RSTE
Revue des Sciences, de Technologies et de l'Environnement Volume 3
Édition spéciale, Université d'été 2ème édition Mahajanga, novembre 2020

EXPLORATION DES RADIOÉLÉMENTS ASSOCIÉS AUX SABLES DE PLAGES À MINÉRAUX LOURDS DU DISTRICT DE FENOARIVO ATSINANANA PAR L'ANALYSE SPECTROMÉTRIQUE GAMMA

ARISTARQUE Louidovick Be Ferdinand[1], RASOLONIRINA Martin[2], RAMANIVOSOA Beby Victoire Lalaseheno[3], RAKOTOSOLOFO Nicolas Albert[3]

1: Ecole Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), Université de Mahajanga

2: Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar), Antananarivo

3: Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement (FSTE), Université de Mahajanga

E-mail : aristarquelb@yahoo.fr ; Tél : +261 32 45 611 92

Résumé

Les plages de la côte Est de Madagascar attirent des touristes nationaux et étrangers. Les sables de plages (placers) à hafnium, zirconium, titane, et à tantale du District de Fenoarivo Atsinanana sont associés à une forte teneur en éléments radioactifs. Ils émettent des rayonnements ionisants qui peuvent entrainer des impacts néfastes à l'environnement et à l'homme. Les objectifs de cette étude sont de déterminer les radionucléides présents et leurs activités spécifiques, puis d'estimer les doses d'exposition, afin d'évaluer les éventuels impacts à la santé humaine. La spectrométrie gamma muni d'un détecteur HPGe a permis de déterminer les activités spécifiques de l'uranium-238, du thorium-232 et l'élément potassium-40 dans le site d'étude. Le calcul de débit des doses absorbées et des doses efficaces annuelles nous a permis d'estimer les risques radiologiques liés à la radioactivité naturelle du milieu étudié. Les résultats obtenus montrent que les activités spécifiques varient de 139 ± 20,70 Bq.kg^{-1} à 2183 ±117,33 Bq.kg^{-1} pour le potassium-40, de 60 ± 6,04 Bq.kg^{-1} à 1130 ± 59,24 Bq.kg^{-1} pour le thorium-232, et de 1,4 ± 0,82 Bq.kg^{-1} à 564 ± 28,76 Bq.kg^{-1} pour l'uranium-238. Les débits de doses trouvés sont compris entre 37,97 nGy.h^{-1} à 948,87 nGy.h^{-1}, avec une moyenne de 339,26 nGy.h^{-1}. Ce dernier est six fois supérieure à la valeur moyenne mondiale donnée par le Comité Scientifique des Nations Unies pour les Effets de Radiation Atomique en 2000 (UNSCEAR 2000), qui est de 57 nGy.h^{-1}. La valeur moyenne mondiale de dose efficace reçue par une personne adulte à l'air libre est de 0,07 mSv.a^{-1}. D'après l'UNSCEAR, la valeur limite maximale acceptable de dose efficace pour le public est de 1 mSv.a^{-1}. Dans les sites d'étude, les doses efficaces moyennes trouvées sont de 0,41 mSv.a^{-1}, 0,54 mSv.a^{-1} et 0,47 mSv.a^{-1} respectivement pour adulte, enfant de 0 à 5 ans et enfant de 6 à 15 ans. Ces valeurs sont presque six fois supérieures aux moyennes mondiales. Mais, elles restent inférieures à la norme de la dose admissible fixée par l'UNSCEAR (1 mSv.a^{-1}). Ces doses efficaces sont considérées faibles selon le classement de référence des doses publié par l'UNSCEAR, 2000.

Mots clés : Analanjirofo, minéraux lourds, radioactivité, activités spécifiques, doses efficaces

Abstract

The beaches on the East coast of Madagascar attract domestic and foreign tourists. Hafnium, zirconium, titanium and tantalum beach sands (placers) from the Fenoarivo Atsinanana District are associated with a high content of radioactive elements. They emit ionizing radiation which can be harmful to the environment and humans. The objectives of this study are to determine the radionuclides present in the studied beaches with their specific activities, then to estimate their exposure doses in order to assess the possible impacts on human health. Gamma spectrometry system using HPGe detector allowed us to determine the specific activities of uranium-238 and thorium-232 series, and potassium-40 in the analyzed samples. The calculation of absorbed dose rates and effective annual doses allowed us to estimate the radiation hazard risks related to the natural radioactivity in the study sites. The results obtained show that the specific activities

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

vary from 139 ± 20,70 Bq.kg^{-1} to 2183 ± 117,33 Bq.kg^{-1} for potassium-40, from 60 ± 6,04 Bq.kg^{-1} to 1130 ± 59,24 Bq.kg^{-1} for thorium-232 series, and 1,4 ± 0,82 Bq.kg^{-1} to 564 ± 28,76 Bq.kg^{-1} for uranium-238 series. The dose rates found at the studied sites range from 37,97 nGy.h^{-1} to 948,87 nGy.h^{-1}, with an average of 339,26 nGy.h^{-1}. This average value is six times higher than the world average value given by the UNSCEAR 2000, which is 57 nGy.h^{-1}. The global average effective dose value received by an adult person in air is 0,07 mSv.a^{-1}. According to UNSCEAR, the maximum acceptable limit of effective dose for public is 1 mSv.a^{-1}. In the study sites, the average effective doses are 0,41 mSv.a^{-1}, 0,54 mSv.a^{-1} and 0,47 mSv.a^{-1} respectively for adults, for children up to 5 years old and for children from 6 to 15 years old. These results are almost six times higher than the worldwide average values. However, they are still below the admissible dose rate of 1 mSv.a^{-1}. These values are considered as low dose rates according to the classification of reference dose published by UNSCEAR, 2000.

Key words: Analanjirofo, Heavy mineral, radioactivity, specific activity, effective dose.

Introduction

La présence des radionucléides dans le sol ou dans un sédiment provient de deux sources principales, à savoir la radioactivité naturelle représentée principalement par les familles radioactives uranium-238, uranium-235, thorium-232 et l'élément potassium-40 et par les radioéléments d'origines cosmiques. Nos récemment études minéralogiques et géochimiques des sables de plages du District de Fenoarivo Atsinanana montrent qu'ils sont composés des minéraux lourds à forte teneur en éléments radioactifs tels que l'uranium (551,6 ppm), le thorium (1778,2 ppm) et le plomb (120 ppm). Ils émettent des rayons radioactifs qui contribuent aux expositions internes et externes d'un individu. L'exposition en forte dose entraîne des impacts néfastes à l'environnement et à l'homme avant, pendant et après l'exploitation d'un gisement minier. De plus, les touristes nationaux et étrangers sont attirés par la beauté des plages de la côte Est de Madagascar. Ils sont associés aux éléments indispensables à l'industrie et à la technologie, dont le hafnium, le zirconium, le titane, et le tantale en forte proportion. C'est pourquoi que nous avons besoins de savoir les niveaux de la radioactivité naturelle responsable aux expositions des rayonnements radioactifs. Puis, il faut connaître les débits des doses absorbées et les doses efficaces annuelles afin de prendre des éventuelles mesures de protection pour les travailleurs et les publics aux alentours du gisement de hafnium, de zirconium, de titane, et de tantale qui sont en forte teneur des éléments radioactifs.

Méthodologie

La chaîne de spectrométrie gamma doit être étalonnée en énergie et en efficacité. Elle permet de déterminer qualitativement et quantitativement les radionucléides présents dans les échantillons analysés.

Présentation du site d'etude

Les sables de plage de la ville de Fenoarivo Atsinanana, et celui des villages de Tanambao Bitavola, et d'Ampasimbe sont situés dans les Communes Rurales d'Ampasina Maningoro, d'Ampasimbe Manatsatrana et dans la Commune Urbaine de Fenoarivo Atsinanana, District de Fenoarivo Atsinanana, Est de Madagascar.

Préparation physique des échantillons

Les échantillons ont été préparés dans le département Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN-Madagascar. Ils sont mis dans des portes-

échantillons cylindriques en polyéthylène de 100 cm^3, stockés pendant trois semaines avant de procéder aux analyses pour avoir des équilibres séculaires entre le radium-226 et ses descendants. Pour les échantillons de roche, ils sont broyés afin de les rendre homogène. Au total, six échantillons ont été préparés et analysés à l'aide d'un spectromètre gamma, muni d'un détecteur Germanium à Haute Pureté (HPGe), d'une efficacité relative de 30%. Ces échantillons sont repartis comme suivant : trois roches et trois sables de minéraux lourds. Les masses des échantillons sont déterminées à l'aide d'une balance de précision. Toutes les informations sont enregistrées dans le logbook de préparation.

Étalonnage en énergie et en efficacité

L'étalonnage en énergie nécessite au moins dix pics d'absorption totale, bien répartis dans la plage d'énergie du spectre afin d'avoir de bonne précision. Dans ce cas, nous avons utilisé les pics intenses des radionucléides émetteurs gamma (Th-234, Pb-214 et Bi-214) descendants de l'uranium-238. L'énergie dépend du nombre de canaux par une relation linéaire :

$$E(keV) = A_0 + A_1C + A_2C^2 + A_3C^3 + ... \quad (1)$$

Où $\mathbf{A_0}$, $\mathbf{A_1}$, $\mathbf{A_2}$ **et** $\mathbf{A_3}$ sont les coefficients à déterminer. **C** est le numéro de canal de l'AMC. Le coefficient A_0 représente le décalage du point de départ par rapport à zéro, A_1 représente le gain et les deux autres coefficients voire plus représentent la partie non linéaire de la courbe d'étalonnage.

La calibration en efficacité de la chaîne de mesure est faite à partir du calcul de l'efficacité absolue de chaque rayonnement gamma émis, tel que :

$$\varepsilon_{abs} = N_{det} / N_{emis} \quad (2)$$

Avec $\boldsymbol{\varepsilon_{abs}}$: efficacité absolue calculée à partir de la source radioactive ; $\mathbf{N_{det}}$: nombre des rayonnements détectés ; $\mathbf{N_{emis}}$: nombre des rayonnements gamma émis par la source radioactive.

L'étalonnage en efficacité est une fonction polynômiale. On utilise la transformée logarithmique pour avoir de bon lissage de la courbe.Cette courbe est donnée par l'équation (3) suivante :

$$ln\varepsilon = a_0 + a_1.(lnE_\gamma)^1 + a_2.(lnE_\gamma)^2 + a_3.(lnE_\gamma)^3 + a_4.(lnE_\gamma)^4 + ... \quad (3)$$

On déduit l'efficacité d'absorption totale selon l'équation (4). Avec $\mathbf{N_{net}}$ **(E)** : comptage net du pic d'énergie E ; **A** : activité du radionucléide [Bq] ; $\boldsymbol{\varepsilon_E}$: efficacité de détection pour l'énergie E ; **t** : temps d'acquisition [s] ; $\mathbf{I_\gamma}$: intensité d'émission de la raie gamma d'énergie E; $\mathbf{C_i}$: produit de différents facteurs correctifs inhérents aux conditions de mesure.

$$\varepsilon_E = \frac{N_{net}(E)}{AxtxI\gamma xC_i} \quad (4)$$

Détermination d'exposition externe des doses radioactives

L'exposition externe due aux rayonnements gamma sont principalement d'origine terrestre, c'est-à-dire des radionucléides primordiaux présents dans l'air, dans l'eau, et dans le sol. En effet, l'exposition à l'air libre est directement en rapport avec les activités des radionucléides primordiaux. Cela nous conduit à calculer la quantité des débits de doses absorbées et efficaces qui sont déterminées à partir des activités spécifiques du potassium-40, de la famille de l'uranium-238 et de la famille du thorium-232.

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Débit de dose absorbée

Le débit de dose absorbée est la quantité d'énergie de rayonnements absorbée par unité de temps de la matière exposée. Le débit de dose absorbée par un individu à un mètre au-dessus de la surface du sol dépend de l'activité massique et des coefficients de conversion de dose de trois principaux radionucléides naturels. Ce débit de dose absorbée est déterminé selon la formule :

$$Da = C_K A_K + C_U A_U + C_{Th} A_{Th}$$

Avec ***Da*** : débit des doses absorbées par l'individu (en nGy.h^{-1}) ; C_K, C_U, C_{Th}: coefficients de conversion de débit de dose respectivement pour potassium-40, uranium-238 et thorium-232 (en nGy.h^{-1}/ Bq.kg^{-1}); A_K, A_U, A_{Th} **:** activités moyennes du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232.

Dose efficace annuelle

La dose efficace annuelle est la quantité d'énergie de rayonnements absorbée par unité de masse de matière pendant une durée déterminée. Cette dose varie à l'intérieur d'une habitation et à l'air libre. De manière générale, une personne passe 80 % de son temps à l'intérieur et 20% à l'air libre (**UNSCEAR, 2000**). Une conversion de ce pourcentage en nombre d'heures permet d'obtenir un résultat annuel de 7000 heures à l'intérieur (365 jours * 24 heures * 80%) et de 1760 heures à l'air libre (365 jours * 24 heures * 20%). Supposons que les personnes passent moins ou plus de 80% de leur temps à l'intérieur d'une habitation. Il nous tient compte le facteur d'atténuation due à l'habitat (indoor shielding factor) de 0,8 et d'un pourcentage de 80% du temps passé à l'intérieur d'une habitation pour le calcul de la dose efficace moyenne annuelle imputable au rayonnement cosmique. D'où, la durée de séjour annuelle vaut 8760 h.a^{-1} qui est le séjour intérieur et extérieur d'une personne. A un (1) mètre au-dessus du sol, la quantité de dose efficace annuelle reçue par un individu est donnée par la formule :

$$E = Da \times da \times do \times C$$

Avec **E :** dose efficace annuelle (en mSv.a^{-1}) ; ***da*** **:** durée de séjour externe annuelle (en h.a^{-1}); ***do*** **:** taux d'occupation à l'extérieur d'un bâtiment; ***C*****:** le coefficient de conversion d'unité de dose pour adulte (Sv.Gy^{-1}).

Tableau 1 : Paramètres indispensables à l'estimation des doses radioactives

Paramètres		Valeurs	Unité ou références
Coefficients de conversion de débit de dose	C_K	0,0417	UNSCEAR, 2000
	C_U	0,462	
	C_{Th}	0,604	
Valeur moyenne des activités des échantillons mesurés	A_K	560	Bq.kg^{-1}
	A_U	357	
	A_{Th}	217	
Durée de séjour externe annuelle	***da***	8760	365 jours x 24 heures x (20% + 80%) (en heures)
Taux d'occupation à l'extérieur d'un bâtiment	***do***	0,2 (20%)	UNSCEAR, 2000
Coefficient de conversion pour adulte	**C**	0,7	
Coefficient de conversion pour enfant de 6 à15 ans	**C**	0,8	
Coefficient de conversion pour enfant de 0 à 5 ans	**C**	0,9	

Résultats

La détermination de l'activité des radionucléides se fait directement en utilisant leurs raies gamma, qui tient compte des descendants (émetteurs gamma) ayant une forte probabilité d'émission. Ils permettent d'obtenir ainsi des proportions des activités des différents radio-isotopes pour les échantillons des roches et placers étudiés.

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Caractérisation des radionucléides

Trois principaux radionucléides naturels (potassium-40, famille du thorium-232, et famille de l'uranium-238) sont présents dans les trois placers et dans les roches environnantes de la Région Analanjirofo. Comme le thorium-232 et l'uranium-238 sont des émetteurs alpha, la détermination de ces deux radionucléides s'effectue à partir de ses descendants (actinium-228, plomb-212, bismuth-212 et thallium-208) et (plomb-214 et bismuth-214) respectivement.

Activités moyennes de la famille radioactive

Le tableau 2 révèle que les activités du potassium-40 varient de 139 ± 20,70 Bq.kg^{-1} à 2183 ± 117,33 Bq.kg^{-1}. Elles varient selon le type de roche et les placers. Les activités de la famille du thorium-232 varient entre 60 ± 6,04 Bq.kg^{-1} à 1130 ± 59,24 Bq.kg^{-1}. La famille de l'uranium-238 a des activités variant de 1,4 ± 0,82 Bq.kg^{-1} à 564 ± 28,76 Bq.kg^{-1}.

Tableau 2 : Activités spécifiques de l'U-238, de Th-232 et K-40

Echantillons	Activités des familles radioactives (Bq.kg^{-1})		
	K-40	Th-232	U-238
Placer d'Ampasimbe	238 ± 20,64	189 ± 12,93	236 ± 12,42
Placer de Tanambao Bitavola	147 ± 15,74	676 ± 35,66	478 ± 24,22
Placer de Fenoarivo Atsinanana	139 ± 20,70	1130 ± 59,24	564 ± 28,76
Orthogneiss à composition TTG	499 ± 33,08	27 ± 6,95	1,4 ± 0,82
Orthogneiss migmatitique	2183 ± 117,33	60 ± 6,04	10 ± 1,51
Paragneiss	152 ± 3,88	60 ± 0,65	13 ± 0,18
Moyenne des activités	560 ± 35,23	357 ± 20,24	217 ± 11,32
UNSCEAR, 2000	400	30,0	35,0

Étude comparative des activités des radionucléides

Les activités des trois radionucléides sont comparées aux valeurs moyennes mondiales de l'UNSCEAR, 2000 dans le sol. Le tableau 3 ci-après présente les activités spécifiques du potassium-40, de l'uranium-238 et du thorium-232 dans le sol, trouvées dans quelques pays du monde, ainsi que les valeurs moyennes mondiales données par l'UNSCEAR, 2000.

Tableau 3 : Valeurs mondiales des activités de l'U-238, de Th-232 et K-40

Pays	Activités des radionucléides dans les sols (Bq.kg^{-1})					
	K-40		Famille de l'U-238		Famille du Th-232	
	Moyenne	Plage	Moyenne	Plage	Moyenne	Plage
Inde	400	38-760	29	7-81	64	14-160
Chine	440	9-1800	33	2-690	41	1-360
Malaisie	310	170-430	66	49-86	82	63-110
Russie	520	100-1400	19	0-67	30	2-79
USA	370	100-700	35	4-140	35	4-130
Moyenne mondiale	400	140-850	35	16-110	30	11-64

Comparaison des activités trouvées avec les valeurs moyennes mondiales

Les activités du potassium-40 des échantillons des placers sont comprises entre 139 ± 20,70 Bq.kg^{-1} à 238 ± 20,64 Bq.kg^{-1}. Or, les activités du potassium-40 des échantillons des roches sont comprises entre 152 ± 3,88 Bq.kg^{-1} à 2183 ± 117,33 Bq.kg^{-1}. La valeur moyenne des activités du potassium-40 est de 560 ± 35,23 Bq.kg^{-1}. Aucun échantillon des placers n'a une activité supérieure à la valeur moyenne mondiale. Par contre, un échantillon de roche orthogneiss migmatitique présente une activité supérieure à la valeur de référence mondiale, qui est 400 Bq.kg^{-1} (UNSCEAR, 2000). Les activités de la famille du thorium-232 des échantillons des placers sont comprises entre 189 ± 12,93 Bq.kg^{-1} à 1130 ± 59,24 Bq.kg^{-1}. Pour échantillons des roches, les activités sont comprises entre 27 ± 6,95 Bq.kg^{-1} à 60 ± 6,04 Bq.kg^{-1}. La valeur moyenne des activités de la famille du thorium-232 de nos échantillons est de 357 ± 20,24

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

Bq.kg^{-1}. Il est constaté qu'aucun échantillon des roches dépasse la valeur de référence mondiale. Tandis que les échantillons des placers de Tanambao Bitavola et de Fenoarivo

Atsinanana ont des activités supérieures à la moyenne mondiale de 30 Bq.kg^{-1} (UNSCEAR, 2000). Nous constatons que, toutes les activités de la famille du thorium-232 dans les sables de plages de la région étudiée et dans les deux roches (orthogneiss migmatitique et paragneiss) sont supérieures à l'activité moyenne mondiale de la famille du thorium-232 publiée par l'UNSCEAR en 2000. Seule la roche orthogneiss à composition TTG a une activité du thorium-232 inférieure à cette activité moyenne mondiale. Les activités de l'uranium-238 des échantillons des placers sont comprises entre 236 ± 12,42 Bq.kg^{-1} à 564 ± 28,76. Elles sont comprises entre 1,4 ± 0,82 Bq.kg^{-1} à 13 ± 0,18 Bq.kg^{-1} dans les échantillons des roches. Elles ont une valeur moyenne de 217 ± 11,32 Bq.kg^{-1}. Il est noté qu'aucun échantillon des roches ne dépasse l'activité moyenne mondiale. Mais, les échantillons des placers ont des activités supérieures à la valeur moyenne mondiale qui est de 35 Bq.kg^{-1} (UNSCEAR, 2000). Par rapport à l'activité moyenne mondiale de la famille de l'uranium-238 publiée par l'UNSCEAR (2000) (35 Bq.kg^{-1}), toutes les activités de la famille de l'uranium-238 présent dans les sables de plages des sites d'études sont supérieures à cette activité moyenne mondiale. Par contre, toutes les activités de la famille de l'uranium-238 présent dans les roches sont inférieures à l'activité moyenne mondiale de l'UNSCEAR.

Comparaison des activités des radionucléides entre elles

Le tableau 4 ci-après présente les activités des radionucléides présentes dans nos échantillons. Nous avons comparé ces activités entre elles pour connaitre les radionucléides à fortes activités.

Tableau 4 : Activités moyennes des radionucléides

Famille	**Activités spécifiques (Bq.kg^{-1})**						
	Radionucléides	Placer l'Ampasimbe	Placer de Tanambao Bitavola	Placer de Fenoarivo Atsinanana	Paragneiss	Orthogneiss migmatitique	Orthogneiss (TTG)
K-40	K-40	238 ± 20,64	147± 15,74	139 ± 20,70	152 ± 3,88	2183 ± 117,33	499 ± 33,08
Th-232	Tl-208	71 ± 4,17	282 ± 14,59	463 ± 23,86	33 ± 0,18	27 ± 1,88	3 ± 2,11
	Bi-212	235 ± 23,62	802 ± 46,11	1291 ± 73,54	11 ± 1,65	61 ± 13,04	90 ± 15,57
	Pb-212	226 ± 11,79	794 ± 40,22	1418 ± 71,88	100 ± 0,28	79 ± 4,52	8 ± 5,00
	Ac-228	224 ± 12,13	825 ± 41,70	1341 ± 67,66	93 ± 0,48	74 ± 4,70	8 ± 5,11
U-238	Bi-214	232 ± 12,36	473 ± 24,04	568 ± 29,10	14 ± 0,22	11 ± 1,84	1,4 ± 2,37
	Pb-214	239 ± 12,47	482 ± 24,40	560 ± 28,43	12 ± 0,15	8 ± 1,18	1,4 ± 1,63

Nous constatons que les activités des radionucléides varient entre 1,4 ± 2,37 Bq.kg^{-1} à 2183 ± 117,33 Bq.kg^{-1} respectivement pour le bismuth-214 de la roche orthogneiss à composition TTG et le potassium-40 de la roche orthogneiss migmatitique (tableau 4).

Les activités du potassium-40 présente des valeurs très variées selon le type de l'échantillon. La roche orthogneiss migmatitique a une valeur d'activité du potassium-40 plus élevée. Tandis que, cette activité est faible dans les sables de plages (placers) de Fenoarivo Atsinanana. Dans tous les échantillons, la valeur moyenne des activités est de

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

560 ± 35,23 Bq.kg^{-1}. Ceci indique que les roches contiennent des fortes activités par rapport aux placers.

Les activités de bismuth-212 sont aussi très variées en fonction du type de l'échantillon. Ces activités sont comprises entre 11 ± 1,65 Bq.kg^{-1} à 1291 ± 73,54 Bq.kg^{-1}. La roche paragneiss contient la plus faible activité de bismuth-212. Tandis que, les placers de Fenoarivo Atsinanana présentent une activité de bismuth-212 plus élevée. La valeur moyenne de ces activités est de 415 ± 28,92 Bq.kg^{-1}. En effet, les placers ont des fortes concentrations par rapport les roches. Comme le bismuth-212, l'activité du bismuth-214 varie selon le type de l'échantillon.

La valeur moyenne des activités du bismuth-214 est de 217 ±11,66 Bq.kg^{-1}. Les placers de Fenoarivo Atsinanana présentent une activité du bismuth-214 plus élevée. Par contre, cette valeur d'activité du bismuth-214 devient plus faible dans la roche orthogneiss à composition TTG. D'où, le bismuth-214 présente une forte activité dans les placers par rapport aux roches.

Les placers de Fenoarivo Atsinanana présentent une activité du plomb-212 très élevée. Tandis que la roche orthogneiss à composition TTG contient une faible valeur d'activité du plomb-212. La valeur moyenne des activités plomb-212 dans tous les échantillons est de 438 ± 22,28 Bq.kg^{-1}. Par rapport aux échantillons de roches, les placers présentent des fortes activités du plomb-212. Les activités du plomb-214 sont presque identiques à celles du plomb-212. Les activités du plomb-214 sont comprises entre 1,4 ± 1,63 Bq.kg^{-1} à 560 ± 28,43 Bq.kg^{-1}. La moyenne de cette activité calculée à partir des échantillons collectés est de 217 ± 11,38 Bq.kg^{-1}. Les placers de Fenoarivo Atsinanana présentent de forte activité du plomb-214. La valeur de cette activité est faible dans la roche orthogneiss à composition TTG. Nous constatons que les placers contiennent des fortes activités du plomb-214 par rapport aux roches analysées.

La valeur moyenne des activités de l'actinium-228 est de 427 ± 21,96 Bq.kg^{-1}. Elle varie aussi selon le type de l'échantillon. Les placers de Fenoarivo Atsinanana présentent une forte activité de l'actinium-228. Et, la roche orthogneiss à composition TTG contient de l'actinium-228 à faible d'activité. D'où, l'actinium-228 se concentre dans les placers que dans les roches.

Il est noté que le thallium-208 présente des activités plus fortes dans les placers. Elles varient entre 71 ± 4,17 Bq.kg^{-1} et 463 ± 23,86 Bq.kg^{-1} pour les placers, et de 10 ± 2,11 Bq.kg^{-1} et 33 ± 0,18 Bq.kg^{-1} pour les roches. Les placers de Fenoarivo Atsinanana ont une valeur d'activité de thallium-208 la plus élevée. Tandis que, la roche orthogneiss à composition TTG contient la plus faible activité de thallium-208. La valeur moyenne des activités de thallium-208 dans tous les échantillons est de 147 ± 7,80 Bq.kg^{-1}.

Exposition externe des doses radioactives

L'exposition humaine aux sources de rayonnement naturel a toujours existé. Au niveau mondial, l'exposition au bruit de fond de l'environnement constitue la principale contribution à l'exposition totale aux rayonnements (UNSCEAR, 2008). La méthode de calcul de l'exposition au rayonnement naturel se base sur la méthode prescrite dans le rapport UNSCEAR, 2000. Le tableau 1 présente les valeurs des paramètres indispensables au calcul d'estimation des doses. En

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192

appliquant les formules de débit de dose absorbée (*Da*) et la formule de dose efficace annuelle (E), respectivement $Da = C_K A_K + C_U A_U + C_{Th} A_{Th}$, et $E = Da \times da \times do \times C$, nous avons obtenu les valeurs d'exposition externe des doses dans les sites étudiés. Le tableau 5 présente les résultats de calcul de débit de dose absorbée (*Da*) dans l'air (nGy.h^{-1}) pour une personne et la dose efficace annuelle (E) pour l'enfant et l'adulte.

Tableau 5 **:** Débit de dose absorbée (*Da*) et dose efficace annuelle (E)

Échantillons (Placers et roches)	**Activité spécifique (Bq.kg^{-1})**			**Débit de dose absorbée**	**Dose efficace annuelle E (mSv.a^{-1})**		
	K-40	**Th-232**	**U-238**		**Enfant 0 à 5 ans**	**Enfant 6 à 15 ans**	**Adulte**
P. d'Ampasimbe	238	189	236	233,11	0,37	0,33	0,28
P. de Tanambao Bitavola	147	676	478	635,26	1,00	0,89	0,78
P. de Fenoarivo Atsinanana	138	1130	564	948,87	1,50	1,33	1,16
Orthogneiss (TTG)	498	27	1,4	37,97	0,06	0,05	0,05
Orthogneiss migmatitique	2183	60	10	132,04	0,21	0,18	0,16
Paragneiss	152	59	13	48,30	0,08	0,07	0,06
Valeur moyenne	560	357	217,09	339,26	0,54	0,47	0,41
UNSCEAR, 2000	400	30	35	57	0,09	0,08	0,07

D'après les résultats, les débits de doses trouvés sont compris entre 37,97 nGy.h^{-1} et 948,87 nGy.h^{-1}, avec une moyenne de 339,26 nGy.h^{-1}. Cette valeur moyenne est six fois supérieure à la valeur moyenne mondiale donnée par l'UNSCEAR 2000, qui est de 57 nGy.h^{-1}.

Tableau 6 : Classification de référence des doses (UNSCEAR, 2000)

Doses efficaces	**Classe**
Au-delà de 10 Sv	Très fortes doses
2 Sv à 10 Sv	Fortes doses
200 mSv à 2000 mSv (2 Sv)	Doses moyennes
20 mSv à 200 mSv	Faibles doses
0 à 20 mSv	Très faibles doses

Discussion

Les concentrations radioactives mesurées dans les sites étudiés varient légèrement d'un échantillon à l'autre. Elles sont généralement considérées que les minéraux lourds des sables de plages contiennent des niveaux élevés de radioactivité que les roches environnantes. Dans les roches environnantes, les roches métamorphiques orthodérivées présentent plus davantage de radioactivité que les roches métamorphiques paradérivées. Nous remarquons que les valeurs moyennes des activités de Th-232 et de l'U-238 dans les sables de pages de la ville de Fenoarivo Atsinanana sont comparables, mais supérieures aux celles de Tanambao Bitavola et d'Ampasimbe. Cela pourrait être dû à la forte teneur en zircon à grains fins dans les sables de plages de la ville de Fenoarivo Atsinanana par rapport aux celles de Tanambao Bitavola et d'Ampasimbe. Les concentrations moyennes de l'U-238, de Th-232 et K-40 dans les sites étudiés sont supérieures aux valeurs publiées par Kall et al., (2014), à l'exception les valeurs trouvées dans les sables des plages de Ramena et d'Orangea, District d'Antsiranana qui ont des activités moyennes de l'U-238, de Th-232 et K-40 relativement faibles (77 Bq.kg^{-1} pour le Th-232 ; 109 Bq.kg^{-1} pour l'U-238 ; et 198 Bq.kg^{-1} pour le K-40). Elles sont aussi supérieures à la moyenne mondiale publiée par l'UNSCEAR (2000). Les

valeurs moyennes mondiales des doses efficaces à l'air libre reçues par une personne sont de 0,07 $mSv.a^{-1}$, de 0,09 $mSv.a^{-1}$ et de 0,08 $mSv.a^{-1}$ respectivement pour adulte, enfant de 0 à 5 ans et enfant de 6 à 15 ans. D'après l'UNSCEAR, la valeur limite maximale acceptable de dose efficace pour le public est de 1 $mSv.a^{-1}$. Dans les sites d'étude, les doses efficaces moyennes trouvées sont de 0,41 $mSv.a^{-1}$, de 0,54 $mSv.a^{-1}$ et de 0,47 $mSv.a^{-1}$ respectivement pour adulte, enfant de 0 à 5 ans et enfant de 6 à 15 ans. Ces valeurs sont presque six fois supérieures aux valeurs moyennes mondiales. Mais, elles restent inférieures à la norme de la dose admissible fixée par l'UNSCEAR qui est de 1 $mSv.a^{-1}$. Ces doses efficaces sont classifiées comme des doses normales selon le classement de référence des doses donné par l'UNSCEAR (2000) (tabl. 6).

Conclusion

La teneur en éléments rares, notamment le hafnium, le zirconium, le titane, et le tantale constitutifs des minéraux lourds associés aux sables de plages du District de Fenoarivo Atsinanana attire d'attention des prospecteurs miniers et des exploitants. Ces éléments sont associés aux éléments radioactifs dans leurs minerais. La détermination de la radioactivité et de la dose efficace annuelle permet d'évaluer les éventuels impacts à la santé humaine avant, pendant et après l'exploitation du gisement. La forte teneur en éléments radioactifs dans les sables de plages à minéraux lourds de la région étudiée entraine une exposition des rayonnements ionisants. Les placers contiennent les trois principaux radionucléides naturels (l'uranium-238, le thorium-232 et le potassium-40). Leurs activités sont élevées par rapport aux valeurs publiées par d'autres auteurs qui étudient la radioactivité des sables de plages de Madagascar. Elles sont aussi supérieures aux valeurs moyennes mondiales publiées par la Comité Scientifique des Nations Unies pour les Effets de Radiation Atomique en 2000 (UNSCEAR, 2000). La présence de radionucléides naturels dans les sables de plages étudiés entraine des expositions de débits des doses absorbées et des doses efficaces annuelles de forte teneur à 1 mètre de la source et à l'air libre. L'exposition des doses efficaces moyennes trouvées dans nos sites d'étude pour une personne adulte (0,41 $mSv.a^{-1}$) est presque six fois supérieure à la moyenne mondiale des doses efficaces annuelles (0,07 $mSv.a^{-1}$). Néanmoins, elles restent inférieures à la norme de la dose admissible fixée par l'UNSCEAR (1 $mSv.a^{-1}$). Ainsi, l'exposition des doses efficaces est considérée comme faible selon le classement de référence des doses donné par l'UNSCEAR, 2000.

Références bibliographiques

Kall, B., Z. Donne, M. Rasolonirina, N. Rabesiranana, G. Rambolamanana, (2014). Contribution à l'étude de la radioactivité gamma du sable des plages de Ramena et d'Orangea, Antsiranana, Madagascar. Revue. Afrique SCIENCE 10(4): 23- 35. ISSN 1813-548X.

UNSCEAR, (2000). Sources and Effects of Ionizing Radiation: Exposures from natural radiation sources. Report to the General Assembly, Annex B, United Nations, New York.

UNSCEAR, (2008). Sources, effects and risks of ionising radiation. Report to the General Assembly, Official Records Sixty-third Session Supplement No. 46. United Nations, New York.

ISSN: 2709-8192-1. https://portal.issn.org/resource/ISSN/2709-8192