

CARACTERISATION DE LA RADIOACTIVITE NATURELLE DU GISEMENT DES TERRES RARES, DE LA PRESQU'ILE D'AMPASINDAVA, DU NORD-OUEST DE MADAGASCAR



CHARACTERIZATION OF THE NATURAL RADIOACTIVITY OF THE RARE EARTH DEPOSIT OF THE AMPASINDAVA PENINSULA, NORTHWESTERN MADAGASCAR

| Olivier Rafidimanantsoa^{1*} | Martin Rasolonirina² | Zafizara Donne³ | Patrice Hermann Ralaïarison⁴ | Sergio Tonissa⁴ | Naivo Rabesiranana^{2,1} | et | Radaorolala Joseph Lucien Zafimanjato² |

¹- Faculté des Sciences | Université d'Antananarivo | Département de Physique | Laboratoire d'Analyse et Technique Nucléaire | Antananarivo | Madagascar |

²- INSTN-Madagascar | Département ATN | Laboratoire d'Analyse et Technique Nucléaire | Antananarivo | Madagascar |

³- Faculté des Sciences : Université d'Antsiranana | Département de Physique | Laboratoire de Métrologie Nucléaire et Environnement | Antsiranana | Madagascar |

⁴- Faculté des Sciences : Université d'Antsiranana | Département SNE | Laboratoire Science de la Nature et de l'Environnement | Antsiranana | Madagascar |

| Received September 25, 2021 |

| Accepted October 02, 2021 |

| Published October 08, 2021 |

| ID Article | Rafidimanantsoa-Ref2-ajira280921 |

RESUME

Introduction : Les radionucléides naturels d'origine terrestre sont répandus dans l'environnement et sont distribués dans le sol, les roches, l'eau, l'air, les plantes et le corps humain. Ces radionucléides sont principalement le potassium-40 (⁴⁰K) et les familles de l'uranium-238 (²³⁸U) et du thorium-232 (²³²Th). Ils sont principalement la source d'exposition de l'homme aux rayonnements.

Contexte : Certaines régions de Madagascar possèdent de niveau élevé de radioactivité naturelle, à savoir les endroits riches en minerai radioactif ou le gisement des terres rares. C'est la raison pour laquelle qu'on a un intérêt particulier de mener une étude dans le gisement des terres rares de la presqu'île d'Ampasindava. **Objectifs :** Le but de ce travail est de caractériser les activités spécifiques de ces trois radionucléides ainsi que ses distributions spatiales. **Méthodes :** Durant l'échantillonnage du 27 août au 04 octobre 2019, quarante-neuf (49) échantillons ont été prélevés dont 24 échantillons de sols et 25 échantillons de roches. Les analyses ont été faites par spectrométrie gamma du département Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar. **Résultats :** Dans l'ensemble du site d'étude, les activités spécifiques (⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th) dans le sol varient de (116 ± 8) Bq.kg⁻¹ à (893 ± 28) Bq.kg⁻¹ avec une moyenne de (355 ± 45) Bq.kg⁻¹, de (34 ± 3) Bq.kg⁻¹ à (152 ± 4) Bq.kg⁻¹ avec une moyenne de (76 ± 6) Bq.kg⁻¹ et de (125 ± 10) Bq.kg⁻¹ à (445 ± 17) Bq.kg⁻¹ avec une moyenne de (261 ± 19) Bq.kg⁻¹ respectivement. Pour les échantillons de roches, ces activités varient de (92 ± 8) Bq.kg⁻¹ à (1913 ± 57) Bq.kg⁻¹ avec une moyenne de (772 ± 111) Bq.kg⁻¹, de (16 ± 3) Bq.kg⁻¹ à (429 ± 7) Bq.kg⁻¹ avec une moyenne de (80 ± 16) Bq.kg⁻¹ et de (65 ± 8) Bq.kg⁻¹ à (497 ± 17) Bq.kg⁻¹ avec une moyenne de (176 ± 20) Bq.kg⁻¹ respectivement. **Conclusion :** Les activités moyennes trouvées dépassent généralement les valeurs moyennes mondiales, publiées dans l'UNSCEAR 2000. Cela indique que le minerai des terres rares dans le site d'étude est riche en élément radioactif naturel. Les distributions spatiales des activités sont aussi discutées en détail.

Mots-clés : radionucléide, activité spécifique, sol, roche, spectrométrie gamma.

ABSTRACT

Background: Natural radionuclides of terrestrial origin are widely in the environment which are distributed in soil, rocks, water, air, plants and the human bodies. These radionuclides are mainly potassium-40 (⁴⁰K), uranium-238 (²³⁸U) and thorium-232 (²³²Th) series. They are mainly the source of human radiation exposure. **Context:** Some regions of Madagascar are reputed high level of natural radioactivity, namely places rich in radioactive ore or the deposit of rare earth elements (REE). This is the reason for the particular interest for studying the rare earth deposit of the Ampasindava peninsula. **Objectives:** The aim of this work is to characterize the activities of these three radionuclides as well as their spatial distributions. **Methods:** During the field work, i.e. from 27 August to 4 October 2019, forty-nine (49) samples were collected, with 24 soil and 25 rock samples. Sample measurement has been performed by gamma spectrometry system at the INSTN-Madagascar Nuclear Analyses and Techniques Department. **Results:** Considering the study site as whole, the (⁴⁰K, ²³⁸U and ²³²Th) specific activities in soil samples vary from (116 ± 8) Bq.kg⁻¹ to (893 ± 28) Bq.kg⁻¹ with an average of (355 ± 45) Bq.kg⁻¹, from (34 ± 3) Bq.kg⁻¹ to (152 ± 4) Bq.kg⁻¹ with an average of (76 ± 6) Bq.kg⁻¹ and from (125 ± 10) Bq.kg⁻¹ to (445 ± 17) Bq.kg⁻¹ with an average of (261 ± 19) Bq.kg⁻¹ respectively. For rock samples, activity values obtained are between (92 ± 8) Bq.kg⁻¹ and (1913 ± 57) Bq.kg⁻¹ with an average of (772 ± 111) Bq.kg⁻¹, (16 ± 3) Bq.kg⁻¹ and (429 ± 7) Bq.kg⁻¹ with an average of (80 ± 16) Bq.kg⁻¹ and (65 ± 8) Bq.kg⁻¹ and (497 ± 17) Bq.kg⁻¹ with an average of (176 ± 20) Bq.kg⁻¹ respectively. **Conclusion:** The average activities found are generally above the worldwide average values, published in UNSCEAR 2000. This indicates that the rare earth elements deposit in the study site is rich in the naturally occurring radioactive materials. The activity spatial distributions are also discussed in details.

Key-words: radionuclide, specific activity, soil, rock, gamma spectrometry system.

1. INTRODUCTION

En 2008, la compagnie d'exploration minière Tantalus Rare Earth (TREM) débute un programme d'exploration minière d'Ambohimirahavavy, presqu'île d'Ampasindava du Nord-ouest de Madagascar. Avant de commencer l'exploitation, cette compagnie a procédé un relevé géophysique aéroporté (magnétique et radiométrique) dans l'objectif de mieux comprendre la géologie du complexe, d'obtenir une cartographie plus précise des différents corps plutoniques et de définir avec une bonne précision la position des zones minéralisées potentielles à forer.

La grande majorité des gisements primaires de Terres Rares est associée à des formations magmatiques plus ou moins fortement différenciées, voire stratifiées, souvent à structure circulaire. Le gisement comprend les massifs intrusifs alcalins et peralcalins, les carbonatites, et les volcanites et certains systèmes hydrothermaux éventuellement associés [1].

Cependant, les principaux gisements de Terres Rares exploités se trouvent en Chine. Le plus important est le gisement de Bayan Obo, en Mongolie Intérieure, qui détiendrait plus de 80 % des réserves chinoises et plus de 60 % des réserves mondiales, et qui produit près de la moitié des Terres Rares produites en Chine [1].

Dans le reste du monde, les principaux gisements exploités sont à Mount Weld (Australie Occidentale), Mountain Pass (Californie, États-Unis), Lovozero (Péninsule de Kola, Russie), des sables de monazite en Inde (Odisha, Andhra Pradesh) et au Brésil. De nouveaux projets sont en préproduction (Dong Pao, Vietnam, Ulba Tailings, Kazakhstan), et plusieurs dizaines d'autres gisements ont été découverts et évalués au cours des années 2010 à 2014, en Afrique (Malawi, Kenya, Tanzanie, Namibie, Afrique du Sud, Madagascar), en Amérique (États-Unis, Canada, Brésil), en Europe (Suède, Groenland) et en Australie [1].

D'une manière générale, les terres rares et les métaux rares jouent un rôle important dans la transition énergétique. Elles jouent aussi un rôle dans les technologies à basse consommation d'énergie, et les secteurs microélectronique, le wifi, le radar, ou la téléphonie mobile [2].

Entre 2010 et 2011, la flambée des prix de ces terres rares ainsi que les inquiétudes associées sur leurs approvisionnements avaient conduit à l'augmentation de nombre d'investisseurs à rechercher des ressources minières en Terres Rares ailleurs qu'en Chine [1]. Madagascar présente un potentiel minier fort intéressant mais jusqu'à présent il a été peu mis en valeur, comme l'a récemment montré la synthèse géologique et minière réalisée par les bureaux géologiques allemand (BGR), américain (USGS) et français (BRGM) dans le cadre du Projet de Gouvernance des Ressources Minérales (PGRM) financé par la Banque Mondiale [3]. Sur la base d'études anciennes et des nouvelles données obtenues dans le cadre du PGRM [4], on sait que de nombreuses minéralisations en métaux rares sont présentes dans les massifs alcalins situés au nord-ouest de Madagascar, notamment sur la péninsule d'Ampasindava. Toutefois, les terres rares sont généralement associées aux radionucléides naturels dans les isotopes du thorium et de l'uranium [5].

Ces derniers sont les principales sources d'exposition aux rayonnements (environ 56 %) de l'homme par l'intermédiaire du radon gazeux. D'autre source d'exposition provient aussi le radionucléide potassium-40 et le rayonnement cosmique [6]. Les trois radionucléides naturels (K-40, familles de l'U-238 et du Th-232) ayant des demi-vies radioactives relativement proches de l'âge de la terre, sont considérés comme les principaux contributeurs de la source d'irradiation externe du corps humain. Ils peuvent être transportés et être piégés par divers matériaux géologiques [6].

Seules les zones proches de sites des accidents nucléaires se caractérisent les niveaux de radionucléides artificiels présents dans l'environnement plus importants que ceux des radionucléides d'origine naturelle. L'exposition aux rayonnements ionisants des populations résulte principalement des irradiations externes et internes liées aux sources de radioactivité naturelle [7, 8, 9, 10]. En effet, les procédés de traitement des terres rares peuvent accentuer les niveaux de la radioactivité naturelle à la surface du sol. C'est dans ce contexte que nous nous sommes intéressés sur la caractérisation de la radioactivité naturelle dans le gisement des terres rares dans la presqu'île d'Ampasindava, District d'Ambanja. Pour aboutir à l'objectif de la recherche, des travaux de prélèvement des échantillons (sol et roche) ont été effectués. Les résultats sont présentés en termes des activités spécifiques et de distribution spatiale de ces activités dans la zone d'étude.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Localisation et description du site d'étude :

La presqu'île d'Ampasindava se trouve dans la zone côtière Nord-Ouest de Madagascar. Elle est située à 35 km au Sud-Ouest de la ville d'Ambanja. Ampasindava appartient administrativement à la région DIANA, s'étendant entre 11° et 15° de latitude et entre 47° et 50° de longitude, couvrant une surface de 20942 km² [4]. Les campements, les villages, les voies minières dans laquelle l'étude a été faite sont localisés dans les périmètres miniers de la Société TREM ; notamment les Communes rurales d'Antsirabe et Ambaliha, District d'Ambanja, Madagascar (Figure 1).

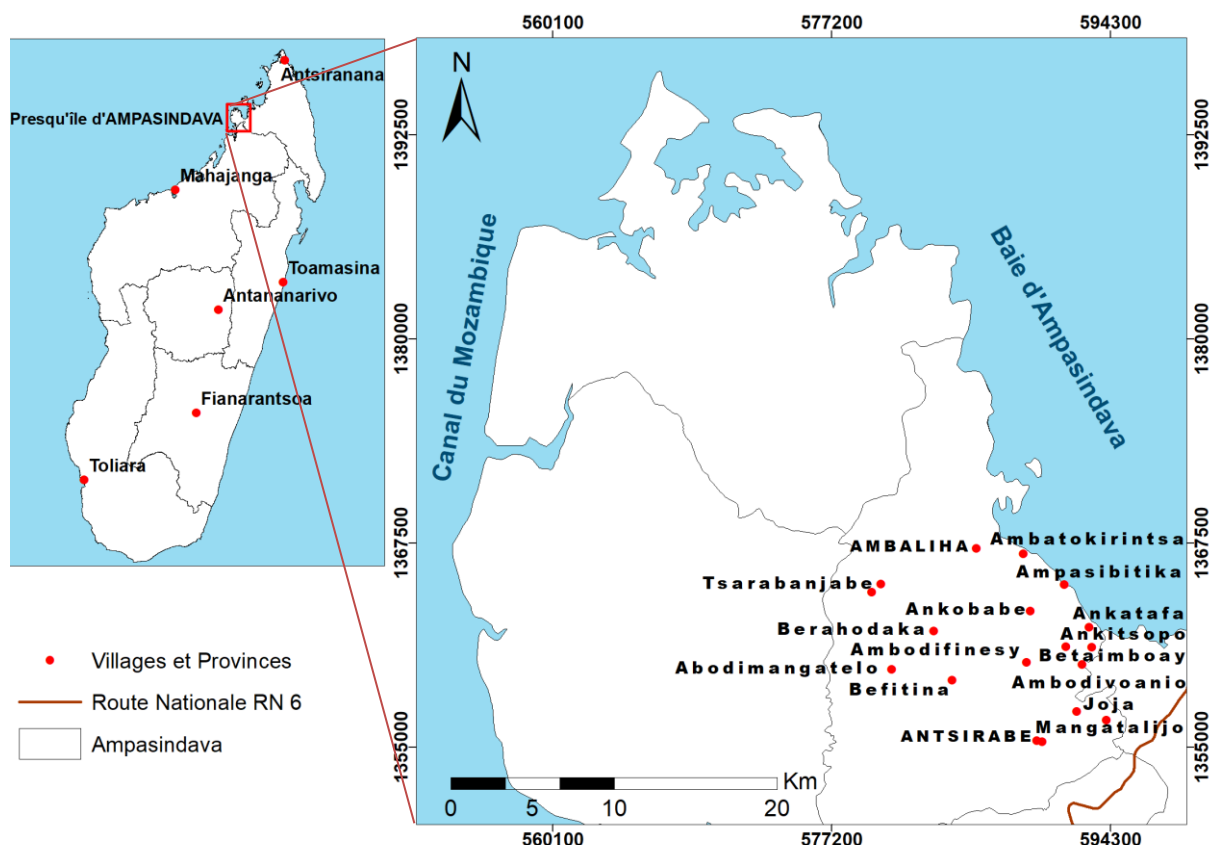


Figure 1: Carte de localisation de la zone d'étude.

2.2 Prélèvement des échantillons :

Les échantillons ont été prélevés entre le 27 août et 04 octobre 2019. Au total, vingt-quatre (24) échantillons de sol, d'une masse chacune de 500 g, ont été prélevés jusqu'à 10 cm de profondeur dont 14 à Antsirabe et 10 à Ambaliha. De plus, vingt-cinq (25) échantillons de roches de 500 g chacun ont été prélevés à la surface du terrain dont 14 à Antsirabe et 11 à Ambaliha. Ils ont été ensuite mis dans des sachets en plastique. Les échantillons prélevés ont été mis dans des sachets en plastique, bien étiquetés et codés. Il est à noter que les sols et les roches sont utilisés comme matériaux de constructions de la population locale. Les coordonnées géographiques des points de prélèvement ont été déterminées à l'aide du Global Positioning System (GPS).

2.3 Préparation des échantillons :

Au laboratoire, les échantillons de sols sont séchés à 80 °C dans une étuve pendant 12 à 24 h selon le taux d'humidité de l'échantillon, puis broyés pour les rendre homogènes. Après le broyage, ils sont mis dans des porte-échantillons cylindriques en polyéthylène de 100 cm³, fermés hermétiquement et stockés pendant un mois pour atteindre l'équilibre séculaire entre le ²²⁶Ra et ses descendants. Les masses d'échantillon analysées sont déterminées à l'aide d'une balance électronique de précision ($\pm 5\%$) et enregistrées dans le logbook de préparation du laboratoire. Ces masses sont utilisées pour les calculs des activités massiques (Bq.kg⁻¹).

2.4 Spectrométrie gamma :

Les échantillons sont analysés par un spectromètre gamma, muni d'un détecteur iodure de sodium activé au thallium NaI(Tl) 3"x 3" de l'ORTEC. Ce détecteur est polarisé d'une tension +800 V via un câble USB (Modèle 905-4) à l'aide d'un logiciel ScintiVision. Le module préamplificateur (Modèle ORTEC) est placé au plus près du détecteur pour récupérer le maximum des signaux délivrés par le tube photomultiplicateur et réduire le bruit généré par les composantes électroniques du détecteur. Ce module est connecté à un analyseur multi-canal (MCA) comprenant 1024 canaux et fonctionnant à 100 MHz. Le MCA est composé d'un amplificateur et d'un convertisseur analogique numérique (ADC). L'amplificateur permet de régler le gain de 0,40 à 1,20 et de faire la mise en forme (Shaping Time) de 2 μ s.

Ce type de détecteur a été choisi en raison de sa bonne efficacité de détection. De plus, il est adéquat pour mesurer les échantillons de l'environnement. Le spectre obtenu permet de faire l'analyse qualitative et quantitative [11, 12, 13].

2.5 Contrôle qualité de la chaîne de mesure :

Avant de faire les analyses, le contrôle qualité de la chaîne de mesure est faite à l'aide des matériaux de référence certifiés de l'AIEA RGK-1, RGU-1 et RGTh-1 afin d'avoir la bonne précision et des résultats fiables. Trois pics d'absorption totale sont exploités pour chaque spectre. Les centroïdes des pics exploités correspondent à 1461 keV (⁴⁰K), à 1764,5 keV (²¹⁴Bi) et à 2614,5 keV (²⁰⁸Tl). Les deux derniers radionucléides proviennent des familles de l'uranium-238 et du thorium-232 respectivement.

Comme ces trois radionucléides sont d'origines naturels, la mesure du bruit de fond de l'environnement a été effectuée par la mesure à vide (absence d'une source radioactive ou de l'échantillon) pour faire la correction.

Les trois matériaux de référence (RGK-1, RGU-1 et RGTh-1) sont utilisés à la fois pour l'étalonnage en énergie et le calcul de l'activité massique. Ces sources sont de natures et de formes semblables à celles de l'échantillon à analyser. Elles sont référencées par une activité massique ou volumique ou à un taux d'émission photonique des principales raies gamma [14, 15].

2.6. Étalonnage en énergie :

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

$$E = a.C + b \quad (1)$$

Où a : coefficient directeur (keV/canal),
 b : valeur de l'énergie à l'origine.

Les valeurs de coefficients a et b sont déterminées à l'aide de la méthode des moindres carrés [13].

2.7 Bruit de fond :

La connaissance du bruit de fond pour les mesures de faibles activités est une condition préalable, pour obtenir les limites de détection les plus faibles possibles. Les rayonnements provenant de bruit de fond environnemental sont dus aux radio-isotopes constituant le détecteur, les matériaux de protection associés, les radionucléides terrestres et les rayonnements cosmiques [16, 17]. Afin de soustraire les contributions parasites dues, d'une part, à la boîte en plastique, d'autre part, au bruit de fond ambiant, un comptage à vide est réalisé pendant une durée de temps égale à celle de l'acquisition des spectres.

2.8 Calculs des activités :

L'activité spécifique d'un radionucléide gamma est déterminée à partir d'une analyse comparative entre le matériau de référence (utilisé comme étalon) et l'échantillon [18], donnée par la relation (2) ci-après :

$$A_{éch} = A_{étal} \times \frac{\tau_{N_{éch}}}{\tau_{N_{étal}}} \times \frac{m_{étal}}{m_{éch}} \quad (2)$$

Où $A_{éch}$: activité massique de l'échantillon (Bq.kg⁻¹),
 $A_{étal}$: activités de l'étalon (Bq.kg⁻¹),
 $\tau_{N_{éch}}$: taux net du pic photoélectrique de l'échantillon (coup par seconde),
 $\tau_{N_{étal}}$: taux net du pic photoélectrique de l'étalon (coup par seconde),
 $m_{éch}$: masse de l'échantillon (kg),
 $m_{étal}$: masse de l'étalon (kg).

2.9 Calculs d'incertitude des mesures :

L'incertitude de mesure (notée σ) est la valeur qui caractérise la dispersion des valeurs qui peuvent être attribuées à la grandeur mesurée. L'incertitude est généralement due au prélèvement, à la préparation de l'échantillon et à la statistique de comptage. Elle est indépendante et s'additionne selon la loi des écarts-types [12].

Cette incertitude est donc calculée à partir de l'équation 3 ci-après.

$$\sigma_{A_{éch}} = A_{éch} \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_{A_{étal}}}{A_{étal}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tau_{étal}}}{\tau_{N_{étal}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\tau_{éch}}}{\tau_{N_{éch}}}\right)^2} \quad (3)$$

Où $\sigma_{A_{éch}}$: incertitude absolue de l'échantillon,
 $\sigma_{A_{étal}}$, $\sigma_{\tau_{étal}}$ et $\sigma_{A_{éch}}$: incertitude partielle sur chaque paramètre.

3. RESULTATS

3.1 Echantillon de sol :

Les activités spécifiques (⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th) ainsi que les incertitudes sont déterminées en utilisant les relations 2 et 3 (Tableau 1). Les résultats obtenus sont ensuite comparés aux activités spécifiques trouvées par les études antérieures dans quelques régions de Madagascar et au niveau mondial (Tableau 2 et 3).

Tableau 1 : Activités massiques de ^{40}K , ^{238}U et ^{232}Th des échantillons de sols

Sites	Codes	Activités spécifiques (Bq.kg^{-1})		
		^{40}K	^{238}U	^{232}Th
Ambodifinesy	S01	389 \pm 14	63 \pm 4	201 \pm 11
	S02	224 \pm 11	122 \pm 4	259 \pm 12
	S03	406 \pm 15	61 \pm 4	227 \pm 12
Joja	S04	220 \pm 10	54 \pm 4	199 \pm 11
Mangantalijo	S05	481 \pm 17	71 \pm 4	233 \pm 12
Antsirabe I	S06	154 \pm 8	42 \pm 3	128 \pm 9
	S07	198 \pm 9	56 \pm 3	170 \pm 10
Antsirabe II	S08	205 \pm 9	34 \pm 3	157 \pm 9
	S09	136 \pm 8	39 \pm 3	125 \pm 8
Ambodimangatelo	S10	476 \pm 16	66 \pm 4	125 \pm 10
Tsarabanjahely	S11	893 \pm 28	56 \pm 4	156 \pm 10
Tsarabanjabe	S12	174 \pm 9	152 \pm 4	266 \pm 12
Berahodaka	S13	214 \pm 11	133 \pm 5	445 \pm 17
Befitina	S14	168 \pm 10	79 \pm 4	295 \pm 13
	S15	303 \pm 13	83 \pm 4	393 \pm 16
Ambodivoanio	S16	817 \pm 26	52 \pm 4	327 \pm 14
Ankitsopo	S17	116 \pm 8	120 \pm 4	354 \pm 14
Ankatafa	S18	361 \pm 14	67 \pm 4	325 \pm 14
Betaimboay	S19	236 \pm 11	86 \pm 4	319 \pm 14
Ankobabe	S20	236 \pm 10	93 \pm 3	352 \pm 13
Ambaliha	S21	474 \pm 16	96 \pm 4	298 \pm 13
	S22	446 \pm 16	42 \pm 4	229 \pm 12
Ambatokirintsa	S23	361 \pm 13	67 \pm 4	319 \pm 14
Ampasibitika	S24	836 \pm 26	86 \pm 4	354 \pm 14
Moyenne [Minimale – Maximale]		355 [116 – 893]	76 [34 – 152]	261 [125 – 445]

Tableau 2 : Extraits des activités spécifiques dans les sols à Madagascar

Site	Activités spécifiques (Bq.kg^{-1}) *			Référence
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	
Baie des Français, Antsiranana	313 [112 – 565]	139 [77 – 190]	126 [81 – 161]	[19]
Befandriana Nord	200 [122 – 519]	56 [24 – 95]	118 [12 – 238]	[20]
Ambanja	1 025 [803 – 1 249]	21 [10 – 40]	198 [153 – 218]	[21]
Antalaha-Ambohitralanana	338 [103 – 1039]	23 [5 – 109]	31 [9 – 146]	[22]
Ampasimbe, Fenoarivo Atsinanana	575 [161 – 1045]	5 390 [437 – 17295]	21 336 [910 – 87 160]	[12]
Vinaninkarena-Antsirabe	467 [237 – 667]	176 [92 – 451]	126 [107 – 158]	[13]
Antananarivo	448 [24 – 2 315]	14 [4 – 24]	75 [47 – 118]	[23]
Montagne d'Ambre, Antsiranana	218 [126 – 327]	44 [14 – 73]	90 [10 - 402]	[24]

* Valeur moyenne [valeur minimale – valeur maximale]

Tableau 3 : Extraits des activités spécifiques dans le sol au niveau Mondial.

Pays	Activités spécifiques (Bq.kg^{-1}) *			Référence
	^{40}K	^{238}U	^{232}Th	
Algérie	370 [66 – 1150]	30 [2 – 110]	25 [2 - 140]	[25]
Egypte	320 [29 – 650]	37 [6 – 120]	18 [2 – 96]	
Etats-Unis	370 [100 – 700]	35 [4 – 140]	35 [4 – 130]	
Chine	440 [9 – 1800]	33 [2 – 690]	41 [1 – 360]	
Inde	400 [38 – 760]	29 [7 – 81]	64 [14 – 160]	
Malaisie	310 [170 – 430]	66 [49 – 86]	82 [63 – 110]	
Russie	520 [100 – 1400]	19 [0 – 67]	30 [2 – 79]	
Suisse	370 [400 – 1000]	40 [10 – 150]	25 [4 – 70]	
Portugal	840 [220 – 1230]	49 [26 – 82]	51 [22 – 100]	

* Valeur moyenne [valeur minimale – valeur maximale]

3.2 Echantillon de roche :

Les résultats d'analyse des échantillons des sols sont donnés au Tableau 4.

Tableau 4: Activités spécifiques dans les échantillons de roche.

Sites	Codes	Activités spécifiques (Bq.kg ⁻¹)		
		⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th
Ambodifinesy	R01	119 ± 8	41 ± 3	112 ± 9
	R02	102 ± 8	72 ± 4	118 ± 9
	R03	1098 ± 33	92 ± 3	154 ± 9
Joja	R04	1329 ± 40	120 ± 4	290 ± 13
	R05	751 ± 24	50 ± 4	185 ± 11
Mangantalijo	R06	169 ± 9	60 ± 3	153 ± 9
	R07	1644 ± 48	111 ± 4	435 ± 11
Antsirabe II	R08	1435 ± 43	93 ± 4	226 ± 12
Ambodimangatelo	R09	92 ± 8	16 ± 3	94 ± 9
Tsarabanjahely	R10	1330 ± 40	29 ± 3	157 ± 10
Tsarabanjabe	R11	1913 ± 57	23 ± 3	111 ± 10
Berahodaka	R12	1429 ± 43	45 ± 3	118 ± 10
	R13	925 ± 28	125 ± 4	227 ± 10
Befitina	R14	549 ± 18	429 ± 7	497 ± 17
	R15	293 ± 11	22 ± 3	65 ± 8
Antsirabe I	R16	313 ± 13	98 ± 4	204 ± 12
Ambodivoanio	R17	541 ± 18	48 ± 3	141 ± 10
Ankitsopo	R18	128 ± 8	28 ± 3	141 ± 9
Ankatafa	R19	157 ± 9	62 ± 4	118 ± 9
Betaimboay	R20	841 ± 26	100 ± 4	217 ± 11
Ankobabe	R21	1091 ± 34	68 ± 4	147 ± 10
Ambaliha	R22	671 ± 22	70 ± 4	130 ± 10
	R23	1133 ± 35	18 ± 3	72 ± 10
Ambatokirintsa	R24	157 ± 9	68 ± 4	141 ± 9
Ampasibitika	R25	1098 ± 33	115 ± 4	147 ± 10
Moyenne [Minimale – Maximale]		772 [92 – 1913]	80 [16 – 429]	176 [65 – 497]

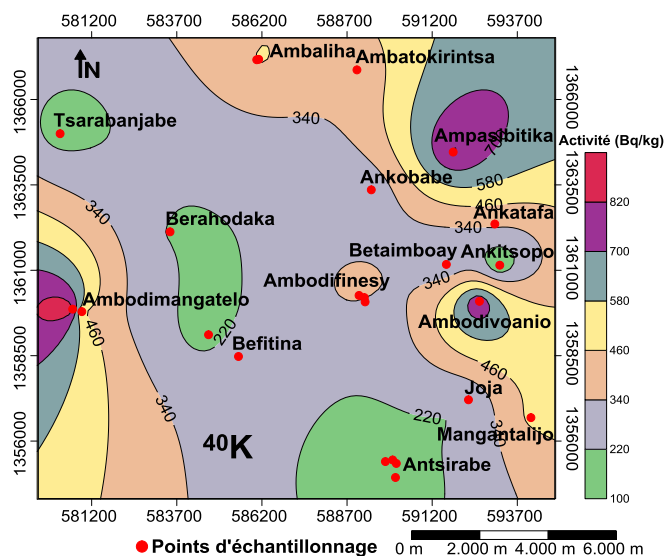
Tableau 5 : Extraits des activités spécifiques dans la roche au niveau Mondial.

Pays	Activités spécifiques (Bq.kg ⁻¹)*			Référence
	⁴⁰ K	²³⁸ U	²³² Th	
Turquie	243 [144 – 452]	35 [12 – 49]	32 [8 - 53]	[26]
Arabie saoudite (Al-Atawilah, Al-Baha)	1131 [110 – 6070]	12 [5 – 54]	13 [5 – 61]	[27]
Yémen	1235 [1031 – 1489]	45 [37 – 53]	106 [83 – 128]	[28]
Inde (Coorg district, Karnataka state)	512 [97 – 934]	9 [1 – 34]	79 [16 – 161]	[29]
Moyenne Mondial	500	50	50	[25], [30]

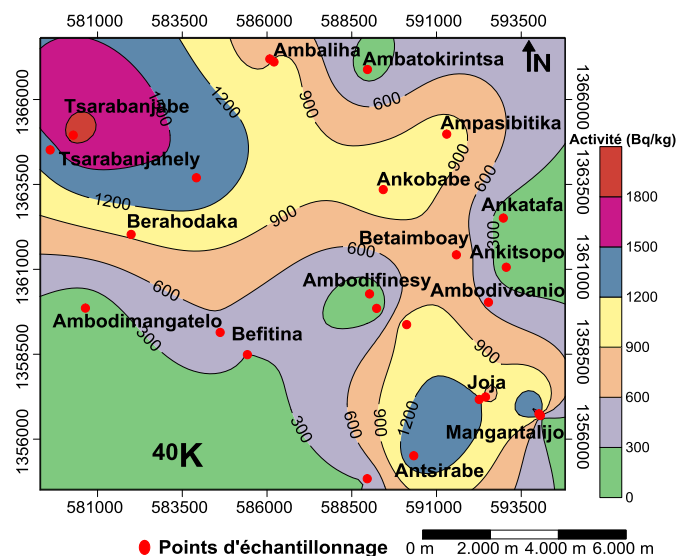
* Valeur moyenne [valeur minimale – valeur maximale]

3.3 Distribution spatiale des trois radionucléides :

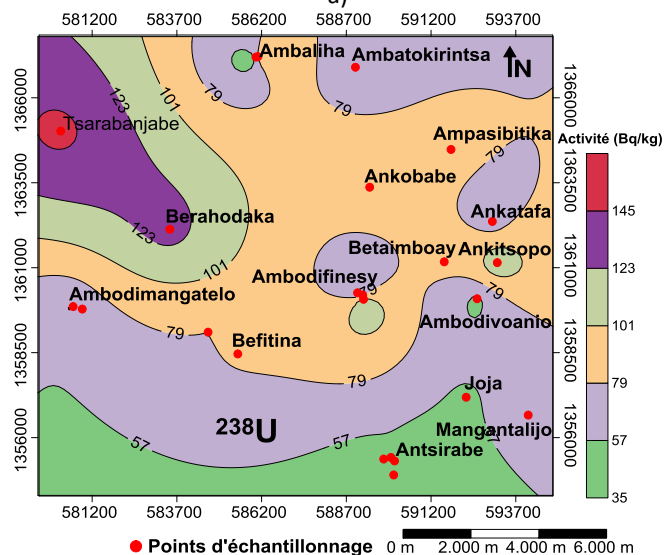
Les cartes de distribution spatiale des activités spécifiques du ^{40}K , de ^{238}U et du ^{232}Th des échantillons des sols et des roches sont présentées dans la figure 2 et figure 3 ci-dessous.



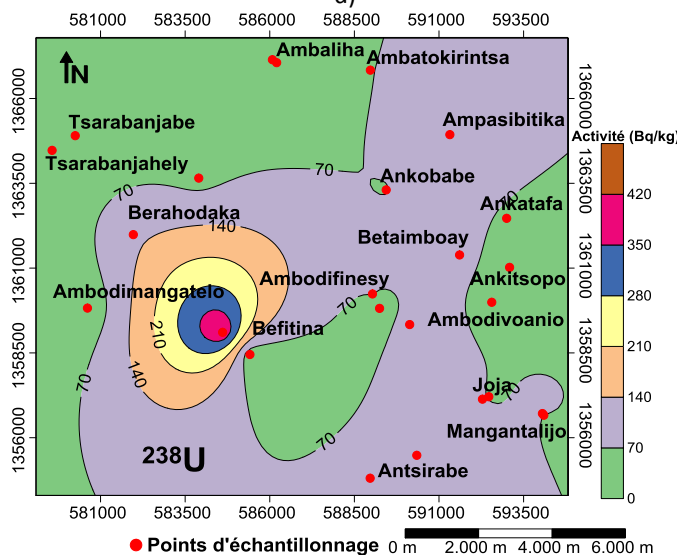
a)



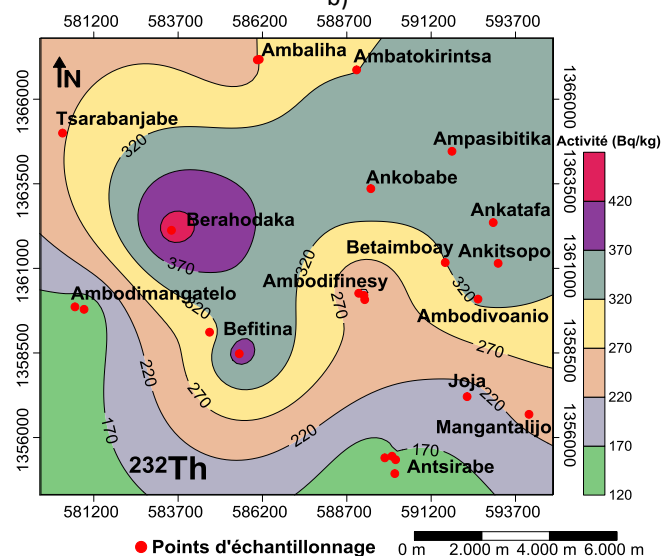
d)



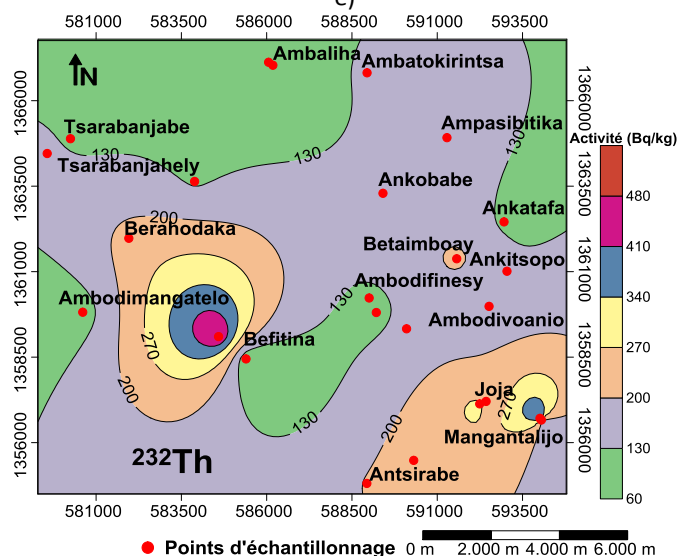
b)



e)



c)



f)

Figure 2. Distribution spatiale des activités spécifiques dans le sol : a) ^{40}K , b) ^{238}U et c) ^{232}Th

Figure 3. Distribution spatiale des activités spécifiques dans les roches : d) ^{40}K , e) ^{238}U et f) ^{232}Th

3.4 Etude statistique des données :

Les études statistiques des données sont menées afin d'identifier les origines des radionucléides ^{238}U et ^{232}Th . Les activités des échantillons des sols et des roches sont comparées à l'aide d'un test d'égalité de moyenne. Ce test repose sur les hypothèses suivantes:

- H_0 : la différence entre les activités moyennes des sols et des roches est égale à 0,
- H_1 : la différence entre les activités moyennes des sols et des roches est différente de 0.

Les résultats du test sont récapitulés dans le tableau 3 ci-après.

Tableau 3 : Résultats du test t pour les échantillons de sol et de roche

Paramètres	Valeur trouvée	
	Uranium-238	Thorium-232
Différence	4,29	-84,67
Valeur observée	0,24	-3,07
Valeur critique	2,01	2,01
Valeur-p (bilatérale)	0,81	0,004
Valeur α	0,05	0,05

Pour l'uranium-238, la valeur-p calculée ($p = 0,81$) est très supérieure au niveau de significativité $\alpha = 0,05$. Donc statistiquement, on ne peut pas affirmer qu'il y a une différence entre les activités de ^{238}U dans les sols et dans les roches. Ceci pourrait être dû à la mobilité géochimique de l'uranium qui fait que sa répartition spatiale reste globalement uniforme.

En ce qui concerne le thorium-232, la valeur calculée ($p = 0,004$) est inférieure au niveau de significativité $\alpha = 0,05$. L'hypothèse nulle H_0 est rejetée et on retient l'hypothèse alternative H_1 . Cela signifie que le modèle trouve une différence significative entre les activités spécifiques du thorium-232 dans le sol et la roche.

La différence des activités du ^{232}Th est expliquée par la mobilité différente des éléments uranium et thorium dans l'environnement [31]. Dans un milieu géologiquement non perturbé, la mobilisation est limitée mais elle est accélérée par les activités humaines telles que l'agriculture, l'exploitation minière, etc. Le thorium est moins mobile que l'uranium à basse température [32, 33, 34, 35, 36, 37]. De plus, le thorium est considéré comme l'élément chimique le plus immobile du fait de sa très faible solubilité en solution aqueuse [38, 39, 40]. L'altération des roches est généralement provoquée par l'air et l'eau. Comme la zone étudiée se trouve dans une zone humide et de précipitation annuelle élevée, la dispersion dépend du taux de l'altération des roches mères, de la structure de l'élément et de la grandeur de la perturbation. En outre, le thorium est présent à l'état d'oxydation des roches ignées primaires [41]. Des études ont montré que le thorium est principalement transporté dans les minéraux résistant insolubles ou fortement adsorbé par sol argileux [42, 31]. Ceux-ci confirment l'activité élevée du radionucléide ^{232}Th dans le sol qu'à celle trouvée dans la roche.

4. DISCUSSION

4.1 Activité spécifique

Pour sol, les activités spécifiques du ^{40}K varient de $(116 \pm 8) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(893 \pm 28) \text{ Bq.kg}^{-1}$, d'une moyenne de $(355 \pm 45) \text{ Bq.kg}^{-1}$. La valeur minimale se trouve Ankitsopo, tandis que celle de la maximale se trouvant à Tsarabanjahely. L'activité moyenne trouvée est relativement proche de la moyenne mondiale de 400 Bq.kg^{-1} [6, 25]. En outre, l'activité moyenne calculée est supérieure de celles trouvées à montagne d'Ambre et à Befandriana Nord. Elle est relativement proche de celles trouvées à la baie des Français Antsiranana et à Antalaha/Ambositralanana. Tandis que cette valeur moyenne est en-dessous de celle trouvée à Vinaninkarena Antsirabe et Antananarivo, et largement en-dessous de la valeur trouvée à Ampasimbe Fenoarivo Atsinanana et à Ambanja. Pour ce dernier, la concentration élevée en ^{40}K est due à l'utilisation de l'engrais pour la culture du cacao.

En ce qui concerne l'uranium-238, les activités spécifiques sont comprises entre $(34 \pm 3) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(152 \pm 4) \text{ Bq.kg}^{-1}$, d'une moyenne de $(76 \pm 6) \text{ Bq.kg}^{-1}$. Cette valeur élevée est due à la formation géologique du milieu étudié. L'activité minimale se trouve à Antsirabe, tandis que la valeur maximale se trouvant à Tsarabanjabe. L'activité moyenne trouvée est deux fois supérieure à la moyenne mondiale de 35 Bq.kg^{-1} [6, 25]. Cette activité moyenne calculée est largement inférieure aux valeurs trouvées à la baie des Français Antsiranana, à Vinaninkarena Antsirabe et à Ampasimbe Fenoarivo Atsinanana. Ces deux derniers sites se trouvent à la zone uranifère et contiennent de forte concentration en monazite respectivement.

Pour le thorium-232, les activités spécifiques varient de $(125 \pm 10) \text{ Bq.kg}^{-1}$ (Antsirabe et Ambodimangatelo) à $(445 \pm 17) \text{ Bq.kg}^{-1}$ (Berahodaka), d'une moyenne de $(261 \pm 19) \text{ Bq.kg}^{-1}$. Cette valeur moyenne trouvée est presque neuf fois supérieure à la moyenne mondiale de 30 Bq.kg^{-1} [6, 25]. De plus, la valeur moyenne est au-dessus des activités trouvées dans plusieurs régions de Madagascar. Par contre, elle est presque cent fois supérieure à la concentration trouvée à Ampasimbe Fenoarivo Atsinanana car le minerai de monazite a une très forte concentration en ^{232}Th .

Pour roche, les activités du ^{40}K varient de $(92 \pm 8) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(1913 \pm 57) \text{ Bq.kg}^{-1}$ avec la valeur moyenne de $(772 \pm 111) \text{ Bq.kg}^{-1}$. Celles de ^{238}U varient de $(16 \pm 3) \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $(429 \pm 7) \text{ Bq.kg}^{-1}$, avec une valeur moyenne de $(80 \pm 16) \text{ Bq.kg}^{-1}$. Tandis que les activités du ^{232}Th sont comprises entre $(65 \pm 8) \text{ Bq.kg}^{-1}$ et $(497 \pm 17) \text{ Bq.kg}^{-1}$ avec la valeur moyenne $(176$

± 20) Bq.kg⁻¹. En termes des valeurs moyennes, les résultats trouvés de ces trois radionucléides sont au-dessus des valeurs de référence mondiale qui sont de 500 Bq.kg⁻¹, de 50 Bq.kg⁻¹ et de 50 Bq.kg⁻¹ respectivement [6, 30]. Les filons de granite du complexe d'Ambohimirahavavy possèdent tous une minéralogie typiquement alcaline caractérisée par la présence d'amphibole et de pyroxène sodiques [4]. L'activité du ⁴⁰K est plus élevée en comparaison aux radionucléides ²³⁸U et ²³²Th. Ceux-ci sont dus à la mobilisation et la migration des concentrations plus élevées de potassium et le micronutriment dans le sol du milieu [43, 44].

4.2 Distribution spatiale

Pour les échantillons de sol, les cartes de distribution de ces trois radionucléides (Figure 2) ⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th dans la commune d'Antsirabe et Ambaliha montrent qu'il y a des variations considérables des activités spécifiques du ⁴⁰K, de ²³⁸U et du ²³²Th. Elles montrent clairement que certaines régions avaient des activités spécifiques élevées. Par exemple, ²³⁸U a des activités spécifiques élevées dans toute la région nord, nord-est d'Antsirabe, et à l'ouest autour de Tsarabanjabe et Berahodaka (figure 2b). Le ²³²Th a des activités spécifiques élevées dans toute la région d'Antsirabe et Ambaliha, comme le montre la figure 2c, alors que le ⁴⁰K a des activités élevées au nord-est d'Antsirabe et à l'ouest autour d'Ambodimangaletto (figure 2a).

En ce qui concerne les échantillons de roches, la répartition des radionucléides dans la zone d'étude est donnée par la carte de la figure 3. Les cartes montrent qu'il y a certaines régions ayant des activités spécifiques de ⁴⁰K, ²³⁸U et ²³²Th élevées. Le ²³⁸U a des activités spécifiques élevées dans la région d'Antsirabe au sud, au nord Betaimboay et Ampasibitika, et à l'ouest autour de Befitina (figure 3e). Le ²³²Th a des activités spécifiques élevées, au sud la région d'Antsirabe, au nord autour de Betaimboay, à l'ouest Befitina, comme le montre la figure 3f. Le ⁴⁰K a des activités élevées Antsirabe et Mangatalijo, au nord Ankobabe et Ampasibitika et à l'ouest autour de Tsarabanjabe (voir la figure 3d). Les autres régions sont caractérisées par des valeurs modérées et faibles des activités du ⁴⁰K, de ²³⁸U et du ²³²Th.

5. CONCLUSION

Les échantillons collectés (sol et roche) contiennent le potassium-40, les familles de l'uranium-238 et du thorium-232. Les résultats obtenus montrent que les activités moyennes de ces trois radionucléides naturels sont supérieures aux valeurs moyennes mondiales surtout pour les cas des familles de l'uranium-238 et du thorium-232. Cela confirme la présence de minéral radioactif dans la zone d'étude.

Dans l'ensemble du site d'étude, les activités moyennes trouvées dans le sol sont de (355 \pm 45) Bq.kg⁻¹, de (76 \pm 6) Bq.kg⁻¹ et de (261 \pm 19) Bq.kg⁻¹ respectivement. Pour ²³⁸U et le ²³²Th, ces activités trouvées sont supérieures à la valeur moyenne mondiale, publiée par l'UNSCEAR 2000. Tandis que l'activité moyenne trouvée (355 \pm 45) Bq.kg⁻¹ du ⁴⁰K, est relativement proche de la référence mondiale de 400 Bq.kg⁻¹.

Pour les échantillons des roches, les activités moyennes de trois radionucléides sont de (772 \pm 111) Bq.kg⁻¹, de (80 \pm 16) Bq.kg⁻¹ et de (176 \pm 20) Bq.kg⁻¹ respectivement. Ces valeurs trouvées sont supérieures à celles moyennes mondiales, publiée par l'UNSCEAR 2000, 2008.

Le ⁴⁰K est, quel que soit le site et le type de prélèvement, le radionucléide naturel le plus abondant. Sa concentration de 350 à 600 Bq kg⁻¹ dépasse en général d'un facteur 10 ou plus celles de tous les autres radionucléides naturels appartenant aux familles de ²³⁸U ou du ²³²Th, qui se situent en général entre 10 et 50 Bq kg⁻¹ [45].

Enfin, selon les résultats obtenus, nous avons pu conclure que le ⁴⁰K, ²³⁸U et le ²³²Th pourraient engendrer des risques assez importants pour la population locale de la zone d'étude. Dans cette zone, la sensibilisation à l'effet de radioactivité naturelle doit être prioritaire ainsi que la mise en place du système de radioprotection du public et du travailleur.

Reconnaissance : Mes vifs remerciements s'adressent aux personnels de l'INSTN-Madagascar, en particulier à ceux du département Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar, pour leur aide à la réalisation de ce projet de recherche et aux travaux de laboratoire. Je remercie également la société Tantalus Rare Earth Madagascar pour avoir facilité l'accès dans leur périmètre minier.

6. REFERENCES

1. Bru K., Christmann P., Labbé J.F., Lefebvre G. Panorama mondial 2014 du marché des Terres Rares. Rapport public. BRGM/RP-65330-FR. 194 p., 58 fig., 32 tab (2015).
2. Hetzel P. et Bataille D. (2016). Les enjeux stratégiques des terres rares et des matières premières stratégiques et critiques. Rapport de l'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, 19 mai 2016.
3. BGS-USGS-GLW. République de Madagascar ministère de l'énergie et des mines (MEM/SG/DG/UCP/PGRM). Report (2008).
4. Rakotovo, S., R. Rakotondrazafy, D. Beziat, S. Salvi et E. Rasolomanana. « Pétrologie du complexe alcalin cénozoïque d'Ambohimirahavavy, presqu'île d'Ampasindava, nord-ouest de Madagascar ». In : Mada-Géo. (2009);13, p. 5,13.
5. USGS. Mineral commodity summaries. Report (2007).
6. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. 2000 report to the general assembly, with scientific annexes, United Nations, New York (2000).
7. Jammot H. Importance relative de l'irradiation naturelle dans l'ensemble des expositions humaines, Congrès sur les données actuelles sur la radioactivité naturelle, Monie-Carlo, 5-7 novembre 1984.
8. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionising Radiations, Report to the General Assembly with scientific annexes, E.88.IX.7, Nations Unies, New-York (1988).
9. UNSCEAR. Sources, Effects and Risks of Ionising Radiations, Report to the General Assembly with scientific annexes, E.94.IX.2, Nations Unies, New-York (1993).
10. Thébaud H., Charmasson S., Calmet D., Arnaud M., Henocque Y. The Coastal Mediterranean monitoring network project: radionuclide survey, Rad. Prot. Dusim. (1993);75 (1-4), 49-56.
11. Khandaker M.U. High purity germanium detector in gamma-ray spectrometry, *IJFPS*. (2011);1, 42- 46
12. Randriamora.T. H., Razafindramiandra H. A., Raelina Andriambololona, Ravelomanantsoa S. D., Ralaivelo M. A. L., Rasolonirina M., Zafimanjato J. L. R.

- Determination of natural radioactivity in the North East beach sands of Madagascar. *American Journal of Physics and Applications*. (2017);5(1), 6 – 12.
13. Razafindramiandra.H. A. Radioprotection du public suite aux études comparatives de la dose efficace annuelle reçue entre la méthode directe et indirecte, Cas de la zone uranifère de Vinankarena, Antsirabe. Thèse de Doctorat en Physique Nucléaire Appliquée et Physique des Hautes Energies de l'Université d'Antananarivo Madagascar (2017).
14. Jurado Vargas M., Fernández A., Cornejo Díaz N., Perez Sánchez. Timón D. Monte Carlo simulation of the self-absorption corrections for natural samples in gamma-ray spectrometry, *Appl. Radiat. Isotopes*. (2002);57, 893–898.
15. Vasconcelos D. C., Pereira C., Gallardo S., Rocha Z., Santos T. O. Efficiency simulation of a HPGe detector for the environmental radioactivity laboratory/cdt using a mcnp-gamma vision method, *INAC*. (2011);43.
16. Radulescu I., Blebea-Apostu A. M., Margineanu R.M., Mocanu N., Background radiation reduction for a high-resolution gamma-ray spectrometer rused for environmental radioactivity measurements, *Nucl. Instrum. Meth. A*. (2013); 715, 112-118.
17. Tomarchio E. Environmental Sample Measurement with low background gamma-ray spectrometric systems. *IRPA*. (2006);38, 1-13.
18. UNSCEAR, Sources and effects of ionizing radiation. 2016 Report to the General Assembl.,Biologiceffects of selectedinternalemitters-uranium, Annex D, NewYork(2016).
19. 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.
20. Randrianarivo A., Solonjara A. F., 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*. (2016). ISSN 2429-5396. Available on: <http://www.american-jiras.com>.
21. Antonjara A., Rasolonirina M., Rabesiranana N., Asimanana F. Détermination par spectrométrie gamma des trois principaux radionucléides naturels du sol et de la fève du cacao dans la plaine du Sambirano, Ambanja. *Afrique SCIENCE*. (2016);12(5), 303 – 315.
22. Barijaona A.F., Rasolonirina M., Asimanana F. Contribution à l'étude de la radioactivité naturelle, par spectrométrie gamma, du sol dans la zone littorale d'Antalaha-Ambohitrana Madagascar. *Afrique SCIENCE*. (2017);13(2), 101 – 112.
23. Rabesiranana, N. (2017). 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 140p. http://biblio.univ-antananarivo.mg/pdfs/rabesirananaNaivo1_PC_HDR_17.pdf
24. Donné Z., Rasolonirina M., Djaovagnono H.C., Kall B., Rabesiranana N., Rajaobelison J. Study of water radioactivity transfer from telluric origin in the Amber Mountain, Antsiranana, Madagascar. *Scientific African*. (2021);13, 1-10.
25. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. 2000 Report to the General Assembly, Exposures from natural radiation sources, Annex B, New York (2000).
26. Akkurt I., and Günoglu. K. Natural Radioactivity Measurements and Radiation Dose Estimation in Some Sedimentary Rock Samples in Turkey. *Hindawi Publishing Corporation, Science and Technology of Nuclear Installations*, Volume 2014, Article ID 950978, 6 pages. Available on: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/950978>.
27. Al-Zahrani B., Alqannas H., and Hamidaldin S. Study and Simulated the Natural Radioactivity (NORM) U-238, Th-232 and K-40 of Igneous and Sedimentary Rocks of Al-Atawilah (Al-Baha) in Saudi Arabia. *World Journal of Nuclear Science and Technology*. (2020);10, 171-181. Doi: 10.4236/wjnst.2020.104015. Available on: <https://www.scirp.org/journal/paperinformation.aspx?paperid=103527>.
28. Nafee S., Al-Othmany D., Hamidaldin S., Al-Zahrani J., Alharbi W. and Barashed, H. Measurement of Gamma Emitting Radionuclides for Assessment, Environmental Hazards of Radiation in Rock and Soil Samples of Shabwah and Hadramout Regions, Yemen. *Journal of Geoscience and Environment Protection*. (2017);5, 66-75. Doi: 10.4236/gep.2017.55005. Available on: <http://www.scirp.org/journal/gep>
29. Prakash, M.M., Kaliprasad, C.S. & Narayana, Y. Studies on natural radioactivity in rocks of Coorg district, Karnataka state, India, *Journal of Radiation Research and Applied Sciences*, 10:2, 128-134. Doi: 10.1016/j.jrras.2017.02.003. Available on: <https://doi.org/10.1016/j.jrras.2017.02.003>.
30. UNSCEAR. Sources and effects of ionizing radiation. 2008 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, New York (2008).
31. Jean-Jacques Braun. Comportement géochimique et minéralogique des terres rares, du thorium et de l'uranium dans le profil latéritique d'Akongo (sud-ouest Cameroun). Sciences de la Terre. Université Henri Poincaré - Nancy 1. pp242. (2018).
32. Jessica Bonhoure. Géochimie des éléments de terres rares et du plomb dans les oxydes d'uranium naturels. Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, pp 396. (2007).
33. Piler R. Adams J. A. S. The distribution of thorium and uranium in a Pennsylvanian weathering profile. *Geochim. Cosmochim. Acta*. (1962);26,1137-1146.
34. Moreira-Nordemann L. M. & Sieffermann G. Distribution of uranium in soil profiles of Bahia State, Brazil. *Soil Sei*. (1979);127,275-280.
35. Rosholt J. N. (1982). Mobilization and weathering. In *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Environmental Problems*. (éd. Ivanovich M. & Harmon R. S.). Clarendon Press, Oxford, 167-178.
36. Michel J. Redistribution of uranium and thorium series isotopes during isovolumetric weathering of granite. *Geochim. Cosmochim. Acta*. (1984);48, 1249-1255.
37. Muller J. P. & Calas G. Tracing kaolinites through their defect centers: kaolinite paragenesis in a laterite (Cameroon). *Econ. Geol*. (1989);84, 694-707.
38. Langmuir D. & Hermann J. S. The mobility of thorium in natural waters at low temperatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*. (1980);44, 1753-1766
39. Stumm W. & Morgan J. J. Aquatic Chemistry. An introduction emphasizing chemical equilibria in natural waters, 2 0 édition. Wiley Interscience.(1981);78Op.
40. Cramer J. J. & Nesbitt H. W. Mass-balance relations and trace-element mobility during continental weathering of various igneous rocks. *Sci. Géol .. Mém . Strasbourg*. (1983);73, 63-73.
41. Gascoyne M., 1992. Geochemistry of the Actinides and Their Daughters. In: Ivanovich M. and Harmon R.S., Eds., *Uranium Series Disequilibrium: Applications to Earth, Marine and Environmental Sciences*, 2nd Edition, Clarendon Press, Oxford, pp. 34-61.
42. Sahoia F.E., Rabesiranana N., Raoelina Andriambololona, Finck N., Marquardt C. and Geckeis H. Crystallographic study of uranium-thorium bearing minerals in Tranomaro, south-east Madagascar. *Journal of Minerals and Materials Characterization an Engineering (JMMCE)*, 1, 347-352. doi.org/10.4236/jmmce.(2013).16053
43. IAEA. International Atomic Energy Agency. Derivation of activity concentration values exclusion, exemption and clearance, International Atomic Energy Agency. IAEA Safety Report Series. International Atomic Energy Agency. (2005);44: 1020-6450.
44. PietrzakFlis Z, Rosiak L, Suplinska MM, Chrzanowski E, Dembinski S. Daily intake of ²³⁸U, ²³⁴U, ²³²Th, ²³⁰Th, ²²⁸Th and ²²⁶Ra in the adult popula on of Central Poland. *Sci Total Environ*. (2001);273,163-169.
45. Gontier G. 1998. Le potassium 40 dans l'environnement, Journées SFRP; les irradiations naturelles en France, Poitiers, 17-18 Mars 1998.



Cite this article : Olivier Rafidimanantsoa, Martin Rasolonirina, Zafizara Donne, Patrice Hermann Ralaïarison, Sergio Tonissa, Naivo Rabesiranana et Radaorolala Joseph Lucien Zafimanjato. 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.

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/>