

Contribution des eaux de consommation à l'exposition dosimétrique dans la Ville d'Antsiranana, Madagascar

**Zafizara DONNE^{1*}, Martin RASOLONIRINA², Sylvano NIRINA³, Naivo RABESIRANANA²
et Briant KALL¹**

¹ *Université d'Antsiranana, Faculté des Sciences, Département de Physique, Laboratoire de Métrologie Nucléaire et Environnement, BP 0 Antsiranana, Madagascar*

² *Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar), Département d'Analyses et Techniques Nucléaires, BP 4279 Antananarivo, Madagascar*

³ *Université d'Antsiranana, Faculté des Sciences, Département de Chimie, Laboratoire de Génie des procédés et Chimie Appliquée, BP 0 Antsiranana, Madagascar*

* Correspondance, courriel : zafizara1067@gmail.com

Résumé

La population de la ville d'Antsiranana du nord de Madagascar utilise les eaux de robinets et de puits pour leurs activités quotidiennes. Dans les systèmes hydrologiques, l'eau traverse divers matériaux géologiques pouvant contenir des niveaux élevés de la radioactivité naturelle appartenant au potassium-40, aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232. La distribution de ces radionucléides dans l'eau dépend essentiellement des caractéristiques géologiques locales du milieu environnant la source d'eau. Une exposition à long terme aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans l'eau de consommation peut avoir des effets négatifs sur la santé humaine. L'OMS recommande qu'une exposition due à l'ingestion des eaux de consommation ne doit pas dépasser le seuil $0,10 \text{ mSv.an}^{-1}$. L'objectif de ce travail est d'étudier les niveaux de la radioactivité des eaux de robinets et des eaux de puits ainsi que leurs impacts dosimétriques sur la population d'Antsiranana. L'approche méthodologique consiste à prélever 33 échantillons d'eau dans la ville d'Antsiranana. Ensuite, ces échantillons ont été analysés à l'aide d'un spectromètre gamma, muni d'un détecteur NaI(Tl). Les résultats des eaux de robinets montrent que la dose efficace annuelle vaut $(0,10 \pm 0,03) \text{ mSv.an}^{-1}$ pour le nourrisson, $(0,14 \pm 0,04) \text{ mSv.an}^{-1}$ pour l'enfant et l'adulte. En ce qui concerne les eaux de puits, les doses efficaces annuelles sont $(0,45 \pm 0,13) \text{ mSv.an}^{-1}$, $(0,66 \pm 0,20) \text{ mSv.an}^{-1}$ et $(0,73 \pm 0,23) \text{ mSv.an}^{-1}$ respectivement pour le nourrisson, l'enfant et l'adulte. Le seuil de qualité de l'eau suggère qu'il n'y a pas de risques potentiels pour la santé publique en utilisant les eaux de robinets de la ville d'Antsiranana, contrairement aux eaux de puits qui sont relativement élevées.

Mots-clés : *radioactivité naturelle, eau de robinets, eau de puits, spectromètre gamma, dose efficace annuelle.*

Abstract

Contribution of drinking water to dosimetric exposition in Antsiranana City, Madagascar

The population of Antsiranana City, northern Madagascar, uses tap water and well water for their daily consumption. In hydrological systems, water goes through various geological media which may contain high levels of natural radioactivity belonging to the potassium-40, the uranium-238 and the thorium-232 series. The distribution of these radionuclides in water depends essentially on the local geological and environmental conditions surrounding the water source. Long-term exposure to the uranium-238 and the thorium-232 series in drinking water can have negative effects on human health. WHO recommends that exposure due to ingestion of water intended for consumption should not exceed the threshold $0.10 \text{ mSv}\cdot\text{year}^{-1}$. The objective of this work is to study the radioactivity levels in the tap water and well water, and their dosimetric impact on the local population of Antsiranana. The methodological approach is to collect 33 water samples from Antsiranana City. Then, these samples were analyzed by gamma spectrometry system using NaI(Tl) detector. The tap water results show that the annual effective dose is $(0.10 \pm 0.03) \text{ mSv}\cdot\text{year}^{-1}$ for infant, $(0.14 \pm 0.04) \text{ mSv}\cdot\text{year}^{-1}$ for child and for adult. Regarding well water, the annual effective doses are $(0.45 \pm 0.13) \text{ mSv}\cdot\text{year}^{-1}$, $(0.66 \pm 0.20) \text{ mSv}\cdot\text{year}^{-1}$ and $(0.73 \pm 0.23) \text{ mSv}\cdot\text{year}^{-1}$ for infant, child and adult respectively. The water quality threshold suggests that there are no potential risks to public health by using tap water in Antsiranana city, contrary to well water which is relatively high.

Keywords : *natural radioactivity, tap water, well water, gamma spectrometry system, annual effective dose.*

1. Introduction

L'étude de la radioactivité environnementale à Madagascar est généralement motivée, d'une part, par la raison économique, d'autre part, par la raison liée à la santé humaine [1]. Cette dernière nous attire l'intérêt très particulier dans ce présent travail car elle touche la totalité de la population dans le milieu étudié. En raison de l'énergie relativement élevée des rayonnements gamma et des interactions possibles avec les éléments cellulaires, une exposition à long terme aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans l'eau de consommation peut avoir des effets négatifs sur la santé humaine [1-8]. Il est alors nécessaire d'avoir des données sur la distribution spatio-temporelle de ces radionucléides dans l'eau [1, 6]. Ces données permettent ensuite de prendre des mesures de prévention, de protection ou d'atténuation des conséquences néfastes d'une façon rationnelle [1]. Dans les systèmes hydrologiques, l'eau traverse divers matériaux géologiques pouvant contenir des niveaux élevés de radioactivité naturelle appartenant au potassium-40, aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232 [5]. Cette radioactivité apparaît à différents niveaux à Madagascar et ailleurs [1, 2, 9 - 11]. La distribution de l'activité de ces radionucléides dans l'eau dépend essentiellement des caractéristiques géologiques locales du milieu environnant la source d'eau [1 - 4, 10 - 12]. Les radionucléides naturels sont omniprésents dans la croûte terrestre et ils s'infiltrent dans l'eau naturelle et pénètrent dans le cycle de l'eau potable [4, 5]. L'eau joue un rôle très important et indispensable pour la santé humaine [13, 14]. La pollution de l'eau n'est pas forcément d'origine microbiologique ou physico-chimique mais elle peut être aussi de nature radiologique [14]. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande que l'exposition annuelle due à l'ingestion des eaux de consommation contenant des radionucléides naturels doit être inférieure ou égale au seuil de qualité de référence $0,10 \text{ mSv}\cdot\text{an}^{-1}$ [2, 14]. Des études sur la radioactivité des eaux de consommation ont été réalisées dans la région centrale et nord-est de Madagascar affirmant la présence des éléments radioactifs dans les eaux naturelles [1, 9]. La qualité de l'eau destinée à la

consommation humaine est l'un des paramètres les plus importants des études environnementales [5]. Par conséquent, la préoccupation sur la qualité radiologique des eaux de consommation de la ville d'Antsiranana, extrême nord de Madagascar, entraîne une demande des données disponibles sur la distribution des principaux radionucléides naturels potassium-40, uranium-238 et thorium-232 dans l'eau. Cela nous a poussés à prendre l'initiative de mener cette présente étude. Par ailleurs, la population d'Antsiranana utilise les eaux de robinets de la société JIRAMA et les eaux de puits pour leurs activités quotidiennes. Ainsi, l'objectif de ce travail est d'étudier les niveaux de la radioactivité naturelle dans l'eau de consommation afin d'estimer les doses d'exposition interne due à l'ingestion de la population d'Antsiranana.

2. Matériel et méthodes

2-1. Description de site d'étude

Antsiranana, appelée également Diégo Suarez, est la plus grande ville située dans la partie septentrionale de Madagascar. Sa position géographique est comprise entre latitude $12^{\circ} 16' 00''$ – $12^{\circ} 23' 00''$ Sud et longitude $49^{\circ} 16' 30''$ – $49^{\circ} 16' 47''$ Est. Antsiranana est la capitale de la région DIANA. Actuellement, sa population compte 182032 habitants, répartis sur les 25 Fokontany dont vingt-trois se situent à Antsiranana-ville (Place Kabary, Avenir, Bazarikely, Lazaret Nord, Lazaret Sud, Morafeno, Cité Ouvrière, Ambalakazaha, Manongalaza, Ambohimitsinjo, Ambalavola, Tsaramandroso, Mahatsara, Mangarivotra, Soafeno, Tanambao III, Tanambao IV, Tanambao V, Tanambao Nord, Tanambao Sud, Tanambao Tsena, Grand-Pavois et Scama) et deux autres se trouvent hors de la ville (Anamakia et Cap Diégo). Ces Fokontany sont présentés sur la *Figure 1a*. Les sources en eau qui alimentent la ville d'Antsiranana proviennent 16 % de la rivière d'Ambodimanga ($150 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) et 84 % de la rivière de Besokatra ($800 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Des barrages sont plantés sur ces deux rivières sur lesquels des conduites d'adduction d'eau sont acheminées vers la station de traitement à 7 km sud de la ville d'Antsiranana. Les barrages d'Ambodimanga et de Besokatra sont situés respectivement à 12 km et 45 km environs au sud de la ville d'Antsiranana. Les eaux provenant des deux barrages sont ensuite traitées dans la station de production d'eau et distribuées dans les 23 Fokontany susmentionnés. La source d'eau du barrage de Besokatra repose sur un socle volcanique représenté par des basaltes fissurés et très perméables [15]. Dans cette zone, les sols varient de type ferrugineux sur basaltes récents au type ferralitique sur vieux basaltes. Le sol en surface est fortement acide ($\text{pH} = 4,5$). Par contre, l'acidité diminue graduellement avec la profondeur jusqu'à pH égale à 5,2 [16]. Les roches volcaniques, essentiellement des basaltes, couvrent les deux-tiers de l'extrême nord de Madagascar. Le un tiers restant appartient aux roches sédimentaires, essentiellement des calcaires, grès et marnes. La géologie de la ville d'Antsiranana appartient généralement aux roches sédimentaires [16 - 18].

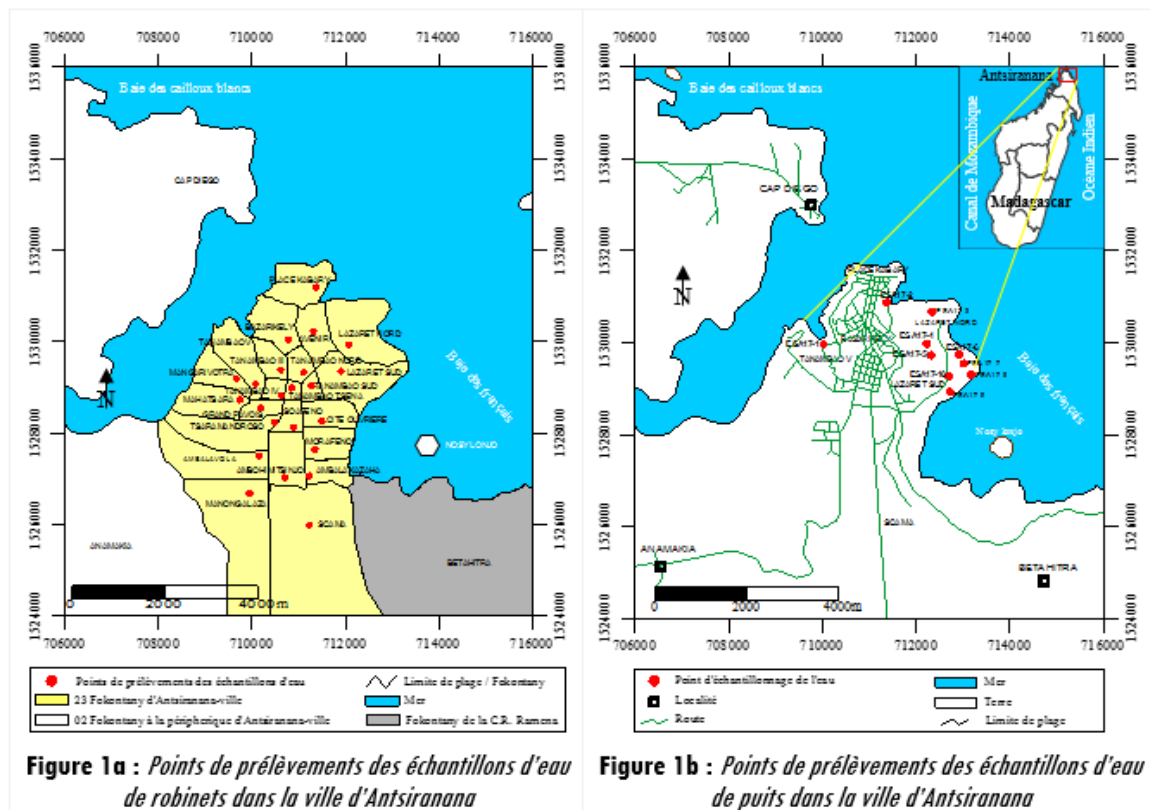


Figure 1 : Localisation des points de prélèvement des eaux de consommation de la ville d'Antsirana, Nord-Madagascar

2-2. Prélèvements et préparations des échantillons

Les campagnes de prélèvements des échantillons d'eau de robinets et d'eau de puits de la ville d'Antsirana ont été effectuées en Juillet 2017. Nous avons prélevé 33 échantillons d'eau de consommation dont 23 échantillons d'eau de robinets et 10 échantillons d'eau de puits. Pour chaque Fokontany de la ville d'Antsirana, on a prélevé un échantillon d'eau de robinets sur une borne fontaine choisie préalablement. Par contre, les eaux de puits sont prélevées dans les Fokontany de la partie basse de la ville d'Antsirana à savoirs Tanambao V, Place Kabary, Lazaret Nord et Lazaret Sud (voir **Figure 1b**). Ces échantillons ont été ensuite respectivement mis dans des bouteilles en plastiques de 1,5 litre. Les points de prélèvements sont représentés sur la **Figure 1**. Chaque point de prélèvement a été repéré à l'aide d'un GPS (Global Positioning System) de marque Etrex Garmin. Par la suite, tous les échantillons collectés ont été étiquetés et transporté au laboratoire pour analyse. Au laboratoire, les échantillons d'eau ont été transférés dans des béciers Marinelli en polyéthylène de 1 litre, fermés hermétiquement et conservés pendant trois semaines pour atteindre l'équilibre séculaire entre les radionucléides pères et leurs descendants dans les familles de désintégration de l'uranium-238 et du thorium-232.

2-3. Mesure par spectrométrie gamma

Les échantillons d'eau ont été analysés à l'aide d'un spectromètre gamma, muni d'un détecteur NaI(Tl), de marque ORTEC du département Analyses et Techniques Nucléaire de l'INSTN-Madagascar. Cet équipement de mesure permet de déterminer les activités spécifiques du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232. Pour chaque mesure, le temps de comptage a été fixé à 24 heures. La méthode d'analyse décrite

par Rybach a été utilisée pour le calcul des activités à partir des spectres obtenus [19, 20]. Cette méthode exploite trois régions d'intérêt correspondant aux trois pics caractéristiques du potassium-40 (1461 keV), du Bismuth-214 (1764,5 keV) et du Thallium-208 (2614,5 keV) tel que montré sur la **Figure 2**. Les deux derniers sont respectivement des descendants de l'uranium-238 et du thorium-232 [19 - 21]. Les étalonnages ont été effectués à l'aide des matériaux de référence (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) certifiés de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA).

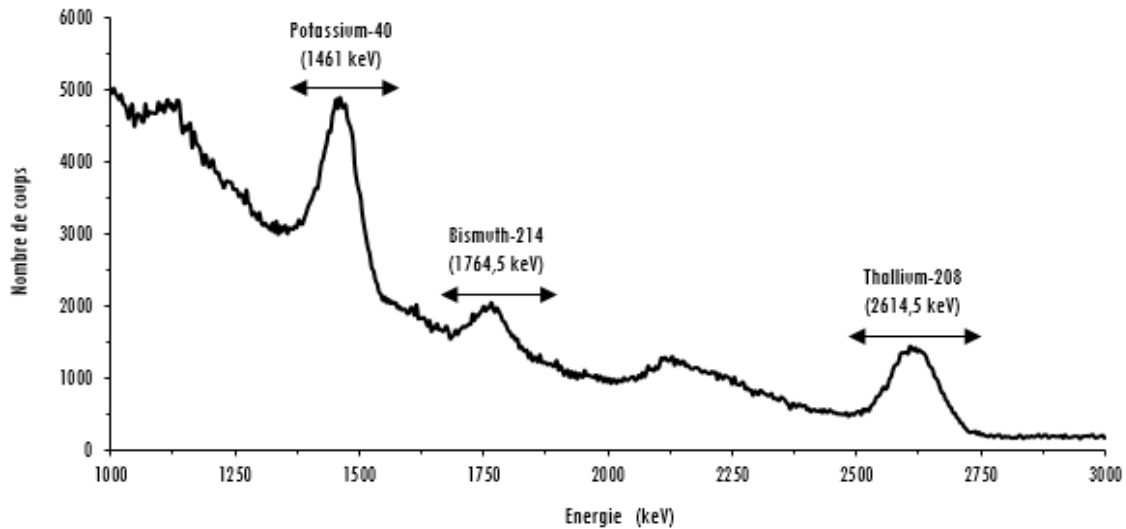


Figure 2 : Régions d'intérêt du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232

2-4. Activité spécifique et limite de détection d'un radionucléide

L'activité spécifique d'un radionucléide (potassium-40, famille de l'uranium-238 et famille du thorium-232) a été calculée à partir de l'équation ci-après [2, 22] :

$$A = \frac{N_{net}}{\varepsilon(E) \times P_e \times t_c \times m} \tag{1}$$

A étant l'activité spécifique d'un radionucléide exprimé en Bq.l⁻¹, N_{net} l'aire nette du pic d'absorption totale pour l'énergie E, ε(E) l'efficacité de détection pour l'énergie E, P_e la probabilité d'émission gamma pour l'énergie E exprimé en s⁻¹, t_c le temps de comptage en s et m la masse de l'échantillon analysé en kg.

L'incertitude d'une activité spécifique est calculée à partir de la formule suivante [2, 22] :

$$\sigma_A = A \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_{net}}{N_{net}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_\varepsilon}{\varepsilon}\right)^2} \tag{2}$$

□_A, □_{net} et □_ε étant respectivement l'incertitude de l'activité spécifique, l'incertitude de l'aire nette et l'incertitude de l'efficacité.

La limite de détection (LD) est donnée par la **Formule** ci-dessous [22].

$$LD = \frac{8,76 \times \sqrt{\tau_{BF} \times \Delta E}}{\varepsilon \times P_o \times t_c \times m} \quad (3)$$

τ_{BF} étant le taux de comptage du bruit de fond et ΔE la largeur à mi-hauteur

2-5. Evaluation de l'exposition interne par ingestion

La grande partie de l'exposition interne par ingestion est due essentiellement à la famille de l'uranium-238 et à celle du thorium-232. En effet, le potassium-40 est un élément clé dans la régulation de nombreuses fonctions corporelles telles que la digestion, la fréquence cardiaque et la teneur en eau des cellules. Le niveau de ce radionucléide dans le corps est naturellement régulé par des processus métaboliques et il n'est pas influencé de façon significative par les niveaux d'admission. Par conséquent, le potassium-40 est exclu du calcul de la dose efficace totale [2]. En d'autre terme, la dose efficace totale est la dose efficace engagée pour une année d'absorption résultant de tous les radionucléides dont la présence dans l'eau a été détectée. Ainsi, la dose efficace totale de l'ingestion est donnée par l'expression suivante [12, 23, 24] :

$$D_{ing} = I \times \sum_{i=1}^2 A_i \times C_i \quad (4)$$

D_{ing} étant la dose efficace totale de l'ingestion en $mSv.an^{-1}$, A_i l'activité d'un radionucléide en $Bq.l^{-1}$, C_i le facteur de conversion de dose du radionucléide et I le taux annuel de consommation d'eau pour les individus de référence en $l.an^{-1}$.

Les valeurs du facteur de conversion rapportées par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) et la Comité Scientifique des Nations Unies pour les Effets de Radiation Atomique (UNSCEAR) sont ($0,12.10^{-3}$ et $0,45.10^{-3} mSv.Bq^{-1}$) pour les nourrissons, ($0,068.10^{-3}$ et $0,29.10^{-3} mSv.Bq^{-1}$) pour les enfants et ($0,045.10^{-3}$ et $0,23.10^{-3} mSv.Bq^{-1}$) pour les adultes [2, 25]. Quant à la valeur du taux annuel de consommation, elle est égale à $150 l.an^{-1}$ (équivalant à la consommation de 0,5 litre par jour), à $350 l.an^{-1}$ (équivalant à la consommation de 1 litre par jour) et à $500 l.an^{-1}$ (équivalant à la consommation de 1,5 litre par jour) respectivement pour les nourrissons entre 1 et 2 ans, les enfants entre 7 et 12 ans, et les adultes supérieurs à 17 ans [2]. L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) recommande que l'exposition annuelle due à l'ingestion des radionucléides naturels présents dans l'eau de consommation ne doit pas dépasser la dose efficace totale de $0,10 mSv.an^{-1}$ [2, 14]. Cette valeur est la référence de qualité. En cas de dépassement, cette référence de qualité ne devrait pas être interprétée comme la limite obligatoire. Le dépassement d'un niveau recommandé devrait susciter une investigation plus poussée, même si cela n'indique pas nécessairement que l'eau de consommation présente un risque sanitaire pour le public [14]. Selon l'UNSCEAR [2] :

- Si la dose efficace annuelle est inférieure ou égale à $0,10 mSv.an^{-1}$, la qualité radiologique de l'eau de consommation est classée idéale, c'est-à-dire l'eau ne présente aucun risque sanitaire dû aux rayonnements ionisants.
- Dans le cas où la dose efficace annuelle est comprise entre $0,10 mSv.an^{-1}$ et $0,30 mSv.an^{-1}$, la qualité radiologique de l'eau de consommation ne présente pas de risque sanitaire considérable, étant donné que la valeur $0,30 mSv.an^{-1}$ est la dose efficace moyenne due à l'ingestion des radionucléides naturels présents dans les aliments et à la fois dans l'eau. Pour cela, les actions destinées à corriger la qualité de l'eau ne sont pas encore nécessaires.

- Dans le cas où la dose efficace annuelle de l'eau de consommation est comprise entre 0,30 mSv.an⁻¹ et 1 mSv.an⁻¹, l'utilisation de cette eau pour la consommation et la préparation des aliments est déconseillée surtout pour les nourrissons, les enfants et les femmes enceintes. Cependant, des solutions de réduction des expositions doivent être prises en compte localement telles que le traitement de l'eau, l'élimination des sédiments en suspension contenant des radionucléides, etc.
- Enfin, pour des eaux présentant une dose efficace annuelle supérieure à 1 mSv.an⁻¹, des solutions visant à réduire l'exposition sont impérativement à rechercher et à mettre en œuvre.

3. Résultats et discussion

3-1. Radioactivité des eaux de consommation de la ville d'Antsiranana

3-1-1. Activités spécifiques des radionucléides naturels dans les eaux de robinets

Les activités spécifiques de trois principaux radionucléides naturels dans les eaux de robinets de la ville d'Antsiranana sont présentées dans le **Tableau 1** suivant.

Tableau 1 : *Activités des radionucléides dans les eaux de robinets et localité de prélèvement avec le nombre de population*

Code	Activités spécifiques des radionucléides (Bq.l ⁻¹)			Activités totales (Bq.l ⁻¹)	Fokontany	Habitants
	Potassium-40	Uranium-238	Thorium-232			
ERA1	3,8 ± 2,2	2,0 ± 1,2	0,6 ± 0,4	6,4	Tanambao V	7888
ERA2	3,8 ± 2,2	4,9 ± 0,3	0,6 ± 0,4	9,3	Mangarivotra	6619
ERA3	3,9 ± 2,2	1,9 ± 1,1	0,6 ± 0,3	6,4	Mahatsara	7322
ERA4	3,9 ± 2,3	4,3 ± 0,3	0,6 ± 0,4	8,8	Grand Pavois	6668
ERA5	2,6 ± 1,5	1,5 ± 0,8	0,4 ± 0,2	4,5	Tanambao IV	6650
ERA6	3,7 ± 2,1	2,0 ± 1,1	0,6 ± 0,4	6,3	Tsaramandroso	5695
ERA7	3,9 ± 2,3	3,8 ± 0,3	0,7 ± 0,4	8,4	Ambalavola	8968
ERA8	3,7 ± 2,1	2,1 ± 1,2	0,6 ± 0,3	6,4	Manongalaza	8404
ERA9	3,8 ± 2,2	2,0 ± 1,1	0,6 ± 0,4	6,4	Avenir	6823
ERA10	4,1 ± 2,3	2,0 ± 1,1	0,6 ± 0,4	6,7	Scama	8669
ERA11	5,0 ± 2,9	2,4 ± 1,4	0,8 ± 0,5	8,2	Ambohimitsinjo	7654
ERA12	3,8 ± 2,2	2,0 ± 1,2	0,6 ± 0,3	6,4	Ambalakazaha	7169
ERA13	3,9 ± 2,2	4,5 ± 0,3	0,6 ± 0,4	9	Morafeno	7982
ERA14	3,8 ± 2,2	3,8 ± 0,3	0,6 ± 0,3	8,2	Cité ouvrière	8219
ERA15	3,8 ± 2,2	2,1 ± 1,2	0,6 ± 0,4	6,5	Soafeno	8131
ERA16	3,8 ± 2,2	2,0 ± 1,2	0,6 ± 0,3	6,4	Tanambao Tsena	8049
ERA17	4,0 ± 2,3	4,8 ± 0,3	0,6 ± 0,4	9,4	Tanambao Nord	8269
ERA18	8,0 ± 1,0	2,0 ± 1,2	0,6 ± 0,4	10,6	Lazaret Sud	7523
ERA19	3,8 ± 2,2	3,7 ± 0,3	0,6 ± 0,4	8,1	Lazaret Nord	8808
ERA20	4,1 ± 2,4	5,6 ± 0,3	0,7 ± 0,4	10,4	Place Kabary	7739
ERA21	4,0 ± 2,3	9,0 ± 0,4	1,0 ± 0,6	14	Bazarikely	7631
ERA22	8,0 ± 0,8	4,1 ± 0,2	0,3 ± 0,2	12,4	Tanambao III	6662
ERA23	3,9 ± 2,2	5,0 ± 0,3	0,6 ± 0,3	9,5	Tanambao Sud	5402
Moyenne ± σ [Min – Max]*	4,2 ± 1,3 [2,6 – 8]	3,4 ± 1,8 [1,5 – 9]	0,6 ± 0,1 [0,3 – 1]	8,2 ± 2,2 [4,5 – 14]		

**Valeur moyenne ± écart-type [valeur minimale - valeur maximale]*

Les résultats dans le **Tableau 1** montrent que le potassium-40, les familles de l'uranium-238 et du thorium-232 ont été détectés dans les échantillons d'eau de robinets de la ville d'Antsiranana. Leurs activités spécifiques varient de $(2,6 \pm 1,5)$ Bq.l⁻¹ à $(8,0 \pm 1,0)$ Bq.l⁻¹ avec une moyenne de $(4,2 \pm 1,3)$ Bq.l⁻¹ pour le potassium-40 ; de $(1,5 \pm 0,8)$ Bq.l⁻¹ à $(9,0 \pm 0,4)$ Bq.l⁻¹ avec une moyenne de $(3,4 \pm 1,8)$ Bq.l⁻¹ pour l'uranium-238 ; et de $(0,3 \pm 0,2)$ Bq.l⁻¹ à $(1,0 \pm 0,6)$ Bq.l⁻¹ avec une moyenne de $(0,6 \pm 0,1)$ Bq.l⁻¹ pour la famille du thorium-232. D'après la **Figure 3** ci-dessous, on remarque que les activités de ces radionucléides fluctuent d'un Fokontany à l'autre. L'activité du potassium-40 le plus élevée a été observée dans les eaux de robinets des Fokontany Lazaret Sud et Tanambao III. Par contre, l'activité du potassium-40 le plus faible a été trouvée dans le Fokontany Tanambao IV. En ce qui concerne la famille de l'uranium-238, son activité le plus significatif a été constatée dans le Fokontany Bazarikely mais son activité le moins important a été aperçue dans le Fokontany Tanambao IV. Pour la famille du thorium-232, son activité le plus prépondérant a été déterminée dans le Fokontany Bazarikely, tandis que son activité le plus faible a été mesurée dans le Fokontany Tanambao III. A cet effet, l'activité totale le plus élevé de ces radionucléides a été quantifiée dans le Fokontany Bazarikely mais l'activité totale le plus faible a été trouvée dans le Fokontany Tanambao IV. On observe aussi que, dans les eaux de robinets, le potassium-40 est relativement abondant comparé aux deux autres radionucléides. Quant à la famille de l'uranium-238, son activité est plus significative par rapport à celle de la famille du thorium-232. Pour ce dernier radionucléide, la moyenne de ses activités est largement inférieure à celles du potassium-40 et de la famille de l'uranium-238. La présence du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans les eaux du robinet de la ville d'Antsiranana est due aux transferts de ces radionucléides provenant des sources d'eau aux barrages de Besokatra et d'Ambodimanga. Ces sources sont en contact avec des roches basaltiques pouvant contenir des radioactivités naturelles d'environ 300 Bq.kg⁻¹ pour le potassium-40, (10-15) Bq.kg⁻¹ pour la famille de l'uranium-238 et (7-10) Bq.kg⁻¹ pour la famille du thorium-232 [27]. Il est probable qu'il y ait des transferts sol-eau des radionucléides qui pourrait contaminer les eaux du barrage jusqu'aux eaux de robinets de la ville d'Antsiranana [28]. La variation des activités spécifiques dans les eaux de robinets est expliquée par le phénomène de dispersion qui dépend essentiellement de la variation de la vitesse d'écoulement d'eau et de la solubilité ainsi que de la mobilité sous les conditions géochimiques de ces radionucléides dans les réseaux d'adduction [26]. A cet effet, la distribution des niveaux de la radioactivité du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 ne sont pas uniformément répartis dans les eaux de robinets de la ville d'Antsiranana.

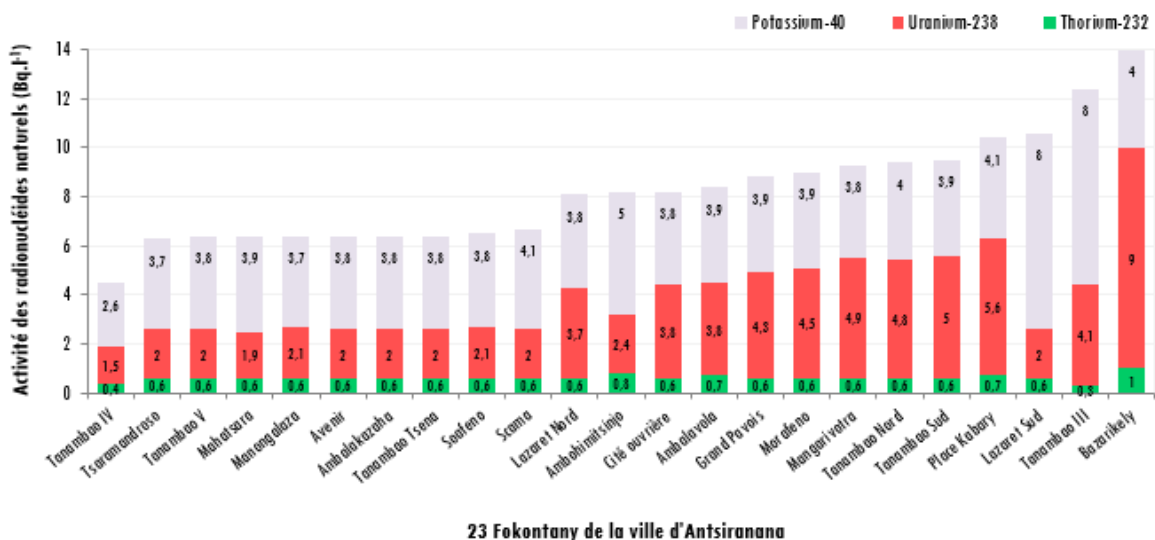


Figure 3 : Activités spécifiques dans les eaux de robinets

3-1-2. Activités spécifiques des radionucléides naturels dans les eaux de puits

Les activités spécifiques du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans les eaux de puits de la ville d'Antsiranana sont illustrés dans le **Tableau 2** ci-après.

Tableau 2 : Activités des radionucléides dans les eaux de puits et localité de prélèvement avec le nombre de population

Code	Activités spécifiques des radionucléides (Bq.l ⁻¹)			Activités totales (Bq.l ⁻¹)	Fokontany	Habitants
	Potassium-40	Uranium-238	Thorium-232			
ESA-1	6,8 ± 1,6	1,9 ± 1,1	2,1 ± 0,3	10,8	Tanambao V	7888
ESA-2	4,2 ± 2,4	2,1 ± 1,2	0,6 ± 0,4	6,9	Place Kabary	7739
ESA-3	3,9 ± 2,3	7,0 ± 0,3	0,6 ± 0,4	11,5	Lazaret Nord	8269
ESA-4	3,7 ± 2,1	4,6 ± 0,3	0,6 ± 0,3	8,9		
ESA-5	3,8 ± 2,2	6,7 ± 0,3	0,6 ± 0,4	11,1		
ESA-6	3,9 ± 2,3	4,2 ± 0,3	2,3 ± 0,3	10,4		
ESA-7	6,7 ± 1,1	6,5 ± 0,3	2,3 ± 0,3	15,5		
ESA-8	3,7 ± 2,1	7,6 ± 0,3	0,6 ± 0,3	11,9	Lazaret Sud	7523
ESA-9	3,9 ± 2,2	6,3 ± 0,3	0,6 ± 0,4	10,8		
ESA-10	3,7 ± 2,2	7,8 ± 0,3	0,6 ± 0,3	12,1		
Moyenne ± σ [Min - Max]*	4,4 ± 1,2 [3,7 - 6,8]	5,5 ± 2,0 [1,9 - 7,8]	1,1 ± 0,8 [0,6 - 2,3]	11,0 ± 2,2 [6,9 - 15,5]		

* Valeur moyenne ± écart-type [valeur minimale - valeur maximale]

D'après les résultats dans le **Tableau 2**, on constate que le potassium-40, les familles de l'uranium-238 et du thorium-232 ont été quantifié dans tous les échantillons d'eau de puits de la ville d'Antsiranana. Ces résultats montrent que les activités du potassium-40 sont comprises entre (3,7 ± 2,1) Bq.l⁻¹ à (6,8 ± 1,6) Bq.l⁻¹ avec une moyenne de (4,4 ± 1,2) Bq.l⁻¹. Pour le cas de l'uranium-238, ses activités varient de (1,9 ± 1,1) Bq.l⁻¹ à (7,8 ± 0,3) Bq.l⁻¹ avec une moyenne de (5,5 ± 2,0) Bq.l⁻¹. Quant à la famille du thorium-232, ses activités fluctuent de (0,6 ± 0,3) Bq.l⁻¹ à (2,3 ± 0,3) Bq.l⁻¹ avec une moyenne de (1,1 ± 0,8) Bq.l⁻¹. D'après la **Figure 4** ci-dessous, on remarque aussi que les activités de ces radionucléides varient d'un endroit à l'autre. L'activité du potassium-40 est plus élevée dans le Fokontany Tanambao V. Tandis qu'elle est plus faible dans les Fokontany Lazaret Nord et Sud. Pour la famille de l'uranium-238, son activité a été observée plus importante dans le Fokontany Lazaret Sud. Cependant, cette activité a été déterminée plus faible dans le Fokontany Tanambao V. Pour la famille du thorium-232, son activité a été constatée plus prépondérante dans le Fokontany Lazaret Nord. Par contre, cette activité a été remarquée moins significative dans les Fokontany Place Kabary et Lazaret Sud. Par conséquent, l'activité totale le plus élevée de ces radionucléides a été identifiée dans le Fokontany Lazaret Nord mais l'activité totale le plus faible a été trouvée dans le Fokontany Place Kabary. On aperçoit aussi que l'activité moyenne de la famille de l'uranium-238 dans les eaux de puits est supérieure à celle du potassium-40 et de la famille du thorium-232. Par contre, l'activité moyenne de la famille du thorium-232 est faible par rapport aux activités moyennes du potassium-40 et de la famille de l'uranium-238. La variation de ces radionucléides dans les eaux de puits est due à la nature géologique de la nappe phréatique et à la durée de contact de ces eaux avec le sous-sol, ainsi qu'à la solubilité et mobilité sous les conditions géochimiques de ces radionucléides dans le milieu étudié [7, 26]. Le fait que les eaux de puits sont en contact direct avec le sous-sol contenant du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 explique la présence et les niveaux de la radioactivité assez importante dans ces eaux. A cet effet, les résultats des mesures révèlent que les niveaux de la radioactivité de ces trois radionucléides naturels varient spatialement dans les eaux de puits de la ville d'Antsiranana.

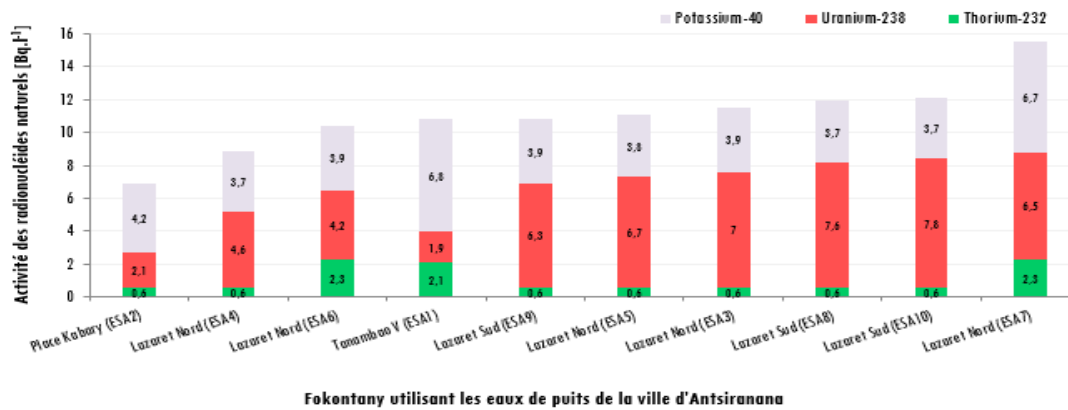


Figure 4 : Activités spécifiques dans les eaux de puits

3-2. Estimation de l'exposition interne par ingestion

3-2-1. Doses efficaces dues à l'ingestion des eaux de robinets de la ville d'Antsirananana

Les résultats des doses efficaces ingérées par le nourrisson, l'enfant et l'adulte dues aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans les eaux de robinets de la ville d'Antsirananana sont représentés dans le **Tableau 3** ci-après.

Tableau 3 : Doses efficaces annuelles d'ingestion des eaux de robinets de la ville d'Antsirananana

Code	Doses efficaces annuelles (mSv.an ⁻¹)			Fokontany	Habitants
	Nourrisson (1 à 2 ans)	Enfant (7 à 12 ans)	Adulte (> 17 ans)		
ERA1	0,08 ± 0,03	0,11 ± 0,04	0,11 ± 0,04	Tanambao V	7888
ERA2	0,13 ± 0,02	0,18 ± 0,03	0,19 ± 0,04	Mangarivotra	6619
ERA3	0,11 ± 0,03	0,16 ± 0,04	0,16 ± 0,05	Mahatsara	7322
ERA4	0,14 ± 0,03	0,19 ± 0,04	0,20 ± 0,05	Grand Pavois	6668
ERA5	0,07 ± 0,03	0,11 ± 0,05	0,11 ± 0,05	Tanambao IV	6650
ERA6	0,11 ± 0,03	0,16 ± 0,04	0,16 ± 0,05	Tsaramandroso	5695
ERA7	0,12 ± 0,03	0,17 ± 0,04	0,17 ± 0,05	Ambalavola	8968
ERA8	0,16 ± 0,03	0,22 ± 0,04	0,22 ± 0,05	Manongalaza	8404
ERA9	0,08 ± 0,03	0,11 ± 0,05	0,11 ± 0,05	Avenir	6823
ERA10	0,07 ± 0,03	0,10 ± 0,04	0,11 ± 0,04	Scama	8669
ERA11	0,06 ± 0,02	0,08 ± 0,04	0,09 ± 0,04	Ambohimitsinjo	7654
ERA12	0,07 ± 0,03	0,10 ± 0,04	0,11 ± 0,04	Ambalakazaha	7169
ERA13	0,12 ± 0,03	0,16 ± 0,04	0,17 ± 0,05	Morafeno	7982
ERA14	0,08 ± 0,03	0,11 ± 0,05	0,11 ± 0,05	Cité ouvrière	8219
ERA15	0,09 ± 0,03	0,12 ± 0,05	0,13 ± 0,05	Soafeno	8131
ERA16	0,11 ± 0,03	0,15 ± 0,04	0,16 ± 0,05	Tanambao Tsena	8049
ERA17	0,05 ± 0,02	0,07 ± 0,03	0,07 ± 0,03	Tanambao Nord	8269
ERA18	0,09 ± 0,03	0,12 ± 0,05	0,13 ± 0,05	Lazaret Sud	7523
ERA19	0,16 ± 0,03	0,22 ± 0,04	0,22 ± 0,05	Lazaret Nord	8808
ERA20	0,11 ± 0,03	0,15 ± 0,04	0,15 ± 0,05	Place Kabary	7739
ERA21	0,08 ± 0,03	0,11 ± 0,04	0,12 ± 0,04	Bazarikely	7631
ERA22	0,11 ± 0,03	0,16 ± 0,04	0,16 ± 0,05	Tanambao III	6662
ERA23	0,11 ± 0,02	0,16 ± 0,03	0,16 ± 0,04	Tanambao Sud	5402
Moyenne ± σ [Min - Max]	0,10 ± 0,03 [0,05 - 0,16]	0,14 ± 0,04 [0,07 - 0,22]	0,14 ± 0,04 [0,07 - 0,22]		

* Valeur moyenne ± écart-type [valeur minimale - valeur maximale]

Les résultats dans le **Tableau 3** montrent que la dose efficace évaluée chez le nourrisson varie de $(0,05 \pm 0,02) \text{ mSv.an}^{-1}$ à $(0,16 \pm 0,03) \text{ mSv.an}^{-1}$ avec une moyenne de $(0,10 \pm 0,03) \text{ mSv.an}^{-1}$. Chez l'enfant, la dose efficace est estimée entre $(0,07 \pm 0,03) \text{ mSv.an}^{-1}$ à $(0,22 \pm 0,04) \text{ mSv.an}^{-1}$ avec une moyenne de $(0,14 \pm 0,04) \text{ mSv.an}^{-1}$. Chez l'adulte, la dose efficace est comprise entre $(0,12 \pm 0,07) \text{ mSv.an}^{-1}$ et $(0,17 \pm 0,04) \text{ mSv.an}^{-1}$ avec une moyenne de $(0,14 \pm 0,04) \text{ mSv.an}^{-1}$. Ces résultats révèlent que les doses efficaces mesurées fluctuent autour de 30 % par rapport aux valeurs moyennes trouvées. D'après la **Figure 5** ci-après, on remarque que les doses efficaces ingérées par le nourrisson, l'enfant et l'adulte ont été observées plus importantes dans les Fokontany Manongalaza et Lazaret Nord. Toutefois, ces doses ont été constatées plus faibles dans le Fokontany Tanambao Nord. De plus, ces doses chez l'enfant et l'adulte sont supérieures à celle mesurée chez le nourrisson. On constate également que la dose efficace moyenne ingérée par le nourrisson est égale au seuil de qualité de référence $0,10 \text{ mSv.an}^{-1}$ recommandée par l'OMS. Par contre, les doses efficaces ingérées par l'enfant sont similaires à celles de l'adulte. La moyenne de ces doses est légèrement supérieure au seuil de qualité de référence $0,10 \text{ mSv.an}^{-1}$. A cet effet, l'utilisation des eaux de robinets de la ville d'Antsiranana comme eaux de consommation pour le public ne présentent pas des risques considérables pour la santé.

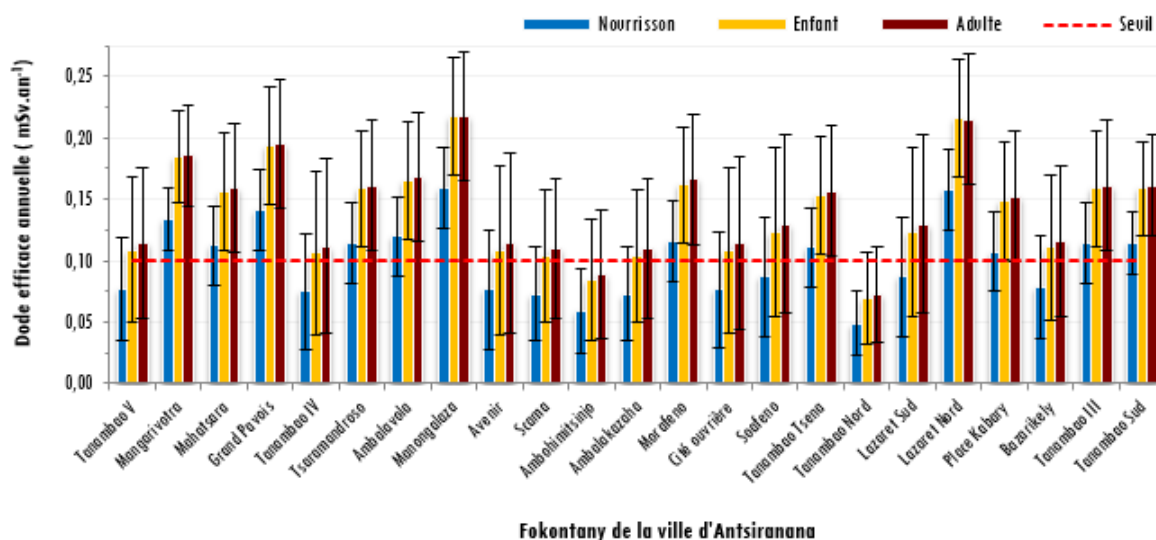


Figure 5 : Dose efficace ingérée par individu à partir des eaux de robinets

3-2-2. Doses efficaces dues à l'ingestion des eaux de puits de la ville d'Antsiranana

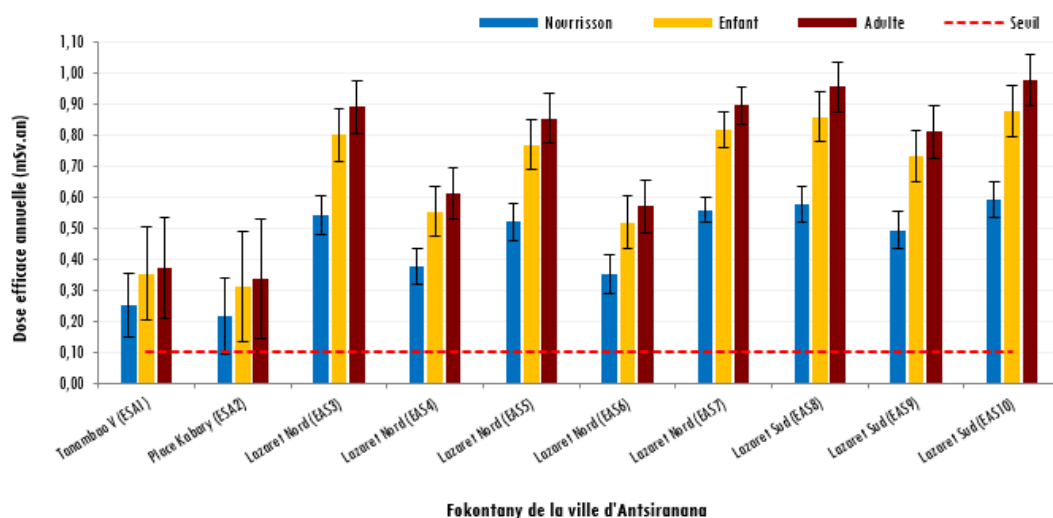
Les résultats des doses efficaces ingérées par le nourrisson, l'enfant et l'adulte dues aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans les eaux de puits de la ville d'Antsiranana sont résumés dans le **Tableau 4** suivant.

Tableau 4 : Doses efficaces annuelles d'ingestion des eaux de puits de la ville d'Antsiranana

Code	Doses efficaces annuelles d'ingestion (mSv.an ⁻¹)			Fokontany	Habitants
	Nourrisson (1 à 2 ans)	Enfant (7 à 12 ans)	Adulte (> 17 ans)		
ESA-1	0,25 ± 0,10	0,35 ± 0,15	0,37 ± 0,16	Tanambao V	7888
ESA-2	0,22 ± 0,12	0,31 ± 0,18	0,34 ± 0,19	Place Kabary	7739
ESA-3	0,54 ± 0,06	0,80 ± 0,09	0,89 ± 0,09	Lazaret Nord	8269
ESA-4	0,38 ± 0,06	0,55 ± 0,08	0,61 ± 0,08		
ESA-5	0,52 ± 0,06	0,77 ± 0,08	0,86 ± 0,08		
ESA-6	0,35 ± 0,06	0,52 ± 0,09	0,57 ± 0,09		
ESA-7	0,56 ± 0,04	0,82 ± 0,06	0,90 ± 0,06		
ESA-8	0,58 ± 0,06	0,86 ± 0,08	0,96 ± 0,08		
ESA-9	0,50 ± 0,06	0,73 ± 0,08	0,81 ± 0,08	Lazaret Sud	7523
ESA-10	0,59 ± 0,06	0,88 ± 0,08	0,98 ± 0,08		
Moyenne ± σ [Min - Max]*	0,45 ± 0,13 [0,22 - 0,59]	0,66 ± 0,20 [0,31 - 0,88]	0,73 ± 0,23 [0,34 - 0,98]		

* Valeur moyenne ± écart-type [valeur minimale - valeur maximale]

Les résultats dans le **Tableau 4** révèlent que la dose efficace évaluée dans les eaux de puits est comprise entre (0,22 ± 0,12) mSv.an⁻¹ à (0,59 ± 0,06) mSv.an⁻¹, avec une moyenne de (0,45 ± 0,13) mSv.an⁻¹ chez le nourrisson ; de (0,31 ± 0,18) mSv.an⁻¹ à (0,88 ± 0,08) mSv.an⁻¹, avec une moyenne de (0,66 ± 0,20) mSv.an⁻¹ chez l'enfant ; et de (0,34 ± 0,19) mSv.an⁻¹ à (0,98 ± 0,08) mSv.an⁻¹, avec une moyenne de (0,73 ± 0,23) mSv.an⁻¹ chez l'adulte. Ces résultats confirment les fluctuations des doses efficaces estimées, d'un endroit à l'autre, pour les trois classes d'individus étudiés. D'après la **Figure 6** ci-dessous, on aperçoit que les doses efficaces ingérées par le nourrisson, l'enfant et l'adulte ont été observées plus élevées dans le Fokontany Lazaret Sud. Par contre, ces doses ont été constatées plus faibles dans le Fokontany Place Kabary. On remarque également que les doses efficaces obtenues chez l'adulte sont plus significatives que chez le nourrisson et chez l'enfant. En plus, les valeurs trouvées chez l'enfant sont plus importantes que celles évaluées chez le nourrisson. Ces résultats montrent aussi que toutes les doses mesurées sont 4 à 7 fois supérieures au seuil de qualité de référence 0,10 mSv.an⁻¹ recommandée par l'OMS. Par conséquent, l'utilisation des eaux de puits de la ville d'Antsiranana comme eaux de consommation pour la population locale est déconseillée, sans faire du traitement préalable.

**Figure 6 : Dose efficace ingérée par individu à partir des eaux de puits**

4. Conclusion

L'eau joue un rôle très important pour la santé humaine. La présence des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 à des niveaux élevés de la radioactivité dans les eaux de consommation peut générer des effets négatifs sur la santé. Cette étude montre que le potassium-40, les familles de l'uranium-238 et du thorium-232 sont bel et bien quantifiés dans les eaux de robinets et de puits de la ville d'Antsiranana au nord de Madagascar. Les niveaux de la radioactivité de ces radionucléides varient d'un point à l'autre et ne sont pas uniformément repartis dans ces eaux. De plus, les eaux de puits de la ville d'Antsiranana contiennent un taux de la radioactivité plus élevé que les eaux de robinets. En effet, ces données ont permis d'estimer l'éventuel risque radiologique lié à l'ingestion de ces eaux. Ainsi, les résultats d'études des doses efficaces ingérées par le nourrisson, l'enfant et l'adulte révèlent que les eaux de robinets ne présentent pas des risques sanitaires considérables pour la population d'Antsiranana du fait que ces doses tournent autour de la valeur seuil $0,10 \text{ mSv.an}^{-1}$. Par contre, l'utilisation des eaux de puits comme eaux de consommation est déconseillée parce que les doses efficaces mesurées dans ces eaux sont largement supérieures à $0,10 \text{ mSv.an}^{-1}$. Alors, pour continuer d'utiliser les eaux de puits comme eaux de consommation à long terme, il est recommandé d'apporter de la correction, afin d'avoir la qualité radiologique acceptable.

Remerciements

Nos remerciements vont : i) aux personnels de l'INSTN-Madagascar surtout à l'équipe scientifique du Département ATN qui a facilité l'accès aux équipements de mesure et aidé dans le traitement des données ; ii) aux Directions de cet Institut qui ont offert des formations internationales dans le cadre des projets RAF5063 et RAF7017 de la Coopération Technique de l'AIEA. Ces formations ont permis de renforcer les compétences scientifiques dans le domaine de la radioactivité environnementale.

Références

- [1] - N. RABESIRANANA, "Contribution à l'étude de la radioactivité environnementale à Madagascar : de la quantification à l'utilisation des traceurs radio-isotopiques environnementaux", HDR, Université d'Antananarivo, Madagascar (2017)
- [2] - UNITED NATION SCIENTIFIC COMMITTEE ON THE EFFECTS OF ATOMIC (UNSCEAR), "Sources and Effects of Ionizing Radiation: Exposures from natural radiation sources", Report to the General Assembly with scientific annexes B, United Nations, New York (2000)
- [3] - N. M. YUSSUF, I. HOSSAIN and H. WAGIRAN, "Natural radioactivity in drinking and mineral water in Johor Bahru (Malaysia)". *Scientific Research and Essays*, Vol. 7, N° 9 (2012) 1070 - 1075. <http://www.academicjournals.org/SRE> DOI: 10.5897/SRE12.034
- [4] - M. ROŽMARIĆ, M. ROGIĆ, L. BENEDIK and M. ŠTOK, "Natural radionuclides in bottled drinking waters produced in Croatia and their contribution to radiation dose", *Science of the Total Environment* 437 (2012) 53-60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.018>
- [5] - M. AMRANE and L. OUFNI, "Determination for levels of uranium and thorium in water along Oum Er-Rabia river using alpha track detectors, Morocco", *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10 (2017) 246-251. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jrras.2017.05.002>

- [6] - F. A. ALSEROURY, T. ALMEELBI, ASLAM KHAN, M. A. BARAKATA, J. H. AL-ZHRANI and W. ALALI, "Estimation of natural radioactive and heavy metals concentration in underground water", *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 11 (2018) 373-378. <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2018.07.004>
- [7] - F. O. UGBEDE, B. C. ADUO, O. N. OGBONNA and O. C. EKOI, "Natural radionuclides, heavy metals and health risk assessment in surface water of Nkalagu river dam with statistical analysis", *Scientific African*, 8 (2020) e00439. <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00439>
- [8] - D. MADZUNYA, V. P. DUDU, M. MATHUTHU and M. MANJORO, "Radiological health risk assessment of drinking water and soil dust from Gauteng and North West Provinces, in South Africa", *Heliyon*, 6 (2020) e03392. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03392>
- [9] - T. H. RANDRIAMORA, H. A. RAZAFINDRAMIANDRA, RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, S. D. RAVELOMANANTSOA, M. A. L. RALAVELO, M. RASOLONIRINA, J. L. R. ZAFIMANJATO and 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. <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/ajpa> doi: 10.11648/j.ajpa.20170501.12
- [10] - M. IBRAHIM, O. SHALABIEA and H. DIAB, "Measurement of some radioactive elements in drinking water in Arar city, Saudi Arabia", *American Journal of Life Sciences*, Vol. 2, No. 1 (2014) 24-28. doi: 10.11648/j.ajls.20140201.13
- [11] - A. S. PRADEEP, H. GEREMEW, and B. GETACHEW, "Natural Radio Activity Levels in Water and Soil at Kemessie Hot Spring, North-Eastern Ethiopia", *Radiation Science and Technology*, Vol. 2, No. 1 (2016) 1-5 <http://www.sciencepublishinggroup.com/j/rst> doi: 10.11648/j.rst.20160201.11
- [12] - T. MANICKUM, W. JOHN, S. TERRY and K. HODGSON, "Preliminary study on the radiological and physicochemical quality of the Umgeni Water catchments and drinking water sources in KwaZulu-Natal, South Africa", *Journal of Environmental Radioactivity*, 137 (2014) 227-240. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2014.07.015>
- [13] - S. ABDULLAHI, C. E. NDIKILAR, A. B. SULEIMAN and H. Y. HAFEEZ, "Evaluation of Radioactivity Concentration in Drinking Water Collected from Local Wells and Boreholes of Dutse Town, North West, Nigeria", *International Journal of Environmental Monitoring and Analysis*, Vol. 4, No. 1, (2016) 6-11. doi: 10.11648/j.ijema.20160401.12
- [14] - WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO), "Guidelines for drinking-water quality (4th Ed.)", *WHO Library Cataloguing-in-Publication Data NLM classification*, Geneva, WA 675 (2011)
- [15] - J. RATSARAMODY, M. RASIKA et M. A. RANDRIAZANAMPARANY, "Contribution au diagnostic technique et proposition d'amélioration de l'adduction d'eau de la ville d'Antsiranana (Madagascar)", E.S.P Antsiranana (2014)
- [16] - P. SEGALIN, "Notice sur la carte pédologique de reconnaissance au 1/200000^e, feuille n°1, Diego Suarez", *Mémoires de l'Institut Scientifique de Madagascar*, série D, Tome VII (1956)
- [17] - P. LEMOINE, "Etudes géologiques dans le Nord de Madagascar : Roches éruptives basaltiques récentes, Chap. XIX", Paris, *Librairie scientifique A. HERMANN*, pp 278-296 (1906)
- [18] - C. BARAT, "La montagne d'Ambre (nord de Madagascar)", *Revue de géographie alpine*, Vol. 46, N° 4 (1958) 629-681
- [19] - J. BEZUIDENHOUT, "Measuring naturally occurring uranium in soil and minerals by analysing the 352 keV gamma-ray peak of ²¹⁴Pb using a NaI(Tl)-detector", *Applied Radiation and Isotopes* 80 (2013) 1 - 6. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2013.05.008>
- [20] - B. KALL, T. TOMBO, M. RASOLONIRINA, N. RABESIRANANA et Gérard RAMBOLAMANANA, "Contribution à l'étude de dose due à la radioactivité gamma du sol sur la rive de la baie des Français, Antsiranana, Madagascar", *Afrique SCIENCE* 11 (1) (2015) 122 - 135 ISSN 1813-548X, <http://www.afriquescience.info>
- [21] - G. CINELLI, L. TOSITTI, D. MOSTACCI and J. BARE, "Calibration with MCNP of NaI detector for the determination of natural radioactivity levels in the field", *Journal of Environmental Radioactivity*, 155-156 (2016) 31-37. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2016.02.009>

- [22] - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), "Measurement of radionuclides in food and the environment". A guidebook. Technical reports series No.295, p.170 (1989)
- [23] - A. TWESIGYE, E. O. DARKO, A. FAANU and C. SCHANDORF, "Dose assessment to public due to exposure to natural radioactivity at the Bibiani gold mine, Ghana", *Radiation Protection and Environment*, Vol. 38. Issue. 1 & 2 (2015). <http://www.rpe.org.in> DOI:10.4103/0972-0464.162818
- [24] - M. MOSHIUR RAHMAN, APURBA MONDAL, M. A. KABIR and K. ASADUZZAMAN, "Assessment of Natural Radioactivity Levels and Radiological Significance of Bottled Drinking Water in Bangladesh", *American Journal of Physics and Applications*, Vol. 3, N° 6 (2015) 203-207. doi: 10.11648/j.ajpa.20150306.13
- [25] - INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA), "Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards", *Interim Edition; General Safety Requirements*, No. GSR Part 3 (2011)
- [26] - M. YEHIA, A. BAGHDADY, F. M. HOWARI, S. AWAD and A. GAD, "Natural radioactivity and groundwater quality assessment in the northern area of the Western Desert of Egypt", *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 12 (2017) 331 - 344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.06.002>
- [27] - NATIONAL ACADEMY PRESS, "Evaluation of Guidelines for Exposures to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials. Committee on Evaluation of EPA Guidelines for Exposures to Naturally Occurring Radioactive Materials". Board on Radiation Effects Research. Commission on Life sciences. National Research Council. Washington, D.C. (1999). <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK230656/> consulté (2 juillet 2020)
- [28] - S. G. DLAMINI, M. M. MATHUTHU and V.M. TSHIVHASE, "Radionuclides and toxic elements transfer from the princess dump to water in Roodepoort, South Africa". *Journal of Environmental Radioactivity*, 153 (2016) 201-205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvrad.2015.12.026>