Afrique SCIENCE *29(5) (2026) 1 - 17*
ISSN 1813-548X, http://www.afriquescience.net

Évaluation radiologique des eaux de puits de Mandritsara, Madagascar

Hansi Hertz ZARABE[1*], Jean Remi RANDRIANTSIVERY[2], Frédéric ASIMANANA[1] et Martin RASOLONIRINA[3]

[1] Université d'Antsiranana, Faculté des Sciences, Laboratoire Métrologie Nucléaire et Environnement, BP 0 201, Antsiranana, Madagascar
[2] Université de Toamasina, Faculté des Sciences et Technologie, BP591, Toamasina, Madagascar
[3] Institut National des Sciences et Techniques Nucléaire de Madagascar (INSTN-Madagascar), Département Analyses et Techniques Nucléaires, BP 3907, Antananarivo, Madagascar

(Reçu le 05 Août 2026 ; Accepté le 21 Septembre 2026)

* Correspondance, courriel : *hertzzarabe@gmail.com*

Résumé

La présence de radionucléides naturels dans les eaux souterraines constitue une préoccupation croissante en matière de santé publique, en raison de leur contribution potentielle à l'exposition interne des populations par ingestion. Dans le district de Mandritsara (Madagascar), où les eaux de puits représentent l'une des principales sources d'approvisionnement en eau potable, les données relatives à la radioactivité naturelle demeurent limitées. La présente étude vise à évaluer les activités spécifiques du ^{40}K, de la famille de l'^{238}U et de la famille du ^{232}Th dans les eaux de puits, ainsi qu'à estimer les doses efficaces annuelles associées à leur ingestion. Onze (11) échantillons d'eau de puits ont été prélevés dans différents Fokontany de la Commune Urbaine de Mandritsara entre le 22 et le 26 décembre 2021. Les activités spécifiques ont été déterminées par spectrométrie gamma à l'aide d'un détecteur NaI(Tl) 3''x3'', après établissement de l'équilibre séculaire des radionucléides. Les doses efficaces annuelles ont été calculées conformément aux recommandations de l'UNSCEAR et de la Commission Internationale de Protection Radiologique (ICRP). Les activités spécifiques moyennes mesurées sont de 59 $\pm$ 7 Bq.L^{-1} pour le ^{40}K, 21 $\pm$ 5 Bq.L^{-1} pour la famille de l'^{238}U et 34 $\pm$ 5 Bq.L^{-1} pour la famille du ^{232}Th. Le ^{40}K constitue le radionucléide prédominant dans l'ensemble des échantillons. Les doses efficaces annuelles moyennes dues à l'ingestion des eaux de puits sont estimées à 4,2 $\pm$ 0,6 mSv.an^{-1} pour les enfants et 4,6 $\pm$ 0,7 mSv.an^{-1} pour les adultes. Ces valeurs sont supérieures aux niveaux de référence recommandés pour l'eau destinée à la consommation humaine. Cette étude constitue la première évaluation radiologique des eaux de puits du district de Mandritsara. Les résultats obtenus fournissent des données de référence utiles pour la surveillance de la radioactivité naturelle des ressources en eau et soulignent la nécessité d'études complémentaires afin de mieux caractériser le risque radiologique et d'orienter les stratégies de gestion de la qualité des eaux destinées à la consommation.

Mots-clés : *radioactivité naturelle, eaux de puits, spectrométrie gamma, dose efficace annuelle, Mandritsara.*

Abstract

Radiological assessment of well water in Mandritsara district (Madagascar) using gamma spectrometry

The presence of natural radionuclides in groundwater has become an increasing public health concern due to their potential contribution to internal radiation exposure through water ingestion. In the Mandritsara district (Madagascar), where well water is one of the main sources of drinking water supply, data on natural radioactivity remain limited. The present study aimed to determine the specific activities of ^{40}K, the ^{238}U decay series and the ^{232}Th decay series in well water and to estimate the annual effective doses associated with their ingestion. A total of eleven (11) well water samples were collected from different Fokontany of the Mandritsara Urban Municipality between 22 and 26 December 2021. The specific activities were determined by gamma-ray spectrometry using a 3''x3'' NaI(Tl) detector after allowing secular equilibrium to be established between the radionuclides and their short-lived progeny. The annual effective doses were calculated according to the recommendations of UNSCEAR and the International Commission on Radiological Protection (ICRP). The mean specific activities obtained were 59 $\pm$ 7 Bq.L^{-1} for ^{40}K, 21 $\pm$ 5 Bq·L^{-1} for the ^{238}U decay series and 34 $\pm$ 5 Bq.L^{-1} for the ^{232}Th decay series. Among the radionuclides investigated, ^{40}K was the predominant contributor in all samples. The average annual effective doses due to the ingestion of well water were estimated at 4.2 $\pm$ 0.6 mSv.yr^{-1} for children and 4.6 $\pm$ 0.7 mSv.yr^{-1} for adults. These values exceed the reference levels recommended for drinking water intended for human consumption. This study represents the first radiological assessment of well water in the Mandritsara district. The results provide baseline data for the monitoring of natural radioactivity in groundwater resources and highlight the need for further investigations to better characterize the radiological risk and to support water quality management strategies for drinking water supplies.

Keywords : *natural radioactivity, well water, gamma-ray spectrometry, annual effective dose, Mandritsara.*

1. Introduction

La radioactivité présente dans l'environnement est principalement d'origine naturelle, bien qu'elle puisse également résulter d'activités anthropiques telles que les applications médicales, industrielles, minières ou les retombées des essais nucléaires et des accidents nucléaires [1, 2]. Les radionucléides naturels, dits primordiaux, sont présents depuis la formation de la Terre. Parmi eux, les plus importants sur le plan radiologique sont le potassium-40 (^{40}K), l'uranium-238 (^{238}U) et le thorium-232 (^{232}Th), qui contribuent de manière significative à l'exposition naturelle des populations aux rayonnements ionisants [3, 4]. Dans les eaux souterraines, la radioactivité naturelle résulte principalement des interactions entre l'eau et les formations géologiques traversées. Les processus d'altération, de dissolution, de lessivage et d'échange ionique favorisent la migration de certains radionucléides depuis les roches et les minéraux vers les aquifères. Les concentrations observées dépendent notamment de la nature lithologique, des conditions hydrogéologiques, du pH, du potentiel d'oxydoréduction, de la minéralisation des eaux ainsi que du temps de résidence dans l'aquifère [2, 5]. L'uranium est un élément naturellement présent dans la croûte terrestre, essentiellement sous les isotopes ^{238}U (99,27 %), ^{235}U (0,72 %) et ^{234}U (0,0055 %). Sa mobilité dans les eaux souterraines dépend fortement des conditions géochimiques, en particulier du potentiel d'oxydoréduction et de la présence de ligands tels que les carbonates, susceptibles de favoriser sa mise en solution. Les concentrations en uranium dans les eaux naturelles restent généralement faibles : elles sont de l'ordre de 2 à 3µ g.L^{-1} dans l'eau de mer et inférieures à 10 µg.L^{-1} dans la majorité des eaux douces, bien que des teneurs plus élevées puissent être observées dans les régions riches en formations granitiques, phosphatées ou uranifères [2, 5]. Le thorium-232, également radionucléide primordial, est environ trois à quatre fois plus

abondant que l'uranium dans la croûte terrestre. Toutefois, sa très faible solubilité limite fortement sa migration vers les eaux souterraines. En revanche, certains radionucléides issus de sa chaîne de désintégration, notamment le radium-228 (^{228}Ra), peuvent être plus mobiles et contribuer de manière significative à la radioactivité des eaux destinées à la consommation humaine [3, 5]. Le potassium-40 constitue également un radionucléide primordial largement distribué dans l'environnement. Isotope radioactif naturel du potassium, il représente environ 0,0117 % du potassium total et est présent dans les sols, les roches, les eaux ainsi que les organismes vivants. En raison de sa grande abondance dans les minéraux potassiques, il contribue de manière importante au rayonnement gamma naturel et à l'exposition interne des populations [3, 5]. Dans les formations géologiques, les radionucléides parents et leurs descendants sont généralement en équilibre séculaire. Toutefois, cet équilibre peut être rompu lors des processus de dissolution, de transport et de précipitation dans les aquifères, en raison des propriétés physico-chimiques spécifiques de chaque radionucléide. Les activités des radionucléides présents dans les eaux peuvent ainsi différer sensiblement de celles observées dans les roches, ce qui justifie la réalisation d'analyses spécifiques pour évaluer la qualité radiologique des ressources en eau [1, 2]. L'eau de boisson constitue l'une des principales voies d'exposition interne aux radionucléides naturels. Afin de protéger la santé publique, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande une surveillance régulière de la qualité radiologique des eaux destinées à la consommation humaine, notamment dans les régions où le contexte géologique est susceptible de favoriser une mobilisation des radionucléides naturels [5]. De nombreuses études ont ainsi été consacrées à l'évaluation de la radioactivité naturelle des eaux souterraines dans différentes régions du monde, mettant en évidence une forte variabilité spatiale liée aux caractéristiques géologiques locales. A Madagascar, les informations relatives à la radioactivité naturelle des eaux souterraines demeurent encore limitées, en particulier dans le district de Mandritsara, où les populations s'approvisionnent majoritairement en eau à partir de puits traditionnels. Le contexte géologique diversifié de cette région est susceptible d'influencer les concentrations en radionucléides naturels dans les eaux destinées à la consommation. Dans cette perspective, la présente étude a pour objectif d'évaluer la qualité radiologique des eaux de puits du district de Mandritsara en déterminant les activités spécifiques des radionucléides naturels ^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th par spectrométrie gamma à l'aide d'un détecteur NaI(Tl), puis d'estimer les doses efficaces annuelles dues à l'ingestion de ces eaux. Les résultats obtenus fourniront des données de référence utiles à la surveillance radiologique des ressources en eau souterraine à Madagascar et contribueront à l'élaboration de stratégies de gestion visant à protéger durablement la santé des populations.

2. Matériel et méthodes

2-1. Zone d'étude

Le district de Mandritsara est situé dans la partie orientale de la région Sofia, au nord-ouest de Madagascar, au sein de la province de Mahajanga. La Commune Urbaine de Mandritsara est localisée entre les latitudes 15°49'29''S et 15°51'33''S, et les longitudes 48°49'46'E à 48°51'01''E, à une altitude moyenne d'environ 322 mètres. Elle est composée de treize (13) fokontany, à savoir Andohomby, Ambalabe, Ambalakompania, Ambalanantsotry, Antsahabe, Ambohimahavelona, Ambohimandroso, Antanantsimihety, Antanandrenivelo, Ampitantsimo, Mandritsara Ambony, Mandritsara Vaovao et Maroamboka ***(Figure 1)***. La Commune Urbaine de Mandritsara contient 31135 populations (INSTAT-RGPH3, 2018). Selon le troisième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH-3), la Commune comptait 31135 habitants en 2018 [6]. La région est soumise à un climat tropical caractérisé par une saison pluvieuse (novembre à avril) et une saison sèche (mai à octobre), favorisant la recharge des aquifères pendant la période des pluies. Le substratum géologique appartient au socle cristallin précambrien de Madagascar, dominé par des formations métamorphiques et

granitoïdes susceptibles de renfermer des radionucléides naturels tels que ^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th. Les eaux souterraines circulent principalement dans les horizons d'altération et les fractures du socle, où les interactions eau-roche peuvent contrôler les concentrations en radionucléides naturels. En l'absence d'un réseau d'adduction d'eau potable couvrant l'ensemble de la Commune, la population utilise principalement les eaux de puits pour la consommation domestique. Cette dépendance aux ressources souterraines justifie l'évaluation de leur qualité radiologique.

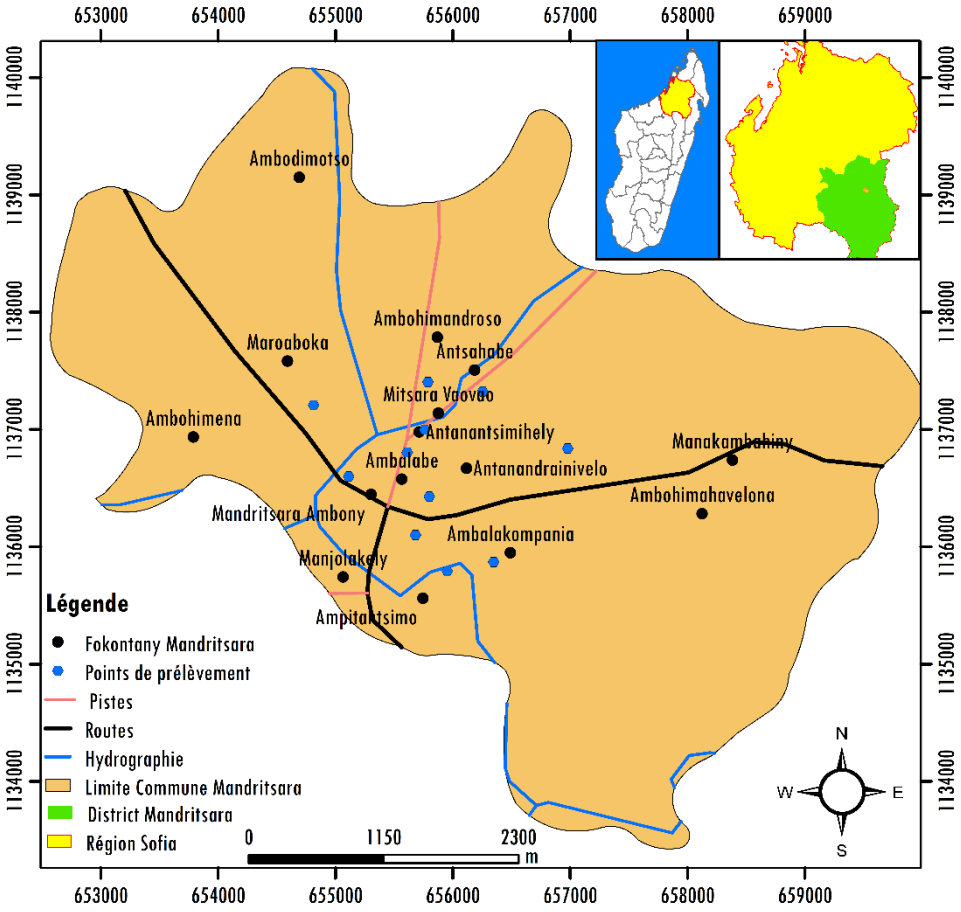


Figure 1 : *Localisation de la zone d'étude*

2-2. Prélèvement et préparation des échantillons

Les prélèvements ont été réalisés du 22 au 26 décembre 2021dans la Commune Urbaine de Mandritsara. Au total, onze (11) échantillons d'eau de puits ont été collectés dans différents Fokontany. Les points de prélèvement ont été sélectionnés dans les secteurs les plus densément peuplés, où les eaux de puits constituent la principale source d'eau destinée à la consommation humaine. Les coordonnées géographiques de chaque puits ont été relevées à l'aide d'un système de positionnement global (GPS), puis consignées avec le code et la localisation correspondants ***(Tableau 1)***.

Tableau 1 : *Localisation géographique des puits échantillonnés*

Code	Fokontany	Longitude	Latitude
EPM02	Antsahabe	48°49'47,9''S	15°50'11,4''E
EPM03	Antanantsimihety	48°49'31,5''S	15°50'22,2''E
EPM04	Ambalanantsotry	48°50'12,5''S	15°50'26,9''E
EPM05	Ampitantsimo	48°49'38,4''S	15°51'1,3''E
EPM06	Mandritsara Ambony	48°49'9,9''S	15°50'35,4''E
EPM07	Ambohimandroso	48°49'32,2''S	15°50'8,9''E
EPM08	Andohomby	48°49'26,5''S	15°50'28,5''E
EPM09	Ambalabe	48°49'29,1''S	15°50'51,4''E
EPM10	Maroamboka	48°48'59,5''S	15°50'15,7''E
EPM11	Ambalakompania	48°49'51,7''S	15°50'58,6''E
EPM12	Antandrenivelo	48°49'33,0''S	15°50'40,7''E

Chaque échantillon a été prélevé dans une bouteille en plastique de 500 mL, préalablement nettoyée, puis soigneusement codée et étiquetée afin d'assurer sa traçabilité et de prévenir tout risque de contamination pendant le transport vers le laboratoire de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar). Au laboratoire, les échantillons ont été homogénéisés, puis transférés dans des porte-échantillons cylindriques de 200 cm^3, hermétiquement fermés afin d'éviter toute perte de radon. Ils ont ensuite été conservés pendant trois semaines pour permettre l'établissement de l'équilibre séculaire entre le radium-226 (^{226}Ra) et ses descendants à vie courte, condition nécessaire à la détermination des activités de la famille de l'^{238}U par spectrométrie gamma. La masse de chaque échantillon a été mesurée à l'aide d'une balance électronique de précision (Kern PBJ 6200-2M) et utilisée pour le calcul des activités spécifiques des radionucléides naturels, exprimées en $Bq.L^{-1}$.

2-3. Mesure des activités spécifiques

Les activités spécifiques des radionucléides naturels ont été déterminées par spectrométrie gamma, une technique non destructive largement utilisée pour l'analyse radiologique des échantillons environnementaux [7, 8]. Son principe repose sur la détection des photons gamma émis lors de la désintégration radioactive. Les photons interagissent avec le cristal scintillateur, produisant des impulsions lumineuses dont l'amplitude est proportionnelle à leur énergie. Après conversion en signaux électriques et traitement par un analyseur multicanal, un spectre gamma est obtenu, représentant le nombre de photons détectés en fonction de leur énergie. L'identification des radionucléides est réalisée par comparaison des pics d'absorption totale avec les énergies caractéristiques des émissions gamma de chaque radionucléide. Les mesures ont été effectuées à l'aide d'un détecteur à scintillation NaI(Tl) de 3''x3'' (ORTEC, série 905-4), présentant une résolution énergétique de 7,5 % pour la raie de 1332,5 keV du ^{60}Co. Le détecteur était couplé à un préamplificateur, à un analyseur multicanal (MCA) intégrant les modules de haute tension, d'amplification et de conversion analogique-numérique, ainsi qu'au logiciel ScintiVision pour l'acquisition et le traitement des spectres. Afin de réduire le rayonnement de fond ambiant, l'ensemble de la chaîne de mesure était installé dans un blindage constitué de 10 cm de plomb, doublé intérieurement d'une mince couche de cuivre destinée à limiter le rayonnement X induit par le plomb [8, 9]. Avant les mesures, la chaîne spectrométrique a été étalonnée en énergie et en efficacité à l'aide des matériaux de référence certifiés RGK-1, RGU-1 et RGTh-1 fournis par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA). Ces matériaux contiennent des activités certifiées de ^{40}K, de la famille de l'^{238}U et de la famille du ^{232}Th, permettant de vérifier les performances de la chaîne de mesure et de déterminer les coefficients d'étalonnage nécessaires au calcul des activités spécifiques. Les caractéristiques des matériaux de référence utilisés sont présentées dans le ***Tableau 2***.

Tableau 2 : *Caractéristiques des matériaux de référence RK-1, RG-1 et 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
Tenneur(µg/g)	K	448000 ± 3000	<20	0,02 ± 0,01
	U	<0,001	400 ± 1	6,3 ± 0,4
	Th	<0,01	<1	800 ± 16

L'étalonnage en énergie consiste à établir la relation linéaire entre le numéro de canal *C* du spectre et l'énergie *E* (keV) correspondante, selon une régression obtenue par la méthode des moindres carrés. ***L'Équation*** obtenue correspond à une fonction linéaire, donnée par la relation :

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

où, a et b sont les coefficients à déterminer.

L'étalonnage en efficacité a été réalisé selon la méthode proposée par Rybach et améliorée par [10, 11], en utilisant trois régions d'intérêt centrées sur les principales raies gamma de ^{40}K (1460,8 keV), de ^{214}Bi (1764,5 keV), représentatif de la série de l'^{238}U, et de ^{208}Tl (2614,5 keV), appartenant à la série du ^{232}Th. Une fenêtre d'intégration comprise entre 10 et 15 % de la largeur du pic a été retenue afin de prendre en compte l'ensemble de la surface des pics photoélectriques ***(Figure 2)***.

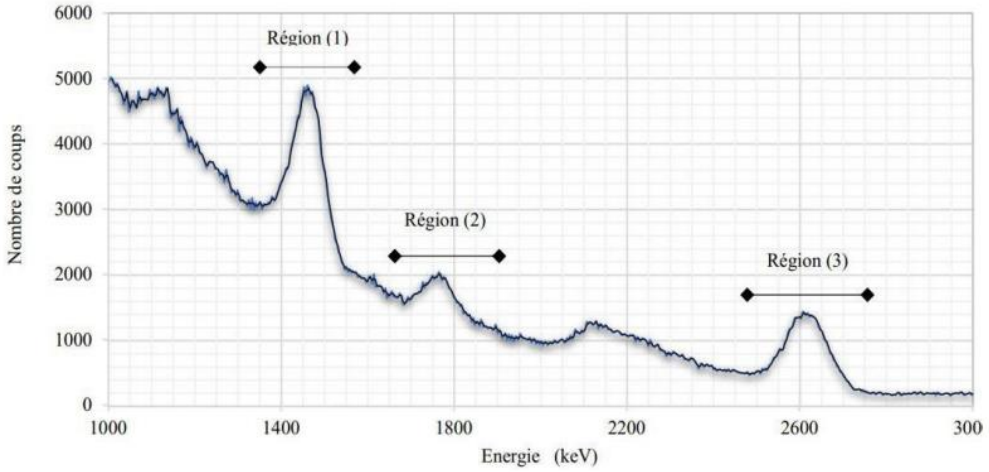


Figure 2 : *Trois régions d'intérêts utilisés*

A partir d'un spectre gamma, le taux de comptage net mesuré dans une région d'intérêt est directement lié à l'activité du radionucléide considéré dans le matériau de référence. Cette relation est exprimée par ***l'Équation (2)***:

$$R_{i,j} = \sum_{k=1}^{3} \varepsilon_{i,k} A_{k,j} \tag{2}$$

où, $A_{k,j}$: Activité spécifique du radionucléide k dans le matériau de référence j (Bq.kg^{-1}),
$A_{i,k}$: Constante d'étalonnage associée à la région d'intérêt i pour le radionucléide k,
$R_{i,j}$: Taux de comptage net dans la région d'intérêt i du matériau de référence j, donné par ***l'Équation*** *:*

$$R_{i,j} = \frac{N_{i,j}}{t_j} - B_i \quad (3)$$

où, B_i : Taux de comptage du bruit de fond dans la i^ème région d'intérêt (cps),
t_j : Temps de comptage du matériau de référence j.

Les constantes d'étalonnage $\varepsilon_{i,j}$ sont déterminées à partir des activités certifiées des matériaux de référence ***(Tableau 2)*** et des taux de comptage nets mesurés dans les différentes régions d'intérêt. Les activités spécifiques des radionucléides dans les échantillons, en utilisant la méthode matricielle de Rybach améliorée par Chiozzi et al. (2000), sont obtenues par :

$$A_k = \sum_{i=1}^{3} \alpha_{k,i} R_i \quad (4)$$

En développant ***l'Équation (4)***, on obtient :

$$\begin{cases} A_K = \alpha_{1,1} R_K + \alpha_{1,2} R_U + \alpha_{1,3} R_{Th} \\ A_U = 0 + \alpha_{2,2} R_U + \alpha_{2,3} R_{Th} \\ A_{Th} = 0 + \alpha_{3,2} R_U + \alpha_{3,3} R_{Th} \end{cases} \quad (5)$$

où, $\alpha_{i,j}$ représente les éléments de la matrice inverse des constantes d'étalonnage $\varepsilon_{i,j}$.

Chaque échantillon a été compté pendant 43 200 s (12 h), durée choisie afin d'améliorer la statistique de comptage et de réduire les incertitudes de mesure. Les activités spécifiques ont ensuite été calculées à partir des taux de comptage nets enregistrés dans les différentes régions d'intérêt, des coefficients d'étalonnage déterminés avec les matériaux de référence et des paramètres géométriques des échantillons. Les résultats sont exprimés en becquerels par litre ($Bq.L^{-1}$). Les émissions radioactives étant des phénomènes aléatoires, le nombre de coups enregistrés par le détecteur suit une distribution de Poisson. Par conséquent, toute mesure est affectée d'une fluctuation statistique dont l'importance diminue lorsque le temps de comptage augmente. L'estimation des incertitudes de mesure est donc indispensable pour apprécier la fiabilité des activités spécifiques déterminées. Pour un nombre de coups (N), l'écart-type statistique est donné par :

$$u^2 = \sqrt{N} \quad (6)$$

Les incertitudes associées aux activités spécifiques des radionucléides naturels sont ensuite calculées par propagation des incertitudes, en appliquant le développement limité au premier ordre de la fonction reliant l'activité aux différentes variables expérimentales. Elles sont exprimées par la ***Relation (7)*** ci-après :

$$u(A_k) = \sqrt{\sum_{i=1}^{3} \alpha_{k,i}^2 u^2(R_i)} \quad (7)$$

où, A_k : Activité spécifique du radionucléide k,
$\alpha_{k,i}$: Elément de la matrice inverse des constantes d'étalonnage,
R_i : Taux de comptage net dans le i^ème région d'intérêt,
$u(R_i)$: Incertitude sur ce taux de comptage

La limite de détection (LD_n) de chaque radionucléide est déterminée à partir du taux de comptage du bruit de fond (B_i) dans la région d'intérêt, du temps de comptage (t_i) et des constantes d'étalonnage ($\varepsilon_{i,k}$) de la chaîne de mesure. Elle est calculée à l'aide de la ***Relation*** suivante :

$$LD_n = \frac{2\sqrt{2}}{\varepsilon_{i,k}} \cdot \sqrt{\frac{B_i}{t}} \quad (8)$$

où, B_i : Taux de comptage du bruit de fond dans la i^{ème} région d'intérêt,
t : Temps de comptage,
$\varepsilon_{i,k}$: Constante d'étalonnage associée au radionucléide k.

2-4. Évaluation de la dose efficace annuelle

L'exposition radiologique résultant de la consommation des eaux de puits a été évaluée à partir de la dose efficace annuelle par ingestion (DEA), calculée pour les enfants et les adultes. Cette dose dépend de l'activité spécifique des radionucléides présents dans l'eau, de la quantité d'eau consommée annuellement et du coefficient de dose par ingestion propre à chaque radionucléide [5, 12]. La dose efficace annuelle due à l'ingestion a été calculée à l'aide de la ***Relation (9)*** :

$$D_{eff} = A \times C \times Q \quad (9)$$

où, D_{eff} : Dose efficace annuelle (Sv.an^{-1}),
A : Activité spécifique du radionucléide dans l'eau (Bq.L^{-1}),
C : Coefficient de dose par ingestion du radionucléide considéré (Sv.Bq^{-1}),
Q : Consommation annuelle d'eau (L.an^{-1}).

Conformément aux recommandations de l'UNSCEAR (2000), les consommations annuelles d'eau retenues pour le calcul de la dose efficace sont de 350 L.an^{-1} pour les enfants (groupe d'âge de 10 ans) et de 500 L.an^{-1} pour les adultes. Les coefficients de dose par ingestion ont été adoptés selon les recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (ICRP Publication 119) et sont également repris dans les guides de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA) et l'Organisation Mondiale de la Santé (WHO). Pour les enfants, les coefficients de dose sont de 1,3x10^{-8} Sv.Bq^{-1} pour le ^{40}K, 6,8x10^{-8} Sv.Bq^{-1} pour l'^{238}U et 2,9x10^{-7} Sv.Bq^{-1} pour le ^{232}Th. Les coefficients correspondants pour les adultes sont respectivement de 6,2.10^{-9} Sv.Bq^{-1}, 4,5.10^{-8} Sv.Bq^{-1} et 2,3.10^{-7} Sv.Bq^{-1} [12]. L'évaluation de la dose efficace annuelle repose sur l'hypothèse que les eaux de puits constituent la principale source d'eau de boisson des populations étudiées et que les activités spécifiques des radionucléides restent constantes au cours de l'année. Les doses efficaces annuelles ont été calculées séparément pour les radionucléides ^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th, puis additionnées afin d'obtenir la dose efficace annuelle totale due à l'ingestion des eaux de puits.

3. Résultats

3-1. Activités spécifiques

Les activités spécifiques des radionucléides naturels ^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th mesurées dans les onze (11) échantillons d'eau de puits de la Commune Urbaine de Mandritsara sont présentées dans le ***Tableau 3***.

Tableau 3 : *Activités spécifiques des radionucléides naturels mesurées dans les eaux de puits des différents points de prélèvement*

Code	Activité spécifique (Bq. L^{-1})		
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th
EPM02	57 ± 6	25 ± 5	31± 5
EPM03	66 ± 8	24 ± 4	39 ± 7
EPM04	50 ± 5	17 ± 3	33 ± 6
EPM05	48 ± 5	16 ± 2	24 ± 5
EPM06	57 ± 6	26 ± 5	32 ± 6
EPM07	56 ± 6	24 ± 4	31± 5
EPM08	62 ± 7	23 ± 4	45 ± 7
EPM09	51± 6	19 ± 3	34 ± 6
EPM10	66 ± 8	20 ± 3	33 ± 6
EPM11	65 ±8	10 ± 2	37± 7
EPM12	66 ± 8	25 ± 5	37 ± 7
[Min-Max]	[48 - 66]	[10 - 26]	[24 - 45]
Moyenne ± σ	59 ± 7	21± 5	34 ± 5
Coefficient de variation	12%	24%	16%

σ : Ecart-type.

Les activités spécifiques du ^{40}K varient entre 48 ± 5 Bq.L^{-1} (EPM05) à 66 ± 8 Bq.L^{-1} (EPM03, EPM10 et EPM12), avec une valeur moyenne de 59 ± 7 Bq.L^{-1}, représentée par la ligne horizontale en pointillés rouges ***(Figure 3)***. La majorité des échantillons présentent des activités proches de cette moyenne, les écarts restants généralement compris dans les limites des incertitudes de mesure. Les échantillons EPM03, EPM08, EPM10, EPM11 et EPM12 présentent des activités supérieures à la moyenne, tandis que les échantillons EPM04, EPM05, EPM07 et EPM09 affichent des valeurs inférieures. Le faible coefficient de variation (12 %) traduit une répartition relativement homogène des activités du ^{40}K entre les différents points de prélèvement.

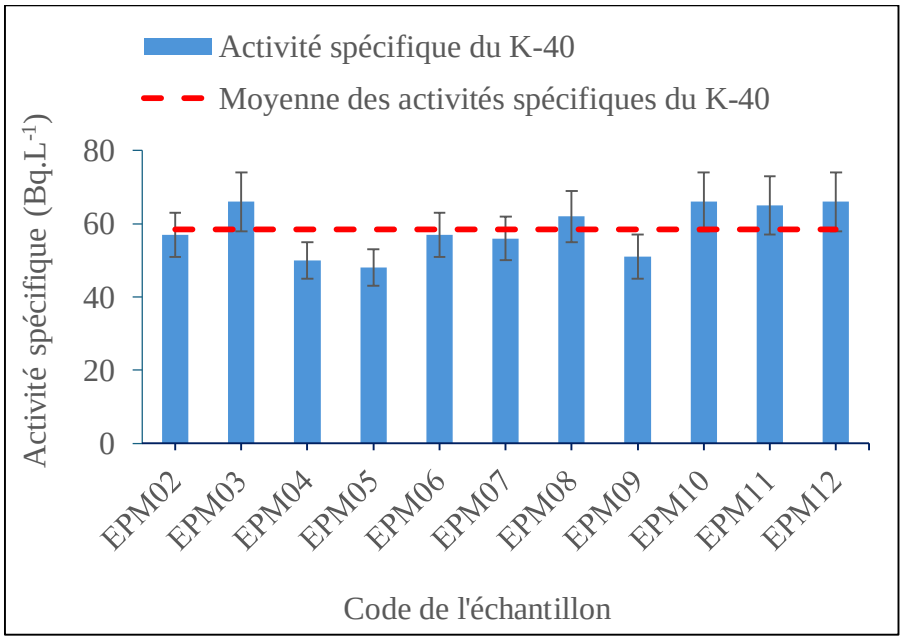


Figure 3 : *Distribution des activités spécifiques du ^{40}K*

Pour la famille de l'^{238}U, les activités spécifiques sont comprises entre 10 ± 2 et 26 ± 5 Bq.L^{-1}, avec une valeur moyenne de 21 ± 5 Bq.L^{-1} ***(Tableau 3)***. La figure 4 montre la répartition des activités spécifiques de l'^{238}U dans les onze échantillons collectés. L'activité maximale est observée dans l'échantillon EPM06, tandis que l'échantillon EPM11 présente la valeur la plus faible. Les échantillons EPM02, EPM03, EPM06, EPM07, EPM08 et EPM12 présentent des activités supérieures à la moyenne, alors que les échantillons EPM04, EPM05, EPM09, EPM10 et EPM11 affichent des valeurs inférieures ou proches de celle-ci. Le coefficient de variation de 24 % met en évidence une variabilité plus importante des activités de la famille de l'^{238}U que celles observées pour le ^{40}K et le ^{232}Th. La ***Figure 4*** présente la distribution des activités spécifiques des radionucléides appartenant à la famille de l'^{238}U dans les échantillons analysés.

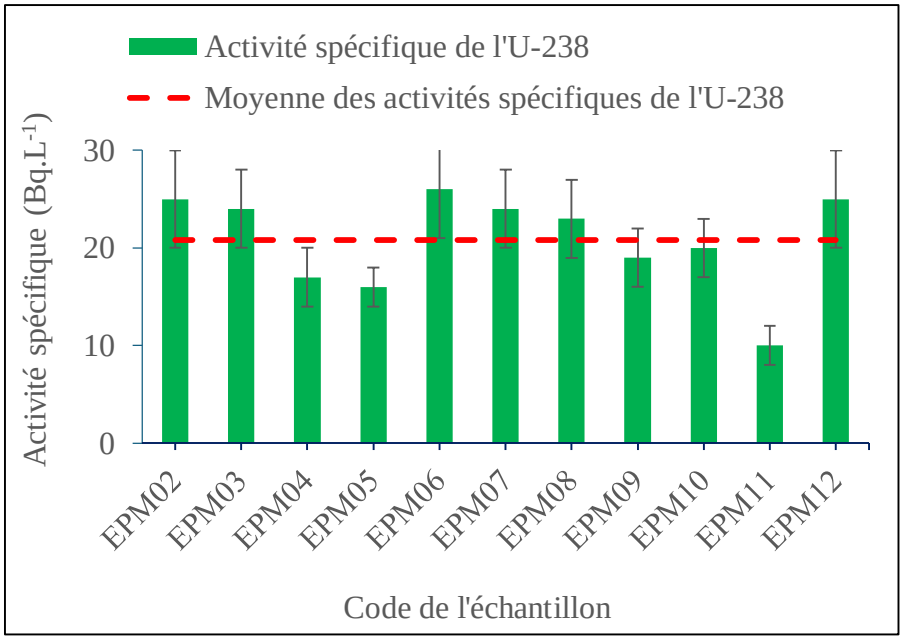


Figure 4 : *Distribution des activités spécifiques de la famille de l'^{238}U*

La ***Figure 5*** illustre la répartition des activités spécifiques de la famille du ^{232}Th dans les onze échantillons d'eau de puits. Les valeurs mesurées sont relativement homogènes autour de la moyenne (34 ± 5 Bq.L^{-1}), avec toutefois quelques écarts notables. L'activité spécifique la plus élevée est observée dans l'échantillon EPM08 (45 ± 7 Bq.L^{-1}), tandis que l'échantillon EPM05 présente la valeur la plus faible (24 ± 5 Bq.L^{-1}). Les échantillons EPM03, EPM08, EPM11 et EPM12 affichent des activités supérieures à la moyenne, alors que la majorité des autres échantillons présentent des valeurs proches ou légèrement inférieures à celle-ci. Le coefficient de variation de 16 % traduit une variabilité modérée des activités spécifiques du ^{232}Th entre les différents points de prélèvement.

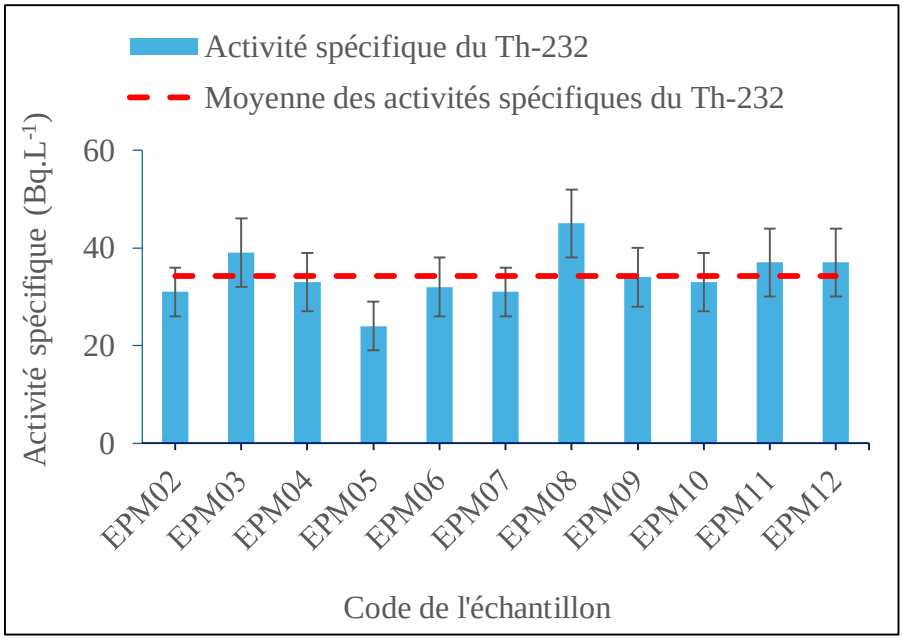


Figure 5 : *Distribution des activités spécifiques de la famille du ^{232}Th*

Dans l'ensemble des échantillons analysés, le ^{40}K présente les activités spécifiques les plus élevées, suivi du ^{232}Th puis de l'^{238}U. Les coefficients de variation montrent que les activités spécifiques du ^{40}K sont relativement homogènes d'un puits à l'autre, alors que celles de l'^{238}U présentent une variabilité plus marquée.

3-2. Analyse en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée afin d'examiner les relations entre les activités spécifiques des radionucléides naturels (^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th) et de visualiser la distribution des différents points de prélèvement. Les deux premiers axes factoriels (F1 et F2) expliquent 88,28% de la variance totale des données, dont 57,46% pour l'axe F1 et 30,83% pour l'axe F2, indiquant une bonne représentation de l'information par le plan factoriel ***(Figure 6)***. La ***Figure 6.a***, représentant le cercle des corrélations, montre que les trois radionucléides sont bien représentés sur le plan factoriel, leurs vecteurs étant proches du cercle de corrélation. Les vecteurs associés au ^{40}K et au ^{232}Th sont orientés dans une direction très voisine, traduisant une forte corrélation positive entre ces deux variables. En revanche, le vecteur de l'^{238}U est orienté différemment, avec une composante positive marquée sur l'axe F2, ce qui met en évidence un comportement distinct de celui du ^{40}K et du ^{232}Th sur le plan factoriel. La ***Figure 6.b*** présente le biplot de l'ACP, qui associe simultanément les variables et les observations. Les échantillons EPM03, EPM08 et EPM12 sont projetés dans la partie positive de l'axe F1, à proximité des vecteurs du ^{40}K et du ^{232}Th, tandis que les échantillons EPM02 et EPM06 sont davantage associés à la direction du vecteur de l'^{238}U. Les échantillons EPM04, EPM05 et EPM09 sont situés du côté négatif de l'axe F1, traduisant une moindre contribution des trois radionucléides à leur caractérisation. L'échantillon EPM11 se distingue par une projection négative sur l'axe F2, indiquant un comportement particulier par rapport aux autres points de prélèvement. Dans l'ensemble, l'ACP met en évidence une structuration des échantillons selon leurs activités spécifiques en radionucléides naturels et révèle une proximité entre les distributions du ^{40}K et du ^{232}Th, tandis que l'^{238}U présente une distribution plus indépendante sur le plan factoriel.

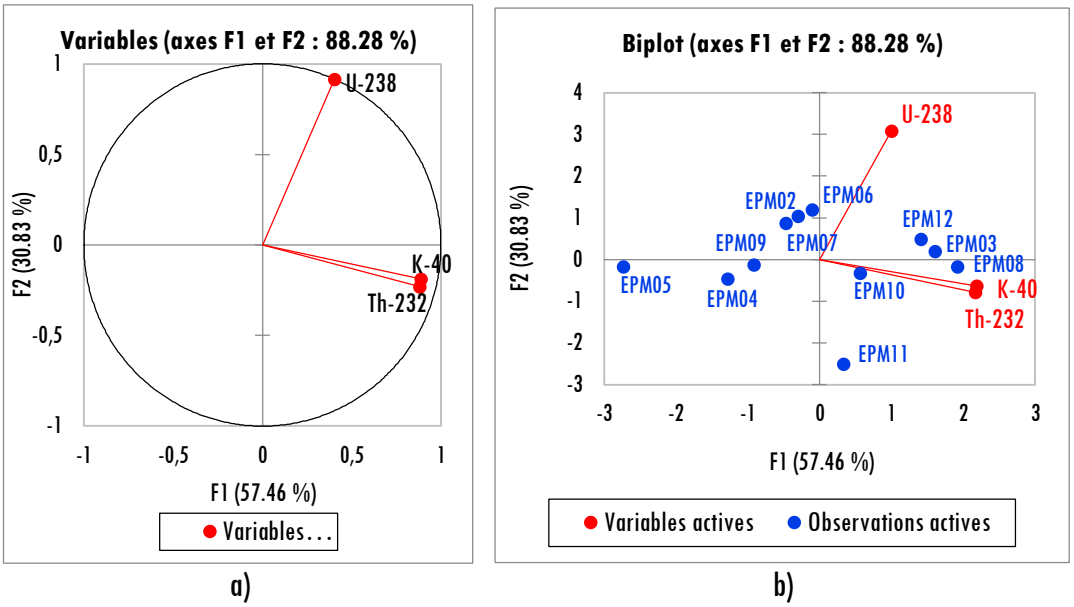


Figure 6 : *ACP des activités spécifiques de ^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th : a) cercle des corrélations ; b) biplot des variables et des points de prélèvement*

3-3. Comparaison des activités spécifiques avec les données de la littérature

Le ***Tableau 4*** présente une synthèse des activités spécifiques du ^{40}K, de la famille de l'^{238}U et de la famille du ^{232}Th mesurées dans différentes eaux naturelles et eaux destinées à la consommation, à Madagascar et dans plusieurs autres pays. Les activités spécifiques moyennes mesurées dans les eaux de puits de Mandritsara sont de 59 $Bq.L^{-1}$ pour le ^{40}K, 21 $Bq.L^{-1}$ pour la famille de l'^{238}U et 34 $Bq.L^{-1}$ pour la famille du ^{232}Th. Ces valeurs figurent parmi les plus élevées de celles rapportées pour les eaux souterraines étudiées à Madagascar. Elles sont notamment supérieures à celles observées à Antsiranana, dans le Nord-Est de Madagascar et à Antsohihy, quel que soit le type d'eau considéré. A l'échelle internationale, les activités spécifiques mesurées à Mandritsara sont également supérieures à celles rapportées pour les eaux de puits ou de surface du Ghana, de la Tanzanie, de l'Arabie Saoudite, du Yémen, de l'Ethiopie et du Cameroun. En revanche, certaines eaux de boisson analysées en Irak et en Malaisie. Pour les familles de l'^{238}U et du ^{232}Th, les activités spécifiques obtenues à Mandritsara demeurent globalement supérieures à celles rapportées dans la majorité des études recensées, bien que quelques valeurs maximales observées dans certaines régions puissent atteindre ou dépasser les intervalles mesurés dans cette étude. Dans l'ensemble, le tableau 4 met en évidence une variabilité importante des activités spécifiques des radionucléides naturels selon les régions étudiées et les types d'eau analysés. Les valeurs obtenues à Mandritsara s'inscrivent dans les intervalles rapportés dans la littérature, tout en se situant parmi les plus élevées pour les radionucléides ^{238}U et ^{232}Th.

Tableau 4 : *Comparaison des activités spécifiques des radionucléides naturels dans différentes eaux rapportées dans la littérature*

Pays (Ville)	Type d'eau	Activité spécifique (Bq.L^{-1})			Référence
		^{40}K	^{238}U	^{232}Th	
Madagascar (Mandritsara)	Puits	59 [48 - 66]	21 [10 - 26]	34 [24 -45]	Présente étude
Madagascar (Antsiranana)	Puits	4,4 [3,7 - 6,8]	5,5 [1,9 - 7,8]	1,1 [0,6 – 2,3]	[13]
	Robinet	4,2 [2,6 - 8,0]	3,4 [1,5 - 9,0]	0,6 [0,3 - 1,0]	
Ghana	Puits, Rivière	7,8 [1,7 - 12,0]	0,5 [0,1 - 1,0]	0,4 [0,2 - 0,6]	[14]
Tanzanie	Rivière	10,1 [9,2 - 11,2]	2,4 [2,2 - 2,5]	1,9 [1,8 - 1,9]	[15]
Madagascar (Nord Est)	Puits, Rivière	17,9 [6,9 - 36,2]	9,2 [0,6 -19,5]	13,0 [3,4 - 17,7]	[16]
Madagascar (Antsohihy)	Robinet	17,9 [11,7 - 34,4]	6,7 [1,7 - 14,9]	6,0 [2,1 - 8,8]	[17]
Cammeroun	Minérale	0,11 [0,01 - 0,16]	0,02 [0,01 - 0,04]	0,04 [0,01 - 0,12]	[18]
Bangladesh	Minérale	18,3 [10,9 - 32,2]	3,3 [1,9 - 32,2]	6,4 [1,4 - 9,7]	[19]
Arabie saoudite	Souterraine	4,6 [1,5 - 8,9]	0,6 [0,1 - 1,6]	0,2 [0,5 - 0,7]	[20]
Yémen	Souterraine, Surface	34,9 [26,7 - 43,7]	3,0 [2,3 - 3,5]	0,7 [0,3 - 1,4]	[21]
Madagascar (Antsiranana)	Source	6,3 [3,8 - 8,8]	4,0 [2,2 - 5,7]	2,0 [0,6 - 3,3]	[22]
Ethiopie	Thermale	17,7 [10,6 - 24,3]	2,3 [1,2 - 3,9]	1,7 [0,7 - 2,7]	[23]
Irak	Boisson	129,9 [6,4 - 253,9]	12,9 [1,4 - 55,8]	6,0 [2,2 - 9,7]	[24]
Malaisie	Boisson	152 [53 - 222]	2,9 [0,6 - 8,6]	3,8 [0,7 - 7,0]	[25]

3-4. Doses efficaces annuelles

Les doses efficaces annuelles dues à l'ingestion des eaux de puits, calculées pour les enfants et les adultes, sont présentées dans le ***Tableau 5***. Pour les enfants, les doses efficaces annuelles varient de 3,0 ± 0,5 à 5,4 ± 0,7 mSv.an^{-1}, avec une valeur moyenne de 4,2 ± 0,6 mSv.an^{-1}. La dose la plus élevée est observée pour l'échantillon EPM08, tandis que la plus faible correspond à l'échantillon EPM05. Pour les adultes, les doses efficaces annuelles sont comprises entre 3,3 ± 0,6 et 5,9 ± 0,8 mSv.an^{-1}, avec une moyenne de 4,6 ± 0,7 mSv.an^{-1}. Comme pour les enfants, les valeurs maximale et minimale sont respectivement enregistrées pour les échantillons EPM08 et EPM05. Le coefficient de variation est de 14% pour les deux groupes d'âge, traduisant une dispersion relativement faible des doses entre les différents points de prélèvement. Les doses efficaces annuelles calculées pour les adultes sont légèrement supérieures à celles obtenues pour les enfants. Cette différence est liée aux hypothèses de calcul retenues, notamment à la consommation annuelle d'eau plus élevée considérée pour les adultes. En comparaison avec la valeur de référence de 0,1 mSv.an^{-1} recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé [5] et les *Basic Safety Standards* de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique [2] pour l'exposition due à la consommation d'eau potable, toutes les doses efficaces annuelles estimées dans cette étude sont supérieures à cette valeur guide. De même, elles excèdent la contrainte de dose de 1 mSv.an^{-1} recommandée par la Commission Internationale de Protection Radiologique [4] et les *International Basic Safety Standards* [2] pour l'exposition du public aux rayonnements ionisants. Ces résultats indiquent que, dans les conditions et les hypothèses retenues pour cette étude, l'ingestion des eaux de puits de la Commune Urbaine de Mandritsara est associée à des doses efficaces annuelles relativement élevées, mettant en évidence un niveau d'exposition radiologique qui mérite une attention particulière. Les implications de ces résultats seront discutées dans la section suivante.

Tableau 5 : *Estimation des doses efficaces annuelles dues à l'ingestion*

Code	Dose efficace annuelle (mSv.an-1)	
	Enfant	Adulte
EPM02	4,0 ± 0,5	4,3 ± 0,6
EPM03	4,8 ± 0,7	5,2 ± 0,8
EPM04	4,0 ± 0,6	4,3 ± 0,7
EPM05	3,0 ± 0,5	3,3 ± 0,6
EPM06	4,1 ± 0,6	4,4 ± 0,7
EPM07	4,0 ± 0,5	4,3 ± 0,6
EPM08	5,4 ± 0,7	5,9 ± 0,8
EPM09	4,1 ± 0,6	4,5 ± 0,7
EPM10	4,1 ± 0,6	4,4 ± 0,7
EPM11	4,3 ± 0,7	4,7 ± 0,8
EPM12	4,7 ± 0,7	5,0 ± 0,8
[Min-Max]	[3,0 - 5,4]	[3,3 - 5,9]
Moyenne ± σ	4,2 ± 0,6	4,6 ± 0,7
Coefficient de variation	14%	14%

4. Discussion

4-1. Niveaux de radioactivité observés

Les analyses par spectrométrie gamma ont mis en évidence la présence des radionucléides naturels ^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th dans l'ensemble des échantillons d'eau de puits prélevés dans la Commune Urbaine de Mandritsara. Les activités spécifiques mesurées révèlent une prédominance du ^{40}K, suivi du ^{232}Th et de la famille de l'^{238}U. Cette hiérarchie est cohérente avec l'abondance naturelle de ces radionucléides dans la croûte terrestre, le potassium étant un élément majeur constitutif de nombreux minéraux silicatés [2, 26]. L'analyse statistique montre une faible variabilité des activités spécifiques du ^{40}K (CV = 12 %) et du ^{232}Th (CV = 16 %), suggérant une répartition relativement homogène de ces radionucléides dans les eaux de puits étudiées. A l'inverse, la famille de l'^{238}U présente une dispersion plus importante (CV = 24 %), traduisant une plus grande hétérogénéité spatiale. Cette différence peut être attribuée aux propriétés géochimiques distinctes de l'uranium, dont la mobilité dans les eaux souterraines dépend fortement des conditions d'oxydoréduction, du pH, de la minéralisation et de la composition des aquifères [27, 28]. L'Analyse en Composantes Principales (ACP) met également en évidence une forte association entre le ^{40}K et le ^{232}Th, tandis que la famille de l'^{238}U présente un comportement plus indépendant. Cette organisation suggère que les radionucléides ne sont pas contrôlés par les mêmes mécanismes géochimiques au sein des aquifères de la zone d'étude.

4-2. Comparaison avec la littérature

La comparaison avec les études réalisées à Madagascar montre que les activités spécifiques mesurées à Mandritsara sont généralement supérieures à celles rapportées dans les régions d'Antsiranana, d'Antsohihy et du Nord-Est de Madagascar. Cette tendance concerne les trois radionucléides étudiés, mais elle est particulièrement marquée pour les familles de l'^{238}U et du ^{232}Th. A l'échelle africaine, les activités spécifiques observées dans les eaux de Mandritsara dépassent également celles rapportées au Ghana, en Tanzanie, au Cameroun et en Ethiopie. Des écarts comparables sont observés avec plusieurs études réalisées en Arabie saoudite, au Yémen et au Bangladesh. En revanche, certaines eaux embouteillées analysées en Irak et en Malaisie présentent des activités en ^{40}K supérieures à celles obtenues dans la présente étude. Ces différences peuvent être liées aux caractéristiques géologiques et hydrogéologiques propres à chaque région. Les teneurs en radionucléides naturels des eaux souterraines sont principalement influencées par la nature lithologique

des formations traversées, les processus d'altération des roches, le temps de résidence des eaux dans les aquifères ainsi que les conditions physico-chimiques qui contrôlent la dissolution et le transport des éléments radioactifs [5, 28]. Dans le cas de Mandritsara, les formations cristallines et métamorphiques présentes dans la région peuvent constituer une source potentielle de radionucléides naturels, bien que des investigations géochimiques complémentaires soient nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

4-3. Évaluation radiométrique

Les doses efficaces annuelles calculées à partir de l'ingestion des eaux de puits montrent des valeurs comprises entre 3,0 et 5,4 $mSv.an^{-1}$ chez les enfants et entre 3,3 et 5,9 $mSv.an^{-1}$ chez les adultes. Les doses estimées pour les adultes sont légèrement supérieures à celles des enfants en raison de l'hypothèse d'une consommation annuelle d'eau plus importante retenue dans cette étude. Comparées à la valeur de référence de 0,1 $mSv.an^{-1}$ recommandée par l'Organisation Mondiale de la Santé [5] pour l'eau destinée à la consommation humaine, les doses obtenues apparaissent nettement plus élevées. Elles dépassent également la limite de dose annuelle de 1 $mSv.an^{-1}$ recommandée par la Commission Internationale de Protection Radiologique [4] et reprise dans les normes fondamentales de sûreté de l'AIEA [2] pour l'exposition du public. Ces résultats indiquent que, selon les hypothèses de consommation adoptées et les activités spécifiques mesurées, l'ingestion régulière des eaux de puits de Mandritsara pourrait constituer une source non négligeable d'exposition aux rayonnements ionisants. Ils soulignent l'intérêt de poursuivre les investigations afin de confirmer ces niveaux d'exposition, d'identifier les radionucléides les plus contributifs et d'évaluer plus précisément le risque radiologique associé à la consommation de ces eaux.

4-4. Limites de l'étude et perspectives

Cette étude constitue une première évaluation de la radioactivité naturelle des eaux de puits de la Commune Urbaine de Mandritsara. Toutefois, plusieurs limites doivent être prises en considération lors de l'interprétation des résultats. Tout d'abord, le nombre d'échantillons analysés (11 puits) reste limité et ne permet pas de couvrir l'ensemble de la variabilité spatiale des ressources en eau souterraine de la région. Des campagnes de prélèvement plus étendues permettraient d'améliorer la représentativité des résultats. Par ailleurs, les mesures ont été réalisées à l'aide d'un détecteur NaI(Tl), dont la résolution énergétique est inférieure à celle d'un détecteur à germanium hyperpur (HPGe). Bien que le détecteur NaI(Tl) soit largement utilisé pour les études environnementales, l'utilisation d'un système HPGe permettrait une meilleure séparation des pics gamma et une détermination plus précise des activités spécifiques des radionucléides. Les prélèvements ayant été effectués au cours d'une seule campagne, les éventuelles variations saisonnières des activités spécifiques n'ont pas été prises en compte. Des mesures réalisées en saisons sèche et humide permettraient d'évaluer l'influence des conditions hydrologiques sur la radioactivité naturelle des eaux. Enfin, cette étude s'est limitée aux radionucléides ^{40}K, ^{238}U et ^{232}Th. Des travaux complémentaires pourraient intégrer d'autres radionucléides d'intérêt radiologique, notamment le ^{226}Ra, le ^{228}Ra et le ^{222}Rn, dont la contribution à la dose efficace par ingestion peut être significative dans certaines eaux souterraines. L'association des mesures radiologiques à des analyses hydrochimiques et géologiques détaillées contribuerait également à mieux comprendre les mécanismes contrôlant la présence et la mobilité des radionucléides naturels dans les aquifères de Mandritsara.

5. Conclusion

Cette étude a permis d'évaluer, pour la première fois, la radioactivité naturelle des eaux de puits de la commune urbaine de Mandritsara (Madagascar) à travers la détermination des activités spécifiques du ^{40}K, de la famille de l'^{238}U et de la famille du ^{232}Th par spectrométrie gamma. Les résultats montrent que le ^{40}K est le radionucléide prédominant dans l'ensemble des échantillons analysés, suivi du ^{232}Th et de l'^{238}U. Les analyses statistiques mettent en évidence une répartition relativement homogène des activités spécifiques, avec une variabilité plus marquée pour la famille de l'^{238}U. L'évaluation radiologique indique des doses efficaces annuelles moyennes de $4,2 \pm 0,6$ mSv.an^{-1} pour les enfants et de $4,6 \pm 0,7$ mSv.an^{-1} pour les adultes. Selon les hypothèses retenues dans cette étude, ces valeurs sont supérieures aux niveaux de référence recommandés par les organismes internationaux pour l'eau destinée à la consommation humaine, ce qui suggère que la qualité radiologique des eaux de puits étudiées mérite une attention particulière. Cette étude constitue une première base de données sur la radioactivité naturelle des eaux de puits dans le district de Mandritsara et apporte des informations utiles pour la surveillance radiologique des ressources en eau. Des investigations complémentaires portant sur un plus grand nombre de points de prélèvement, différentes périodes de l'année et d'autres radionucléides naturels, notamment le ^{226}Ra, le ^{228}Ra et le ^{222}Rn, permettront de consolider ces résultats et d'améliorer l'évaluation du risque radiologique associé à la consommation de ces eaux. Les résultats obtenus constituent ainsi une référence scientifique pour de futures études sur la radioactivité naturelle des eaux souterraines à Madagascar et peuvent contribuer à l'élaboration de programmes de surveillance radiologique destinés à protéger la santé des populations.

Références

[1] - UNSCEAR, "*Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation*". Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. New York: United Nations. Sales No. E.22.IX.1, ISBN: 978-92-1-139206-7, e-ISBN: 978-92-1-001003-0. (2020/2021)

[2] - IAEA, "*Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards*". General Safety Requirements Part 3 (GSR Part 3). SBN978-92-0-135310-8, (2014) https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm

[3] - UNSCEAR, *"Sources and Effects of Ionizing Radiation"*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, New York. ISBN / ISSN9789211422740, (2008) 463 p.

[4] - ICRP, "*The 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection "*. ICRP Publication 103. Annals of the ICRP, 37 (2007) 2-4, 1-332

[5] - WHO, *«Guidelines for Drinking-water Quality (4th ed., incorporating the second addendum)"*. Geneva: World Health Organization. ISBN: 978-92-4-004506-4, (2022) 614 p.

[6] - INSTAT, « *Troisième recensement général de la population et de l'habitation (RGPH-3) »*. Résultats globaux du RGPH-3 de 2018 de Madagascar, INSTAT-CCER, (2018) 279 p.

[7] - IAEA, *"Measurement of Radionuclides in Food and the Environment". Technical Reports Series No. 295(1989)*. International Atomic Energy Agency, Vienna, STI/DOC/010/295.ISBN92-0-125189-0, (1989) 169 p.

[8] - G. F. KNOLL, "*Radiation Detection and Measurement (4th ed.)"*. John Wiley & Sons. ISBN: 9780470131480, (2010) 830 p.

[9] - GILMORE, 2008. "*Practical Gamma-Ray Spectrometry (2nd ed.)"*. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd. ISBN: 978-0-470-86196-7

[10] - RYBACH, "*Radiometric techniques, In: Wainerdi, R. E., Uken, E. A., (Eds), Modern Methods of Geochemical Analysis, Plenum Press, New York"*, (1971)

[11] - P. CHIOZZI, P. DE FELICE, A. FAZIO, V. PASQUALE et M. VERDOYA, *"Laboratory application of NaI(Tl) g-ray spectrometry to studies of natural radioactivity in geophysics". Applied Radiation and Isotopes*, 53 (2000)1-2 : 127-132

[12] - ICRP, "*Compendium of Dose Coefficients based on ICRP Publication 60"*. ICRP Publication 119. Annals of the ICRP, 41 (Suppl.), (2012) 1 - 130.

[13] - M. ZAFIZARA DONNE, M. RASOLONIRINA, S. NIRINA, N. RABESIRANANA & B. KALL, "*Contribution des eaux de consommation à l'exposition dosimétrique dans la Ville d'Antsiranana, Madagascar. Afrique Science,* 17 (1) (2020) 137 - 151 p.

[14] - A. FAANU, J. H. EPHRAIM & E. O. DARKO, *"Assessment of public exposure to naturally occurring radioactive materials from mining and mineral processing activities of Tarkwa Goldmine in Ghana". Environ Monit Assess*, 180 (2011) 15 - 29.

[15] - NK. MOHAMMED et MS. MAZUNGA, "*Natural Radioactivity in Soil and Water from Likuyu Village in the Neighborhood of Mkuju Uranium Deposit". Int J Anal Chem.*, (2013) 501856. doi :10.1155/2013/501856

[16] - T. H. RANDRIAMORA, H. A. RAZAFINDRAMIANDRA, RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, S. D. RAVELOMANANTSOA, M. A. L. RALAIVELO, M. RASOLONIRINA, J. L. R. ZAFIMANJATO & H. F. RANDRIANTSEHENO, *"Determination of Natural Radioactivity in the North East Beach Sands of Madagascar". American Journal of Physics and Applications*, 5 (1) (2017) 6 - 12.

[17] - FELIX RANDRIA, MILSON BEMALAZA, MARTIN RASOLONIRINA, JEAN REMI RANDRIANTSIVERY et FREDERIC ASIMANANA, « *Evaluation de la radioactivité naturelle (α, β) dans l'eau de distribution de la JIRAMA : Cas de la Commune Urbaine d'Antsohihy, Madagascar ». Am. J. innov. res. appl. sci.*, 20 (1) (2025) 1 - 13.

[18] - MM. NDONTCHUENG, A. SIMO, EJM. NGUELEM, JF. BEYALA et D. KRY EZIU, *"Preliminary study of natural radioactivity and radiological risk assessment in some mineral bottled water produced in Cameroon". Int J Sci Technol.*, 3 (5) (2013) 2224 - 3577.

[19] - AMM. RAHMAN, MA. KABIR et K. ASADUZZAMAN, « *Assessment of Natural Radioactivity Levels and Radiological Significance of Bottled Drinking Water in Bangladesh*». *Am J Phys Appl.*, 3 (6) (2015) 203 - 7. doi: 10.11648/j.ajpa.20150306.13

[20] - FA. ALSEROURY, T. ALMEELB, A. KHAN, MA. BARAKATA, JH. AL-ZAHRANI et W. ALALI, "*Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water". J Radiat Res Appl Sci.*, 11 (4) (2018) 373 - 378. Doi: 10.1016/j.jrras.2018.07.004

[21] - AIA. EL-MAGEED, AEH. EL-GAMEL, AEB. ABBACY, S. HERB et II. SALE, "*Natural radioactivity of ground and hot spring water in some areas in Yemen"*. Desalination, 321 (2013) 28 - 31. doi: 10.1016/j.desal.2011.11.022

[22] - Z. DONNE, M. RASOLONIRINA, HC. DJAOVAGNONO, B. KALL et N. RABESERANANA, *"Study of water radioactivity transfer from telluric origin in the Amber Mountain, Antsiranana, Madagascar"*. Sci Afr., 13(2021): 1-10. doi: 10.1016/j.sciaf. 2021.e00902

[23] - AS. PRADEEP, H. GEREMEW et B. GETACHEW "*Natural Radio Activity Levels in Water and Soil at Kemessie Hot Spring, North-Eastern Ethiopia". Radiat Sci Technol.*, 2 (1) (2016) 1 - 5. doi: 10.11648/j.rst.20160201.11

[24] - AH. AL-MASHHADANI et AM. SALEH, *"Assessment of radioactivity and associated hazards in drinking water in Al-Sadar City, Baghdad". Int J Geol Agr Environ Sci.*, Vol. 2, (4) (2014)

[25] - B. ALMAYAHI, A. TAJUDDIN et M. JAAFAR, *"Radiation hazard indices of soil and water samples in Northern Malaysian Peninsula". Appl Radiat Isot*, Vol. 70, (11) (2012) 2652 - 60. doi: 10.1016/j.apradiso.2012.07.021

[26] - UNSCEAR, *"Sources and Effects of Ionizing Radiation"*. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation Report to the General Assembly. Sales No. E.00.IX.3, ISBN 92-1-142238-8, (2000)

[27] - D. LANGMUIR, *"Aqueous Environmental Geochemistry"*. Water chemistry, Environmental geochemistry. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. Boxid IA41176320 Col number: COL-2833. ISBN:0023674121, (1997)

[28] - IAEA, "*Climate Change and Nuclear Power 2013"*. Vienna, (2013)