environnementaux propres à la région. Néanmoins, les valeurs obtenues indiquent des niveaux normaux de radioactivité environnementale, suggérant que ces eaux ne nécessitent pas de traitements spécifiques pour leur utilisation.

Mots-clés : Radioactivité naturelle, Qualité de l'eau potable, Spectrométrie gamma, Potassium-40, Uranium-238, Thorium-232, Contamination environnementale.

ABSTRACT

Background: The population of the city of Mandritsara relies on groundwater and surface water as sources of drinking water. However, the quality of these water sources raises significant concerns due to existing agricultural and mining activities that may contaminate them with various pollutants, such as radionuclides. **Objectives**: This study aims to evaluate the levels of natural radioactivity in tap water in the Urban Municipality of Mandritsara. **Methods**: Thirteen tap water samples were collected from the 13 Fokontany in the city. These samples were placed in 500 mL plastic bottles and analyzed at the INSTN-Madagascar laboratory using gamma spectrometry to determine the specific activities of potassium-40, uranium-238, and thorium-232. **Results**: The results indicate that specific activities range from (51 ± 5) Bq.L⁻¹ to (70 ± 8) Bq.L⁻¹, with an average of (63 ± 6) Bq.L⁻¹ for potassium-40; from (11 ± 2) Bq.L⁻¹ to (33 ± 6) Bq.L⁻¹, with an average of (23 ± 4) Bq.L⁻¹ for uranium-238; and from (21 ± 4) Bq.L⁻¹ to (46 ± 8) Bq.L⁻¹, with an average of (39 ± 6) Bq.L⁻¹ for thorium-232. **Conclusions**: The results show that the levels of these three natural radionuclides in the analyzed samples are predominantly dominated by potassium-40, followed by thorium-232 and uranium-238. Specific activities vary from one location to another, which can be attributed to geological and environmental factors specific to the region. Nonetheless, the obtained values indicate normal levels of environmental radioactivity, suggesting that these waters do not require specific treatment for their use.

Keywords: Natural radioactivity, Drinking water quality, Gamma spectrometry, Potassium-40, Uranium-238, Thorium-232, Environmental contamination

1. INTRODUCTION

La radioactivité dans l'environnement provient de sources naturelles et/ou artificielles [1]. Les niveaux de concentration de ces radionucléides dépendent des formations géologiques et des sources de rejets dans l'environnement. La radioactivité naturelle de l'eau est généralement attribuée aux roches et aux minéraux qui composent l'aquifère, en raison des processus d'érosion et de dissolution des éléments radioactifs qu'ils contiennent. Parmi ces éléments, l'uranium est largement répandu dans la nature, principalement sous forme des isotopes uranium-234, uranium-235 et uranium-238, avec des abondances respectives de 0,005%, 0,7% et 99,28%. Toutefois, les concentrations d'uranium dans la plupart des eaux naturelles restent faibles; par exemple, l'eau de mer présente une teneur moyenne en uranium d'environ 2 µg.L⁻¹, tandis que les concentrations dans la plupart des eaux douces sont généralement inférieures à 10 µg.L⁻¹.

Une autre série de radionucléides naturels d'importance est représentée par le thorium-232, un isotope du thorium. Bien que le thorium soit 3 à 4 fois plus abondant que l'uranium dans la croûte terrestre, sa faible solubilité limite sa présence dans les eaux. Toutefois, le radium-228, un descendant du thorium-232, peut devenir un contaminant significatif en raison de sa radiotoxicité élevée. Le potassium-40, un autre radionucléide naturel très présent dans l'environnement, est un émetteur bêta-gamma d'origine primordiale, tout comme l'uranium-238 et le thorium-232. Ce potassium radioactif est associé au potassium stable avec un rapport fixe de $31,3 \text{ Bq.g}^{-1}$.

Dans les roches, les radionucléides parents sont en équilibre séculaire avec leurs descendants. Toutefois, la sorption et la stabilité de ces radionucléides dans l'eau sous forme de solutés sont déterminées par des mécanismes physico-chimiques complexes et par les caractéristiques spécifiques de chaque radioélément. Lorsqu'ils se dissolvent dans l'eau, ces équilibres séculaires peuvent être perturbés, entraînant des concentrations indépendantes les unes des autres. Par conséquent, l'étude de la radioactivité dans les eaux potables est essentielle pour évaluer les risques radiologiques potentiels, en particulier dans les régions où les niveaux de radionucléides présents ne sont pas encore bien documentés.

La ville de Mandritsara, située dans une région géologiquement diverse, présente des caractéristiques environnementales pouvant influencer les processus de radioactivité naturelle dans ses ressources en eau, qui constituent des composantes fréquentes et potentiellement préoccupantes. Il est donc crucial de procéder à une analyse détaillée des radionucléides présents dans l'eau potable consommée par la population locale. Cette recherche vise à fournir des données de référence sur la radioactivité naturelle de l'eau, afin que les autorités publiques puissent adopter des mesures appropriées pour protéger la santé publique et l'environnement de cette région [2, 3].

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Description du site d'étude

La ville de Mandritsara est située dans la partie Est de la région Sofia, province de Majunga. Elle se trouve à une altitude de 322 m, des coordonnées géographiques entre $15^{\circ}49'29''\text{S}$ et $15^{\circ}51'33''\text{S}$, et entre $48^{\circ}49'46''\text{E}$ et $48^{\circ}51'01''\text{E}$. La Commune Urbaine de Mandritsara possède treize (13) Fokontany, à savoir Andohomby, Ambalabe, Ambalacompania, Ambalanantsotry, Antsahabe, Ambohimahavelona, Ambohimandroso, Antanantsimihety, Antanandrenivelo, Ampitatsimo, Mandritsara Ambony, Mandritsara Vaovao et Maroamboka.

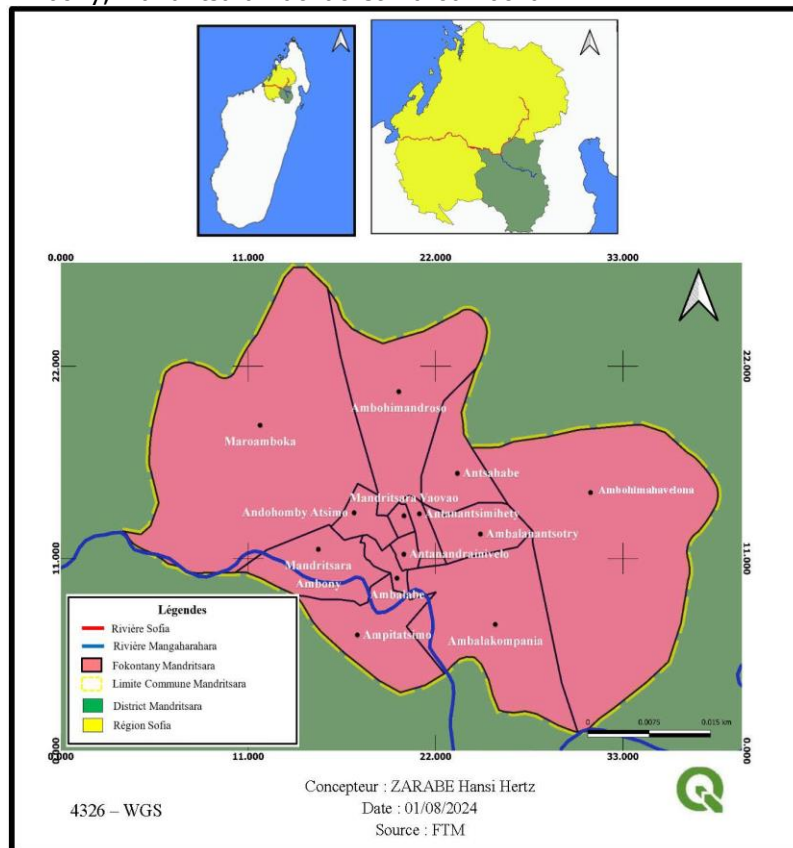


Figure 1 : Localisation du site d'étude.

2.2 Prélèvements de l'échantillon

Les échantillons ont été prélevés dans la ville de Mandritsara, du 22 au 26 décembre 2021. Au total, treize (13) échantillons d'eau de robinet ont été collectés dans tous les Fokontany. Ils ont été mis dans des bouteilles en plastique de 500 mL, bien codés et étiquetés afin d'éviter les éventuelles contaminations radioactives et les faciliter au transport vers le laboratoire de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires-Madagascar.

2.3 Préparation des échantillons

Au laboratoire du département Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar, ces échantillons ont été préparés physiquement aux fins d'analyses. Après l'homogénéisation, ils ont été directement mis dans des porte-échantillons cylindriques de 200 cm³, fermés hermétiquement et stockés pendant trois semaines pour atteindre l'équilibre séculaire entre le radium-226 (²²⁶Ra) et ses descendants. Ce type de porte-échantillon a été choisi car il est approprié pour éviter l'émanation du gaz de radon. Les masses des échantillons analysés ont été mesurés à l'aide d'une balance électronique de précision Kern PBJ 6200-2M, et utilisés pour les calculs des activités massiques en Bq.kg⁻¹ des trois radionucléides ⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th.

2.4 Technique de mesure

La technique d'analyse par spectrométrie gamma a été utilisée pour identifier et quantifier les éléments radioactifs présents dans les échantillons étudiés. Cette technique est basée sur le flux de photons gamma émis et dépose en l'intégralité ou une partie de son énergie dans le cristal de détection pour former un spectre [4]. Ce spectre est constitué par le nombre de photons détectés en fonction de leur énergie respective. Un radionucléide est identifié en connaissant les énergies correspondantes. Les niveaux d'énergie ou raies d'émission sont cependant caractéristiques de chaque radio-émetteur gamma. Les raies se matérialisent sous formes de pics dans le spectre [5]. La chaîne de mesure est composée d'un détecteur, d'un préamplificateur, d'un analyseur multicanal (MCA) et d'un ordinateur muni d'un logiciel ScintiVision. Le MCA abrite le module de haute tension, d'amplificateur et de convertisseur analogique-numérique (ADC).

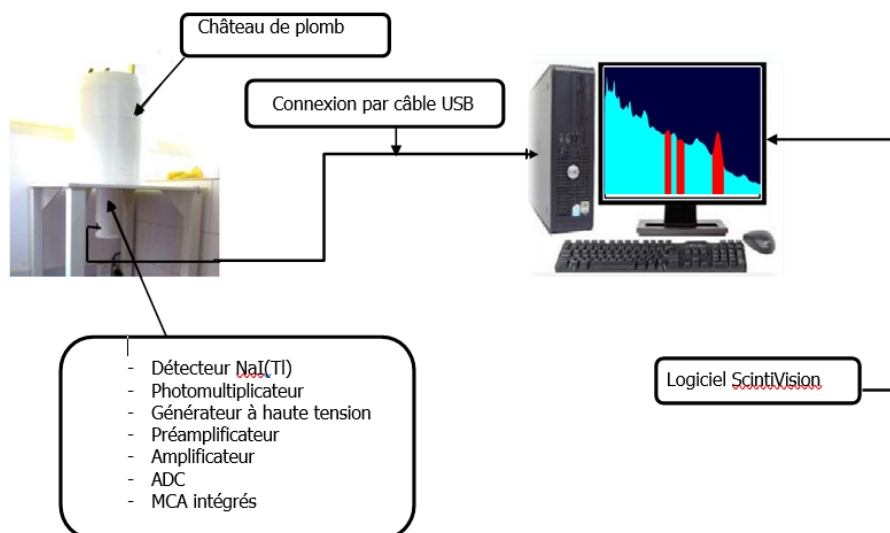


Figure 2 : chaîne de spectrométrie gamma.

2.5 Etalonnage de la chaîne de mesure

Avant d'analyser les échantillons, la chaîne de mesure a été étalonnée en utilisant les matériaux de référence certifiés RGK- 1, RGU-1 et RGTh-1, qui contiennent les minerais du potassium, de l'uranium et du thorium respectivement. Les caractéristiques de ces matériaux sont résumées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux de référence RGK-1, RGU-1, RGTh-1.

Minerai		RGK-1	RGU-1	RGTh-1
Nature		Sulfate de Potassium Extra pur	Minerai d'Uranium Dilué avec de la Silice	Minerai de thorium Dilué avec de la silice
Masse(g)		258,75	218,79	216,08
Volume (ml)		200	200	200
	K	448000 ± 3000	<20	0,02 ± 0,01
Teneur µg/g	U	<0,001	400 ± 2	6,3 ± 0,4
	Th	<0,01	<1	800 ± 16

Les matériaux de référence RGK-1 et RGU-1 sont respectivement composés de potassium et d'uranium presque purs. En effet, la présence du thorium et du potassium dans RGU-1 ainsi que celle du thorium et de l'uranium dans le RGK-1 peuvent être négligées. Par contre celle d'uranium dans le RGTh-1 ne peut pas être omise [6]. Il existe deux types d'étalonnage : étalonnage en énergie et en efficacité.

2.5.1 Étalonnage en énergie

L'étalonnage en énergie consiste à établir une relation entre l'énergie E (KeV) et le numéro de Canal C. L'équation de l'étalonnage obtenue est une fonction de droite, donnée par la relation (1) ci-après

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

Dans ce travail, les valeurs de coefficients a et b ont été déterminées à l'aide de la méthode des moindres carrés [7].

2.5.2 Étalonnage en efficacité

Ce type d'étalonnage a été effectué à l'aide d'une méthode développée par Rybach et améliorée par Chiozzi et al. Cette méthode consiste à exploiter trois régions d'intérêt correspondants aux pics caractéristiques d'énergies 1461 keV du potassium-40, 1764,5 keV du bismuth-214 et 2614,5 keV du thalium-208. Les deux derniers radionucléides sont les descendants de l'uranium-238 et du thorium-232. Pour récupérer la totalité de la surface du pic, la région d'intérêt varie de 10% à 15% du centroïde de l'énergie correspondante [8].

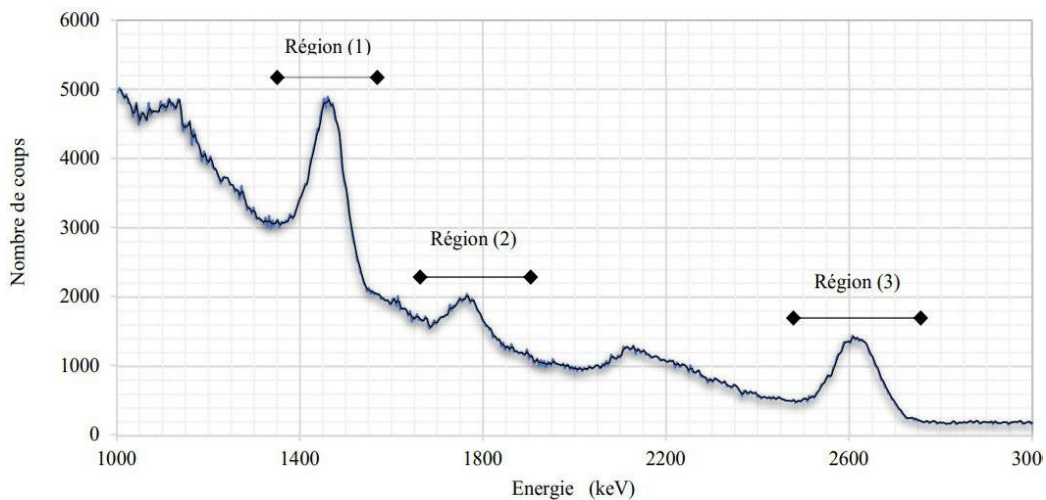


Figure 3 : Trois régions d'intérêts utilisés.

A partir d'un spectre, le taux de comptage net est proportionnel à l'activité de la source étalon pour une énergie donnée. Il est calculé à partir de l'équation (2) ci-après.

$$R_{ij} = \sum_{j=1}^3 \varepsilon_{ik} A_{kj} \tag{2}$$

- Où
- A_{kj} : Activité du radionucléide k dans $j^{\text{ème}}$ source étalon
 - ε_{ik} : Constante d'étalonnage de la $i^{\text{ème}}$ région d'intérêt pour le radionucléide k
 - R_{ij} : Taux de comptage net dans la $i^{\text{ème}}$ région d'intérêt de la source étalon j , donné par l'équation (2)

$$R_{ij} = \frac{N_{ij}}{t_j} - R_{bi} \quad (3)$$

Où R_{ij} : aire de pic enregistré par le détecteur ;
 T_j : durée de comptage, exprimée en seconde ;
 R_{bi} : taux de comptage du bruit de fond dans $i^{ème}$ région d'intérêt.

Les constantes d'étalonnage en efficacité sont déterminées à partir des activités des matériaux de référence et des taux de comptage des régions d'intérêt [6]. Ainsi, on a :

Pour le RGK-1
$$e_{11} = \frac{R_{11}}{A_{11}} \quad (4)$$

Pour le RGU-1
$$e_{11} = \frac{R_{11}}{A_{11}} \text{ et } e_{22} = \frac{R_{22}}{A_{11}} \quad (5)$$

Pour le RGTh-1
$$e_{11} = \frac{R_{13} - \frac{R_{12}A_{23}}{A_{22}}}{A_{33}} \text{ et } e_{23} = \frac{R_{23} - \frac{R_{22}A_{23}}{A_{22}}}{A_{33}} \quad (6)$$

Les autres constantes d'étalonnage en efficacité peuvent être déterminées en combinant les taux de comptage mesurés à la 3^{ème} région d'intérêt dans les spectres des matériaux de référence RGU-1 et RGTh-1 [6] :

$$e_{22} = \frac{R_{32}}{A_{22}} \text{ et } e_{33} = \frac{R_{33} - \frac{R_{32}A_{23}}{A_{22}}}{A_{33}} \quad (7)$$

2.6 Détermination de l'activité spécifique

A partir de l'équation (2), on obtient la forme matricielle suivante [6] :

$$\begin{pmatrix} R_K \\ R_U \\ R_{Th} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e_{11} & e_{12} & e_{13} \\ 0 & e_{22} & e_{23} \\ 0 & e_{32} & e_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_K \\ A_U \\ A_{Th} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Avec $\begin{pmatrix} R_K \\ R_U \\ R_{Th} \end{pmatrix}$ et $\begin{pmatrix} A_K \\ A_U \\ A_{Th} \end{pmatrix}$: matrices des taux de comptages nets et des activités spécifiques respectivement

En utilisant l'équation (8), les activités spécifiques des trois radionucléides naturels (⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th) sont déterminées dans l'équation (9) ci-après.

$$\begin{pmatrix} A_K \\ A_U \\ A_{Th} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ 0 & \alpha_{22} & \alpha_{23} \\ 0 & \alpha_{32} & \alpha_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R_K \\ R_U \\ R_{Th} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Ainsi, ces activités spécifiques sont finalement données par l'équation (10).

$$\begin{cases} A_K = \alpha_{11}R_K + \alpha_{12}R_U + \alpha_{13}R_{Th} \\ A_U = \alpha_{22}R_U + \alpha_{23}R_{Th} \\ A_{Th} = \alpha_{32}R_U + \alpha_{33}R_{Th} \end{cases} \quad (10)$$

2.7 Limite de détection

La limite de détection (LD_k) est fonction de l'efficacité de détection (ϵ_{ik}) de la $i^{ème}$ région d'intérêt du radionucléide n , du taux de comptage du bruit de fond (B_i) de la même région d'intérêt et le temps de comptage t du spectre [8]. Cette limite de détection est donc donnée par l'équation (11) ci-après.

$$LD_K = \frac{2\sqrt{2}}{\epsilon_{ik}} \sqrt{\frac{B_i}{t}} \quad (11)$$

3. RESULTATS

3.1 Activités spécifiques des trois radionucléides naturels

Les résultats du tableau 1 et les figures 2 à 4 indiquent que les échantillons d'eau du robinet de la ville de Mandritsara contiennent du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232.

Tableau1: Activités spécifiques trouvées par Fokontany de la ville de Mandritsara.

Code d'échantillon	Activité spécifique (Bq. L ⁻¹)			Fokontany
	Potassium-40	Uranium-238	Thorium-238	
ERM01	61 ± 6	22 ± 4	38 ± 6	Ambalanantsotry
ERM02	58 ± 6	19 ± 3	32 ± 5	Antsahabe
ERM03	70 ± 8	17 ± 3	37 ± 5	Antanantsimihety
ERM04	70 ± 8	27 ± 5	43 ± 7	Mandritsara vaovao
ERM05	65 ± 7	29 ± 5	46 ± 8	Ampitantsimo
ERM06	61 ± 6	11 ± 2	45 ± 8	Mandritsara ambony
ERM07	54 ± 5	22 ± 3	44 ± 7	Ambohimandroso
ERM08	70 ± 8	24 ± 3	21 ± 4	Andohomby
ERM09	68 ± 8	33 ± 6	40 ± 6	Ambalabe
ERM10	51 ± 5	14 ± 2	45 ± 8	Maroamboka
ERM11	66 ± 7	29 ± 5	36 ± 5	Ambohimahavelona
ERM12	57 ± 5	26 ± 4	43 ± 7	Ambalacompania
ERM13	64 ± 7	26 ± 4	42 ± 7	Antanandrenivelo
Moyenne ± σ	63 ± 6	23 ± 4	39 ± 6	
[Min - Max]	[51 - 70]	[11 - 33]	[21 - 46]	

3.1.1 Activités spécifiques du potassium-40

Les résultats montrent que les activités spécifiques du potassium-40 varient de (51 ± 5) Bq. L⁻¹ à (70 ± 8) Bq.L⁻¹, avec une moyenne de (63 ± 6) Bq.L⁻¹. Le coefficient de variation de 10% indique que ces activités varient d'un Fokontany à l'autre. L'activité minimale a été trouvée dans le Fokontany de Maroamboka, tandis que celles de maximales ont été déterminées dans les Fokontany d'Antanantsimihety, de Mandritsara vaovao et d'Andohomby.

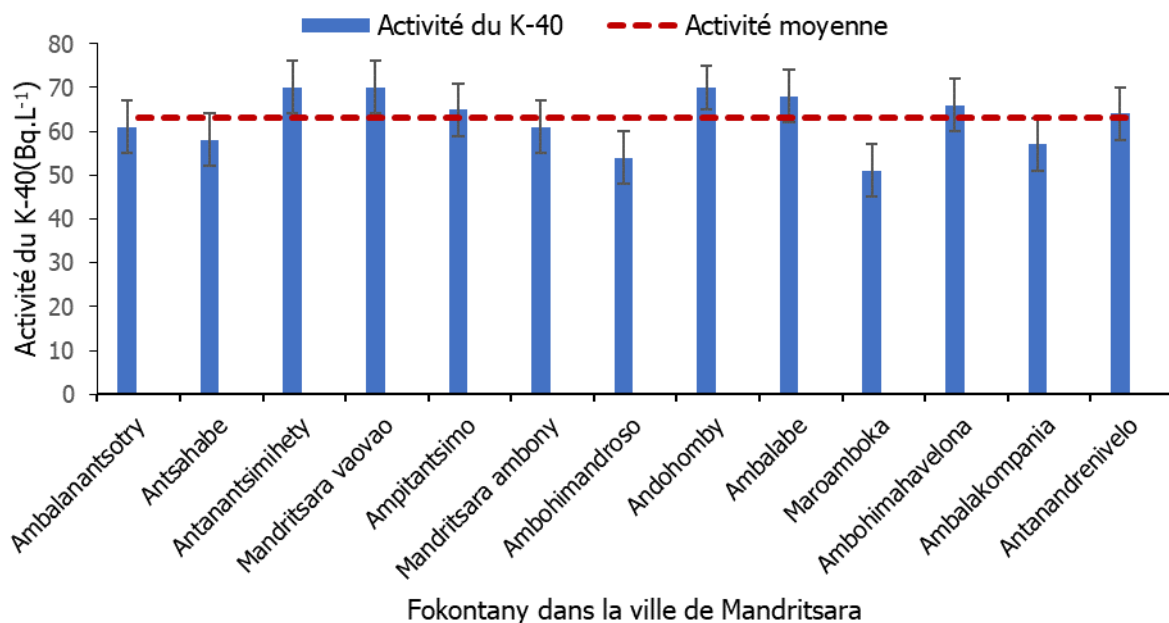


Figure 1 : Activités spécifiques du K-40.

3.1.2 Activités spécifiques de l'uranium-238

La figure 3 montre la présence de l'uranium-238 dans les échantillons analysés. Leurs activités sont comprises entre (11 ± 2) Bq. L⁻¹ à (33 ± 6) Bq. L⁻¹ avec une moyenne de (23 ± 4) Bq. L⁻¹. Le coefficient de variation de 27% confirme la variabilité du radionucléide uranium-238 dans la zone étudiée. L'activité minimale ont été trouvée dans le Fokontany de Mandritsara Ambony et celle de maximale dans le Fokontany d'Ambalabe.

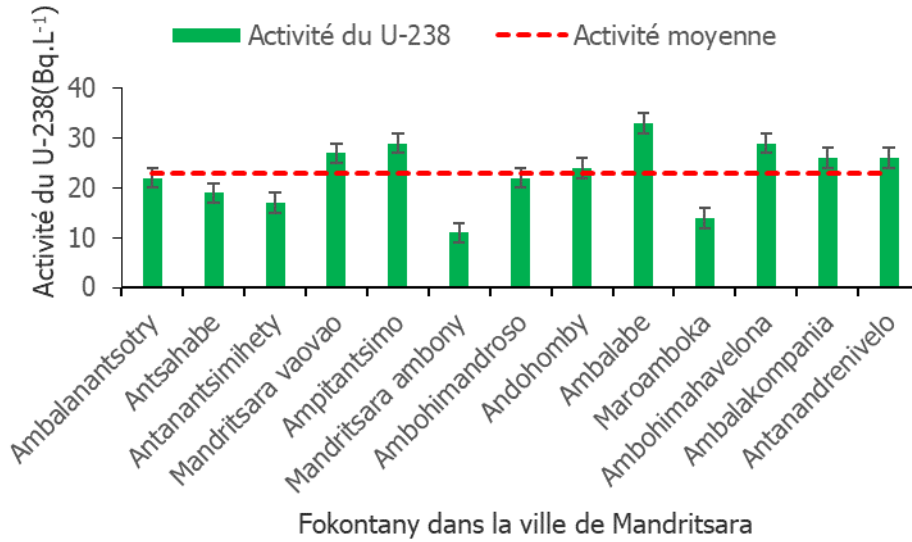


Figure 5: Activités spécifiques de l'U-238.

3.1.3 Activités spécifiques du thorium-232

D'après la figure 3 ci-dessus, les activités spécifiques du thorium-232 varient de (21 ± 4) Bq.L⁻¹ à (46 ± 8) Bq.L⁻¹, avec une moyenne de (39 ± 6) Bq.L⁻¹. Le coefficient de variation de 18% indique la variabilité d'un point à l'autre et la solubilité de ce radionucléide dans l'eau. La valeur minimale a été identifiée au Fokontany d'Andohomby, tandis que celle de maximale a été trouvée dans le Fokontany d'Ampitantsimo.

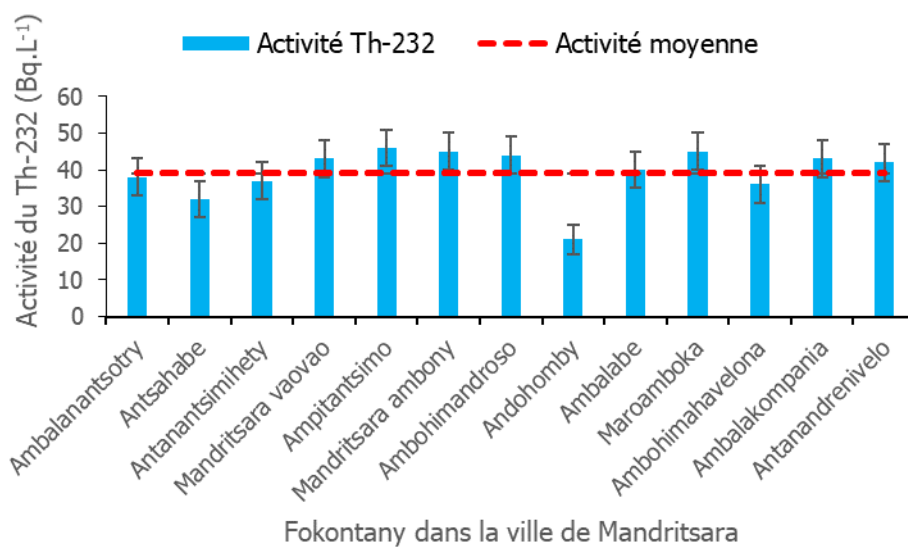


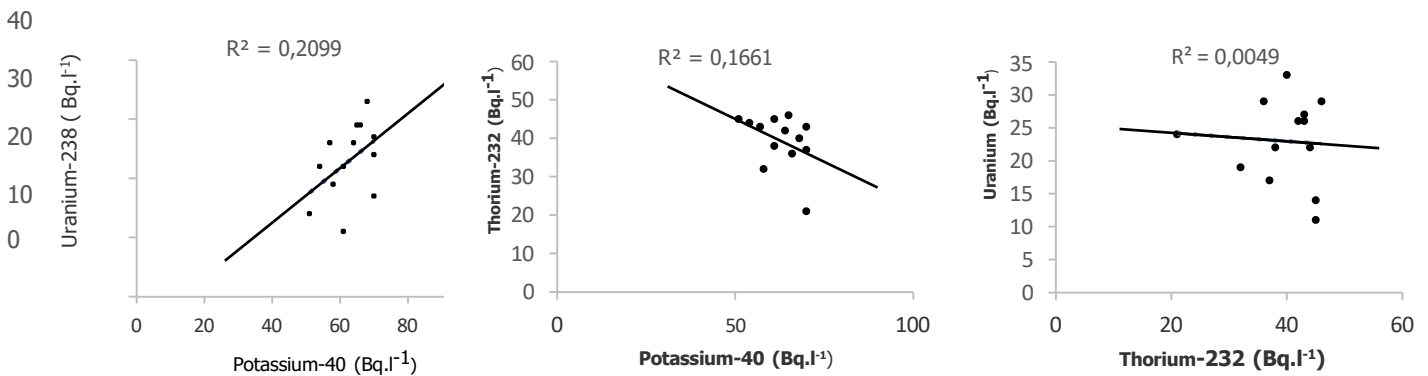
Figure 6: Activités spécifiques du Th-232.

Tableau 2 : Extraits des activités spécifiques dans l'eau au niveau mondial.

Pays	Type d'eau	Activité spécifique (Bq.L ⁻¹)			Référence
		K-40	U-238	Th-232	
Madagascar	Robinet	63 [51 - 70]	23 [11 - 33]	39 [21 - 46]	Présent étude
Madagascar	Rivière	17,9 [6,9- 36,2]	9,2 [0,6-19,5]	13,0 [3,4 - 17,7]	[9]
Madagascar	Rivière	7,4 [2,7 - 19,3]	4,0 [2,2 - 8,2]	0,6 [0,4 - 0,7]	[10]
Tanzanie	Rivière	10,1 [9,2 - 11,2]	2,4 [2,2 - 2,5]	1,9 [1,8 - 1,9]	[11]
Madagascar	Lac	10,2 [6,5 - 19,8]	3,8 [1,7 - 5,2]	0,8 [0,6 - 1,3]	[10]
Madagascar	Source	6,3 [3,8 - 8,8]	4,0 [2,2 - 5,7]	2,0 [0,6 - 3,3]	[10]
Cameroun	Minérale	0,11 [0,01-0,16]	0,02 [0,01-0,04]	0,04 [0,01 -0,12]	[12]
Bangladesh	Minérale	18,3 [10,9 - 32,2]	3,3 [1,9 - 5,0]	6,4 [1,4 - 9,7]	[13]
Ethiopie	Thermale	17,7 [10,6 - 24,3]	2,3 [1,2 - 3,9]	1,7 [0,7 - 2,7]	[14]
Arabie saoudite	Souterraine	4,6 [1,5 - 8,9]	0,6 [0,1 - 1,6]	0,2 [0,5 - 0,7]	[15]
Egypte	Souterraine	10,3 [5,3 - 22,1]	45,6 [0,0 - 92,0]	2,9 [1,1 - 5,7]	[16]
Yémen	Souterraine	34,9 [26,7 - 43,7]	3,0 [2,3 - 3,5]	0,7 [0,3 - 1,4]	[17]
Irak	Boisson	129,9 [6,4 - 253,9]	12,9 [1,4 - 55,8]	6,0 [2,2 - 9,7]	[18]
Malaisie	Boisson	152 [53- 222]	2,9 [0,6 - 8,6]	3,8 [0,7 - 7,0]	[19]

3.2 Corrélation entre les trois radionucléides naturels

La figure 6 montre la corrélation entre les activités des trois radionucléides tels que le potassium-40, la famille de l'Uranium-238 ainsi que celle de thorium-232.

**Figure 7** : Corrélation entre les activités du K-40, de la famille de l'U-238 et celles du Th 232.

• Uranium-238 et Potassium-40

La première dispersion montre une corrélation positive entre l'uranium-238 et le potassium-40, avec un coefficient de détermination R^2 de 0,21. Cela signifie qu'il existe une relation linéaire entre ces deux isotopes radioactifs [20]. L'uranium-238 est un isotope radioactif qui se désintègre en thorium-234, tandis que le potassium-40 se désintègre en argon-40.

• Thorium-232 et Potassium-40

La deuxième dispersion montre une corrélation négative entre le thorium-232 et le potassium-40, avec un R^2 de 0,166 [21]. Le thorium-232 se désintègre en radium-228 puis en radon-220.

• Uranium-238 et thorium-232

La troisième dispersion montre une très faible corrélation négative entre l'uranium-238 et le thorium-232 avec un R^2 de 0,005 [22].

4. DISCUSSION

L'analyse de la radioactivité naturelle des eaux de robinet de la ville de Mandritsara, Madagascar, a révélé la présence de trois radionucléides principaux : le potassium-40, l'uranium-238 et le thorium-232. Les résultats obtenus mettent en évidence des niveaux d'activité variables selon les isotopes considérés, avec des implications potentielles pour la santé publique et la gestion des ressources en eau. Les échantillons d'eau analysés présentent une activité spécifique du potassium-40 variant de 51 ± 6 Bq.L⁻¹ à 70 ± 6 Bq.L⁻¹, avec une moyenne de 63 ± 6 Bq.L⁻¹. Cette activité moyenne est significativement supérieure à celles rapportées dans plusieurs études régionales et internationales, notamment dans les rivières de Madagascar et de Tanzanie [9-11],

les lacs et les eaux de sources de Madagascar [10], les eaux minérales du Cameroun et du Bangladesh [12,13], l'eau thermale d'Éthiopie [14] et les eaux souterraines d'Égypte et du Yémen [16, 17]. Cependant, elle reste nettement inférieure aux valeurs observées dans certaines eaux de boisson d'Irak et de Malaisie [18, 19], où des concentrations presque deux fois supérieures ont été enregistrées.

Concernant l'uranium-238, les activités mesurées sont comprises entre 11 ± 2 Bq.L⁻¹ et 33 ± 2 Bq.L⁻¹, avec une moyenne de 23 ± 6 Bq.L⁻¹. Cette valeur moyenne dépasse celles rapportées dans la majorité des études comparatives citées [9-15, 17-19]. Toutefois, elle reste inférieure à l'activité maximale observée dans les eaux souterraines d'Égypte [16], où des valeurs 2,8 fois supérieures ont été enregistrées. Il est important de noter que la variabilité des concentrations en uranium-238 peut être influencée par les conditions géologiques locales et les processus géochimiques.

Les niveaux d'activité spécifique du thorium-232 varient de 21 ± 4 Bq.L⁻¹ à 46 ± 5 Bq.L⁻¹, avec une moyenne de 39 ± 7 Bq.L⁻¹. Ces résultats sont nettement supérieurs à ceux rapportés dans l'ensemble des études comparatives [9-19]. Cette observation soulève des questions sur les sources potentielles de thorium dans l'environnement local et les mécanismes de son enrichissement dans les eaux de Mandritsara. Pour mieux comprendre les comportements de ces radionucléides dans les eaux analysées, une étude de corrélation a été réalisée. Les résultats montrent des coefficients de corrélation faibles ($0,07 \leq r \leq 0,46$), statistiquement non significatifs au seuil de confiance de 95%. Ces observations suggèrent des origines et des comportements géochimiques distincts pour chaque élément. Le potassium-40 présente une faible corrélation avec l'uranium-238 ($r = 0,46$) et le thorium-232 ($r = 0,41$), indiquant probablement des sources différentes et des processus d'enrichissement ou de déplétion distincts dans l'environnement aquatique. La corrélation très faible entre l'uranium-238 et le thorium-232 ($r = 0,07$) suggère que ces deux radionucléides proviennent vraisemblablement de minéraux et de roches-mères différents.

La mobilité différentielle de ces éléments dans l'eau peut expliquer en partie ces faibles corrélations. L'uranium, sous sa forme hexavalente U⁶⁺, est soluble et mobile en milieu aqueux, tandis que le thorium est généralement peu soluble et son transport est principalement associé aux matières en suspension. Cette différence de comportement géochimique pourrait expliquer les variations observées dans leurs concentrations respectives. Ces résultats mettent en évidence des niveaux de radioactivité naturelle relativement élevés dans les eaux de robinet de Mandritsara, en particulier pour le thorium-232. Cette situation soulève plusieurs questions importantes concernant les sources géologiques spécifiques de ces radionucléides dans la région, les mécanismes d'enrichissement et de transport dans le système hydrogéologique local, ainsi que les implications potentielles pour la santé publique.

Des études complémentaires sont nécessaires pour caractériser en détail la géologie et l'hydrogéologie de la région, évaluer la variabilité temporelle et spatiale des concentrations en radionucléides, déterminer les doses d'exposition de la population locale et les risques sanitaires associés, et examiner les options de traitement et de gestion des eaux pour réduire les niveaux de radioactivité. En effet, cette étude met en lumière l'importance d'une surveillance régulière de la radioactivité naturelle dans les eaux de consommation, en particulier dans les régions présentant des caractéristiques géologiques susceptibles d'enrichir les eaux en radionucléides. Elle souligne également la nécessité d'une approche multidisciplinaire intégrant la géologie, l'hydrogéologie, la radiochimie et la santé publique pour une gestion durable et sûre des ressources en eau à Mandritsara et dans des contextes similaires.

5. CONCLUSION

Les activités spécifiques des trois radionucléides, à savoir le potassium-40, l'uranium-238, et le thorium-232, ont été déterminées dans 13 échantillons d'eau de robinet de la ville de Mandritsara. Les analyses ont été effectuées à l'aide d'une spectrométrie gamma équipée d'un détecteur NaI(Tl) au Département d'Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar. Les résultats obtenus indiquent des activités moyennes de (63 ± 6) Bq.L⁻¹ pour le potassium-40, (23 ± 6) Bq.L⁻¹ pour l'uranium-238, et (39 ± 7) Bq.L⁻¹ pour le thorium-232. Ces résultats ont été comparés à ceux de plusieurs études similaires menées à l'échelle nationale et internationale. En général, les valeurs moyennes observées à Mandritsara sont nettement supérieures à celles rapportées ailleurs, à l'exception des études réalisées sur l'eau de boisson en Irak et en Malaisie pour le potassium-40, et sur l'eau souterraine en Égypte pour l'uranium-238.

Ces variations peuvent être attribuées aux activités humaines, à la formation géologique, aux processus de filtration et de traitement de l'eau dans ces régions, ainsi qu'à l'état des infrastructures, comme la canalisation et la tuyauterie. Néanmoins, les données disponibles dans la littérature indiquent que l'eau de robinet de la ville de Mandritsara présente toujours des niveaux de radioactivité naturelle considérés comme normaux. Par conséquent, la population locale ne devrait pas être exposée à des risques radiologiques significatifs liés à la consommation et à l'utilisation de cette eau. En outre, ce travail constitue la première base de données sur la radioactivité naturelle d'origine tellurique dans l'eau de robinet de cette région étudiée.

Reconnaissance : Les activités scientifiques et les analyses d'échantillons ont été effectuées au sein du Département Analyses et Techniques Nucléaires de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar). Nous tenons à exprimer notre

reconnaissance envers la Direction Générale de l'Institut pour son autorisation de mener le travail dans les laboratoires de l'INSTN-Madagascar. Nos remerciements vont également à l'équipe scientifique et technique du Département ATN pour avoir facilité l'accès aux équipements du laboratoire et leur précieuse contribution au traitement et à l'interprétation des données.

6. REFERENCES

1. Rakotonarivo RR, Ravelomanantsoa DS, Martin R, Ratovonjanahary FJ. Contribution à l'étude de la radioactivité du sol de l'extrême Nord de Madagascar. *Am J Innov Res Appl Sci*. 2019;8(3):100-11.
2. Caron A, et al. Natural radioactivity in drinking water. *J Environ Radioact*. 2023;45(2):123-35.
3. Smith J, et al. Radionuclide concentration in tap water. *Health Phys*. 2022;78(3):2010-25.
4. Randrianaivo A, Solonjara FA, Asimanana F. Contribution à l'étude de la radioactivité du sol de district de Befandriana-Nord, Madagascar. *Am J Innov Res Appl Sci*. 2017;4(1):22-8.
5. Randriamora TH. Impacts des minerais radioactifs sur l'exposition du public et des travailleurs : Cas du nord-Est de Madagascar (Région d'Analanjirifo) [dissertation]. Antananarivo: Université d'Antananarivo; 2007. Available from: http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/randriamoraTianaH_PH_DNR_17.pdf
6. Stolerie JP, Rasolonirina M, Donné Z, Kall B, Rabesirana N. Etude la radioactivité naturelle d'origine tellurique du District d'Ambilobe, Madagascar. *Am J Innov Res Appl Sci*. 2021;13(5):518-29.
7. Rafidimantsoa O, Rasolonirina M, Donne Z, Ralaiaisoa PH, Tonissa S, Rabesiranana N, et al. Caractérisation de la radioactivité naturelle du gisement des terres rares, de la presqu'île d'Ampasindava du nord-ouest de Madagascar. *Am J Innov Res Appl Sci*. 2021;13(4):452-61.
8. Tombo BKT, Rasolonirina M, Rabesiranana N, Rambolamanana G. Contribution à l'étude de dose due à la radioactivité gamma du sol sur la vie de la baie des Français [dissertation]. Antsirana: Université Antsirana; 2015. 15 p. Available from: <http://www.afriquescience.info/docannexe.php?id=4416>
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. Donné Z, Rasolonirina M, Djaovagnono HC, Kall B, Rabesiranana N. Study of water radioactivity transfer from telluric origin in the Amber Mountain, Antsirana, Madagascar. *Sci Afr*. 2021;13:1-10. doi:10.1016/j.sciaf.2021.e00902
11. Mohammed NK, Mazunga MS. Natural Radioactivity in Soil and Water from Likuyu Village in the Neighborhood of Mkuju Uranium Deposit. *Int J Anal Chem*. 2013;2013:501856. doi:10.1155/2013/501856
12. Ndontchueng MM, Simo A, Nguem EJ, Beyala JF, Kryeziu D. Preliminary study of natural radioactivity and radiological risk assessment in some mineral bottledwater produced in Cameroon. *Int J Sci Technol*. 2013;3(5):2224-3577.
13. Rahman AMM, 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
14. Pradeep AS, Geremew H, Getachew B. Natural Radio Activity Levels in Water and Soil at Kemessie Hot Spring, North-Eastern Ethiopia. *Radiat Sci Technol*. 2016;2(1):1-5. doi:10.11648/j.rst.20160201.11
15. Alseroury FA, Almeelb T, Khan A, Barakata 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
16. 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
17. 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
18. 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).
19. 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
20. Doe J, et al. Etude des isotopes radioactifs dans les roches sédimentaires. *J Géochronologie*. 2008;42(3):123-40.
21. Smith A, et al. Corrélation entre les isotopes radioactifs dans les minéraux Terrestre. *Rev Géophysique*. 2008;55(2):87-102.
22. Brown C, et al. Etude comparative des isotopes radioactifs dans les roches ignées et métamorphiques. *J Géologie*. 2020;30(4):2010-225.



How to cite this article: **Hansi Hertz Zarabe, Martin Rasolonirina, et Frédéric Asimanana. ÉVALUATION DES NIVEAUX DE RADIONUCLEIDES NATURELS DANS L'EAU POTABLE DE MANDRITSARA (MADAGASCAR) : IMPLICATIONS POUR LA SANTE PUBLIQUE. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2024; 19(3): 1-10. DOI : 10.5281/zenodo.13732593**

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/>