

TABLE DES MATIERES

DEDICACES	i
REMERCIEMENTS.....	ii
LISTE DES ABREVIATIONS	iv
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES TABLEAUX	vi
Introduction.....	1
CHAPITRE I : Généralités	3
1.1. Radioactivité naturelle.....	3
1.1.1. Rayonnement cosmique.....	3
<i>1.1.1.1. Rayonnement primaire</i>	<i>3</i>
<i>1.1.1.2. Rayonnement secondaire.....</i>	<i>3</i>
1.1.2. Rayonnement ambiant terrestre	4
<i>1.1.2.1. Radionucléides cosmogéniques</i>	<i>4</i>
<i>1.1.2.2. Radionucléides primordiaux</i>	<i>5</i>
1.1.3. Chaines de désintégration.....	6
<i>1.1.3.1. Chaîne de désintégration de l'uranium-238.....</i>	<i>6</i>
<i>Source : Cours PGEC, 2012, AIEA.....</i>	<i>6</i>
<i>1.1.3.2. Chaîne de désintégration du thorium-232.....</i>	<i>7</i>
<i>1.1.3.3. Radionucléide de Potassium.....</i>	<i>7</i>
1.2. Les minerais radioactifs	8
1.2.1. Le minerai d'ilménite	8
1.2.2. Le minerai de zircon.....	9
1.3. Désintégration radioactive.....	9
1.3.1. Filiation radioactive	9
1.3.2. Équilibre séculaire	10
1.4. Interactions et effets des rayonnements ionisants.....	11
1.4.1. Interactions rayonnements-matières	11
<i>1.4.1.1. L'ionisation directe</i>	<i>11</i>
<i>a. Interaction des particules alpha.....</i>	<i>11</i>
<i>b. Interaction des particules bêta</i>	<i>11</i>
<i>1.4.1.2. L'ionisation indirecte</i>	<i>12</i>
<i>a. Interaction neutron matière :.....</i>	<i>12</i>
<i>b. Interaction du rayonnement gamma.....</i>	<i>12</i>
1.4.2. Effets biologiques de rayonnements ionisants.....	13

1.4.2.1. Effets déterministes ou pathologiques	13
1.4.2.2. Effets stochastiques ou aléatoires	13
1.5. La spectrométrie gamma	14
1.5.1. Le rayonnement gamma	15
1.5.2. La chaîne de spectrométrie de rayonnement gamma.....	15
1.5.3. Préamplificateur	15
1.5.4. Inspector	15
1.5.5. Logiciels	16
1.6. Le détecteur	16
1.6.1. Détecteur Geiger-Müller	16
CHAPITRE II : Radioprotection	20
2.1. Principes de la radioprotection	20
2.2. Grandeurs et unités en dosimétrie et radioprotection	20
2.2.1. Grandeurs dosimétriques	20
2.2.1.1. Dose absorbée D	21
2.2.1.2. Débit de dose absorbée \dot{D}	21
2.2.2. Grandeurs de protection	21
2.2.2.1. Dose équivalente H_T	21
2.2.2.2. Débit de dose équivalente \dot{H}_T	22
2.2.2.3. Dose efficace E	22
2.2.3. Grandeurs opérationnelles.....	22
2.2.3.1. Surveillance individuelle	22
2.2.3.2. Surveillance de l'environnement	23
2.2.4. Dose effective.....	23
2.3. Incertitude des mesures	23
2.4. Contrôle règlementaire	25
2.4.1. Introduction	25
2.4.2. Réglementation sur la radioprotection à Madagascar.....	25
2.4.3. Textes du droit minier Malagasy	26
CHAPITRE III: Impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement	28
3.1. Toxicité radiologique et chimique de l'uranium et ses descendants	28
3.1.1 Radiotoxicité de l'uranium	28
3.1.1.1. Plantes.....	28
3.1.1.2 Animaux et Homme.....	29

3.1.2. Radiotoxicité des poussières radioactives et du radon	30
3.1.2.1 <i>Poussières radioactives</i>	30
3.1.2.2 <i>Radon-222</i>	31
3.1.3. Radiotoxicité et toxicité chimique des autres éléments	31
3.1.3.1 <i>Le thorium</i>	31
3.1.3.2 <i>Les descendants : radium, polonium et plomb</i>	32
CHAPITRE IV : Radioprotection dans les mines.....	34
4.1. Identification des risques radiologiques:	34
4.1.1 Exposition externe	34
4.1.2. Exposition interne :.....	34
4.1.2.1 <i>Inhalation de la poussière</i>	34
4.1.2.2 <i>Ingestion de la poussière</i>	35
4.1.2.3 <i>Inhalation du radon</i>	35
4.1.3. Contamination de la peau	36
4.1.4. Voies de contaminants radioactifs au public	37
4.1.5. Remarques complémentaires pour les régions éloignées et autochtones :	37
4.1.6. Scénarios d'exposition	38
4.1.7. Critères de protection	38
CHAPITRE V : Localisation, présentation générales et description des villages et des sites.....	39
5.1. Localisation et présentation générales des villages et des sites.....	39
5.2.1. Village d'Anjahambe:.....	40
5.2.2. Village de Vohitrakanga:.....	40
5.2.3. Village d'Analanampotsy :	41
5.2.4. Village de Mahasoia :	41
5.2.5. Village Manakantafana :.....	41
5.2.6. Village de Menatany :.....	41
5.2.7. Ville de Soanierana Ivongo	41
CHAPITRE VI : Les matériels utilisés et méthodes	42
6.1. Matériels utilisés.....	42
6.1.1. Débitmètre Graetz X5 DE	42
6.1.2. Chaîne de spectrométrie gamma NaI(Tl)	42
6.1.3. Radon mètre RTM 2100 SARAD	43
6.1.4. GPS Garmin Map 76CSx	44
6.1. Méthodologies.....	44

6.2.1. Dosimétrie	44
6.2.2. Prélèvement des échantillons environnementaux	45
6.2.3. Protocoles de prélèvement	46
6.2.3.1. Sols	46
6.2.3.2. Eau	46
6.2.3.3. Radon dans l'air	46
6.2.4. Méthodes d'analyse des échantillons environnementaux	47
6.2.4.1. Analyse de la radioactivité	47
6.2.5. Méthode de calcul de doses d'exposition minimales et maximales	47
6.2.5.1. Concept	47
6.2.5.2. Estimation des doses	48
CHAPITRE VII : Résultats	49
7.1. Résultats dosimétriques et cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants	49
7.1.1. Commune rurale d'Ampasimbe	49
7.1.1.1. Village d'Analanampotsy	49
7.1.1.2. Site A d'Analanampotsy	50
7.1.1.3. Site B d'Analanampotsy	52
7.1.1.4. Villages d'Anjahambe	54
7.1.1.5. Site d'Anjahambe	55
7.1.2. Commune rurale d'Ampasina Maningory	58
7.1.2.1. Village Mahasoa	58
7.1.2.2. Vohitrakanga	59
7.1.3. Commune rurale de Soanierana Ivongo	61
7.1.3.1. Village Manankatafana	61
7.1.3.2. Site Manankatafana	62
7.1.3.3. Menatany-Soanierana Ivongo (Suivant le littoral)	64
7.1.3.4. Ville de Soanierana Ivongo	65
7.2. Prélèvement des échantillons (Sol, eau, air)	68
7.2.1. Échantillon de sol	68
7.2.2. Échantillons d'eau	70
7.2.3. Prélèvement d'air	71
7.3. Résultats d'analyse des échantillons environnementaux	72
7.3.1. Radioactivité des échantillons de sol	72
7.3.2. Radioactivité des échantillons d'eau	74
7.3.3. Radon dans l'air	74

CHAPITRE VIII : Interprétation des résultats	75
8.1. Calcul des doses d'exposition estimatives minimales et maximales	75
8.2. Dosimétrie de la dose de rayonnements ambiants.....	76
8.3. Radioactivité des échantillons environnementaux	77
8.3.1. Echantillons de sol (minerais)	77
8.3.2. Echantillons d'eau	78
8.3.3. Prélèvement d'air.....	78
8.3.4. Doses d'exposition minimales et maximales.....	78
CONCLUSION	79
SUGGESTIONS.....	81
Références bibliographiques	I
Annexe 1 : Tableau des doses d'effets déterministes	I
Annexe 2 : Carte des villages	III
Annexe 3 : Photo des sites et entreposages	I
Annexe 4 : Exemple d'utilisation de logiciel Surfer 11	VII
Annexe 5 : Publications scientifiques	IX

DEDICACES

Je dédie cette thèse à mes très chers parents :

M. RANDRIAMORA Albert et

Mme. RAZAFIMALALA Marie Noëline Elisabeth

Aucune dédicace, aucun mot ne pourrait exprimer à leur juste valeur la gratitude et l'amour que je vous porte.

Je mets entre vos mains, le fruit de longues années d'études, de longs mois de distance de votre amour de votre tendresse, de longs jours d'apprentissage.

Votre soutien et votre encouragement m'ont toujours donné de la force pour persévérer et pour prospérer dans la vie.

Chaque ligne de cette thèse chaque mot et chaque lettre vous expriment la reconnaissance, le respect, l'estime et le merci d'être mes parents.

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le fruit d'un travail de recherche qui n'aurait pu aboutir sans les apports d'un ensemble de diverses personnalités, collègues, amis et famille.

Tout d'abord, je remercie le Dieu Tout Puissant de m'avoir donné sa bénédiction pour l'accomplissement de mes études et en particulier ce travail.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et ma gratitude envers Monsieur RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, Professeur Titulaire de classe exceptionnelle, Fondateur, Ancien Directeur Général de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar) et Président Exécutif de la Commission Raelina Andriambololona pour la NANOTECHNOLOGIE (CORANANO) de m'avoir accueilli parmi son équipe de recherche au sein de l'INSTN-Madagascar et qui a bien voulu accepter la fonction d'examineur de cette thèse malgré ses lourdes tâches et ses nombreuses occupations.

J'adresse mes respectueux remerciements à Monsieur RANDRIANARIVONY Edmond, Professeur Titulaire à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, qui a voulu accepter la fonction d'examineur de cette thèse.

Mes vifs remerciements s'adressent à Monsieur RAVELOMANANTSOA Solofonirina Dieudonné, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo qui a accepté de diriger ce travail de thèse. Ce manuscrit n'aurait pu être bien élaboré sans ses aides, sa disponibilité, son esprit de motivation et ses précieux conseils.

Je remercie également mes deux rapporteurs, Monsieur RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et Monsieur RAJAOBELISON Joël, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Directeur Général de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar) qui ont accepté d'évaluer cette thèse.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur RABOANARY Roland, Professeur Titulaire de l'Université d'Antananarivo, de m'avoir fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

Mes remerciements vont également à Monsieur le Responsable du domaine Sciences et Technologies, à Monsieur le Responsable de Mention et aux Responsables de l'Ecole Doctorale Physique et Applications, qui ont accepté mon inscription dans l'Equipe d'Accueil Doctorale Physique Nucléaire et Physique des Hautes Energies.

Je tiens à remercier toute l'équipe de « Fortbildungszentrum für Technik und Umwelt » du Centre de Recherche Karlsruhe (Allemagne), en particulier Monsieur MÖBIUS Siegurd et Madame RAMAMONJISOA Tiana Lalao, pour leurs encadrements, leurs accueils et leurs aides qu'ils m'ont accordés lors de mes stages sur les mesures de Radium et Plomb sur les échantillons environnementaux.

Je remercie également l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), de m'avoir octroyé des bourses d'études et des formations nécessaires au bon déroulement de cette recherche.

Je ne saurais oublier de remercier le « Deutscher Akademischer Austausch Dienst (DAAD) », de m'avoir fourni une bourse d'études et de recherches pour l'accomplissement de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous ceux qui ont participé à l'amélioration du manuscrit, en particulier, Madame RAZAINJAFY Clara.

Je ne pourrai oublier de remercier toute l'équipe du département de Dosimétrie et Radioprotection (DRP) et celui d'Analyses et Techniques Nucléaires (ATN), ainsi que les personnels de l'INSTN-Madagascar, qui ont porté leurs aides à la réalisation de cette thèse.

Ma profonde gratitude s'adresse à mes très chers parents de m'avoir soutenu moralement et financièrement tout au long de mes études et à toute ma famille, particulièrement mon épouse Madame BONIFACE Jeannie Lucia de m'avoir soutenu moralement durant ce travail.

LISTE DES ABREVIATIONS

ADN	:	Acide DésoxyriboNucléique
AIEA	:	Agence Internationale de l'Energie Atomique
ALARA	:	As Low As Reasonably Achievable
ANPSR	:	Autorité Nationale de Protection et de Sûreté Radiologique
ATN	:	Analyses et Techniques Nucléaires
BAPE	:	Bureau d'Audiences Publiques sur l'Environnement
CCSN	:	Commission Canadienne de Sûreté Nucléaire
CEA	:	Commissariat à l'Energie Atomique
CEAEQ	:	Centre d'Expertise en Analyse Environnementale du Québec
CIPR	:	Commission Internationale de Protection Radiologique
CIUMR	:	Commission Internationale des Unités et Mesures Radiologiques
DAAD	:	Deutscher Akademischer Austausch Dienst
DRP	:	Dosimétrie et Radioprotection
EPA	:	Environmental Protection Agency
ESSA	:	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques
FID	:	Fonds d'Intervention pour le Développement
G.M	:	Geiger Müller
GPS	:	Global Positioning System
IAEA	:	International Atomic Energy Agency
INSPQ	:	Institut National de Santé Publique du Québec
INSTN	:	Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires
IRSN	:	Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire
KIT	:	Karlsruhe Institute of Technology
LCD	:	Liquid Crystal Display
LD	:	Limite de détection
NORM	:	Naturally Occurring Radioactive Materials
PGEC	:	Post Graduate Educational Course
UNSCEAR	:	United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

LISTE DES FIGURES

Figure 1: L'uranium-238 et ses descendants.....	6
Figure 2: Le thorium-232 et ses descendants	7
Figure 3: Localisation générale des zones d'étude.....	39
Figure 4: Cheminement terrestre lors du transfert des radionucléides et des doses d'exposition à l'homme.....	47
Figure 5: Carte de niveau de débit de dose ambiante sur le site A d'Analanampotsy (Nord) (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$).....	51
Figure 6: Carte de niveau de débit de dose ambiante (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) sur le site B du village d'Analanampotsy	53
Figure 7: Carte de niveau de débit de dose ambiante sur le site d'Anjahambe en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$	57
Figure 8: Carte de niveau de débit de dose ambiante (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) sur le site de Vohitrakanga60	
Figure 9: Carte de niveau de débit de dose ambiante (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) sur le site de Manankatafana.	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Limites règlementaires pour les travailleurs et le public.....	26
Tableau 2: Caractéristiques de l'appareil Débitmètre Graetz X5 DE	42
Tableau 3: Caractéristiques de l'appareil de la chaîne de spectrométrie gamma NaI(Tl)	43
Tableau 4: Caractéristiques de l'appareil Radon mètre RTM 2100 SARAD	43
Tableau 5: Caractéristiques de l'appareil GPS Garmin	44
Tableau 6: Débits de dose dans le village d'Analanampotsy.....	49
Tableau 7: Débits de dose dans le site A d'Analanampotsy	50
Tableau 8: Débits de dose dans le site A du village d'Analanampotsy	52
Tableau 9: Débits de dose dans le nouveau village d'Anjahambe.....	54
Tableau 10: Débits de dose dans l'ancien village d'Anjahambe.....	55
Tableau 11: Débits de dose dans le site d'Anjahambe.....	55
Tableau 12: Débits de dose dans le village de Mahasoa	58
Tableau 13: Site Vohitrakanga.....	59
Tableau 14: Débits de dose dans le village de Manankatafana.....	61
Tableau 15: Débits de dose dans le site de Manankatafana	62
Tableau 16: Débits de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) suivant le littoral du village de Menatany à la ville de Soanierana Ivongo.....	64
Tableau 17: Débits de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) dans la ville de Soanierana Ivongo	65
Tableau 18: Valeurs limites des doses d'exposition mesurées dans les villages et la ville de Soanierana Ivongo.....	66
Tableau 19: Valeurs limites des doses d'exposition mesurées dans les sites miniers, dans les communes rurales d'Ampasimbe Manantsatrana et de Soanierana Ivongo.....	66
Tableau 20: Valeurs limites des doses d'exposition mesurées sur les aires d'entreposage dans les sites d'exploitation.....	67
Tableau 21: Concentrations et points de prélèvement des échantillons de sol dans la Commune rurale d'Ampasimbe	68

Tableau 22: Concentrations et points de prélèvement des échantillons d'eau, Communes rurales d'Ampasimbe et Soanierana Ivongo	70
Tableau 23: Concentrations et points de mesure de radon de l'air, Communes rurales d'Ampasimbe et Soanierana Ivongo	72
Tableau 24: Valeurs minimales et maximales de la radioactivité spécifique des échantillons de sol.	73
Tableau 25: Valeurs de référence de la radioactivité spécifique dans les sols.....	73
Tableau 26: Radioactivité spécifique dans les échantillons d'eau	74
Tableau 27: Doses d'exposition calculées minimales et maximales (Région Analanjirofo)...	76

Introduction

L'homme est exposé en permanence aux rayonnements ionisants, par exemple à ceux du soleil. La lumière s'accompagne de rayonnements invisibles connus sous le nom de rayonnements ultraviolets et infrarouges. L'homme est également exposé à d'autres rayonnements invisibles de très forte énergie qui proviennent de la planète Terre, les rayonnements telluriques [10].

De tous temps, les populations humaines ont été soumises à des rayonnements d'origine très variée. Indépendamment de l'irradiation directe due aux rayons cosmiques et aux rayonnements de matières radioactives contenues dans les roches, l'homme est soumis à une certaine irradiation interne due aux radioéléments d'origine naturelle contenus dans le sol, l'air et l'eau de boisson et les aliments, et qui peuvent se déposer dans l'organisme après ingestion ou inhalation [15].

La plus grande partie de la radioactivité naturelle de l'organisme est due à des éléments des séries de l'uranium, du thorium et du potassium 40.

Les débits de dose provenant des rayonnements d'origine naturelle varient d'une région à l'autre dans d'assez larges limites. De nombreux facteurs affectent la dose d'irradiation absorbée par l'homme à partir de la radioactivité naturelle. Parmi ces facteurs, citons l'âge, le sexe, les habitudes alimentaires, le site de la résidence, le type d'habitation, etc [15].

Les impacts sont réels, si on n'adopte pas des mesures de sûreté et de protection appropriées.

Le littoral nord de Madagascar est riche en sables lourds minéralisés contenant des minerais radioactifs. Cette étude se focalise surtout dans la région d'Analanjirifo plus précisément dans les Districts de Fénérive Est et de Soanierana Ivongo ayant une exploration et exploitation des sables lourds minéralisés.

Les objectifs de ce travail sont d'évaluer les niveaux de la radioactivité naturelle, de réduire les impacts nocifs dus aux minerais radioactifs et d'assurer la protection radiologique des employés qui travaillent sur les sites et manipulent des substances radioactives, et des habitants vivant à proximité des sites.

Le présent travail comporte deux parties à savoir la partie théorique et la partie pratique (travaux de terrain et de laboratoire effectués). Ces deux parties contenant huit (08) chapitres différents tels que :

La première partie présente quatre (04) chapitres : Le chapitre 1 parle des généralités; le chapitre 2 concerne la radioprotection; le chapitre 3 développe les impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement et enfin le chapitre 4 décortique la Radioprotection dans les mines.

Quant à la deuxième partie, elle se divise en quatre (04) chapitres également : Le chapitre 5 montre la localisation, la présentation générale et la description des villages et des sites, le chapitre 6 présente les matériels utilisés et les méthodes, le chapitre 7 montre les résultats obtenus et enfin le chapitre 8 est réservé à l'interprétation des résultats. La conclusion et quelques suggestions seront données à la fin de ce manuscrit.

CHAPITRE I : Généralités

1.1. Radioactivité naturelle

La radioactivité naturelle ambiante à laquelle l'humanité a été toujours exposée à un certain nombre de composants. Chaque composant varie en fonction de l'espace et du temps. Les deux principaux composants proviennent des sources de rayonnement extraterrestre ou rayonnement cosmique et des radionucléides présents dans l'écorce terrestre et dans l'atmosphère sources du rayonnement tellurique [32].

1.1.1. Rayonnement cosmique

Le terme de rayonnement cosmique se réfère aux rayons cosmiques primaires d'origine extraterrestre et les rayons cosmiques secondaires formés quand des protons provenant des sources extraterrestres interagissent avec l'atmosphère pour produire des particules secondaires ou des rayonnements électromagnétiques.

1.1.1.1. Rayonnement primaire

Isotrope et constant dans le temps, il arrive au sommet de l'atmosphère. Il a son origine en partie à l'intérieur de notre galaxie, en partie à l'extérieur. Son temps de vol moyen est de deux millions d'années. Au-dessous de 10^{12} eV, la composition de ce rayonnement est bien connue : protons 85%, hélions 12,5%, composante lourde ($Z > 2$) 1,5%, négatons 1%. Le rayonnement cosmique matériel est accompagné d'un « bruit de fond » de photons et de neutrinos.

1.1.1.2. Rayonnement secondaire

Les particules primaires interagissent avec les noyaux présents dans les couches supérieures de l'atmosphère et produisent le rayonnement secondaire reçu au niveau du sol. Ce sont surtout les photons qui interagissent pour donner des pions π^\pm et π^0 ; ils interagissent à leur tour et créent des gerbes ou cascades. Les pions chargés créent des gerbes nucléaires constituées par des protons, des neutrons et des muons ; les pions neutres créent des gerbes électromagnétiques constituées par des négatons, des positons, et des photons ainsi que les neutrinos et antineutrinos correspondants.

Au niveau de la mer, il n'existe plus de pions ou d'autres particules à durées de vie relativement courtes. On trouve des muons constituant la composante pénétrante dont l'énergie moyenne est de 2 GeV, quelques protons, des neutrons, des négatons constituant la composante molle et des photons.

1.1.2. Rayonnement ambiant terrestre

Les radionucléides naturels dans l'environnement de la terre peuvent être divisés en deux classes à savoir les radionucléides cosmogéniques et les radionucléides primordiaux [32].

1.1.2.1. Radionucléides cosmogéniques

Ils sont produits quand des nucléons cosmiques de hautes énergies originaires de l'extérieur du système solaire interagissent avec des atomes cibles dans l'atmosphère. La terre et la biosphère les activent pour produire des isotopes radioactifs. La source majeure de leur production est celle faisant intervenir les interactions avec les atmosphères.

Les radionucléides cosmogéniques ont été détectés dans l'Homme, le sol, la glace polaire, la surface des roches, les sédiments, la biosphère, le sol marin et l'atmosphère. Les quatre radionucléides cosmogéniques contribuant à donner des doses à l'être humain sont :

C-14, H-3, Na-22 et Be-7. Les trois premiers sont des isotopes d'éléments majeurs dans le corps.

Il est à noter que de directes activations dans le corps peuvent avoir lieu pour les personnes directement exposées à des rayons cosmiques, par exemple les astronautes et passagers des avions volant à des altitudes supérieures à 10 km.

Des matériaux d'origine extraterrestre tels que les astéroïdes, météorites et comètes contiennent des concentrations significatives de radionucléides cosmogéniques, jusqu'à 17 Bq.g⁻¹, dus à l'activation directe par les rayons cosmiques.

Des années plutôt, particulièrement pendant le début des années 1960, les essais nucléaires dans l'atmosphère ont fait augmenter significativement les nucléides ci-dessus dans la biosphère, jusqu'à 50 fois, et par conséquent dans les tissus humains. En plus les réacteurs nucléaires délivrent également les C-14 et H-3 mais la quantité totale est insignifiante comparée aux quantités générées naturellement et par les tests des armements nucléaires.

1.1.2.2. Radionucléides primordiaux

On peut imaginer que lors de la formation de la Terre et des autres planètes du système solaire, il y a environ $4,5 \cdot 10^9$ ans, la plupart des nucléides étaient radioactifs. Une majorité d'entre eux se sont désintégrés depuis pour donner des noyaux stables, mais certains avaient des périodes de désintégration suffisamment longues pour que nous puissions mesurer encore de nos jours leur radioactivité.

Sur les 325 nucléides naturels environ 50 sont radioactifs : ce sont les radionucléides primordiaux. Une minorité provient de divers éléments de masse moyenne. Ce sont des nucléides dont la période est comparable ou supérieure à l'âge de la Terre et dont la désintégration conduit à un élément stable (Exemple : K-40 de période $1,28 \cdot 10^9$ ans, Rb-87 de période $4,7 \cdot 10^9$ ans, ...etc.). [32]

La grande majorité plus de 40, provient de 3 substances mères : uranium-235 de période $7,04 \cdot 10^8$ ans, uranium-238 de période $4,47 \cdot 10^9$ ans et thorium-232 de période $1,41 \cdot 10^{10}$ ans. Leurs produits de désintégration sont aussi instables et sont, soit émetteurs bêta, soit émetteurs alpha pouvant être suivi ou non d'émissions X et gamma.

Les trois séries de désintégration (uranium-235, uranium-238 et thorium-232) ont plusieurs caractéristiques communes. La tête de chaque série a une longue période, chaque série se termine en isotope stable du plomb, en passant par un isotope du radon, gaz radioactif.

Ces radionucléides primordiaux sont présents à des degrés divers dans tous les milieux : air, eau, sols, matériaux de construction, aliments et, par conséquent, conduisent à une irradiation interne et externe de l'individu.

A cause de leur longue période radioactive, les familles radioactives naturelles et leurs descendants existent encore à l'heure actuelle et elles continuent à émettre des rayonnements dans l'atmosphère. Les radionucléides émetteurs gamma des familles naturelles dans l'environnement sont donnés dans les figures 1 et 2 ci-dessous.

1.1.3. Chaines de désintégration

1.1.3.1. Chaîne de désintégration de l'uranium-238

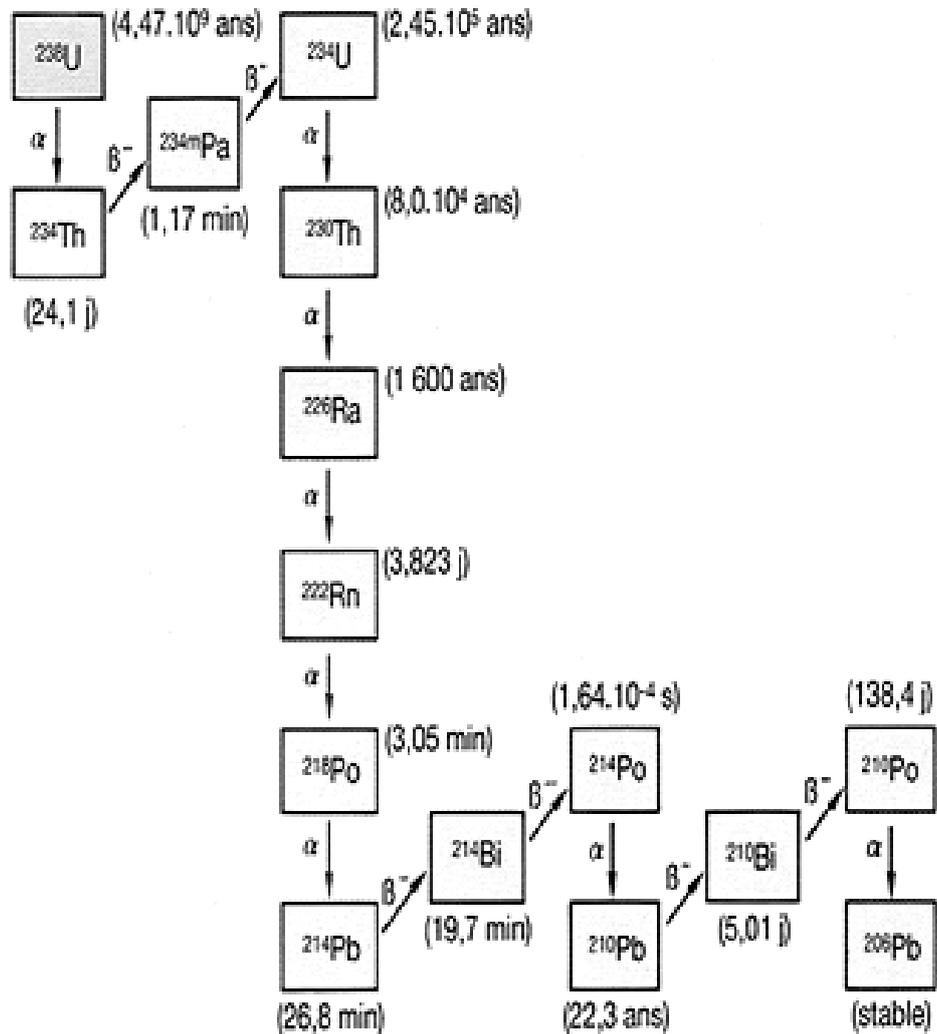


Figure 1: L'uranium-238 et ses descendants

Source : Cours PGEC, 2012, AIEA

1.1.3.2. Chaîne de désintégration du thorium-232

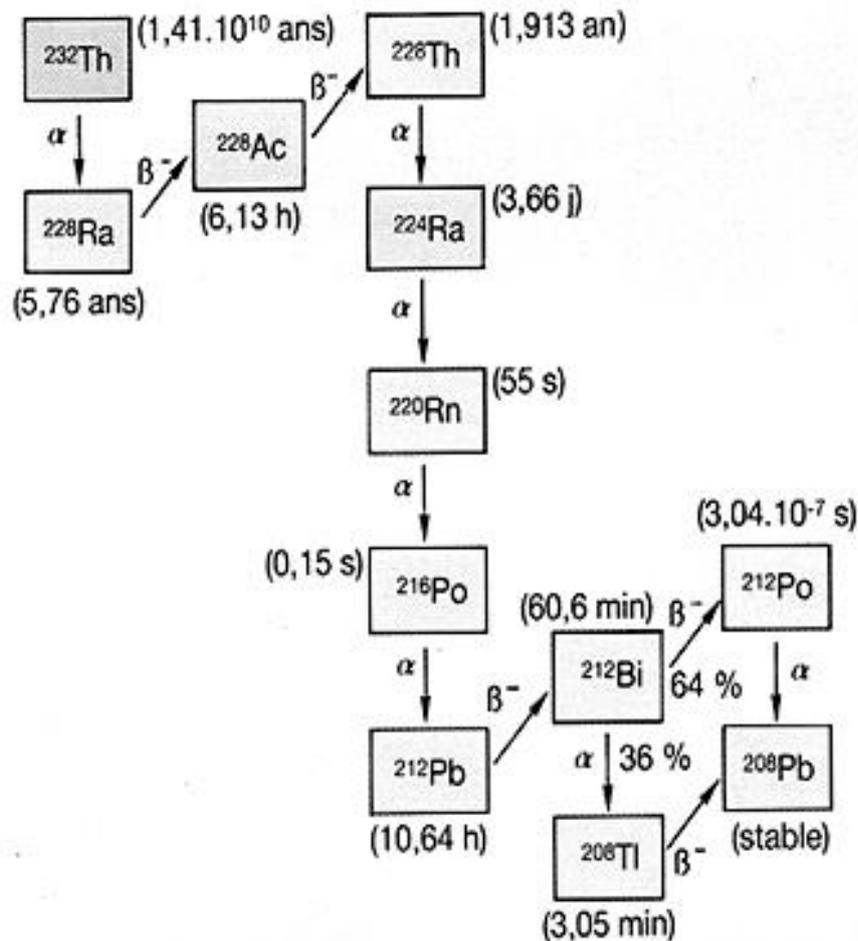


Figure 2: Le thorium-232 et ses descendants

Source : Cours PGEC, 2012, AIEA

1.1.3.3. Radionucléide de Potassium

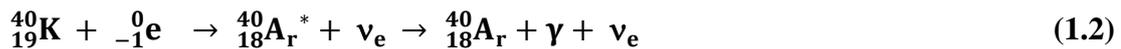
En 1905, J.J. Thompson a découvert la radioactivité du ^{40}K contenue dans le potassium naturel.

Un gramme de ^{40}K présente une radioactivité de 265,2 kBq, sa période radioactive est de 1,248 milliards d'années pendant laquelle on observe les trois modes de désintégration suivants :

- Une désintégration β^- dans 88,8% des cas pour donner de ^{40}Ca avec une énergie de désintégration de 1,311 MeV.



- Une capture électronique dans 11,2% des cas pour donner de ^{40}Ar avec l'énergie de désintégration de 1,505 MeV.



- c. Une désintégration β^+ en proportion négligeable en comparaison des deux (02) réactions précédentes (de l'ordre de 0,001%)



1.2. Les minerais radioactifs

Un minerai (du latin *minera*, mine) est une roche contenant des minéraux utiles en proportion suffisamment intéressante pour justifier l'exploitation, et nécessitant une transformation pour être utilisés par l'industrie. Par extension, le terme « minerai » peut également désigner directement les minéraux exploités.

1.2.1. Le minerai d'ilménite

L'ilménite de formule générale FeOTiO_2 est un important minerai de titane et de moindre mesure en fer.

L'oxyde de fer titane FeTiO_3 est parfois important en magnésium et en manganèse pour obtenir une composition de $(\text{Fe}, \text{Mg}, \text{Mn}) \text{TiO}_3$.

C'est l'oxyde naturel de fer titane que l'on trouve dans certains schistes cristallins. Il appartient à un groupe de minéraux silicatés, sous forme de prisme hexagonal allongé, en baguette ou en aiguilles striées ou cannelées, à section rectangulaire.

La composition des minerais d'ilménite varie de 38% à plus de 60% en TiO_2 . Les concentrations les plus basses se rencontrent principalement dans les dépôts massifs, tandis que l'ilménite plus riche est habituellement trouvée dans les dépôts alluviaux et dans ce cas, en association avec d'autres minerais lourds tels que le rutil, le zircon et la monazite.

Ce minéral peut être facilement confondu avec les minéraux du groupe de la crichtonite mais aussi avec l'hématite. C'est un minéral accessoire commun dans les roches ignées comme le gabbro, diorite et l'anorthosite. Il est aussi des formes dans les veines et les pegmatites.

L'ilménite est opaque, de couleur noire et d'éclat submétallique. Son trait varie entre le noir et le marron. Sa cassure est conchoïdale. Sa Dureté varie de 5,5 à 6 et sa Densité de 4,7 à 4,8.

La couleur du trait permet de la distinguer de l'hématite ; le magnétisme faible la différencie de la magnétite [40].

1.2.2. Le minerai de zircon

Le zircon est le principal minerai de zirconium et de hafnium, il cristallise en système cristallin tétragonal ou quadratique, présente une dureté relative de 6,5 à 7,5 sur l'échelle de Mohs et de densité variée 4,6 à 4,7.

Parfois incolores, le zircon a une couleur naturelle qui varie de doré à rouge et brun, mais ils peuvent aussi être verts, bleus ou noirs. La poussière de zircon est blanche. Le zircon peut être chatoyant, c'est-à-dire montrer un effet « oeil de chat » sur les pierres taillées en cabochons. Il a un éclat vitreux à adamantin ; transparent à translucide et de clivage mauvais (110) ; Cassure conchoïdale.

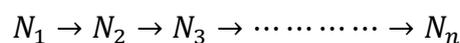
L'oxyde de zirconium (ZrO_2) possède un point de fusion d'environ 1 852 °C (2 125 K) et est employé pour la fabrication de matériaux à haut point de fusion et résistants à l'abrasion, par exemple les amalgames dentaires et les bridges dentaires. Le zirconium trouve lui aussi son utilité, entre autre dans les réacteurs nucléaires. Par leur indice optique élevé (indice optique de 1,95 ; comparé au diamant : 2,4 à la zircone : 2,2 et au quartz : 1,5) les spécimens les plus gros sont taillés en cabochon. Par traitement thermique, la couleur de zircon brun ou trouble peut être modifiée, et passée selon le degré de chauffage à translucide, bleue ou dorée. Les spécimens, qui par leur taille et leur pureté sont considérés comme des pierres précieuses, sont appréciés comme substitut des diamants, avec lesquels on les confond souvent [40].

1.3. Désintégration radioactive

1.3.1. Filiation radioactive

La désintégration d'un noyau conduit à un nouveau noyau. S'il est lui-même radioactif cela conduit à un autre nouveau noyau, et ainsi de suite jusqu'à aboutir à un noyau stable. Ces désintégrations successives caractérisent la filiation radioactive.

Dans une filiation, un radionucléide N_1 se transforme en radionucléide N_2 , N_2 en N_3 et ainsi de suite jusqu'à un élément stable N_n .



Les constantes radioactives sont $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 \dots, \lambda_n$

Chacune de désintégration du noyau père au noyau fils est liée par le système d'équation de Batman suivants :

$$\begin{cases} \frac{dN_1(t)}{dt} = \lambda_1 N_1 \\ \frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \frac{dN_n(t)}{dt} = \lambda_m N_m - \lambda_n N_n \end{cases}$$

En intégrant, on obtient :

$$N_n(t) = N_1(0) (C_1 e^{-\lambda_1 t} + C_2 e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{-\lambda_n t}) \quad (1.4)$$

Avec

$N_1(0)$: Nombre de noyaux initiaux

1, 2, 3, m, n représentant les noyaux père et ses descendants

$C_1, C_2, \dots, C_m, C_n$ sont des constantes telles que

$$C_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_n - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_1}$$

$$C_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_n - \lambda_2} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_2} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_2}$$

⋮

$$C_m = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_m} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_m} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_m} \dots \frac{\lambda_n}{\lambda_n - \lambda_m}$$

$$C_n = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_n} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_n} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_n} \dots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_n}$$

1.3.2. Équilibre séculaire

Il y a équilibre séculaire lorsque la période du noyau père est nettement supérieure à celle du noyau fils. Les activités des noyaux fils se mettent à l'équilibre à un instant bien déterminé de la filiation. Toutes les activités des radionucléides descendants sont quasiment constantes et égales à celle du noyau père. Si l'un des éléments s'échappe de la chaîne de filiation, l'équilibre est rompu [33].

Exemple : l'échappement du gaz radon dans la chaîne de filiation de l'uranium entraîne le déséquilibre.

Si la période du noyau père est grande par rapport à celle des noyaux fils, l'équation ci-dessus devient :

$$N_n(t) = N_1(0) e^{-\lambda_1 t} C$$

$$N_n(t) = N_1 C_1 = N_1 \cdot \frac{\lambda_1}{\lambda_n - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} \cdots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_1}$$

En multipliant membre à membre par λ_n

On a :

$$\lambda_n N_n(t) = \lambda_1 N_1 \cdot \frac{\lambda_n}{\lambda_n - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \frac{\lambda_3}{\lambda_3 - \lambda_1} \cdots \frac{\lambda_m}{\lambda_m - \lambda_1} \text{ or } T_i = \frac{\ln 2}{\lambda_i} \text{ avec } i \text{ varie de } 1 \text{ à } n.$$

On a

$$A_1 = A_1 \cdot \frac{T_1}{T_1 - T_n} \cdot \frac{T_1}{T_1 - T_2} \cdots \frac{T_1}{T_m - T_1}$$

On a l'équilibre séculaire si T_1 est grand par rapport aux périodes de ses descendants,

Donc $A_1 = A_2 = A_3 = \cdots = A_n$ d'où on a la relation

$$N_n = \frac{\lambda_1}{\lambda_n} N_1 \tag{1.5}$$

1.4. Interactions et effets des rayonnements ionisants

1.4.1. Interactions rayonnements-matières

Le passage des rayonnements dans la matière s'accompagne d'ionisation de dépôt local d'énergie. C'est le cas des rayonnements alpha, bêta, gamma et neutroniques.

L'ionisation peut s'effectuer de deux manières :

- ionisation directe pour les rayonnements alpha ou bêta,
- ionisation indirecte pour des photons gamma ou neutrons.

1.4.1.1. L'ionisation directe

a. Interaction des particules alpha

Perte d'énergie essentiellement par interaction électromagnétique avec les électrons atomiques. Importante création de paires électrons-ions : on dit que le rayonnement alpha est fortement ionisant. A cause de sa grande masse, la particule alpha est peu déviée. La trajectoire des alpha dans la matière est rectiligne.

b. Interaction des particules bêta

Perte d'énergie des électrons (et positrons) :

- Par interaction avec les électrons atomiques provoquant l'excitation ou l'ionisation de la matière.

• Par interaction avec les noyaux des atomes du milieu, qui devient la trajectoire des électrons. Lors du changement de trajectoire, un photon de Bremsstrahlung (rayonnement de freinage) est émis (conservation de la quantité de mouvement).

Les particules bêta sont 8000 fois plus légères que les particules alpha et elles sont facilement déviées par le champ électromagnétique des noyaux. Leur trajectoire est en forme de ligne brisée. Les particules bêta sont nettement moins ionisantes que les particules alpha.

1.4.1.2. L'ionisation indirecte

On distingue deux types d'ionisation indirecte.

a. Interaction neutron matière :

Il s'agit des réactions qui mettent en jeu les noyaux atomiques du milieu traversé.

L'absence de charge rend le neutron insensible à l'interaction électromagnétique des atomes. L'énergie est transférée par collision au noyau léger, mobilisé, chargé qui constitue la particule ionisante. Il traverse les matériaux constitués d'atomes lourds comme le plomb et l'acier.

b. Interaction du rayonnement gamma

Du point de vue microscopique, l'interaction des photons de haute énergie est pour l'essentiel une interaction avec les électrons atomiques. En fonction de l'énergie du photon, l'interaction donnera lieu à :

→ Effet Photoélectrique

L'énergie du photon incident est faible ($20 \text{ keV} < E < 100 \text{ keV}$). C'est un processus par lequel le photon incident, d'énergie $h\nu$, cède toute son énergie à un électron des couches profondes qui est alors éjecté de l'atome : il y a absorption totale du photon et ionisation de l'atome. L'énergie de l'électron est égale à l'énergie du photon incident moins l'énergie de liaison de l'électron qui a été éjecté :

$E_{e^-} = h\nu - W_e$. L'atome réorganise ensuite son cortège électronique provoquant l'émission d'un rayonnement X secondaire.

→ Effet Compton

Il a une énergie du photon incident intermédiaire ($100 \text{ keV} < E < 1,02 \text{ MeV}$). Le photon incident cède une partie de son énergie à un électron des couches périphériques de l'atome, qui est éjecté. Il apparaît un nouveau photon diffusé, d'énergie $h\nu' < h\nu$. Il y a

donc diffusion du photon incident et ionisation de l'atome. L'énergie du photon incident est répartie sous la forme d'énergie cinétique apportée à l'électron et d'énergie du photon diffusé : $h\nu = E_{e^-} + h\nu'$ (on néglige ici l'énergie de liaison de l'électron des couches périphériques).

→ *Création de paire e+e-*

L'énergie du photon incident est élevée ($E > 1,02 \text{ MeV}$). C'est un processus par lequel le photon incident disparaît, son énergie se matérialisant pour donner naissance à une paire e+e-. Pour que ce processus ait lieu, le photon doit avoir une énergie supérieure au seuil de création e+e- ($h\nu > 2 \times 0,511 \text{ MeV}$).

1.4.2. Effets biologiques de rayonnements ionisants

On distingue deux effets biologiques de rayonnements ionisants tels que les effets déterministes et les effets stochastiques.

1.4.2.1. Effets déterministes ou pathologiques

Une exposition aux rayonnements à des doses élevées peut avoir des effets tels que nausées, érythème ou, dans les cas graves, syndromes plus aigus qui se manifestent cliniquement chez les individus exposés peu de temps après l'exposition. Ces effets sont appelés «**effets déterministes**», car il est certain qu'ils se produiront si la dose dépasse une valeur seuil (Voir Tableau annexe).

Les effets déterministes résultent de divers processus, principalement la destruction des cellules et le retard dans la division cellulaire provoqués par une exposition à des niveaux élevés de rayonnements. S'ils s'étendent trop, ces processus peuvent compromettre le fonctionnement du tissu exposé. La gravité d'un effet déterministe donné chez un individu exposé augmente avec la dose, au-dessus du seuil d'apparition de cet effet [1].

1.4.2.2. Effets stochastiques ou aléatoires

Une exposition aux rayonnements peut également induire des effets somatiques tels que des affections malignes qui se manifestent après une période de latence et qui peuvent être décelables dans une population par une étude épidémiologique; ils sont supposés être induits sur tout le spectre des doses sans qu'il existe de seuil. En outre, des effets héréditaires dus à une exposition à des rayonnements ionisants ont été mis en évidence dans d'autres populations de mammifères par une méthode statistique, et l'on

suppose qu'ils peuvent se produire aussi chez les populations humaines. Ces effets décelables par une étude épidémiologique (affections malignes et effets héréditaires) sont appelés «**effets stochastiques**» en raison de leur caractère aléatoire [1].

Les effets stochastiques peuvent apparaître lorsque les cellules irradiées ne sont pas détruites, mais modifiées. Les cellules modifiées peuvent, après un long processus, évoluer en cancer. Les mécanismes de réparation et de défense de l'organisme rendent une telle évolution très improbable à faibles doses. Néanmoins, rien ne permet d'établir l'existence d'une dose seuil au-dessous de laquelle un cancer ne pourrait pas se former. La probabilité d'apparition d'un cancer est plus forte à hautes doses, mais la gravité d'un cancer éventuel est indépendante de la dose. Si la cellule endommagée à la suite d'une exposition est une cellule germinale, dont la fonction est de transmettre des informations génétiques à la descendance, il est concevable que des effets héréditaires de différents types apparaissent chez les descendants de la personne exposée. La probabilité des effets stochastiques est supposée proportionnelle à la dose reçue, sans qu'il existe de seuil de dose.

1.5. La spectrométrie gamma

L'idée est que si l'on dispose d'un appareil permettant d'une part de mesurer exactement l'énergie des photons gamma émis et d'autre part d'en comptabiliser le nombre pendant une certaine durée, on peut alors identifier les radioéléments présents et déterminer leur activité. Cet appareil d'analyse n'est autre qu'un spectromètre gamma.

La spectrométrie gamma est une technique non destructive de mesure nucléaire utilisée pour identifier et quantifier des éléments radioactifs par la mesure de l'énergie et du nombre des rayonnements gamma émis par le radionucléide. Le flux de photons gamma émis par le radionucléide interagit en déposant l'intégralité ou une partie de son énergie dans le cristal de détection. Cette mesure réalisée sur une certaine durée permet de construire un spectre. Ce spectre donne le nombre de photons détectés en fonction de leur énergie. L'identification est possible car les noyaux atomiques ont une structure en niveaux d'énergie de sorte qu'ils ne peuvent émettre que des photons d'énergies particulières. Ces niveaux d'énergie ou raies d'émission sont caractéristiques de chaque radio-émetteur gamma. Les raies se matérialisent sous forme de pics dans le spectre.

1.5.1. Le rayonnement gamma

Le rayonnement issu d'un radioélément peut-être de différentes natures : on parle d'émission alpha, bêta, X ou gamma. Le rayonnement gamma, qui suit généralement une émission alpha ou bêta, est issu du noyau de l'atome et correspond à une désexcitation de ce dernier. En effet, après une désintégration alpha ou bêta, le nouveau noyau n'est pas toujours dans un état d'équilibre énergétique : il possède encore "un trop plein d'énergie", on dit qu'il est excité. Pour se débarrasser de cet excédent, il va émettre un ou plusieurs rayonnements gamma d'énergie déterminée et caractéristique du noyau et donc de l'atome en présence, c'est en quelque sorte la signature du radioélément. Le rayonnement gamma est un rayonnement analogue à celui de la lumière, mais beaucoup plus énergétique. On appelle "photon" la particule associée à ce rayonnement.

1.5.2. La chaîne de spectrométrie de rayonnement gamma

La chaîne de spectrométrie de rayonnement gamma permet d'évaluer qualitativement et quantitativement les activités des radionucléides émetteurs gamma. Elle est constituée d'un détecteur, d'un préamplificateur, d'un « Inspector » et d'un logiciel « Génie 2000 ».

1.5.3. Préamplificateur

Le préamplificateur est directement relié au détecteur. Son rôle est de cueillir le signal électrique à la sortie du détecteur, de filtrer le bruit électronique et de délivrer à la sortie un signal sous forme d'impulsion électrique dont l'amplitude est proportionnelle à la charge totale accumulée.

1.5.4. Inspector

L'«Inspector» abrite le générateur de haute tension, l'amplificateur et le convertisseur analogique numérique. Le générateur de haute tension polarise les armatures du détecteur. Lorsque le détecteur est polarisé, il est capable de collecter les charges produites par l'interaction des photons gamma avec le cristal du détecteur. L'amplificateur amplifie le signal électronique à la sortie du préamplificateur afin d'adapter son amplitude à la gamme de tension 0 - 10 volts analysable pour l'analyseur multi-canal. Il transforme le signal sorti pour avoir une forme gaussienne dont l'amplitude est proportionnelle à l'énergie déposée par le photon incident. Le convertisseur analogique numérique permet de convertir les signaux analogiques en valeur numérique binaire traitable par le microprocesseur. Il place

les énergies des photons E sur les canaux de l'analyseur multi-canal selon leurs longueurs d'onde pour obtenir un spectre. Le convertisseur analogique numérique peut être réglé par le gain de conversion qui correspond au nombre de canaux.

1.5.5. Logiciels

Le logiciel sert à commander la chaîne de spectrométrie. Il permet de manipuler les paramètres de la chaîne, de stocker et de traiter le spectre obtenu.

1.6. Le détecteur

On dit que les rayonnements sont imperceptibles, qu'on ne peut pas les toucher, les voir, les sentir. Ce qui est vrai pour l'homme l'est aussi pour l'électronique associée à la chaîne de mesure qui gère les informations. Pour assurer la détection, il faut avoir recours à un organe intermédiaire qui va transformer les rayonnements en une grandeur (en l'occurrence une tension électrique) directement exploitable par l'électronique associée à la chaîne de mesure.

Quand un photon gamma pénètre dans le détecteur :

- soit il se ballade sans laisser la moindre trace de son passage et il n'est pas détecté.
- soit il y a interaction du photon avec les atomes constituant le cristal de germanium et la détection devient possible. Elle repose alors sur les effets engendrés par le rayonnement gamma sur la matière et est optimale pour un effet donné (appelé effet photoélectrique).

1.6.1. Détecteur Geiger-Müller

Un détecteur Geiger-Müller est un détecteur à gaz constitué par un cylindre métallique ayant en son axe un fil conducteur isolé et mince porté à un potentiel positif, supérieur à 400V, par rapport au corps du compteur. Ce fil constitue l'anode et le cylindre, la cathode. Le cylindre est rempli de gaz sous faible pression qui constitue le milieu ionisant sur lequel agissent les rayonnements à détecter. Le gaz utilisé est habituellement l'hélium ou l'argon. Quand un rayonnement entre dans le tube, il ionise le gaz et les ions sont attirés aux électrodes et un courant électrique est produit. Un compteur enregistre ensuite le nombre de pulsations courantes, et on obtient le nombre de coups toutes les fois qu'un rayonnement ionise le gaz.

CHAPITRE II : Radioprotection

La Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) a été créée en 1928 à Stockholm à l'occasion du deuxième Congrès International de Radiologie. Sa mission est d'éditer les premières recommandations en matière de protection contre les effets immédiats des rayonnements ionisants.

2.1. Principes de la radioprotection

Dans la publication 26 en 1977, la CIPR effectue une synthèse de ses publications précédentes tout en actualisant les connaissances. Cette publication définit les trois principes de base de la protection radiologique: la justification des pratiques, l'optimisation de la protection et de la sûreté, et la limitation des doses.

- **La justification des pratiques**

Toute activité entraînant une exposition aux rayonnements ionisants doit être justifiée par une analyse coût/avantage, mettant en évidence que le détriment est suffisamment faible par rapport au bénéfice que l'on retire de cette pratique.

- **L'optimisation de la protection et de la sûreté**

Elle consiste à réduire et à maintenir l'exposition au rayonnement à un niveau de dose aussi bas que raisonnablement possible, compte tenu des impératifs sociaux et économiques. Ce principe est parfois encore appelé principe ALARA (As Low As Reasonably Achievable).

- **La limitation des doses**

Il faut également réduire les expositions individuelles aux limites pour lesquelles le risque est jugé acceptable. L'exposition normale des individus est restreinte de façon que, ni la dose effective totale, ni la dose équivalente totale aux organes ou tissus concernés, ne dépasse toutes limites de doses applicables, sauf dans des circonstances particulières. Des limites de doses sont ainsi choisies pour que les expositions au-delà de ces limites soient considérées comme inacceptables dans des circonstances normales.

2.2. Grandeurs et unités en dosimétrie et radioprotection

2.2.1. Grandeurs dosimétriques

Les grandeurs dosimétriques servent à caractériser l'effet physique des rayonnements sur la matière en termes d'énergie transférée.

2.2.1.1. Dose absorbée D

La dose absorbée est une grandeur purement physique qui exprime la quantité d'énergie transmise au milieu par le rayonnement, par unité de masse de matière.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (4.1)$$

Où D est la dose absorbée, E l'énergie en joule (J) du rayonnement et m la masse en kilogramme (kg) de la matière irradiée.

L'unité de la dose absorbée dans le système international est le joule par kilogramme (J.kg^{-1}), et son nom est le gray (Gy).

2.2.1.2. Débit de dose absorbée \dot{D}

Le débit de dose absorbée \dot{D} est la dérivée par rapport au temps de la dose absorbée.

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (4.2)$$

Son unité est le $\text{J.kg}^{-1}.\text{s}^{-1}$ ou Gy.s^{-1}

2.2.2. Grandeurs de protection

Les grandeurs de protection sont destinées à quantifier le risque encouru par un individu lorsqu'il est soumis à une exposition interne ou externe.

2.2.2.1. Dose équivalente H_T

La probabilité d'apparition d'effets dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement incident. C'est pourquoi, on a défini un facteur de pondération w_R pour les rayonnements.

La dose équivalente, notée $H_{T,R}$, est obtenue en multipliant la dose absorbée dans un organe ou un tissu par le facteur de pondération w_R du rayonnement incident.

$$H_{T,R} = w_R \times D_{T,R} \quad (4.3)$$

où $D_{T,R}$ est la dose moyenne absorbée au tissu ou à l'organe, T , due au rayonnement R , et w_R est le facteur de pondération dépendant du rayonnement incident, R .

Lorsque le champ se compose de différents types de rayonnements ayant différentes valeurs de w_R , la dose équivalente est donnée par la formule :

$$H_{T,R} = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (4.4)$$

L'unité de dose équivalente est le joule par kilogramme (J.kg^{-1}), ou le sievert (Sv).

2.2.2.2. Débit de dose équivalente \dot{H}_T

Le débit de dose équivalent \dot{H}_T est défini comme étant le rapport entre l'équivalent de dose et le temps d'irradiation.

En d'autre terme, c'est la dérivée par rapport au temps de la dose équivalente H_T .

$$\dot{H}_T = \frac{dH_T}{dt} \quad (4.5)$$

Son unité est le Sv.h⁻¹

2.2.2.3. Dose efficace E

C'est une grandeur notée par E , définie comme étant la somme des produits des doses équivalentes aux tissus par leurs facteurs de pondération tissulaires respectifs :

$$E = \sum_R w_T H_T \quad (4.6)$$

où H_T est la dose équivalente au tissu T et w_T le facteur de pondération tissulaire pour le tissu T . D'après la définition de la dose équivalente, il s'ensuit que :

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R D_{T,R} \quad (4.7)$$

où w_R est le facteur de pondération radiologique pour le rayonnement R , et $D_{T,R}$ la dose absorbée moyenne dans l'organe ou le tissu T .

2.2.3. Grandeurs opérationnelles

Les grandeurs opérationnelles définies par la CIUMR ont été introduites dans le but de fournir une grandeur mesurable soit un bon estimateur de la dose efficace. Toutes les grandeurs opérationnelles actuelles ont pour unité le sievert (Sv).

2.2.3.1. Surveillance individuelle

L'équivalent de dose individuel, $H_p(d)$, est l'équivalent de dose au tissu mou au-dessous d'un point spécifié de la surface du corps à une profondeur appropriée d .

2.2.3.1.1. Dose équivalente individuelle $H_p(0,07)$

La valeur recommandée de d est 0,07 mm pour les rayonnements peu pénétrants, d'où la notation $H_p(0,07)$. On l'appelle dose à la peau.

2.2.3.1.2. Dose équivalente individuelle $H_p(10)$

Pour les rayonnements très pénétrants, une profondeur de 10 mm est recommandée avec la notation $H_p(10)$. On l'appelle dose en profondeur.

2.2.3.2. Surveillance de l'environnement

2.2.3.2.1. Dose équivalente ambiante $H^*(d)$

C'est l'équivalent de dose qui serait produit par le champ unidirectionnel et expansé correspondant dans la sphère CIUMR à une profondeur d sur le rayon opposé à la direction du champ unidirectionnel. Une profondeur de 10 mm est recommandée pour les rayonnements très pénétrants.

2.2.3.2.2. Dose équivalente directionnelle $H'(d)$

C'est l'équivalent de dose qui serait produit par le champ expansé correspondant dans la sphère CIUMR à une profondeur d , sur un rayon de direction spécifiée Ω . Une profondeur de 0,07 mm est recommandée pour les rayonnements peu pénétrants.

2.2.4. Dose effective

En radioprotection, la dose efficace n'est pas une grandeur physique mais une grandeur de radioprotection mesurant l'impact sur les tissus biologiques d'une exposition à un rayonnement ionisant, notamment à une source de radioactivité. Il se définit comme étant la dose absorbée, à savoir l'énergie reçue par unité de masse, prenant en compte d'une part la dangerosité relative du rayonnement considéré et d'autre part la sensibilité du tissu irradié.

L'unité de dose efficace est le sievert (Sv), en l'honneur du physicien Rolf Sievert.

La moyenne mondiale de la dose effective annuelle est 0,48 mSv, avec des résultats pour différents pays étant généralement dans la marge de (0,3 – 0,6) mSv. Pour des enfants et des enfants en bas âge, les valeurs sont environ 10% et 30% plus hauts, en proportion directe avec une augmentation en valeur du coefficient de conversion de la dose absorbée en air à la dose effective [43, 44].

$$\text{Intérieur (nSv)} = \text{dose absorbée (nGy/h)} \times 8760 \text{ h} \times 0,8 \times 0,7 \text{ SvG/y} \quad (4.8)$$

$$\text{Extérieur (nSv)} = \text{dose absorbée (nGy/h)} \times 8760 \text{ h} \times 0,2 \times 0,7 \text{ SvG/y} \quad (4.9)$$

(L'ancienne unité, le rem, vaut 10 mSv (100 rem = 1 Sv).

2.3. Incertitude des mesures

Des incertitudes sont relevées lors de l'échantillonnage, par l'instrumentation et dues à la statistique de comptage. Ces incertitudes sont indépendantes et s'additionnent

selon la loi des écarts-types [33].

Soit une grandeur u dépendant des variables x_i ($i=1, 2, 3, \dots, n$).

Donc

$$\sigma_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial u}{\partial x_i}\right)^2 \times \sigma_{x_i}^2} \quad (4.10)$$

Avec $\left(\frac{\partial u}{\partial x_i}\right)$ dérivées partielles

σ_u : Incertitude totale

σ_{x_i} : Incertitudes partielles

Si u est une fonction du premier degré en x_i , alors $\forall i$ on a $\left(\frac{\partial u}{\partial x_i}\right)^2 = 1$

Propriétés :

$u = x_i \pm x_j$ on a $\sigma_u = \sqrt{\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{x_j}^2}$

Si $u = x_i \times x_j$ et $u = \frac{x_i}{x_j}$ on a $\left(\frac{\sigma_u}{u}\right) = \sqrt{\left(\frac{\partial x}{x_i}\right)^2 + \left(\frac{\partial x}{x_j}\right)^2}$

Si $u = C \times x_i$ avec C constante on a $\sigma_u = C \times \sigma_{x_i}$

En négligeant les incertitudes de mesure qui sont dues à l'échantillonnage et l'instrumentation, la formule (a) s'écrit :

$$\sigma_u = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sigma_{N_i}^2} \quad (4.11)$$

Où σ_{N_i} est l'erreur due à la statistique de comptage de N_i coups, donnée par la relation

$$\text{suivante : } \sigma_{N_i} = \sqrt{N_i} \quad (4.12)$$

Premier cas

Si l'activité est de la forme $A = k \times N_{net}$, où k est une constante qui varie en fonction de l'activité en question et $N_{net} = N_{ech} - N_{bf}$ valeur net de taux de comptage, alors on a :

$$\sigma_A = k \times \sigma_{net} = k \sqrt{N_{ech} + N_{bf}} \quad (4.13)$$

Deuxième cas :

Si l'activité est de la forme $A = k (N_{net_1} - N_{net_2})$ avec

$$N_{net_1} = N_{ech_1} - N_{bf_1} \text{ et } N_{net_2} = N_{ech_2} - N_{bf_2}$$

$$\text{On a } \sigma_A = k \times (\sigma_{net_1} - \sigma_{net_2}) = k \sqrt{N_{ech_1} + N_{bf_1} + N_{ech_2} + N_{bf_2}} \quad (4.14)$$

2.4. Contrôle règlementaire

2.4.1. Introduction

La radioactivité est un phénomène naturel et des sources naturelles de rayonnements sont présentes dans l'environnement. Les risques radiologiques pour les travailleurs, le public et l'environnement pouvant découler de ces applications doivent être évalués et, le cas échéant, contrôlés. C'est pour cela que la réglementation de la sûreté radiologique est une responsabilité nationale.

La protection radiologique et la sûreté des sources de rayonnements sont en général gérées par des systèmes juridiques adoptés par les corps législatifs nationaux et par une combinaison de réglementations, d'ordonnances et de normes.

2.4.2. Réglementation sur la radioprotection à Madagascar

Après la constatation de l'utilisation dans différents domaines des rayonnements ionisants sur le territoire national, Madagascar a mis en place, en 1993, la première réglementation nationale en matière de protection contre les rayonnements ionisants. Cette réglementation a été révisée et le 02 janvier 1998, le pays a promulgué la loi N°97-041 relative à la protection contre les dangers des rayonnements ionisants et à la gestion des déchets radioactifs à Madagascar et ses quatre décrets d'application [34] :

- décret n° 2002-569 du 04 juillet 2002 fixant les attributions et le fonctionnement des divers organes chargés de la protection contre les dangers des rayonnements ionisants et de la gestion des déchets radioactifs à Madagascar. Ce décret a été abrogé et remplacé par le décret n° 2012-1112 du 04 décembre 2012 portant réorganisation de l'Autorité Nationale de Protection et de Sûreté Radiologique (ANPSR);
- décret n°2002-1161 du 02 octobre 2002 fixant les principes généraux régissant la détention et l'utilisation des sources de rayonnements ionisants destinées à des fins médicales ou odontostomatologies ;
- décret n° 2002-1199 du 07 octobre 2002 fixant les principes généraux de la protection contre les rayonnements ionisants ;

- décret n° 2002-1274 du 16 octobre 2002 fixant les principes généraux de la gestion des déchets radioactifs.

Le principe de limitation indique que l'exposition doit être maintenue strictement en dessous de limites, afin de garantir que la personne exposée ne présentera pas d'effets déterministes et que le risque dû aux effets stochastiques sera maintenu à un niveau acceptable. La loi et ses décrets d'application sont basés sur la publication n° 60 de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) en 1991 et les Normes Fondamentales Internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements ionisants de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA) en 1997 [34].

Dans le but d'atteindre le principe d'optimisation de la protection et de la sûreté, les normes internationales en vigueur établissent que les doses doivent être limitées:

Tableau 1: Limites règlementaires pour les travailleurs et le public

Situations d'exposition planifiée	exposition professionnelle	20 mSv par an en moyenne sur cinq années consécutives (100 mSv en cinq ans) et de 50 mSv en une seule année
Situations d'exposition existante	exposition du public	Une dose efficace de 1 mSv par an.
Situations d'exposition existante	exposition du public	Une dose efficace de 1 à 20 mSv par an

Source : AIEA Normes de sûreté No. GSR Part III

2.4.3. Textes du droit minier Malagasy

Loi n°2005-021 du 17 octobre 2005 portant modification de certaines dispositions de la Loi n°99-022 du 19 août 1999 portant Code minier.

Il en est ainsi en ce qui concerne l'activité minière se rapportant aux substances et minerais radioactifs. **L'article 8** du Code Minier est modifié pour mieux en expliquer la signification, en précisant que les droits pour faire la recherche ou l'exploitation desdites substances s'obtiennent par la voie d'un permis minier comme pour toutes les autres substances minières ; seulement, le permis minier doit être un permis standard, et il est octroyé sous réserve d'une convention particulière avec l'Etat pour assurer la radioprotection, la bonne gestion des déchets et la sécurité. Il est en plus clarifié que la convention particulière incorpore les instructions de l'Autorité Nationale de Protection et de Sûreté Radiologique (« ANPSR ») comme cahier des charges. Enfin, la procédure

pour l'obtention de l'avis de l'ANPSR est prévue de façon à ne pas décourager l'initiative privée pour découvrir et développer les substances radioactives [39].

CHAPITRE III: Impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement

3.1. Toxicité radiologique et chimique de l'uranium et ses descendants

Il existe plusieurs mécanismes de transfert entre les radionucléides et les organismes vivants. Chez les humains, les deux principales voies de transfert sont la voie digestive (par ingestion) et la voie respiratoire (par inhalation de gaz ou d'aérosols). La voie cutanée (par blessure ou par dépôt) constitue également une voie de transfert, mais mineure en comparaison des deux premières [42].

Tant chez les végétaux que chez les animaux et les humains, la toxicité chimique des radioéléments est observée seulement à la suite de l'absorption du contaminant par l'organisme. Dans le cas de la radiotoxicité, par contre, des effets peuvent être observés lors d'une irradiation interne ou externe. Une dose interne est reçue lorsque le rayonnement est émis à la suite de l'incorporation du radionucléide dans les tissus de l'organisme par une des nombreuses voies connues (par exemple, par voie racinaire chez la plante ou par inhalation chez l'humain). Une dose externe est reçue par l'organisme lorsque le rayonnement provient de l'environnement extérieur.

3.1.1 Radiotoxicité de l'uranium

L'uranium naturel est faiblement radioactif : il n'émet qu'une faible quantité de rayonnements alpha, puisque les périodes radioactives de ses isotopes sont très longues. Pour l'uranium naturel, 97,8 % de la radioactivité est attribuable à ^{234}U et ^{238}U ainsi que 2,2 % est attribuable à ^{235}U .

L'activité massique de l'uranium est d'environ 25 000 Bq par gramme. Cela signifie qu'un atome d'uranium sur 1×10^{17} se désintègre par seconde.

L'uranium est néanmoins caractérisé comme étant cancérigène chez l'humain par l'agence de protection de l'environnement des États-Unis (EPA), en raison du pouvoir cancérigène établi des radiations alpha [18].

3.1.1.1. Plantes

Plusieurs études de toxicité ont été réalisées sur des plantes consommées par les humains. Chez les plantes, la toxicité chimique de l'uranium dépend largement des

Impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement

caractéristiques du sol. La teneur en carbonates, qui mène à la formation de composés carbonates solubles assimilables par les végétaux, ainsi que la présence de cations divalents comme Ca^{2+} et Mg^{2+} , qui entrent en compétition avec l'ion uranyle UO_2^{2+} pour les sites d'absorption, auront un impact sur la quantité d'uranium assimilé et donc sur son degré de toxicité. Ce degré varie aussi d'une espèce à l'autre et selon l'âge de la plante au moment de l'exposition [8].

Les mécanismes de toxicité chez les végétaux impliquent généralement une inhibition du système enzymatique et des interactions avec les acides nucléiques. On observe souvent une diminution de la biomasse de la plante, ainsi que des altérations influant sur la croissance, le développement et la survie.

3.1.1.2 Animaux et Homme

Chez les animaux et les humains, la toxicité chimique de l'uranium varie en fonction de la voie d'exposition interne, soit l'inhalation ou l'ingestion. Elle varie également en fonction de la solubilité et de la forme chimique des composés d'uranium absorbés. En cas d'inhalation, les composés solubles sont plus toxiques chimiquement puisque, à la suite de leur dissolution dans les sécrétions pulmonaires, ils atteignent le reste de l'organisme par la circulation sanguine puis suivent le même parcours biologique que ceux introduits dans l'organisme par l'absorption gastro-intestinale [7]. Certains chercheurs estiment que seule la forme soluble de l'uranium (UO_2^{2+}) cause une toxicité chimique après ingestion orale [42].

Chez les humains, la voie digestive est la voie la plus fréquente d'absorption de radionucléides, compte tenu de la présence d'uranium, même à l'état de trace, dans l'alimentation et l'eau potable. En cas d'ingestion, l'absorption gastro-intestinale de l'uranium est faible, généralement inférieure à 5 % [18]. De cette quantité absorbée, 75 % se retrouvera dans le sang et dans les tissus mous, c'est-à-dire les reins, le foie et les poumons. Le rein représente l'organe cible de l'uranium bio accessible, dont la toxicité chimique se traduit par des problèmes d'insuffisance rénale [18]. Environ 15 % de l'uranium bioaccessible se retrouvera dans le squelette, où il se comporte comme un des constituants des os, le calcium.

Les systèmes excréteurs jouent un rôle critique dans l'élimination de l'uranium. Par exemple, lors d'une étude réalisée chez des humains, environ 66 % de l'uranium

Impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement

absorbé se trouvait excrété par l'urine après 24 heures, alors qu'un autre 10 % de la quantité absorbée l'était à l'intérieur des trois ou quatre jours suivants [18].

Plusieurs études réalisées sur des animaux en laboratoire ont montré que l'uranium est particulièrement toxique pour les reins et peut causer, comme chez l'humain, un dysfonctionnement rénal [6]. Des effets sur la reproduction et le développement ont également été montrés chez des souris gestantes en laboratoire : une diminution du poids et de la longueur du fœtus, une augmentation de la mortalité à la naissance, et une diminution de la croissance et du développement des jeunes ont été observées à la suite de l'ingestion quotidienne de concentrations d'au moins 2,8 mg/kg d'uranium [18].

Étant donné le bruit de fond naturel lié à la présence d'uranium dans l'environnement, la toxicité, à des niveaux environnementaux, est rarement établie selon des concentrations ou des activités fixes. Par conséquent, on se sert souvent d'outils d'évaluation du risque radiologique. Les publications sur les concentrations de radionucléides dans les denrées sont rares. Le Comité scientifique des Nations Unies a réalisé une compilation [44, 45, 46];

3.1.2. Radiotoxicité des poussières radioactives et du radon

Pour les travailleurs dans les sites contenant des minerais radioactifs, l'inhalation est la voie la plus fréquente d'absorption de radionucléides [42]. Lors de travaux d'extraction de minerais radioactifs, des radionucléides peuvent être présents dans les rejets atmosphériques sous la forme de particules en suspension ou de poussières, et ils peuvent également être introduits dans l'organisme lors de l'inhalation du radon.

3.1.2.1 Poussières radioactives

L'inhalation de poussières mène au dépôt de particules dans les poumons. Sur un site minier, ces poussières peuvent contenir des descendants de l'uranium naturel, dont le thorium-230, le radium-226 et le polonium-210.

Les particules inhalées sont de différentes grosseurs, et leur élimination se fait selon leur taille et leur solubilité. Les particules solubles vont se dissoudre dans les sécrétions pulmonaires, puis atteindre le reste de l'organisme par la circulation sanguine avant d'être évacuées en grande partie par les reins. Les particules non solubles sont par contre davantage retenues à l'intérieur des poumons : elles peuvent y rester pendant de longues périodes et transmettre des doses de rayonnement plus importantes que celles produites par les particules solubles ingérées puis éliminées en grande partie [7].

Impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement

3.1.2.2. Radon-222

Le radon est un gaz et représente la source la plus importante d'exposition naturelle aux rayonnements des êtres humains. Il se désintègre rapidement (son temps de demi-vie est de 3,8 jours), et il s'agit d'un gaz inerte, c'est-à-dire dépourvu de réactivité chimique. Cela fait en sorte qu'il migre facilement du roc fissuré des sols jusque dans l'atmosphère, où il s'échappe de particules de poussière en suspension dans l'air [3]. Le radon s'échappe toutefois difficilement d'un roc solide non fissuré, où il restera confiné.

Lorsqu'il est inhalé, le radon qui n'a pas subi de désintégrations lors de son passage dans les poumons est complètement rejeté lors de l'exhalation. Par contre, les atomes de radon qui se sont désintégrés par émission alpha lors de leur séjour dans les poumons se sont transformés en éléments solides qui peuvent se déposer dans les voies respiratoires, d'où ils vont émettre à leur tour des rayonnements ionisants. Il s'agit des descendants du radon-222, soit le polonium-218, le plomb-214, le bismuth-214, le polonium-214 et le plomb-210, ce dernier étant le plus stable (temps de demi-vie = 22,2 années).

Le rayonnement alpha émis par les poussières radioactives ainsi que par le radon et ses descendants peut causer des lésions à l'intérieur de certains tissus des poumons, et plusieurs études ont montré qu'une exposition prolongée à de fortes teneurs en radon provoque le cancer du poumon.

3.1.3. Radiotoxicité et toxicité chimique des autres éléments

3.1.3.1. Le thorium

Le thorium présente une toxicité chimique similaire à celle de l'uranium, alors que sa radiotoxicité, due au fait qu'il provoque une série de désintégrations (Th-232), lui serait supérieure en raison des temps de demi-vie relativement plus courts de ses descendants émetteurs alpha et bêta. Il est à noter que la prépondérance relative accordée à un mode de toxicité en particulier (à la radiotoxicité par rapport à la toxicité chimique) n'est pas encore clairement établie.

Tout comme pour l'uranium, des études montrent que le thorium peut être absorbé par la plupart des végétaux et autres organismes terrestres et aquatiques. Cependant, des facteurs de bioconcentration semblent indiquer qu'en général le thorium ne se bioconcentre pas à l'intérieur des organismes [8].

Impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement

Bien que les mécanismes d'absorption soient encore mal connus, des études effectuées en laboratoire ont montré que des expositions élevées au thorium peuvent mener à un ralentissement de la croissance chez les végétaux et une augmentation de la mortalité chez certains amphibiens et mammifères. Le thorium en tant que métal lourd et en tant qu'émetteur alpha induirait, tout comme l'uranium, des dommages à l'ADN des cellules vivantes.

3.1.3.2 Les descendants : radium, polonium et plomb

Le radium-226 est l'isotope le plus fréquemment observé dans l'environnement, et son temps de demi-vie est de 1600 ans (comparativement à 5,7 années, 3,6 jours et 11,7 jours pour les autres isotopes naturels du radium, ^{228}Ra , ^{224}Ra et ^{223}Ra respectivement).

Lorsqu'il est ingéré par les animaux ou les humains, le radium adopte un comportement métabolique similaire à celui du calcium. Par conséquent, le site principal de dépôt et de rétention du radium dans l'organisme est la structure osseuse. En cas d'exposition importante au radium, les lésions induites par son rayonnement ionisant sont associées essentiellement à des cancers de type osseux [42].

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'activité massique du polonium-210 (présent à l'état de trace dans l'environnement mais le plus abondant des 29 isotopes du polonium) est très élevée ($1,66 \times 10^{14}$ Bq par gramme de ^{210}Po). Ainsi, sa radiotoxicité est plus importante que sa toxicité chimique. Puisque cet isotope est formé à la suite de la désintégration du radon-222, il est omniprésent dans l'air, à une activité volumique de l'ordre de 50 mBq/m^3 . Il peut toutefois atteindre des activités massiques particulièrement élevées dans les résidus d'exploitation des mines d'uranium (15 000 à 22 000 Bq/kg comparativement à 10 à 200 Bq/kg dans les sols) [41].

Le polonium-210 est transmis aux végétaux terrestres par transfert foliaire sans pour autant être absorbé, puisqu'il reste principalement concentré à la surface des feuilles. Le transfert chez les animaux et les humains s'effectue par ingestion ou inhalation. Le polonium-210 peut s'accumuler et se bioconcentrer à l'intérieur de certains organismes marins, où des activités beaucoup plus importantes que dans le milieu ambiant peuvent être observées (par exemple dans la glande digestive de mollusques, le foie de certains poissons ou le plancton) [42].

Chez l'homme, de 10 à 50 % du polonium ingéré sera absorbé (dépendant de sa forme chimique) pour à la fois se lier aux globules rouges du sang et se distribuer entre le foie, la

Impacts des éléments présents dans les minerais radioactifs sur l'Homme et l'environnement

rate, les reins et la moelle osseuse. De cette quantité ingérée, environ la moitié sera éliminée dans l'urine au cours des 50 premiers jours. Les poumons font évidemment partie des organes ciblés par le polonium lorsqu'il est inhalé [42]. Dans la moelle osseuse, le polonium-210 est, entre autres, responsable d'une diminution des globules blancs, provoquant chez une personne fortement intoxiquée une augmentation de sa sensibilité aux infections (c'est-à-dire la perte de ses défenses immunitaires).

Le plomb est un métal lourd. Contrairement aux éléments mentionnés jusqu'à présent, il possède des isotopes stables (c'est-à-dire non radioactifs), soit le plomb-204, 206, 207 et 208 (plusieurs étant des éléments de fin de chaîne de ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th). Parmi les isotopes radioactifs (^{210}Pb , ^{211}Pb , ^{212}Pb , ^{214}Pb), seul le ^{210}Pb possède un temps de demi-vie de plus de quelques heures. Or, puisque les isotopes stables sont présents à des teneurs supérieures de plusieurs ordres de grandeur à leurs analogues radioactifs, leurs effets radiotoxiques sont généralement dissimulés sous leur toxicité chimique, d'autant plus que, dans l'écosystème, les isotopes radioactifs présentent le même comportement chimique que les isotopes stables. Seule une petite fraction du plomb se trouvant dans un écosystème est biodisponible. Cette fraction sera principalement absorbée par les parois cellulaires des racines des plantes et y sera bioaccumulée. La phytotoxicité due au plomb s'observera entre autres par des dommages causés à l'ADN. Ce qui pourra avoir pour effet une diminution ou une inhibition du taux de germination, du développement de la plante et de la production de chlorophylle (Pourrut et coll., 2011).

Les autres isotopes issus des chaînes de désintégration de ^{235}U et de ^{232}Th ont un comportement similaire à celui de leurs équivalents de la chaîne de ^{238}U (par exemple ^{228}Ra et ^{226}Ra), mais présentent des degrés de radioactivité variables.

CHAPITRE IV : Radioprotection dans les mines

4.1. Identification des risques radiologiques:

Les risques radiologiques associés à l'extraction et à l'exploitation des minerais radioactifs sont liés beaucoup plus aux familles radioactives de l' ^{238}U , du ^{232}Th et du ^{40}K . Les travailleurs et le public sont exposés à la fois à l'exposition externe et à l'exposition interne dues aux rayonnements issus de l'ensemble des radionucléides telluriques dans les familles radioactives [20].

4.1.1 Exposition externe

Le risque d'exposition externe correspond aux cas où les sources radioactives agissent sur l'organisme uniquement par les rayonnements qu'elles émettent sans transfert de substances radioactives à l'intérieur de cet organisme. L'exposition externe est due principalement aux rayonnements gamma et bêta durs (de fortes énergies) émis par les radionucléides présents dans les lieux où il y a des minerais radioactifs. L'exposition aux rayonnements bêta peut exister à très faible distance de la source en absence d'écran de protection ou si la peau est couverte de produits radioactifs (minerai ou concentré) ou à des grandes distances dans le cas des rayonnements bêta à fortes énergies.

Quant aux rayonnements gamma, l'exposition est prépondérante, elle est due essentiellement aux descendants à vies courtes du radon (^{214}Bi et ^{214}Pb) et aux descendants de l' ^{238}U - (^{234}Th et $^{234\text{m}}\text{Pa}$).

4.1.2. Exposition interne :

Le risque d'exposition interne correspond au cas où l'organisme humain est soumis aux rayonnements émis par des radionucléides incorporés. L'inhalation et l'ingestion de la poussière sont les principales voies de cette exposition [20].

4.1.2.1. Inhalation de la poussière

L'exposition interne par inhalation peut avoir lieu suite à l'incorporation des poussières remises en suspension dans l'atmosphère des lieux de travail : les poussières (contaminées) pénètrent dans les poumons à l'inspiration. Une fraction de celles-ci est rejetée à l'expiration ; une autre peut, selon l'état physico-chimique des radionucléides, soit traverser la muqueuse alvéolaire et se trouver dans le sang, soit adhérer au tissu pulmonaire avant d'être éliminée ; une autre fraction se dépose dans les voies respiratoires supérieures (nez, gorge...) puis est entraînée dans le tube digestif.

La détermination des doses délivrées à l'organisme par les radionucléides inhalés fait intervenir :

- la concentration dans l'air des aérosols radioactifs ;
- le débit respiratoire et la durée d'exposition du travailleur ;
- les éliminations biologiques et la décroissance radioactive des

radionucléides incorporés ;

- le port de moyens de protection des voies respiratoires (masques anti-poussière...).

Les aérosols, qui résultent de la dispersion dans l'air des radionucléides, présentent un risque particulièrement important par leur facilité d'inhalation. Ces aérosols, la plupart du temps très instables, sont captés rapidement par dépôt sur toutes matières se trouvant à leur portée.

4.1.2.2. Ingestion de la poussière

La contamination par voie digestive peut se produire suite à :

- l'ingestion de la poussière après contamination des mains ou d'objets portés à la bouche ;

- l'épuration mécanique, des substances inhalées, par le mécanisme de transport effectué par les cellules de surface et les macrophages vers les voies digestives.

L'impact des radionucléides ingérés dépend :

- des propriétés physico-chimiques de ces derniers ;
- de la fraction retenue par le corps de l'individu lorsqu'il inhale ou ingère un radionucléide ;
- du cheminement de ce radionucléide (du site du dépôt vers le sang puis du sang vers les organes cibles) ;
- du taux d'élimination biologique de ce radionucléide par l'organe cible ;
- de la décroissance radioactive du radionucléide inhalé ou ingéré.

4.1.2.3. Inhalation du radon

Le radon est un gaz radioactif d'origine naturelle constituant le principal risque radiologique auquel est exposé chaque individu. La voie respiratoire est la principale voie de pénétration du radon dans le corps humain. Après inhalation, le radon est rapidement exhalé car il a peu d'affinité avec les milieux biologiques notamment les poumons. Au contraire, ses descendants particuliers également radioactifs se fixent sur les aérosols inhalés qui se déposent le long des voies respiratoires selon leur granulométrie. Certains de ces descendants sont des émetteurs alpha dont l'action est limitée aux tissus pulmonaires proches du site de dépôt.

La concentration du radon dans les ambiances de travail dépend de multiples facteurs : la teneur en uranium ou en thorium dans le produit minier, la nature du milieu (confinement), la qualité de la ventilation, la porosité du produit, les conditions météorologiques, etc.

Le radon possède trois isotopes naturels : ^{219}Rn -, ^{220}Rn et ^{222}Rn .

- le ^{219}Rn (actinon), issu de la famille de l' ^{235}U -, il est le moins abondant des trois isotopes. En effet, la teneur en ^{235}U dans les roches et les sols représente environ 0,73 % de celle de l' ^{238}U , il est pratiquement absent dans l'atmosphère ; par conséquent on ne s'intéressera qu'aux deux autres isotopes ;

- le ^{220}Rn (thoron), issu de la famille du ^{232}Th , est le plus abondant des trois isotopes, mais il disparaît très vite en raison de sa courte période radioactive (55 s). Sa contribution dans l'exposition radiologique est moins importante que celle du troisième isotope, mais non négligeable ;

- le ^{222}Rn (radon), issu de la famille de l' ^{238}U , il émane en quantité plus faible que celle du thoron, mais sa période radioactive est suffisamment longue (3,8 jours) pour lui conférer une plus large distribution dans les ambiances de travail.

La concentration du radon qui peut s'accumuler dans les ambiances du lieu de travail dépend du taux d'exhalation du radon, de la surface et le volume du produit, du volume du local en question, de la période radioactive du radionucléide et du taux de renouvellement de l'air (ventilation forcée ou naturelle) [20].

4.1.3. Contamination de la peau

La peau peut être contaminée soit, par dépôt direct de la contamination, soit par contact avec des surfaces contaminées. Le risque d'exposition externe suite à la contamination de la peau dépend de plusieurs facteurs :

- Les caractéristiques physiques des radionucléides déposés (nature et énergie du rayonnement émis);

- L'activité déposée :

- Le temps d'exposition (durée pendant laquelle ce dépôt reste sur la peau).

4.1.4. Voies de contaminants radioactifs au public

L'exposition au rayonnement des membres du public dans des sites contenant des minerais radioactifs est considérée comme une «situation d'exposition existante». Lorsque les membres du public ont accès à un site, les expositions à l'intérieur du site peuvent venir directement des sables minéralisés. L'exposition surgit généralement dans la zone entourant les sables minéralisés où les radionucléides ont été dispersés par des voies aéropartées ou d'origine hydrique. L'exposition du public en dehors du site peut être causée par la propagation de matières radioactives dans le milieu environnant par le vent et l'érosion hydrique et la dispersion.

Autres voies d'exposition du public comprennent la construction de logements sur ou à côté des tas de minerais et l'utilisation de minerais NORM dans les routes et les bâtiments. En conséquence, des concentrations élevées de ces radionucléides peuvent se produire dans l'approvisionnement local en eau, les sols et la chaîne alimentaire, entraînant une exposition supplémentaire du public au-dessus des niveaux de fond locaux naturels dominants.

Les principales voies d'exposition des membres du public dans les situations d'exposition sont:

- ✓ Exposition externe au rayonnement gamma ;
- ✓ Apports de matière due à la poussière par inhalation, soit directement, soit par la remise en suspension ;
- ✓ Apports de matières par ingestion, soit directement ou par l'ingestion de nourriture ou d'eau ;
- ✓ Inhalation de radon libéré dans l'air par les matériaux.

4.1.5. Remarques complémentaires pour les régions éloignées et autochtones :

Le peuple autochtone peut être sujet à un risque plus élevé d'exposition aux radiations dans et autour des sites contenant les minerais radioactifs. Par exemple : voyageant sur les routes poussiéreuses dans des véhicules ouverts ; assis sur le sol, vivre et dormir dans des structures temporaires avec des planchers de terre ; absence d'installations sanitaires adéquates, en consommant le biote local et en cuisinant dans le sol et en participant à certaines formes de distractions (événements sportifs, spectacle en plein air dans un endroit poussiéreux).

4.1.6. Scénarios d'exposition

Construction de logements sur des terrains contaminés ou sur les décharges des minerais radioactifs ; utilisation des minerais radioactifs présents dans les matériaux de construction ; utilisation des sols contaminés et eaux de surface ; aliments contaminés ; inhalation de poussières ; et ingestion de sol surtout les enfants.

4.1.7. Critères de protection

La dose limite applicable à des situations planifiées d'exposition ne s'applique pas aux situations d'expositions existantes. Au lieu de doses limites, des niveaux de référence sont établis, exprimé comme une dose efficace annuelle pour une personne représentative de l'ordre de 1 à 20 mSv ou une autre quantité équivalente.

Les niveaux de référence peuvent être convertis en grandeurs opérationnelles, telles que des concentrations d'activité en Bq.kg^{-1} ou Bq.m^{-2} et de débit de dose gamma. Cela permettra à la partie responsable de mettre en œuvre des mesures correctives et de démontrer la conformité aux critères de dose. Le calcul de ces quantités opérationnelles devrait être aussi réaliste que possible. La valeur réelle du niveau de référence dépend de la possibilité de contrôler la situation et de l'expérience de la gestion des situations similaires dans le passé.

Les niveaux de référence doivent être utilisés :

- Prospectivement, pour la planification des stratégies de protection et d'assainissement;
- Rétrospectivement comme point de repère pour juger l'efficacité des stratégies de protection et les mesures correctives de mises en œuvre.

Les réductions dans les doses individuelles devraient être atteintes par le biais de mesures correctives (supprimant les sources de contamination, modifiant les voies d'exposition, ou réduisant le nombre de personnes ou d'autres récepteurs exposés au rayonnement de la source).

CHAPITRE V : Localisation, présentation générales et description des villages et des sites

5.1. Localisation et présentation générales des villages et des sites

Les zones d'étude se situent dans la côte Nord – est de Madagascar, Région d'Analanjirofo, Districts de Fénérive-Est et de Soanierana Ivongo. Plus précisément les villages au sein de la Commune rurale d'Ampasina Maningory (Analanampotsy et Mahaso) ; au sein de la Commune rurale d'Ampasimbe (Vohitrakanga, Anjahambe) et de la Commune rurale de Soanierana Ivongo (les villages de Manankatafana et de Menatany ainsi que la ville de Soanierana Ivongo).

La localisation générale des zones d'étude est donnée dans la carte de la figure 3 suivante:

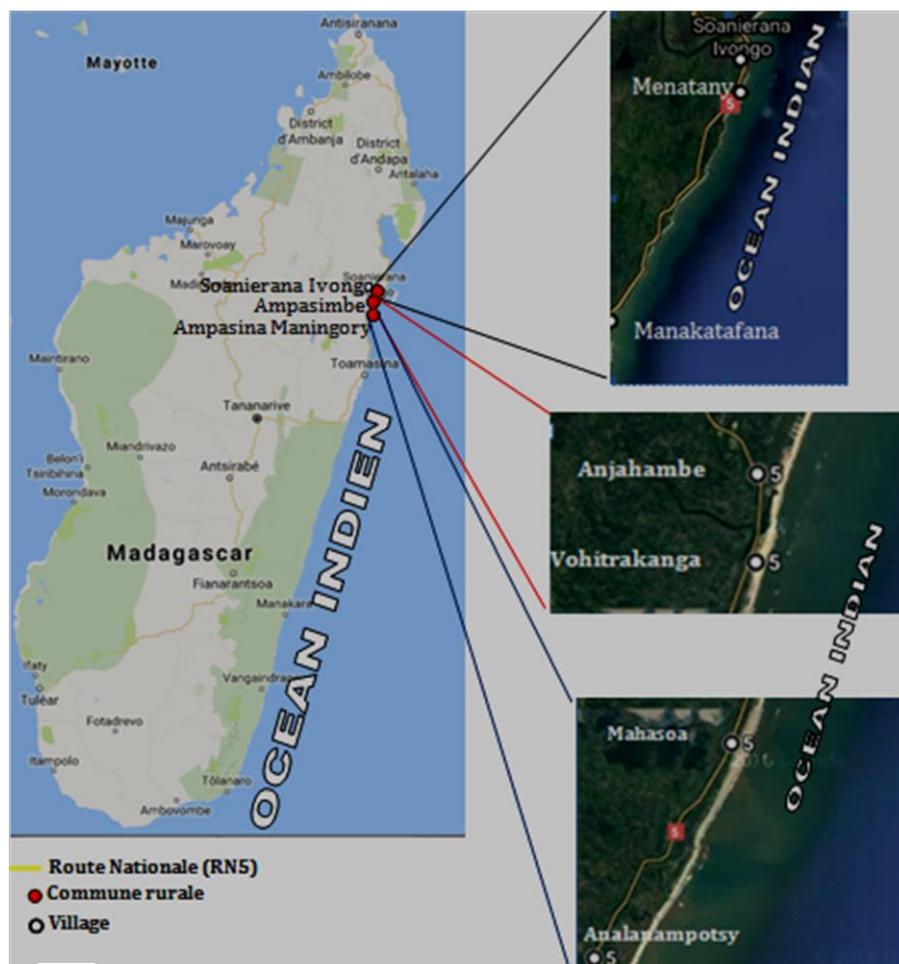


Figure 3: Localisation générale des zones d'étude

Localisation, présentation générales et description des villages et des sites

En général, les sites se trouvent sur le long du littoral du Nord-est de Madagascar (Fénérive-Est et Soanierana Ivongo). Quelques sites ont déjà fait l'objet d'exploitation minière.

Ces sites sont divisés en trois catégories tels que des sites où il n'y a jamais eu d'activité d'exploitation (sites vierges), des sites en cours d'exploitation (zone de décapage, zone de stockage temporaire de minerais brut en attente de traitement, zone d'implantation de l'unité de séparation, zone d'entreposage temporaire de minerais de zircon, et zone d'entreposage de minerais d'ilménite) et les sites en cours de réhabilitation (zone remblayée et zone revégétalisée) constituent le dernier site.

Il y a des villages qui se trouvent à proximité des sites d'exploitation. Ces villages contiennent des maisons d'habitation familiales ainsi que des infrastructures publiques et économiques qui sont fréquentées par la population locale : mairie, école, champs de plantations, rizières, etc.

Nous avons étudié quatre zones à savoir :

La première zone d'étude touche les villages d'Analanampotsy et de Mahasoa, ainsi que leurs environs. La deuxième englobe le village d'Anjahambe et ses environs. La troisième touche le village de Manankatafana et ses environs, et la dernière le village de Menatany et la ville de district de Soanierana Ivongo, ainsi que leurs environs.

5.2. Description des villages et des sites

5.2.1. Village d'Anjahambe:

Il se trouve dans la Commune rurale d'Ampasimbe. Le site est déjà exploité et en cours de réhabilitation et de revégétalisation. Deux entreposages de minerais d'ilménite et de zones non exploitées et vierges s'y trouvent également.

5.2.2. Village de Vohitrakanga:

Il se trouve dans la Commune rurale d'Ampasimbe. Le site est déjà exploité et en cours de réhabilitation et de revégétalisation. Il y a présence d'un entreposage de minerais d'ilménite et de zones non exploitées et vierges.

5.2.3. Village d'Analanampotsy :

Il se trouve dans la Commune rurale d'Ampasina Maningory, deux sites ont été étudiés tels que :

- **Site A au Nord :**

Cette zone est en cours d'exploitation, de réhabilitation et de révégétalisation. La présence de trois entreposages d'ilménite dont un en cours de remplissage a été trouvée.

- **Site B au Sud :**

Ce site est en cours de réhabilitation (zone remblayée) et il y a un lieu de stockage temporaire d'ilménite.

5.2.4. Village de Mahasoia :

Il se trouve dans la Commune rurale d'Ampasina Maningory. Il se situe à proximité des sites d'exploitation. Ce village contient des maisons d'habitation familiales.

5.2.5. Village Manakantafana :

Il se trouve dans la Commune rurale de Soanierana Ivongo, le site est en cours de réhabilitation et de revégétalisation. Il y a présence de deux entreposages de minerais d'ilménite.

5.2.6. Village de Menatany :

Il se trouve dans la Commune rurale de Soanierana Ivongo : cette zone est en cours de réhabilitation et de révégétalisation. Il y a présence de cinq entreposages d'ilménite.

5.2.7. Ville de Soanierana Ivongo

Le District de Soanierana Ivongo se trouve dans la partie Nord-est de Madagascar, Région d'Analanjirifo. Dans cette ville, il n'y a ni site d'exploitation ni site d'exploration mais elle a une forte densité de la population à cause de l'exode rural. Cette ville est proche du village de Menatany.

CHAPITRE VI : Les matériels utilisés et méthodes

6.1. Matériels utilisés

Durant la réalisation de ce travail, nous avons utilisé les appareils suivants :

6.1.1. Débitmètre Graetz X5 DE

Le débitmètre de GRAETZ X 5 DE est un débitmètre portatif constitué par un compteur G.M compensé en énergie pour mesurer les débits de doses dont les caractéristiques sont les suivantes :

Tableau 2: Caractéristiques de l'appareil Débitmètre Graetz X5 DE

Appareils	Caractéristiques
	<ul style="list-style-type: none"> ➔ Type de dosimètre : débitmètre portatif avec un compteur G .M. ➔ Marque: GRAETZ X 5 DE ➔ Type de rayonnement : pour la mesure de rayonnement γ et de rayon X. ➔ Gamme d'énergie : 48 keV –1,3 MeV max. ➔ Direction optimale du rayonnement incident : parallèle à l'axe longitudinal. ➔ Position de détection : Horizontale. ➔ Gamme de débit de dose : $0,06 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ à $19,99 \text{mSv.h}^{-1}$

6.1.2. Chaîne de spectrométrie gamma NaI(Tl)

Cette chaîne permet de détecter et de mesurer le taux de radioactivité gamma émise par les radionucléides contenus dans les échantillons.

Tableau 3: Caractéristiques de l'appareil de la chaîne de spectrométrie gamma NaI(Tl)

Appareil	Caractéristiques
	<ul style="list-style-type: none"> ➔ Détecteur: Iodure de sodium activé au thallium [NaI(Tl)] ➔ Marque: ORTEC ➔ Résolution en énergie: 60 keV à 1333 keV du Co-60 ➔ Tension de polarisation: +800 V ➔ Tension limite : +1000 V ➔ Logiciel utilisé: ScintiVision

6.1.3. Radon mètre RTM 2100 SARAD

Cet appareil permet de mesurer la concentration des gaz radioactifs, en particulier le radon-222 et le thoron-220 de l'air prélevé.

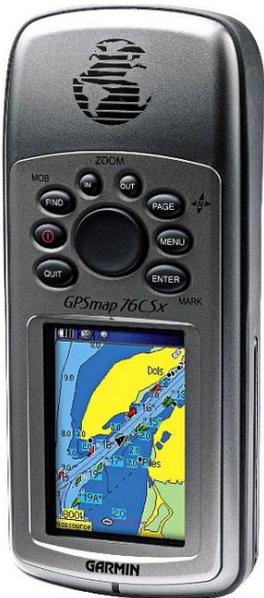
Tableau 4: Caractéristiques de l'appareil Radon mètre RTM 2100 SARAD

Appareil	Caractéristiques
	<ul style="list-style-type: none"> ➔ Marque : SARAD ➔ Modèle : RTM 2100 ➔ Numéro de série : 158/04/05 ➔ Température de refroidissement : Minimum à 8°C ➔ Temps de fonctionnement après démarrage : Après environs 10 minutes ➔ Température de fonctionnement : 0 à 30°C ➔ Dimensions : 52 x 120 x 125 mm ➔ Poids : 0,75 kg

6.1.4. GPS Garmin Map 76CSx

Il permet de déterminer les coordonnées géographiques de n'importe quel point situé à la surface du globe. Le GPS s'utilise en association avec une carte pour se repérer et se positionner.

Tableau 5: Caractéristiques de l'appareil GPS Garmin

Appareil	Caractéristiques
	<ul style="list-style-type: none">➔ Type: Portable➔ Logiciel: Garmin➔ Capacité du journal de suivi: 10 000 points➔ Alarme : Sonore➔ Type d'écran: LCD couleur➔ Taille de l'écran: 4,1x5.6 cm➔ Résolution de l'écran: 160x240 pixels➔ Vitesse de précision: 0,05 m/s➔ Taux de rafraîchissement: 1 heure/s➔ Type d'antenne: Interne➔ Dimensions (LxHxP): 69x157x31 mm➔ Poids: 222 g

Remarque : Les travaux sur terrain ont été effectués en décembre 2012 et tous les appareils utilisés appartiennent à l'INSTN-Madagascar.

6.1. Méthodologies

6.2.1. Dosimétrie

Le domaine d'étude se focalise surtout sur les formations de sables lourds minéralisés, contenant de l'ilménite, du zircon et de la monazite. Ces minéraux contiennent des éléments radioactifs tels que l'uranium et le thorium. De ce fait, le risque d'exposition aux rayonnements ionisants sur ces zones est réel.

L'estimation des risques causés par les rayonnements ionisants peut être déduite à partir des mesures de doses de rayonnement absorbées par les travailleurs et le public, dont certains peuvent être exposés à des accroissements de doses dues aux rayonnements émis par les radioisotopes naturels.

Les mesures de débits de doses d'exposition ambiante ont été effectuées à l'aide d'un débitmètre GRAETZ X5DE. Lors des mesures, le débitmètre est placé à 1 m au-dessus du sol ou au niveau de la poitrine.

Sur les sites, les levées dosimétriques ont été effectuées suivant des maillages variables selon l'étendue de la zone à cartographier.

En chaque point de mesure, on a obtenu une valeur moyenne des débits de dose d'exposition ambiante et on a prélevé les coordonnées géographiques à l'aide d'un GPS.

Les coordonnées géographiques (longitude-latitude) ont été converties en coordonnées Laborde, unités métriques. Les données ont alors été traitées à l'aide des logiciels de système d'information géographique Surfer 11.0, Google Map et Google Earth. Le logiciel Surfer 11, conçu par Golden Software, il permet de réaliser des modèles numériques de terrain (MNT) issus des données qu'on aura récoltées sur le terrain via DGPS. Le principe de Surfer est le suivant : le logiciel permet de créer des grilles qui vont interpoler les données irrégulières des points x,y,z afin de les ordonner. C'est à partir de ces grilles qu'on pourra créer plusieurs types de cartes : base map, contour map, 3D surface, vector et bien d'autres...

L'exemple d'utilisation du logiciel Surfer 11 seront données à l'annexe 4 (Réalisation des cartes de niveau de débit de dose).

6.2.2. Prélèvement des échantillons environnementaux

L'existence des sables lourds minéralisés contenant les minéraux d'ilménite, de zircon et de monazite dans les sites dans la région d'Analanjirifo est réelle.

Des gisements qui sont déjà épuisés et en cours de réhabilitation ont été constatés.

Les travailleurs fréquentent des périmètres où l'on trouve des gisements de sables lourds minéralisés, contenant des minerais radioactifs (ilménite, zircon et monazite). Comme ces minerais sont riches en uranium et thorium, les activités minières exposent les travailleurs à des contaminations externe et interne durant les phases de prospection, d'extraction et de manipulation d'échantillons.

Ainsi, pour la plupart des éléments des séries radioactives naturelles, l'exposition aux rayonnements se fait soit par voie externe, soit par contamination, soit par voie interne (ingestion et inhalation de gaz radon et des poussières radioactifs).

6.2.3. Protocoles de prélèvement

6.2.3.1. Sols

Le prélèvement des échantillons de sols est effectué, soit de façon aléatoire, soit sur les endroits où le niveau de débit de dose de rayonnement est élevé.

Des quantités de l'ordre de 0,5 kg à 1,0 kg d'échantillons sont ensuite mises dans des sachets plastiques. Les coordonnées de chaque point de prélèvement sont repérées à l'aide d'un GPS.

6.2.3.2. Eau

Le choix de prélèvement des échantillons d'eau se fait, soit dans les ruisseaux ou rivières traversant les zones d'étude, soit dans les puits et sources naturelles utilisées par les habitants comme sources d'approvisionnement en eau potable.

Les échantillons d'eau sont prélevés dans des bouteilles en plastique de 1,5 L. Les coordonnées de chaque point de prélèvement sont identifiées à l'aide d'un GPS.

6.2.3.3. Radon dans l'air

Les mesures de la radioactivité dans l'air ont été effectuées in-situ. Le radon-mètre TM-2100 de marque SARAD a été utilisé à cet effet.

Les mesures sont effectuées dans des locaux des villageois à proximité des sites. Les villages concernés se trouvent soit à l'intérieur des sites, soit dans leur environnement immédiat.

Les durées de mesure sont 12 heures environs. De même, les coordonnées des points de prélèvement sont repérées à l'aide d'un GPS.

Les résultats obtenus sont comparés aux limites de référence (400 Bq.m^{-3} pour le public et de 1000 Bq.m^{-3} pour les travailleurs).

6.2.4. Méthodes d'analyse des échantillons environnementaux

6.2.4.1. Analyse de la radioactivité

Dès leur arrivée au laboratoire, les échantillons de sols ont été placés dans des porte-échantillons de 100 cm³. Quant aux échantillons d'eau, ils sont versés dans des béciers marinelli de 500 cm³.

Les analyses ont été réalisées à l'aide d'une chaîne de spectrométrie gamma comprenant un détecteur NaI(Tl).

Les résultats obtenus sont d'une part comparés aux valeurs moyennes mondiales de la radioactivité contenues dans le même type d'échantillon, qui sont données par des documents de référence tel que l'UNSCEAR 2000. D'autre part, ces valeurs sont utilisées pour estimer les doses d'exposition minimale et maximale pour les personnes qui manipulent de tels échantillons, ou ingèrent ce type d'eau de boisson, ou inhalent ce type d'air.

6.2.5. Méthode de calcul de doses d'exposition minimales et maximales

6.2.5.1. Concept

Le modèle de base standard (UNSCEAR) utilisé pour décrire le comportement, le transfert et les calculs dosimétriques liés à la radioactivité naturelle est représenté dans le schéma de la **figure** ci-après.

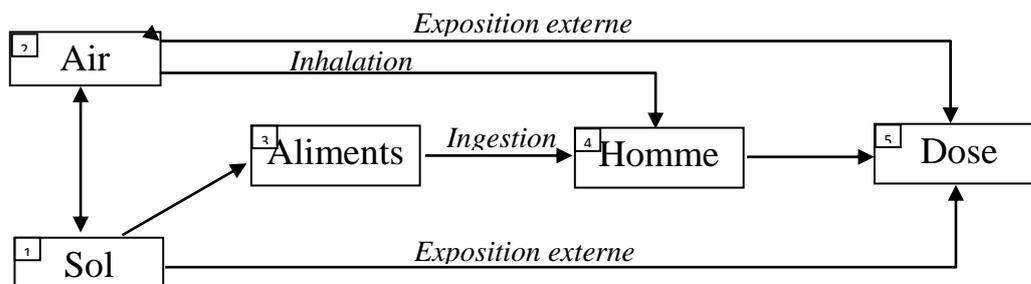


Figure 4: Cheminement terrestre lors du transfert des radionucléides et des doses d'exposition à l'homme

Source : UNSCEAR, 2000

Les doses auxquelles l'homme est soumis proviennent de l'exposition externe et de l'exposition interne, à savoir l'inhalation et l'ingestion. Les doses d'exposition aux rayonnements proviennent des radionucléides qui se trouvent dans le sol, l'air et les aliments consommés par l'homme.

6.2.5.2. Estimation des doses

L'estimation des doses d'exposition consiste à calculer les doses causées par la concentration des radionucléides dans les différents compartiments environnementaux. Les calculs nécessitent ainsi la détermination de l'activité.

Pour les personnes séjournant et travaillant sur le lieu étudié, on peut en déduire les doses annuelles probables d'exposition due :

- à la radioactivité du sol,
- à l'exposition interne due à l'ingestion des eaux de boisson de la population locale,
- à l'exposition interne due à l'inhalation du radon.

Nous insistons sur l'ingestion des eaux contaminées et la respiration de l'air contenant des émanations radioactives car ce sont les voies les plus probables à l'introduction des radionucléides dans l'organisme humain.

CHAPITRE VII : Résultats

7.1. Résultats dosimétriques et cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants

Les mesures de débit de dose dans les villages (Analanampotsy, Mahasoà) de la commune rurale d'Ampasina Maningory, (Vohitrakanga, Anjahambe) de la commune rurale d'Ampasimbe et (Manakantafana, Menatany) de la commune rurale de Soanierana Ivongo, ainsi que la ville de Soanierana Ivongo seront données dans les tableaux et les cartes ci – après.

7.1.1. Commune rurale d'Ampasimbe

7.1.1.1. Village d'Analanampotsy

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le village d'Analanampotsy sont donnés dans le tableau 6 ci-dessous:

Tableau 6: Débits de dose dans le village d'Analanampotsy

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17° 09' 53,0"	49° 28' 51,2"	723 733,73	989 404,95	0,08
2	17° 09' 51,2"	49° 28' 52,0"	723 758,24	989 459,92	0,11
3	17° 09' 59,2"	49° 28' 46,4"	723 588,88	989 216,53	0,07
4	17° 09' 57,6"	49° 28' 47,3"	723 616,250	989 265,31	0,10
5	17° 09' 56,6"	49° 28' 48,1"	723 640,37	989 295,69	0,07
6	17° 09' 49,7"	49° 28' 52,3"	723 767,83	989 505,90	0,10
7	17° 09' 48,9"	49° 28' 53,7"	723 809,59	989 529,85	0,12
8	17° 09' 47,9"	49° 28' 53,2"	723 795,29	989 560,83	0,11
9	17° 09' 46,4"	49° 28' 54,5"	723 834,44	989 606,35	0,07
10	17° 09' 43,5"	49° 28' 55,4"	723 862,43	989 695,10	0,08
11	17° 09' 35,8"	49° 28' 50,4"	723 718,33	989 934,15	0,09
12	17° 09' 34,0"	49° 29' 02,1"	724 065,03	989 984,10	0,10
13	17° 09' 52,1"	49° 28' 50,7"	723 719,38	989 432,85	0,10
14	17° 10' 01,2"	49° 28' 45,4"	723 558,36	989 155,50	0,10
15	17° 09' 56,8"	49° 28' 46,0"	723 578,20	989 290,51	0,07
16	17° 09' 54,5"	49° 28' 48,4"	723 650,25	989 360,12	0,09
17	17° 09' 52,7"	49° 28' 49,4"	723 689,54	989 414,86	0,09
18	17° 09' 50,1"	49° 28' 51,0"	723 729,21	989 494,20	0,07
19	17° 09' 48,5"	49° 28' 51,9"	723 756,58	989 542,98	0,10
20	17° 09' 43,8"	49° 28' 54,2"	723 826,81	989 686,43	0,09
21	17° 09' 39,4"	49° 28' 55,9"	723 879,18	989 820,93	0,10
22	17° 09' 37,6"	49° 28' 57,2"	723 918,46	989 875,67	0,09
23	17° 09' 35,8"	49° 28' 59,0"	723 972,53	989 930,18	0,07
24	17° 09' 31,9"	49° 29' 01,7"	724 054,21	990 048,85	0,10

Dans le village d'Analanampotsy, vingt-quatre (24) mesures de débit de dose ont été effectuées. Les valeurs de ces derniers varient de $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ (minimale) à $0,12 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ (maximale). Elles sont légèrement supérieures au bruit de fond (B.F = $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) de cette région. La cartographie du niveau des débits de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants sera donnée à l'annexe 2.

7.1.1.2. Site A d'Analanampotsy

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le site A d'Analanampotsy sont donnés dans le tableau 7 ci-après :

Tableau 7: Débits de dose dans le site A d'Analanampotsy

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17° 09' 39,5"	49° 29' 15,8"	724 467,35	989 808,67	0,11
2	17° 09' 35,5"	49° 29' 16,5"	724 489,96	989 931,33	0,15
3	17° 09' 37,6"	49° 29' 16,7"	724 494,86	989 866,67	0,14
4	17° 09' 37,4"	49° 29' 16,9"	724 500,87	989 872,73	0,13
5	17° 09' 37,4"	49° 29' 17,1"	724 506,78	989 872,64	0,07
6	17° 09' 45,8"	49° 29' 11,0"	724 322,44	989 617,19	0,48
7	17° 09' 46,3"	49° 29' 11,1"	724 325,16	989 601,77	0,35
8	17° 09' 46,5"	49° 29' 10,8"	724 316,19	989 595,76	0,18
9	17° 09' 46,4"	49° 29' 10,4"	724 304,42	989 599,02	0,23
10	17° 09' 46,5"	49° 29' 10,6"	724 310,28	989 595,85	0,38
11	17° 09' 47,0"	49° 29' 10,7"	724 312,99	989 580,43	0,15
12	17° 09' 48,0"	49° 29' 09,2"	724 268,18	989 550,38	0,10
13	17° 09' 47,5"	49° 29' 10,3"	724 300,93	989 565,24	0,13
14	17° 09' 47,2"	49° 29' 10,2"	724 298,12	989 574,51	0,20
15	17° 09' 46,8"	49° 29' 09,4"	724 274,67	989 587,18	0,09
16	17° 09' 47,5"	49° 29' 09,3"	724 271,37	989 565,70	0,10
17	17° 09' 48,1"	49° 29' 09,9"	724 271,09	989 547,25	0,09
18	17° 09' 48,2"	49° 29' 10,2"	724 297,64	989 543,76	0,07
19	17° 09' 48,4"	49° 29' 10,1"	724 294,59	989 537,66	0,09
20	17° 09' 48,0"	49° 29' 09,1"	724 265,22	989 550,42	0,08
21	17° 09' 49,3"	49° 29' 09,8"	724 285,29	989 510,13	0,10
22	17° 09' 49,5"	49° 29' 08,9"	724 258,59	989 504,39	0,12
23	17° 09' 49,1"	49° 29' 09,9"	724 288,34	989 516,23	0,14
24	17° 09' 49,7"	49° 29' 09,3"	724 270,32	989 498,06	0,10
25	17° 09' 50,3"	49° 29' 07,8"	724 322,44	989 480,31	0,11
26	17° 09' 53,2"	49° 29' 05,9"	724 168,14	989 392,02	0,46

Le Site A se situe dans le nord du village d'Analanampotsy. Vingt-six (26) mesures de débit de dose ont été effectuées et les valeurs de ce dernier varient de $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ (minimale)

à $0,48 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ (maximale). Cette dernière est supérieure au bruit de fond (B.F = $0,07 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) de cette région. La carte de niveau de débit dose ambiante en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ est donnée ci-dessous :

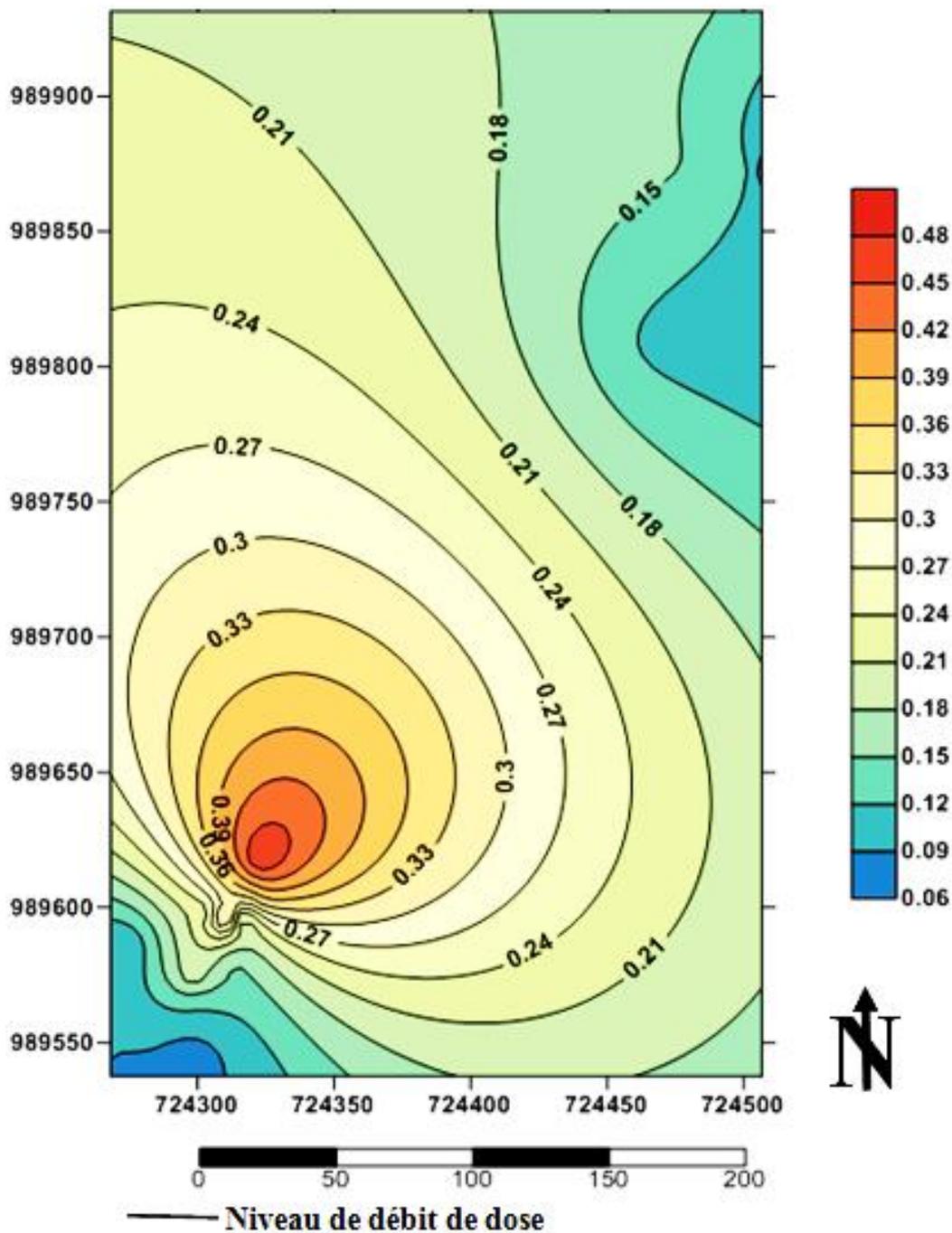


Figure 5: Carte de niveau de débit de dose ambiante sur le site A d'Analanampotsy (Nord) (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)

Cette courbe de niveau montre que les débits de dose dans le site A d'Analanampotsy sont beaucoup plus importants dans la partie sud-ouest que dans la partie nord-est.

7.1.1.3. Site B d'Analanampotsy

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le site B d'Analanampotsy sont donnés dans le tableau 8 ci-après :

Tableau 8: Débits de dose dans le site A du village d'Analanampotsy

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17° 10' 14,4"	49° 28' 55,7"	723 856,479	988 744,905	0,15
2	17° 10' 14,8"	49° 28' 56,0"	723 865,154	988 732,468	0,09
3	17° 10' 14,6"	49° 28' 56,6"	723 882,984	988 738,340	0,12
4	17° 10' 14,4"	49° 28' 57,0"	723 894,903	988 744,305	0,24
5	17° 10' 14,5"	49° 28' 57,0"	723 894,855	988 741,230	0,12
6	17° 10' 12,6"	49° 28' 57,0"	723 895,767	988 799,648	0,11
7	17° 10' 12,3"	49° 28' 56,8"	723 889,999	988 808,964	0,08
8	17° 10' 12,3"	49° 28' 57,1"	723 898,866	988 808,826	0,11
9	17° 10' 12,5"	49° 28' 57,6"	723 913,549	988 802,446	0,09
10	17° 10' 12,4"	49° 28' 55,1"	723 839,703	988 806,674	0,29
11	17° 10' 11,8"	49° 28' 57,8"	723 919,796	988 823,876	0,15
12	17° 10' 11,2"	49° 28' 57,6"	723 914,173	988 842,416	0,12
13	17° 10' 11,2"	49° 28' 57,0"	723 896,438	988 842,693	0,13
14	17° 10' 10,9"	49° 28' 56,6"	723 884,759	988 852,101	0,18
15	17° 10' 09,5"	49° 28' 56,7"	723 888,386	988 895,100	0,13
16	17° 10' 10,5"	49° 28' 57,6"	723 914,508	988 863,939	0,13
17	17° 10' 10,6"	49° 28' 58,4"	723 938,106	988 860,495	0,10
18	17° 10' 10,6"	49° 28' 58,9"	723 952,885	988 860,264	0,15
19	17° 10' 10,2"	49° 28' 59,0"	723 956,033	988 872,517	0,07

Le Site B se situe dans le sud du village d'Analanampotsy. Dix-neuf (19) mesures de débit de dose ont été effectuées et les valeurs de ces derniers varient de 0,07 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ (minimale) à 0,29 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ (maximale). Elles sont légèrement supérieures au bruit de fond (B.F = 0,07 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) de cette région. La carte de niveau de débit dose ambiante en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ est donnée ci-dessous :

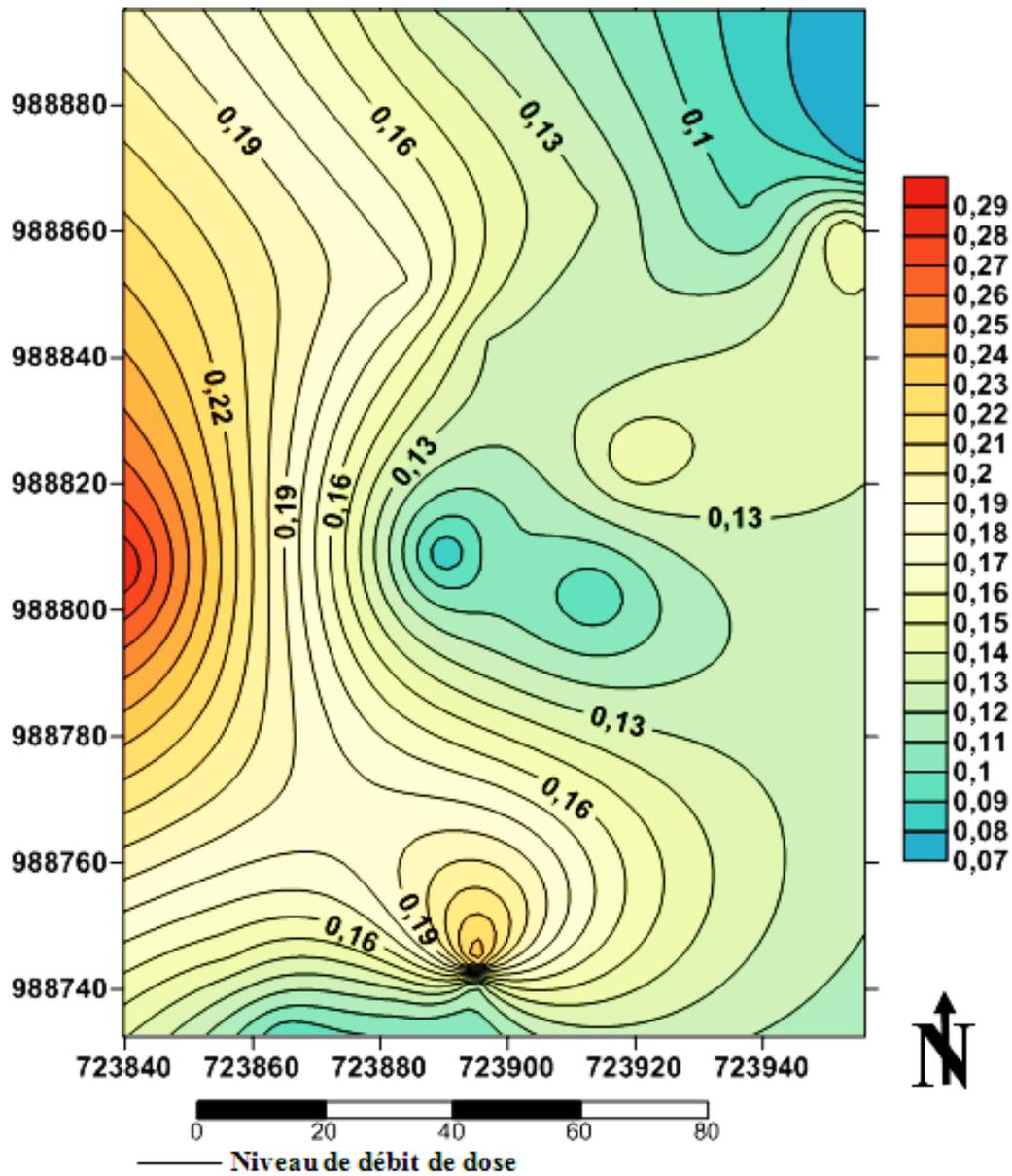


Figure 6: Carte de niveau de débit de dose ambiante (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) sur le site B du village d'Analanampotsy

Cette courbe de niveau montre que les débits de dose sont beaucoup plus importants dans la partie ouest du site B d'Analanampotsy.

7.1.1.4. Villages d'Anjahambe

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans les villages (Nouveau et ancien) d'Analanampotsy sont donnés dans les tableaux 9 et 10 ci-dessous:

- Nouveau village d'Anjahambe

Tableau 9: Débits de dose dans le nouveau village d'Anjahambe

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17° 07' 27,3"	49° 30' 06,8"	726 038,590	993 849,722	0,06
2	17° 07' 25,6"	49° 30' 06,9"	726 042,365	993 901,944	0,06
3	17° 07' 23,9"	49° 30' 07,1"	726 049,097	993 954,120	0,06
4	17° 07' 16,2"	49° 30' 04,2"	725 967,067	994 192,208	0,06
5	17° 07' 15,1"	49° 30' 03,1"	725 935,075	994 226,538	0,06
6	17° 07' 11,5"	49° 30' 02,7"	725 924,982	994 337,409	0,06
7	17° 07' 0,07"	49° 29' 51,4"	725 596,089	994 674,694	0,06
8	17° 07' 0,01"	49° 29' 50,1"	725 557,942	994 693,743	0,06
9	17° 06' 58,6"	49° 29' 47,9"	725 493,619	994 740,879	0,06
10	17° 06' 54,5"	49° 29' 44,9"	725 406,892	994 868,324	0,06
11	17° 06' 45,8"	49° 29' 39,1"	725 239,588	995 138,493	0,06
12	17° 06' 43,7"	49° 29' 38,9"	725 234,684	995 203,152	0,06
13	17° 07' 26,8"	49° 30' 04,6"	725 973,788	993 866,114	0,06
14	17° 07' 24,5"	49° 30' 06,3"	726 025,156	993 936,043	0,06
15	17° 07' 23,2"	49° 30' 06,2"	726 022,826	993 976,059	0,06
16	17° 07' 21,4"	49° 30' 05,4"	726 000,041	994 031,773	0,06
17	17° 07' 19,8"	49° 30' 04,7"	725 980,116	994 081,291	0,06
18	17° 07' 18,4"	49° 30' 04,2"	725 966,008	994 124,567	0,06
19	17° 07' 13,6"	49° 30' 01,8"	725 897,363	994 273,259	0,06
20	17° 07' 13,3"	49° 30' 02,7"	725 924,116	994 282,066	0,06
21	17° 07' 11,9"	49° 30' 01,3"	725 883,398	994 325,758	0,07
22	17° 07' 07,5"	49° 29' 59,4"	725 829,342	994 461,920	0,07
23	17° 07' 04,8"	49° 29' 57,7"	725 780,380	994 545,721	0,07
24	17° 07' 03,4"	49° 29' 55,6"	725 718,966	994 589,737	0,07
25	17° 07' 02,1"	49° 29' 53,5"	725 657,504	994 630,679	0,07

Dans le nouveau village d'Anjahambe, vingt-cinq (25) mesures de débit de dose ont été effectuées. On voit que les valeurs de débit de dose dans ce village ne varient presque pas et sont sensiblement ou égales au bruit de fond ($B.F = 0,06 \mu\text{Sv.h}^{-1}$). La cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants sera donnée à l'annexe 2.

- Ancien village d'Anjahambe

Tableau 10: Débits de dose dans l'ancien village d'Anjahambe

Nombre	Coordonnées			Laborde Nord	Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est		
1	17° 06' 18,7"	49° 30' 37,9"	726 991,178	995 944,481	0,11
2	17° 06' 21,0"	49° 30' 37,8"	726 987,111	995 873,812	0,10
3	17° 06' 23,7"	49° 30' 37,8"	726 985,808	995 790,797	0,12
4	17° 06' 24,9"	49° 30' 36,4"	726 943,834	995 754,552	0,10
5	17° 06' 26,4"	49° 30' 34,6"	726 889,889	995 709,268	0,10
6	17° 06' 27,2"	49° 30' 36,2"	726 936,811	995 683,929	0,10
7	17° 06' 31,1"	49° 30' 34,6"	726 887,621	995 564,762	0,12
8	17° 06' 36,1"	49° 30' 31,6"	726 796,507	995 412,424	0,12
9	17° 06' 41,1"	49° 30' 28,0"	726 687,654	995 260,363	0,12
10	17° 06' 46,1"	49° 30' 25,3"	726 605,412	995 107,885	0,12
11	17° 06' 51,1"	49° 30' 23,1"	726 537,955	994 955,175	0,12
12	17° 06' 56,1"	49° 30' 20,5"	726 458,672	994 802,651	0,14
13	17° 07' 01,1"	49° 30' 18,3"	726 391,216	994 649,940	0,14
14	17° 07' 06,1"	49° 30' 16,4"	726 332,631	994 497,091	0,10
15	17° 07' 11,1"	49° 30' 14,7"	726 279,960	994 344,148	0,09
16	17° 07' 16,1"	49° 30' 12,9"	726 224,332	994 191,252	0,10
17	17° 07' 21,1"	49° 30' 11,2"	726 171,662	994 038,310	0,11

Dans l'ancien village d'Anjahambe, dix-sept (17) mesures de débit de dose ont été effectuées. Ces valeurs mesurées ne varient presque pas mais elles sont supérieures au bruit de fond ($B.F= 0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) de la région. La cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants sera donnée à l'annexe 2.

7.1.1.5.Site d'Anjahambe

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le site d'Anjahambe sont donnés dans le tableau 11 ci-après :

Tableau 11: Débits de dose dans le site d'Anjahambe

Nombre	Coordonnées			Laborde Nord	Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est		
1	17° 07' 09,1"	49° 30' 18,7"	726 399,19	994 403,79	0,25
2	17° 07' 56,4"	49° 29' 14,2"	724 469,54	992 979,33	0,31
3	17° 07' 04,1"	49° 30' 17,9"	726 262,64	994 559,70	0,22
4	17° 07' 09,1"	49° 30' 14,0"	726 260,23	994 405,97	0,12
5	17° 06' 56,1"	49° 30' 20,6"	726 432,69	992 957,84	0,11
6	17° 07' 01,0"	49° 30' 18,4"	726 394,22	994 652,97	0,10
7	17° 06' 51,0"	49° 30' 20,9"	726 472,96	994 959,27	0,11
8	17° 06' 46,1"	49° 30' 24,6"	726 584,72	995 108,21	0,16
9	17° 06' 41,1"	49° 30' 27,0"	726 658,09	995 260,83	0,20
10	17° 06' 36,1"	49° 30' 27,6"	726 678,24	995 414,28	0,11
11	17° 06' 31,1"	49° 30' 27,3"	726 671,78	995 568,15	0,12

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
12	17° 06' 26,1"	49° 30' 21,7"	726 508,62	995 724,48	0,10
13	17° 06' 25,5"	49° 30' 23,6"	726 565,08	995 742,04	0,11
14	17° 06' 21,1"	49° 30' 15,8"	726 336,58	995 880,94	0,09
15	17° 06' 19,2"	49° 30' 14,1"	726 287,23	995 940,14	0,09
16	17° 07' 00,1"	49° 29' 48,1"	725 498,81	994 694,67	0,07
17	17° 06' 57,3"	49° 29' 45,9"	725 435,11	994 781,77	0,09
18	17° 06' 53,1"	49° 29' 43,1"	725 354,35	994 912,20	0,11
19	17° 07' 22,0"	49° 30' 11,9"	726 191,92	994 010,31	0,09
20	17° 07' 21,5"	49° 30' 12,2"	726 201,03	994 025,55	0,09
21	17° 07' 20,8"	49° 30' 12,5"	726 210,24	994 046,93	0,09
22	17° 07' 20,5"	49° 30' 12,7"	726 216,30	994 056,06	0,09
23	17° 07' 17,6"	49° 30' 14,2"	726 262,04	994 144,53	0,08
24	17° 07' 15,2"	49° 30' 15,4"	726 298,68	994 217,77	0,08
25	17° 07' 12,8"	49° 30' 16,6"	726 335,31	994 291,00	0,15
26	17° 07' 10,0"	49° 30' 17,7"	726 369,19	994 376,58	0,12
27	17° 07' 09,1"	49° 30' 18,7"	726 399,19	994 403,79	0,12
28	17° 07' 04,1"	49° 30' 20,3"	726 448,90	994 556,78	0,07
29	17° 06' 59,1"	49° 30' 22,3"	726 510,44	994 709,58	0,10
30	17° 06' 54,1"	49° 30' 24,3"	726 571,99	994 862,38	0,07

Trente (30) mesures de débit de dose ont été effectuées dans le Site d'Anjahambe. On voit que les débits de dose varient de $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ à $0,31 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. Cette valeur maximale est supérieure au bruit de fond (B.F = $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) de cette région. La carte de niveau de débit dose ambiante en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ est donnée sur la figure suivante :

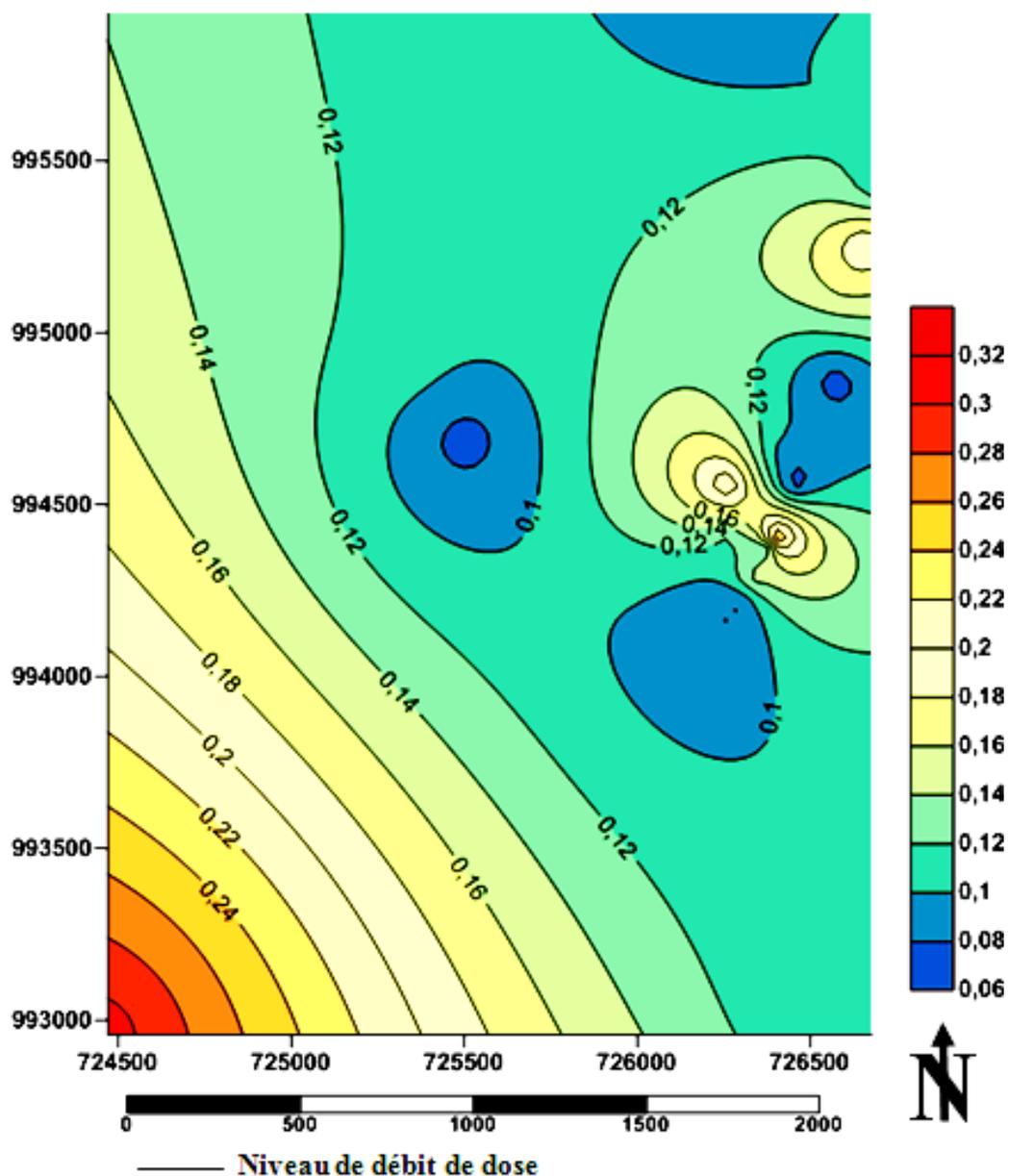


Figure 7: Carte de niveau de débit de dose ambiante sur le site d'Anjahambe en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$

Cette courbe de niveau montre que les débits de dose sont beaucoup plus importants notamment dans la partie sud-ouest du site B d'Analanampotsy.

7.1.2. Commune rurale d'Ampasina Maningory

7.1.2.1. Village Mahasoa

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le village de Mahasoa sont donnés dans le tableau 12 ci-dessous:

Tableau 12: Débits de dose dans le village de Mahasoa

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17° 08' 53,6"	49° 29' 31,5"	724 953,493	991 212,667	0,12
2	17° 08' 49,9"	49° 29' 35,4"	725 070,560	991 324,625	0,14
3	17° 08' 45,8"	49° 29' 38,2"	725 155,303	991 449,389	0,24
4	17° 08' 42,5"	49° 29' 40,5"	725 224,881	991 549,788	0,10
5	17° 08' 41,6"	49° 29' 41,3"	725 248,963	991 577,090	0,10
6	17° 08' 39,8"	49° 29' 42,1"	725 273,478	991 632,063	0,11
7	17° 08' 37,6"	49° 29' 43,3"	725 310,011	991 699,149	0,10
8	17° 08' 31,4"	49° 29' 46,7"	725 413,504	991 888,202	0,12
9	17° 08' 25,1"	49° 29' 49,2"	725 490,441	992 080,746	0,07
10	17° 08' 21,8"	49° 29' 50,3"	725 524,548	992 181,699	0,12
11	17° 08' 17,8"	49° 29' 52,8"	725 600,379	992 303,527	0,11
12	17° 08' 14,5"	49° 29' 53,8"	725 631,531	992 404,526	0,15
13	17° 08' 07,3"	49° 29' 56,6"	725 717,773	992 624,602	0,12
14	17° 08' 01,5"	49° 29' 58,7"	725 782,649	992 801,957	0,15
15	17° 08' 51,3"	49° 29' 33,9"	725 025,545	991 282,274	0,08
16	17° 08' 47,3"	49° 29' 35,8"	725 083,634	991 404,380	0,07
17	17° 08' 42,9"	49° 29' 38,9"	725 177,390	991 538,230	0,07
18	17° 08' 40,9"	49° 29' 40,0"	725 210,870	991 599,213	0,07
19	17° 08' 35,8"	49° 29' 43,3"	725 310,877	991 754,492	0,07
20	17° 08' 34,4"	49° 29' 44,0"	725 332,243	991 797,213	0,07
21	17° 08' 33,0"	49° 29' 45,1"	725 365,435	991 839,749	0,07
22	17° 08' 29,2"	49° 29' 46,9"	725 420,475	991 955,751	0,08
23	17° 08' 25,8"	49° 29' 47,6"	725 442,805	992 059,964	0,07
24	17° 08' 19,3"	49° 29' 50,4"	725 528,707	992 258,518	0,07
25	17° 08' 17,3"	49° 29' 51,7"	725 568,101	992 319,409	0,07
26	17° 08' 12,4"	49° 29' 53,8"	725 632,542	992 469,093	0,07
27	17° 08' 03,3"	49° 29' 57,2"	725 737,437	992 747,309	0,07
28	17° 07' 58,6"	49° 29' 58,5"	725 778,133	992 891,213	0,07

Dans le village de Mahasoa, vingt-huit (28) mesures de débit de dose ont été faites. Ces valeurs varient de $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ à $0,24 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. Cette valeur maximale est supérieure au bruit de fond de cette région qui est de $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. La cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants sera donnée à l'annexe 2.

7.1.2.2. Vohitrakanga

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le site de Vohitrakanga sont donnés dans le tableau 13 ci-dessous :

Tableau 13: Site Vohitrakanga

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17° 07' 44,2"	49° 30' 08,5"	726 080,71	993 329,33	0,10
2	17° 07' 44,4"	49° 30' 09,2"	726 101,31	993 322,85	0,06
3	17° 07' 44,6"	49° 30' 09,3"	726 104,17	993 316,66	0,07
4	17° 07' 45,5"	49° 30' 08,3"	726 074,17	993 289,45	0,06
5	17° 07' 46,1"	49° 30' 06,9"	726 011,79	993 271,97	0,08
6	17° 07' 47,3"	49° 30' 06,2"	726 011,22	993 235,08	0,11
7	17° 07' 50,8"	49° 30' 07,1"	726 036,14	993 127,05	0,06
8	17° 07' 51,3"	49° 30' 05,1"	725 976,77	993 112,60	0,06
9	17° 07' 52,2"	49° 30' 04,3"	725 952,68	993 085,30	0,10
10	17° 07' 53,2"	49° 30' 04,8"	725 966,98	993 054,33	0,06
11	17° 07' 54,7"	49° 30' 06,2"	726 007,65	993 007,56	0,13
12	17° 07' 55,1"	49° 30' 05,5"	725 986,76	992 995,58	0,12
13	17° 07' 55,6"	49° 30' 04,5"	725 956,96	992 980,67	0,06
14	17° 07' 56,9"	49° 30' 05,6"	725 988,85	992 940,19	0,07
15	17° 07' 58,3"	49° 30' 04,6"	725 958,61	992 897,61	0,11
16	17°07'44,8"	49° 30' 09,2"	726 101,11	993 310,55	0,06
17	17°07'41,8"	49° 30' 10,0"	726 126,21	993 402,42	0,06
18	17°07'38,8"	49° 30' 10,0"	726 127,66	993 494,66	0,11
19	17°07'44,8"	49° 30' 07,5"	726 050,85	993 311,34	0,07
20	17°07'47,8"	49° 30' 08,0"	726 064,19	993 218,87	0,12
21	17°07'43,8"	49° 30' 08,5"	726 080,90	993 341,62	0,12

Vingt et un (21) mesures de débit de dose ont été effectuées dans le Site de Vohitrakanga et sa valeur maximale ($0,13 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) est légèrement supérieure au bruit de fond de cette région qui est de $0,06 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. La carte de niveau de débit dose ambiante en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ est donnée ci-dessous :

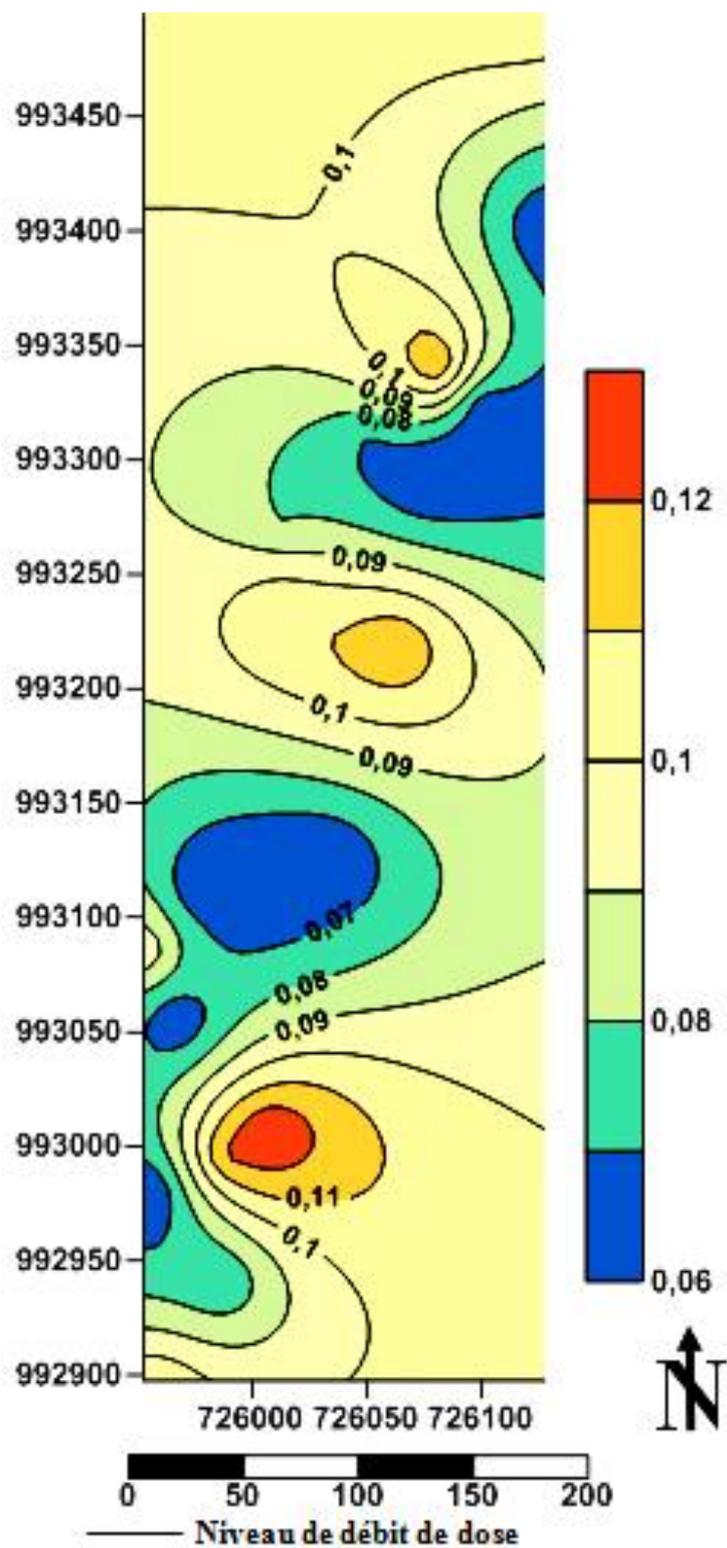


Figure 8: Carte de niveau de débit de dose ambiante (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) sur le site de Vohitrakanga
 Cette courbe de niveau montre que les débits de dose dans ce site ne varient presque pas.

7.1.3. Commune rurale de Soanierana Ivongo

7.1.3.1. Village Manankatafana

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le village de Manankatafana sont donnés dans le tableau 14 ci-dessous:

Tableau 14: Débits de dose dans le village de Manankatafana

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17°04'18,0"	49°31'22,0"	728 353,56	999 635,03	0,09
2	17°04'16,6"	49°31'20,6"	728 312,84	999 678,72	0,07
3	17°04'15,2"	49°31'20,4"	728 307,60	999 721,86	0,07
4	17°04'12,6"	49°31'17,0"	728 208,31	999 803,38	0,08
5	17°04'08,2"	49°31'16,0"	728 180,86	999 939,13	0,07
6	17°04'04,6"	49°31'17,1"	728 215,14	1 000 049,30	0,07
7	17°04'02,8"	49°31'16,8"	728 207,13	1 000 104,78	0,07
8	17°04'00,6"	49°31'18,5"	728 258,47	1 000 171,63	0,12
9	17°03'56,6"	49°31'19,6"	728 292,94	1 000 294,11	0,09
10	17°03'52,4"	49°31'20,9"	728 333,42	1 000 422,63	0,09
11	17°03'48,6"	49°31'22,2"	728 373,70	1 000 538,86	0,10
12	17°03'44,6"	49°31'24,3"	728 437,74	1 000 660,87	0,08
13	17°03'40,6"	49°31'26,0"	728 489,95	1 000 783,06	0,08
14	17°03'36,6"	49°31'27,4"	728 533,29	1 000 905,39	0,08
15	17°03'34,4"	49°31'26,9"	728 519,57	1 000 973,27	0,08
16	17°03'37,1"	49°31'24,3"	728 441,37	1 000 891,46	0,07
17	17°03'40,5"	49°31'23,7"	728 421,98	1 000 787,21	0,07
18	17°03'45,0"	49°31'21,4"	728 351,78	1 000 649,92	0,07
19	17°03'48,8"	49°31'20,8"	728 332,20	1 000 533,36	0,07
20	17°03'53,1"	49°31'18,5"	728 262,10	1 000 402,23	0,07
21	17°03'57,0"	49°31'16,7"	728 206,98	1 000 283,16	0,07
22	17°04'01,1"	49°31'15,2"	728 160,64	1 000 157,80	0,09
23	17°04'05,1"	49°31'13,2"	728 099,56	1 000 035,74	0,07
24	17°04'08,6"	49°31'10,9"	728 029,85	999 929,20	0,07
25	17°04'11,6"	49°31'09,4"	727 984,04	999 837,66	0,10

Vingt-cinq (25) mesures de débit de dose ont été effectuées dans le village de Manankatafana. Les débits de dose ne varient presque pas et sont légèrement supérieurs au bruit de fond ($0,07\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) de ce village. La cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants sera donnée à l'annexe 2.

7.1.3.2.Site Manankatafana

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans le site de Manankatafana sont donnés dans le tableau 15 ci-dessous :

Tableau 15: Débits de dose dans le site de Manankatafana

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	17°04'17,2"	49° 31' 21,7"	728 345,078	999 659,762	0,07
2	17°04'21,0"	49° 31' 27,5"	728 514,762	999 540,227	0,14
3	17°04'29,1"	49° 31' 23,6"	728 395,507	999 293,000	0,09
4	17°04'27,0"	49° 31' 23,8"	728 402,438	999 357,474	0,09
5	17°04'27,7"	49° 31' 25,3"	728 446,458	999 335,253	0,09
6	17°04'24,8"	49° 31' 25,4"	728 450,819	999 424,370	0,30
7	17°04'24,2"	49° 31' 26,9"	728 495,469	999 442,119	0,30
8	17°04'22,8"	49° 31' 27,8"	728 522,762	999 484,745	0,25
9	17°04'20,6"	49° 31' 28,6"	728 547,485	999 552,013	1,10
10	17°04'21,3"	49° 31' 26,6"	728 488,001	999 531,422	1,20
11	17°04'21,0"	49° 31' 24,3"	728 420,128	999 541,717	0,16
12	17°04'23,2"	49° 31' 23,9"	728 407,234	999 474,262	0,12
13	17°04'23,9"	49° 31' 25,4"	728 451,255	999 452,041	0,12
14	17°04'25,5"	49° 31' 22,9"	728 376,549	999 404,012	0,10
15	17°04'28,0"	49° 31' 21,5"	728 333,937	999 327,798	0,10
16	17°04'22,2"	49° 31' 23,8"	728 404,761	999 505,054	0,07

Seize (16) mesures de débit de dose ont été effectuées dans le Site de Manankatafana. Le débit de dose maximal ($1,20 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) est supérieur au bruit de fond de ce site qui est de $0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. La carte de niveau de débit dose ambiante (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) est donnée sur la figure suivante :

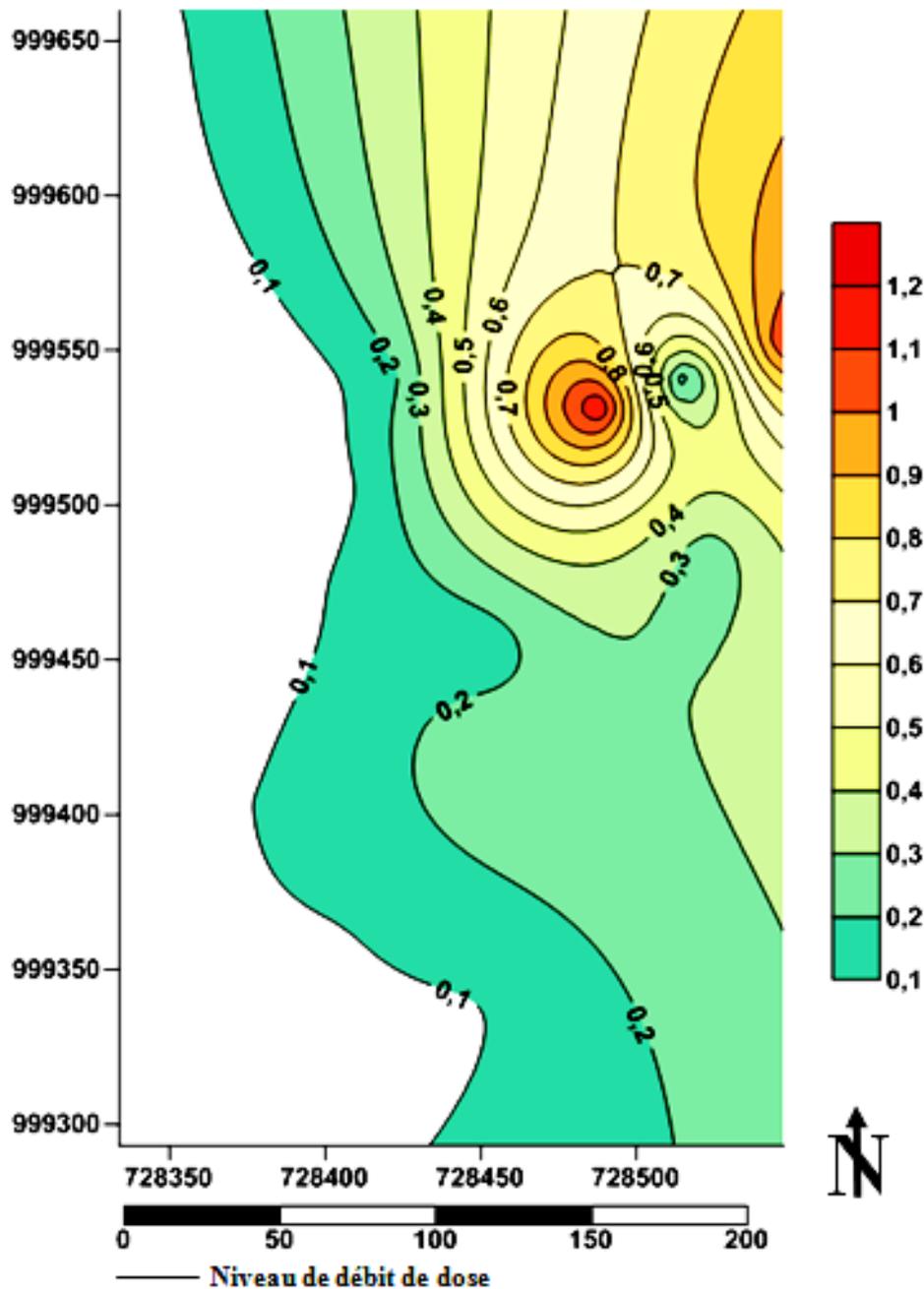


Figure 9: Carte de niveau de débit de dose ambiante (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) sur le site de Manankatafana.

Cette courbe de niveau montre que les débits de dose sont beaucoup plus importants dans la partie nord-est du site de Manankatafana.

7.1.3.3. Menatany-Soanierana Ivongo (Suivant le littoral)

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés suivant le littoral du village de Menatany à la ville de Soanierana Ivongo sont donnés dans le tableau 16 ci-dessous:

Tableau 16: Débits de dose (en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$) suivant le littoral du village de Menatany à la ville de Soanierana Ivongo

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	16° 56' 45,0"	49° 35' 08,1"	735263,06	1013456,89	0,07
2	16° 56' 40,2"	49° 35' 10,7"	735342,36	1013603,24	0,08
3	16° 56' 35,1"	49° 35' 10,3 "	735333,03	1013760,23	0,07
4	16° 56' 30,2"	49° 35' 08,5 "	735282,17	1013911,74	0,10
5	16° 56' 25,1"	49° 35' 10,0 "	735329,06	1014067,83	0,09
6	16° 56' 20,2"	49° 35' 12,9 "	735417,29	1014217,12	0,09
7	16° 56' 15,2"	49° 35' 15,4 "	735493,73	1014369,66	0,13
8	16° 56' 10,3"	49° 35' 13,7"	735445,82	1014521,12	0,07
9	16° 56' 05,1"	49° 35' 12,1"	735401,02	1014681,76	0,15
10	16° 55' 55,1"	49° 35' 16,8"	735545,03	1014986,99	0,12
11	16° 55' 50,1"	49° 35' 20,2"	735648,11	1015139,11	0,11
12	16° 55' 45,2"	49° 35' 22,7"	735724,50	1015288,59	0,12
13	16° 55' 40,2"	49° 35' 23,9"	735762,47	1015441,75	0,07
14	16° 55' 35,1 "	49° 35' 16,6"	735548,93	1015602,00	0,08
15	16° 55' 30,2 "	49° 35' 16,5"	735548,37	1015752,70	0,07
16	16° 55' 25,2 "	49° 35' 18,1"	735598,18	1015905,67	0,07
17	16° 55' 20,1 "	49° 35' 16,6"	735556,29	1016063,19	0,08
18	16° 55' 15,0 "	49° 35' 16,3"	735549,91	1016220,13	0,09
19	16° 55' 10,2 "	49° 35' 10,5"	735380,61	1016370,45	0,13
20	16° 54' 57,3 "	49° 35' 23,0"	735756,90	1016761,16	0,15
21	16° 54' 52,7 "	49° 35' 26,5"	735875,14	1017491,21	0,09
22	16° 54' 33,5"	49° 35' 43,1"	736363,51	1017483,40	0,09
23	16° 54' 38,5"	49° 35' 38,8"	736233,78	1017331,71	0,10
24	16° 54' 43,5"	49° 35' 33,1"	736062,62	1017180,68	0,11
25	16° 54' 48,5"	49° 35' 27,4"	735891,45	1017029,65	0,07
26	16° 54' 53,5"	49° 35' 22,2"	735735,09	1016878,37	0,08
27	16° 54' 58,5"	49° 35' 15,9"	735546,17	1016727,62	0,07

Vingt-sept (27) mesures de débit de dose ont été effectuées suivant le littoral du village de Menatany jusqu'à la ville de Soanierana Ivongo. Les débits de dose sont légèrement supérieurs au bruit de fond ($0,07 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$). La cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants sera donnée à l'annexe 2.

7.1.3.4. Ville de Soanierana Ivongo

Les coordonnées géographiques et les débits de dose mesurés dans la ville de Soanierana Ivongo sont donnés dans le tableau 17 ci-après :

Tableau 17: Débits de dose (en $\mu\text{Sv.h}^{-1}$) dans la ville de Soanierana Ivongo

Nombre	Coordonnées				Débits de dose ambiante ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	Latitude Sud	Longitude Est	Laborde Est	Laborde Nord	
1	16° 55' 02,4"	49° 35' 10,3"	735378,51	1016610,36	0,10
2	16° 55' 05,6"	49° 35' 10,6"	735385,82	1016511,83	0,09
3	16° 54' 59,73"	49° 35' 11,1"	735403,51	1016692,99	0,08
4	16° 54' 58,8"	49° 35' 09,2"	735347,72	1016721,56	0,09
5	16° 55' 23,8"	49° 35' 14,3"	735486,40	1015950,51	0,11
6	16° 55' 44,2"	49° 35' 16,5"	735541,50	1015322,26	0,10
7	16° 55' 24,4"	49° 35' 15,5"	735521,62	1015931,50	0,06
8	16° 55' 09,0"	49° 35' 00,8"	735094,10	1016441,92	0,12
9	16°55'00,2"	49°35'06,7"	735273,04	1016679,70	0,11
10	16°55'04,3"	49°35'01,6"	735120,08	1016556,05	0,07
11	16°55'09,3"	49°35'00,9"	735096,92	1016402,65	0,08
12	16°55'13,3"	49°35'01,8"	735121,59	1016279,24	0,10
13	16°55'18,3"	49°35'01,9"	735122,10	1016125,47	0,12
14	16°55'23,0"	49°35'02,0"	735122,76	1015980,92	0,06
15	16°55'24,2"	49°34'59,8"	735057,06	1015945,06	0,07
16	16°55'22,1"	49°34'54,8"	734910,10	1016011,98	0,08
17	16°55'21,5"	49°34'49,0"	734738,74	1016033,17	0,07
18	16°55'22,5"	49°34'44,7"	734610,98	1016004,45	0,07
19	16°55'24,0"	49°34'39,8"	734465,23	1015960,64	0,06
20	16° 55' 52,5"	49° 35' 14,9"	735490,07	1015067,83	0,07
21	16° 55' 46,8"	49° 35' 16,1"	735528,39	1015242,51	0,08
22	16° 55' 42,1"	49° 35' 15,7"	735518,86	1015387,21	0,06
23	16° 55' 36,6"	49° 35' 15,3"	735509,72	1015556,50	0,07
24	16° 55' 32,9"	49° 35' 15,6 "	735520,41	1015670,11	0,09
25	16° 55' 27,9"	49° 35' 16,6"	735552,46	1015823,37	0,08
26	16° 55' 22,4"	49° 35' 13,9"	735475,25	1015993,75	0,09
27	16° 55' 17,9"	49° 35' 11,5"	735406,43	1016133,24	0,08
28	16° 55' 12,6"	49° 35' 10,4"	735376,47	1016296,71	0,08
29	16° 55' 07,8"	49° 35' 09,7"	735358,10	1016444,62	0,07

Vingt-neuf (29) mesures de débit de dose ont été effectuées dans la ville de Soanierana Ivongo. Les débits de dose sont légèrement supérieurs au bruit de fond ($0,07 \mu\text{Sv.h}^{-1}$) de cette ville. La cartographie du niveau de dose d'exposition aux rayonnements ionisants ambiants sera donnée à l'annexe 2.

Tableau 18: Valeurs limites des doses d'exposition mesurées dans les villages et la ville de Soanierana Ivongo.

Villages et ville	Nombre de mesures	Valeur minimale ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)	Valeur maximale ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
Analanampotsy	24	0,07	0,12
Anjahambe	42	0,06	0,14
Mahasoa	28	0,07	0,24
Vohitrakanga	-	-	-
Manankatafana	25	0,07	0,12
Menatany – Soanierana Ivongo	27	0,07	0,15
Soanierana Ivongo	29	0,06	0,12
Total	175	0,06	0,24

Tableau 19: Valeurs limites des doses d'exposition mesurées dans les sites miniers, dans les communes rurales d'Ampasimbe et de Soanierana Ivongo.

Villages et ville	Nombre de mesures	Valeur minimale ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)	Valeur maximale ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
Analanampotsy	45	0,07	0,48
Anjahambe	30	0,07	0,31
Mahasoa	-	-	-
Vohitrakanga	21	0,06	0,13
Manankatafana	16	0,07	1,20
Menatany – Soanierana Ivongo	-	-	-
Soanierana Ivongo	-	-	-
Total	112	0,06	1,20

Tableau 20: Valeurs limites des doses d'exposition mesurées sur les aires d'entreposage dans les sites d'exploitation.

Villages et ville	Nombre de mesures	Entreposage de minerais d'ilménite		Entreposage de minerais de zircon	
		Valeur minimale	Valeur maximale	Valeur minimale	Valeur maximale
		($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)	($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)	($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)	($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
Analanampotsy	22	0,20	2,80	11,80	16,20
Anjahambe	-	-	-	-	-
Mahasoa	-	-	-	-	-
Vohitrakanga	-	-	-	-	-
Manankatafana	-	-	-	-	-
Menatany – Soanierana Ivongo	-	-	-	-	-
Soanierana Ivongo	-	-	-	-	-
Total	22	0,20	2,80	11,80	16,20

Les tableaux des résultats ci-dessus montrent que trois cent neuf (309) mesures de débit de dose ambiante ont été effectuées dans les trois (03) communes rurales (Ampasimbe, Ampasina Maningory et Soanierana Ivongo) dont cent soixante-quinze (175) dans les villages à proximité des sites et dans la ville de Soanierana Ivongo, cent douze (112) à l'intérieur des cinq sites d'étude et vingt-deux (22) dans les aires d'entreposage d'ilménite et de zircon (Site d'Analanampotsy).

On a vu que les valeurs de débit de dose d'exposition dans les deux communes d'étude varient de $0,06 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ à $16,20 \mu\text{Sv.h}^{-1}$. Ces valeurs montrent que les valeurs de débit de dose ambiante varient suivant les lieux de mesure.

Néanmoins, si on compare les valeurs obtenues hors sites d'exploitation (dans les différents villages et la ville de Soanierana Ivongo) avec la limite acceptable de la zone surveillée (zone pour le public), on voit que ces valeurs sont inférieures à la limite acceptable qui est de $2,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$.

De même pour les cinq (05) sites d'étude autre que les aires d'entreposage d'ilménite et de zircon, les valeurs de débit de dose d'exposition sont largement inférieures à la limite acceptable pour la zone contrôlée (zone pour les travailleurs) qui est de $7,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$.

Par contre, sur les aires d'entreposage de zircon et d'ilménite des sites A et B d'Analanampotsy, on constate des valeurs de débit de dose élevées par rapport à la limite acceptable pour les travailleurs ($7,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$). Les valeurs minimale et maximale mesurées dans les aires d'entreposage de zircon sont respectivement $11,80 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ et $16,20 \mu\text{Sv.h}^{-1}$.

7.2. Prélèvement des échantillons (Sol, eau, air)

7.2.1. Échantillon de sol

Durant les travaux sur terrain, on a prélevé douze (12) échantillons de sols dont les caractéristiques des lieux de prélèvement sont les suivantes :

On a prélevé les échantillons suivants : S1 dans le tas de minerais brut, S2 dans le stock de minerais de zircon, S3 dans le tas de minerais de zircon et S4 dans le tas de minerais de zircon en cours d'emballage. Ces quatre (04) échantillons ont été prélevés dans le site A d'Analanampotsy.

S5 dans la zone en cours de réhabilitation, S6 et S7 dans les déchets de traitement. Ces trois (03) échantillons ont été prélevés dans le site B d'Analanampotsy.

S8 sur l'air d'entreposage de minerais d'ilménite, S9 et S10 dans la zone réhabilitée et revégétalisée. Ces trois (03) échantillons ont été prélevés dans le site d'Anjahambe.

S11 dans la zone réhabilitée et revégétalisée au nord de Manankatafana et S12 sur l'aire d'entreposage de minerais d'ilménite à Manankatafana.

Les concentrations (en Bq.kg^{-1}) et les coordonnées des points de prélèvement de sol dans la commune rurale d'Ampasimbe sont données dans le tableau 21 suivant.

Tableau 21: Concentrations et points de prélèvement des échantillons de sol dans la Commune rurale d'Ampasimbe

Code	Concentration (Bq.kg^{-1})			Teneur (ppm)			Coordonnées
	^{40}K	Famille ^{232}Th	Famille ^{238}U	^{40}K	^{232}Th	^{238}U	Latitude (S) Longitude (E)
Village Analanampotsy							
S01	1045	7535	3206	32306	1857	260	17° 09' 42,5"
	± 117	± 823	± 783	± 3630	± 203	± 63	49° 29' 12,5"

Code	Concentration (Bq.kg ⁻¹)			Teneur (ppm)			Coordonnées
	⁴⁰ K	Famille ²³² Th	Famille ²³⁸ U	⁴⁰ K	²³² Th	²³⁸ U	Latitude (S) Longitude (E)
S02	427 ±246	57825 ± 13239	14780 ± 4822	13196 ± 7627	14253 ± 3263	1197 ± 390	17° 09' 43,1" 49° 29' 12,4"
S03	663 ± 33	2140 ± 158	437 ± 99	20505 ± 1023	528 ± 39	35 ± 8	17° 09' 44,5" 49° 29' 10,4"
S04	327 ± 16	1861 ± 137	681 ± 153	10109 ± 506	459 ± 34	55 ± 12	17°09' 51,9" 49° 29' 05,8"
S05	619 ± 27	910 ± 64	461 ± 103	19142 ± 821	224 ± 16	37 ± 8	17° 09' 48,1" 49° 29' 09,7"
S06	439 ±253	63398 ± 17735	17295 ± 6779	13566 ±7841	15627 ± 4371	1400 ± 549	17° 10' 11,8" 49° 28' 56,3"
S07	450 ±260	87160 ± 28872	16606 ± 7255	13915 ±8043	21484 ± 7117	1345 ± 587	17° 10' 12,1" 49° 28' 56,3"
Village Anjahambe							
S08	136,5 ±78	3505 ± 255	1419 ± 319	4227,5 ±2443	864 ± 63	115 ± 26	17° 07' 12,8" 49° 30' 16,6"
S09	616 ± 31	3732 ± 274	1123 ± 253	19051 ± 951	920 ± 67	91 ± 20	17° 06' 42,8" 49° 30' 29,2"
S10	222 ± 18	11004 ± 930	5034 ± 1166	6866 ± 561	2712 ± 229	408 ± 94	17° 07' 43,8" 49° 30' 08,5"
Village Manankatafana							
S11	161 ± 7	1574 ± 112	444 ± 99	4965 ± 231	388 ± 28	36 ± 8	17° 04' 24,8" 49° 31' 25,4"
S12	343 ± 27	15391 ± 1328	3199 ± 738	10611 ± 843	3794 ± 327	259 ± 60	17° 04' 21,6" 49° 31' 26,1"

7.2.2. Echantillons d'eau

Durant les travaux sur terrain, onze (11) échantillons d'eau ont été prélevés dont les caractéristiques des lieux de prélèvement sont les suivantes :

On a prélevé les échantillons d'eau suivants : E01 dans le puits du village d'Analanampotsy, E02 sur la conduite qui vient de la rivière d'Itrotro, E03 sur l'eau de lavage mélangée aux minerais d'ilménite, E04 sur l'eau ruisselant de la spirale de séparation et E05 sur le puits de forage du FID (Fond d'Intervention pour le Développement) du village d'Analanampotsy.

E06 sur l'eau de pompage de puits de l'ancien village d'Anjahambe.

E07 sur le puits du village de Manankatafana, E08 sur l'eau de source (consommation et boisson) du village de Manankatafana, E09 sur l'eau de puits de pompage, village d'Andafaza et E10 sur le puits du village de Marofinaritra.

L'échantillon d'eau E11 a été prélevé dans le puits du village de Menatany.

Les concentrations (en Bq.L⁻¹) et les coordonnées des points de prélèvement d'eau dans les communes rurales d'Ampasimbe et de Soanierana Ivongo sont données dans le tableau 22 suivant :

Tableau 22: Concentrations et points de prélèvement des échantillons d'eau, Communes rurales d'Ampasimbe et Soanierana Ivongo

Code	Concentration (Bq.L ⁻¹)			Coordonnées Latitude (S) Longitude(E)
	Potassium-40	Famille Thorium	Famille Uranium	
Analanampotsy				
E01	32,0 ± 1,2	10,6 ± 0,7	11,8 ± 2,6	17° 07' 24,5" 49° 30' 08,7"
E02	17,1 ± 0,6	< 12	19,5 ± 4,4	17° 09' 42,9" 49° 29' 12 ,5"
E03	< 112	17,7 ± 1,2	10,1 ± 2,3	17° 09' 43,0" 49° 29' 12,0"
E04	7,3 ± 0,3	16,5 ± 1,1	3,6 ± 0,8	17° 09' 42,4" 49° 29' 12,2"

Code	Concentration (Bq.L ⁻¹)			Coordonnées Latitude (S) Longitude(E)
	Potassium-40	Famille Thorium	Famille Uranium	
Anjahambe				
E05	< 121	6,8 ± 0,5	0,7 ± 0,2	17° 09' 52,1" 49° 28' 50,7"
Manankatafana				
E07	< 116	11,1 ± 0,8	16,9 ± 3,8	17° 04' 02,8" 49° 31' 16,8"
E08	6,9 ± 0,2	16,9 ± 1,2	8,7 ± 1,2	17° 03' 34,4" 49° 31' 26,9"
E09	36,2 ± 1,4	8,1 ± 0,6	10,5 ± 2,3	17° 06' 00,6" 49° 30' 32,8"
E10	12,3 ± 0,4	17,7 ± 1,2	0,6 ± 0,1	17° 05' 51,1" 49° 29' 55,2"
Menatany				
E11	10,2 ± 0,4	7,1 ± 0,5	< 76	16° 57' 01,6" 49° 34' 41,7"

7.2.3. Prélèvement d'air

Quatre (04) mesures de radon dans l'air ont été effectuées dont deux (02) pour la commune rurale d'Ampasimbe et deux (02) pour celle de Soanierana Ivongo. Les caractéristiques des lieux de prélèvement sont les suivantes :

Les mesures de radon R01 et R02 ont été faites dans des maisons de familles villageoises tout près du site d'Anjahambe.

Les mesures de radon R03 et R04 ont été faites dans des maisons de familles installées au bord de la mer de la ville de Soanierana Ivongo.

Les concentrations (en Bq.m^{-3}) et les coordonnées des points de mesure de radon de l'air dans les communes rurales d'Ampasimbe et de Soanierana Ivongo sont données dans le tableau 23 suivant :

Tableau 23: Concentrations et points de mesure de radon de l'air, Communes rurales d'Ampasimbe et Soanierana Ivongo

Code	Durée de mesure (heures)	Taux de radioactivité du radon (Bq.m^{-3})			Coordonnées Latitude (S) Longitude(E)
		Valeur moyenne	Valeur minimale	Valeur maximale	
R01	12 h	$8,1 \pm 3,1$	$7,7 \pm 1,2$	15 ± 2	17° 07' 25,0" 49° 30' 08,9"
R02	12 h	$7,1 \pm 3,6$	$3,2 \pm 1,6$	10 ± 1	17° 07' 24,8" 49° 30' 04,6"
R03	12 h	< 2,3	-	$1,0 \pm 0,5$	16° 55' 50,2" 49° 35' 16,3"
R04	12 h	$7,0 \pm 2,3$	$4,7 \pm 1,4$	$7,0 \pm 3,5$	16° 55' 51,3" 49° 35' 17,3"
Référence	-	46	-	480	

7.3. Résultats d'analyse des échantillons environnementaux

7.3.1. Radioactivité des échantillons de sol

En général, les concentrations de la radioactivité dans les sols sont nettement supérieures aux valeurs de référence mondiale. Notons en particulier :

- l'échantillon S01 collecté sur le site d'Analanampotsy qui contient une concentration élevée de potassium-40 ;

- l'échantillon S06 collecté sur le site d'Analanampotsy qui contient une concentration élevée d'uranium;

- l'échantillon S07 collecté sur le site d'Analanampotsy qui contient une concentration élevée de thorium.

Tableau 24: Valeurs minimales et maximales de la radioactivité spécifique des échantillons de sol.

1. Site d'Analanampotsy

Nombre d'éch.	Radionucléides	Activité (Bq.kg ⁻¹) (teneur)			
		Min		Max	
07	Potassium	327 ± 16	(1,01 ± 0,05) %	1 045 ± 117	(3,23 ± 0,36) %
	Thorium	910 ± 64	(224 ± 16) ppm	87 160±28 872	(21 484 ± 7 117) ppm
	Uranium	437 ± 99	(35 ± 8) ppm	17 295 ± 6 779	(1 400 ± 549) ppm
	Rapport Th/U	4		15	

2. Site d'Anjahambe

Nombre d'éch.	Radio-nucléides	Activité (Bq.kg ⁻¹) (teneur)			
		Min		Max	
03	Potassium	136,5 ± 78	(0,42 ± 0,24) %	616 ± 31	(1,9 ± 0,1) %
	Thorium	3505 ± 255	(864 ± 63) ppm	11 004 ± 930	(2 712 ± 229) ppm
	Uranium	1123 ± 253	(91 ± 20) ppm	5 034 ± 1166	(408 ± 94) ppm
	Rapport Th/U		7		10

3. Site de Manankatafana

Nombre d'éch.	Radionucléides	Activité (Bq.kg ⁻¹) (teneur)			
		Min		Max	
02	Potassium	161 ± 7	(0,5 ± 0,02) %	343 ± 27	(1,1 ± 0,08) %
	Thorium	1 574 ± 112	(388 ± 28) ppm	15 391±1328	(3 794 ± 327) ppm
	Uranium	444 ± 99	(36 ± 8) ppm	3 199 ± 738	(259 ± 60) ppm
	Rapport Th/U		11		15

Tableau 25: Valeurs de référence de la radioactivité spécifique dans les sols

Radionucléide	Moyenne (Min – Max)	
Potassium	400 (140 – 850) Bq.kg ⁻¹	1,2 (0,4 – 2,6) %
Thorium	30 (11 – 64) Bq.kg ⁻¹	7 (3 – 16) ppm
Uranium	35 (16 – 110) Bq.kg ⁻¹	3 (1,3 – 8,9) ppm
Rapport Th/U	Roches primaires	3,5 (3,5 – 6,3)
	Sols et sables	5 (1,5 – 21)

Sources: UNSCEAR 2000 et J.J.W. ROGERS, J.A.S. ADAMS - Handbook of Geochemistry.

7.3.2. Radioactivité des échantillons d'eau

Le tableau 26 suivant montre les valeurs récapitulatives de la radioactivité spécifique dans les échantillons d'eau.

Tableau 26: Radioactivité spécifique dans les échantillons d'eau

Nombre d'échantillons	Radio- nucléides	Activité (Bq.L ⁻¹)	
		Minimum	Maximum
11	Potassium	6,9 ± 0,2	36,2 ± 1,4
	Thorium	3,4 ± 0,2	17,7 ± 1,2
	Uranium	0,6 ± 0,1	19,5 ± 4,4

Le tableau 26 ci-dessus récapitule les valeurs minimales et maximales de la radioactivité spécifique pour les échantillons d'eau prélevés dans les deux communes rurales. Ces résultats montrent que les eaux se trouvant aux alentours des sites contenant des minerais radioactifs ne présentent pas des risques de contamination radioactive pour le public et les travailleurs. Néanmoins, des précautions particulières doivent être prises pour la consommation et l'utilisation de ces eaux.

7.3.3. Radon dans l'air

Le tableau 23 ci-dessus montre que les valeurs de la radioactivité spécifique de radon de l'air mesurées dans les deux communes rurales, plus précisément dans le village d'Anjahambe de la commune rurale d'Ampasimbe et la ville de Soanierana Ivongo sont relativement faibles par rapport à la valeur de référence. La plupart des mesures donnent des valeurs moyennes de concentration du radon inférieures à la valeur moyenne de référence dont la limite acceptable pour le public est de 400 Bq.m⁻³ et de 1000 Bq.m⁻³ pour les travailleurs.

Ces faibles valeurs sont dues à l'effet du vent marin qui souffle en permanence sur les côtes et qui contribue au brassage et à la dilution des gaz radioactifs en suspension. En plus, les maisons traditionnelles (mur en « Falafa » et toiture en « Ravinala ») sont bien aérées car elles laissent traverser facilement le vent. Ce type de construction est très efficace pour éliminer le gaz radon dans la chambre.

CHAPITRE VIII : Interprétation des résultats

8.1. Calcul des doses d'exposition estimatives minimales et maximales

L'estimation des débits de dose annuels sera calculée à partir des trois (03) hypothèses suivantes :

D'après l'enquête que nous avons faite avec les travailleurs (travailleur normal). La base de calculs a été faite à partir d'un travailleur qui a :

- 1- Pour l'exposition externe : Un séjour sur le lieu de travail d'une durée de 8 heures par jour, durant 5 jours par semaine et sur 52 semaines par an, pour l'exposition aux rayonnements gamma des sols ;

Le débit de dose absorbé \dot{D} à 1 m du niveau de sol a été calculé en utilisant l'équation de l'UNSCEAR suivante :

$$\dot{D} \text{ (nGy.h}^{-1}\text{)} = (0,462 \times C_U) + (0,604 \times C_{Th}) + (0,0417 \times C_K) \quad (10.1)$$

Avec 0,462; 0,604 et 0,0417 sont des coefficients de dose en (nGy.h⁻¹ par Bq.kg⁻¹) pour ²³⁸U, ²³²Th and ⁴⁰K respectivement. Et

C_U , C_{Th} et C_K sont des concentrations en (Bq.kg⁻¹) pour ²³⁸U, ²³²Th et ⁴⁰K respectivement.

D'où le débit de dose effective annuel est donné par la relation suivante :

$$\dot{D} \text{ (mSv.an}^{-1}\text{)} = \dot{D} \text{ (nGy.h}^{-1}\text{)} \times (8 \times 5 \times 52) \times 0,7 \times 10^{-6} \quad (10.2)$$

Rapport de l'UNSCEAR 1993, avec 0,7 est le coefficient de conversion en (Sv.Gy⁻¹)

- 2- Pour l'ingestion : une consommation (ingestion) moyenne de 500 litres d'eau par an. L'estimation de débit de dose est calculée à partir de l'activité de ²²⁶Ra car ce dernier se dissout dans l'eau. Le débit de dose effective annuel est donné par la formule suivante :

$$\dot{D} \text{ (mSv.an}^{-1}\text{)} = (0,28 \times C_{Ra}) \times 500 \times 10^{-3} \quad (10.3)$$

Avec 0,28 est le facteur de conversion de ²²⁶Ra en (μSv.Bq⁻¹) et C_{Ra} est l'activité de ²²⁶Ra en (Bq.L⁻¹).

- 3- Pour l'inhalation: Un séjour en atmosphère confinée (maison) de 7000 heures annuelles, pour le cas de l'inhalation du radon.

Le débit de dose effective annuel est donné par la formule suivante :

$$\dot{D} \text{ (mSv.an}^{-1}\text{)} = C_{Rn} \times 0,4 \times 7000 \times 9 \times 10^{-6} \quad (10.4)$$

Avec C_{Rn} est la concentration du ²²²Rn en (Bq.m⁻³). Le facteur de conversion de dose est de

9 nSv/Bqh.m⁻³ qui est encore considéré comme un calcul approprié de la dose effective moyenne. D'après l'UNSCEAR 2000, le facteur d'équilibre à l'intérieur est de 0,4.

Pour chaque zone d'étude et pour chaque type d'exposition, on utilise les valeurs correspondant aux échantillons qui d'une part, génèrent le minimum de dose d'exposition et d'autre part génèrent le maximum. On obtient ainsi les valeurs minimales et maximales possibles de doses d'exposition.

Les doses d'exposition interne et externe estimatives, pour les personnes séjournant et/ou travaillant à l'intérieur ou à proximité des sites sont calculées à partir de la radioactivité des échantillons environnementaux mesurés dans la section précédente. On représente dans le **tableau 27** les résultats récapitulatifs, pour les valeurs extrêmes.

Tableau 27: Doses d'exposition calculées minimales et maximales (Région Analanjirofo).

Origine	Voie d'exposition	Dose annuelle calculée (mSv.an ⁻¹)	
		Minimum	Maximum
Sols	Externe	1,1 ± 00	87,88 ± 12,93
Eaux	Interne par ingestion	0,08 ± 00	2,73 ± 0,62
Air	Interne par inhalation	0,03 ± 00	0,40 ± 0,05
Total annuel		≈ 1,21 ± 00	≈ 91,01 ± 12,91
Valeur de référence		1-20	

Pour les travailleurs restant en permanence à proximité des minerais les plus radioactifs, ils reçoivent une dose maximale estimative d'exposition annuelle de **91,01 mSv.an⁻¹**. Cette valeur est due en général à la radioactivité des échantillons des minerais radioactifs existant dans les sites en particulier dans les échantillons de zircon et sur le stockage des minerais à ciel ouvert des sites d'exploitation. Si on compare cette valeur à la valeur limite annuelle (Norme réglementaire) d'exposition pour les travailleurs (**20 mSv.an⁻¹**), elle est largement supérieure.

8.2. Dosimétrie de la dose de rayonnements ambiants

Les doses d'exposition varient en fonction des lieux. En général, les débits de dose sont faibles. Les valeurs mesurées ne dépassent les limites réglementaires, ni dans les zones hors sites pour le public, ni sur sites d'exploitation pour les travailleurs.

Cependant, il y a des excès de débits de dose en certains points sur les aires d'entreposage de minerais. Les valeurs maximales mesurées sont de $2,8 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ sur les aires d'entreposage de minerais d'ilménite, et de $16,20 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ sur les aires d'entreposage de minerais de zircon.

Par contre, les entreposages de zircon, de faible dimension, sont fréquentés par les travailleurs qui déposent et manipulent les sacs de zircon.

Par conséquent, aucune disposition particulière n'est nécessaire pour la protection des travailleurs si ces derniers se déplacent temporairement sur ces sites. De même, la circulation temporaire du public dans les sites ne présente aucun risque.

Par contre, les travailleurs qui, pour des raisons professionnelles, sont susceptibles de travailler plus ou moins longtemps pendant des temps prolongés.

1) sur les dépôts naturels de sables lourds minéralisés riches en éléments radioactifs et présentant des niveaux élevés de bruit de fond radioactif,

2) à proximité des concentrés de minerais de zircon, c'est-à-dire tout près des zones de stockage, devront prendre les précautions nécessaires conformément aux principes ALARA, afin de minimiser les doses d'exposition aux rayonnements radioactifs. Pour minimiser les risques d'exposition aux rayonnements des travailleurs provenant des minerais de zircon, il est nécessaire de stocker ces derniers dans des endroits éloignés des lieux de travail ou de séjour.

8.3. Radioactivité des échantillons environnementaux

8.3.1. Échantillons de sol (minerais)

D'après le tableau 24, les valeurs de la radioactivité des échantillons de sol sont largement supérieures aux valeurs de référence mondiale. Ces échantillons proviennent des entreposages des minerais d'ilménite ou de zircon, sur les sites. Les valeurs du rapport de teneurs Th/U montrent que le thorium est plus abondant dans les minerais de zircon et d'ilménite. Ainsi, en raison des concentrations élevées de la radioactivité dans les sols ou des sites d'exploitation ou dans les concentrés de minerais, des précautions particulières doivent être prises lors de leur manipulation.

8.3.2. Echantillons d'eau

En général, la radioactivité spécifique des échantillons d'eau est faible. On peut donc en déduire que les radionucléides contenus dans les minerais radioactifs présents dans les zones d'étude se dissolvent très faiblement dans les eaux de surface et les eaux souterraines. De ce fait, les minéraux radioactifs seraient fortement fixés par les sables de l'encaissant. Les radionucléides (uranium et thorium) seraient donc difficilement mobilisables, ne favorisant pas leur libération dans la phase aqueuse. Par conséquent, le risque de contamination des eaux de boisson utilisées par les habitants limitrophes aux sites étudiés est limité. Néanmoins, des précautions particulières doivent être prises pour l'usage des eaux.

8.3.3. Prélèvement d'air

Dans la plupart des cas, la radioactivité spécifique du radon est suffisamment faible et ne dépasse pas les fluctuations de mesure. Le maximum d'émanation a été mesuré sur le site d'Anjahambe. Mais par rapport aux valeurs limites acceptables de 400 Bq.m^{-3} et 1000 Bq.m^{-3} respectivement pour le public et les travailleurs, les résultats de mesures montrent des valeurs relativement faibles. On peut expliquer ces faibles niveaux par l'aération naturelle des habitations locales et l'architecture moderne des constructions dans le camp (dallages, murs étanches) qui contribue à atténuer le phénomène de diffusion ascendante du gaz radon à partir du sol.

Ainsi, des dispositions d'atténuation du radon dans l'atmosphère à proximité du site de travail doivent toujours être prises en considération dans les activités futures.

8.3.4. Doses d'exposition minimales et maximales

Les valeurs calculées des doses d'exposition dans les cas extrêmes sont largement supérieures à la valeur limite annuelle de **20 mSv.an⁻¹** pour les travailleurs dans les aires de stockage de zircon et d'ilménite.

Ce cas hypothétique peut se produire dans les cas suivants:

- si une installation est construite sur un affleurement de minerais de sables lourds à radioactivité élevée, les personnes travaillant dans ces installations seront alors surexposées en permanence ;
- si les travailleurs restent en permanence près des zones de stockage ;
- si les travailleurs manipulent en permanence les minerais contenant des substances radioactives.

CONCLUSION

L'existence des minerais radioactifs dans les zones d'étude est confirmée notamment dans les sites d'exploitation. Par conséquent, leurs impacts aussi seraient réels si on n'adopte pas les mesures de protection et de sûreté appropriées pour les travailleurs et le public habitant autour des sites.

Le but de cette étude est de réduire l'impact des minerais radioactifs et d'assurer la protection des travailleurs et des habitants environnants contre les effets et les impacts des rayonnements ionisants émis par les minerais radioactifs sur la santé humaine et l'environnement, aujourd'hui et à l'avenir sans imposer des contraintes excessives aux générations futures.

Le risque d'exposition directe est faible pour les personnes de passage dans les sites, ou qui habitent hors site.

Par contre, le risque d'exposition aux rayonnements ionisants existe pour les employés qui travaillent directement sur les minerais radioactifs (Exposition prolongée des travailleurs à proximité immédiate et manipulation des minerais radioactifs), aussi bien sur les sites d'exploitation que sur les aires d'entreposage de zircon et d'ilménite.

Durant le transport de ces minerais, la dispersion des poussières radioactives provenant des sables minéralisés tels que le zircon et l'ilménite est réelle. Il y a donc un risque de contamination de la peau, d'ingestion et d'inhalation des poussières radioactives pour les travailleurs et le public.

Les débits de dose d'exposition mesurés dans les villages et leurs alentours sont inférieurs à la limite acceptable de $2,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$ pour le public. Dans les sites d'exploitation à part des sites d'entreposage, les valeurs ne dépassent pas $7,5 \mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$, limite acceptable pour les travailleurs. Pour les deux cas, les impacts sont minimes, néanmoins, des précautions particulières doivent être prises.

Pour les échantillons de sols prélevés et mesurés, quelques valeurs de la radioactivité spécifique pour le potassium et le thorium ainsi que l'uranium sont largement supérieures aux valeurs de référence mondiale (Voir tableau 25). Ces fortes valeurs entraînent des impacts majeurs s'il n'y a pas prise de précautions pour les travailleurs manipulant ces minerais radioactifs.

Pour les échantillons d'eau, les valeurs de la radioactivité spécifique pour les trois (03) éléments (Potassium, Thorium et Uranium) sont dans le même ordre de grandeur que les

références mondiales, et montrent que les radionucléides ne se dissolvent pas facilement dans les eaux environnantes. Néanmoins, pour éviter l'impact sur la santé du public et des travailleurs, des précautions particulières doivent être prises lors de son utilisation.

Pour les mesures de radon de l'air, les valeurs moyennes de la radioactivité spécifique sont inférieures à la valeur moyenne de référence égale à 46 Bq.m^{-3} . Ces faibles valeurs sont dues au vent soufflant fort sur le littoral de la commune d'Anjahambe. L'impact du gaz radon dans cette région est faible.

Pour la dose maximale estimative d'exposition annuelle de $91,01 \text{ mSv.an}^{-1}$ (Voir tableau 27). Cette valeur est largement supérieure à la valeur limite d'exposition annuelle pour les travailleurs (20 mSv.an^{-1}). Elle montre que l'impact est inéluctable si les travailleurs restent très longtemps à proximité des stockages de minerais de zircon.

Ainsi, les niveaux de débit de dose d'ambiance mesurés dans les zones d'étude à savoir sur les sites de prospection et d'exploitation, sur les sites en cours de réhabilitation, et à leurs proximités, sont inférieurs aux niveaux trouvés dans d'autres régions du monde où la radioactivité naturelle est élevée.

Pour replacer ces valeurs dans le contexte mondial, et à titre de référence, notons que certaines régions dans le monde présentent un niveau élevé de radioactivité naturelle.

Les plages de la région de Guarapari au Brésil avec une dose d'exposition aux rayonnements relativement élevée ($63 \mu\text{Sv.h}^{-1}$), due aux minéraux de monazites dans les sables minéralisés ; ou encore la région de Ramsar en Iran, avec une dose d'exposition aux rayonnements de $11,9 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ due à l'accumulation de radium-226 provenant des sources thermales.

SUGGESTIONS

Pour minimiser les risques et pour éviter l'impact majeur dus aux minerais radioactifs, la prévention est un des moyens les plus efficaces.

Avant l'ouverture d'un site minier, le choix du principe d'optimisation engage de façon déterminante ce qui sera le niveau des expositions subies par les travailleurs de cette exploitation. Cette prise en compte des critères radiologiques à côté des critères techno-économiques doit également apparaître tout au long de la vie de la mine, au moment des décisions nouvelles devant être prises par l'exploitant.

La politique d'optimisation de la radioprotection impose une deuxième étape qui consiste à maintenir des conditions optimales vis-à-vis des risques radiologiques pendant la durée de l'exploitation. C'est dans le cadre de cette deuxième étape que l'action des services de radioprotection doit se concrétiser chaque jour sur les chantiers.

La présence régulière d'un agent de radioprotection dans les zones de travail est nécessaire pour inciter le personnel exploitant à veiller à la mise en œuvre des moyens classiques de limitation des expositions.

Cette action de tous les jours permet ainsi d'obtenir de bonnes performances radiologiques et surtout de les maintenir. Leur amélioration nécessite, cependant, de nouvelles options techniques de prévention.

Pour éviter l'impact de ces minerais radioactifs sur la santé du public et des travailleurs, il faut mettre en place les mesures de protection et de sûreté appropriées. L'application des trois principes de la radioprotection (Justification des pratiques, optimisation de la protection et de sûreté « ALARA » et la limitation des doses) est à suggérer lors du travail sur site contenant des sables lourds minéralisés. Il est nécessaire de limiter au minimum possible le temps d'exposition et de garder le maximum possible la distance par rapport aux minerais radioactifs. Le port des équipements de protection individuelle (Dosimètre individuel pour le suivi dosimétrique, gants, masques à poussière, combinaison, ...) est obligatoire durant le travail sur site. Pour éviter la dispersion des poussières radioactives dans l'environnement, l'arrosage des sables radioactifs notamment le stockage de minerais de zircon est obligatoire.

La limitation des doses d'exposition lors du transport : lors du transport des produits radioactifs, tels que le zircon, il est conseillé de mettre les marchandises radioactives dans un

emballage étanche, de transporter ces produits dans des camions munis de bâches, et à l'état humide afin de minimiser la dispersion de poussières.

Pour le risque dû au radon-222 et à ses descendants : contrôle du transport convectif du radon -222 dans les sables lourds minéralisés (mise en dépression des vieux travaux ; mise en pression des ouvrages en exploitation) ;

Pour les expositions externes, dans le cas de gisements à forte teneur : blindage des engins ; organisation de l'exploitation visant à limiter les sources d'irradiation (remblayages) ; l'éloignement des agents par rapport aux sources est un moyen d'action efficace et, dans ce sens, la mécanisation des chantiers dans les mines, l'introduction d'engins miniers téléopérés ou l'automatisation des usines sont à considérer.

Pour les travailleurs, les minéraux radioactifs ne doivent pas être transportés dans les poches de vêtement. On s'abstiendra autant que possible de tenir les minéraux radioactifs dans les mains. Après tout contact avec un matériau radioactif, on se lavera soigneusement les mains pour éviter la contamination.

Perspectives

La côte nord- est jusqu'au sud-est de Madagascar est riche en sables lourds minéralisés. Par conséquent, les études (Méthode, suggestion, ...) effectuées dans la région d'Analanjirofo pourront être appliquées à tous les sites d'exploration et d'exploitation des minerais radioactifs existant à Madagascar, à savoir la côte Nord-est depuis Mananara Nord jusqu'au Sud-est (Manakara, Farafangana, Tolagnaro Sainte luce, Petriky, Mandena,...).

Pour protéger l'homme et l'environnement à l'avenir sans imposer des contraintes excessives aux générations futures, il est nécessaire de mesurer l'évolution des niveaux de la radioactivité de cette région avant, pendant et après exploitation.

Références bibliographiques

- [1] **AIEA**, **RADIOPROTECTION ET SÛRETÉ DES SOURCES DE RAYONNEMENTS** : Normes fondamentales internationales de sûreté édition provisoire, VIENNE, 2011.
- [2] **André FOUCART**, **Les minéraux radioactifs sont-ils dangereux?** Copyright 4M, D/2005/7187/10.
- [3] **BAPE**, **Rapport d'enquête, Projet d'exploitation d'une mine et d'une usine de niobium à Oka**, 2002, Québec, Canada
- [4] **B. Chareyron** , **CRIIRAD : NOTIONS DE BASE RADIOACTIVITE**, Annexes Année 2006.
- [5] **Benjamin ROTENBERG**, These de Doctorat, « Modélisation multi-échelles du comportement de l'eau et des ions dans les argiles », Université de PIERRE ET MARIE CURIE, Paris 6, 15 octobre 2007.
- [6] **BRAMKI AMINA**, Mémoire de magister en physique, « Mesure par spectrométrie gamma de la radioactivité naturelle présente dans des échantillons de l'environnement », Université Mentouri Constantine, Algérie, 2011.
- [7] **CCSN**, **Rapport annuel 2009 sur les activités de gestion de l'uranium**, 2009, Canada
- [8] **CEAEQ**, **Modes de conservation pour l'échantillonnage des sols**, 22 janvier 2013, Québec, Canada
- [9] **Cloudylabs**. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.google.mg/?gws_rd=cr,ssl&ei=Uqt8WMLcFoj7UP6RmrAI#q=Cloudylabs,+les+minerais+radioactifs> (Consulté le 01/01/2016)
- [10] **COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE**, Eude d'Impact du Centre de CADARACHE, « L'Homme et la Radioactivité ».
- [11] **DAMIEN CRESSIER**, Thèse de Doctorat : « Synthèse et Evaluation de Nouveaux Dérivés Organiques et Organométalliques Contre les Effets des Rayonnements Ionisants, 13 Octobre 2010, Université de Toulouse.
- [12] **D. DOUMONT F. LIBION**, **Impact sur la santé des différents polluants : quels effets à court, moyen et long terme ?** Service Communautaire de Promotion de la Santé, Communauté française de Belgique, janvier 2006.
- [13] **Fiche CRIIRAD N°16-30, Minéraux radioactifs, Version 4 / 6 avril 2016, Valence, France.**

Références bibliographiques

- [14] **GEORGE SHAW**, Radioactivity in the Environment Volume 10, Radioactivity in the terrestrial environment, University of Nottingham Nottingham, U.K, 2007.
- [15] **Guy. LACOURLY**, « Les pollutions radioactives, que faut-il en penser ? », 92 Fontenay-Aux-Roses
- [16] **HAMMOUM DJAMILA**, Mémoire de Master, Mesure des radiations naturelles des sédiments et de sol de Hammam Boughrara, « Oued Mouillah » 28 juin 2015, Université Abou Bekr Belkaid, Algérie.
- [17] **ICPR PUBLICATION 103**, the 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, French Edition by Jean Claude Nénot assisted, Jean Brenot, Dominique Laurier, Alain Rannou and Dominique Thierry, Paris, France, 2007.
- [18] **INSPQ**, Cadre de référence en gestion des risques pour la santé dans le réseau québécois de la santé publique, janvier 2003, Quebec, Canada
- [19] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY**, International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series N° 115, VIENNA, 1996.
- [20] **INTERNATIONAL ATOMIQUE ENERGY AGENCY**, Postgraduate Educational Course in Radiation Protection and the Safety of Radiation Sources (PGEC), “Protection against occupational exposure”, Alger, Algerie, novembre 2015.
- [21] **INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY**, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, International Basic Safety Standards, Interim Edition, GSR Part 3, VIENNA, 2011.
- [22] **J.B. FLEUTOT**, Les effets des rayonnements ionisants sur la sante, Sureté Nucléaire de Défense.
- [23] **KLAUS FROEHLICH**, Radioactivity in the Environment, Environmental radionuclides: Tracers and timers of terrestrial processes, Vienna, Austria, 2010.
- [24] **LAKEHAL CHAOUKI**, Mémoire de magister en physique, « Mesures qualitatives et quantitatives des éléments radioactifs naturels présents dans des échantillons de l'environnement par spectrométrie γ », Université de Mentouri Constantine, Algérie.
- [25] **MARION JEAMBRUN**, These de Doctorat, « l'uranium et ses descendant dans la chaîne alimentaire », Université de Strasbourg, 24 septembre 2012.

Références bibliographiques

- [26] **MOEBIUS Siegurd-Siegfried**, Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences, Nouveaux développements dans la détermination des radionucléides naturels par scintillation liquide, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, 05 janvier 2004.
- [27] **NUCLEAR ENERGY AGENCY**, NEA No. 7062, Managing Environmental and Health Impacts of Uranium Mining, 2014.
- [28] **N. Karunakara et al.** / Results in Physics 4 (2014) 20–27, Assessment of ambient gamma dose rate around a prospective uranium mining area of South India – A comparative study of dose by direct methods and soil radioactivity measurements.
- [29] **PAVEL P. POVINEC**, Radioactivity in the Environment Volume 11, Analysis of environmental Radionuclides, Faculty of Mathematics, Physics and Informatics, Comenius University, Bratislava, Slovakia, 2008.
- [30] **PHYSIQUE 113** : Cours de Radioactivité 2009-2010, 22p.
- [31] Rapport IRSN n° 2007/01, Evaluations dosimétriques de l'exposition potentielle liée à l'accumulation naturelle d'uranium et de thorium dans les sables de certaines plages du littoral de Camargue, Institut de Radioprotection et de Sureté Nucléaire, France.
- [32] **RAVELOMANANTSOA Solofonirina Dieudonné**, Thèse de Doctorat d'Etat ès-Sciences, Contribution à l'étude de l'environnement radioactif à Antananarivo : Evaluation de l'exposition du public aux rayonnements X et gamma telluriques et au radon, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, 02 mai 2001.
- [33] **RAVOSON Heritiana Nomenjanahary**, Diplôme d'études Approfondies, Contribution à l'étude de la radioactivité des eaux de consommation à Madagascar. Cas de la localité d'Alasora, 30 octobre 2007, Antananarivo
- [34] **Réglementation en Radioprotection** à Madagascar, LOI n° 97-041 du 02 janvier 1998.
- [35] **R. Veiga et al.** / Radiation Measurements 41 (2006) 189–196, Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands.
- [36] **Société Nucléaire Canadienne**, Feuillet éducatif sur la désintégration de l'uranium (du Po-210 en moi ?) http://www.cns-snc.ca/ecc/cnsecc_fr.html.
- [37] **Société Nucléaire Canadienne**, Feuillet éducatif sur Nu-Salt ou NoSalt comme, source radioactive, www.cns-snc.ca.
- [38] **Stéphane GUEDRON**, These de doctorat : « Impact de l'exploitation minière en Guyane française sur les flux de mercure vers les écosystèmes aquatiques », 22 février 2008, Université Joseph Fourier - Grenoble I.

Références bibliographiques

[39] **Textes du Droit minier Malagasy**, LOI N°99-022 du 19 août 1999 portant Code minier modifiée par la Loi n°2005-021 du 17 octobre 2005.

[40] **TSIRY LOVA TSIAMIDY**, Mémoire de Diplôme d'Etudes Supérieures Spécialisées, Option études d'impacts environnementaux ; « Etude d'impact environnemental du Projet d'exploitation d'ilménite et de Zircon dans la commune rurale d'Anosiala, District de Manakara, Région Vatovavy Fitovinany»; ESPA, 10 octobre 2011.

[41] **Tony GERYES, These de Doctorat**, « Etude expérimentale et numérique de la dégradation de la mesure nucléaire d'aérosols radioactifs prélevés avec des filtres de surveillance », Université Paris – Est, septembre 2009.

[42] **UNIVERSITE DE LAVAL**, Étude sur l'état des connaissances, les impacts et les mesures d'atténuation de l'exploration et de l'exploitation des gisements d'uranium, Québec, 10 avril 2014.

[43] **UNSCEAR 1993**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, UNITED NATIONS, New York, 1993.

[44] **UNSCEAR 2000**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, UNITED NATIONS, New York, 2000.

[45] **UNSCEAR 2000**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, Annexe B; 2000.

[46] **UNSCEAR 2008**, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Report to the General Assembly, vol. 1, Annex. B; 2008.

[47] **VINCENT AMABILI RIVET**, « Impacts de l'exploitation des mines d'uranium sur la santé humaine », Université de Sherbrooke, août 2013.

Annexe 1

Tableau des doses d'effets déterministes

Effets déterministes

Tableau a : Effets déterministes décrits pour des expositions à des rayonnements gamma ou X

Effets déterministes recensés	Dose d'irradiation
Stérilité masculine temporaire	à partir de 0,15 Gy
Diminution temporaire des leucocytes (famille de globules blancs)	de 0,2 à 1 Gy
Nausée, asthénie	de 1 à 2 Gy
Modification de la formule sanguine	
Effet immunodépresseur (risques d'infections)	
Sous surveillance médicale, le retour à la normale se produit rapidement.	
Risque de stérilité féminine	à partir de 2,5 Gy
Stérilité masculine définitive	de 3,5 à 6 Gy
Aplasie (arrêt ou insuffisance du développement d'un tissu ou d'un organe).	à partir de 4,5 Gy
En l'absence de traitement, au moins la moitié des personnes irradiées meurent et il existe des risques de séquelles.	
Atteinte oculaire (survenue possible de cataracte de 1 à 10 ans après l'irradiation)	2 à 5 Gy
Atteinte gastro-intestinale	6 Gy
Atteinte pulmonaire	8 Gy
Coma, mort cérébrale	au-delà de 10 Gy
Mort inévitable	

Tableau b : Facteur de pondération radiologique

Type et domaine d'énergie du rayonnement	Facteur de pondération radiologique (w_R)
Photons, toutes énergies	1
Electrons et muons, toutes énergies	1
Neutrons, énergie < 10 keV	5
10 keV à 100 keV	10
> 100 keV à 2 MeV	20
> 2 MeV à 20 MeV	10
>20 MeV	5
Protons, autres que les protons de recul, énergie >2 MeV	5
Particules alpha, fragments de fission, noyaux lourds	20

Source : AIEA Normes de sûreté No. GSR Part III

^aA l'exclusion des électrons Auger reçus par l'ADN à partir des noyaux cellulaires, pour lesquels il faut tenir compte de considérations microdosimétriques particulières.

Tableau c : Facteurs de pondérations tissulaires

Tissu ou organe	facteur de pondération tissulaire (w_T)
Gonades	0,20
Moelle osseuse (rouge)	0,12
Côlon ^a	0,12
Poumon	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Sein	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres tissus ou organes ^b	0,05

Source : AIEA Normes de sûreté No. GSR Part III

^aLe facteur de pondération pour le côlon est appliqué à la moyenne massique de la dose équivalente dans les parois du gros intestin supérieur et inférieur.

^b Pour les besoins du calcul, la rubrique «autres tissus ou organes» comprend les glandes surrénales, le cerveau, la région extra-thoracique, l'intestin grêle, les reins, les muscles, le pancréas, la rate, le thymus et l'utérus. Dans les cas exceptionnels où le tissu de cette catégorie le plus exposé reçoit la dose équivalente engagée la plus élevée parmi tous les organes, un facteur de pondération de 0,025 est appliqué à ce tissu ou organe et un facteur de pondération de 0,025 à la dose moyenne dans le reste des «Autres tissus et organes».

Tableau d: Limites réglementaires des doses pour les travailleurs et le public

Situations d'exposition planifiée	Exposition professionnelle	20mSv par an en moyenne sur cinq années consécutives (100 mSv en cinq ans) et de 50 mSv en une seule année
	Exposition du public	Une dose efficace de 1 mSv par an.
Situations d'exposition existante	Exposition du public	Une dose efficace de 1 à 20 mSv par an

Source : AIEA Normes de sûreté No. GSR Part III

Annexe 2

Carte des villages

Village Analanampotsy

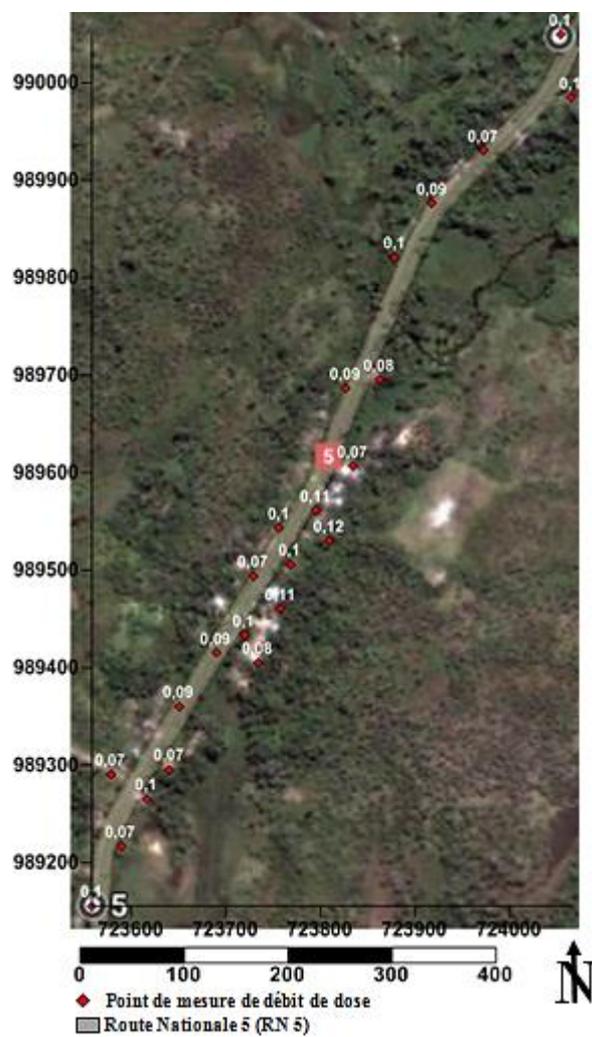


Figure a : Village Analanampotsy

Villages d'Anjahambe

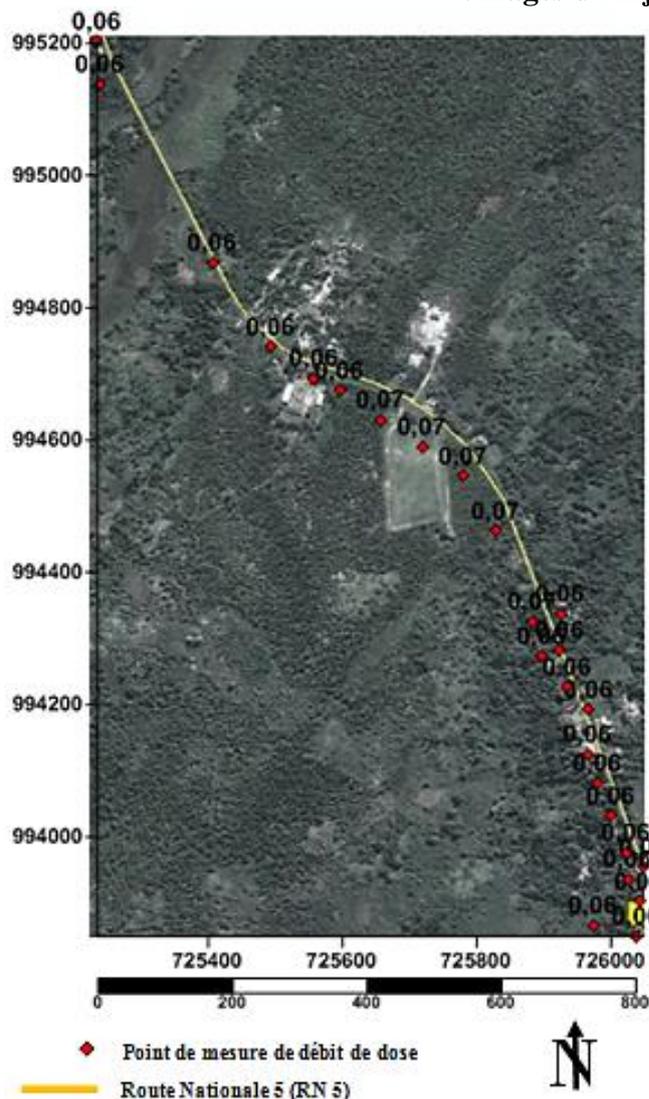


Figure b : Nouveau village d'Anjahambe



Figure c : Ancien village d'Anjahambe

Village Mahasoa



Figure d : Village Mahasoa

Village Manankatafana



Figure e : Village Manankatafana

Suivant le littoral
Site Menatany-Soanierana Ivongo

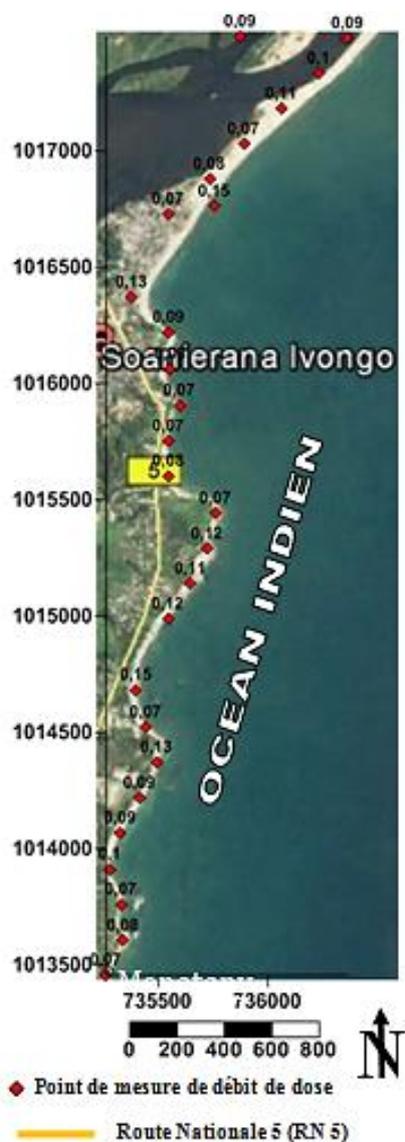


Figure f: Littoral Site
Menatany-Soanierana Ivongo

Ville de Soanierana Ivongo

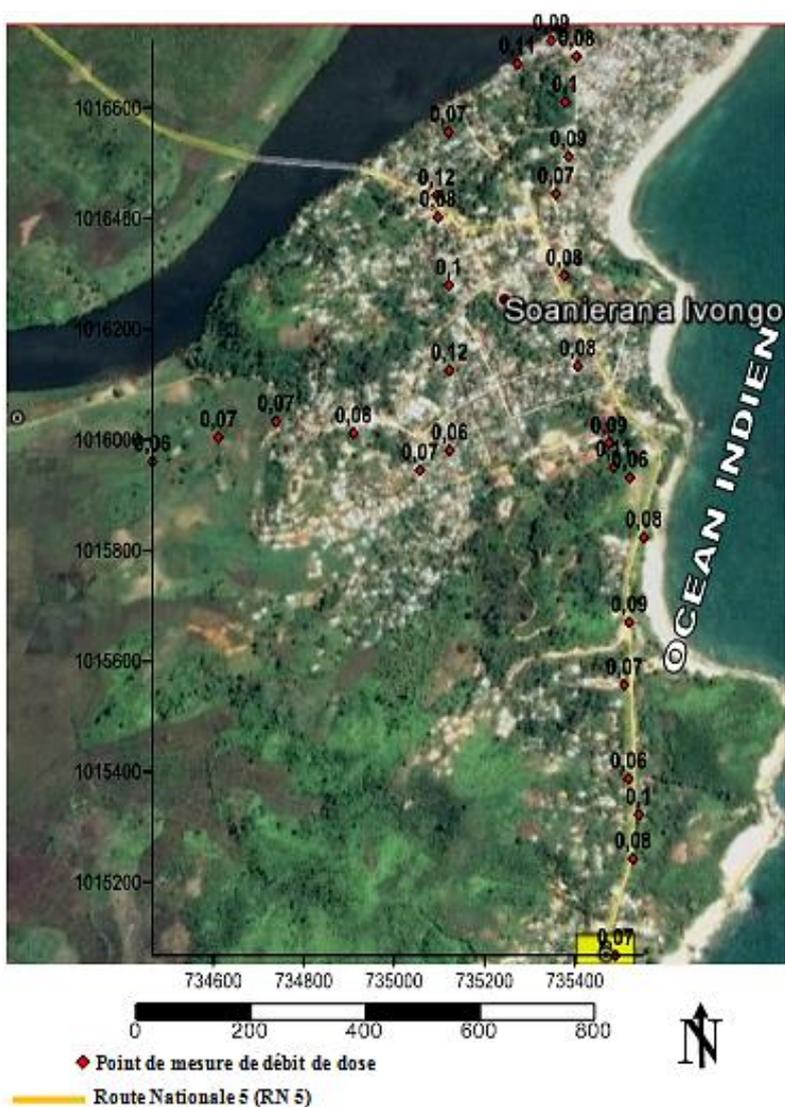


Figure g : Ville de Soanierana Ivongo

Annexe 3

Photo des sites et entreposages

1- Anjahambe



a. Entreposage d'ilménite d'Anjahambe



b. Site d'Anjahambe

2- Analanampotsy



a. Entreposase de Zircon Analanampotsy



b. Site Analanampotsy

3- Vohitrakanga



a. Site Vohitrakanga

4- Manakatafana



b. Site Manakatafana

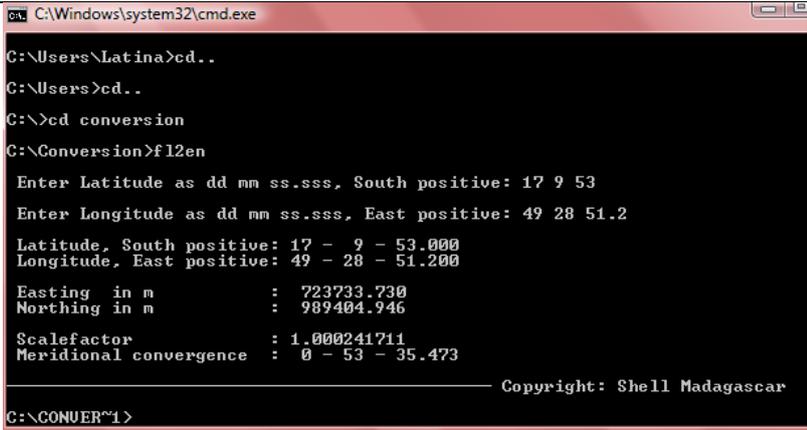
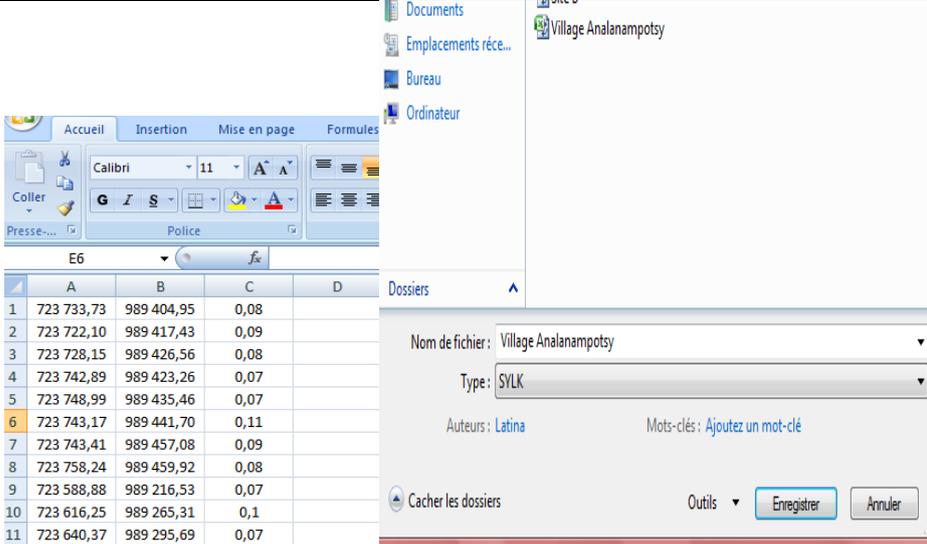
5- Menatany



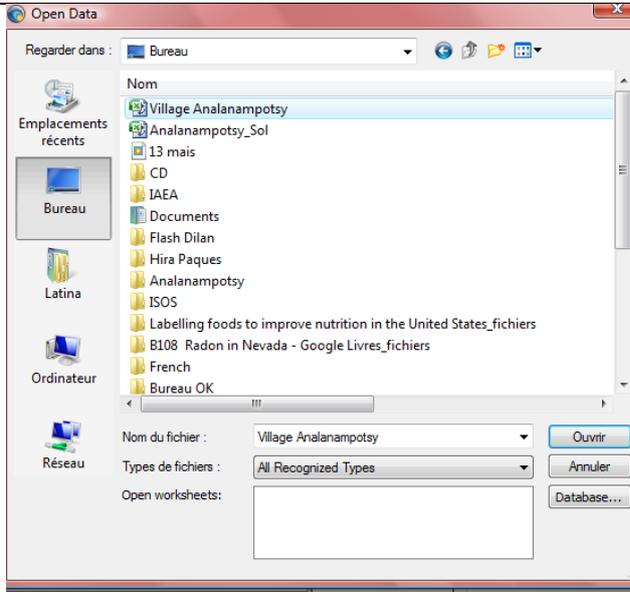
a. Entreposage d'ilménite de Menatany

Annexe 4

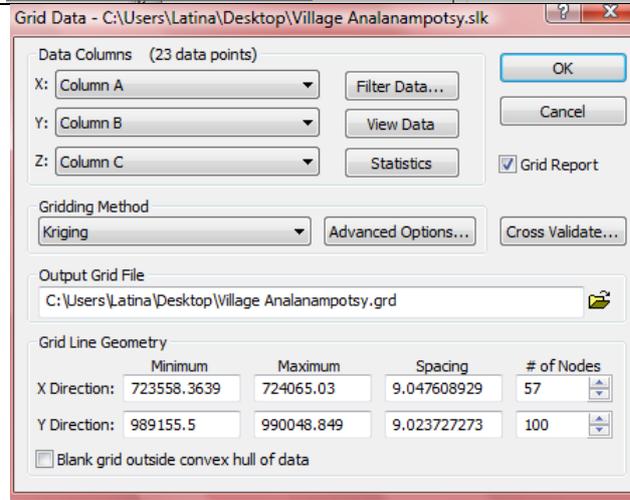
Exemple d'utilisation de logiciel Surfer 11

<p>1- Ouvrir l'invite de commande (cmd)</p> <p>2- Utiliser le logiciel de conversion (fl2en) pour convertir les coordonnées géographiques (degré, minute, seconde) longitude-latitude en coordonnées Laborde (unités métriques)</p>	 <pre> C:\Windows\system32\cmd.exe C:\Users\Latina>cd.. C:\Users>cd.. C:\>cd conversion C:\Conversion>fl2en Enter Latitude as dd mm ss.sss, South positive: 17 9 53 Enter Longitude as dd mm ss.sss, East positive: 49 28 51.2 Latitude, South positive: 17 - 9 - 53.000 Longitude, East positive: 49 - 28 - 51.200 Easting in m : 723733.730 Northing in m : 989404.946 Scalefactor : 1.000241711 Meridional convergence : 0 - 53 - 35.473 Copyright: Shell Madagascar C:\CONUER~1> </pre>																																																												
<p>3- Copier les coordonnées Laborde en fichier excel avec les débits de dose correspondants.</p> <p>4- Enregistrer le fichier excel en type SYLK.</p>	 <table border="1" data-bbox="448 1010 740 1285"> <thead> <tr> <th></th> <th>A</th> <th>B</th> <th>C</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>723 733,73</td><td>989 404,95</td><td>0,08</td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td>723 722,10</td><td>989 417,43</td><td>0,09</td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td>723 728,15</td><td>989 426,56</td><td>0,08</td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td>723 742,89</td><td>989 423,26</td><td>0,07</td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td>723 748,99</td><td>989 435,46</td><td>0,07</td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td>723 743,17</td><td>989 441,70</td><td>0,11</td><td></td></tr> <tr><td>7</td><td>723 743,41</td><td>989 457,08</td><td>0,09</td><td></td></tr> <tr><td>8</td><td>723 758,24</td><td>989 459,92</td><td>0,08</td><td></td></tr> <tr><td>9</td><td>723 588,88</td><td>989 216,53</td><td>0,07</td><td></td></tr> <tr><td>10</td><td>723 616,25</td><td>989 265,31</td><td>0,1</td><td></td></tr> <tr><td>11</td><td>723 640,37</td><td>989 295,69</td><td>0,07</td><td></td></tr> </tbody> </table>		A	B	C	D	1	723 733,73	989 404,95	0,08		2	723 722,10	989 417,43	0,09		3	723 728,15	989 426,56	0,08		4	723 742,89	989 423,26	0,07		5	723 748,99	989 435,46	0,07		6	723 743,17	989 441,70	0,11		7	723 743,41	989 457,08	0,09		8	723 758,24	989 459,92	0,08		9	723 588,88	989 216,53	0,07		10	723 616,25	989 265,31	0,1		11	723 640,37	989 295,69	0,07	
	A	B	C	D																																																									
1	723 733,73	989 404,95	0,08																																																										
2	723 722,10	989 417,43	0,09																																																										
3	723 728,15	989 426,56	0,08																																																										
4	723 742,89	989 423,26	0,07																																																										
5	723 748,99	989 435,46	0,07																																																										
6	723 743,17	989 441,70	0,11																																																										
7	723 743,41	989 457,08	0,09																																																										
8	723 758,24	989 459,92	0,08																																																										
9	723 588,88	989 216,53	0,07																																																										
10	723 616,25	989 265,31	0,1																																																										
11	723 640,37	989 295,69	0,07																																																										
<p>5- Ouvrir le logiciel Surfer 11</p>																																																													
<p>6- Une barre du menu en haut. On utilise principalement les menus Grid et Map</p>																																																													

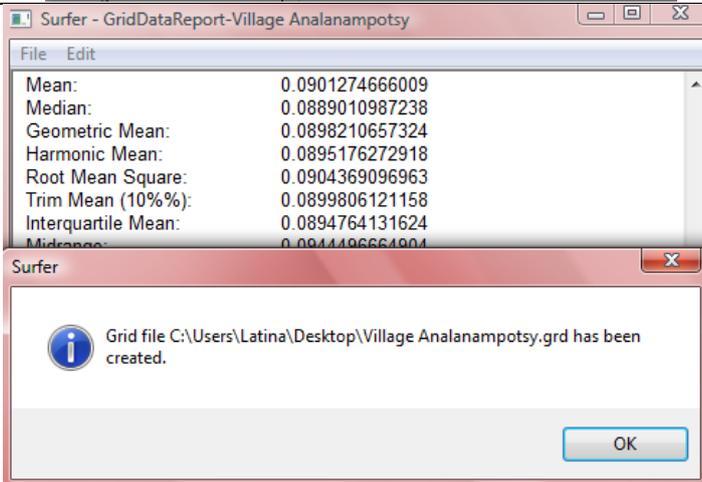
7- Cliquer Grid et Data



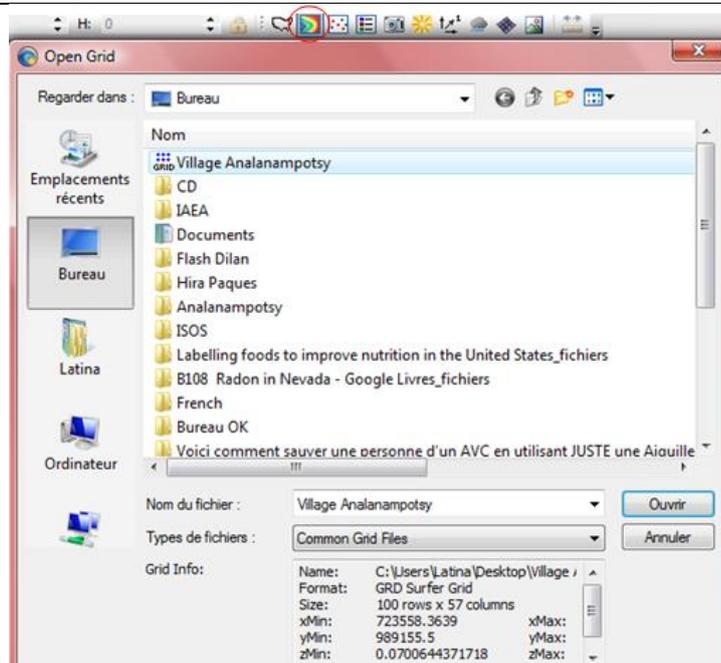
8- Ouvrir Data et OK



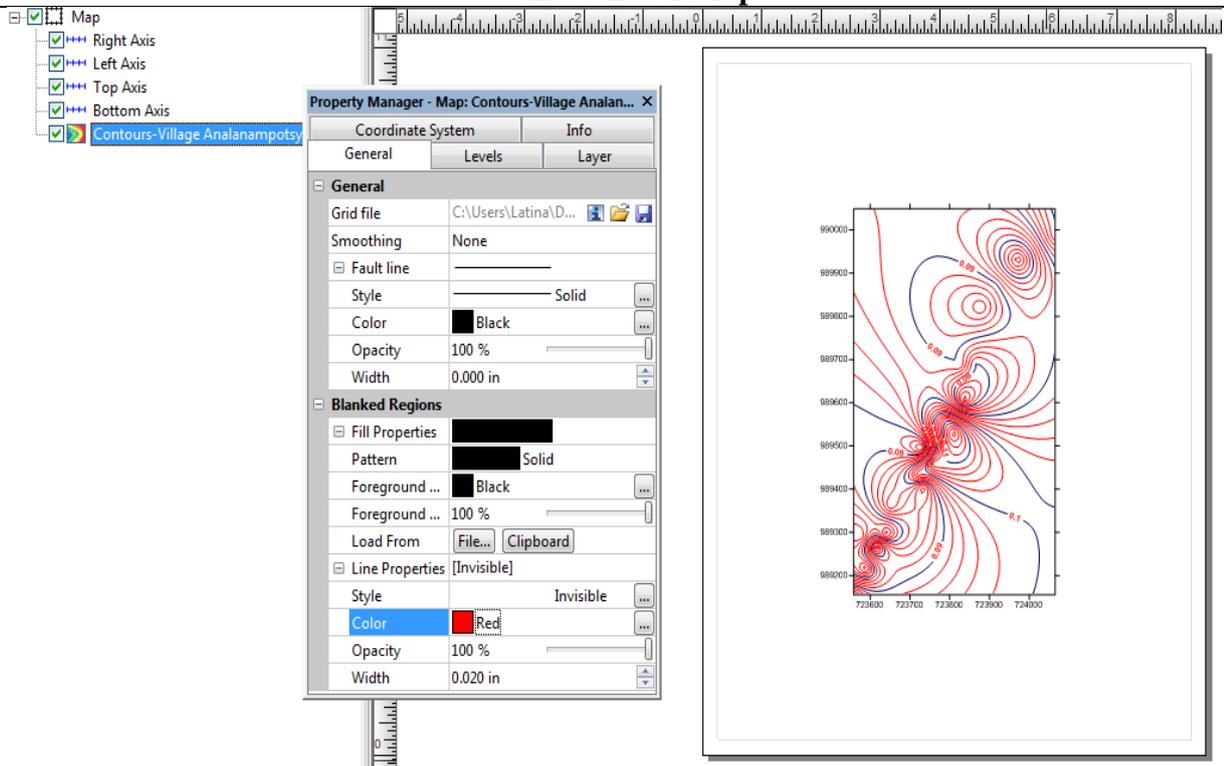
9- Fichier Grid a été créé



10- Ouvrir Grid

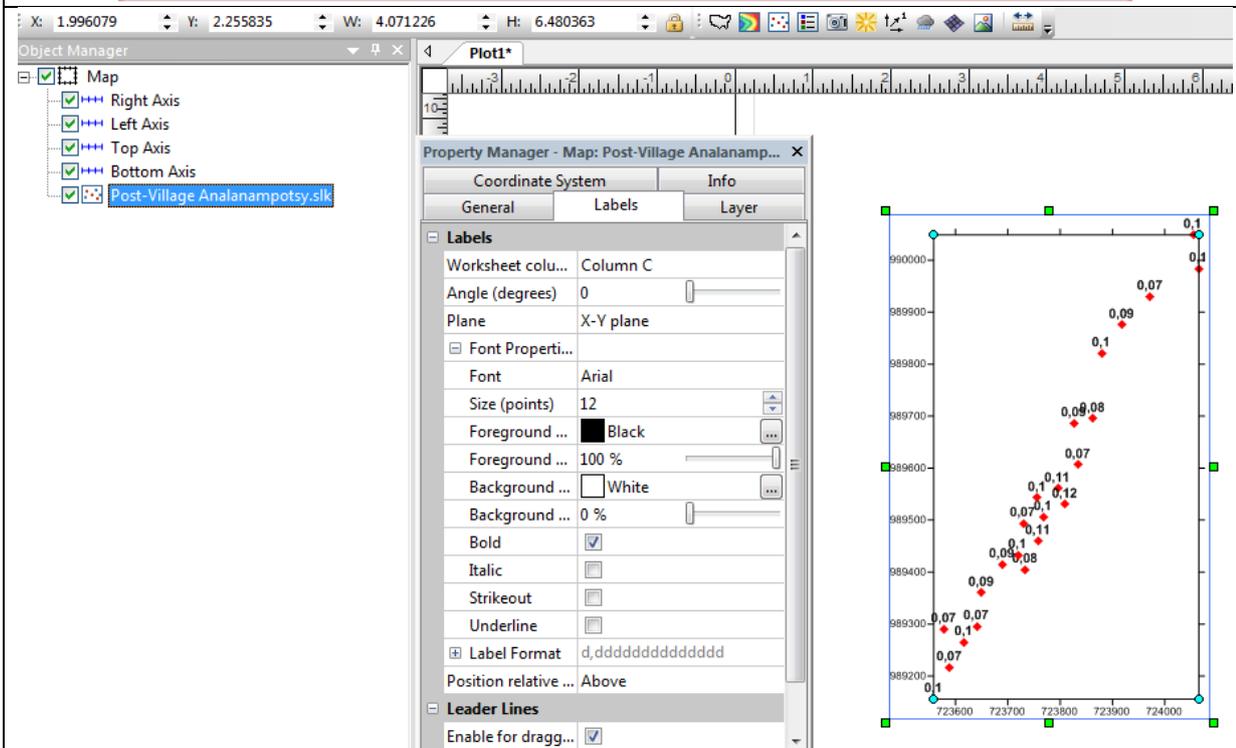
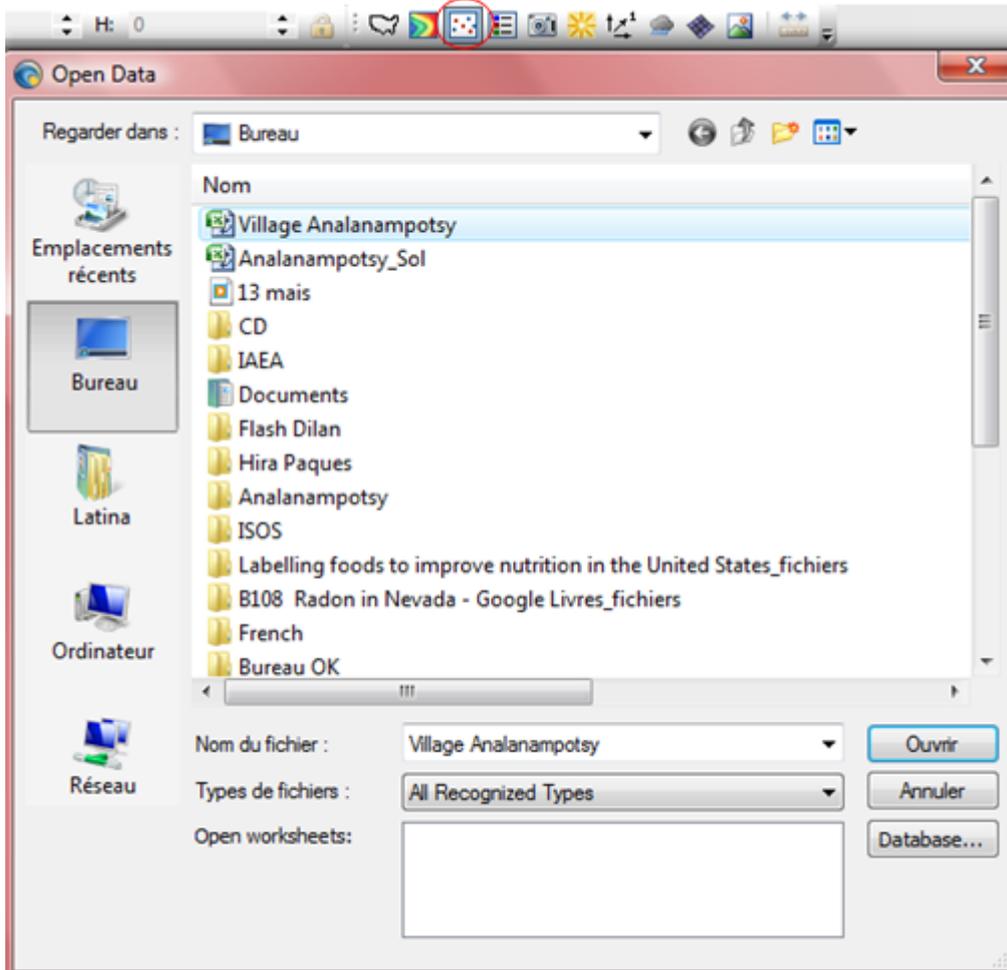


11- Contour Map



12- Ouvrir Data

13- Post Map



14- Superposition des deux cartes

15- New base Map

16- Chercher la carte dans son emplacement (Dossier)

The screenshot displays a GIS application window titled "Plot1* Village analanampotsy*". The interface includes a toolbar at the top with various icons for map manipulation. On the left, the "Object Manager" panel shows a hierarchical tree of map elements:

- Map Scale (checked)
- Map (checked)
 - Right Axis (unchecked)
 - Left Axis (checked)
 - Top Axis (unchecked)
 - Bottom Axis (checked)
- Post-Village Analanampotsy.sk (checked)
- Map (checked)
 - Right Axis (unchecked)
 - Left Axis (unchecked)
 - Top Axis (unchecked)
 - Bottom Axis (unchecked)
- Base-Photo_Village_Alanampotsy.png (checked)
 - Image (checked)

In the center, a "Property Manager - Nothing Selected" dialog box is open, showing an "Info" tab and "No selection" text. The main map area on the right shows a satellite-style map of a village with a grid overlay. The vertical axis (Y) ranges from 98900 to 99000, and the horizontal axis (X) ranges from 729000 to 729400. A scale bar at the bottom of the map indicates distances up to 400 units. A ruler at the top of the window shows a scale from -5 to 8 units.

Determination of Natural Radioactivity in the North East Beach Sands of Madagascar

**Randriamora Tiana Harimalala¹, Razafindramiandra Hary Andrianarimanana¹,
Raelina Andriambololona³, Ravelomanantsoa Solofonirina Dieudonné⁴,
Ralaivelo Mbolatiana Anjarasoa Luc¹, Rasolonirina Martin²,
Zafimanjato Joseph Lucien Radaorolala¹, Randriantseho Hery Fanja¹**

¹Department of Dosimetry and Radiation Protection, National Institute of Sciences and Nuclear Techniques (INSTN-Madagascar), Antananarivo, Madagascar

²Department of Nuclear Techniques and Analysis, National Institute of Sciences and Nuclear Techniques (INSTN-Madagascar), Antananarivo, Madagascar

³Department of Theoretical Physics, National Institute of Sciences and Nuclear Techniques (INSTN-Madagascar), Antananarivo, Madagascar

⁴Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Antananarivo, Antananarivo, Madagascar

Email address:

rlatinah@yahoo.fr (R. T. Harimalala)

To cite this article:

Randriamora Tiana Harimalala, Razafindramiandra Hary Andrianarimanana, Raelina Andriambololona, Ravelomanantsoa Solofonirina Dieudonné, Ralaivelo Mbolatiana Anjarasoa Luc, Rasolonirina Martin, Zafimanjato Joseph Lucien Radaorolala, Randriantseho Hery Fanja. Determination of Natural Radioactivity in the North East Beach Sands of Madagascar. *American Journal of Physics and Applications*. Vol. 5, No. 1, 2017, pp. 5-12. doi: 10.11648/j.ajpa.20170501.12

Received: December 30, 2016; **Accepted:** January 17, 2017; **Published:** February 13, 2017

Abstract: Exploration and exploitation of radioactive ores (ilmenite, zircon and monazite) are considered as the main source of exposure to ionizing radiation of the population living in the coast of Analanjanorofo Region (Fénérive-Est Districts, Rural municipality Ampasimbe Manantsatrana). Radioactivity measurements have been performed in this region. The distribution of natural radionuclide gamma-emitters (^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K) and their respective annual effective dose rates have been determined for sand(s), water and air. The samples have been collected along and around the coast of the region. The radiation emitted from the natural radionuclide containing in the environmental samples has been determined by gamma spectrometry system and Radon meter (SARAD). Exposure dose rates at 1 m above the ground have been measured along the coast and in the villages around the exploitation sites. Dose rate measurements have been performed by Dosimeter Graetz X5 DE, equipped of Geiger Müller Counter. Results have been compared with the reference values provided by IAEA (BSS 115) and UNSCEAR 2000.

Keywords: Coastal Sands, ^{238}U , ^{232}Th and ^{40}K concentrations, Annual Effective Dose rate, Gamma Spectrometry, Geiger Müller Counter

1. Introduction

Natural radioactivity represents the main source of human exposure to ionizing radiation. Public and workers are exposed to natural radionuclides from the environment via external and internal pathways. The terrestrial gamma rays are essentially derived from ^{40}K and radionuclides belonging to ^{238}U and ^{232}Th series that are present in the earth's crust [6].

The study of the distribution of primordial radionuclides

allows the understanding of the radiological contribution of these elements due to the γ -ray exposure of the body and irradiation of lung tissues from inhalation of radon and its daughters. It represents a significant asset to the assessment of the radiation hazards associated with the exploitation of radioactive ores. Hence, the assessment of gamma radiation dose from radioactive ores presents a particular importance to study the contribution of external and internal doses for public around the sites and workers in the sites. The dose rates vary depending upon the concentration of the natural

radionuclides such as ^{238}U and ^{232}Th series, and ^{40}K present in water, sand and air [5].

The objective of this study is to evaluate the natural levels of radioactivity from radioactive ores in the study areas and surrounding villages; to quantify the impact of activities related to the exploitation of radioactive ores; to ensure the radiological protection of workers in the site, handling radioactive substances, and publics living around the sites.

Laboratory measurements are performed by gamma spectrometry system using NaI(Tl) detector in order to determine the natural radionuclide activities in soil, sand and water samples. The annual effective dose rates and external hazard indexes have been evaluated and compared to the limits

proposed by United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR, 2000) and the measurements of dose rate have been carried out using GRAETZ X5 DE Ratemeter equipped with Geiger Muller detector.

2. Location and Delimitation of Study Site

The investigated area is located in the north-east of Madagascar, Region of Analanjirifo, District of Fenoarivo Atsinanana, Rural Commune of Ampasimbe (Figure 1).

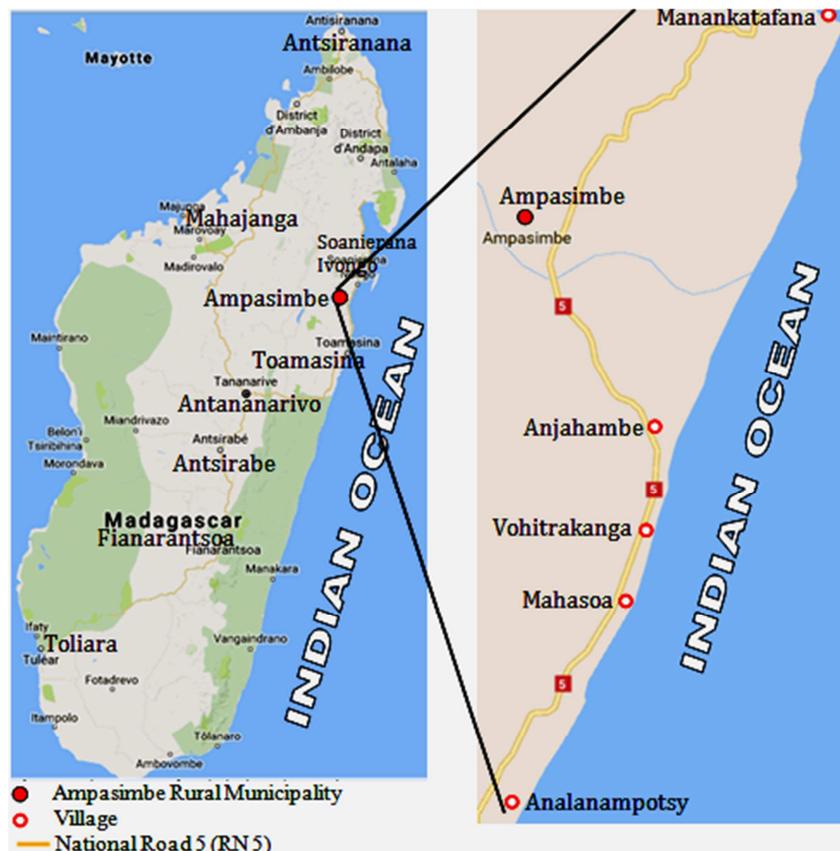


Figure 1. Location of study site.

Several villages have been studied such as Analanampotsy, Mahaso, Anjahambe, Manankatafana and Vohitrakanga. In addition, the study has been performed in all village surroundings in order to rake an approximate area.

3. Materials and Methods

3.1. Dosimetry Methodology

Measurements have been carried out using GRAETZ X5 DE ratemeter equipped with Geiger Muller detector type whose the measuring range for gamma radiation varies from $0.06 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ to $20 \text{mSv} \cdot \text{h}^{-1}$. The ratemeter detection limit is $0.06 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$, values below this limit are not detected. Measurements have been performed at 1 m above the ground.

In each point of measurement, the geographical coordinates were recorded using a Global Positioning System (GPS) device. In situ, dosimetric measurements were carried out at a variable mesh depending on the expanse of the area of the map. The obtained longitude and latitude were converted in plan coordinates, using Laborde projection.

3.2. Sampling Strategy

3.2.1. Soil Samples

Soil samples were taken randomly and in the places where measured dose rates were relatively high compared with the mean dose rate value. The samples were put into plastic bags and the quantities varied from 0.5 kg to 1.0 kg. Each point is recorded by GPS device. The samples are analyzed in terms of radioactivity.

3.2.2. Water Samples

Water samples have been collected in streams, in rivers and underground water. These waters are used by the population as household and drinking water. The samples have been put into plastic bottles of 1.5 L. The geographical coordinates were identified using GPS device.

3.2.3. Radon in Air

Measurements of radon were performed in-situ by radon-meter RTM-2100 SARAD. This equipment is able to measure the radioactive gas concentration, especially radon-222. Measurements were carried out inside and outside of sites, in high occupation factor premises or in the populations who live nearby. The affected villages are located within the sites or its surroundings. Measurement times vary from 12 hours to 24 hours depending of the radon concentration level. Similarly, the geographical coordinates of sampling are identified using GPS device. The obtained results were compared with the reference limits, which are 400 Bq. m⁻³ for the public and 1,000 Bq. m⁻³ for the workers.

3.3. Laboratory Works

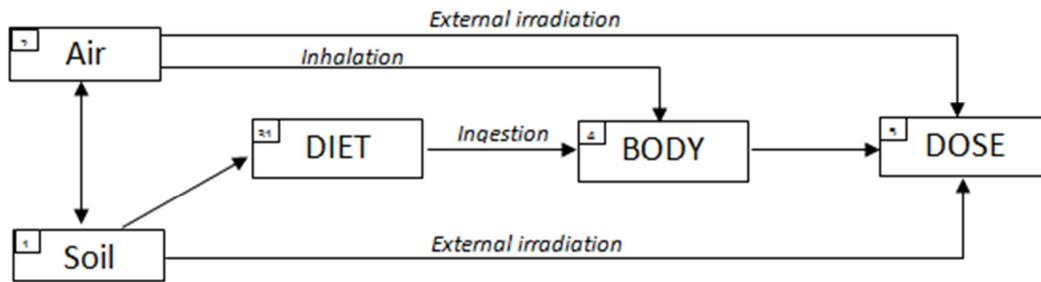
All samples were analysed at the “Institut National des

Sciences et Techniques Nucléaires” (INSTN – Madagascar). During sample preparation, soil samples were oven-dried at 80°C, grinded, sieved, homogenized and placed into 100 cm³ polyethylene cylindrical containers. These containers were hermetically sealed during one month to reach equilibrium of ²²⁶Ra and its daughters before analysis. While water samples were directly put in 500 cm³ Marinelli beakers. Analyzes were performed by gamma spectrometry system, with NaI (TI) detector. The samples have been counted between 12 to 24 hours. The equipment is able to measure qualitatively and quantitatively of emitted gamma-rays. The obtained results were compared to the global averages of the same sample types, which are given in reference documents such as UNSCEAR 2000. These values have been used to estimate the minimum and maximum dose rates related to the external exposure, the inhalation and the ingestion.

3.4. Exposure Dose Assessment

3.4.1. Concept

The basic standard model (UNSCEAR 2000) is used to determine the transfer pathway and to evaluate the dose rates related to the environment natural radioactivity (Figure 2).



Source: UNSCEAR, 2000

Figure 2. Terrestrial pathways of radionuclide dose transfer.

The main human dose rates are produced by the internal (inhalation and ingestion) and the external exposures. These dose rates proceed mainly from the soil, the air and the food.

3.4.2. Estimation Method

The estimation of radiation exposure consists to calculate the doses caused by the concentration of radionuclides in various environmental patterns. The calculation is based on the activity determination. For people living and working in the exposed area, the annual dose rates were determined such as soil and rock radioactivities, internal exposure of drinking

water and internal exposure of radon inhalation. Ingestion and inhalation are the most important pathways for the migration of radionuclides inside the human body.

Estimation dose rates are calculated according to the three following hypotheses:

1. For external exposure, the annual working duration is 8 hours per day, 5 days per week and 52 weeks. The outdoor absorbed dose rate (\dot{D}), at 1 m above the ground level, is calculated using equation 1 [1, 2, 3].

$$\dot{D} \text{ (nGy. h}^{-1}\text{)} = (0.462 \times C_U) + (0.604 \times C_{Th}) + (0.0417 \times C_K) \tag{1}$$

where 0.462, 0.604 and 0.0417 are the dose coefficients (nGy. h⁻¹ per Bq. kg⁻¹) for ²³⁸U, ²³²Th and ⁴⁰K respectively. C_U, C_{Th} and C_K are the activity (Bq. kg⁻¹) of ²³⁸U, ²³²Th and ⁴⁰K respectively.

The annual effective dose rate per year is calculated by the following relation (2):

$$\dot{D} \text{ (mSv. y}^{-1}\text{)} = \dot{D} \text{ (nGy. h}^{-1}\text{)} \times (8 \times 5 \times 52) \times 0,7 \times 10^{-6} \tag{2}$$

UNSCEAR 1993 reported, the conversion coefficient for adult is 0.7 Sv. Gy⁻¹ [4].

2. For ingestion, the annual average consumption is about 500 liters. The estimation of dose rate is calculated from

²²⁶Ra activity because of its dissolution in water. The annual effective dose rate is given by the following formula (3):

$$\dot{D} \text{ (mSv.y}^{-1}\text{)} = (0.28 \times C_{\text{Ra}}) \times 500 \times 10^{-3} \quad (3)$$

where 0.28 is the conversion factor ($\mu\text{Sv. Bq}^{-1}$) of ²²⁶Ra and C_{Ra} is the activity (Bq. L^{-1}).

3. For inhalation, the annual duration in confined place is 7000 hours. The annual effective dose rate is calculated by the following formula (4):

$$\dot{D} \text{ (mSv.y}^{-1}\text{)} = C_{\text{Rn}} \times 0.4 \times 7000 \times 9 \times 10^{-6} \quad (4)$$

where C_{Rn} is the ²²²Rn concentration (Bq. m^{-3}). The dose conversion factor is 9 nSv/Bqh. m^{-3} [U3, U4] which it is still considered as appropriate calculation of average effective dose. According to UNSCEAR 2000, the indoor equilibrium factor is 0.4.

The exposure doses are reported in minimum and maximum values.

The calculated values of the total absorbed dose rate of the all samples (soil, water and air) measured are represented in Table 7.

4. Results and Discussions

4.1. Dosimetric Results

In total, 272 ambiente dose rate points have been measured of which 250 points spreaded inside of mining area and 22 points in Analanampotsy storage zone of ilmenite and zircon ores (Table 2). In addition, five villages around the mining zone have been also performed such as Rural Commune of Ampasimbe Manantsatrana (Table 1). The minimum and maximum values have been gathered. The ratemeter detection limit is up to 0.06 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$, in which values below this limit cannot be measured. However, these low values do not present hazards either to the public or to workers. The measured exposure dose rates vary from 0.06 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$ to 16.20 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$. The values show that environmental radioactivity levels in the studied areas vary according to the geological formation of the environment. In comparison with regulatory limits, measured dose rates are below the limit values which are 2.5 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$ for public and 7.5 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$ for worker [7, 8, 9].

At Analanampotsy village where the zircon and ilmenite ores have been stored, the dose rates exceeded the limit values. The maximum dose rates of 2.80 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$ and 16.20 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$ were found in ilmenite and zircon storages respectively. The last value is higher than the controlled area limit value of 7.5 $\mu\text{Sv. h}^{-1}$ [7, 8, 9].

Table 1. Exposure dose rates measured in mining sites and in villages at Rural Commune of Ampasimbe Manantsatrana.

Location	Number of measurements (Village/Site)	Minimum value ($\mu\text{Sv. h}^{-1}$)	Maximum value ($\mu\text{Sv. h}^{-1}$)
Analanampotsy	88 (23/65)	0.07	0.48
Anjahambe	72 (42/30)	< 0.06	0.32
Mahasoa	28 (28/00)	0.07	0.24
Vohitrakanga	21 (21/00)	0.06	0.13
Manankatafana	41 (25/16)	< 0.06	0.27
Total	250 (139/111)	-	-

Table 2. Limit values of exposure dose rates measured in temporary storage of mining sites.

Location	Number of measurements	Storage area of ilmenite ore		Storage area of zircon ore	
		Minimum value (mSv. h^{-1})	Maximum value (mSv. h^{-1})	Minimum value (mSv.h^{-1})	Maximum value (mSv.h^{-1})
Anjahambe	-	-	-	-	-
Analanampotsy	22	0.20	2.80	11.80	16.20
Mahasoa	-	-	-	-	-
Vohitrakanga	-	-	-	-	-
Manankatafana	-	-	-	-	-
Total	22	0.20	2.80	11.80	16.20

Tables 3. Minimum and maximum values of specific radioactivity of soil samples.

1. Site of Analanampotsy

Number of samples	Radionuclide	Activity (Bq. kg^{-1}) (content)	
		Minimum	Maximum
07	Potassium	327 ± 16 (1.01 ± 0.05) %	1 045 ± 117 (3.23 ± 0.36) %
	Thorium	910 ± 64 (224 ± 16) ppm	87 160 ± 28 872 (21 484 ± 7 117) ppm
	Uranium	437 ± 99 (35 ± 8) ppm	17 295 ± 6 779 (1 400 ± 549) ppm

2. Site of Anjahambe

Number of samples	Radionuclides	Activity (Bq. kg ⁻¹) (content)	
		Minimum	Maximum
03	Potassium	222 ± 18 (0.7 ± 0.07) %	616 ± 31 (1.9 ± 0.1) %
	Thorium	3505 ± 255 (864 ± 63) ppm	11 004 ± 930 (2 712 ± 229) ppm
	Uranium	1123 ± 253 (91 ± 20) ppm	5 034 ± 1 166 (408 ± 94) ppm

3. Site of Manankatafana

Number of samples	Radionuclides	Activity (Bq. kg ⁻¹) (content)	
		Minimum	Maximum
02	Potassium	161 ± 7 (0.5 ± 0.02) %	343 ± 27 (1.1 ± 0.08) %
	Thorium	1 574 ± 112 (388 ± 28) ppm	15 391 ± 1 328 (3 794 ± 327) ppm
	Uranium	444 ± 99 (36 ± 8) ppm	3 199 ± 738 (259 ± 60) ppm

Table 4. Reference values in the specific radioactivity in soils.

Radionuclide	Average value (Minimum – Maximum)	
Potassium	400 (140 – 850) Bq. kg ⁻¹	1.2 (0.4 – 2.6) %
Thorium	30 (11 – 64) Bq. kg ⁻¹	7 (3 – 16) ppm
Uranium	35 (16 – 110) Bq. kg ⁻¹	3 (1.3 – 8.9) ppm
Th/U ratio	Roches primaires	3.5 (3.5 – 6.3)
	Soils and sands	5 (1.5 – 21)

Source: UNSCEAR 2000 and J. J. W. ROGERS, J. A. S. ADAMS – Handbook of Geochemistry

4.2. Radioactivity of Water Samples

Table 5. Specific Radioactivity in water samples.

Number of samples	Radionuclides	Activity (Bq. L ⁻¹)	
		Minimum	Maximum
08	Potassium	6.9 ± 0.2	36.2 ± 1.4
	Thorium	3.4 ± 0.2	17.7 ± 1.2
	Uranium	0.6 ± 0.1	19.5 ± 4.4

The results show the normal values of specific radioactivity for the water samples. It can be deduced that the radionuclides contained in material radioactive ores in the investigated area not contaminate the surrounding waters. However, special precautions must be taken into consideration.

4.3. Specific Radioactivity of Radon from Air

Summary values of the emanation of radon in air are showed in Table 6.

The measurement values are given in average

concentrations of which all are below of reference value. Similarly for acceptable values of public of 400 Bq. m⁻³ and worker of 1000 Bq. m⁻³, the measured values are relatively low. On the one hand, this can be explained that the existence of constantly sea wind blows along the coastline and contributes to scatter of radioactive gases in suspension; on the other hand by the natural ventilation of local dwellings. Modern architecture of buildings in the camp (floors, sealed walls) also contributes to attenuate the emanation phenomenon of radon gas from the soil surface.

Table 6. Specific radioactivity of radon gas in air.

Code	Counting time (hour)	Concentration (Bq. m ⁻³)		
		Average	Minimum	Maximum
R01 / Anjahambe	12	< 1.2	-	< 1.2
R02 / Anjahambe	12	8.1 ± 3.1	7.7 ± 1.2	15 ± 2
R03 / Anjahambe	24	2.6 ± 1.4	2.3 ± 1	16 ± 2
R04 / Anjahambe	12	7.1 ± 3.6	3.2 ± 1.6	10 ± 1
Reference value	-	46	-	480

4.4. Minimum and Maximum Exposure Doses

The estimated Internal and External exposure doses for humans staying and working on sites or its surroundings are calculated from the environmental samples. The summary results are given in Table 7.

Table 7. Minimum and maximum of calculated exposure dose rates.

Origin	Exposure pathway	Calculated annual dose rate (mSv.y ⁻¹)	
		Minimum	Maximum
Soil	External	1.1 ± 0.0	87.88 ± 12.93
Water	Internal (ingestion)	0.08 ± 0.0	2.73 ± 0.62
Air	Internal (inhalation)	0.03 ± 0.0	0.40 ± 0.05
Total		1.21 ± 0.0	91.01 ± 12.91
Reference value	1 - 20		

In assumption of a person constantly working near of high radioactive level, the estimated maximum value of annual exposure dose rates is (91.01 ± 12.91) mSv. y⁻¹. This rate is calculated from the zircon samples, the temporary storage and the current operation sites. The obtained value is widely higher than the annual limit value of 20 mSv. y⁻¹ for workers [7, 8, 9].

5. Conclusion

The exposure dose rate values vary from 0.06 μSv. h⁻¹ to 16.20 μSv. h⁻¹. The measured exposure doses inside and around the villages are below the acceptable limit value for the public. In the mining sites and outside of storage areas, values do not exceed the controlled area limit value for workers. In storage areas, some values exceed the controlled area limit

value. The maximum value was obtained in the temporary storage area of zircon mining site of Analanampotsy.

For soil sample measurements, the specific activities values are higher than the world reference given by the *Table 4*.

For water sample, the specific activities values are relatively in the order of world reference magnitude.

In-situ, radon gas measurements show that the average concentrations in the air are below the reference value provided by the *Table 6*. Taking the assumption that a person is staying constantly in the vicinity of high radioactivity area, the maximum exposure rate is (91.01 ± 12.91) mSv. y⁻¹. Such value is higher than the regulatory limit for workers (20 mSv. y⁻¹) [7, 8, 9].

In comparison of available data, the obtained dose rate levels in the all investigated sites are lower than the beach sand from Guarapari (Brazil) 90 μSv. h⁻¹ (UNSCEAR 2000).

Appendix

Table A1. Radioactivity of soil samples.

Code	Activity (Bq. kg ⁻¹)			Content (ppm)		
	⁴⁰ K	²³² Th series	²³⁸ U series	⁴⁰ K	²³² Th	²³⁸ U
S01	1045 ± 117	7535 ± 823	3206 ± 783	32306 ± 3630	1857 ± 203	260 ± 63
S02	< 854	57825 ± 13239	14780 ± 4822	< 26392	14253 ± 3263	1197 ± 390
S03	663 ± 33	2140 ± 158	437 ± 99	20505 ± 1023	528 ± 39	35 ± 8
S04	327 ± 16	1861 ± 137	681 ± 153	10109 ± 506	459 ± 34	55 ± 12
S05	619 ± 27	910 ± 64	461 ± 103	19142 ± 821	224 ± 16	37 ± 8
S06	< 878	63398 ± 17735	17295 ± 6779	< 27133	15627 ± 4371	1400 ± 549
S07	< 900	87160 ± 28872	16606 ± 7255	< 27831	21484 ± 7117	1345 ± 587
S08	< 273	3505 ± 255	1419 ± 319	< 8455	864 ± 63	115 ± 26
S09	616 ± 31	3732 ± 274	1123 ± 253	19051 ± 951	920 ± 67	91 ± 20
S10	222 ± 18	11004 ± 930	5034 ± 1166	6866 ± 561	2712 ± 229	408 ± 94
S11	161 ± 7	1574 ± 112	444 ± 99	4965 ± 231	388 ± 28	36 ± 8
S12	343 ± 27	15391 ± 1328	3199 ± 738	10611 ± 843	3794 ± 327	259 ± 60

Table A2. Geographical coordinates of soil samples.

Code	Location	Latitude (S)	Longitude (E)
S01		17° 09' 42,5"	49° 29' 12,7"
S02		17° 09' 43,1"	49° 29' 12,5"
S03		17° 09' 44,5"	49° 29' 10,3"
S04	Analanampotsy	17°09' 51,9"	49° 29' 05,7"
S05		17° 09' 48,1"	49° 29' 09,8"
S06		17° 10' 11,8"	49° 28' 56,4"
S07		17° 10' 12,1"	49° 28' 56,5"
S08		17° 07' 12,8"	49° 30' 16,4"
S09	Anjahambe	17° 06' 42,8"	49° 30' 29,3"
S10		17° 07' 43,8"	49° 30' 08,4"
S11		17° 04' 24,8"	49° 31' 25,3"
S12	Manankatafana	17° 04' 21,6"	49° 31' 26,2"

Table A3. Radioactivity of water samples.

Code	Activité (Bq. L-1)		
	⁴⁰ K series	²³² Th series	²³⁸ U series
W01	32,0 ± 1,2	10,6 ± 0,7	11,8 ± 2,6
W02	17,1 ± 0,6	< 12	19,5 ± 4,4
W03	< 112	17,7 ± 1,2	10,1 ± 2,3
W04	7,3 ± 0,3	16,5 ± 1,1	3,6 ± 0,8
W05	13,4 ± 0,5	3,4 ± 0,2	8,7 ± 1,9
W06	6,9 ± 0,2	16,9 ± 1,2	8,7 ± 1,2
W07	36,2 ± 1,4	8,1 ± 0,6	10,5 ± 2,3
W08	12,3 ± 0,4	17,7 ± 1,2	0,6 ± 0,1

Table A4. Geographical coordinates of water samples.

Code	Location	Latitude (S)	Longitude (E)
W01	Analanampotsy	17° 07' 24,5"	49° 30' 08,8"
W02		17° 09' 42,9"	49° 29' 12,4"
W03		17° 09' 43,0"	49° 29' 12,0"
W04		17° 09' 42,4"	49° 29' 12,1"
W05	Anjahambe	17° 06' 24,9"	49° 30' 36,5"
W06	Manakatafana	17° 03' 34,4"	49° 31' 26,8"
W07		17° 06' 00,6"	49° 30' 32,7"
W08		17° 05' 51,1"	49° 29' 55,3"

Table A5. Specific radioactivity of radon gas in air.

Code	Time of measurement (hours)	Concentration of radon (Bq. m ⁻³)		
		Average	Minimum	Maximum
R01/Anjahambe	12 h	< 1,2	-	< 1,2
R02/ Anjahambe	12 h	8,1 ± 3,1	7,7 ± 1,2	15 ± 2
R03/Anjahambe	24 h	2,6 ± 1,4	2,3 ± 1	16 ± 2
R04/Anjahambe	12 h	7,1 ± 3,6	3,2 ± 1,6	10 ± 1

Table A6. Geographical coordinates (radon in air).

Code	Location	Latitude	Longitude
R01	Anjahambe	17° 07' 25,0"	49° 30' 09,3"
R02		17° 07' 25,1"	49° 30' 09,4"
R03		17° 07' 24,4"	49° 30' 05,8"
R04		17° 07' 24,4"	49° 30' 05,8"

References

- [1] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, UNITED NATIONS, New York, 2000.
- [2] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Report to the General Assembly, vol. 1, Annex. B; 2008.
- [3] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR). Sources and effects of ionizing radiation. Report to the General Assembly, Annexe B; 2000.
- [4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, UNSCEAR 1993 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes, UNITED NATIONS, New York, 1993.
- [5] R. Veiga *et al.* / Radiation Measurements 41 (2006) 189–196, Measurement of natural radioactivity in Brazilian beach sands.
- [6] N. Karunakara *et al.* / Results in Physics 4 (2014) 20–27, Assessment of ambient gamma dose rate around a prospective uranium mining area of South India – A comparative study of dose by direct methods and soil radioactivity measurements.
- [7] ICPR PUBLICATION 103, the 2007 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, French Edition by Jean Claude Nénot assisted by Jean Brenot, Dominique Laurier, Alain Rannou and Dominique Thierry.
- [8] Édition en langue française par Jean-Claude Nénot assisté de Jean Brenot, Dominique Laurier, Alain Rannou et Dominique Thierry.
- [9] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Radiation Protection and Safety of Radiation Sources, International Basic Safety Standards, Interim Edition, GSR Part 3, VIENNA, 2011.
- [10] INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, International Basic Safety Standards for Protection Against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources, Safety Series N° 115, VIENNA, 1996.
- [11] J. J. W. Rogers and J. A. S. Adams, “Thorium,” In: K. H. Wedepohl, Ed., Handbook of Geochemistry, Berlin, 1969.
- [12] LEGISLATION ON RADIATION PROTECTION IN MADAGASCAR, LAW 97-041 on 02 January 1998.

Publications Scientifiques

Des publications scientifiques ont été éditées par l'Impétrant :

Concernant les travaux de thèse, un article a été publié le 13 février 2017 dans le journal « American Journal of Physics and Applications ». Il s'intitule : « **Determination of Natural Radioactivity in the North East Beach Sands of Madagascar** ».

- **Autres publications scientifiques publiées :**

- « Doses Evaluation of Some Body Organs of Pediatric Patients Undergoing Chest X-ray Examination using Thermoluminescent Dosimeter » le 19 mai 2017 dans le Journal « Radiation Science and Technology ».
- « Establishing Diagnostic Reference Level for Computed Tomography Examination in Madagascar » en décembre 2015 dans le Journal « Radiation Science and Technology ».
- « Patient Doses Assessment for Conventional Radiography in Madagascar » en 2015 dans le Journal « The Pharmaceutical and Chemical Journal ».

- **Conférences internationales:**

- « Status of Security for Radioactive Sources and their Associated facilities in Madagascar »: International Conference on Nuclear Security, Enhancing Global Efforts, Vienna, Austria, 1-5 July 2013.
- « Patient Doses Assessment in Diagnostic Radiology »: Results for Madagascar, 12th International Congress of the International Radiation Protection Association, Buenos Aires-ARGENTINA, 19-24th October 2008.