

TABLE DES MATIERES

LISTE DES TABLEAUX	iv
LISTE DES FIGURES	v
LISTE DES ABREVIATIONS	vi
INTRODUCTION	1
PARTIE THEORIQUE	2
Chapitre 1 : RAYONNEMENTS IONISANTS	2
1.1. Radioactivité	2
1.1.1. Définition	2
1.1.2. Radioactivité dans l'environnement	2
1.1.3. Radionucléides émetteurs gamma dans l'environnement	3
1.1.4. Mécanisme de transfert de radionucléides émetteurs gamma dans l'environnement	4
1.2. Rayonnements ionisants	5
1.2.1. Parcours des rayonnements ionisants	5
1.2.2. Types de rayonnements ionisants	6
1.2.2.1. Rayonnements directement ionisants	6
1.2.2.2. Rayonnements indirectement ionisants	6
1.2.3. Risques liés aux rayonnements ionisants	6
1.2.3.1. Risque d'exposition externe	7
1.2.3.2. Risque d'exposition interne	7
Chapitre 2 : DETECTION DE RAYONNEMENTS IONISANTS	8
2.1. Introduction	8
2.2. Spectrométrie gamma	8
2.3. Détecteurs de rayonnements gamma	9
2.3.1. Détecteur semi-conducteur	9
2.3.2. Détecteur à scintillation	10
2.3.3. Détecteur Geiger-Müller	11
2.4. Dosimètres	11
2.4.1. Dosimètres actifs	11
2.4.2. Dosimètres passifs	12
Chapitre 3 : RADIOPROTECTION	13
3.1. Principes de la radioprotection	13
3.2. Grandeurs et unités en dosimétrie et radioprotection	14
3.2.1. Grandeurs dosimétriques	14
3.2.1.1. Dose absorbée D	14

3.2.1.1. Débit de dose absorbée \dot{D}	14
3.2.2. Grandeurs de protection.....	14
3.2.2.1. Dose équivalente H_T	14
3.2.2.1. Débit de dose équivalente \dot{H}_T	15
3.2.2.1. Dose efficace E.....	15
3.2.3. Grandeurs opérationnelles	15
3.2.3.1. Surveillance individuelle.....	15
3.2.3.1. Surveillance de l'environnement	16
Chapitre 4 : CONTROLE REGLEMENTAIRE	17
4.1. Généralités.....	17
4.1. Réglementation sur la radioprotection à Madagascar	17
PARTIE PRATIQUE	19
Chapitre 5 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDES	19
5.1. Choix de la zone d'études	19
5.1.1. Historique	19
5.1.2. La zone d'études	20
5.1.2.1. Position géographique.....	20
5.1.2.2. Localisation	20
Chapitre 6 : MATERIELS ET METHODES.....	22
6.1. Etalonnage	22
6.2. FLIR identiFINDER 2 CS-NGH	22
6.3. Saphymo CoMo 170	23
6.4. Débitmètre Thermo FISHER	23
Chapitre 7 : RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	26
7.1. Débit de dose ambiante.....	26
7.1.1. Cas de Vatovory	26
7.1.1.1. Débits de dose ambiante dans le site de Vatovory	27
7.1.1.2. Carte radiométrique de Vatovory	28
7.1.2. Cas d'Ambohitrinimasina	28
7.1.2.1. Débits de dose ambiante dans le site d'Ambohitrinimasina	29
7.1.2.1. Carte radiométrique d'Ambohitrinimasina	30
7.1.3. Cas de Fitatahana	30
7.1.3.1. Débits de dose ambiante dans le site Fitatahana.....	31
7.1.3.2. Carte radiométrique dans le site de Fitatahana	32
7.1.4. Cas du Village de Jeunesse	32

7.1.4.1. Débits de dose ambiante au Village de Jeunesse.....	33
7.1.4.2. Carte radiométrique du Village de Jeunesse	33
7.1.5. Cas du Village d’Ambohitraivo	33
7.1.5.1. Débits de dose ambiante du village d’Ambohitraivo.....	34
7.1.5.2. Carte radiométrique du village d’Ambohitraivo	35
7.1.6. Débits de dose à l’intérieur des maisons des villages aux alentours des sites	35
7.1.7. Vue d’ensemble des différents sites	36
7.2. Identification des radionucléides	40
7.3. Contamination surfacique	42
7.4. Interpretation	46
Chapitre 8 : RECOMMANDATIONS	48
CONCLUSION.....	50
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Liste des radionucléides émetteurs gamma des familles naturelles3

Tableau 4.1 : Limites règlementaires pour les travailleurs et le public 18

Tableau 6.1 : Caractéristiques d'un identiFINDER 2 CS-NGH22

Tableau 7.1 : Débits de dose ambiante mesurés dans le site de Vatovory27

Tableau 7.2 : Débits de dose ambiante dans le site d'Ambohitrinimasina29

Tableau 7.3 : Débits de dose ambiante dans le site Fitatahana31

Tableau 7.4 : Débits de dose ambiante au Village de Jeunesse33

Tableau 7.5 : Débits de dose ambiante du Village d'Ambohitraivo34

Tableau 7.6 : Débits de dose à l'intérieur des maisons dans les villages aux alentours de la mine de Vinaninkarena36

Tableau 7.7 : Valeur maximale, valeur minimale et la valeur moyenne de débit de dose pour les différents sites36

Tableau 7.8 : Moyenne de dose équivalente annuelle39

Tableau 7.9 : Radionucléides identifiés dans les anciens sites du CEA40

Tableau 7.10 : Contamination surfacique43

Tableau 7.11 : Valeur moyenne de contamination surfacique pour chaque radionucléide45

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Les sources de rayonnement ionisant	2
Figure 1.2 : Différents types de transfert de Ra-226	5
Figure 1.3 : Parcours dans la matière des différents types de rayonnements ionisants.....	5
Figure 1.4 : Classification des rayonnements	6
Figure 2.1 : Détecteur à semi-conducteur.....	10
Figure 2.2 : Détecteur à scintillateur cylindrique.....	10
Figure 5.1 : Localisation géographique de la commune de Vinaninkarena	20
Figure 5.2 : Localisation des anciens sites d'exploitation du CEA à Vinaninkarena	21
Figure 6.1 : Les différents points de mesures aux alentours des anciens sites du CEA.....	24
Figure 6.2 : Les différents points de mesures au village d'Ambohitraivo.....	25
Figure 7.1 : Ancien site d'exploitation du CEA à Vatovory	26
Figure 7.2 : Carte radiométrique de Vatovory	28
Figure 7.3 : Ancien site du CEA à Ambohitrinimasina.....	28
Figure 7.4 : Carte radiométrique d'Ambohitrinimasina	30
Figure 7.5 : Ancien site du CEA à Fitatahana.....	30
Figure 7.6 : Carte radiométrique de Fitatahana.....	32
Figure 7.7 : Village de Jeunesse.....	32
Figure 7.8 : Carte radiométrique du Village de Jeunesse	33
Figure 7.9 : Village d'Ambohitraivo	34
Figure 7.10 : Carte radiométrique d'Ambohitraivo.....	35
Figure 7.11 : Niveau de débits de doses maximales pour chaque site	37
Figure 7.12 : Courbe isodose de l'ancienne mine d'uranium de Vinaninkarena	38
Figure 7.13 : Abondance de chaque radionucléide dans les anciens sites du CEA	42
Figure 7.14 : Répartition spatiale de contamination surfacique en carbone 14 dans l'ancienne mine d'uranium de Vinaninkarena	45
Figure 7.15 : Répartition spatiale de contamination surfacique en césium 137 dans l'ancienne mine d'uranium de Vinaninkarena	46

LISTE DES ABREVIATIONS

AIEA : Agence Internationale de l'Energie Atomique

ALARA: As Low As Reasonably Achievable

ANPSR : Autorité Nationale de Protection et de Sûreté Radiologique

BIPM : Bureau International des Poids et des Mesures

CEA: Commissariat à l'Energie Atomique

CIPR : Commission Internationale de Protection Radiologique

CIUMR : Commission Internationale des Unités et des Mesures Radiologiques

INSTN : Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires

NaI(Tl) : Iodure de sodium dopé au thallium

OCGDR : Office Central de Gestion de Déchets Radioactifs

OMNIS : Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques

OTR : Organe Technique de Radioprotection

PNUD : Programme des Nations Unies pour le Développement

UNSCEAR: United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation

INTRODUCTION

La présence de rayons cosmiques et de radionucléides naturels ou artificiels dans l'environnement a pour conséquence la radioexposition de toutes les populations qui vivent sur la terre. D'autre part, les activités industrielles et humaines mettant en œuvre des substances radioactives sont susceptibles d'entraîner le rejet de radionucléides dans l'environnement, soit dans le cadre de leur fonctionnement normal, soit lors d'incidents ou d'accidents d'exploitation [12], comme dans une mine d'uranium.

Il est nécessaire de surveiller et d'étudier le devenir des substances radioactives dans l'environnement avoisinant d'un site uranifère, afin de connaître leur impact éventuel sur la santé de l'homme, de l'environnement et sur les ressources d'intérêt économique notamment l'eau et l'agriculture.

C'est dans cette optique que le thème, intitulé «Evaluation des doses gamma de l'environnement de zone uranifère - Cas de Vinaninkarena » a été choisi.

Des études de cette mine d'uranium ont été faites par l'INSTN-Madagascar : évaluation des doses d'irradiation autour de la mine en 2002 [11], étude de la radioactivité des eaux de consommation en 2003 [16], etc.

L'objectif de cette étude est d'évaluer le niveau de radioactivité, d'identifier les radionucléides et de mesurer le niveau de contamination autour de l'ancienne mine d'uranium au sud d'Antsirabe. Il s'agit notamment du site de Vinaninkarena. Le Commissariat à l'Energie Atomique-France (CEA) y a mené des exploitations à ciel ouvert et par galerie. Pour atteindre ces objectifs l'identiFINDER 2 NGH, le débitmètre THERMO et le SAPHYMO CoMo 170 ont été utilisés lors de la mesure sur terrain.

La première partie est consacrée à la partie théorique qui est divisée en quatre chapitres, à savoir : les rayonnements ionisants, la détection des rayonnements ionisants, la radioprotection et le contrôle réglementaire.

La deuxième partie traitera le cas pratique du travail. Elle se focalise sur la description des moyens expérimentaux, présentation de la zone d'études, matériels et méthodes, résultats et discussions, et finalement des recommandations.

En conclusion, les principaux résultats de cette étude sont résumés.

PARTIE THEORIQUE

Chapitre 1 : RAYONNEMENTS IONISANTS

1.1. Radioactivité

1.1.1. Définition

La radioactivité est un phénomène de désintégration aléatoire spontanée d'atomes, habituellement accompagné de l'émission de rayonnements [2]. Les noyaux qui subissent une telle transformation s'appellent noyaux radioactifs ou radionucléides.

Les principaux rayonnements émis lors de cette transformation sont des particules et/ou des photons γ dont l'énergie est généralement supérieure à 100 keV. Le noyau résiduel peut être lui aussi radioactif et subir d'autres transformations par la suite ou être stable.

1.1.2. Radioactivité dans l'environnement

La population mondiale reçoit une dose moyenne annuelle de rayonnement naturel de 2,4 mSv par an, selon le Comité scientifique des Nations Unies pour l'étude des effets des rayonnements ionisants (UNSCEAR). Cette irradiation naturelle est très variable. On estime que les valeurs maximales de dose annuelle sont 100 fois supérieures aux valeurs moyennes susmentionnées [15]. Le diagramme suivant montre la contribution de chaque type de rayonnements à la dose moyenne annuelle reçue dans le monde selon le rapport de l'UNSCEAR en 2008.

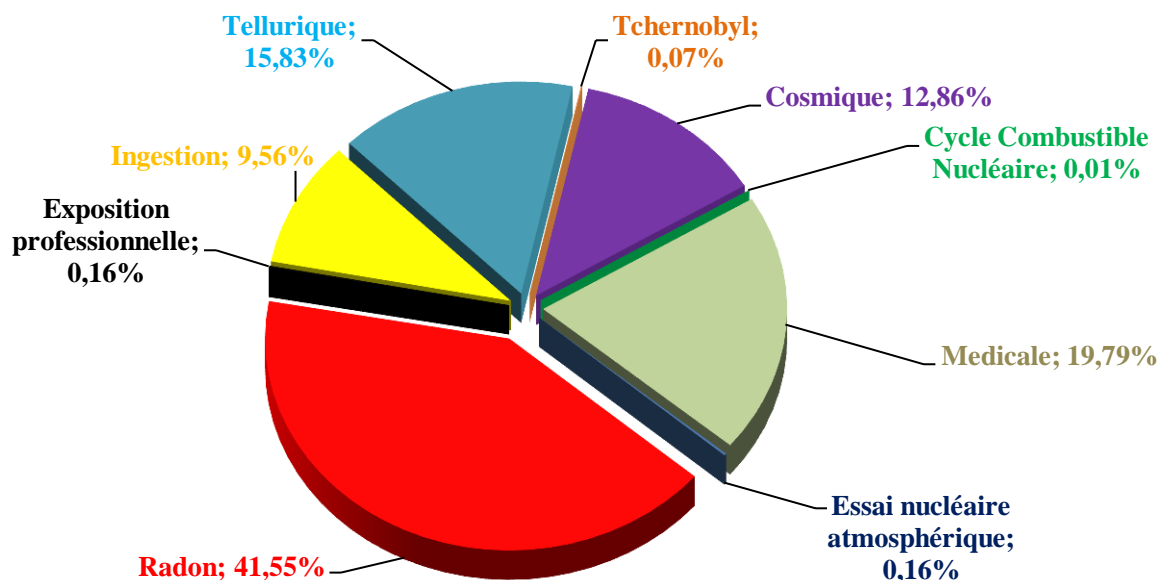


Figure 1.1 : Les sources de rayonnement ionisant
Source UNSCEAR, Rapport 2008

Les plus abondants et importants des radionucléides telluriques sont ceux des familles radioactives naturelles, du K-40 et du Rb-87. Il s'agit des rayonnements émis par les familles radioactives de l'uranium-235, de l'uranium-238 et du thorium-232 ainsi que d'autres radionucléides dont la désintégration aboutit à un élément stable. A l'origine, ces radionucléides étaient répartis de façon homogène, mais des différenciations ont eu lieu, si bien que la croûte terrestre s'est enrichie en uranium et en thorium. Ceux-ci forment donc la majeure partie des noyaux radioactifs présents sur terre [8].

^3H , ^{14}C , ^{22}Na et ^7Be sont des exemples de ces radionucléides produits continuellement par l'interaction des rayonnements cosmiques avec des atomes de l'atmosphère. Ces radionucléides sont, parmi les radionucléides cosmogéniques, les plus considérés dans l'exposition radiologique de l'homme. Le ^{22}Na et le ^7Be entraînent des doses extrêmement faibles.

Les essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère effectués entre 1945 et 1980 par les Etats-Unis, l'Ex-URSS, le Royaume-Uni, la France et la Chine ont provoqué, à l'échelle planétaire, des retombées de radionucléides artificiels étalées sur plusieurs années. Les produits de fission sont nombreux et constituent des noyaux lourds comme le Cs-137, I-131, Sr-90, Fe-55, Ca-45, etc.

1.1.3. Radionucléides émetteurs gamma dans l'environnement

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 listés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 1.1: Liste des radionucléides émetteurs gamma des familles naturelles

Famille de ^{238}U		Famille de ^{235}U		Famille de ^{232}Th	
Radionucléide	Période	Radionucléide	Période	Radionucléide	Période
Thorium 234	24,1 j	Uranium 235	$7,04 \cdot 10^8$ a	Actinium 228	6,13 h
Protactinium 234 ^m	1,17 min	Protactinium 231	$3,21 \cdot 10^4$ a	Plomb 212	10,64 h
Thorium 230	$8,0 \cdot 10^4$ a	Thorium 227	18,7 j	Bismuth 212	60,6 min
Radium 226	1600 a	Radium 223	11,43 j	Thallium 208	3,05 min
Radon 222	3,82 j	Radon 219	3,96 s		
Plomb 214	26,8 min	Plomb 211	36,1 min		
Bismuth 214	19,7 min				
Plomb 210	22,3 a				

Le K-40 et le ^7Be sont aussi des radionucléides émetteurs gamma dans l'environnement.

1.1.4. Mécanisme de transfert de radionucléides émetteurs gamma dans l'environnement

Les mécanismes de transfert des radionucléides sont fondamentalement les mêmes que ceux applicables aux isotopes stables correspondants ou aux éléments stables ayant des propriétés similaires. Les différents types de transfert dans l'environnement sont, la dispersion au sein du milieu récepteur, le dépôt, l'inhalation, la captation par les organes aériens des végétaux, l'absorption racinaire et l'ingestion par l'animal. Ces mécanismes se diffèrent pour chacun des différents composants principaux de l'environnement.

Les sols constituent un compartiment direct de transfert de contamination aux produits agricoles. Les herbes sont aussi, après absorption racinaire, des sources de transfert des radionucléides aux animaux, par exemple dans une viande et le lait, et finalement aux hommes par le biais de la chaîne alimentaire.

L'air peut conduire à une exposition des individus soit par inhalation, soit par ingestion de particules déposées sur la végétation, soit encore indirectement par ingestion des aliments provenant d'animaux ayant été exposés suite à une contamination.

L'eau utilisée pour le bétail et pour l'irrigation peut également être une source de transfert. L'eau de boisson et l'eau domestique sont également très importante due à la consommation et la préparation des aliments.

Cas du radium 226

Le radium, métal blanc et brillant, appartient à la famille des alcalino-terreux. Parmi les 25 isotopes radioactifs du radium, le Ra-226 avec une période radioactive de $T=1600$ ans est majoritaire. Il résulte de la chaîne de désintégration de la famille de l'U-238. Le radium n'existe pas à l'état pur, il se combine immédiatement et est toujours à l'équilibre avec ses descendants. Il est présent dans les sols uranifères. La concentration du Ra-226 peut être importante dans les eaux d'infiltration des mines d'uranium. Le Ra-226 produit un gaz radioactif, le radon, qui peut conduire à des doses importantes de rayonnement dans les habitations. Le radium est un élément transférable à l'homme selon les mêmes voies métaboliques que le calcium: le site principal de dépôt et de rétention est l'os. Il est à noter que la période de rétention dans la partie centrale de l'os est plus longue que celle à la surface osseuse. Son différent mode de transfert dans l'environnement est schématisé comme suit :

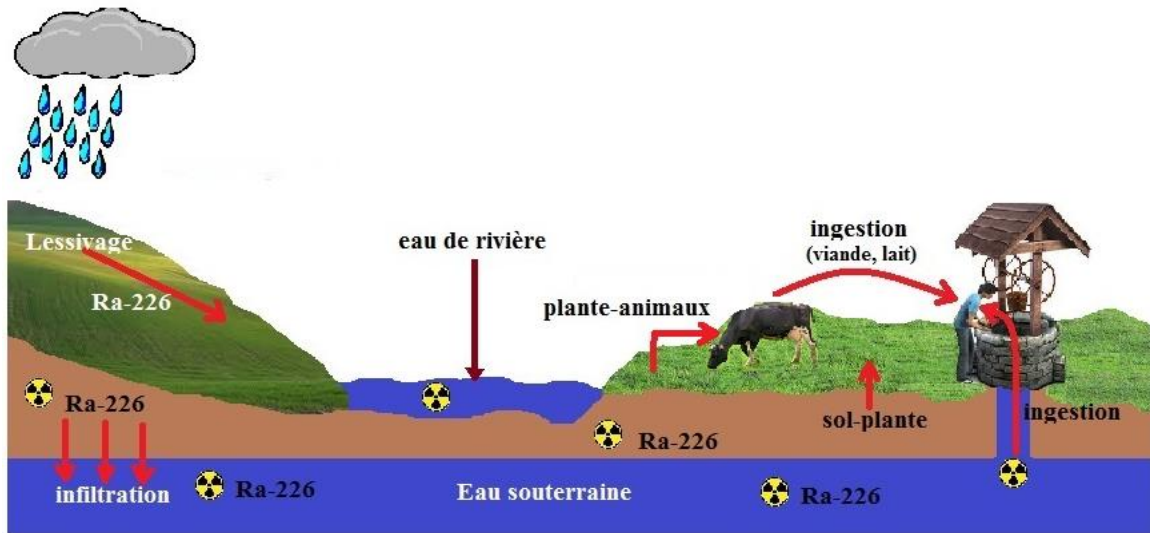


Figure 1.2 : Différents types de transfert de Ra-226

1.2. Rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont ainsi dénommés car, lors de leur interaction avec la matière, ils peuvent l'ioniser, c'est-à-dire arracher un ou plusieurs négatons à ses atomes [6].

Les rayonnements ionisants sont constitués, soit d'ondes électromagnétiques, soit de particules lourdes.

1.2.1. Parcours des rayonnements ionisants

Le parcours de rayonnements ionisants dans une matière dépend de la nature et de l'énergie du rayonnement et du type de constituants de la matière qu'il traverse.

La figure ci-dessous montre les différents modes d'atténuation de ces rayonnements.

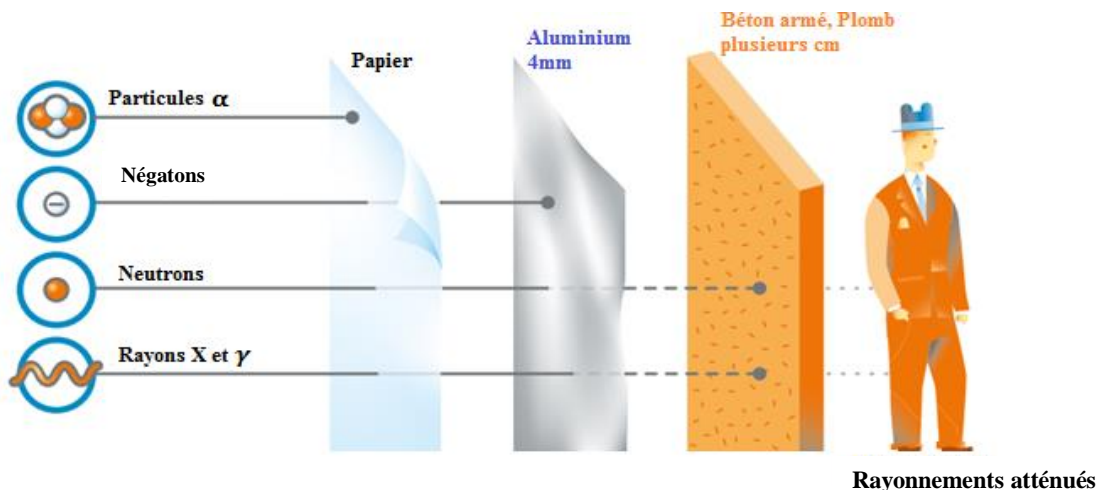


Figure 1.3 : Parcours dans la matière des différents types de rayonnements ionisants [10]

1.2.2. Types de rayonnements ionisants

Les rayonnements se divisent en deux grandes catégories : rayonnements ionisants et rayonnements non ionisants. Ceux qui sont ionisants peuvent être, selon leur nature, directement ou indirectement ionisants.

La figure suivante illustre la classification globale de types de rayonnements.

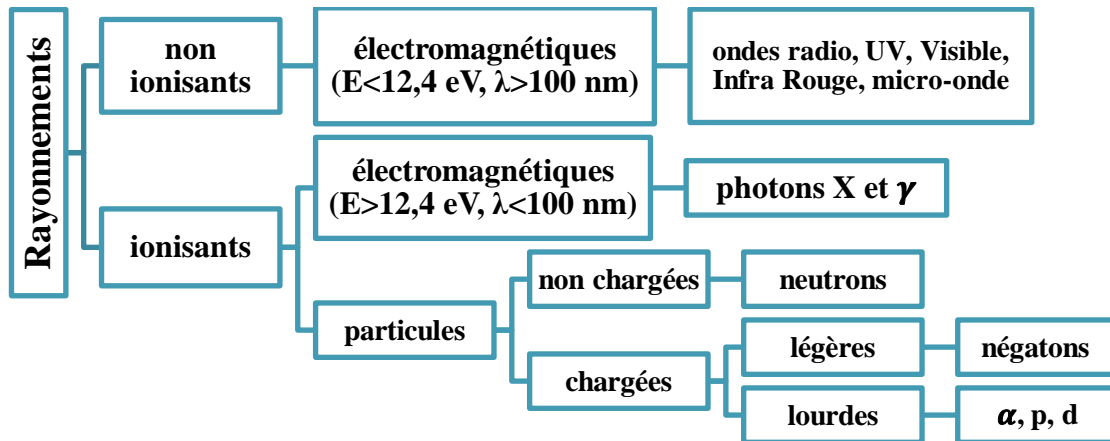


Figure 1.4 : Classification des rayonnements [7]

1.2.2.1. Rayonnements directement ionisants

Ceux sont des particules chargées qui délivrent leur énergie directement à la matière, par l'action des forces coulombiennes s'exerçant avec les atomes du milieu. Les transferts d'énergie dépendent des masses des particules en mouvement et il y a lieu de distinguer les particules chargées lourdes (proton, deuton, alpha, ions lourds) des négatons.

1.2.2.2. Rayonnements indirectement ionisants

Ils sont électriquement neutres, et sont susceptibles de transférer une fraction ou la totalité de leur énergie en une seule interaction à des particules chargées. Ce sont ensuite ces particules secondaires qui ionisent le milieu. Le photon γ , le rayon X et les neutrons entrent dans cette catégorie.

1.2.3. Risques liés aux rayonnements ionisants

L'évaluation des risques liés aux rayonnements ionisants a besoin d'identifier et de caractériser les sources et les rayonnements émis. Ces risques sont classés selon les deux modes d'exposition aux rayonnements ionisants : l'exposition externe et l'exposition interne.

1.2.3.1. Risque d'exposition externe

L'exposition externe est l'exposition à des rayonnements émis par une source se trouvant à l'extérieur de l'organisme [2]. Dans ce cas, le rayonnement ionisant peut entraîner soit une irradiation localisée d'un tissu ou d'une partie du corps, soit une irradiation globale de l'organisme. L'importance de cette irradiation est directement liée au pouvoir de pénétration dans le corps des divers rayonnements émis par la source. En tenant compte du pouvoir de pénétration, ce sont les rayons gamma qui sont la principale source d'exposition externe, les autres types de rayons étant arrêtés en cours de chemin.

1.2.3.2. Risque d'exposition interne

Les radionucléides incorporés dans le corps humain irradient les tissus pendant des périodes de temps déterminées par leur demi-vie physique et leur rétention biologique dans le corps. Ce phénomène d'incorporation conduit à l'exposition interne en fonction de la répartition des radionucléides dans les différents tissus et organes, et délivre une dose à l'ensemble des organes tant que dure leur présence dans l'organisme. Ainsi, ils peuvent donner lieu à des doses délivrées aux tissus du corps pendant de nombreux mois ou années après l'incorporation. Les principaux radionucléides qui présentent ce risque d'exposition interne sont ceux à l'état gazeux ou facilement transférable par l'eau et l'air.

La radioexposition résultant de l'extraction et du traitement de minerais peut survenir de plusieurs manières, notamment par l'inhalation des produits de filiation du radon, l'inhalation de poussières en suspension dans l'air, l'exposition directe au rayonnement gamma et l'ingestion de matières contaminées par des radionucléides résultant de l'exploitation. De plus, les résidus des opérations de traitement, s'ils sont laissés à l'air libre, libéreront des radionucléides dans l'air et le milieu aquatique.

Chapitre 2 : DETECTION DE RAYONNEMENTS IONISANTS

2.1. Introduction

L'étude quantitative de l'effet des rayonnements ionisants entre dans le domaine de la radioprotection et de la dosimétrie. Elle est fondée sur la mesure de l'ionisation que ces rayonnements produisent dans le milieu traversé, par le biais de l'exposition, soit par la mesure de l'énergie qu'ils communiquent à la matière en la traversant soit par la dose absorbée. Si les rayonnements ionisants cèdent, en totalité ou en partie, leur énergie à la matière traversée, cette dernière subit en retour des modifications physiques, chimiques et thermiques. Les phénomènes physiques ayant lieu au niveau du capteur sont traités par une chaîne électronique permettant de transmettre à l'utilisateur des informations relatives au rayonnement détecté.

Les principes de détection sont de :

- recueillir toute ou une partie de l'énergie cédée par un rayonnement incident au milieu détecteur qu'il traverse ;
- transformer les phénomènes d'interactions en signal électrique ou lumineux.

2.2. Spectrométrie 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.

2.3. Détecteurs de rayonnements gamma

Le rayonnement gamma est un rayonnement de type électromagnétique. Il est de même nature que le rayon X. Ce qui les différencie est leur origine. Le rayonnement gamma est issu de transitions nucléaires tandis que son homologue X est issue d'une transition électronique. Le rayonnement gamma possède comme caractéristiques d'être moins ionisant que des particules alpha ou des négatons; mais, il est beaucoup plus pénétrant que ces derniers. On en conclut que pour pouvoir être détecté, le matériau constituant le volume du détecteur doit être suffisamment dense pour être capable d'arrêter le rayonnement gamma.

La relation d'atténuation des photons gamma dans la matière est donnée par la loi de Beer-

$$I = I_0 \times e^{-\mu x} \quad (2.1)$$

Où I_0 est l'intensité du rayon incident

x est l'épaisseur du matériau

μ est le coefficient d'absorption qui dépend du matériau

Le rayonnement gamma est détecté de manière indirecte. Ce sont les particules chargées qu'il crée dans le détecteur qui sont détectés.

2.3.1. Détecteur semi-conducteur

Le fonctionnement d'un détecteur à semi-conducteur peut être assimilé à celui d'un détecteur à gaz. En effet, dans un semi-conducteur, le passage d'un rayonnement sera révélé par l'apparition d'un courant comme dans un détecteur à gaz ou à scintillation. Un rayonnement traversant la zone désertée d'une jonction PN polarisée en inverse va créer de nombreuses paires négatons-positons; les négatons vont se diffuser vers la région P et les positons vers la région N. Le nombre de paires négatons-positons ainsi créées est directement proportionnel à l'énergie cédée par le rayonnement dans la jonction, l'intensité de courant et donc l'impulsion de tension aux bornes d'une résistance sont proportionnelles à cette énergie. On a donc un détecteur permettant à la fois le comptage et la spectrométrie.

L'énergie moyenne nécessaire pour produire une paire négaton-positon est de 3,5 eV dans le silicium et de 2,9 eV dans le germanium, soit une énergie 10 fois plus faible que pour produire une paire d'ions dans un gaz. En effet cette énergie est de 36,1 eV pour le cas d'un gaz.

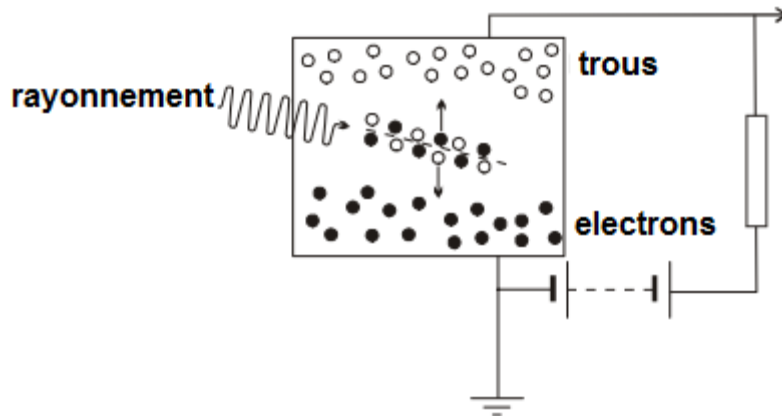


Figure 2.1 : Détecteur à semi-conducteur

2.3.2. Détecteur à scintillation

Le détecteur à scintillation utilise les propriétés de certaines substances d'émettre de la lumière visible sous l'action des rayonnements ionisants. Après l'interaction de ce type de rayonnement avec le scintillateur, les négatons de ce dernier se trouvent à l'état excités et après désexcitation ultérieure le scintillateur émet un photon dans le domaine de la lumière visible. Le photon émis par le scintillateur, interagit avec la photocathode d'un tube photomultiplicateur, libérant des négatons. Les négatons émis par la photocathode sont guidés, à l'aide d'un champ électrique, vers la première dynode, qui est revêtue d'une substance qui émet des négatons secondaires, si les négatons viennent frapper sur elle. Les négatons secondaires de la première dynode sont déviés vers la seconde, à partir de là vers la troisième, et ainsi de suite. La production des négatons secondaires par les dynodes successives aboutit à une amplification finale. Les négatons émis par la dernière dynode sont collectés par l'anode du détecteur.

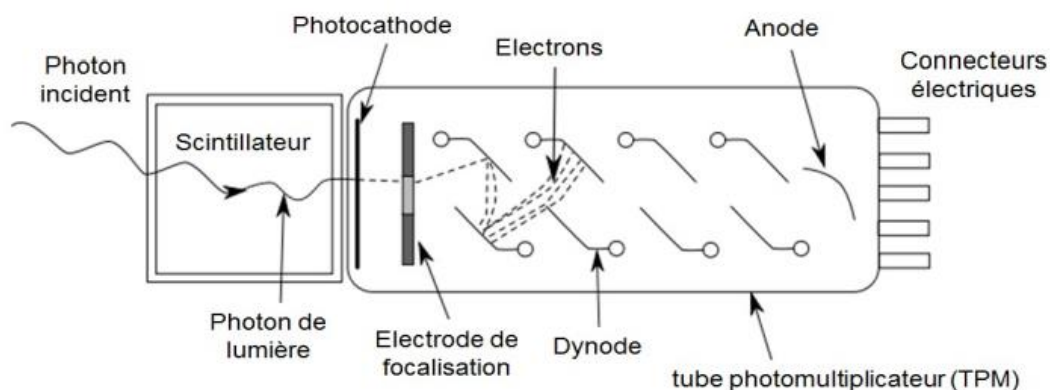


Figure 2.2 : Détecteur à scintillateur cylindrique

Dans la plupart de cas, on utilise le cristal NaI(Tl) qui présente un bon rendement lumineux.

2.3.3. 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 400 V, 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.

2.4. Dosimètres

La dosimétrie fait partie des outils de la radioprotection. Elle a pour objet de mesurer le dépôt d'énergie par unité de masse. Elle détermine au mieux les rayonnements en un lieu pour la dosimétrie de zone ou sur une personne pour la dosimétrie individuelle et, ainsi, fournit une estimation de dose équivalente moyenne et de dose efficace.

On doit distinguer les détecteurs utilisés pour la dosimétrie active, qui mesurent la dose en temps réel, de ceux employés en dosimétrie passive pour laquelle la mesure de la dose est différée.

2.4.1. Dosimètres actifs

Ils sont en fait des dosimètres électroniques qui exploitent l'ionisation ou l'excitation atomique lors de l'interaction avec la matière permettant l'analyse du signal électronique correspondant à l'énergie des rayonnements. Ils peuvent donner une information en temps réel, non seulement en dose intégrée, mais aussi en débit de dose qui est un paramètre très important à connaître en cas d'irradiation accidentelle. Ils peuvent être équipés d'alarmes réglées à différents seuils, selon les besoins.

Enfin, l'électronique associée peut enregistrer de nombreux paramètres comme l'identité du porteur. Il est aussi possible de relire les informations acquises qui facilite le traitement informatique et donc le suivi. Les dosimètres électroniques sont en continuelle évolution, ils tendent à intégrer dans un même boîtier différents éléments des dosimètres, afin d'en faire des outils de grande sensibilité et de manipulation aisée.

2.4.2. Dosimètres passifs

Ils sont initialement issus des techniques photographiques qui ont permis la découverte de la radioactivité par Becquerel en 1896. Ces types de dosimètre sont les premiers à avoir été développés. On appelle « dosimètres passifs » des dosimètres n'ayant pas besoin de source externe d'énergie pour fonctionner. Ce sont des dosimètres intégrateurs, c'est-à-dire qu'ils ne donnent qu'une mesure de dose globale accumulée. Ils ne permettent pas d'estimer les doses instantanées. Ils ont de plus en plus tendance à être remplacés par des dosimètres actifs, mais gardent une place importante dans la surveillance des travailleurs soumis à des rayonnements ionisants.

Chapitre 3 : 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.

3.1. Principes de la radioprotection

Dans la publication 26 en 1977, la CIPR [3] 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.

3.2. Grandeurs et unités en dosimétrie et radioprotection

3.2.1. Grandeurs dosimétriques

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

3.2.1.1. 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.

$$D = \frac{dE}{dm} \quad (3.1)$$

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

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).

3.2.1.1. Débit de dose absorbée \dot{D}

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

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (3.2)$$

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

3.2.2. 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.

3.2.2.1. 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.

$$H_{T,R} = w_R \times D_{T,R} \quad (3.3)$$

où $D_{T,R}$ est la dose absorbée moyennée 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 :

$$H_{T,R} = \sum_R w_R D_{T,R} \quad (3.4)$$

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

3.2.2.1. 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 .

$$\dot{H}_T = \frac{dH_T}{dt} \quad (3.5)$$

Son unité est le $Sv.h^{-1}$

3.2.2.1. 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 :

$$E = \sum_T w_T H_T \quad (3.6)$$

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 :

$$E = \sum_T w_T \sum_R w_R \times D_{T,R} \quad (3.7)$$

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].

3.2.3. 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).

3.2.3.1. Surveillance individuelle

L'équivalent de dose individuel, $H_p(d)$, est l'équivalent de dose au tissu mou en-dessous d'un point spécifié de la surface du corps à une profondeur appropriée d [2].

3.2.3.1.1. 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.

3.2.3.1.1. 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.

3.2.3.1. Surveillance de l'environnement

3.2.3.1.1. 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].

3.2.3.1.2. 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.

Chapitre 4 : CONTROLE REGLEMENTAIRE

4.1. Généralités

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 [1].

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.

4.1. 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 [13]. 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 :

- 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 remplacé par le décret n° 2012-1112 du 04 décembre 2012 portant réorganisation de l'Autorité Nationale de Sûreté et de Protection 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 odontostomatologiques ;
- 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 décret N° 2002-569 de la loi N° 97-041 avec son article 28 stipule que : « Le Département de Dosimétrie et Radioprotection de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires et le Département de Gestion des Déchets Radioactifs de l'INSTN

assurent respectivement les fonctions de l'OTR et de l'OCGDR jusqu'à la mise en place effective de l'ANPSR ».

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 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 en 1997.

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 4.1 : Limites réglementaires pour les travailleurs et le public [4]

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
	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

PARTIE PRATIQUE

Chapitre 5 : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDES

5.1. Choix de la zone d'études

5.1.1. Historique

La région choisie pour réaliser ce travail se trouve dans la partie méridionale du bassin d'Antsirabe, connue sous le nom de Vinaninkarena. La découverte des indices d'uranium dans le bassin « plio-pléistocène » d'Antsirabe par le Commissariat à l'Energie Atomique français (CEA) date de 1910. Les travaux effectués dans la région ont permis l'exploitation de gisements de minerais oxydés d'uranocircite qui aurait fourni une quarantaine de tonnes de concentrés exportés, avant 1940, pour l'extraction d'uranium et de radium [14].

Après 1945, les recherches ont été reprises par le CEA par des travaux de prospection de surface et de sub-surface jusqu'en 1954. Depuis 1976, la mise en valeur des ressources uranifères d'Antsirabe figure dans le programme de l'Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques (OMNIS), avec l'assistance de l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA 1976-1977) et du Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD 1979-1982) [14].

Les indices sont localisés de part et d'autre de la rivière de Manandona. On y accède par la route nationale N° 7 (Antananarivo-Fianarantsoa). De la Commune de Vinaninkarena, une route menant au Village de Jeunesse permet d'atteindre les anciens travaux d'exploitation du CEA à ciel ouvert et par galeries. L'uranium, sous forme d'autunite et d'uranocircite y a été reconnu. L'autunite provient de l'altération de pechblende, associé souvent à la chalcocite, dans les pegmatites et granites uranifères de la zone d'oxydation [14].

Après les exploitations faites par le CEA, il se trouve que ces anciens sites sont abandonnés sans aucun réaménagement. Cependant, il n'a pas pris en compte le suivi des impacts environnementaux de leur travail pour la génération future de la population environnante. Etant donné que les minerais qu'ils ont exploités sont radioactifs, il est important alors, à notre époque, d'évaluer les risques menés par les rayonnements émis par les minerais restants sur ces sites qui pourraient provoquer des impacts négatifs au public et à l'environnement avoisinant.

5.1.2. La zone d'études

5.1.2.1. Position géographique

Le site d'Ambohitrinimasina, de Fitatahana et de Vatovory du Fokontany d'Anjanamanjaka de la région Vakinakaratra, sont les carrières d'exploitation d'uranium du CEA. Ils se trouvent dans la commune rurale de Vinaninkarena du district d'Antsirabe. Avant d'être exporté, les minerais étaient traités au village, à côté du site de Fitatahana appelé Village de Jeunesse.

5.1.2.2. Localisation

Les figures ci-dessous montrent la localisation géographique de la commune de Vinaninkarena et les différents anciens sites d'exploitation du CEA.

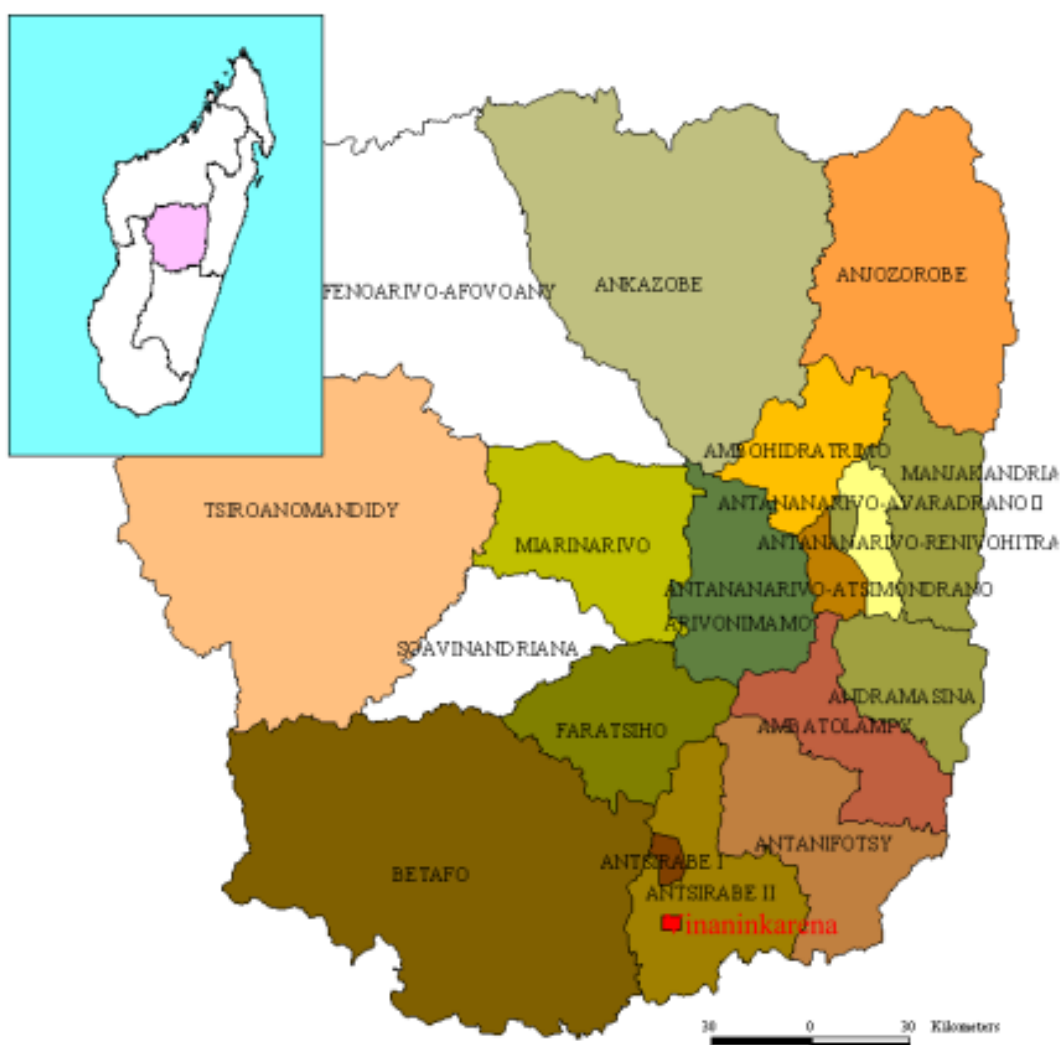


Figure 5.1 : Localisation géographique de la commune de Vinaninkarena



Figure 5.2 : Localisation des anciens sites d'exploitation du CEA à Vinaninkarena
Source du fond de carte : Google Earth

Chapitre 6 : MATERIELS ET METHODES

6.1. Etalonnage

Pour être sûr de l'exactitude des résultats obtenus par un appareil de mesures, on doit procéder à son étalonnage. L'étalonnage est la mesure ou ajustement d'un instrument, d'un composant ou d'un système pour s'assurer que sa précision ou sa réponse est acceptable. Cette technique consiste à comparer la valeur donnée par l'appareil à une valeur étalon donnée par le Bureau International de Poids et de Mesures (BIPM) ou celle donnée par le constructeur. A la suite de l'étalonnage, on peut calculer le facteur d'étalonnage de l'appareil qui est un facteur de correction de la valeur obtenue.

Le FLIR identiFINDER 2 CS-NGH, le débitmètre THERMO et le Saphymo CoMo 170 ont été utilisés pendant l'étude sur terrain.

6.2. FLIR identiFINDER 2 CS-NGH

Le FLIR identiFINDER 2 CS-NGH, conçu et fabriqué par FLIR Radiation, est un appareil numérique portable à batterie. Ces caractéristiques sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 6.1 : Caractéristiques d'un identiFINDER 2 CS-NGH [8]

Fabricant	FLIR Radiation
Détecteurs	<ul style="list-style-type: none"> • Gamma : NaI (Taille du cristal : 35mm × 51mm) • Gamma (débit de dose) : Compteur Geiger-Müller • GPS : Récepteur SiRF III 12 canaux
Etalonnage	Source interne : Cs-137 ; 15nCi ; prêt à utiliser après 60s
Plage de mesure d'énergie (gamma)	20 keV – 3 MeV
Spectre gamma	1024 canaux ; 3 MeV
Plage de mesure du débit de dose	0,000 $\mu\text{Sv.h}^{-1}$ – 10,00 mSv.h^{-1}
Plage de mesure de dose	0,000 μSv – 1 Sv
Bibliothèque des nucléides	Bibliothèque standard
Dimensions (L × P × H)	248 mm × 93 mm × 75 mm

Cet appareil a permis de :

- identifier automatiquement des radionucléides par l'analyse des spectres de rayonnement gamma par un cristal scintillateur d'iodure de sodium NaI;
- mesurer des doses gamma et du débit de dose par un détecteur Geiger-Müller.

6.3. Saphymo CoMo 170

Le Saphymo CoMo 170 est un appareil portable pour mesurer la contamination radioactive de surface. Il est muni d'un seul détecteur à scintillateur plastique revêtu du Sulfure de Zinc avec photomultiplicateur et permet de mesurer la contamination α , β et γ simultanée ou sélective. La bibliothèque de ce appareil contient 13 radionucléides. Les caractéristiques de cet appareil sont les suivants :

- Surface de détection: 100 cm² ;
- Ecran LCD 128 × 64 pixels, rétroéclairé ;
- Tension: 3 V avec 2 piles type AA (R6) ;
- Unité de mesure: Bq.cm⁻² ;
- Gamme de mesures :0 à 999 kBq.

6.4. Débitmètre Thermo FISHER

C'est un appareil portatif équipé d'un détecteur de type Geiger-Müller. Il est utilisé pour la mesure des débits de dose des rayonnements ionisants, en particulier le rayonnement gamma. Les gammes de mesures sont :

- de 10 nSv.h⁻¹ à 100 mSv.h⁻¹ pour les débits de dose et
- de 30 keV à 4,4 MeV pour l'énergie

Cet appareil a été utilisé pour la mesure de débit de dose à l'intérieur des maisons.

Le GPS a été utilisé pour la localisation de tous les points de mesure. Ces points sont aux alentours des anciens sites du CEA et aussi dans les villages d'Ambohitraivo et le Village de Jeunesse. Dans les anciens sites du CEA, le maillage a été fait par 100 m x 100 m.

La figure ci-dessous montre les différents points de mesure des anciens sites du CEA.

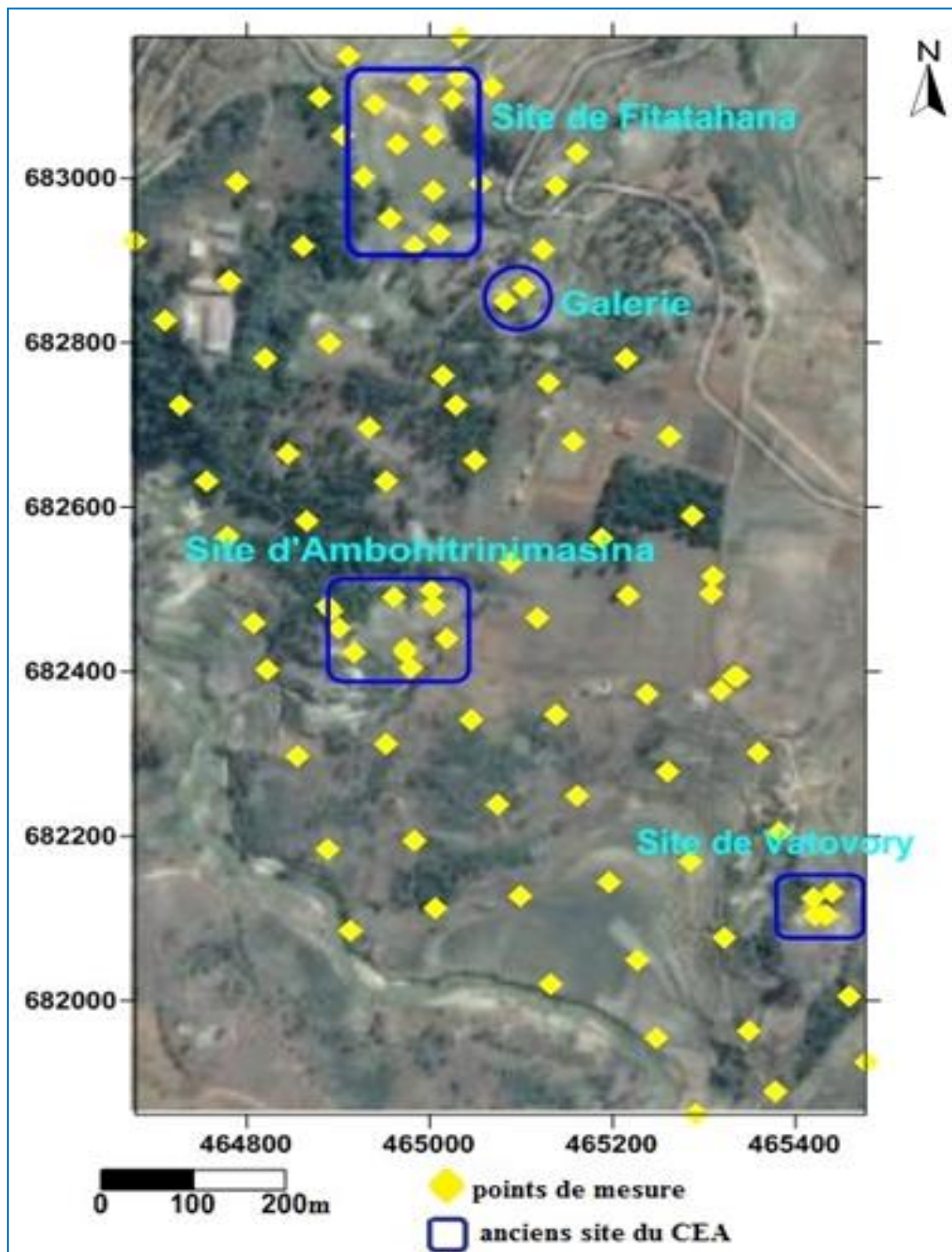


Figure 6.1 : Les différents points de mesures aux alentours des anciens sites du CEA
 Source du fond de carte : Google Earth

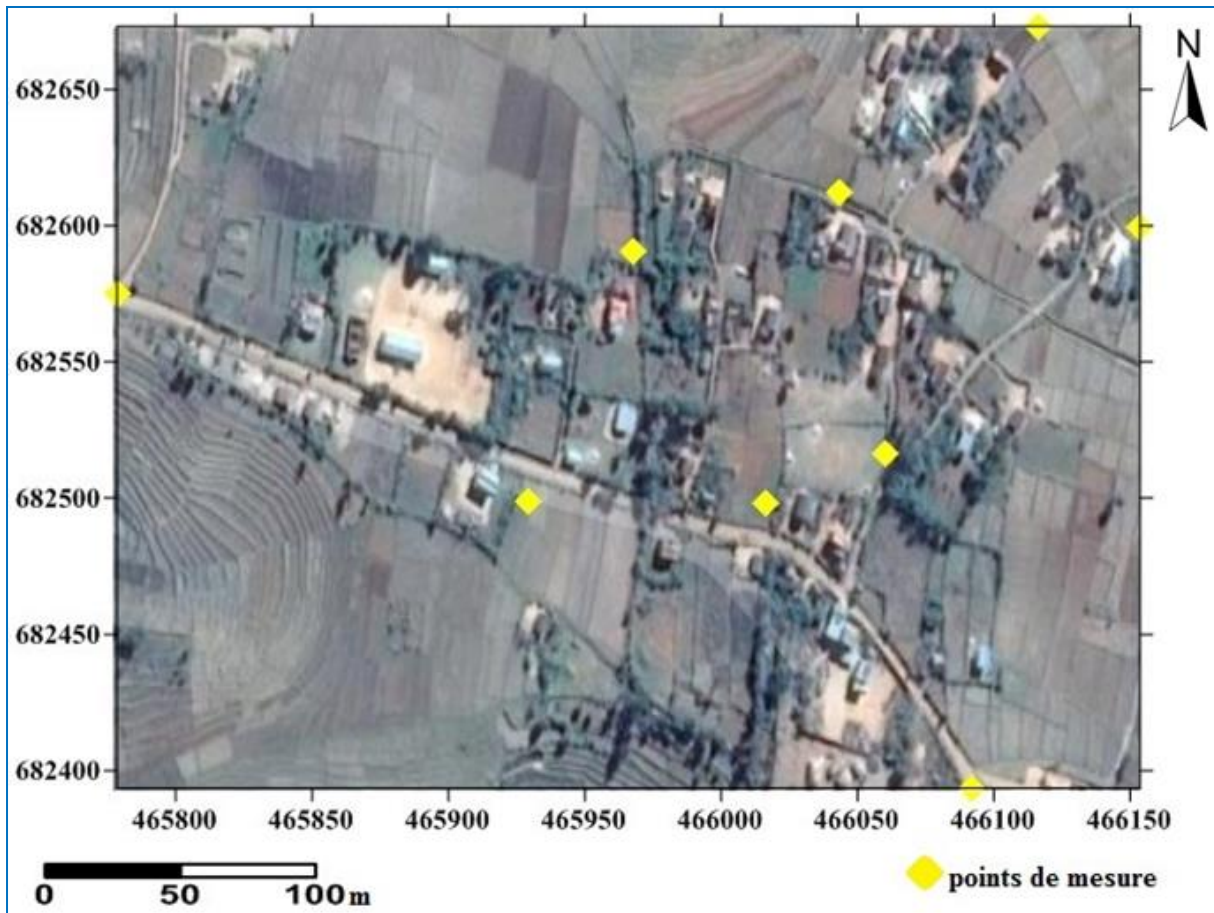


Figure 6.2 : Les différents points de mesures au village d'Ambohitraivo
Source du fond de carte : Google Earth

Chapitre 7 : RESULTATS ET DISCUSSIONS

7.1. Débit de dose ambiante

Dans le cadre de ce travail, 109 mesures de débit de dose ambiante ont été effectuées, dont 89 dans les sites miniers et 20 dans les villages à proximité des sites. D'autres mesures ont été faites aussi dont : 34 dans l'ancienne carrière de Vatovory, 35 dans l'ancienne carrière d'Ambohitrinimasina, 20 dans le site de Fitatahana, 11 au Village de Jeunesse et 9 dans le village d'Ambohitraivo. Les mesures de débit de dose ont été faites à 1 mètre du sol.

7.1.1. Cas de Vatovory

Une exploitation à ciel ouvert a été faite dans l'ancien site de Vatovory. L'ancien site, dégradé par l'érosion, est à côté du village de Vatovory qui compte treize (13) toits. Une vaste étendue de rizière se trouve en aval de ce site. Une maison d'habitation en cours de finition, construite juste à 20 m en aval de ce site, a été constatée.

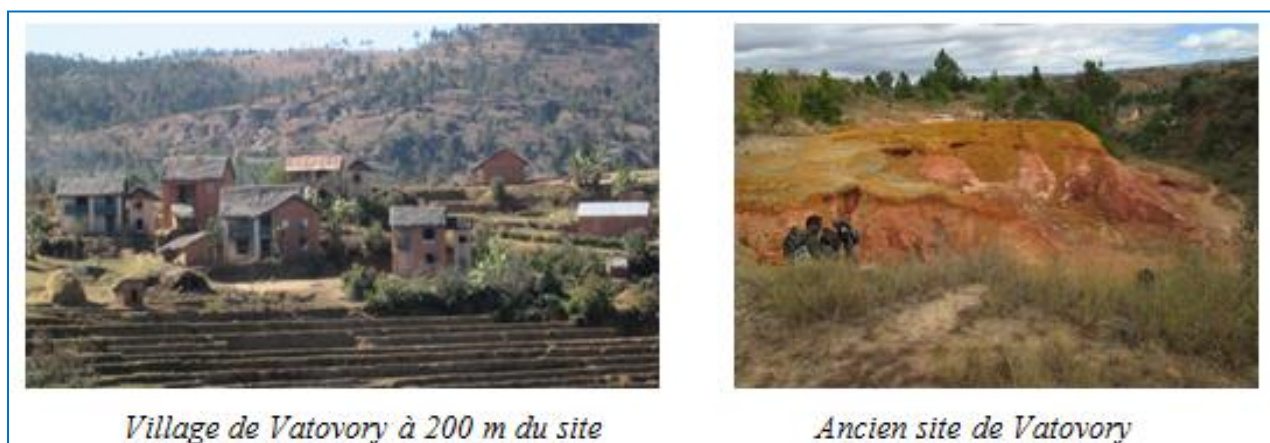


Figure 7.1 : Ancien site d'exploitation du CEA à Vatovory

7.1.1.1. Débits de dose ambiante dans le site de Vatovory

Le tableau ci-après présente les valeurs de débit de dose mesurées dans cet ancien site.

Tableau 7.1 : Débits de dose ambiante mesurés dans le site de Vatovory

Code	Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Débit de dose ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
	S	E	S	E	
V1	19° 57' 51,0"	47° 03' 45,7"	465439,77	682131,58	1,61±0,01
V2	19° 57' 51,9"	47° 03' 45,1"	465422,23	682103,98	2,57±0,01
V3	19° 57' 51,4"	47° 03' 45,5"	465433,85	682103,93	22,65±0,01
V4	19° 57' 51,2"	47° 03' 45,0"	465419,40	682125,50	5,05±0,01
V5	19° 57' 43,0"	47° 03' 41,5"	465318,61	682377,95	0,15±0,01
V6	19° 57' 57,7"	47° 03' 47,0"	465476,78	681925,48	0,36±0,01
V7	19° 57' 58,9"	47° 03' 43,6"	465377,82	681888,96	0,15±0,01
V8	19° 57' 59,8"	47° 03' 40,6"	465290,52	681861,62	0,03±0,01
V9	19° 57' 56,8"	47° 03' 39,1"	465247,27	681954,00	0,14±0,01
V10	19° 57' 56,5"	47° 03' 42,6"	465349,03	681962,84	0,33±0,01
V11	19° 57' 55,1"	47° 03' 46,4"	465459,64	682005,47	0,41±0,01
V12	19° 57' 52,8"	47° 03' 41,7"	465323,30	682076,68	0,37±0,01
V13	19° 57' 53,7"	47° 03' 38,4"	465227,28	682049,37	0,37±0,01
V14	19° 57' 50,6"	47° 03' 37,3"	465195,67	682144,78	0,26±0,01
V15	19° 57' 49,8"	47° 03' 40,4"	465285,86	682169,04	0,42±0,01
V16	19° 57' 46,3"	47° 03' 39,5"	465260,10	682278,32	0,32±0,01
V17	19° 57' 48,6"	47° 03' 43,7"	465381,91	682205,57	0,24±0,01
V18	19° 57' 45,5"	47° 03' 42,9"	465359,02	682300,95	0,17±0,01
V19	19° 57' 42,5"	47° 03' 42,1"	465336,11	682393,26	0,14±0,01
V20	19° 57' 43,2"	47° 03' 38,7"	465237,21	682372,11	0,13±0,01
V21	19° 57' 44,0"	47° 03' 35,3"	465138,29	682347,88	0,14±0,01
V22	19° 57' 54,7"	47° 03' 35,2"	465133,13	682020,15	0,13±0,01
V23	19° 57' 47,2"	47° 03' 36,1"	465161,18	682249,43	0,23±0,01
V24	19° 57' 42,5"	47° 03' 42,0"	465333,20	682393,27	0,24±0,01
V25	19° 57' 51,2"	47° 03' 34,0"	465099,68	682126,70	0,21±0,01
V26	19° 57' 51,7"	47° 03' 30,8"	465006,62	682111,67	0,17±0,01
V27	19° 57' 52,6"	47° 03' 27,6"	464913,50	682084,35	0,17±0,01
V28	19° 57' 49,4"	47° 03' 26,7"	464887,71	682182,82	0,15±0,01
V29	19° 57' 49,0"	47° 03' 30,0"	464983,67	682194,76	0,19±0,01
V30	19° 57' 47,6"	47° 03' 33,1"	465073,94	682237,46	0,23±0,01
V31	19° 57' 44,2"	47° 03' 32,1"	465045,26	682342,08	0,14±0,01
V33	19° 57' 45,2"	47° 03' 28,9"	464952,13	682311,69	0,18±0,01
V34	19° 57' 45,7"	47° 03' 25,6"	464856,16	682296,67	0,15±0,01

7.1.1.2. Carte radiométrique de Vatovory

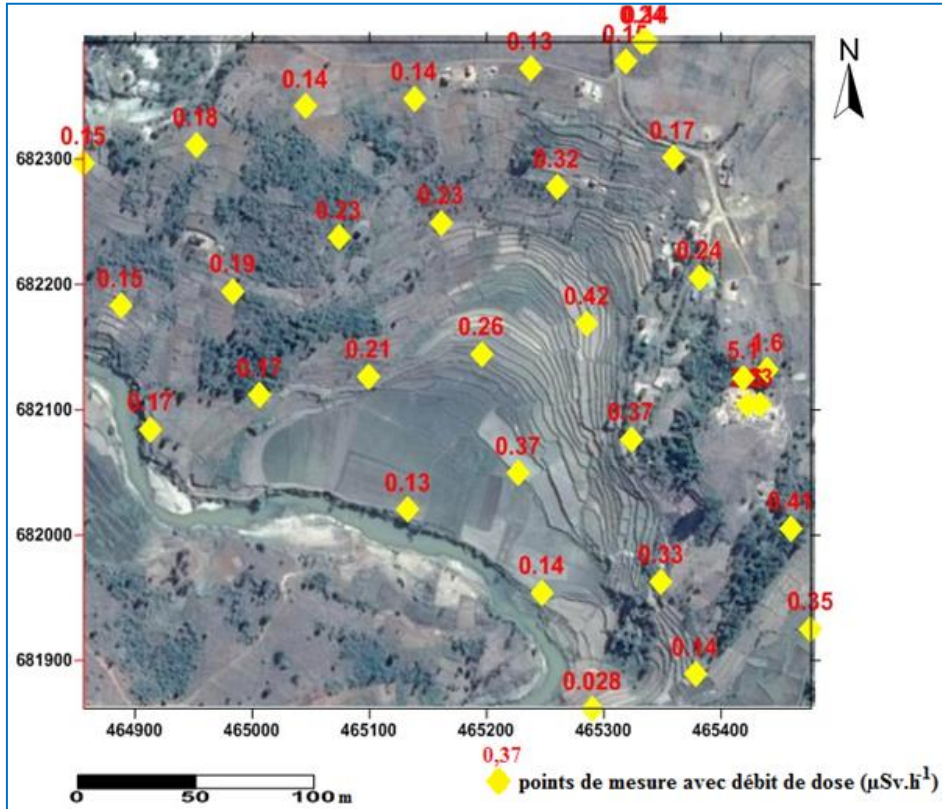


Figure 7.2 : Carte radiométrique de Vatovory
 Source du fond de carte : Google Earth

7.1.2. Cas d’Ambohitrinimasina

L’exploitation dans le site d’Ambohitrinimasina a été faite en ciel ouvert et par galerie. La partie sud-ouest de ce site est dégradée par l’érosion. Durant les mesures in situ, on a trouvé encore des traces d’uranocircite qui se répand sur la surface à l’entrée de cette ancienne galerie.



Figure 7.3 : Ancien site du CEA à Ambohitrinimasina

7.1.2.1. Débits de dose ambiante dans le site d'Ambohitrinimasina

Les résultats de mesure effectuée dans le site d'Ambohitrinimasina sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7.2 : Débits de dose ambiante dans le site d'Ambohitrinimasina

Code	Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Débit de dose ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
	X	Y	S	E	
Aa1	19° 57' 42,2"	47° 03' 29,8"	464978,64	682403,81	0,20±0,01
Aa2	19° 57' 41,6"	47° 03' 29,6"	464972,90	682422,28	0,16±0,01
Aa3	19° 57' 41,4"	47° 03' 29,6"	464972,92	682428,43	1,95±0,01
Aa4	19° 57' 42,3"	47° 03' 24,4"	464821,68	682401,32	0,31±0,01
Aa5	19° 57' 41,6"	47° 03' 27,7"	464917,67	682422,49	0,25±0,01
Aa6	19° 57' 41,0"	47° 03' 31,2"	465019,47	682440,55	0,14±0,01
Aa7	19° 57' 40,2"	47° 03' 34,6"	465118,39	682464,77	0,17±0,01
Aa8	19° 57' 39,3"	47° 03' 38,0"	465217,31	682492,07	0,16±0,01
Aa9	19° 57' 38,5"	47° 03' 41,2"	465310,42	682516,32	0,17±0,01
Aa10	19° 57' 39,2"	47° 03' 41,1"	465307,43	682494,81	0,16±0,01
Aa11	19° 57' 36,1"	47° 03' 40,4"	465287,44	682590,18	0,15±0,01
Aa12	19° 57' 33,0"	47° 03' 39,5"	465261,63	682685,57	0,15±0,01
Aa13	19° 57' 37,0"	47° 03' 37,0"	465188,51	682562,88	0,17±0,01
Aa14	19° 57' 38,0"	47° 03' 33,6"	465089,57	682532,51	0,19±0,01
Aa15	19° 57' 39,1"	47° 03' 30,6"	465002,25	682499,02	0,36±0,01
Aa16	19° 57' 40,6"	47° 03' 27,1"	464900,35	682453,29	0,47±0,01
Aa17	19° 57' 39,9"	47° 03' 26,8"	464891,71	682474,53	0,62±0,01
Aa18	19° 57' 39,7"	47° 03' 30,7"	465005,09	682480,57	0,39±0,01
Aa19	19° 57' 39,4"	47° 03' 29,2"	464961,52	682489,95	1,05±0,01
Aa20	19° 57' 39,7"	47° 03' 26,7"	464888,82	682481,00	0,22±0,01
Aa21	19° 57' 40,4"	47° 03' 23,9"	464807,36	682459,78	0,37±0,01
Aa22	19° 57' 37,0"	47° 03' 22,9"	464778,68	682564,41	0,23±0,01
Aa23	19° 57' 36,4"	47° 03' 25,9"	464865,95	682582,53	0,25±0,01
Aa24	19° 57' 34,8"	47° 03' 28,9"	464953,33	682631,39	0,17±0,01
Aa25	19° 57' 34,0"	47° 03' 32,2"	465049,34	682655,62	0,14±0,01
Aa26	19° 57' 33,2"	47° 03' 35,9"	465156,97	682679,81	0,18±0,01
Aa27	19° 57' 29,9"	47° 03' 37,9"	465215,48	682781,04	0,14±0,01
Aa28	19° 57' 30,9"	47° 03' 35,0"	465131,08	682750,61	0,16±0,01
Aa29	19° 57' 31,8"	47° 03' 31,5"	465029,24	682723,32	0,15±0,01
Aa30	19° 57' 32,7"	47° 03' 28,2"	464933,22	682696,01	0,52±0,01
Aa31	19° 57' 33,7"	47° 03' 25,2"	464845,91	682665,60	0,24±0,01
Aa32	19° 57' 34,8"	47° 03' 22,1"	464755,68	682632,12	0,20±0,01
Aa33	19° 57' 30,6"	47° 03' 31,0"	465014,85	682760,27	0,17±0,01
Aa34	19° 57' 27,1"	47° 03' 34,0"	465102,45	682867,53	1,25±0,01
Aa35	19° 57' 27,7"	47° 03' 33,3"	465082,03	682849,16	0,38±0,01

7.1.2.1. Carte radiométrique d'Ambohitrinimasina

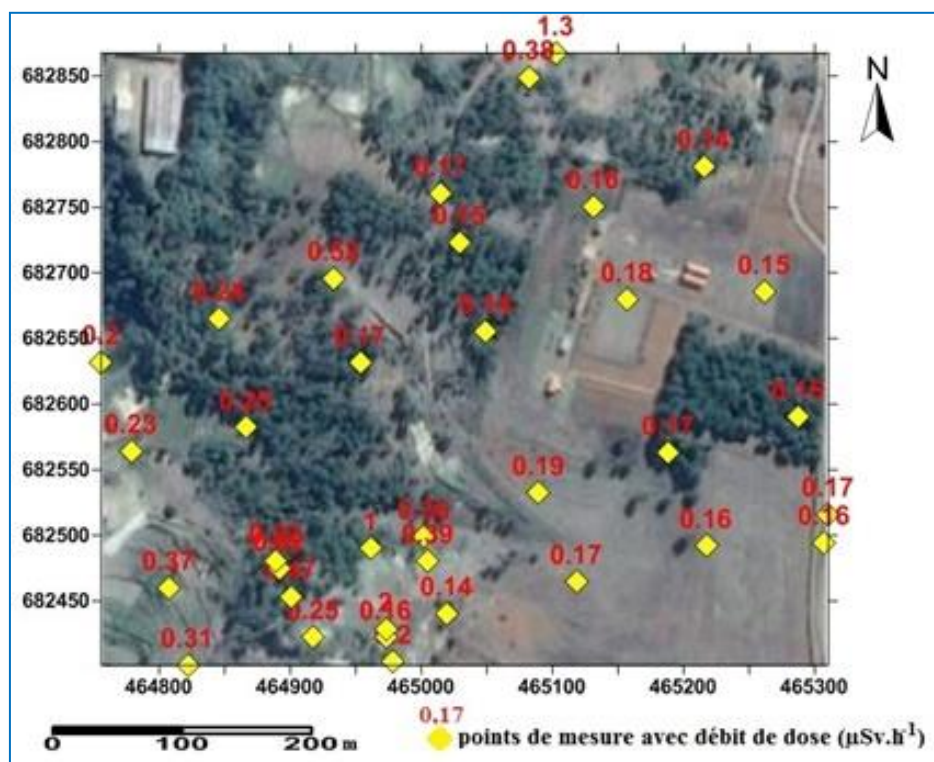


Figure 7.4 : Carte radiométrique d'Ambohitrinimasina
Source du fond de carte : Google Earth

7.1.3. Cas de Fitatahana

La majeure partie de l'exploitation de mine d'uranium de Vinaninkarena du CEA a été extraite du site de Fitatahana. L'exploitation a été faite à ciel ouvert dans ce site. Actuellement, ce site devient un terrain de foot et comme terrain de pâturage par les bouviers venant des villages qui se trouvent à proximité.



Figure 7.5 : Ancien site du CEA à Fitatahana

7.1.3.1. Débits de dose ambiante dans le site Fitatahana

Le tableau ci-dessous présente les valeurs de débits de dose ambiante mesurés dans le site de Fitatahana.

Tableau 7.3 : Débits de dose ambiante dans le site Fitatahana

Code	Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Débit de dose ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
	S	E	S	E	
F1	19° 57' 19,2"	47° 03' 32,8"	465069,17	683110,26	0,13±0,01
F2	19° 57' 19,9"	47° 03' 28,4"	464940,28	683090,47	0,18±0,01
F3	19° 57' 21,5"	47° 03' 29,3"	464965,12	683040,96	0,16±0,01
F4	19° 57' 19,6"	47° 03' 26,3"	464880,26	683098,56	0,13±0,01
F5	19° 57' 21,2"	47° 03' 27,2"	464905,26	683050,67	0,21±0,01
F6	19° 57' 24,4"	47° 03' 29,0"	464957,42	682951,06	0,19±0,01
F7	19° 57' 25,5"	47° 03' 29,9"	464983,45	682917,15	0,33±0,01
F8	19° 57' 22,8"	47° 03' 28,0"	464928,53	683000,35	0,18±0,01
F9	19° 57' 18,0"	47° 03' 27,4"	464911,64	683147,97	0,17±0,01
F10	19° 57' 17,2"	47° 03' 31,6"	465033,81	683172,11	0,17±0,01
F11	19° 57' 18,8"	47° 03' 31,5"	465030,72	683122,93	0,20±0,01
F12	19° 57' 19,7"	47° 03' 31,3"	465024,81	683095,29	0,20±0,01
F13	19° 57' 23,0"	47° 03' 32,4"	465056,40	682993,73	0,16±0,01
F14	19° 57' 21,8"	47° 03' 36,0"	465161,18	683030,23	0,27±0,01
F15	19° 57' 23,1"	47° 03' 35,2"	465137,78	682990,35	2,28±0,01
F16	19° 57' 25,6"	47° 03' 34,7"	465122,96	682913,56	0,38±0,01
F17	19° 57' 25,0"	47° 03' 30,8"	465009,67	682932,42	0,21±0,01
F18	19° 57' 23,3"	47° 03' 30,6"	465004,05	682984,70	0,18±0,01
F19	19° 57' 21,1"	47° 03' 30,6"	465004,30	683052,33	0,17±0,01
F20	19° 57' 19,1"	47° 03' 30,0"	464987,09	683113,88	0,17±0,01

7.1.3.2. Carte radiométrique dans le site de Fitatahana

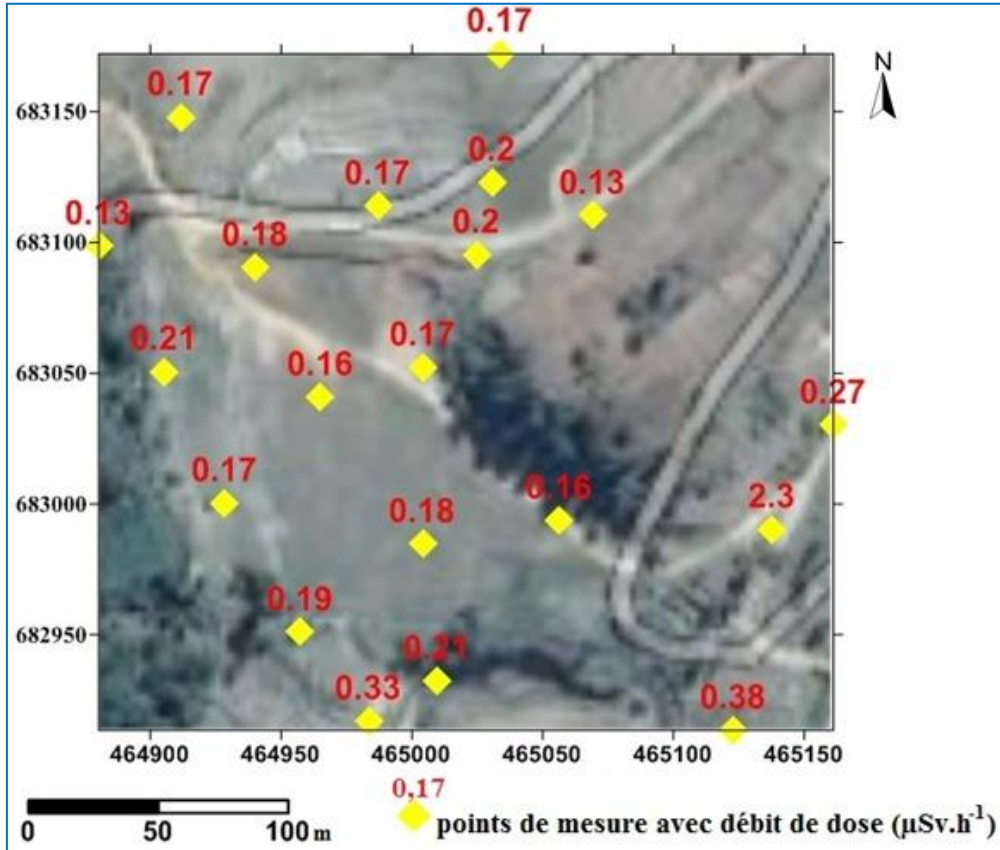


Figure 7.6 : Carte radiométrique de Fitatahana
 Source du fond de carte : Google Earth

7.1.4. Cas du Village de Jeunesse

C’était au Village de Jeunesse que, le CEA a traité par lavage tous les minerais de leur exploitation avant l’exportation. A l’heure actuelle, ce centre de traitement est devenu le Centre National de Formation Professionnelle Artisanale et Rurale (CNFPAR).



Figure 7.7 : Village de Jeunesse

7.1.4.1. Débits de dose ambiante au Village de Jeunesse

Les résultats de mesure effectuée au Village de Jeunesse sont présentés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 7.4 : Débits de dose ambiante au Village de Jeunesse

Code	Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Débit de dose ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
	S	E	S	E	
VJ1	19° 57' 31,8"	47° 03' 21,1"	464726,95	682724,45	0,19±0,01
VJ2	19° 57' 28,5"	47° 03' 20,5"	464709,89	682825,95	0,14±0,01
VJ3	19° 57' 25,3"	47° 03' 19,4"	464678,28	682924,44	0,15±0,01
VJ4	19° 57' 25,5"	47° 03' 25,7"	464861,38	682917,61	0,25±0,01
VJ5	19° 57' 24,4"	47° 03' 29,0"	464957,42	682951,07	0,20±0,01
VJ6	19° 57' 29,9"	47° 03' 24,3"	464819,24	682780,46	0,20±0,01
VJ7	19° 57' 29,4"	47° 03' 26,7"	464890,96	682798,41	0,14±0,01
VJ8	19° 57' 26,9"	47° 03' 22,9"	464780,63	682874,87	0,18±0,01
VJ9	19° 57' 27,2"	47° 03' 11,5"	464448,44	682866,88	0,13±0,01
VJ10	19° 57' 27,3"	47° 03' 14,4"	464532,72	682863,49	0,21±0,01
VJ11	19° 57' 24,8"	47° 03' 14,5"	464535,91	682940,33	0,21±0,01

7.1.4.2. Carte radiométrique du Village de Jeunesse

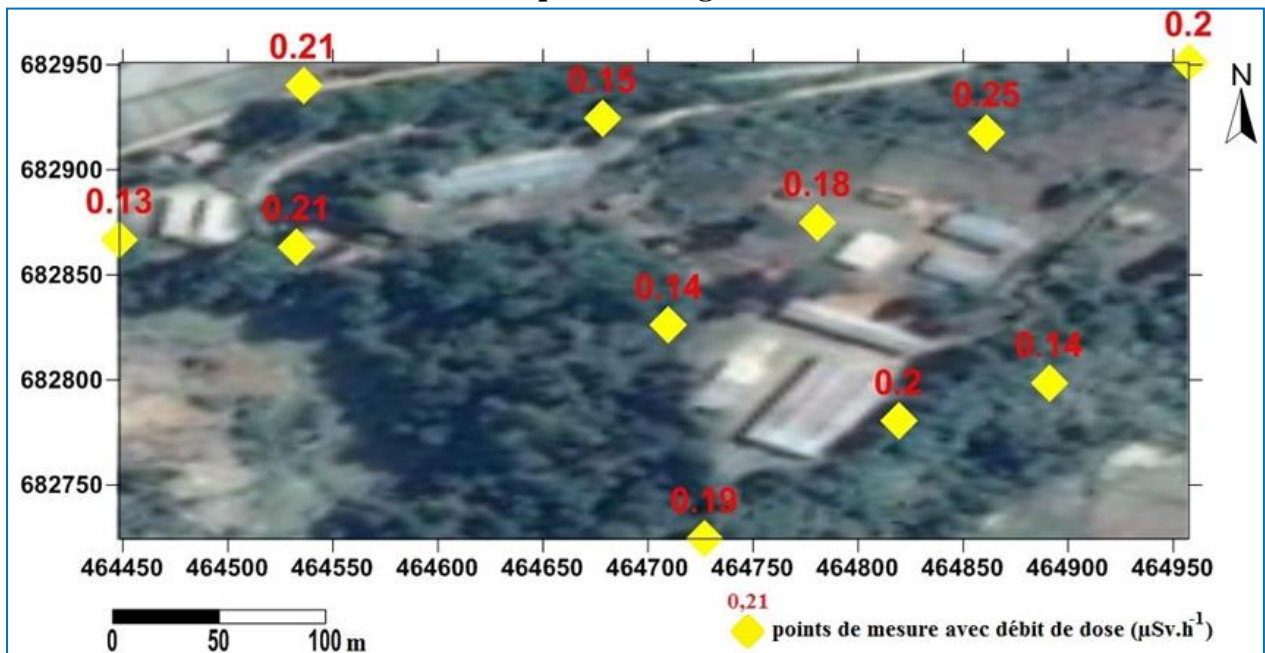


Figure 7.8 : Carte radiométrique du Village de Jeunesse
Source du fond de carte : Google Earth

7.1.5. Cas du Village d’Ambohitraivo

Ce village se situe à 800 m de l’ancien site de Vatovory. C’est beaucoup peuplé que les autres. Alors, des mesures de débit de dose ambiant ont été faites dans le but d’estimer la dose annuelle reçue par la population de ce village qui y habite.



Figure 7.9 : Village d'Ambohitraivo

7.1.5.1. Débits de dose ambiante du village d'Ambohitraivo

Les résultats de mesures par l'appareil sont donnés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7.5 : Débits de dose ambiante du Village d'Ambohitraivo

Code	Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Débit de dose ($\mu\text{Sv.h}^{-1}$)
	S	E	S	E	
Ao1	19° 57' 37,7"	47° 03' 57,3"	465778,47	682539,15	0,17±0,01
Ao2	19° 57' 39,0"	47° 04' 02,5"	465929,46	682498,62	0,18±0,01
Ao3	19° 57' 39,0"	47° 04' 05,5"	466016,66	682498,29	0,25±0,01
Ao4	19° 57' 42,4"	47° 04' 08,1"	466091,83	682393,49	0,18±0,01
Ao5	19° 57' 38,4"	47° 04' 07,0"	466060,33	682516,57	0,17±0,01
Ao6	19° 57' 35,7"	47° 04' 10,2"	466153,65	682599,22	0,22±0,01
Ao7	19° 57' 33,3"	47° 04' 08,9"	466116,14	682673,14	0,18±0,01
Ao8	19° 57' 35,3"	47° 04' 06,4"	466043,24	682611,93	0,20±0,01
Ao9	19° 57' 36,0"	47° 04' 03,8"	465967,59	682590,70	0,20±0,01

7.1.5.2. Carte radiométrique du village d'Ambohitraivo

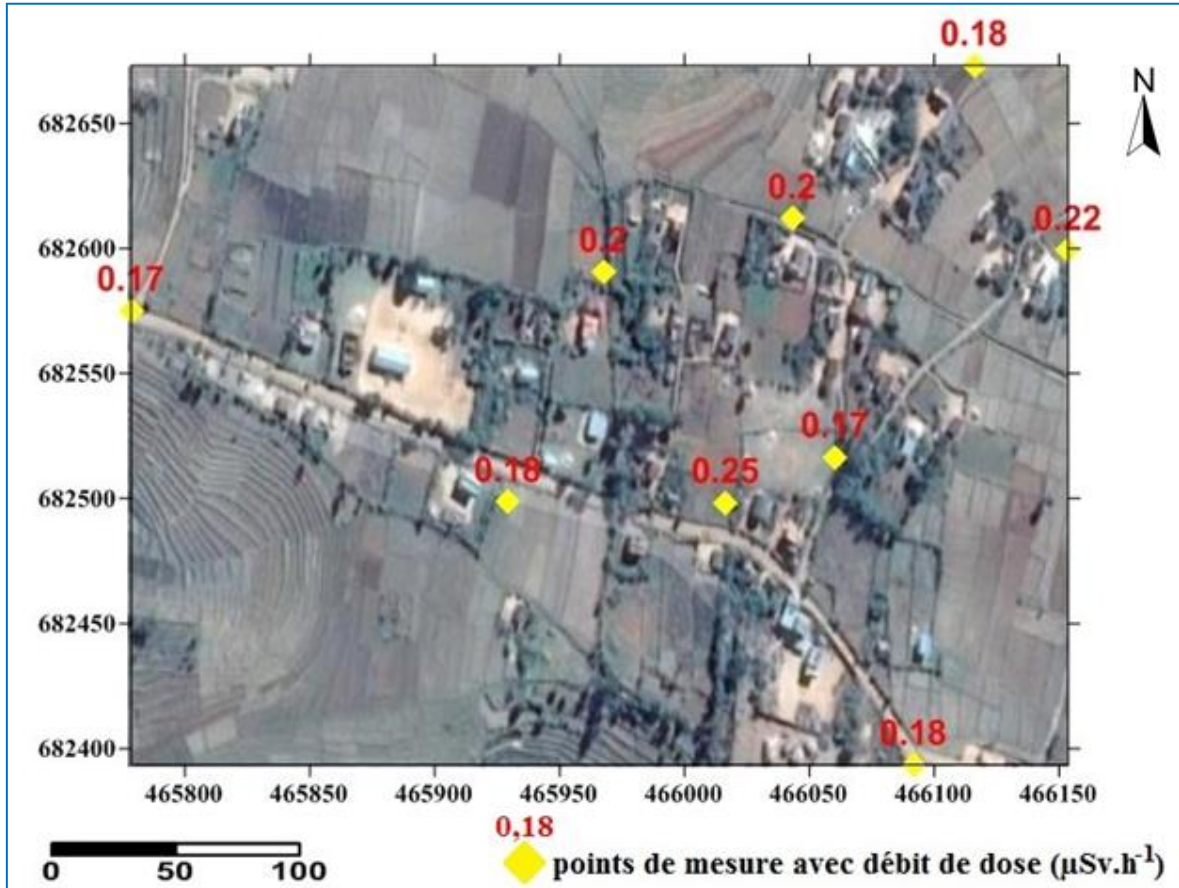


Figure 7.10 : Carte radiométrique d'Ambohitraivo
 Source du fond de carte : Google Earth

7.1.6. Débits de dose à l'intérieur des maisons des villages aux alentours des sites

Pour qu'on puisse estimer la valeur de dose annuelle reçue par la population aux alentours des anciens sites du CEA, des mesures de débit de dose ont été faites à l'intérieur des maisons. Les résultats de mesures sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 7.6 : Débits de dose à l'intérieur des maisons dans les villages aux alentours de la mine de Vinaninkarena

Code	Points de mesure	Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Débits de dose ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)
		S	E	S	E	
Ao1	Village d'Ambohitraivo			466153,65	682598,91	0,44±0,01
Ao2	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 39,7"	47° 4' 5,2"	466007,86	682476,81	0,36±0,01
Ao3	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 36,6"	47° 4' 3,9"	465970,43	682572,25	0,42±0,01
Ao4	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 38,3"	47° 4' 2,7"	465935,36	682520,12	0,25±0,01
Ao5	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 36,6"	47° 3' 1,9"	464168,34	682578,95	0,36±0,01
Ao6	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 37,2"	47° 3' 54,8"	465705,86	682554,80	0,23±0,01
Ao7	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 32,2"	47° 3' 56,0"	465741,32	682708,37	0,27±0,01
Ao8	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 46,6"	47° 4' 9,1"	466120,41	682264,28	0,23±0,01
Ao9	Village d'Ambohitraivo	19° 57' 46,6"	47° 4' 3,4"	465954,74	682264,90	0,25±0,01
V1	Village de Vatovory	19° 57' 47,4"	47° 3' 43,1"	465364,62	682242,53	0,28±0,01
V2	Village de Vatovory	19° 57' 46,9"	47° 3' 43,3"	465370,49	682257,87	0,30±0,01
V3	Village de Vatovory	19° 57' 47,6"	47° 3' 43,9"	465387,85	682236,29	0,33±0,01
V4	Village de Vatovory	19° 57' 49,6"	47° 3' 42,2"	465338,21	682175,00	0,44±0,01
VJ1	Village de Jeunesse	19° 57' 26,4"	47° 3' 13,9"	464518,29	682891,21	0,25±0,01
VJ2	Village de Jeunesse	19° 57' 27,2"	47° 3' 22,8"	464776,89	682865,67	0,20±0,01
VJ3	Village de Jeunesse	19° 57' 28,1"	47° 3' 21,9"	4674750,63	682838,10	0,23±0,01
VJ4	Village de Jeunesse	19° 57' 26,0"	47° 3' 22,3"	464762,49	682902,61	0,20±0,01
VJ5	Village de Jeunesse	19° 57' 25,7"	47° 3' 18,0"	464637,54	682912,29	0,20±0,01

7.1.7. Vue d'ensemble des différents sites

Le tableau suivant résume la valeur maximale, valeur minimale et la valeur moyenne de débit de dose en plein air pour les différents sites.

Tableau 7.7 : Valeur maximale, valeur minimale et la valeur moyenne de débit de dose pour les différents sites ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)

	Ambohitraivo	Ambohitrinimasina	Fitatahana	Vatovory	Village de Jeunesse
Nombre des points de mesure	9	35	20	33	11
Valeur maximale	0,25	1,95	2,28	22,65	0,25
Valeur minimale	0,17	0,14	0,13	0,03	0,13
Valeur moyenne	0,20	0,34	0,30	1,16	0,18

Le diagramme suivant représente les valeurs maximales de débit de dose de ce tableau.

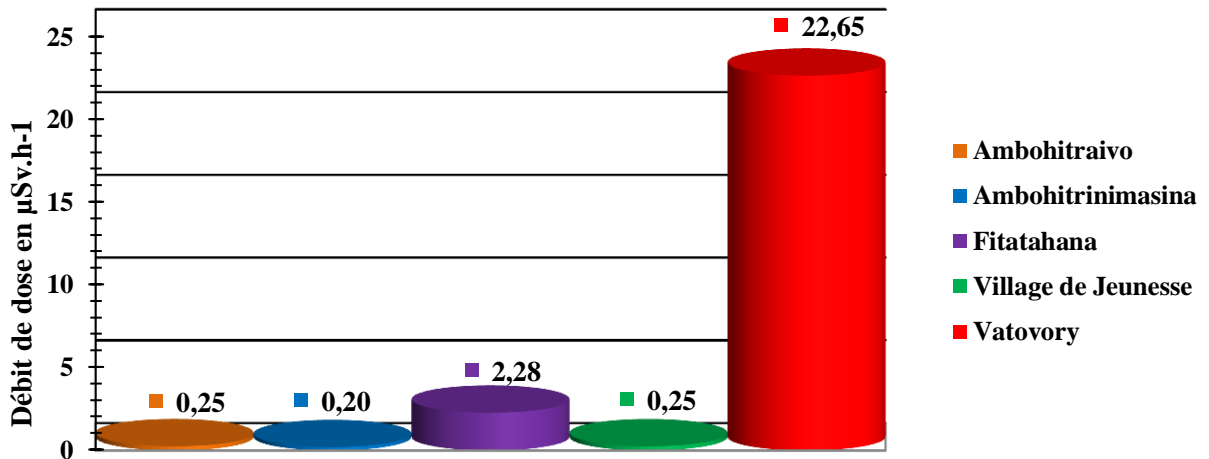


Figure 7.11 : Niveau de débits de doses maximales pour chaque site ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)

Afin de visualiser nettement la variation des débits de dose dans les anciens sites du CEA, la figure suivante présente la courbe isodose de l'ancienne mine d'uranium de Vinaninkarena obtenue à partir du logiciel « surfer 11 ».

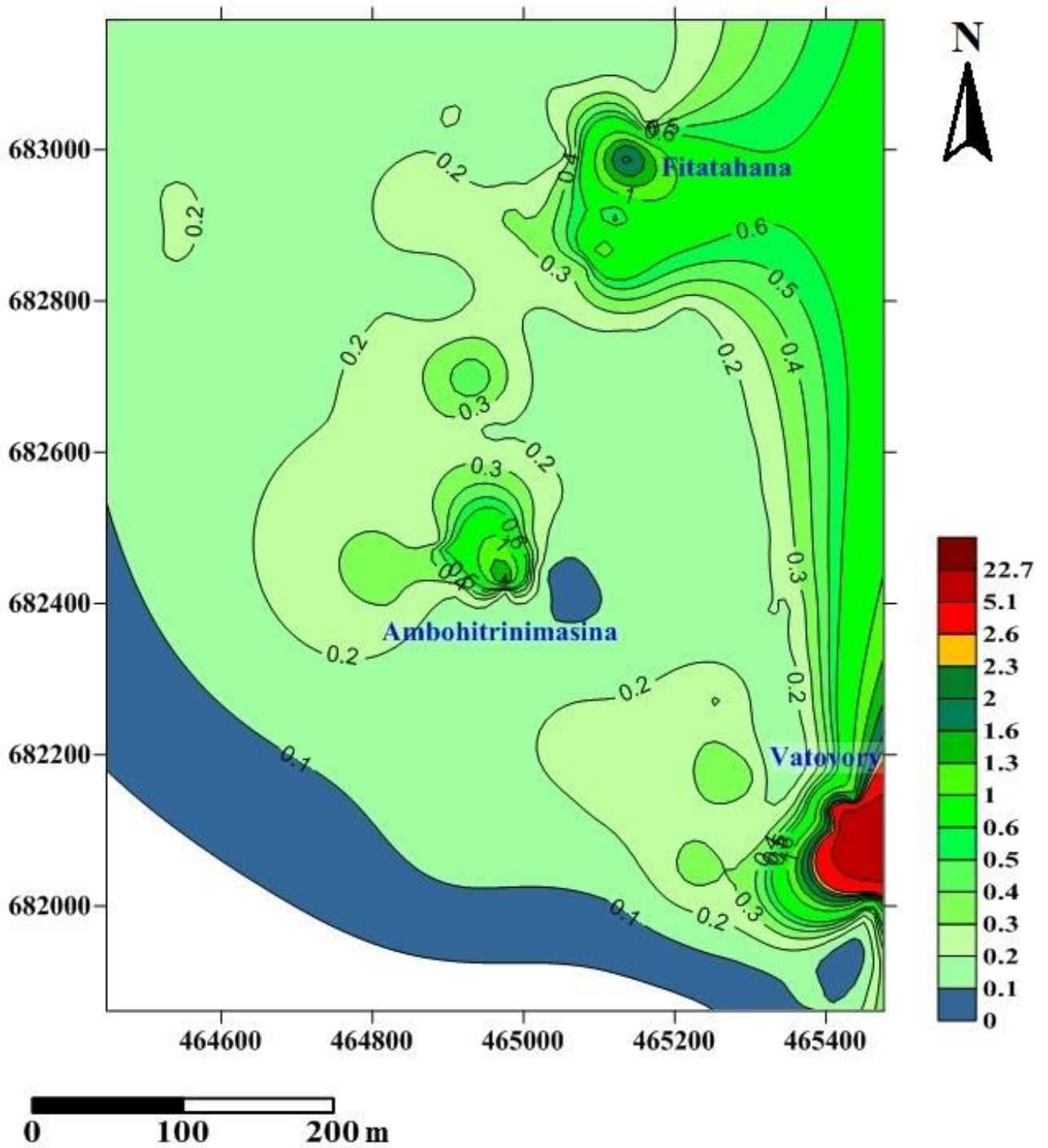


Figure 7.12 : Courbe isodose de l'ancienne mine d'uranium de Vinaninkarena (débits de dose en $\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)

Pour un village donné, après avoir comparé les débits de dose à l'intérieur et à l'extérieur de la maison (en plein air), ce dernier est élevé par rapport au premier.

Pour estimer la dose équivalente annuelle reçue par la population qui habite aux alentours des anciens sites du CEA, les hypothèses suivantes ont été prises:

- les habitants travaillent de 7 h à 17 h, soit 10 h de travail par jour. En d'autre terme, ils sont exposés aux rayonnements à l'extérieur de la maison pendant 10 h;
- les habitants restent chez eux pendant les 14 heures restantes ;
- une année vaut 365 jours ;
- les valeurs moyennes de débit de dose sont utilisées pour l'estimation de dose annuelle.

En tenant compte de ces hypothèses, l'estimation de la moyenne de dose équivalente annuelle pour chaque zone est présentée dans le tableau qui suit.

Tableau 7.8 : Moyenne de dose équivalente annuelle

Zones	Moyenne de débits de dose ($\mu\text{Sv}\cdot\text{h}^{-1}$)		Dose équivalente annuelle (mSv)
	à l'extérieur de la maison	à l'intérieur de la maison	
Ambohitraivo	0,20	0,31	2,30
Ambohitrinimasina	0,34	-	1,25
Fitatahana	0,30	-	1,11
Vatovory	1,16	0,34	5,96
Village de Jeunesse	0,18	0,22	1,78

7.2. Identification des radionucléides

Des radionucléides ont été découverts dans 62 points parmi la totalité des points de mesure des anciens sites du CEA. Les radionucléides identifiés sont regroupés dans le tableau ci-dessous avec leurs positions géographiques respectives.

Tableau 7.9 : Radionucléides identifiés dans les anciens sites du CEA

Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Radionucléides identifiés
S	E	S	E	
19° 57' 51,00"	47° 03' 45,70"	465439,77	682131,58	Ra-226
19° 57' 51,90"	47° 03' 45,10"	465422,23	682103,98	Ra-226
19° 57' 51,40"	47° 03' 45,50"	465433,86	682103,94	Ra-226
19° 57' 51,23"	47° 03' 45,54"	465435,10	682124,53	Ra-226
19° 57' 50,95"	47° 03' 44,89"	465416,24	682133,21	Ra-226
19° 57' 55,12"	47° 03' 44,33"	465399,48	682005,08	Bi-207
19° 57' 57,80"	47° 03' 47,21"	465482,88	681922,39	Ra-226
19° 57' 56,80"	47° 03' 39,10"	465247,28	681954,01	K-40
19° 57' 56,50"	47° 03' 42,60"	465349,04	681962,85	Ra-226
19° 57' 55,52"	47° 03' 43,68"	465444,66	682039,96	Ra-226
19° 57' 55,10"	47° 03' 46,40"	465459,65	682005,47	Ra-226
19° 57' 53,98"	47° 03' 45,88"	465444,66	682039,96	Ra-226
19° 57' 53,56"	47° 03' 46,13"	465451,98	682052,84	Ra-226
19° 57' 52,40"	47° 03' 45,28"	465427,40	682088,59	Ra-226
19° 57' 51,64"	47° 03' 43,00"	465361,22	682112,20	Ra-226
19° 57' 52,10"	47° 03' 41,46"	465316,41	682098,23	Ra-226
19° 57' 49,80"	47° 03' 40,40"	465285,87	682169,04	Ra-226
19° 57' 48,60"	47° 03' 43,70"	465381,92	682205,57	K-40
19° 57' 46,79"	47° 03' 35,71"	465149,89	682262,08	Th-232/U-232
19° 57' 46,63"	47° 03' 38,85"	465241,18	682266,66	Ra-226
19° 57' 52,60"	47° 03' 27,60"	464913,51	682084,36	Ra-226
19° 57' 49,40"	47° 03' 26,70"	464887,72	682182,82	Ra-226
19° 57' 47,60"	47° 03' 33,10"	465073,94	682237,46	Ra-226
19° 57' 46,89"	47° 03' 33,28"	465079,25	682259,27	Ra-226
19° 57' 47,04"	47° 03' 33,05"	465072,55	682254,68	Ra-226
19° 57' 43,07"	47° 03' 23,30"	464789,62	682377,77	Ra-226
19° 57' 39,20"	47° 03' 41,10"	465307,43	682494,81	Th-232/U-232
19° 57' 39,10"	47° 03' 30,60"	465002,25	682499,02	Ra-226
19° 57' 40,19"	47° 03' 27,89"	464923,36	682465,81	Ba-133
19° 57' 40,24"	47° 03' 27,28"	464905,62	682464,34	Ra-226
19° 57' 40,6"	47° 03' 27,1"	464900,35	682453,29	Ra-226

Tableau 7.9 (suite): Radionucléides identifiés dans les anciens sites du CEA

Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		Radionucléides identifiés
S	E	S	E	
19° 57' 40,88"	47° 03' 26,95"	464895,95	682444,70	Ra-226
19° 57' 39,90"	47° 03' 26,80"	464891,71	682474,53	Ra-226
19° 57' 40,25"	47° 03' 26,42"	464880,62	682464,12	Ra-226
19° 57' 39,70"	47° 03' 30,70"	465005,09	682480,57	Ra-226
19° 57' 39,46"	47° 03' 30,81"	465008,31	682487,93	Ra-226
19° 57' 38,59"	47° 03' 30,71"	465005,50	682514,69	Ra-226
19° 57' 39,34"	47° 03' 29,54"	464971,41	682491,76	Ra-226
19° 57' 39,31"	47° 03' 29,05"	464957,17	682492,73	Ra-226
19° 57' 40,40"	47° 03' 23,90"	464807,36	682459,78	Ra-226
19° 57' 32,70"	47° 03' 28,20"	464933,22	682696,01	Ra-226
19° 57' 34,80"	47° 03' 22,10"	464755,68	682632,12	K-40
19° 57' 31,80"	47° 03' 21,10"	464726,95	682724,45	K-40
19° 57' 28,50"	47° 03' 20,50"	464709,89	682825,95	Na-22
19° 57' 23,00"	47° 03' 23,20"	464789,00	682994,73	K-40
19° 57' 25,50"	47° 03' 25,70"	464861,38	682917,61	Ra-226
19° 57' 24,40"	47° 03' 29,00"	464957,42	682951,07	Ra-226
19° 57' 26,71"	47° 03' 34,51"	465117,31	682879,46	Ra-226
19° 57' 21,99"	47° 03' 18,37"	464648,72	683026,30	Ra-226
19° 57' 16,25"	47° 03' 25,38"	464853,13	683201,99	Ra-226
19° 57' 23,09"	47° 03' 35,12"	465135,46	682990,68	Ra-226
19° 57' 17,20"	47° 03' 31,60"	465033,82	683172,11	K-40
19° 57' 19,70"	47° 03' 31,30"	465024,81	683095,30	Ra-226
19° 57' 23,00"	47° 03' 32,40"	465056,41	682993,74	K-40
19° 57' 23,10"	47° 03' 35,20"	465137,78	682990,36	Ra-226
19° 57' 25,60"	47° 03' 34,70"	465122,96	682913,56	Ra-226
19° 57' 27,10"	47° 03' 34,00"	465102,45	682867,53	Ra-226
19° 57' 26,95"	47° 03' 31,78"	465037,94	682872,38	Ra-226
19° 57' 27,37"	47° 03' 32,24"	465051,26	682859,42	Ra-226
19° 57' 25,00"	47° 03' 30,80"	465009,67	682932,43	K-40
19° 57' 23,05"	47° 03' 30,24"	464993,62	682992,43	Ra-226
19° 57' 18,95"	47° 03' 29,95"	464985,66	683118,50	K-40

La figure suivante montre, l'abondance de présence de chaque type de radionucléide parmi les 62 points de mesures.

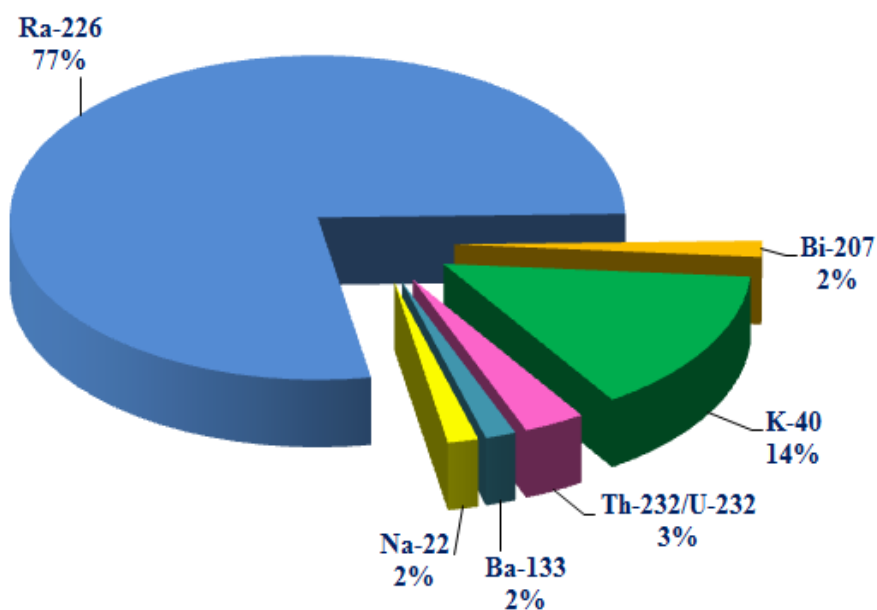


Figure 7.13 : Abondance de chaque radionucléide dans les anciens sites du CEA

7.3. Contamination surfacique

Des séries de mesures de contamination surfacique pour deux (2) radionucléides ont été faites lors des moments de mesure. Ces radionucléides sont le carbone 14 et le césium 137. Les valeurs obtenues sont présentées par le tableau ci-dessous.

Tableau 7.10 : Contamination surfacique (Bq.m⁻²)

Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		C-14	Cs-137
S	E	S	E		
19° 57' 52,0"	47° 03' 45,8"	465442,56	682100,83	550,00±0,01	842,00±0,01
19° 57' 51,9"	47° 03' 49,2"	465541,40	682103,53	1370,00±0,01	624,00±0,01
19° 57' 51,5"	47° 03' 45,2"	465425,18	682116,27	96,40±0,01	31,80±0,01
19° 57' 51,2"	47° 03' 45,0"	465419,40	682125,51	31,10±0,01	0,80±0,01
19° 57' 43,0"	47° 03' 41,5"	465318,62	682377,96	31,40±0,01	85,00±0,01
19° 57' 57,7"	47° 03' 47,0"	465476,79	681925,48	4300,00±0,01	651,00±0,01
19° 57' 57,7"	47° 03' 43,6"	465377,97	681925,85	3980,00±0,01	1240,00±0,01
19° 57' 59,8"	47° 03' 40,6"	465290,53	681861,63	3960,00±0,01	790,00±0,01
19° 57' 56,8"	47° 03' 39,1"	465247,28	681954,01	557,00±0,01	3040,00±0,01
19° 57' 56,5"	47° 03' 42,6"	465349,04	681962,85	2230,00±0,01	676,00±0,01
19° 57' 55,1"	47° 03' 46,4"	465459,65	682005,47	625,00±0,01	117,00±0,01
19° 57' 52,8"	47° 03' 41,7"	465323,31	682076,68	4270,00±0,01	1220,00±0,01
19° 57' 53,7"	47° 03' 38,4"	465227,29	682049,38	3540,00±0,01	1240,00±0,01
19° 57' 50,5"	47° 03' 37,3"	465195,68	682147,86	3940,00±0,01	627,00±0,01
19° 57' 49,8"	47° 03' 40,4"	465285,87	682169,04	2817,00±0,01	382,00±0,01
19° 57' 48,7"	47° 03' 43,8"	465384,81	682202,49	1870,00±0,01	531,00±0,01
19° 57' 45,6"	47° 03' 43,0"	465361,92	682297,87	1790,00±0,01	620,00±0,01
19° 57' 42,5"	47° 03' 42,0"	465333,21	682393,27	2710,00±0,01	670,00±0,01
19° 57' 43,2"	47° 03' 38,7"	465237,21	682372,11	3740,00±0,01	8470,00±0,01
19° 57' 44,0"	47° 03' 47,2"	465484,18	682346,60	4310,00±0,01	1420,00±0,01
19° 57' 47,2"	47° 03' 36,1"	465161,18	682249,43	4350,00±0,01	9720,00±0,01
19° 57' 42,5"	47° 03' 42,0"	465333,21	682393,27	3940,00±0,01	1260,00±0,01
19° 57' 51,2"	47° 03' 34,0"	465099,69	682126,70	79800,00±0,01	0,00±0,01
19° 57' 51,7"	47° 03' 30,8"	465006,62	682111,68	1540,00±0,01	224,00±0,01
19° 57' 52,6"	47° 03' 27,6"	464913,51	682084,36	1500,00±0,01	610,00±0,01
19° 57' 49,4"	47° 03' 26,7"	464887,72	682182,82	898,00±0,01	171,00±0,01
19° 57' 49,0"	47° 03' 30,0"	464983,68	682194,76	3670,00±0,01	828,00±0,01
19° 57' 47,6"	47° 03' 33,1"	465073,94	682237,46	9170,00±0,01	1220,00±0,01
19° 57' 44,2"	47° 03' 32,1"	465045,26	682342,09	0,03±0,01	501,00±0,01
19° 57' 45,2"	47° 03' 28,9"	464952,14	682311,69	2100,00±0,01	875,00±0,01
19° 57' 45,7"	47° 03' 25,6"	464856,17	682296,68	4010,00±0,01	503,00±0,01
19° 57' 42,3"	47° 03' 24,4"	464821,68	682401,32	1470,00±0,01	627,00±0,01
19° 57' 41,6"	47° 03' 27,7"	464917,67	682422,49	2640,00±0,01	528,00±0,01
19° 57' 41,0"	47° 03' 31,2"	465019,47	682440,55	0,04±0,01	0,00±0,01
19° 57' 40,2"	47° 03' 34,6"	465118,39	682464,77	1030,00±0,01	460,00±0,01
19° 57' 39,3"	47° 03' 38,0"	465217,31	682492,07	3640,00±0,01	1430,00±0,01
19° 57' 38,5"	47° 03' 41,2"	465310,42	682516,32	29200,00±0,01	1210,00±0,01
19° 57' 36,1"	47° 03' 40,4"	465287,44	682590,18	3610,00±0,01	742,00±0,01

Tableau 7.10 (suite) : Contamination surfacique (Bq.m⁻²)

Coordonnées Lambert		Coordonnées Laborde (m)		C-14	Cs-137
S	E	S	E		
19° 57' 33,0"	47° 03' 39,5"	465261,63	682685,57	1560,00±0,01	647,00±0,01
19° 57' 37,0"	47° 03' 37,0"	465188,51	682562,88	3700,00±0,01	684,00±0,01
19° 57' 38,0"	47° 03' 33,6"	465089,57	682532,51	1460,00±0,01	995,00±0,01
19° 57' 39,1"	47° 03' 30,6"	465002,25	682499,02	1580,00±0,01	511,00±0,01
19° 57' 39,7"	47° 03' 26,7"	464888,82	682481,00	1020,00±0,01	4,41±0,01
19° 57' 40,4"	47° 03' 23,9"	464807,36	682459,78	1630,00±0,01	134,00±0,01
19° 57' 37,0"	47° 03' 22,9"	464778,68	682564,41	1400,00±0,01	0,00±0,01
19° 57' 36,4"	47° 03' 25,9"	464865,95	682582,53	3120,00±0,01	725,00±0,01
19° 57' 34,8"	47° 03' 28,9"	464953,33	682631,39	2480,00±0,01	489,00±0,01
19° 57' 34,0"	47° 03' 32,2"	465049,34	682655,62	1770,00±0,01	589,00±0,01
19° 57' 33,2"	47° 03' 35,9"	465156,97	682679,81	1880,00±0,01	808,00±0,01
19° 57' 29,9"	47° 03' 37,9"	465215,48	682781,04	1870,00±0,01	588,00±0,01
19° 57' 30,9"	47° 03' 35"	465131,08	682750,61	1880,00±0,01	674,00±0,01
19° 57' 31,8"	47° 03' 31,5"	465029,24	682723,32	32500,00±0,01	1360,00±0,01
19° 57' 32,7"	47° 03' 28,2"	464933,22	682696,01	1900,00±0,01	625,00±0,01
19° 57' 33,7"	47° 03' 25,2"	464845,91	682665,60	2340,00±0,01	1140,00±0,01
19° 57' 34,8"	47° 03' 22,1"	464755,68	682632,12	2040,00±0,01	624,00±0,01
19° 57' 31,8"	47° 03' 21,1"	464726,95	682724,45	9560,00±0,01	95400,00±0,01
19° 57' 28,5"	47° 03' 20,5"	464709,89	682825,95	98300,00±0,01	93500,00±0,01
19° 57' 25,3"	47° 03' 19,4"	464678,28	682924,44	4780,00±0,01	1200,00±0,01
19° 57' 23,0"	47° 03' 23,2"	464789,00	682994,73	4400,00±0,01	1390,00±0,01
19° 57' 25,5"	47° 03' 25,7"	464861,38	682917,61	4230,00±0,01	1420,00±0,01
19° 57' 24,4"	47° 03' 29"	464957,42	682951,07	3870,00±0,01	1260,00±0,01
19° 57' 25,5"	47° 03' 29,9"	464983,46	682917,16	89400,00±0,01	91300,00±0,01
19° 57' 30,6"	47° 03' 31,0"	465014,85	682760,27	96400,00±0,01	52400,00±0,01
19° 57' 22,8"	47° 03' 28,0"	464928,54	683000,36	2010,00±0,01	607,00±0,01
19° 57' 18,0"	47° 03' 27,4"	464911,65	683147,97	3200,00±0,01	855,00±0,01
19° 57' 17,2"	47° 03' 31,6"	465033,82	683172,11	1470,00±0,01	612,00±0,01
19° 57' 19,7"	47° 03' 31,3"	465024,81	683095,30	1850,00±0,01	498,00±0,01
19° 57' 23"	47° 03' 32,4"	465056,41	682993,74	1510,00±0,01	458,00±0,01
19° 57' 23,1"	47° 03' 35,2"	465137,78	682990,36	2960,00±0,01	1070,00±0,01
19° 57' 25,6"	47° 03' 34,7"	465122,96	682913,56	2400,00±0,01	769,00±0,01
19° 57' 27,1"	47° 03' 34,0"	465102,45	682867,53	1030,00±0,01	473,00±0,01
19° 57' 27,7"	47° 03' 33,3"	465082,03	682849,16	2140,00±0,01	785,00±0,01
19° 57' 25"	47° 03' 30,8"	465009,67	682932,43	1550,00±0,01	618,00±0,01
19° 57' 23,3"	47° 03' 30,6"	465004,05	682984,71	1270,00±0,01	494,00±0,01
19° 57' 21,1"	47° 03' 30,6"	465004,31	683052,34	1330,00±0,01	259,00±0,01
19° 57' 19,1"	47° 03' 30,0"	464987,09	683113,88	1510,00±0,01	150,00±0,01

En faisant la moyenne pour chaque radionucléide, le tableau ci-dessous donne la valeur moyenne du niveau de contamination dans les sites.

Tableau 7.11 : Valeur moyenne de contamination surfacique pour chaque radionucléide

Radionucléide	Contamination moyenne (Bq.m ⁻²)
C-14	7876
Cs-137	5267,1

Les deux figures suivantes montrent la répartition spatiale de la contamination surfacique pour le carbone-14 et celle de césium-137.

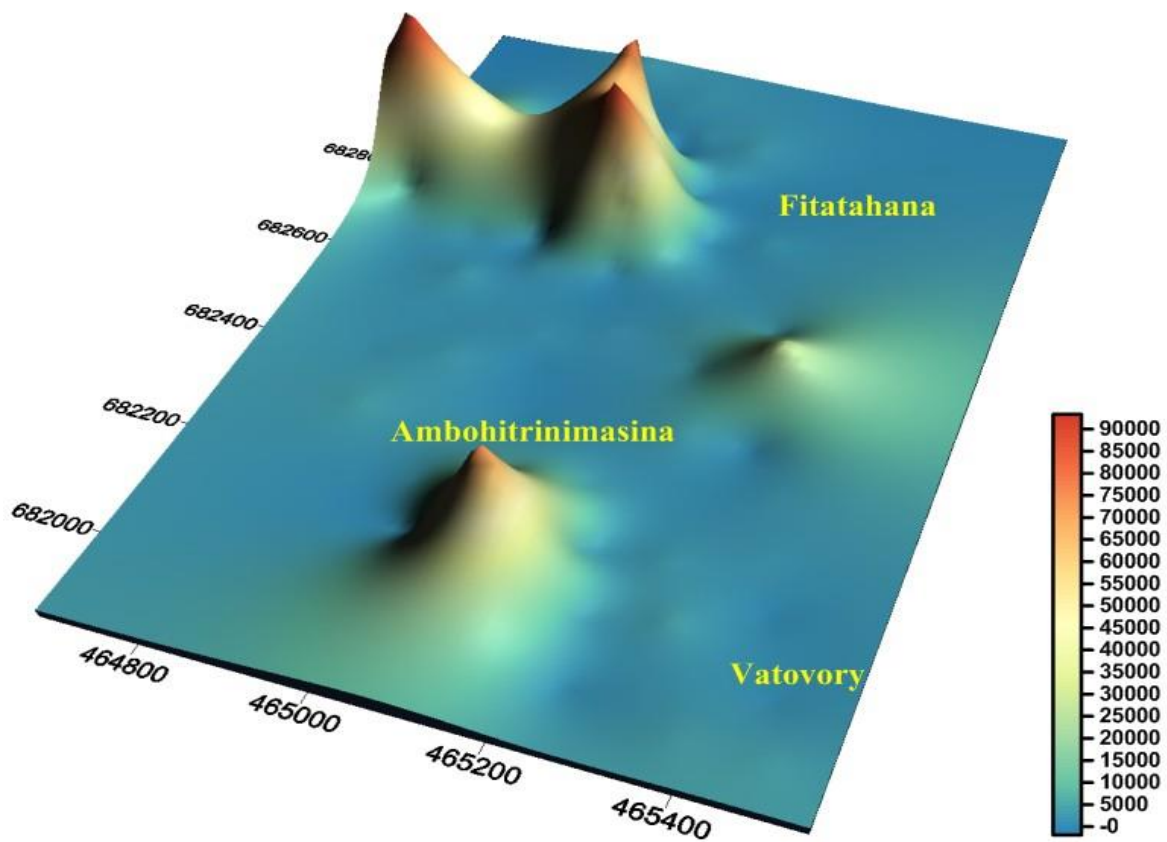


Figure 7.14 : Répartition spatiale de contamination surfacique en carbone 14 (Bq.m⁻²) dans l'ancienne mine d'uranium de Vinaninkarena

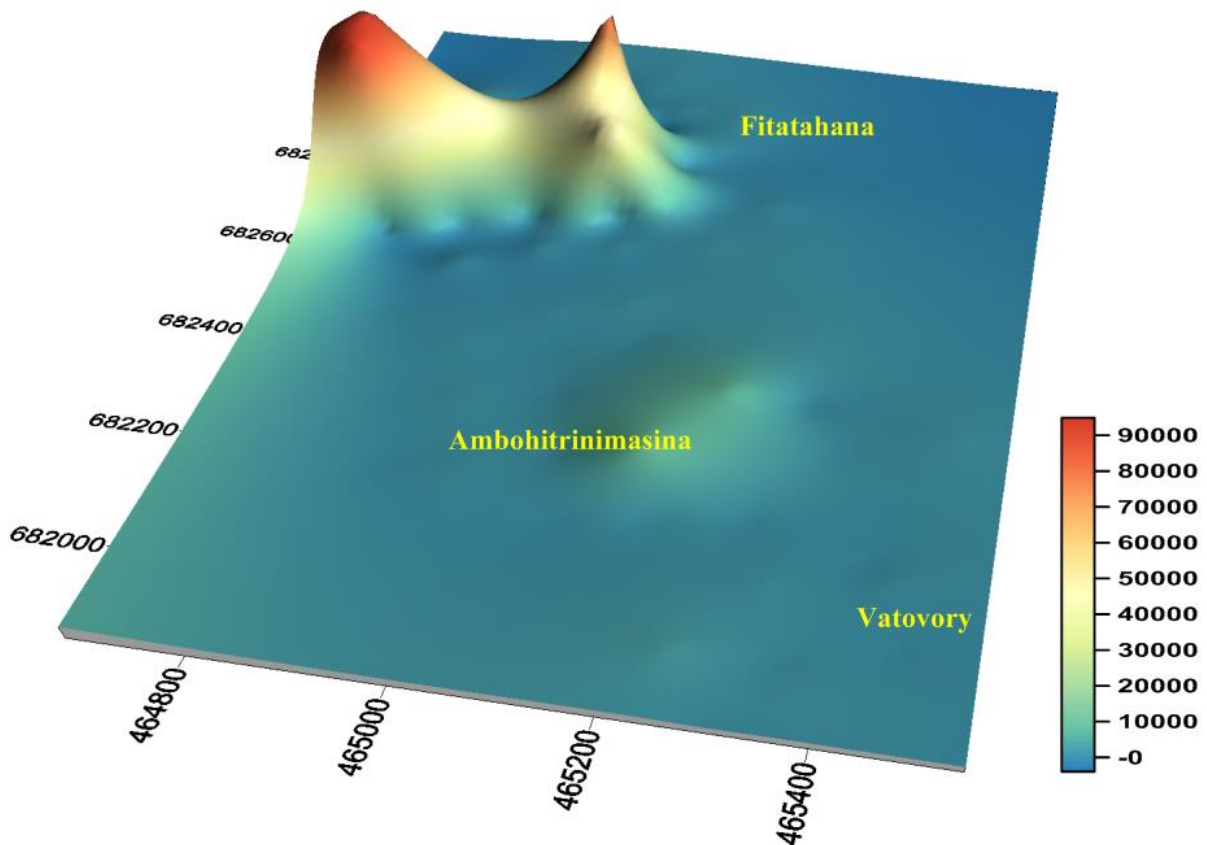


Figure 7.15 : Répartition spatiale de contamination surfacique en césium 137 ($Bq.m^{-2}$) de l'ancienne mine d'uranium de Vinaninkarena

7.4. Interpretation

Les valeurs des débits de dose de gamma ambiant montrent que les niveaux de bruit de fond mesurés à 1m du sol dans les zones étudiées varient suivant les lieux. De ce fait, les valeurs varient de $0,03 \mu Sv.h^{-1}$ à $22,65 \mu Sv.h^{-1}$. On peut affirmer que la plupart des valeurs sont inférieures à la limite réglementaire de $2,5 \mu Sv.h^{-1}$ pour le public. Alors, aucune précaution particulière n'est donc à prendre pour la circulation des villageois dans les anciens sites. Les risques restent minimes pour la population locale. Par contre, 3 points de la zone de Vatovory, qui se situent au cœur de l'ancienne carrière, présentent des valeurs de débit de dose supérieures à la limite réglementaire. C'est pourquoi la circulation du public dans ce site doit être réglementée. La dose annuelle estimée pour chaque site est inférieure à 20 mSv. Cette limite est la recommandation de la CIPR dans sa collection normes de sûreté N°GSR Partie III pour l'exposition existante. Au village d'Ambohitraivo, les débits de dose sont largement inférieurs à la valeur limite. Aucune précaution n'est donc à prendre pour ce village.

La figure 7.13 montre l'abondance de chaque radionucléide identifié par rapport au nombre des points qui indiquent la présence des radionucléides. Le radionucléide ^{226}Ra domine dans cette zone avec un pourcentage de 77% ; suivi par le ^{40}K (14%). La présence de $^{232}\text{Th}/^{232}\text{U}$ (3%), ^{207}Bi (2%), ^{22}Na (2%) et de ^{133}Ba (2%) est rare dans cette zone. Comme tous ces sites sont de l'ancien site d'extraction d'uranium, alors la forte présence de ^{226}Ra dans cette zone est normale. En effet, le ^{226}Ra est parmi les descendants de la famille de l' ^{238}U . Ainsi, avec une période radioactive de 1600 ans, le ^{226}Ra est en équilibre séculaire avec son père ^{238}U . On remarque aussi la présence d'une autre famille naturelle qui est le $^{232}\text{Th}/^{232}\text{U}$. Vu que le ^{226}Ra est le père direct du radon ^{222}Rn , alors la teneur en radon dans cette zone est relativement élevée. Pour minimiser le risque d'inhalation de ce gaz radioactif, une précaution pour la structure de la maison de la population environnante est jugée nécessaire. En effet, le sol de la zone est une source majeure d'émanation de radon dans l'atmosphère [17].

A l'échelle mondiale, il n'y a pas de limite réglementaire de contamination surfacique qui définit une valeur maximale à partir de laquelle on doit faire des actions correctives. La contamination en carbone 14 présente des risques permanents car ce radionucléide a une période radioactive de 5730 ans qui ne disparaît pas facilement. La figure 7.14 montre que l'activité surfacique de carbone 14 est élevée dans les points moins aérés. En effet, les zones qui présentent des pics sur la figure sont des zones soit de basse altitude, soit recouvertes par des arbres. Plus l'altitude augmente, plus la contamination surfacique est élevée, plus le risque d'inhalation de carbone 14 sous forme de gaz carbonique radioactif est important.

La présence de Cs-137 sur la surface montre les retombées des nuages radioactives des anciens essais nucléaires dans l'atmosphère, et les accidents majeurs comme celui de Tchernobyl en 1986. L'UNSCEAR a publié que la moyenne de dépôt cumulé en Cs-137 ($T=30,05$ ans), pour l'hémisphère sud après les essais nucléaires atmosphériques entre 1945-1980, vaut 35000 Bq.m^{-2} [18]. En tenant compte de la demi-vie de ce radionucléide, cette valeur baisse jusqu'à $15611,72 \text{ Bq.m}^{-2}$ actuellement. La valeur moyenne $5610,91 \text{ Bq.m}^{-2}$ de contamination en Cs-137 dans cette mine d'uranium est donc 3 fois plus faible que cette valeur.

Chapitre 8 : RECOMMANDATIONS

Les résultats et les interprétations précédents ont permis d'énumérer quelques recommandations.

Pour l'ancien site d'exploitation de Vatovory, dans la zone où les débits de dose dépassent la limite réglementaire pour le public, il est nécessaire d'éviter le passage à proximité de l'ancien site. Ce geste réduit l'exposition externe aux rayonnements. On doit se procéder aussi à la régénération de ce site en faisant de recouvrement. En effet, les avantages de recouvrement sont les suivants :

- réduire les émissions directes de rayonnement gamma ;
- agir comme protection contre l'érosion ;
- jouer le rôle de barrière contre l'émanation de radon ;

Les recouvrements peuvent être constitués de plusieurs couches, afin de faire en sorte que chacune des fonctions susmentionnées puisse être remplie avec succès. Par exemple, il peut y avoir une prescription imposant la présence:

- a) d'une couche rocheuse faisant barrière ;
- b) d'une couche limitant les infiltrations et jouant le rôle de barrière contre les émissions de radon, qui sera généralement constituée de roches altérées ou d'argile sous forme compactée ;
- c) d'une couche en surface servant de protection contre l'érosion et empêcher leur dispersion par l'action du vent ou de l'eau [9].

Les anciens sites d'Ambohitrinimasina et celui de Fitatahana doivent être protégés contre l'érosion. L'action consiste à créer un mur de soutènement sur le côté en cours de dégradation et en faisant de reboisement de ces deux sites. Ces techniques réduisent les transferts des radionucléides, vers les milieux écologiques situés en aval de bassin versant de ces sites, par l'érosion. Ils minimisent alors le risque d'ingestion pour la population riverain de la rivière de Manandona.

A part de ces actions correctives, une sensibilisation de la population locale sur les effets néfastes des rayonnements ionisants est aussi nécessaire. Pour cela,

- sensibiliser la population locale à ne pas extraire de terre ou de faire des briques dans la zone du site pour construire leur maison ;
- lors de la construction de leur maison, il est conseillé de la faire avec une aération le maximum possible pour réduire la concentration de radon;

- d'éviter d'utiliser les déchets provenant des carrières et galeries pour remblayer les espaces publics et routes.

Pour minimiser les risques d'ingestion des radionucléides, il est nécessaire de faire une adduction en eau potable de la population environnante pour qu'ils ne boivent pas de l'eau du puits de cette zone. En effet, l'eau est l'une des principales voies par lesquelles la contamination peut atteindre l'environnement par suite des activités d'extraction et de traitement du minerai d'uranium [9].

CONCLUSION

L'exposition aux rayonnements naturels existe partout dans le monde. L'intensité du rayonnement naturel est très variable dans les diverses régions du monde. Les doses reçues du sol varient considérablement selon sa composition. Cette intensité de rayonnement est d'autant plus forte dans les zones d'exploitation des minerais radioactifs comme dans le cas de mine d'uranium.

Cette étude contribue à la dosimétrie de l'environnement à Madagascar, plus particulièrement dans les zones uranifères. Dans ce présent travail, des mesures de débit de dose, identification des radionucléides et des mesures de contaminations surfaciques dans l'ancienne mine d'uranium de Vatovory-Vinaninkarena ont été faites.

D'après les mesures de débit de dose: l'identiFINDER 2 NGH et le débitmètre THERMO affichent des valeurs inférieures à $2,5 \mu\text{Sv.h}^{-1}$ limite réglementaire pour le public sauf dans trois les points du site de Vatovory. Ceci permet de dire que les niveaux de débit de dose dans les zones avoisinantes des anciennes mines d'uranium sont inférieurs à la limite réglementaire et aucune précaution particulière ne doit être prise pour cette zone. Pour tous les anciens sites, un programme de réaménagement et de réhabilitation doit être mis en place pour la protection du public et de l'environnement.

Les radionucléides suivants ont été identifiés dans les zones: Ra-226 ; K-40 ; Th-232/U-232 ; Bi-207 ; Na-22 et le Ba-133.

Cette étude a permis de déterminer les niveaux moyens de contaminations de cette zone d'étude pour le carbone 14 et le césium 137. Les valeurs moyennes de l'activité surfacique pour ces radionucléides sont de 7876 Bq.m^{-2} pour le carbone 14 et de $5267,1 \text{ Bq.m}^{-2}$ pour le césium 137.

En conclusion, cette étude a permis de maîtriser en partie la technique d'évaluation de niveau de radioactivité et de contamination dans l'environnement. Les valeurs obtenues au cours de ce travail peuvent être utilisées comme référence pour les études ultérieures de cette mine d'uranium.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Agence Internationale de l'Energie Atomique, « Cadre gouvernemental, législatif et réglementaire de la sûreté, PRESCRIPTIONS GÉNÉRALES DE SÛRETÉ », Collection normes de sûreté N°GSR Part I, Vienne, 2010.
- [2] Agence Internationale de l'Energie Atomique, « Glossaire de sûreté, Terminologie employée en sûreté nucléaire et radioprotection », Edition 2007, Vienne, 2007.
- [3] Agence Internationale de l'Energie Atomique, « Normes fondamentales internationales de protection contre les rayonnements ionisants et de sûreté des sources de rayonnements », Collection sécurité N°115, Vienne, 2007.
- [4] Agence Internationale de l'Energie Atomique, « Radioprotection et sûreté des sources de rayonnements: normes fondamentales internationales de sûreté », prescriptions générales de sûreté, Collection normes de sûreté N°GSR Part III, Vienne, 2011.
- [5] Centre National de la Recherche Scientifique, « Guide de radioprotection », 1^{ère} Edition, Septembre 2007.
- [6] C. GAURON et J.P. SERVENT, « Les points de connaissances sur les rayonnements ionisants » INRS, 2^{ème} Edition, Juin 2011,
- [7] D. MOUHSSINE, « Etude d'une nouvelle génération de dosimètre basée sur les détecteurs photostimulables type BaFBr(Eu) : caractérisation et application à la dosimétrie environnementale et personnelle », Thèse de doctorat, 2004
- [8] FLIR identiFINDER 2, « Manuel de l'utilisateur », Juillet, 2012
- [9] G. GNUGNOLI, M. LARAIA et P. STEGNAR, « Mines d'uranium: le problème de la régénération de l'environnement », AIEA BULLETIN N°2, 1996.
- [10] G. RENON, « La radioactivité », CEA, INFODEM N°E, 2013.
- [11] H.F. RANDRIANTSEHENO, « Evaluation des doses d'irradiation autour d'une ancienne mine d'exploitation d'uranium : Cas du site de Vatovory-Vinaninkarena », Thèse de doctorat de troisième cycle, Université d'Antananarivo, 2002.

- [12] Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire, « Bilan de l'état radiologique de l'environnement français en 2009 »
- [13] Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, « Règlementation en radioprotection à Madagascar, Edition INSTN », 1997.
- [14] J.L.R. ZAFIMANJATO, « Etude du comportement et détection du radon dans les échantillons de l'environnement par la technique des scintillations: application au radium » Thèse de doctorat, Antananarivo, 2007
- [15] J.U. AHMED, « Rayonnements naturels intenses: Rapport de la Conférence internationale de Ramsar », AIEA Bulletin N°2, 1991.
- [16] M. RASOLONIRINA, « Etude de la radioactivité des eaux de consommation en milieu uranifère : Cas de Vinaninkarena et ses environs », Rapport de stage de D.E.A., Université d'Antananarivo, 2003.
- [17] R. ANDRIAMBOLOLONA, G. RAKOTOSON, G. PAIC, "Measurement of the escape rate of radon in uranium minerals from Madagascar", Int. J. Appl. Radiat. Isot. 34, 1017-1018, 1983.
- [18] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation, « Report to the General Assembly, Sources and Effects of Ionizing Radiation », Vol I, Annex C, Exposures from man-made sources of radiation, 2000.

ANNEXES

FACTEUR DE PONDERATION RADIOLOGIQUE

Facteur par lequel la dose absorbée est multipliée afin de tenir compte du risque sanitaire relatif des différents types de rayonnements. Les valeurs du facteur de pondération radiologique que l'on emploie aux fins de la radioprotection sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau A.1 : Valeur de facteurs de pondération radiologique

Nature et domaine d'énergie du rayonnement		Facteur de pondération radiologique WR
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

FACTEUR DE PONDERATION TISSULAIRE

Facteur par lequel la dose équivalente à un organe ou tissu est multipliée afin de tenir compte des différences de la sensibilité des divers tissus ou organes à l'induction d'effets stochastiques des rayonnements. Les facteurs de pondération tissulaires que l'on emploie aux fins de la radioprotection sont résumés dans le tableau suivant.

Tableau A.2 : Valeur de facteurs de pondération tissulaire

Tissu ou organe	Facteur de pondération tissulaire WT
Gonades	0,20
Moelle osseuse (rouge)	0,12
Côlon ^a	0,12
poumon	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Seins	0,05

Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surfaces osseuses	0,01
Autres ^b	0,05

a Gros intestins inférieurs

b Pour les besoins de calcul, la rubrique "autres" comprend les glandes surrénales, le cerveau, le caecum, l'intestin grêle, les reins, les muscles, le pancréas, la rate, le thymus et l'utérus. Dans les cas exceptionnels où un seul de ces tissus ou organes reçoit une dose équivalente dépassant la plus élevée des doses à l'un quelconque des 12 tissus ou organes pour lesquels un facteur de pondération est spécifié, il y a lieu d'appliquer un facteur de pondération de 0,025 à ce tissu ou organe et un facteur de pondération de 0,025 à la dose moyenne reçue des tissus et organes définis ici.

FAMILLE DE L'URANIUM-238

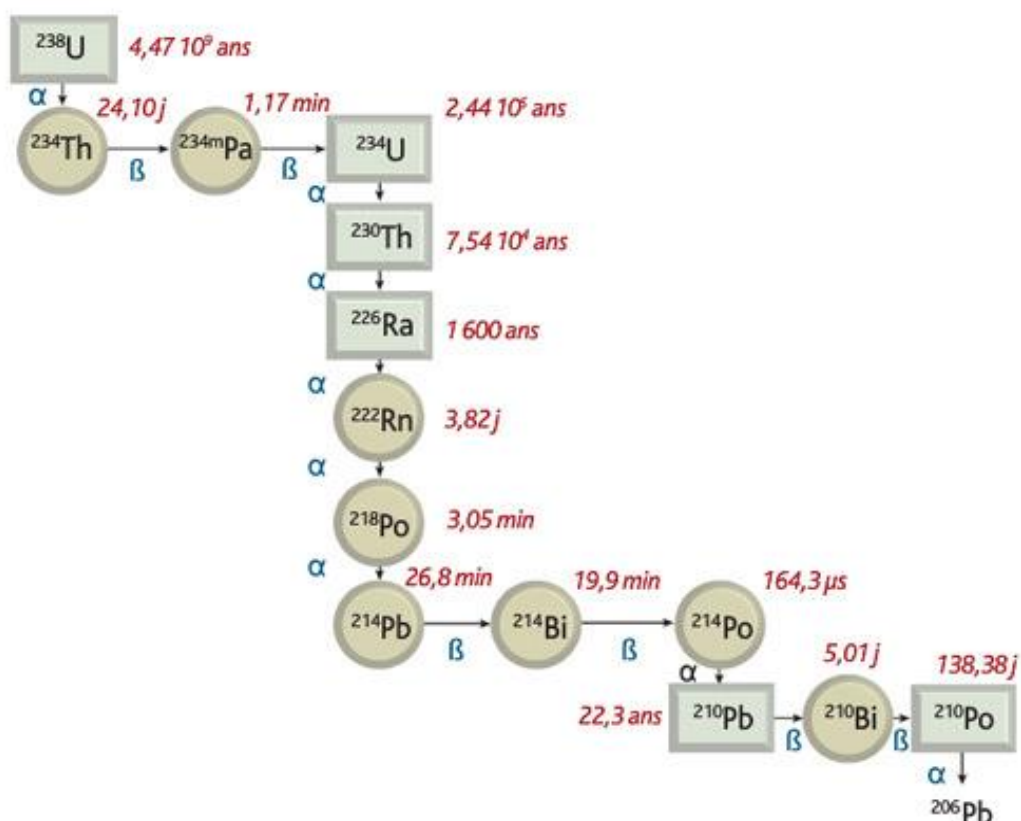


Figure A.1: Schéma de désintégration radioactive de la famille de l'uranium-238

EVALUATION DES DOSES GAMMA DE L'ENVIRONNEMENT D'UNE ZONE URANIFERE - CAS DE VINANINKARENA

Résumé :

Madagascar dispose d'anciens sites d'uranium abandonnés. Des travaux d'exploitation ont été entrepris comme le cas de l'uranium en formation sédimentaire de Vinaninkarena. Après son exploitation, la mine d'uranium présente encore des dangers car elle peut induire des effets néfastes sur l'homme et l'environnement.

Ce travail repose sur l'évaluation des doses gamma; l'identification des radionucléides émetteurs gamma présents et la mesure de niveau de contamination de la mine. Les résultats obtenus ont été comparés aux normes fixées par l'organisme de réglementation et aux références mondiales.

Afin de protéger le public et l'environnement aux alentours de ces sites miniers, il est nécessaire de suivre les recommandations proposées.

Mots clés : dosimétrie, public, environnement, exposition, mine d'uranium

GAMMA DOSE ASSESSMENT TO THE ENVIRONMENT OF URANIFEROUS AREA - CASE OF VINANINKARENA

Abstract:

Madagascar has several old abandoned uranium sites. Mining exploitations have been undertaken as the case of uranium in sedimentary formation of Vinaninkarena. After its exploitation, it still presents risks. The mine can cause the harmful effects to the human health and the environment.

This work concerns especially on the gamma dose assessment, identification of existing radionuclides gamma emitters, measurements of contamination level of the mine. The results obtained were compared with the standards fixed by the regulatory body and International Reference.

In order to protect the public and the environment against the harmful effect of ionizing radiation around the sites, the recommendations proposed should be applied and respected.

Keywords: dosimetry, public, environment, exposure, uranium mine

Encadreurs :

- **M. RAVELOMANANTSOA Solofonirina Dieudonné**,
Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université
d'Antananarivo
- **M. ZAFIMANJATO Joseph Lucien Radaorolala**,
Docteur en Physique Nucléaire, INSTN-Madagascar

Impétrant :

**ANDRIAMAROJAONA Aimé
Augustin**
Tél : +261338762686
E-mail : maroujohn@gmail.com
CU Bloc 46 Porte 7 Ankatso II-
Antananarivo 101

Ce travail a été fait à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN- Madagascar)