

ORIGINALE ARTICLE

ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE DU SOL : CAS DU DISTRICT D'ANTALAHA, RÉGION DE SAVA, NORD-EST DE MADAGASCAR

STUDY OF NATURAL SOIL RADIOACTIVITY: THE CASE OF THE ANTALAHA DISTRICT, SAVA REGION, NORTH-EAST MADAGASCAR



| Fidelin Ngoko ^{1*} | Asivelo Fanantenansoa Solonjara ² | Zafizara Donné ¹ | Daniel Rasolozafy ¹ | et | Briant Kall ¹ |

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 Analyses et Techniques Nucléaires | BP 3907 Antananarivo | Madagascar |

| DOI: 10.5281/zenodo.13844565 | Received September 07, 2024 | Accepted October 09, 2024 | Published October 12, 2024 | ID Article | Fidelin-Ref4-4-19ajira071024 |

RESUME

Contexte : La radioactivité naturelle présente dans l'environnement est un phénomène principalement produit par des radionucléides tels que le potassium-40, ainsi que les familles de l'uranium-238 et du thorium-232. Ces radionucléides émettent des rayonnements ionisants potentiellement nocifs pour la santé publique. **Objectif** : Cette étude vise à quantifier la présence du potassium-40 et des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans le sol du district d'Antalaha, afin de contribuer à l'élaboration de la carte des radionucléides naturels de la région nord de Madagascar. **Méthode** : Cinquante (50) échantillons de sol ont été prélevés dans différentes communes du district d'Antalaha, région SAVA. Les activités spécifiques de chaque famille ont été mesurées à l'aide d'un spectromètre gamma équipé d'un détecteur NaI(Tl). **Résultats** : L'analyse révèle la présence de potassium-40 et des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans le sol du district d'Antalaha. Les activités spécifiques du potassium-40 oscillent entre (33 ± 5) Bq.kg⁻¹ et (755 ± 32) Bq.kg⁻¹, avec une moyenne de (277 ± 3) Bq.kg⁻¹. Pour la famille de l'uranium-238, ces activités varient de (6 ± 2) Bq.kg⁻¹ à (87 ± 4) Bq.kg⁻¹, avec une moyenne de (33 ± 5) Bq.kg⁻¹. Quant à la famille du thorium-232, elles s'étendent de (18 ± 3) Bq.kg⁻¹ à (149 ± 13) Bq.kg⁻¹, avec une moyenne de (54 ± 5) Bq.kg⁻¹. Les activités du radium équivalent fluctuent entre (51 ± 9) Bq.kg⁻¹ et (312 ± 26) Bq.kg⁻¹, avec une moyenne de (133 ± 10) Bq.kg⁻¹. **Conclusion** : Les niveaux de radioactivité de ces trois radionucléides naturels dans les sols du district d'Antalaha varient selon les sites étudiés et ne sont pas uniformément répartis. Dans tous les sites, les activités spécifiques sont dominées par le potassium-40, suivi de la famille du thorium-232, puis de la famille de l'uranium-238. Les sols du district d'Antalaha présentent un niveau de radioactivité considéré comme normal.

Mots-clés : radioactivité naturelle, district d'Antalaha, spectrométrie gamma, activité spécifique.

ABSTRACT

Context: Natural radioactivity in the environment is a naturally occurring phenomenon. It is mainly produced by natural radionuclides such as potassium-40, as well as the uranium-238 and thorium-232 decay series. These radionuclides emit ionizing radiation, which can have negative effects on public health. **Objective:** This study aims to quantify the presence of potassium-40 and the uranium-238 and thorium-232 decay series in the soil of the Antalaha district, to contribute to the development of the missing natural radionuclide map of the northern region of Madagascar. **Method:** Fifty (50) soil samples were collected from various communes in the Antalaha district, SAVA region. The specific activities of each decay series were measured using a gamma spectrometer equipped with a NaI(Tl) detector. **Results:** The analysis reveals the presence of potassium-40 and the uranium-238 and thorium-232 decay series in the soil of the Antalaha district. The specific activities of potassium-40 range from (33 ± 5) Bq.kg⁻¹ to (755 ± 32) Bq.kg⁻¹, with an average of (277 ± 3) Bq.kg⁻¹. For the uranium-238 series, these activities vary from (6 ± 2) Bq.kg⁻¹ to (87 ± 4) Bq.kg⁻¹, with an average of (33 ± 5) Bq.kg⁻¹. As for the thorium-232 series, they range from (18 ± 3) Bq.kg⁻¹ to (149 ± 13) Bq.kg⁻¹, with an average of (54 ± 5) Bq.kg⁻¹. The equivalent radium activities fluctuate between (51 ± 9) Bq.kg⁻¹ and (312 ± 26) Bq.kg⁻¹, with an average of (133 ± 10) Bq.kg⁻¹. **Conclusion:** The radioactivity levels of these three natural radionuclides in the soils of the Antalaha district vary according to the sites studied and are not uniformly distributed. In all sites, the specific activities are dominated by potassium-40, followed by the thorium-232 series, and then the uranium-238 series. The soils of the Antalaha district present a normal level of radioactivity.

Keywords: natural radioactivity, Antalaha district, gamma spectrometry, specific activity.

1. INTRODUCTION

La région SAVA (Sambava, Andapa, Vohémar et Antalaha), située dans le Nord-Est de Madagascar, est renommée pour ses activités agricoles, notamment la production de vanille qui représente 80 % de la production mondiale, ainsi que la riziculture et d'autres cultures comme les cafiers, les girofliers, les cocotiers et diverses épices. Bien que le secteur minier y soit moins développé, il existe des activités d'extraction des pierres précieuses et semi-précieuses, ainsi que des minéraux industriels tels que le fer, le chrome et le titane. Avec ses vastes forêts primaires et ses terres agricoles riches, la région joue un rôle crucial dans l'économie de Madagascar [1].

La radioactivité naturelle présente dans l'environnement, souvent ignorée, a un rôle crucial dans la santé et la sécurité des communautés, en particulier dans les régions où les activités agricoles et de construction sont importantes. La radioactivité naturelle est un phénomène omniprésent résultant de la présence des radionucléides naturels tels que le potassium-40 (K-40), les familles de l'uranium-238 (U-238) et du thorium-232 (Th-232) dans l'environnement. Ces radionucléides émettent des rayonnements ionisants surtout le rayonnement gamma, pouvant avoir des effets néfastes sur la santé publique [2-15].

Des études antérieures ont mis en évidence la variabilité des concentrations des radionucléides naturels dans différentes régions, soulignant la nécessité d'évaluations localisées pour comprendre la distribution et les risques potentiels associés à la radioactivité naturelle. Des recherches menées dans diverses parties du monde ont montré que les niveaux de ces radionucléides peuvent varier considérablement et sont influencés par des facteurs géologiques et environnementaux [5-8, 11, 13, 15]. Des études dans des régions similaires à Madagascar ont démontré que les activités agricoles et de construction peuvent entraîner une exposition accrue à la radioactivité naturelle, nécessitant une cartographie et une analyse détaillées afin d'atténuer les risques potentiels pour la santé [6-8, 10, 11, 13].

Malgré la présence connue des radionucléides naturels, il manque des données sur leur distribution dans les sols du district d'Antalaha dans la région SAVA, côte Nord-Est de Madagascar. Cette lacune pose un défi pour évaluer les risques potentiels pour la santé de la population locale, quotidiennement exposée à ces radionucléides à travers leurs activités quotidiennes. Comprendre les activités spécifiques du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 dans cette région est important pour développer des stratégies efficaces de protection de la santé publique et garantir des pratiques agricoles et de constructions sûres.

Les objectifs de cette étude sont de quantifier les activités spécifiques de ces radionucléides dans diverses communes du district d'Antalaha et de contribuer à la création d'une carte détaillée de la distribution des radionucléides naturels dans la région Nord-Est de Madagascar. Cette recherche vise à fournir des données essentielles qui aideront à évaluer les risques potentiels pour la santé et à informer les politiques de la santé publique et les réglementations de sécurité.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Localisation et Géologie du site d'étude

Le district d'Antalaha a été choisi comme site d'étude de la présente recherche. Ce site, se trouve au Sud-Est du district de Sambava et à l'Est du district d'Andapa. Il est également bordé par l'océan Indien à l'est [16-18]. Les coordonnées géographiques sont comprises entre 14°43'09,41" - 15°59'26,30" Sud (latitude) et 49°50'43,09" - 50°32'07,79" Est (longitude). La **Figure 1** représente le site d'étude et les points de prélèvement des échantillons du sol.

La région SAVA se distingue par un relief massif où les hautes terres rencontrent rapidement la mer. Géomorphologiquement, cette région présente une diversité de formes telles que des reliefs volcaniques, quartziques et cristallins. Les principales unités de relief incluent des plateaux, des horsts et des grabens, résultant de mouvements tectoniques et orogéniques suivis de phases volcaniques répétées à la fin du Tertiaire et au Quaternaire. Le plateau de Makira et la presqu'île de Masoala sont des horsts encadrant le graben de la baie d'Antongil. Les bassins sédimentaires, caractérisés par le contact entre le socle et les sédiments, abritent de nombreux lacs et dépressions, comme la cuvette d'Ankaibe, propice aux cultures de rente tels que la vanille, le café, le girofle et la poivre. La côte, avec ses hautes falaises marines atteignant plus de 1 500 mètres d'altitude, est parsemée de bourrelets dunaires et de végétations adaptées aux milieux côtiers tropicaux, avec quelques présences de mangroves [18].

Cette région se distingue par deux grandes catégories de terrains: sédimentaires et cristallins. Les terrains sédimentaires, formés principalement par des apports fluviaux et éoliens, constituent une étroite plaine côtière reposant sur un socle précambrien. Les terrains cristallins, composés de granites, gabbros et migmatites, sont formés à la surface ou à l'intérieur de la terre d'origine volcanique. Les fréquents cyclones et les pluies abondantes favorisent l'érosion, transformant souvent les paysages cristallins en reliefs accidentés [16-18].

Le climat de la région est tropical chaud et humide, avec deux saisons bien distinctes : une saison chaude et pluvieuse du mois d'octobre au mois d'avril, et une saison fraîche du mois de mai au mois de septembre. Le littoral est caractérisé par des sols alluviaux peu évolués, hydromorphes et moyennement organiques, favorables aux diverses cultures. Les zones de reliefs forestiers, notamment à Vohémar et à l'Ouest de Sambava et d'Antalaha, présentent des sols ferrallitiques et ferrugineux tropicaux peu évolués. La cuvette d'Andapa, avec ses terrains d'alluvions argileuses hydromorphes, nécessite une maîtrise de drainage. La région possède d'importantes formations forestières dont la

forêt dense ombrophile de moyenne altitude, le Masoala et le Marojejy constituant des réserves naturelles. La forêt secondaire "savoka" domine le Sud et l'Ouest tandis que les savanes herbeuses se trouvent dans les zones à saison sèche plus marquée. La culture de la vanille occupe les terres alluviales sur les vallées d'Ampanefena au Nord jusqu'au Sud d'Antalaha [16-18].

Le district d'Antalaha, en particulier, présente un relief varié comprenant des plaines côtières, des collines et des montagnes. La géologie de ce district est dominée par des formations sédimentaires et métamorphiques, avec des intrusions granitiques. Les sols de ce district sont principalement composés de latérites, riches en fer et en aluminium, résultant de l'altération intense des roches sous un climat tropical humide. Ces caractéristiques géologiques influencent la distribution des radionucléides naturels dans les sols, contribuant à la variabilité observée aux niveaux de la radioactivité [16-18].

La population d'Antalaha est d'environ 220 374 habitants, avec une densité de 31,9 habitants par kilomètre carré. Le district couvre une superficie de 6 909,2 km², représentant les 24,2 % de la superficie totale de la région SAVA. Administrativement, le district d'Antalaha est composé de 14 communes dont Antalaha Ville, Ampahana, Ambinanifaho, Lanjarivo, Ampohibe, Marofinaritra, Antombana, Vinanivao, Ambohitralana, Ambalabe, Antsambalahy, Sarahandrano, Antsahanoro et Antananambo. Ce district est principalement rural, avec la commune d'Antalaha comme seule zone urbaine, qui est également le chef-lieu du district [16-18].

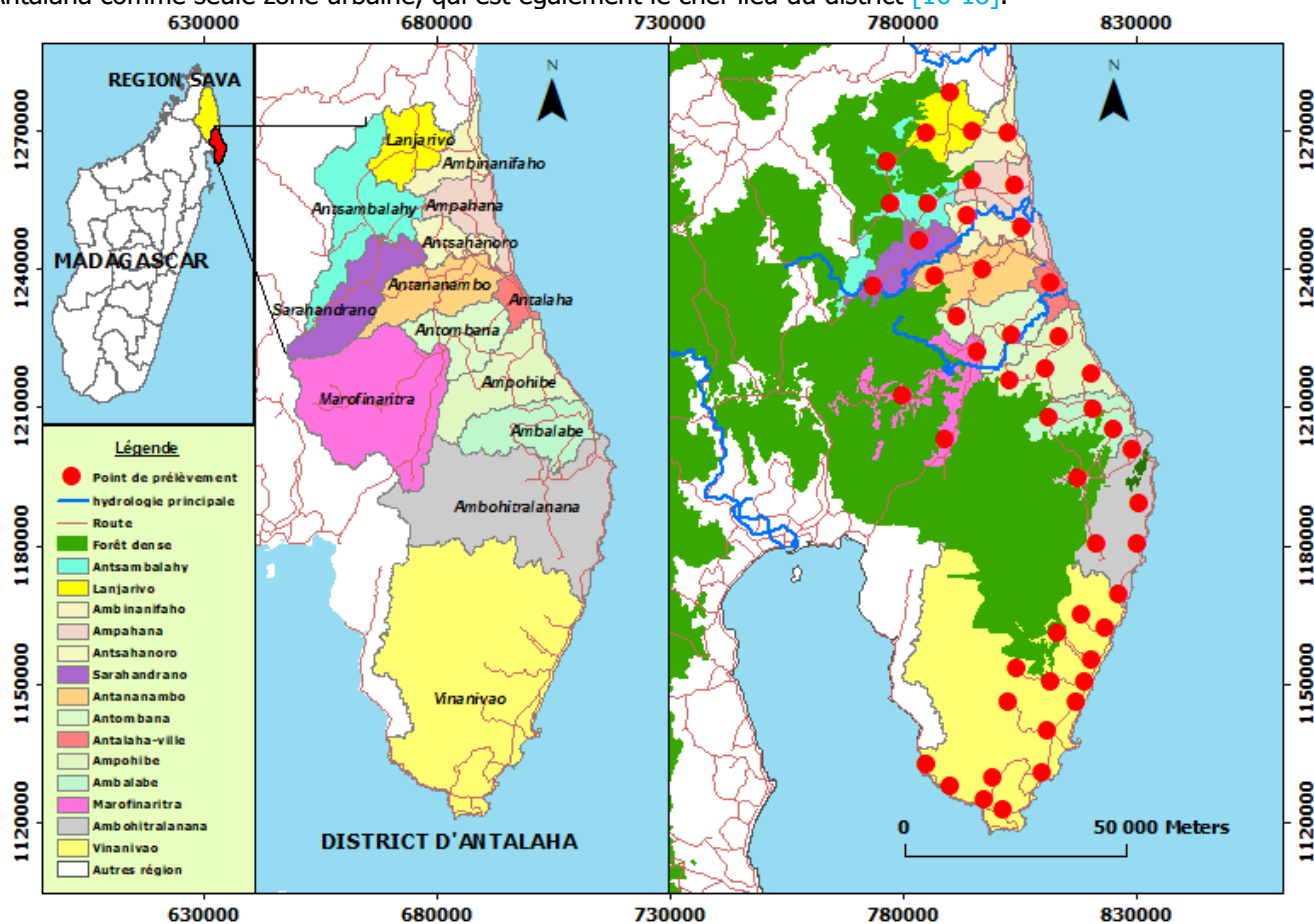


Figure 1 : Localisation des points de prélèvements des échantillons du sol du district d'Antalaha.

2.2. Protocole de prélèvement des échantillons du sol

La **Figure 2** ci-dessous résume le protocole de prélèvement des échantillons du sol.

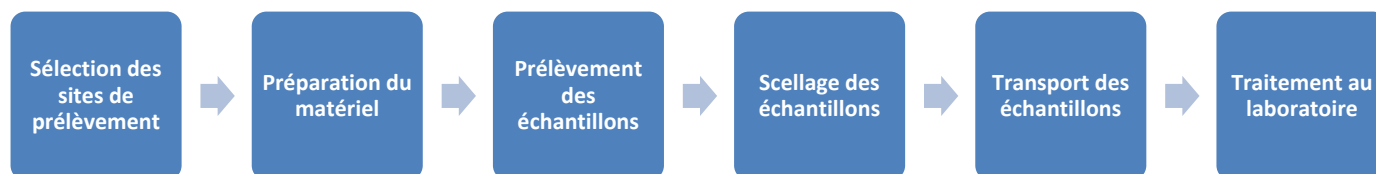


Figure 2 : Différentes étapes de prélèvements des échantillons du sol

D'après le protocole présenté dans la **Figure 2**, les campagnes de prélèvement des échantillons des sols ont eu lieu entre décembre 2022 et mars 2023, dans différentes communes du district d'Antalaha. Les prélèvements ont été effectués dans des endroits fréquentés par la population. Pour chaque échantillon, une quantité de 500 g de sol a été collectée à une profondeur de 30 cm à l'aide d'une pelle. Les échantillons ont ensuite été placés dans des sachets en plastique étiquetés. Les informations sur les étiquettes comprennent des codes et des dates de prélèvement, respectant l'ordre de prélèvement. De plus, les coordonnées géographiques de chaque point de prélèvement ont été prises à l'aide d'un GPS de marque Etrex Garmin. Ces points d'échantillonnage sont représentés sur la **Figure 1**. Au total, cinquante (50) échantillons des sols ont été collectés lors de ces campagnes de prélèvement, dans des endroits non perturbés et non influencés par le phénomène d'érosion. Par la suite, l'ensemble des échantillons des sols collectés a été emballé dans des sacs en polyéthylène et transporté au laboratoire.

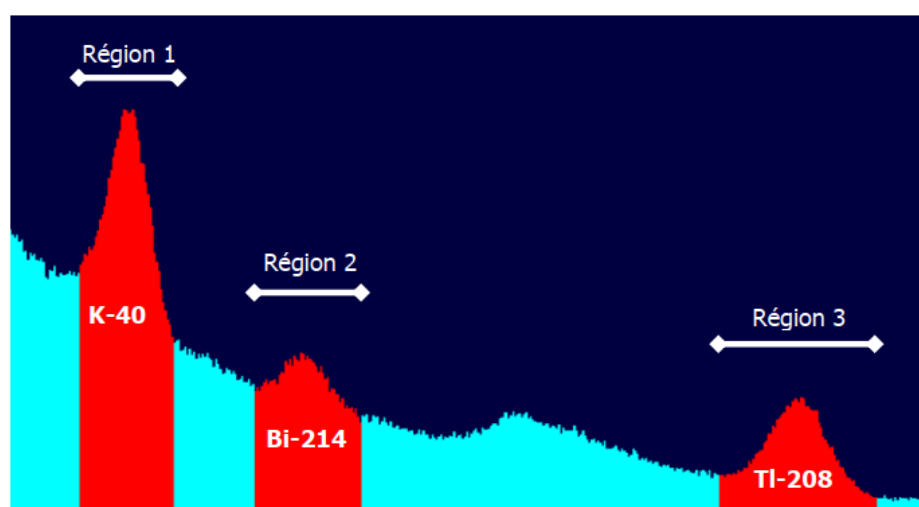
2.3. Préparation et mesure des échantillons du sol au laboratoire

• Préparation des échantillons

Au laboratoire du département Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar, les échantillons des sols ont été préparés physiquement conformément au protocole de préparation des échantillons du sol en vue de les mesurer sur la chaîne de spectrométrie gamma. Tout d'abord, ils ont été séchés à 80 °C dans une étuve pendant 24 heures pour minimiser l'humidité. Ensuite, ils ont été broyés à l'aide d'un mortier et d'un pilon, puis tamisés à travers une maille de 2 mm pour séparer les grosses particules. Après avoir été homogénéisés, ils ont été placés dans des porte-échantillons cylindriques en polyéthylène de 100 cm³ soigneusement fermés hermétiquement et stockés pendant trois semaines afin d'atteindre l'équilibre séculaire entre le radium-226 et ses descendants [5-7].

• Analyse par spectrométrie gamma

Les analyses d'échantillons ont été effectuées dans le département Analyses et Techniques Nucléaires de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar), en utilisant la chaîne de spectrométrie gamma équipée d'un détecteur NaI(Tl) de marque ORTEC, de forme cylindrique et de dimension 76,2 mm x 76,2 mm (hauteur x diamètre). Ce détecteur est doté d'un tube photomultiplicateur comportant 14 étages de dynodes utilisant la technologie digiBase. Le générateur de haute tension de ce système fournit une tension de 800 volts avec une intensité maximale de 500 mA. Ce détecteur possède également un gain de conversion de 1024 canaux et un gain d'amplification variant entre 0,40 et 1,20. De plus, le temps mort du détecteur est inférieur à 5 % à un taux de 50 000 coups par seconde. La résolution énergétique du détecteur (FWHM) à 1332,5 keV (pour le pic de ⁶⁰Co) est de 7,5 %. Le détecteur est placé à l'intérieur d'un blindage en acier inoxydable à deux couches (10 mm d'épaisseur) et en plomb (30 mm d'épaisseur) pour minimiser les rayonnements extérieurs, ainsi que la contribution du rayonnement diffusé par le blindage [5]. Le temps de comptage a été fixé à 24 heures pour tous les échantillons de sol afin d'obtenir des comptages statistiquement suffisants. Les mesures de masses connues des échantillons ont permis de déterminer les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et de la famille du thorium-232. La méthode décrite par Rybach a été utilisée pour traiter les spectres obtenus.



K-40 : potassium-40 ; **Bi-214** : bismuth-214 ; **Tl-208** : thallium-208

Figure 3 : Spectre des trois régions d'intérêt décrites par Rybach.

Ainsi, trois régions d'intérêt dans le spectre de rayonnement gamma centrées approximativement aux sommets des trois pics caractéristiques des pics d'énergie 1 461 keV du potassium-40, 1 764,5 keV du bismuth-214 et 2 614,5 keV

du thallium-208 sont considérées, correspondant respectivement du potassium-40 et aux familles de l'uranium-238 et du thorium-232. En 1988, Rybach a suggéré que la largeur des régions d'intérêt devrait être égale à 10% de l'énergie du radionucléide caractéristique. La **Figure 3** illustre les trois régions d'intérêt d'un spectre gamma des échantillons du sol. Ces spectres sont obtenus à l'aide du logiciel ScintiVision [2, 3, 5, 7, 10]. Ce logiciel permet de quantifier les activités spécifiques du potassium-40, des familles de l'uranium-238 et du thorium-232.

La **Figure 4** ci-dessous représente la chaîne d'acquisition. Cette chaîne est composée d'un détecteur dont la partie sensible est un cristal d'iodure de sodium dopé au thallium [NaI(Tl)], d'un générateur de haute tension, d'un préamplificateur, d'un amplificateur, d'un convertisseur analogique-numérique (ADC), d'un analyseur multicanaux (MCA) et d'un système de traitement informatique [5, 11]. Cette chaîne a été étalonnée en énergie et en efficacité à l'aide de matériaux de référence certifiés par l'Agence Internationale de l'Énergie Atomique (AIEA) (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) afin d'obtenir des résultats précis et fiables pour les activités spécifiques des radionucléides.

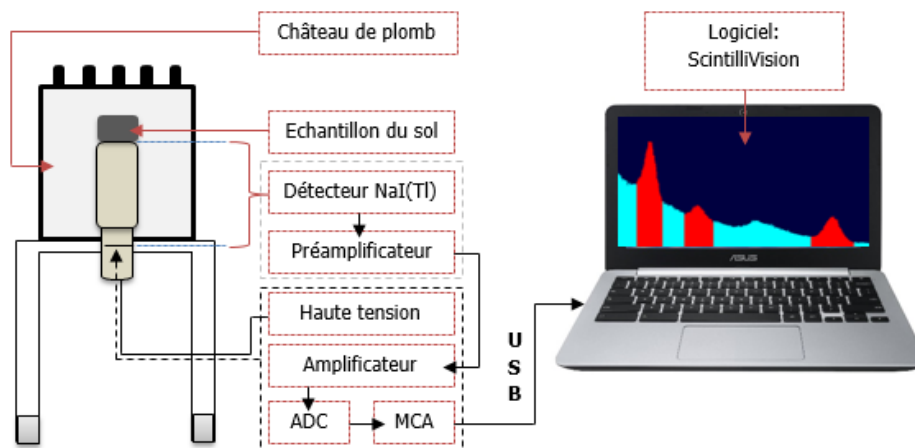


Figure 4 : Dispositif d'analyse avec le détecteur NaI(Tl) du laboratoire de l'INSTN-Madagascar

2.3. Activités spécifiques des radionucléides

A_K , A_U et A_{Th} sont respectivement les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et de la famille du thorium-232, et sont déterminées à l'aide de méthode développée par Rybach [2, 7, 12] :

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

Avec R_K , R_U et R_{Th} représentent respectivement les taux de comptage nets enregistrés du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et de la famille du thorium-232.

De plus, l'activité nette du radionucléide dans l'échantillon du sol est calculée en soustrayant l'activité brute à l'activité du bruit de fond ambiant.

Les incertitudes des activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232 sont déterminées à partir de la formule de propagation des erreurs. Alors, on a les expressions suivantes :

- o Potassium-40

$$\sigma_{A_K} = \sqrt{(R_K \sigma_{a_{1,1}})^2 + (a_{1,1} \sigma_{R_K})^2 + (R_U \sigma_{a_{1,2}})^2 + (a_{1,2} \sigma_{R_U})^2 + (R_{Th} \sigma_{a_{1,3}})^2 + (a_{1,3} \sigma_{R_{Th}})^2} \quad (2)$$

- o Famille de l'uranium-238

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

- Famille du thorium-232

$$\sigma_{A_{Th}} = \sqrt{\left(R_U \sigma_{a_{3,2}}\right)^2 + \left(a_{3,2} \sigma_{R_U}\right)^2 + \left(R_{Th} \sigma_{a_{3,3}}\right)^2 + \left(a_{3,3} \sigma_{R_{Th}}\right)^2} \quad (4)$$

2.3. Activité du radium équivalent

En raison de la non-uniformité de la distribution des radionucléides naturels dans le sol, les niveaux d'activité réelle du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 (en particulier le radium-226) et de la famille du thorium-232 dans les échantillons peuvent être évalués au moyen d'un indice radiologique commun appelé activité du radium équivalent (Ra_{eq}). Cet indice représente les activités de ces trois radionucléides en une seule quantité [20]. De plus, 98,5 % du risque radiologique de la famille de l'uranium-238 provient du radium et de ses descendants. Par conséquent, la famille de l'uranium-238 peut être remplacée par son descendant, le radium-226. Dans la définition de l'activité du radium équivalent, il est supposé que 4 810 Bq.kg⁻¹ du potassium-40, 370 Bq.kg⁻¹ du radium-226 et 259 Bq.kg⁻¹ de la famille du thorium-232 produisent le même taux de dose de rayonnement gamma [15, 21]. L'activité équivalente du radium est exprimée par la formule proposée par Beretka et Mathew [20, 22-25].

$$Ra_{eq} = 370 \times H_{ex} \quad (5)$$

$$\text{Avec } H_{ex} = \left(\frac{A_K}{4810} + \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} \right) \leq 1 : \text{ indice de risque d'exposition externe.}$$

L'équation (5) devient alors :

$$\left\{ \begin{array}{l} Ra_{eq} = 370 \left(\frac{A_K}{4810} + \frac{A_{Ra}}{370} + \frac{A_{Th}}{259} \right) \\ \text{ou} \\ Ra_{eq} = 0,077 \times A_K + A_{Ra} + 1,429 \times A_{Th} \end{array} \right. \quad (6)$$

Où Ra_{eq} : Activité du radium équivalent en Bq.kg⁻¹ ;

A_K , A_{Ra} et A_{Th} sont respectivement les activités spécifiques du potassium-40, du radium-226 (famille de l'uranium-238) et de la famille du thorium-232 dans les échantillons.

3. RESULTATS

À partir des équations (1) et (6), on obtient les valeurs des activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238, de la famille du thorium-232 et les activités du radium équivalent. Ces activités calculées pour chaque échantillon sont exprimées en Bq.kg⁻¹.

2.3. Activités spécifiques des radionucléides naturels dans le district d'Antalaha

En examinant les résultats illustrés dans le **Tableau 3** et sur les **Figure 5**, **6** et **7**, la présence des radionucléides naturels tels que le potassium-40, la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232 a été détectée sur les sols du district d'Antalaha.

Tableau 3 : Activités spécifiques des trois radionucléides naturels dans le district d'Antalaha.

Code d'échantillon	Activités spécifiques (Bq.kg ⁻¹)			
	Potassium-40	Uranium-238	Thorium-232	Radium équivalent
Ech-01	131 ± 8	23 ± 4	40 ± 6	91 ± 13
Ech-02	257 ± 7	32 ± 5	47 ± 5	119 ± 13
Ech-03	429 ± 10	18 ± 5	70 ± 5	152 ± 13
Ech-04	512 ± 12	49 ± 4	86 ± 6	212 ± 13
Ech-05	314 ± 10	32 ± 4	35 ± 5	107 ± 12
Ech-06	219 ± 7	15 ± 4	36 ± 5	84 ± 12
Ech-07	154 ± 8	28 ± 3	41 ± 6	99 ± 12
Ech-08	525 ± 10	13 ± 5	33 ± 5	101 ± 13
Ech-09	419 ± 10	69 ± 4	115 ± 5	266 ± 13
Ech-10	232 ± 6	39 ± 2	83 ± 5	175 ± 10
Ech-11	321 ± 6	87 ± 4	110 ± 5	268 ± 11
Ech-12	224 ± 7	23 ± 5	37 ± 5	94 ± 13
Ech-13	258 ± 6	19 ± 3	43 ± 5	101 ± 10
Ech-14	298 ± 8	13 ± 5	29 ± 5	78 ± 13
Ech-15	124 ± 5	19 ± 3	33 ± 4	76 ± 10
Ech-16	164 ± 7	45 ± 5	91 ± 6	188 ± 13
Ech-17	222 ± 8	51 ± 4	66 ± 6	162 ± 12
Ech-18	158 ± 7	24 ± 5	37 ± 5	89 ± 13
Ech-19	317 ± 6	27 ± 3	68 ± 4	149 ± 10
Ech-20	134 ± 7	68 ± 4	83 ± 5	197 ± 12
Ech-21	345 ± 9	44 ± 5	73 ± 5	175 ± 13
Ech-22	309 ± 8	46 ± 3	71 ± 5	172 ± 12
Ech-23	327 ± 9	70 ± 4	133 ± 6	286 ± 13
Ech-24	406 ± 9	25 ± 5	39 ± 5	113 ± 13
Ech-25	253 ± 6	19 ± 2	25 ± 5	75 ± 9
Ech-26	175 ± 7	29 ± 5	47 ± 5	110 ± 14
Ech-27	169 ± 5	11 ± 3	23 ± 4	57 ± 9
Ech-28	388 ± 10	7 ± 3	18 ± 5	63 ± 12
Ech-29	320 ± 9	50 ± 5	73 ± 5	179 ± 13
Ech-30	371 ± 10	33 ± 3	68 ± 5	160 ± 12
Ech-31	488 ± 25	27 ± 4	80 ± 8	160 ± 12
Ech-32	166 ± 15	19 ± 3	42 ± 5	179 ± 17
Ech-33	445 ± 11	65 ± 7	149 ± 13	92 ± 11
Ech-34	692 ± 22	52 ± 5	41 ± 5	312 ± 26
Ech-35	628 ± 17	43 ± 4	50 ± 5	164 ± 14
Ech-36	171 ± 7	41 ± 5	40 ± 4	163 ± 12
Ech-37	148 ± 9	40 ± 3	63 ± 3	111 ± 11
Ech-38	496 ± 11	31 ± 4	23 ± 4	141 ± 8
Ech-39	755 ± 32	47 ± 6	58 ± 5	102 ± 11
Ech-40	248 ± 13	41 ± 3	56 ± 6	188 ± 16
Ech-41	128 ± 6	23 ± 4	42 ± 7	140 ± 13
Ech-42	123 ± 10	34 ± 5	24 ± 3	93 ± 14
Ech-43	141 ± 8	6 ± 2	24 ± 6	78 ± 10
Ech-44	105 ± 14	33 ± 8	88 ± 11	51 ± 11
Ech-45	121 ± 7	22 ± 4	36 ± 9	167 ± 25
Ech-46	87 ± 5	10 ± 2	25 ± 4	83 ± 17
Ech-47	214 ± 11	13 ± 2	22 ± 3	52 ± 8
Ech-48	115 ± 9	16 ± 4	18 ± 3	61 ± 7
Ech-49	68 ± 6	20 ± 3	21 ± 4	51 ± 9
Ech-50	33 ± 5	18 ± 3	22 ± 3	55 ± 9
Moyenne ± σ	277 ± 3	33 ± 5	54 ± 5	133 ± 10
[Minimale-Maximale]	[33 - 755]	[6 - 87]	[18 - 149]	[51-312]
Moyenne mondiale (UNSCEAR, 2000) [15]	400	35	30	370*

Ech : Echantillon ; σ : Incertitude ; * : Limite maximale admissible.

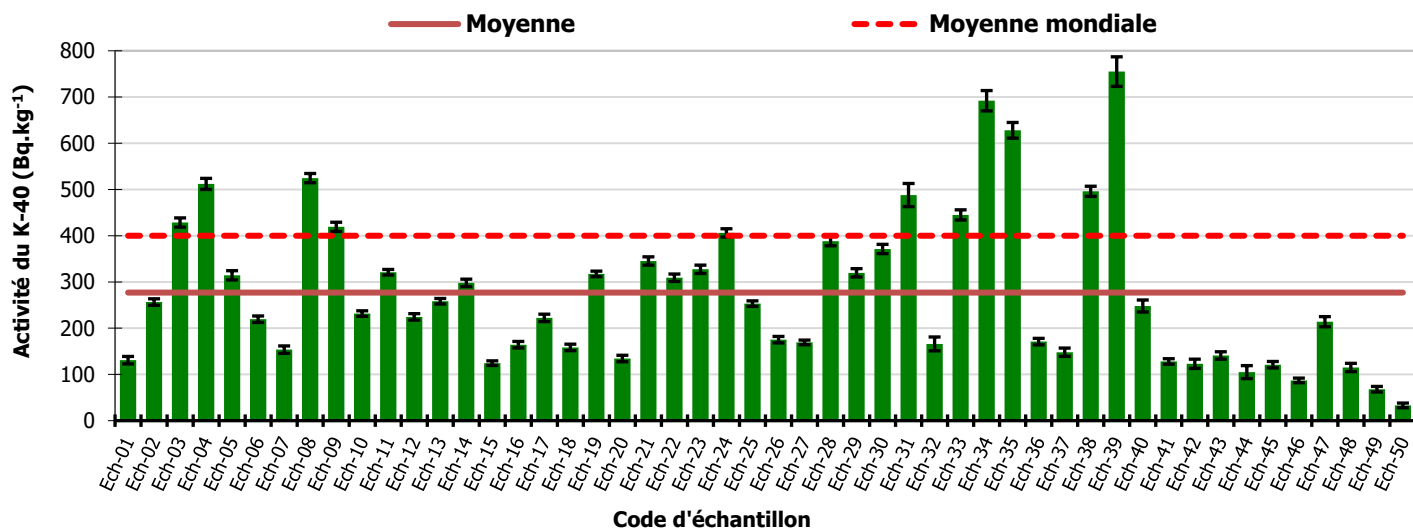


Figure 5 : Activités spécifiques du potassium-40 sur le sol du district d'Antalaha.

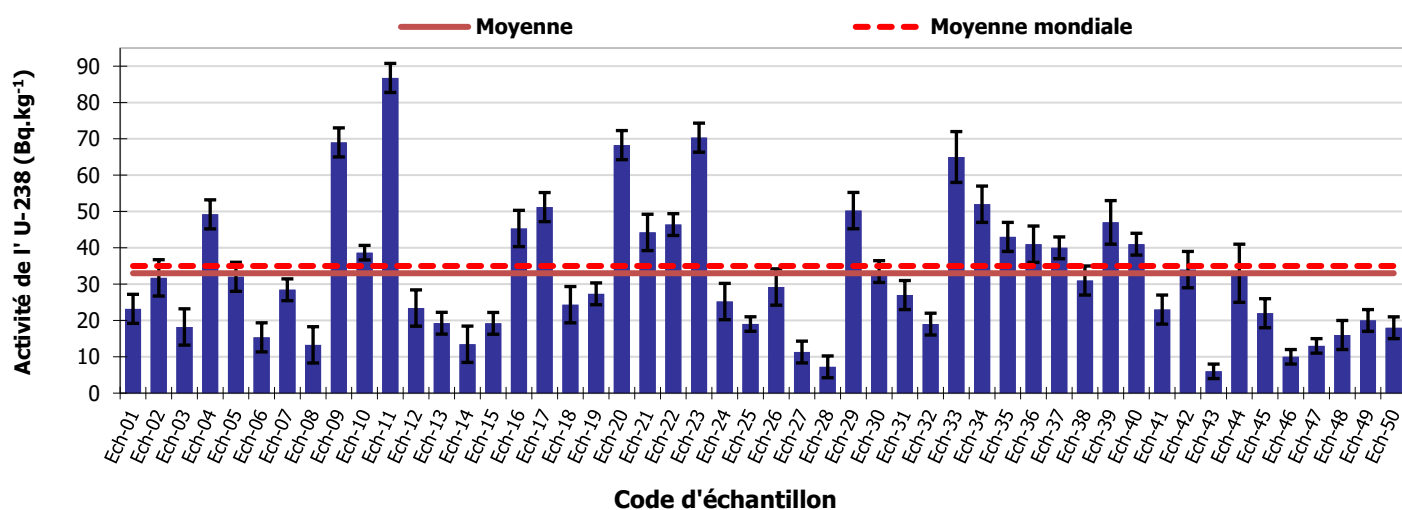


Figure 6 : Activités spécifiques de la famille de l'uranium-238 sur le sol du district d'Antalaha.

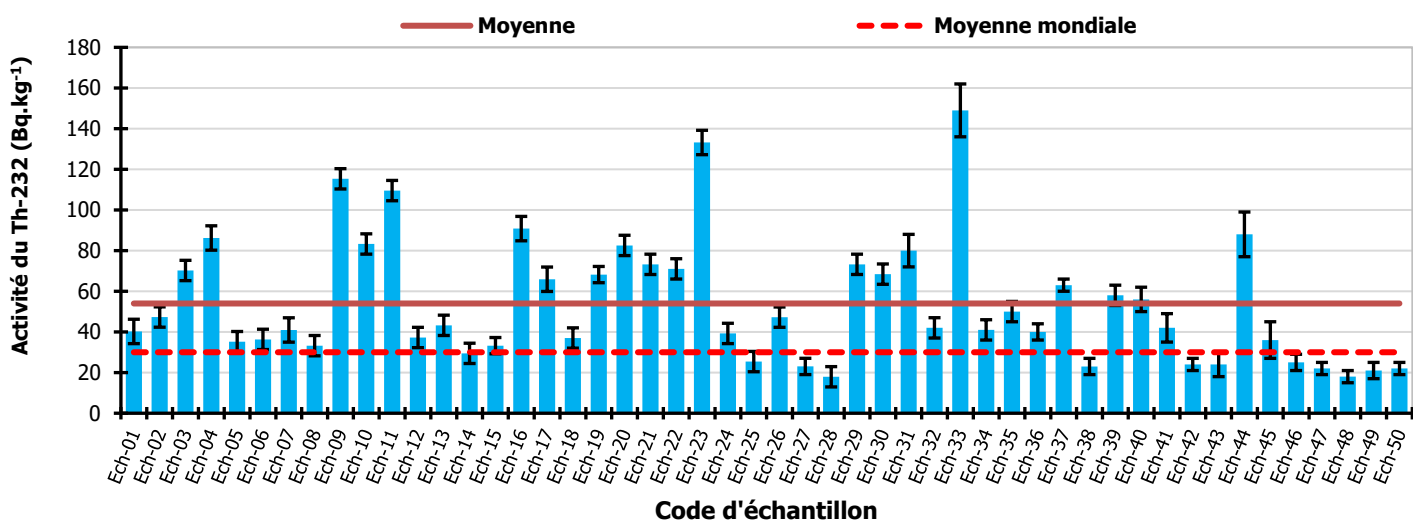


Figure 7 : Activités spécifiques de la famille du thorium-232 sur le sol du district d'Antalaha.

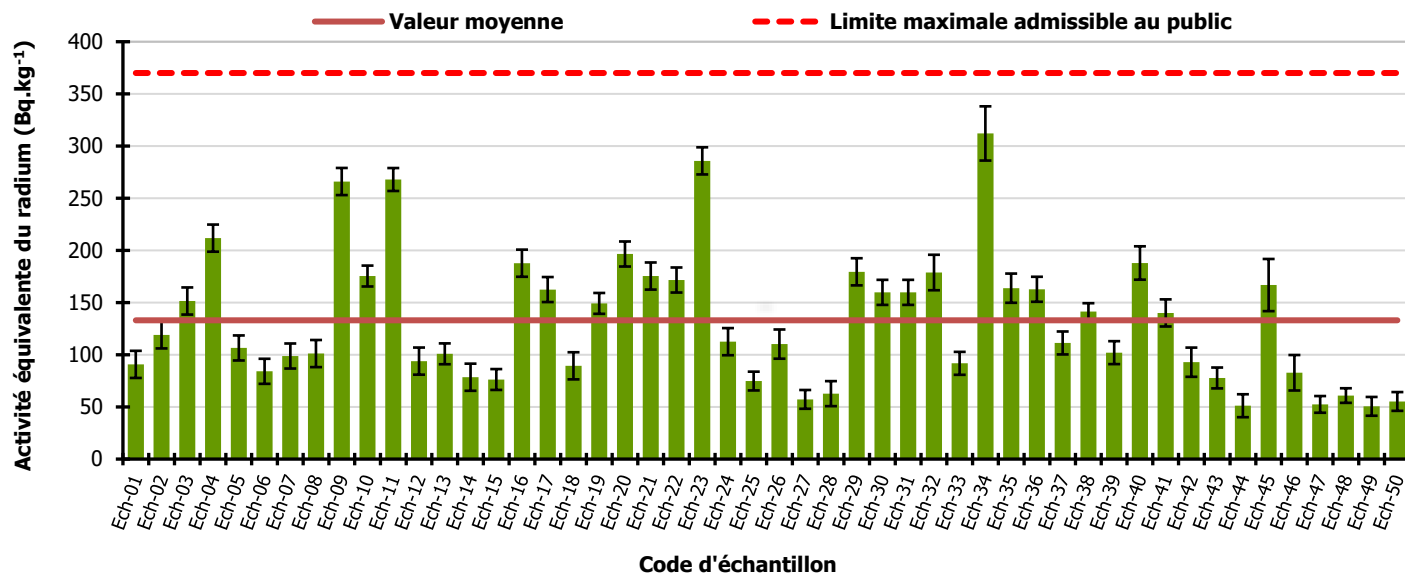


Figure 8 : Activité du radium équivalent sur le sol du district d'Antalaha.

Les résultats obtenus dans la présente étude, à partir des **Figures 5, 6, et 7**, indiquent que les activités spécifiques de ces trois radionucléides varient d'un endroit à l'autre. Parmi les cinquante échantillons de sol collectés, onze présentent des activités spécifiques de potassium-40 supérieures à la moyenne mondiale de 400 Bq.kg^{-1} . Pour la famille de l'uranium-238, dix-sept échantillons ont des activités spécifiques supérieures la moyenne mondiale de 35 Bq.kg^{-1} . En ce qui concerne la famille du thorium-232, trente-huit échantillons de sol ont des activités spécifiques supérieures à la moyenne mondiale de 30 Bq.kg^{-1} . Selon les résultats de la **Figure 8**, les activités du radium équivalent dans les sols du district d'Antalaha varient de $(51 \pm 9) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(312 \pm 26) \text{ Bq.kg}^{-1}$. La valeur moyenne est de $(133 \pm 10) \text{ Bq.kg}^{-1}$. Ces résultats montrent que toutes les valeurs des activités du radium équivalent sont inférieures à la limite maximale admissible au public recommandée par l'ICRP (International Commission on Radiological Protection) et l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), qui est de 370 Bq.kg^{-1} [15, 26].

3.2 Corrélation entre les activités de ces trois radionucléides naturels

Les **Figure 9, 10 et 11** montrent les résultats de corrélation entre les activités de ces trois radionucléides naturels du sol du district d'Antalaha.

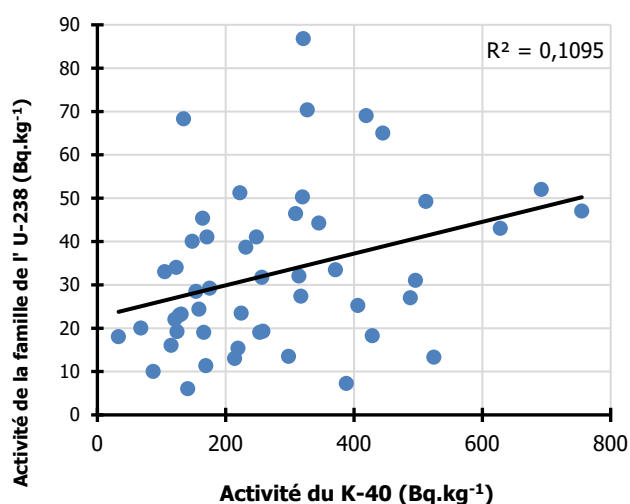


Figure 9 : Corrélation entre K-40 et famille d'U-238 sur les sols du district d'Antalaha.

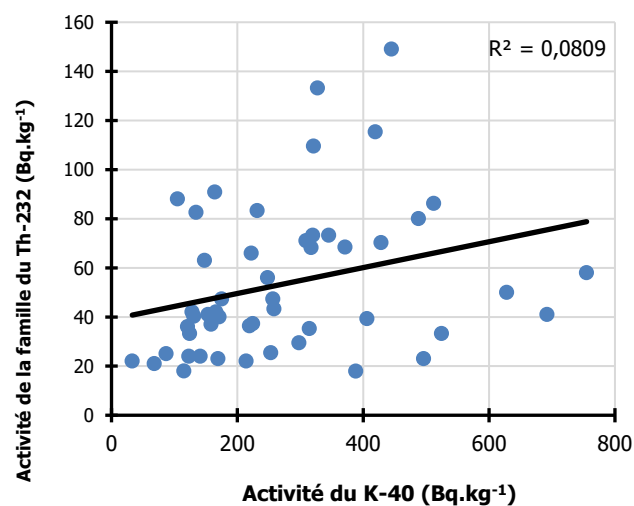


Figure 10 : Corrélation entre K-40 et famille du Th-232 sur les sols du district d'Antalaha.

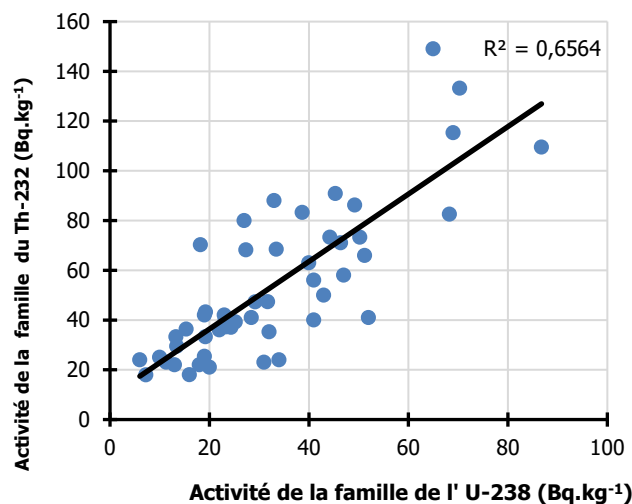


Figure 11 : Corrélation entre famille de l'U-238 et famille du Th-232 sur les sols du district d'Antalaha

Selon les résultats des **Figures 9** et **10**, on observe que les nuages de points s'écartent de la droite d'ajustement. Cela révèle que la corrélation entre le potassium-40 et la famille de l'uranium-238, ainsi qu'entre le potassium-40 et la famille du thorium-232, est remarquablement faible. Leurs coefficients de corrélation respectifs sont ($R^2 = 0,1095$) et ($R^2 = 0,0809$). En revanche, pour la **Figure 11**, les nuages de points formés par les activités spécifiques de la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232 se rapprochent de la droite d'ajustement avec un coefficient de corrélation de ($R^2 = 0,6564$). Cela implique qu'il existe une corrélation modérée entre ces deux familles de radionucléides naturels.

4. DISCUSSION

En analysant les résultats des 50 échantillons des sols, on constate que le potassium-40, la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232 ont été quantifiées dans les sols du district d'Antalaha. Les résultats révèlent que les activités spécifiques de ces trois radionucléides naturels varient d'un point à un autre.

En comparant les résultats obtenus avec les valeurs de la moyenne mondiale et d'autres études similaires dans le Nord de Madagascar, on aperçoit que :

- L'activité moyenne du potassium-40 dans les sols du district d'Antalaha (277 Bq.kg^{-1}) est inférieure à la moyenne mondiale (400 Bq.kg^{-1}) [15]. Elle est également inférieure à celle trouvée dans le sol de l'axe d'Antalaha-Ambohitralanana (338 Bq.kg^{-1}), dans le sol de la rive de Baie de français à Antsiranana (313 Bq.kg^{-1}), dans le sol du Presqu'île d'Ampasindava à Ambanja (355 Bq.kg^{-1}) et significativement faible que celles dans les sols du district d'Ambilobe (578 Bq.kg^{-1}) et de Sambirano à Ambanja ($1\ 025 \text{ Bq.kg}^{-1}$) [3, 7, 9, 10, 12]. Cependant, cette activité est supérieure à celles obtenus dans les sols de Befandriana Nord (200 Bq.kg^{-1}), de Montagne d'Ambre à Antsiranana II (218 Bq.kg^{-1}) et dans le sable de plage de Ramena à Antsiranana II (198 Bq.kg^{-1}) [2, 5, 14].
- L'activité moyenne de la famille de l'uranium-238 (33 Bq.kg^{-1}) est supérieure aux résultats trouvés dans le sol de l'axe d'Antalaha-Ambohitralanana (23 Bq.kg^{-1}), de Sambirano à Ambanja (21 Bq.kg^{-1}) et du district d'Ambilobe (18 Bq.kg^{-1}) [7, 10, 12]. Certes, cette activité est presque comparable à la valeur moyenne mondiale (35 Bq.kg^{-1}) [15]. Par contre, cette activité est inférieure aux résultats obtenus dans le sol de la Baie de français à Antsiranana (139 Bq.kg^{-1}), du Presqu'île d'Ampasindava à Ambanja (76 Bq.kg^{-1}), de Befandriana Nord (56 Bq.kg^{-1}) et de la Montagne d'Ambre à Antsiranana II (44 Bq.kg^{-1}), ainsi que dans le sable de la plage de Ramena à Antsiranana II (109 Bq.kg^{-1}), [2, 3, 5, 9, 14].
- L'activité moyenne de la famille du thorium-232 (54 Bq.kg^{-1}) est légèrement supérieure à la valeur moyenne mondiale (30 Bq.kg^{-1}) et aux résultats analysés dans le sol du district d'Ambilobe (40 Bq.kg^{-1}) et de l'axe d'Antalaha-Ambohitralanana (31 Bq.kg^{-1}) [7, 12, 15]. Cependant, cette activité est faible devant les résultats obtenus dans le sable de plage de Ramena à Antsiranana II (77 Bq.kg^{-1}), et dans le sol du Presqu'île d'Ampasindava à Ambanja (261 Bq.kg^{-1}), de Sambirano à Ambanja (198 Bq.kg^{-1}), de la Baie de français à Antsiranana (126 Bq.kg^{-1}), de Befandriana Nord (118 Bq.kg^{-1}) et de la Montagne d'Ambre à Antsiranana II (90 Bq.kg^{-1}) [2, 3, 5, 9, 10, 14].

Ces résultats sont importants pour évaluer les niveaux de la radioactivité dans les différentes communes du district d'Antalaha et pour comprendre leur impact potentiel dans l'environnement et pour la santé publique. Dans l'ensemble,

les activités spécifiques des radionucléides naturels dans les sols du district d'Antalaha sont dominées par le potassium-40, suivi de la famille du thorium-232 et de la famille de l'uranium-238. Les résultats montrent que ces radionucléides ne sont pas uniformément distribués dans les sols du district d'Antalaha, en raison des structures géologiques et des caractéristiques pédologiques propres de ce district. Quant au radium équivalent, aucune de ces activités ne dépasse la limite admissible au public recommandée par l'ICRP et l'UNSCEAR, qui est de 370 Bq.kg⁻¹. Cela signifie que l'utilisation des matières premières telles que le sable, le sol et les roches pour la construction d'infrastructures diverses ne présente pas de risques radiologiques notable pour la population locale.

Concernant les corrélations entre ces trois radionucléides naturels, de manière générale, il n'y a pas de relation significative entre les activités spécifiques de ces radionucléides naturels dans les sols du district d'Antalaha, sauf pour le cas de la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232. Pour le cas du potassium-40 particulièrement, il n'est pas corrélé avec la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232. La raison en est que ces radionucléides proviennent de sources différentes et sont soumis à des processus d'enrichissement distincts dans l'environnement [27]. Cependant, quant à la famille de l'uranium-238 et à celle du thorium-232, elles présentent une corrélation ($R^2 = 0,6564$) du fait que ces éléments proviennent des mêmes minéraux.

5. CONCLUSION

Cette étude nous a permis de quantifier les activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232 dans les communes rurales et urbaine du district d'Antalaha et de contribuer à la création d'une carte de la distribution des radionucléides naturels dans la région Nord de Madagascar. Au total, 50 échantillons du sol ont été collectés dans le district d'Antalaha, et analysés par un spectromètre gamma, muni d'un détecteur NaI(Tl). Les résultats révèlent des variations significatives des activités spécifiques des radionucléides naturels d'un endroit à l'autre dans les sols du district d'Antalaha. Ces fluctuations reflètent l'influence des facteurs géologiques et géographiques locaux. Les données obtenues nous permettent d'évaluer les risques potentiels pour la santé et d'informer les politiques de santé publique et les réglementations de sécurité dans le district d'Antalaha. En ce qui concerne les estimations des activités du radium équivalent, nous pouvons conclure que l'utilisation courante de matériaux de construction ne présente pas de risques radiologiques pour la population locale, car leurs activités restent en dessous de limite recommandée par l'ICRP et l'UNSCEAR. Cependant, une surveillance continue est essentielle pour garantir la sécurité à long terme. Bien que les activités spécifiques des radionucléides ne soient pas directement liées, il est crucial de sensibiliser la population locale et de mettre en place des politiques de santé publique, notamment des directives sur l'utilisation des matériaux de construction et des pratiques agricoles, afin de minimiser l'exposition aux rayonnements ionisants. Cette recherche apporte notre compréhension de la distribution des radionucléides naturels dans la région de SAVA et servira comme base de données pour des recherches futures et des décisions éclairées en matière de santé et de sécurité.

Reconnaissance : Les travaux de recherche et les analyses d'échantillons ont été menés au Département Analyses et Techniques Nucléaires de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar). Alors, nous exprimons nos sincères remerciements envers la Direction Générale de l'institut pour avoir autorisé à faire cette étude au sein du laboratoire de l'INSTN-Madagascar, ainsi qu'envers l'équipe scientifique et technique du Département ATN, qui a facilité l'accès aux équipements de préparation et de mesure, et nous a assistés dans le traitement et l'interprétation des données.

6. RÉFÉRENCES

1. Garruchet V, Bosc PM, Mialet-Serra I. L'Agriculture à Madagascar: Évolution, chiffres clés et défis. Synthèse complète sur l'agriculture à Madagascar. Plateforme régionale en recherche agronomique pour le développement dans l'océan Indien (PRéRAD-OI); 2023.
2. Kall B, Donné Z, Rasolonirina M, Rabesiranana N, Rambolamanana G. Contribution à l'étude de la radioactivité gamma du sable des plages de Ramena et d'Orangea, Antsiranana, Madagascar. *Afrique science*. 2014;10(4):23-35.
3. Kall B, Tombo T, Rasolonirina M, Rabesiranana N, Rambolamanana G. 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*. 2015;11(1):122-135.
4. Rakotonarivo RR, Ravelomanantsoa DS, Rasolonirina M, Ratovonjanahary FJ. Contribution à l'étude de la radioactivité du sol de l'extrême nord de Madagascar. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2019;8(3):100-112.
5. Donné Z, Rasolonirina M, Djaovagnono HC, Kall B, Rabesiranana N, Rajaobelison J. Study of water radioactivity transfer from telluric origin in the Amber Mountain, Antsiranana, Madagascar. *Scientific African*. 2021;13:e00902. doi: 10.1016/j.sciaf.2021.e00902
6. Donné Z, Rasolonirina M, Nirina S, Rabesiranana N, Kall B. Contribution des eaux de consommation à l'exposition dosimétrique dans la Ville d'Antsiranana, Madagascar. *Afrique science*. 2020;17(1):137-151.
7. Stolerie JP, Rasolonirina M, Donné Z, Rabesiranana N, Kall B. Etude de la radioactivité naturelle d'origine tellurique du district d'Ambilobe, Madagascar. *American Journal of Innovative Research Applied Sciences*. 2021;13(5):518-529. Disponible sur : <https://www.american-jiras.com/Stolerie%E2%80%93ajira221021.pdf>
8. Stolerie JP, Rasolonirina M, Donné Z, Rabesiranana N, Kall B. Distribution des activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et celle du thorium-232 dans le sol et leur impact dosimétrique sur la population locale du district d'Ambilobe. *American Journal of Innovative Research Applied Sciences*. 2022;15(3):62-72. Disponible sur : <https://www.american-jiras.com/Stolerie%E2%80%93ajiras250722.pdf>
9. Rafidimanantsoa O, Rasolonirina M, Donné Z, Ralaarison PH, Tonissa S, Rabesiranana N, et al. Caractérisation de la radioactivité naturelle du gisement des terres rares, de la presqu'île d'Ampasindava, du nord-ouest de Madagascar. *American Journal of Innovative Research Applied Sciences*. 2021;13(4):452-461. Disponible sur : <https://american-jiras.com/Rafidimanantsoa%E2%80%93ajira280921.pdf>

10. Antonjara A, Rasolonirina M, Asimanana F. Contribution à l'étude de la radioactivité des fèves du cacao à Madagascar, cas de la plaine du Sambirano – Ambanja. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2016;3(3):520-528. Disponible sur : <https://americanjiras.com/Arnoldy%20ManuscriptRef.1-ajiras281016.pdf>
11. Rahelivao JE, Donné Z, Razafindrapata A, Joelisoafara AI, Rasolonirina M, Kall B. Study of Natural Radioactivity Levels and the Associated Radiological Hazards in Soil from Ambanja City and its Surroundings, Madagascar. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*. 2023;12(5). doi: 10.15680/IJRSET.2023.1202005
12. Barijaona AF, Asimanana F, Rasolonirina M. Contribution à l'étude de la radioactivité naturelle, par spectrométrie gamma, du sol dans la zone littorale d'Antalaha-Ambohitralanana Madagascar. *Afrique Science*. 2017;13(2).
13. Rabesiranana N. Contribution à l'étude de la radioactivité environnementale à Madagascar : de la quantification à l'utilisation des traceurs radio-isotopiques environnementaux [HDR]. Antananarivo: Université d'Antananarivo; 2017.
14. Randrianarivo A, Asivelo F, Solonjara, Asimanana F. Contribution à l'étude de la radioactivité du sol de district de Befandriana-Nord, Madagascar. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*. 2017;4(1):22-28. Disponible sur : <https://www.american-jiras.com/Albert%20ManuscriptRef.4-ajiras17116.pdf>.
15. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, Exposures from natural radiation sources, Annex B. New York: UNSCEAR; 2000.
16. Wikipédia. Sava (région). Consulté le 18 Août 2024. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Sava_\(r%C3%A9gion\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Sava_(r%C3%A9gion))
17. Wikipédia. District d'Antalaha. Consulté le 18 Août 2024. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/District_d%27Antalaha
18. Groupement des Entreprises de Madagascar (GEM). Monographie de la région du SAVA. Ministère de l'agriculture, de l'élevage et de la pêche. Unité de politique pour le développement rural (UPDR); 2003. Disponible sur : <http://www.gem-madagascar.com/sites/default/files/Sava.pdf>
19. Razafindramaka NO. MONOGRAPHIE DES GISEMENTS AURIFERES DE MADAGASCAR [dissertation]. Antananarivo: Université d'Antananarivo; 2010. Disponible sur : <https://fr.scribd.com/document/648951309/7-GENIE-MINERAL-Monographie-des-gisements-auriferes-de-Madagascar>
20. Beretka I, Mathew PI. Natural radioactivity of Australian building materials, waste and products. *Health Phys*. 1985;48:87-95.
21. Belyaeva O, Pyuskyulyan K, Movsisyan N, Saghatlyan A, Carvalho FP. Natural radioactivity in urban soils of mining centers in Armenia: Dose rate and risk assessment. *Chemosphere*. 2019;225:859-870. doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.057
22. Agbalagba EO, Onoja RA. Evaluation of natural radioactivity in soil, sediment and water samples of Niger Delta (Biseni) flood plain lakes, Nigeria. *J Environ Radioact*. 2011;102:667-671.
23. Ali MMM, Zhao H, Li Z, Maglas NNM. Concentrations of TENORMs in the petroleum industry and their environmental and health effects. *RSC Adv*. 2019;9(67):39201-39229. doi: 10.1039/c9ra06086c
24. Osman R, Dawood YH, Melegy A, El-Bady MS, Saleh A, Gad A. Distributions and Risk Assessment of the Natural Radionuclides in the Soil of Shoubra El Kheima, South Nile Delta, Egypt. *Atmosphere*. 2022;13:98. doi: 10.3390/atmos13010098
25. Canbaz B, Cam NF, Yaprak G, Candan O. Natural radioactivity (226Ra, 232Th and 40K) and assessment of radiological hazards in the Kestanbol granitoid, Turkey. *Radiat Prot Dosimetry*. 2010;141(2):192-8. doi: 10.1093/rpd/ncq165
26. ICRP. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. ICRP Publication 60. Ann ICRP. 1991;21.
27. Bajoga AD, Al-Dabbous AN, Abdullahi AS, Alazemi NA, Bachama YD, Alaswad SO. Evaluation of elemental concentrations of uranium, thorium and potassium in top soils from Kuwait. *Nuclear Engineering and Technology*. 2019;51:1638-1649. doi: 10.1016/j.net.2019.03.027



How to cite this article: Fidelin Ngoko, Asivelo Fanantenansoa Solonjara, Zafizara Donné, Daniel Rasolozafy, et Briant Kall. ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ NATURELLE DU SOL : CAS DU DISTRICT D'ANTALAHA, RÉGION DE SAVA, NORD-EST DE MADAGASCAR. *Am. J. innov. res. appl. sci.* 2024; 19(4): 27-38. Doi : <https://doi.org/10.5281/zenodo.13844565>

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

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