



CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RADIOACTIVITE DU SOL DE L'EXTRÊME NORD DE MADAGASCAR

| Rollando Radomanana Rakotonarivo ^{1*} | Dieudonné Solofonirina Ravelomanantsoa ¹ | Rasolonirina Martin ² | et |
Franck Justinien Ratovonjanahary ³ |

¹ Faculté des Sciences | Université d'Antananarivo | Madagascar |

² INSTN-Madagascar | Département ATN | Université d'Antananarivo | Madagascar |

³ Laboratoire de Physique Nucléaire et Physique de l'Environnement | Université d'Antananarivo | Madagascar |

| Received | 10 February 2019 |

| Accepted 19 March 2019 |

| Published 27 March 2019 |

| ID Article | Rakotonarivo-ManuscriptRef.1-ajira10319 |

RESUME

Contexte : On connaît que Madagascar est un pays riche en minerais radioactifs. Plusieurs sites sont déjà connus et surveillés par des chercheurs locaux ou étrangers pour son niveau de radioactivité élevé. L'origine de ces éléments radioactifs ne peut être seulement naturelle mais aussi artificielle (causé par les essais et accidents nucléaires). Ils contaminent l'environnement et contribuent à la pollution radiologique pour les êtres vivants. **Objectif :** L'objectif de ce travail est de savoir, sur l'extrême nord de Madagascar : - le taux de la pollution radioactive, naturelle et artificielle, et surtout de connaître la contamination en élément radioactif artificiel, - la répartition verticale des radionucléides naturels et artificiels dans le sol et la capacité de migration en profondeur des radionucléides artificiels. **Méthode :** on a fait une mesure sur terrain suivie de l'échantillonnage du sol afin de les analyser en laboratoire. Le mode de prélèvement est suivant la verticale descendante du sol de 0 à 40cm de profondeur. Pour tous les sept (7) sites d'échantillonnage, huit (8) échantillons ont été prélevés pour chaque site suivant les profondeurs (0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-25cm, 25-30cm, 30-35cm, 35-40cm). Deux chaînes de spectrométries gamma ont été utilisées pour les analyses des échantillons collectés : le CZT-500(S) et le HPGe coaxial de type n. **Résultat :** Pour la famille du thorium 232 et celle de l'uranium 238, les activités de leurs descendants émetteurs gamma respectifs, sont égales aux incertitudes près. On a détecté aussi le radionucléide artificiel césium 137 dans quelques échantillons. Les analyses effectuées avec le CZT-500(s) ont permis de savoir les deux (2) sites présentant les échantillons de sol d'activité minimale et maximale. Les analyses avec le HPGe montrent que l'activité de la famille U-238 varie de $6,1 \pm 0,5$ Bq.kg⁻¹ à $18,7$ Bq.kg⁻¹, l'activité de la famille de Th-232 varie de $23,4 \pm 0,6$ Bq.Kg⁻¹ à $65,0 \pm 1,2$ Bq.Kg⁻¹, pour le K-40, son activité varie de $27,2 \pm 5,4$ Bq.kg⁻¹ à 430 ± 8 Bq.g⁻¹, et pour le césium-137 l'activité maximale est de $1,3 \pm 0,1$ Bq.kg⁻¹. **Conclusion :** L'activité de chaque radionucléide naturel varie d'un site à l'autre, et varie aussi avec la profondeur, et cette variation n'est pas constante. Le sol de l'extrême nord de Madagascar a une faible activité pour les familles des radionucléides primordiaux par rapport à d'autres villes de Madagascar. Pour la famille de l'U-238, son activité est inférieure à la valeur moyenne mondiale, tandis que pour la famille de Th-232, certains échantillons ont des activités deux fois supérieures à la valeur moyenne mondiale. Pour le K-40 l'activité maximale est égale à la valeur moyenne mondiale. On trouve des traces de césium-137 dans certains échantillons. Les deux chaînes de spectrométrie gamma utilisées sont complémentaires. Une analyse comparative de tous les échantillons de sol est effectuée avec le CZT-500(s) alors que la chaîne d'analyse avec le HPGe a permis de déterminer les valeurs extrêmes des activités.

Mots-CLES : spectrométrie gamma, radioactivité, détecteur.

ABSTRACT

Context: Madagascar is known as a country rich in radioactive ore resources. Some areas are known for its relatively high background radiation level. The origin of these radioactive elements is not exclusively natural but may be artificial as well (caused by Nuclear weapons tests, nuclear accident). These are the main sources of contamination to the environment and the population by radioactive substances. **Objective:** The objective of the present work is to know, in the north part of Madagascar: - the level of radioactive contamination, natural and artificial, mainly to know the artificial radioactive elements contamination, - the depth distribution of natural and artificial radionuclides in soil and the in-depth migration ability of artificial radionuclides. Two different gamma spectrometry chains are used for the quantitative study of the energy spectra. **Method:** On-site measurements followed by soil sampling laboratory analyses are carried out. Soil samples from 0 to 40cm depths were analyzed. For all the seven (7) sampling areas, eight (8) samples were taken for each site at different depths (0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-25cm, 25-30cm, 30-35cm, 35-40cm). Two different gamma spectrometry chains are used for samples analysis: CZT-500(S) and N-type High Purity Germanium HPGe Coaxial. **Results:** The gamma-emitting daughters activities of ²³⁸U and ²³²Th decays are respectively quite the same. Artificial radionuclide such as ¹³⁷Cs is detected as well in some samples. The analyses conducted with the CZT-500 (s) revealed the two (2) sites presenting the soil samples of minimum and maximum activity. Analyses with HPGe show that the activity of the U-238 decays activity varies from $6,1 \pm 0,5$ Bq.kg⁻¹ to $18,7$ Bq.kg⁻¹, the Th-232 decays activity varies from $23,4 \pm 0,6$ Bq.kg⁻¹ to $65,0 \pm 1,2$ Bq.kg⁻¹, the K-40 activity varies from $27,2 \pm 5,4$ Bq.kg⁻¹ to 430 ± 8 Bq.kg⁻¹, and the cesium-137 maximal activity is $1,3 \pm 0,1$ Bq.kg⁻¹. **Conclusion:** Each natural radionuclide activity varies from one area to another, and varies according to depth as well and the variation is not constant. The soil of the far north of Madagascar has a low activity for families of primordial radionuclides compared to other cities in Madagascar. For families of the U-238, its activity is below the global average, while the families of Th-232, some samples are twice as high as this value. For the K-40 it is less than or equal to the global average value. Cs-137 was found in very small amount in soil. For the two gamma-ray spectrometry chains used, they are complementary. A comparative analysis of all soil samples is carried out with the CZT-500 (s), whereas the analysis chain with the HPGe has determined the extrême values of the activities.

Keywords: gamma spectrometry, radioactivity, detector.

1. INTRODUCTION

La Radioactivité est un phénomène présent dans l'environnement dont l'origine ne peut être seulement naturelle mais aussi artificielle. Plusieurs études concernant l'environnement radioactif ont été réalisées à Madagascar, entre autres ceux faits par le laboratoire de l'INSTN, et du LPNPE de l'Université d'Antananarivo. On connaît que Madagascar est un pays riche en minerais radioactif. Plusieurs sites sont déjà connus et surveillés par des chercheurs locaux ou étrangers à cause de leur niveau de radioactivité élevé. Madagascar ne peut pas échapper à la contamination par des radionucléides artificiels causée par quelques accidents, citées entre autres l'accident du central nucléaire de Tchernobyl en 1986, l'accident satellitaire de 1964, le Transit 5 BN-3 utilisant un générateur thermoélectrique à isotopes radioactifs (RTG) qui se désintégraient dans l'atmosphère à une altitude d'environ 50 kilomètres au-dessus de l'océan Indien, au nord de Madagascar [1]. Ainsi, la région nord de Madagascar mérite une recherche particulière et approfondie, une étude en qualité et en quantité concernant la radioactivité des sols. Ainsi l'objectif de cette recherche est de savoir, sur l'extrême nord de Madagascar : - le taux de la pollution radioactive, naturelle et artificielle, et surtout de connaître la contamination en élément radioactif artificiel, - la répartition verticale des radionucléides naturels et artificiels dans le sol et la capacité de migration en profondeur des radionucléides artificiels. Pour réaliser ce travail, nous avons utilisé deux chaînes de spectrométries gamma à savoir le CZT-500(S) du laboratoire LPNPE de l'Université d'Antananarivo et le HPGe coaxial de type n de l'INSTN-Madagascar.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1. Matériels

Pour réaliser ce travail, deux types d'appareils ont été utilisés : des appareils de terrain, et des appareils de laboratoire constitués par chaînes de spectrométrie gamma au CZT-500(S) et au HPGe.

2.1.1. Appareils de terrain : Ils sont constitués par un débitmètre Gamma scout GS II, un GPS Etrex 10, et les matériels de prélèvement de sol. Le débitmètre Gamma scout GS II est équipé d'un détecteur Geiger Muller [2] qui fournit une mesure certifiée de la radiation, c'est un instrument de mesure précis pour le rayonnement alpha, bêta et gamma. Il sert à mesurer sur terrain le nombre des coups totaux des rayonnements et de détecter préalablement s'il y a forte radiation. Le GPS Etrex 10 a été utilisé pour avoir les coordonnées géographiques de chaque site. Le prélèvement d'échantillon du sol est effectué à l'aide, d'un carottier artisanal muni d'un tube cylindrique en acier de 27 cm de diamètre, 45 cm de hauteur, 5 mm d'épaisseur et gradué de 5 cm, de pelle, marteau et sachet plastique pour conserver les échantillons.

2.1.2. Appareils de laboratoire : Ils sont constitués par des chaînes de spectrométrie gamma. La chaîne de spectrométrie gamma rend visible le rayonnement ionisant à travers la mesure d'énergie transférée au détecteur. Elle est formée de générateur à haute tension, de détecteur, de préamplificateur, d'amplificateur, et de terminal informatique muni d'un logiciel spécifique.

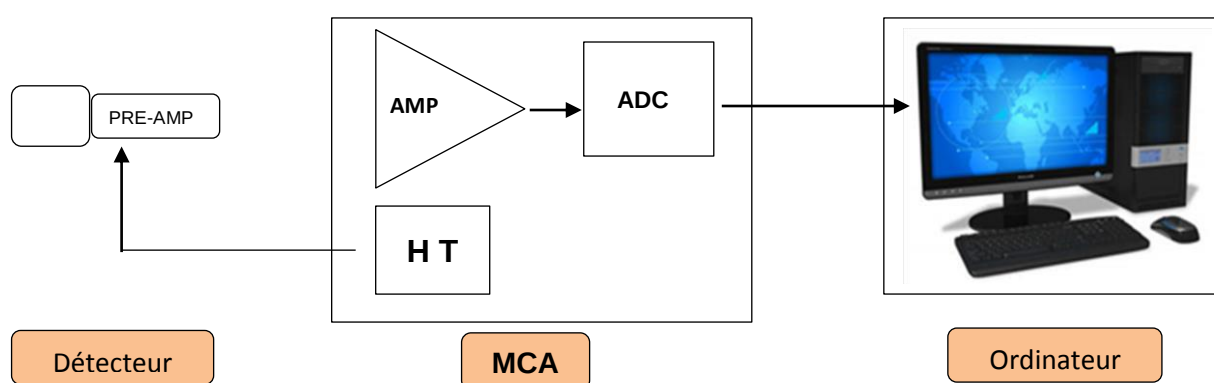


Figure 1 : La figure montre la chaîne de spectrométrie gamma.

PRE-AMP : Préamplificateur

AMP : Amplificateur

HT : Haute tension

ADC : Convertisseur Analogique-Numérique

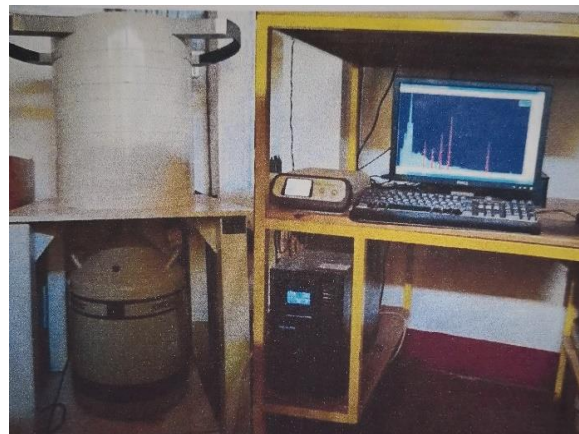
MCA : Analyseur Multicanaux

Pour les analyses des échantillons, deux chaînes de spectrométries gamma ont été utilisées, dont le CZT-500(S) du laboratoire LPNPE de l'Université d'Antananarivo Madagascar et le HPGe coaxial de type n de l'INSTN-Madagascar.

- La chaîne de spectrométrie gamma CZT-500(s), est un appareil de terrain (portatif) mais il est adapté pour effectuer des mesures en laboratoire [3] en ajoutant un château de plomb pour minimiser le bruit de fond.
- Le HPGe coaxial de type n est un appareil de laboratoire qui nécessite un refroidissement par azote liquide pour son utilisation.



Château de plomb du détecteur CZT-500(s)



La spectromètre HPGe

Figure 2 : La figure montre les chaînes de spectrométries gamma utilisés.

2.2. Méthodes

Pour réaliser ce travail, on a fait une mesure sur terrain suivie de l'échantillonnage du sol afin de les analyser au laboratoire. Comme il s'agit d'analyse de sols, et pour permettre une bonne ségrégation en fonction de la profondeur, le prélèvement des échantillons se fait suivant la verticale descendante de sol de 0 à 40cm [4] à l'aide d'un matériel conçu spécialement pour ce travail. En dessous de cette profondeur la présence des éléments artificiels tels que le Plutonium et le Césium est presque nulle [5].

Sur le terrain on a mesuré à l'aide de l'appareil gamma scout GS II le nombre des coups des rayonnements radioactifs à 1m du sol et à la surface de chaque échantillon. Au laboratoire, On a utilisé la méthode d'analyse et technique nucléaire, une méthode non destructive pour identifier et quantifier des éléments radioactifs, à l'aide des chaînes de spectrométrie gamma. Pour les sept (7) sites de prélèvements, tous les échantillons sont analysés par le CZT-500(s). Seuls les deux sites possédants le plus grand et le plus petit en nombre total de coups mesuré par les deux appareils (le gamma scout GS II et CZT-500(s)) sont analysés par le HPGe pour une analyse quantitative.

2.2.1. Mode de prélèvement

Pour chaque site d'échantillonnage, huit (8) échantillons ont été prélevés suivant les profondeurs (0-5cm, 5-10cm, 10-15cm, 15-20cm, 20-25cm, 25-30cm, 30-35cm, 35-40cm). La séparation de l'échantillon de chaque 5cm de profondeur a été choisi afin de savoir la répartition vertical des radionucléides naturels ou artificiels dans le sol et aussi de connaître la capacité de migration en profondeur des radionucléides artificiels.

Avant de faire le prélèvement des sols, on mesure à l'aide de l'appareil gamma scout GS II le nombre des coups des rayonnements radioactifs d'une durée de 600 secondes à un mètre du sol et à la surface du sol. Après on a enfoncé le tube dans le sol, et pour ce faire on a creusé le sol à l'extérieur du tube afin que ce dernier s'enfonce facilement à l'intérieur du sol. Une fois la profondeur est atteinte, on a prélevé les sols de 5cm d'épaisseur, une fois enlevés, on mesure le nombre des coups des rayonnements radioactifs de la surface suivante à l'aide de l'appareil gamma scout GS II d'une même durée de 600 s et ainsi de suite jusqu'à la dernière profondeur. On a huit (8) échantillons pour chaque site de prélèvement. Chaque échantillon a été mis dans de gaine plastique transparente avant de l'introduire dans de sachet noir muni d'une étiquette.



Figure 3 : La figure montre le mode de prélèvement des sols et mesure de nombre des coups des rayonnements.

2.2.2. Préparation et analyse des échantillons

L'analyse au laboratoire comprend trois étapes : la préparation des échantillons, l'analyse par la chaîne de spectrométrie gamma et le dépouillement par le logiciel spécifique.

Avant de faire la mesure des échantillons à la chaîne de spectrométrie gamma, on a broyé les échantillons puis tamisé à l'aide d'un tamis de 0,5 à 1mm. Les échantillons en poudre sont introduits dans des portes échantillons fermés et hermétique pendant au moins 21 jours pour atteindre l'équilibre radioactif.

3. Site d'étude

3.1. Les sites de prélèvement

On a fait des prélèvements d'échantillons et des mesures dans les sept (07) sites différents dans l'extrême nord de Madagascar, proche de la ville de Diégo-Suarez dans la presqu'île de Bobaomby. Ce sont des endroits sans abris, avec ou sans végétations dans un terrain plat en pente légère, au sommet d'une montagne, près d'un cours d'eau, au bord de la mer et dans un lieu habité (dans un quartier à la périphérie de la ville de Diégo-Suarez), présenté dans la figure 4. Le choix de ces sites dépend de la possibilité d'accès.

L'échantillonnage et la mesure ont été faits du 26 au 29 septembre 2016. On a choisi cette période car c'est le moment où la précipitation de cette région est la plus basse [6], et que les sites sont accessibles.

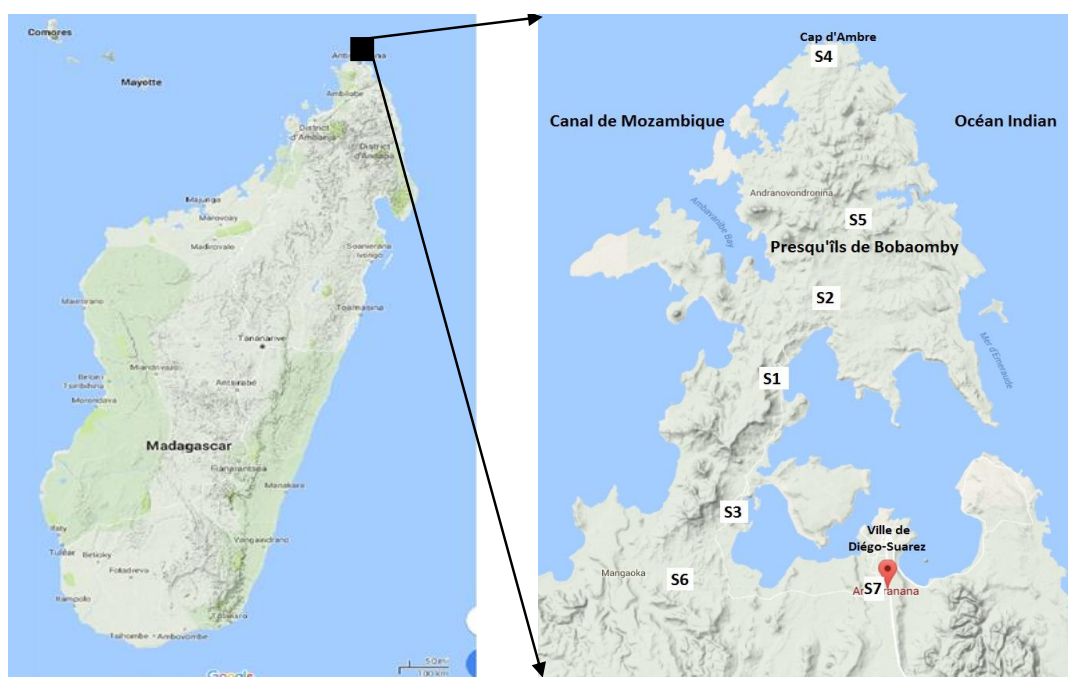


Figure 4 : La figure montre les sites de prélèvements.

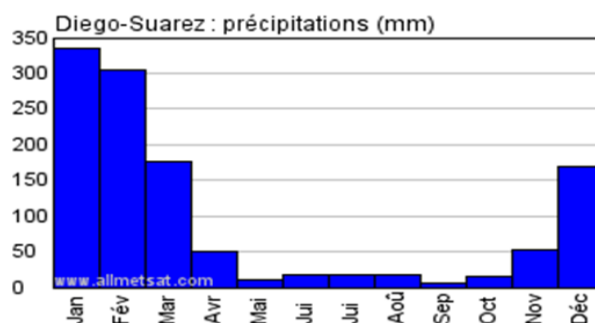


Figure 5 : La figure montre les niveaux de précipitation à Diégo-Suarez.

3.2. Description et coordonnées des sites

Les descriptions et les coordonnées des sites de prélèvement sont les suivantes :

Site 1

Date de prélèvement :	26/09/2016
Coordonnées géographiques :	Latitude : S 12° 11,849'
	Longitude : E 049° 13,811'
	Altitude : 37 m
Description visuelle du site de prélèvement : - Sol de couleur marron et rocaillieux - Terrain plat proche d'une montagne - Végétations clairsemées, - Pas d'activités humaines	

Site 2

Date de prélèvement :	27/09/2016
Coordonnées géographiques :	Latitude : S 12° 06,647'
	Longitude : E 049° 14,816'
	Altitude : 87 m
Description visuelle du site de prélèvement : - Sol rocaillieux de couleur marron - Végétations Clairsemées - Sommet d'une montagne - Pas d'activité humaine, loin d'habitation humaine	

Site 3

Date de prélèvement :	27/09/ 2016
Coordonnées géographiques :	Latitude : S 12° 16,416'
	Longitude : E 049° 11,532'
	Altitude : 13 m
Description visuelle du site de prélèvement - Sols sablonnés à la surface et argileux en profondeur - Cours d'eau en saison de pluies, proche d'une montagne et de l'embouchure. - Végétations sans feuille et épineux - Pas d'activités humaines	

Site 4

Date de prélèvement :	28/09/2016
Coordonnées géographiques :	Latitude : S 11° 56,639'
	Longitude : E 049° 16,585'
	Altitude : 10 m
Description visuelle du site de prélèvement - Sol rocaillieux en surface et argileux en profondeur - Terrain gazonneux, au bord de la mer - Extrême nord de Madagascar - Présence d'activité humaine	

Site 5

Date de prélèvement :	28/09/2016
Coordonnées géographiques :	Latitude : S 12° 03,199'
	Longitude : E 049° 16,620'
	Altitude : 36 m
Description visuelle du site de prélèvement - Sol de couleur noire et rocaillieux - Terrain en pente légère à 150 m d'une montagne - Végétations épineux et clairsemées, et dominé par des brousses - Pas d'activités humaines	

Site 6

Date de prélèvement :	29/09/2016
Coordonnées géographiques :	Latitude : S 12° 18,459'
	Longitude : E 049° 11,296'
	Altitude : 41 m
Description visuelle du site de prélèvement : - Sol de couleur noire - Végétations Clairsemées et broussaille - Terrain légèrement en pente à 200 m de la route. Proche d'un cours d'eau en saison de pluie. - Pas d'activité humaine, loin d'habitation humaine	

Site 7

Date de prélèvement :	29/09/2016
Coordonnées géographiques :	Latitude : S 12° 18,539'
	Longitude : E 049° 17,569'
	Altitude : 62 m
Description visuelle du site de prélèvement	
- Sol de couleur marron et rocaillieux - Terrain plat dans la cours d'une habitation, - Au cœur des activités humaines	

4. Mise au point des chaines de mesure

Pour les deux chaines de mesure on a établi des étalonnages en énergie et en efficacité à l'aide de source étalon : Américium, Césium et Cobalt (Co-60) et le RGU, matériaux de référence certifié de l'AIEA.

Pour les sources étalons :

Désignation	Am-241	Cs-137	Co-60
Date de sortie	01-07-83	01-07-83	01-07-83

Fiche technique du RGU :

Désignation	Radionucléide	Masse (g)	Activité (Bq)	Date de sortie
RGU	U-238	500	4910 - 4970	1987

4.1. Efficacité des détecteurs

On a utilisé le RGU pour déterminer l'efficacité de chaque détecteur. Les constantes d'efficacités sont calculées à partir des aires nettes des pics d'absorption totale, par la relation 4.1 suivante,

$$\epsilon = \frac{N_N}{A \cdot I_\gamma \cdot t_c \cdot m} = \frac{\tau_N}{A \cdot I_\gamma \cdot m} \quad (4.1)$$

Avec $\tau_N = \tau_{Et} - \tau_{Bf}$

N_N : Aire nette du pic (coup)

A : Activité massique de l'étalon ($Bq \cdot kg^{-1}$)

I_γ : Intensité ou probabilité d'émission gamma

t_c : Temps de comptage (s)

m : masse (kg)

τ_N : Taux de comptage net (coups)

τ_{Et} et τ_{Bf} : Taux de comptage de l'échantillon et du bruit de fond

A l'aide de la courbe d'efficacité, on peut calculer l'efficacité du détecteur à chaque énergie.

4.2. Activité

En connaissant l'efficacité du détecteur à chaque énergie, on peut calculer l'activité de chaque élément radioactif. D'après la relation 4.1, l'activité est donnée par la relation 4.2 :

$$A = \frac{N_N}{\epsilon \cdot I_\gamma \cdot t_c \cdot m} = \frac{\tau_N}{\epsilon \cdot I_\gamma \cdot m} \quad (4.2)$$

4.3. Limite de détection

Selon la norme ISO 11929-3:2000 de juillet 2000 [7], la limite de détection spécifie la contribution minimale de l'échantillon pouvant être détectée, avec une probabilité d'erreur donnée. Elle est donnée par la formule 4.3

$$LD = \frac{8.76}{t.R^P(E).I_\gamma(E)} \sqrt{C * FWHM} \quad (4.3)$$

Tels que :

t : temps de comptage de l'échantillon

$R^P(E)$: Rendement d'absorption totale pour l'énergie considérée

$I_\gamma(E)$: Intensité d'émission de rayonnement γ

C : le contenu moyen d'un canal de la région correspondant à l'énergie E

5. RESULTATS

5.1. Nombre des coupes totaux de tous les échantillons

Pour les sept sites de prélèvement, on a cinquante-six (56) échantillons à mesurer. Ils sont tous mesurés à l'aide du gamma scout GS II et du détecteur CZT-500(S). La durée de mesure est de 600 secondes pour le gamma scout GS II, et 18 heures celle du détecteur CZT-500(S).

Les résultats des mesures de nombre total des coups des rayonnements radioactifs à l'aide de l'appareil gamma scout GS II et le détecteur CZT-500(S) sont donnés par la figure 6 et la figure 7

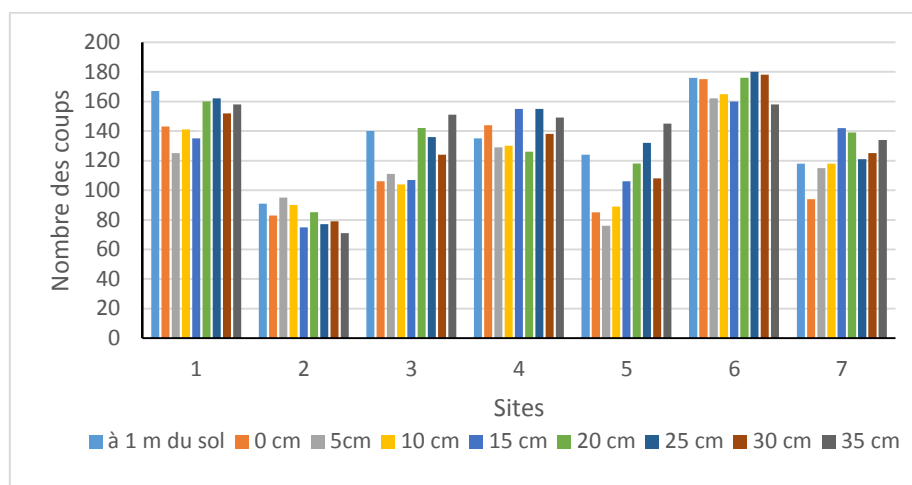


Figure 6 : Nombre total des coups par site et profondeurs par le gamma scout GS II.

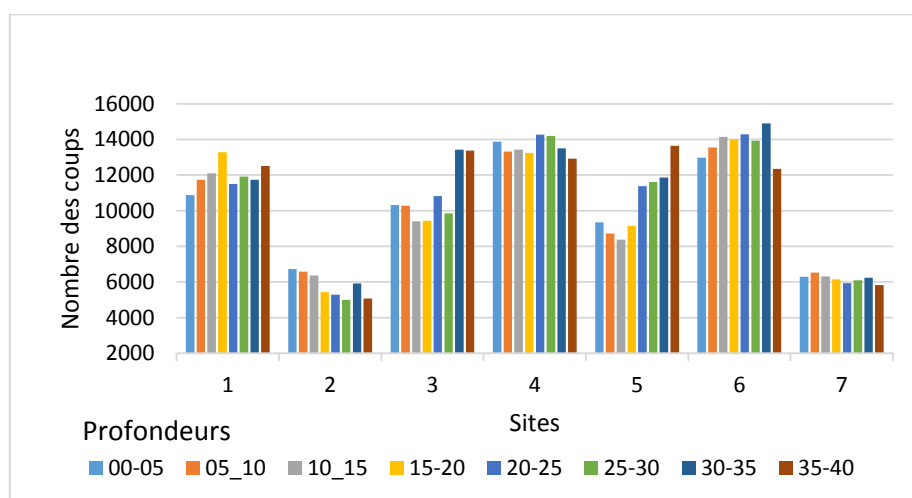


Figure 7 : Nombre total des coups par site et profondeurs par le CZT-500(S)

D'après les figures 7 et 8, on a choisi les échantillons des sites 2 et 6 (possédants le plus petit et le plus grand en nombre total de coups) pour les analyses qualitatives et quantitatives par les deux chaînes de spectrométrie, le CZT-500(s) et le HPGe.

5.2. Efficacités des deux détecteurs utilisés

Après les résultats de mesure et de calcul, les efficacités des deux détecteurs sont montrées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Efficacité des deux détecteurs

Radionucléide	Energie (keV)	Intensité (%)	Efficacité	
			HPGe	CZT-500(s)
Th-234	63,29	04,80	0,0207 ± 0,0002	0,0002769 ± 0,0000580
Pb-214	241,98	07,40	0,0335 ± 0,0003	0,0007009 ± 0,0000438
Pb-214	295,22	19,30	0,0280 ± 0,0002	0,0005335 ± 0,0000206
Pb-214	351,93	37,60	0,0247 ± 0,0002	0,0003945 ± 0,0000105
Bi-214	609,31	46,10	0,0143 ± 0,0001	0,0001092 ± 0,0000051
Bi-214	768,36	04,90	0,0131 ± 0,0002	0,0000541 ± 0,0000242
Bi-214	1120,29	15,10	0,0087 ± 0,0001	0,0000136 ± 0,0000056
Bi-214	1764,49	15,40	0,0069 ± 0,0001	0,0000016 ± 0,0000011

D'après ces résultats, on constate que l'efficacité de HPGe est bien supérieure à celui de CZT-500(s). Ainsi pour le CZT-500(s) le dépouillement de la famille de Th-232 et celle de l'U-238 s'effectue seulement au descendant de leur famille qui correspond à l'efficacité maximale. De ce fait, le Th-232 est mesuré seulement au Pb-212 d'énergie 238.6 keV et d'intensité 43.3% et celle de l'U-238 au Pb-214 d'énergie 351.9 keV d'intensité 37.6%.

5.3. Résultats des analyses des échantillons des sols du site 2 et site 6

Pour les deux chaînes de mesures, on a établi la même bibliothèque pour le dépouillement des résultats. Le CZT-500(s) a été utilisé pour une étude quantitative en coups.kg⁻¹ tandis que le HPGe pour l'analyse quantitative en Bq.kg⁻¹.

5.3.1. Résultat donné par le détecteur CZT-500(s)

Le tableau 2 ci-dessous montre les résultats des analyses effectuées avec le détecteur CZT-500(s)

Tableau 2 : Aire nette par kilogramme des échantillons de sols des sites 2 et 6.

• Site 2

Code	Aire nette (nombre des coups.kg ⁻¹)			
	Famille de l'U-238 Pb-214	Famille de Th-232 Pb-212	K-40	Cs-137
0205	42±15	271±63	10±6	4±4
0210	50±22	222±67	11±6	4±6
0215	32±21	238±64	15±4	8±4
0220	20± 10	204±47	8±4	-
0225	27±18	249±82	6±6	-
0230	44± 15	223±100	6±6	-
0235	20±14	186±61	11±5	-
0240	42± 18	242±64	8±4	-

• Site 6

Code	Aire nette (nombre des coups.kg ⁻¹)			
	Famille de l'U-238 Pb-214	Famille de Th-232 Pb-212	K-40	Cs-137
0605	56±20	328±66	8±6	8±5
0610	71±29	441±75	8±5	5±6
0615	48±25	422±94	14±5	3±6
0620	49±26	562±69	18±10	8±7
0625	54±30	515±95	23±8	8±7
0630	45±23	312±53	8±7	12±8
0635	43±25	538±65	10±7	13±10
0640	70±28	298±56	10±7	-

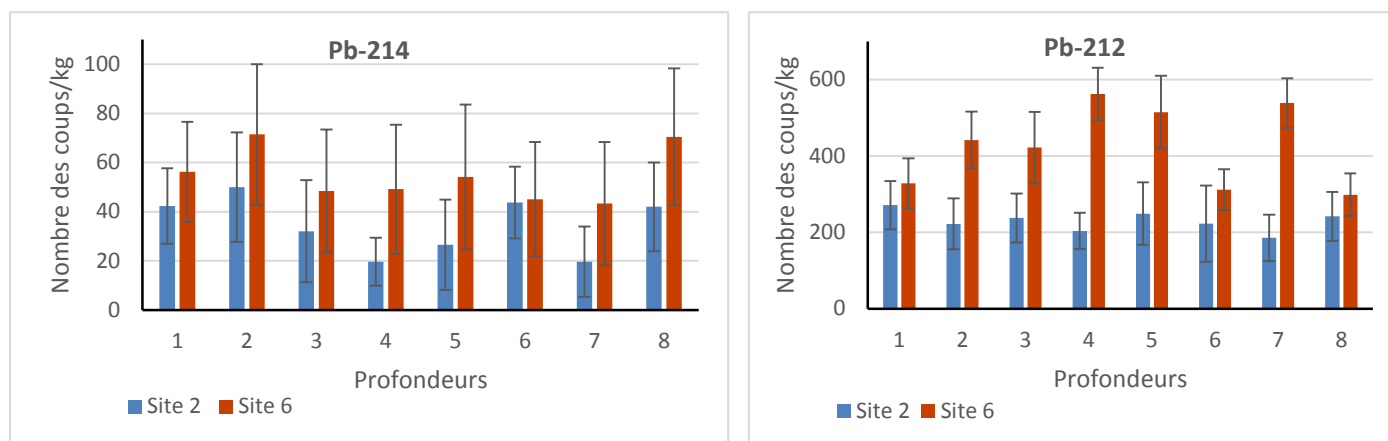


Figure 8 : Les figures montrent la comparaison des aires nettes relatives aux sites 2 et site 6.

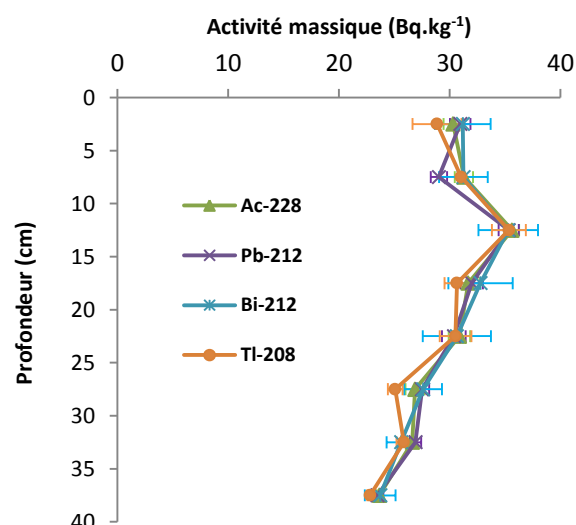
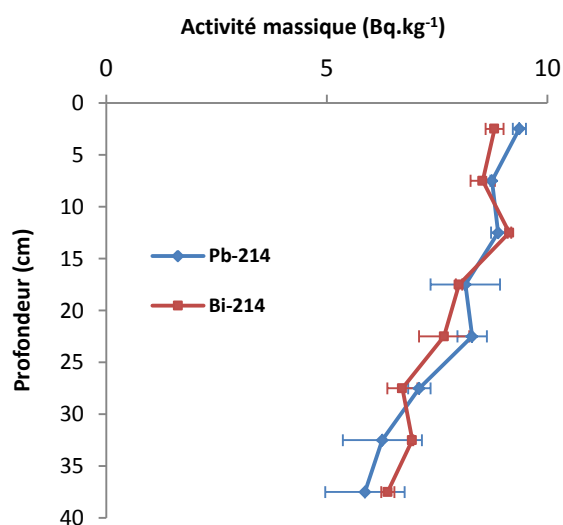
5.3.2. Activité des échantillons du site 2 et du site 6

On a utilisé le détecteur HPGe pour l'analyse quantitative des échantillons de ces deux sites. Les tableaux ci-dessous montrent les résultats des activités spécifiques des radionucléides naturels et artificiels et les figures des distributions de ces activités suivant la profondeur du sol. La durée de mesure est de 18 heures.

❖ Site 2

Tableau 3 : le tableau l'activité des radionucléides des échantillons des sols du site 2.

Code	Activité spécifique (Bq.kg ⁻¹)							
	Famille de l'U-238		Famille du Th-232				K-40	Cs-137
	Pb-214	Bi-214	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208		
0205	9,5 ± 0,1	8,8 ± 0,2	30,3 ± 0,9	31,0 ± 0,9	31,2 ± 2,5	29,7 ± 1,0	35,5 ± 5,1	1,3 ± 0,1
0210	8,7 ± 0,1	8,5 ± 0,3	31,3 ± 0,8	29,0 ± 0,7	31,3 ± 2,2	31,3 ± 0,8	37,6 ± 4,9	0,9 ± 0,1
0215	8,9 ± 0,2	9,1 ± 0,1	35,6 ± 0,7	35,3 ± 0,9	35,3 ± 2,7	35,4 ± 1,5	30,7 ± 5,5	0,5 ± 0,1
0220	8,1 ± 0,8	8,0 ± 0,1	31,7 ± 1,0	32,0 ± 1,0	32,8 ± 2,9	30,7 ± 1,1	27,2 ± 5,4	-
0225	8,3 ± 0,3	7,7 ± 0,6	30,9 ± 1,0	30,4 ± 1,1	30,7 ± 3,1	30,5 ± 1,4	36,0 ± 6,6	-
0230	7,1 ± 0,3	6,7 ± 0,3	26,9 ± 0,9	27,5 ± 0,6	27,6 ± 1,7	25,1 ± 0,7	48,4 ± 4,2	-
0235	6,3 ± 0,9	6,9 ± 0,1	26,6 ± 0,4	26,9 ± 0,5	25,6 ± 1,3	25,9 ± 0,7	37,2 ± 3,1	-
0240	5,9 ± 0,9	6,4 ± 0,1	23,7 ± 0,2	23,5 ± 0,6	23,7 ± 1,4	22,8 ± 0,2	49,2 ± 3,7	-



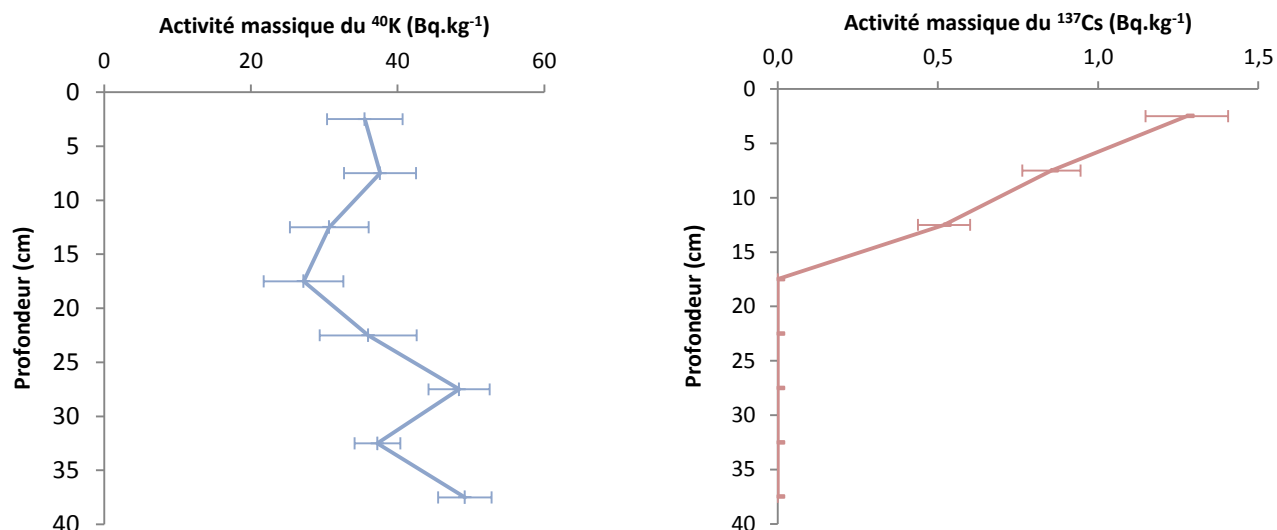
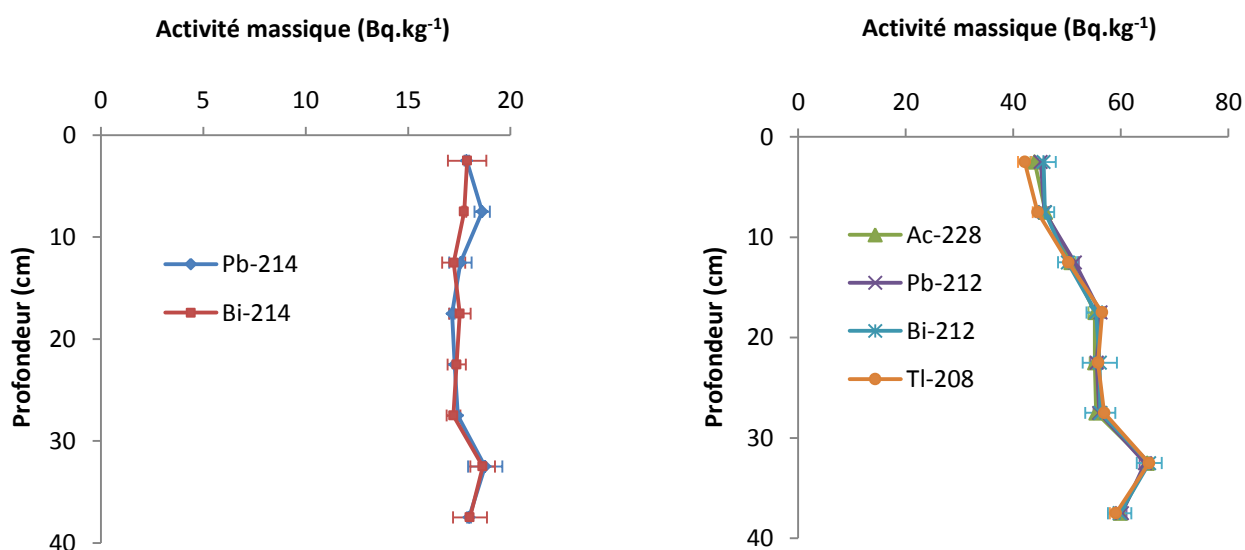


Figure 9 : les figures montrent la distribution des activités spécifiques dans la profondeur du sol du site 2.

❖ Site 6

Tableau 4 : Le tableau montre activité des radionucléides des échantillons du sol du site 6.

Code	Activité spécifique (Bq.kg ⁻¹)							
	Famille de l'U-238		Famille du Th-232				K-40	Cs-137
	Pb-214	Bi-214	Ac-228	Pb-212	Bi-212	Tl-208		
0605	17,9 ± 0,1	17,9 ± 0,9	44,0 ± 0,8	45,1 ± 0,8	45,6 ± 2,3	42,1 ± 1,2	407,8 ± 8,8	0,3 ± 0,1
0610	18,6 ± 0,4	17,7 ± 0,1	46,0 ± 0,5	45,8 ± 0,8	45,9 ± 1,7	44,5 ± 0,9	425,1 ± 7,5	1,2 ± 0,1
0615	17,6 ± 0,6	17,2 ± 0,6	50,7 ± 0,8	51,4 ± 0,8	50,1 ± 1,8	50,2 ± 0,2	400,4 ± 7,2	0,7 ± 0,1
0620	17,1 ± 0,1	17,5 ± 0,5	55,2 ± 1,2	56,2 ± 0,8	55,4 ± 1,7	56,5 ± 0,7	389,4 ± 6,7	0,5 ± 0,1
0625	17,3 ± 0,1	17,4 ± 0,4	55,1 ± 0,9	55,5 ± 1,1	56,1 ± 3,2	55,8 ± 0,3	403,6 ± 10,5	0,5 ± 0,1
0630	17,4 ± 0,1	17,2 ± 0,3	55,4 ± 0,1	56,0 ± 1,0	56,2 ± 2,8	56,9 ± 0,1	393,6 ± 9,4	0,3 ± 0,1
0635	18,8 ± 0,8	18,6 ± 0,6	64,9 ± 0,9	64,5 ± 1,0	65,3 ± 2,3	65,3 ± 0,5	429,8 ± 8,2	0,4 ± 0,1
0640	18,0 ± 0,1	18,0 ± 0,8	59,9 ± 0,8	60,2 ± 0,9	59,8 ± 2,2	59,1 ± 1,1	406,2 ± 7,7	0,3 ± 0,1



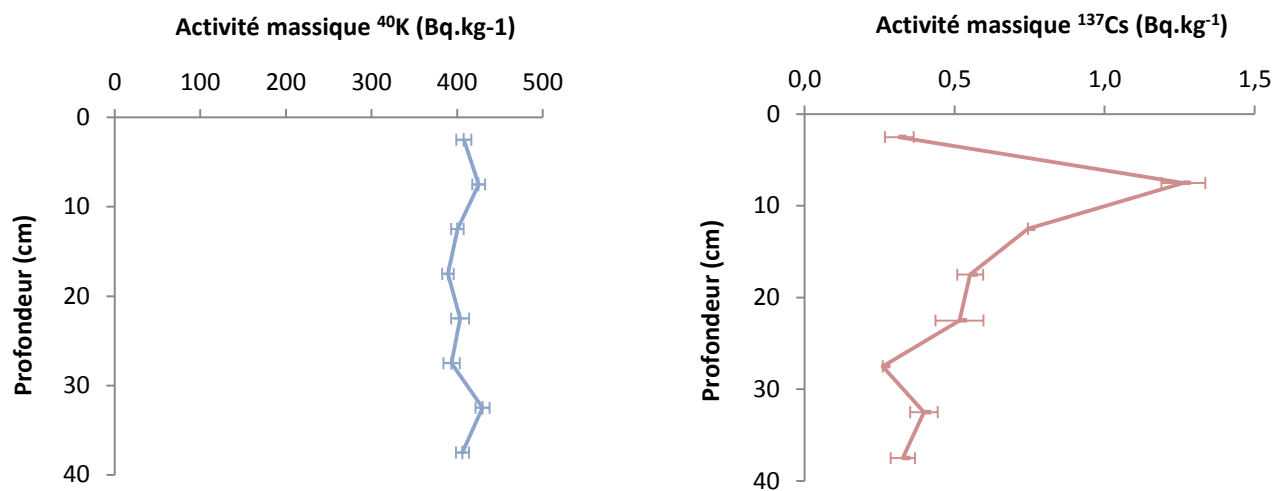


Figure 10 : la figure montre la distribution des activités spécifiques dans la profondeur du sol du site 6.

Ainsi, l'activité massique de la famille de l'U-238 et de Th-232 est présenté dans le tableau 5.

Tableau 5 : le tableau montre l'activité massique de l'U-238 et de Th-232 du site 2 et du site 6.

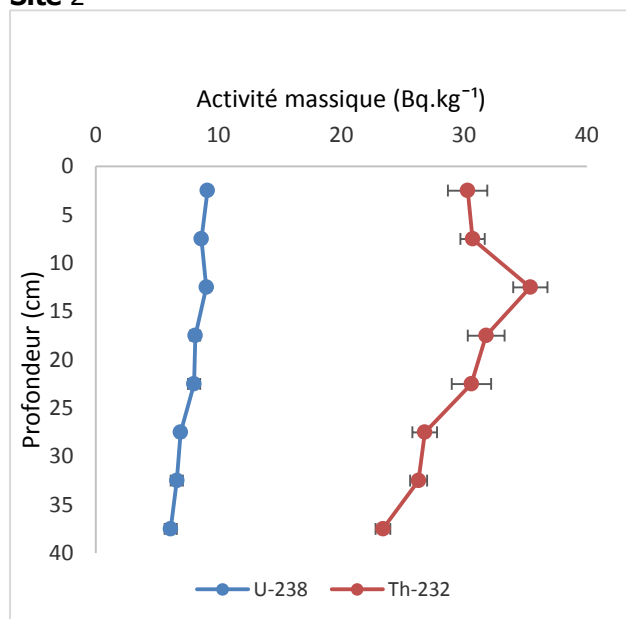
Site 2

Code	Section (cm)	Activité massique (Bq.kg $^{-1}$)	
		U-238	Th-232
0205	0 - 5	9,1±0,2	30,3±1,6
0210	05--10	8,6±0,2	30,7±1,0
0215	10--15	9,0±0,1	35,4±1,4
0220	15 - 20	8,1±0,4	31,8±1,5
0225	20 - 25	8,0±0,5	30,6±1,6
0230	25 - 30	6,9±0,3	26,8±1,0
0235	30 - 35	6,6±0,5	26,3±0,7
0240	35 - 40	6,1±0,5	23,4±0,6

Site 6

Code	Section (cm)	Activité massique (Bq.kg $^{-1}$)	
		U-238	Th-232
0605	0 - 5	17,9±0,5	44,2±1,3
0610	5--10	18,2±0,2	45,6±1,0
0615	10--15	17,4±0,6	50,6±0,9
0620	15 - 20	17,3±0,3	55,8±1,1
0625	20 - 25	17,3±0,2	55,6±1,4
0630	25 - 30	17,3±0,2	56,1±1,0
0635	30 - 35	18,7±0,7	65,0±1,2
0640	35 - 40	18,0±0,5	59,7±1,3

Site 2



Site 6

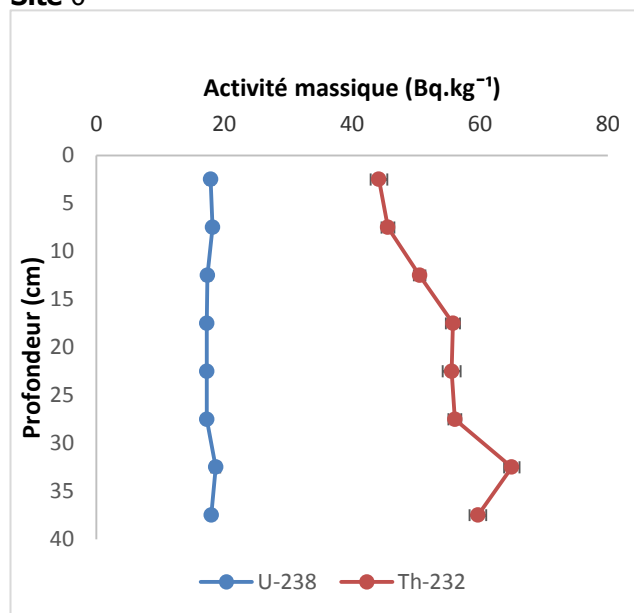


Figure 11 : La figure montre la distribution de l'U-238 et du Th-232 du site 2 et site 6 par le HPGe.

4. DISCUSSION

Nos résultats montrent qu'il y a une corrélation entre les résultats de mesure de coupes totales des échantillons et l'analyse comparative de chaque radionucléide du site 2 et site 6 faites par le CZT-500(s). Ces résultats sont confirmés par le HPGe tels que l'activité des échantillons du site 6 est supérieure à l'activité des échantillons du site 2. En outre, l'activité de la famille de Th-232 est supérieure à l'activité de la famille de l'U-238 sur les deux sites.

Les résultats de mesure de K-40 donnés par le CZT-500(s) indiquent seulement la présence de cet élément, car dans cette région d'énergie où se trouve le K-40, le détecteur n'est pas sensible (efficacité très faible). Alors que, l'activité du sol dans le site 6 est supérieure à l'activité du sol du site 2, cela s'explique de la situation géographique des deux sites. Le site 2 se trouve au sommet d'une montagne d'une altitude de 87 m avec des végétations clairsemées, les couches du sol peuvent se déplacer à cause de l'érosion et du vent. Le site 6 est un terrain en pente légère, en basse altitude (41 m) et qui peut recevoir l'érosion, de plus le lieu de prélèvement est proche d'un cours d'eau en période de pluie.

Pour le site 6 on a trouvé le Cs-137 dans tous les échantillons jusqu'à 40 cm de profondeur, par contre pour le site 2 la trace de Cs-137 s'arrête à 15 cm de profondeur. Ce résultat est peut-être dû à l'érosion et du vent, les couches superficielles du site 2 ont été déplacées, tandis que pour le site 6, la couche superficielle est constituée par du sol provenant d'autres lieux.

Comparé à la valeur moyenne mondiale publiée par la Comité Scientifique des Nations Unies pour les Effets de Radiation Atomique en 2000 (UNSCEAR) [8] : l'activité de la famille U-238 pour les deux sites, varie de $6,1 \pm 0,5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $18,7 \pm 0,7 \text{ Bq.kg}^{-1}$, elle est inférieure à la valeur moyenne mondiale (35 Bq.kg^{-1}). L'activité de la famille de Th-232 varie de $23,4 \pm 0,6 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $65,0 \pm 1,2 \text{ Bq.kg}^{-1}$, pour le site 2 elle est inférieure ou égale à la moyenne mondiale (30 Bq.kg^{-1}) et pour le site 6 elle est supérieure à la moyenne mondiale. Pour le K-40 son activité varie de $27,2 \pm 5,4 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $430 \pm 8 \text{ Bq.kg}^{-1}$, la moyenne mondiale pour le K-40 étant de 400 Bq.kg^{-1} .

5. CONCLUSIONS

Sur le sol :

- L'activité de chaque radionucléide naturel varie d'un site à l'autre, et varie aussi avec la profondeur, et cette variation n'est pas constante. On trouve des traces de césium-137 dans quelques échantillons des sols.
- Le sol de l'extrême nord de Madagascar a une faible activité pour les familles des radionucléides primordiaux par rapport à d'autres villes de Madagascar.
- L'activité de la famille U-238 pour les deux sites, varie de $6,1 \pm 0,5 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $18,7 \pm 0,7 \text{ Bq.kg}^{-1}$, l'activité de la famille de Th-232 varie de $23,4 \pm 0,6 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $65,0 \pm 1,2 \text{ Bq.kg}^{-1}$, pour le K-40, son activité varie de $27,2 \pm 5,4 \text{ Bq.kg}^{-1}$ à $430 \pm 8 \text{ Bq.kg}^{-1}$, et pour le césium-137 l'activité maximale est de $1,3 \pm 0,1 \text{ Bq.kg}^{-1}$.
- Malgré les différents accidents nucléaires qui se sont produits, seules les traces de césium 137 ont été trouvées dans quelques échantillons de sol par les deux détecteurs utilisés.

Pour les deux détecteurs utilisés :

- L'efficacité du détecteur CZT-500(s) est faible par rapport à celle du détecteur HPGe, elle est très faible pour les radionucléides émettant des rayons gamma de hautes énergies et de petites intensités d'émission de rayon gamma, de ce fait le détecteur CZT-500(s) n'est pas sensible pour ces genres des radionucléides.
- Il y a une bonne relation entre les résultats donnés par les deux détecteurs. Les résultats trouvés à l'aide du détecteur CZT-500(s) permettant de comparer les niveaux d'activité des 56 échantillons prélevés et de déterminer les deux sites présentant les niveaux minimal et maximal. Les résultats sont confirmés en termes d'activité spécifique par le détecteur HPGe pour les familles de l'U-238 et le Th-232. Les deux détecteurs sont complémentaires.

6. REFERENCES

- [1]- Tsimok'i Gasikara. REVEILLONS – NOUS, du 12 octobre 2011. Disponible sur : <https://tsimokagasikara.wordpress.com/2014/10/12/chute-du-satellite-us-transit-5-bn-3-au-large-de-madagascar>
- [2] Manuelle d'utilisation du Gamma scout GS II. Disponible sur : <https://www.gamma-scout.com/FR/Leistungsmerkmale.php>
- [3] Randria-Mampianina Hariniaina Léonce « Adaptation du spectromètre au CZT-500(s) à la mesure en laboratoire : validation par le K-40 » Mémoire de Master en Physique, Université d'Antananarivo, 2015
- [4] Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales - Cahier 5, Echantillonnage des sols - Centre d'expertise en analyse environnementale du Québec - Édition : Août 2008, Révisé : 5 février 2010, p16
- [5] Céline DUFFA « Répartition du plutonium et de l'américium dans l'environnement terrestre de la basse vallée du Rhône », Thèse de Doctorat, Discipline : Géosciences de l'Environnement de l'Université Aix Marseille III, 27 mars 2001. Rapport CEA-R-5977. Disponible sur : <http://www.theses.fr/2001AIX30001>
- [6] All met sat : Observations et prévisions météorologiques - Images satellite - Normales climatiques, disponible sur : <https://fr.allmetsat.com/index.html>

[7] Laboratoire National Henri Becquerel - Note technique - Référence note LNHB 2008/05, p5

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



Cite this article: Rollando Radomanana Rakotonarivo, Dieudonné Solofonirina Ravelomanantsoa, Rasolonirina Martin et Franck Justinien Ratovonjanahary. CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA RADIOACTIVITE DU SOL DE L'EXTRÊME NORD DE MADAGASCAR. Am. J. innov. res. appl. sci. 2019; 8(3): 100-112.

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/>