

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

\*\*\*\*\*

PAIX-TRAVAIL-PATRIE

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES

\*\*\*\*\*

CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION  
DOCTORALE EN SCIENCES, TECHNOLOGIES ET  
GEOSCIENCES DOCTORALE

\*\*\*\*\*

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE  
"PHYSIQUE ET APPLICATION"

\*\*\*\*\*

BP 812 Yaoundé

Email : crf-stg@uy1.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

\*\*\*\*\*

Peace-Work-Fatherland

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTY OF SCIENCE

\*\*\*\*\*

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE  
TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

\*\*\*\*\*

RESEARCH AND POSTGRADUATE TRAINING  
UNIT FOR "PHYSICS APPLICATION"

\*\*\*\*\*

PO BOX 812 Yaoundé

Email : crf-stg@uy1.uninet.cm

**LABORATOIRE DE PHYSIQUE NUCLEAIRE, ATOMIQUE, MOLECULAIRE ET  
BIOPHYSIQUE**

***Evaluation des radiologiques liés au transfert de  $^{238}\text{U}$  et  
 $^{232}\text{Th}$  du sol vers la plante sur l'axe syénitique AKONGO-  
LOLODORF à l'aide de code RESRAD-BIOTA.***

**Mémoire**

Présentée et soutenue en vue de l'obtention du  
**Diplôme de Master of science en Physique**



**Option : Physique Nucléaire, Dosimétrie et Radioprotection**

Par :

**KONAI MAMOUDOU Charle**

**Matricule : 16F2400**

**Master en Physique**

**Sous la direction de :**

**BEN-BOLIE Germain Hubert**

**Directeur de Recherche**

**MINRESI**

**BEN-BOLIE Germain Hubert**

**Professeur**

**Université de Yaoundé I**

**Année 2024**

---

**ÉVALUATION DES RISQUES RADIOLOGIQUES LIES AU TRANSFERT  
DE  $^{238}\text{U}$  ET  $^{232}\text{Th}$  DU SOL VERS LA PLANTE SUR L'AXE SYENITIQUE  
AKONGO-LOLORDORF A L'AIDE DU CODE RESRAD-BIOTA**

---

# DEDICACE

---

Je dédie ce modeste travail à la famille Ndjidda pour avoir été un pilier fondamental de ma vie.

---

## REMERCIEMENTS

---

Je remercie Dieu Tout Puissant et riche en bonté, qui m'a accordé la grâce, la santé et le courage d'accomplir ce modeste travail.

Ce travail est le fruit de la contribution de plusieurs personnes auxquelles je tiens particulièrement à exprimer ma gratitude.

J'exprime ma profonde reconnaissance au Pr BEN-BOLIE Germain Hubert et au Dr ELE ABIAMA Patrice, mes Directeurs qui, malgré leurs multiples responsabilités ont encadré ce travail en se rendant disponibles, en étant patients et en nous encourageant. Merci pour leurs enseignements et leurs judicieux conseils tant sur le plan académique que sur le plan social. Que Dieu les bénisse.

J'exprime également ma gratitude au Pr NDJAKA Jean Marie Bienvenu, Chef de Département de Physique à la Faculté de Sciences de l'Université de Yaoundé I qui a assuré notre formation académique.

Je tiens à exprimer pareillement ma reconnaissance au Pr SAÏDOU qui, malgré ses occupations, a fait preuve de grande disponibilité pour nous transmettre son savoir et l'expérience de ses multi-voyages. Que Dieu vous bénisse.

Mes remerciements vont également à l'endroit du Pr BOYOMO ONANA Marthe, Pr OWONO OWONO Luc Calvin, Dr ETINDELE Anne, Pr EKOBENA FOUA, Pr TCHAWOUA Clément et à tous les enseignants du Département de Physique et particulièrement de notre laboratoire pour la formation et les conseils reçus.

Merci à la Section des Techniques Nucléaires de l'Institut de Recherches Géologiques et Minières (IRGM) pour l'utilisation de leurs données pour la phase d'analyse de ce travail.

Je tiens à remercier le Dr MBIDA MBEMBE Serge dont l'assistance a été une aide précieuse, merci pour ses enseignements, son soutien, sa patience, et ses conseils.

Je remercie tout particulièrement Dr GONDJI Dieu Souffit pour sa bonne disponibilité, sa générosité, son hospitalité, son soutien, sa patience, ses conseils et les encouragements tout au long de ce travail. Il est comme un père pour moi.

Une fois de plus, un grand merci à tous les membres de la famille NDJIDDA, particulièrement à ma grande sœur KAVOU Delphine qui n'a cessé de me soutenir moralement et de m'encourager par ses remarques jusqu'au terme de ce travail, ma grande sœur KESINGRY Bernadette la maman de la maison, mon grand frère HAMADOU Fernand et mes petites sœurs. Je tiens également à remercier Dr KIATA Ernest pour son soutien, ses conseils et ses multiples remarques pour la concrétisation de ce travail.

Je remercie vivement mes promotionnaires pour le bon climat qui régnaient entre nous, pour leur sympathie, leurs encouragements et leurs soutiens multiples qui ont été pour nous une source de motivation tout au long de cet exercice. Mes pensées vont particulièrement à l'endroit de NGUENTSA TSEFACK Aubin Martial, HEBSIA Éric, NEGOUE Jeovanie, TSAFACK Patrick et NDZONO Victor.

Je ne saurais finir cette section sans exprimer ma profonde reconnaissance à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, et surtout que personne ne se sente oublié.

---

# TABLE DES MATIERES

---

<b>DEDICACE</b> .....	i
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	ii
<b>TABLE DES MATIERES</b> .....	iv
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	viii
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	ix
<b>LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES</b> .....	i
<b>LISTE DES UNITES</b> .....	iii
<b>RESUME</b> .....	iv
<b>ABSTRACT</b> .....	v
<b>INTRODUCTION GENERALE</b> .....	1
<b>CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LE RAYONNEMENT</b> .....	4
<b>Introduction</b> .....	4
<b>1. RAYONNEMENT</b> .....	4
<b>1.1. Les rayonnements ionisants</b> .....	4
<b>1.2. Les rayonnements non ionisants</b> .....	4
<b>2. GENERALITES SUR LA RADIOACTIVITE</b> .....	5
<b>2.1. Désintégration alpha</b> .....	5
<b>2.2. Désintégration bêta</b> .....	5
<b>2.3. Rayonnement gamma</b> .....	6
<b>3. FAMILLE RADIOACTIVE</b> .....	6
<b>3.1. La série de l'uranium (<math>4n + 2</math>)</b> .....	7
<b>3.2. La série de l'actinium (<math>4n+3</math>)</b> .....	7
<b>3.3. La série du thorium (<math>4n</math>)</b> .....	8
<b>3.4. La série des neptuniums (<math>4n+1</math>)</b> .....	9
<b>4. FILIATION RADIOACTIVE</b> .....	10

4.1. Équilibre radioactive.....	11
4.2. Équilibre séculaire.....	11
4.3. Équilibre Transitoire .....	11
<b>5. SOURCE D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS .....</b>	<b>12</b>
5.1. Source naturelle.....	12
a. Source cosmique .....	12
b. Sources terrestres.....	12
5.2. Sources artificielles.....	13
<b>6. INTERACTION DES RAYONNEMENTS AVEC LA MATIERE .....</b>	<b>13</b>
6.1.....	13
<b>Interaction des photons avec la matière .....</b>	<b>13</b>
a. Effet photoélectrique.....	13
b. Effet Compton .....	14
c. Effet de création de paire.....	15
6.2. Interaction des particules avec la matière.....	15
a. Interaction des particules chargée lourde .....	15
b. Interaction des particules chargée légère.....	16
<b>8. VOIES D'EXPOSITION .....</b>	<b>16</b>
8.1. Voie externe .....	16
8.2. Voie interne.....	17
<b>9. EFFET BIOLOGIQUE DES RAYONNEMENTS IONISANTS LA SANTE .....</b>	<b>18</b>
9.1. Effets chez l'être humain .....	18
a. Effet sur la sante à court terme.....	18
b. Effets sur la santé à long terme.....	18
9.2. Effets sur les animaux et les plantes .....	18
<b>10. GENERALITES SUR LA METHODE D'EVALUATION DE RISQUE RADIOLOGIQUE .....</b>	<b>19</b>
10.1. Cadre méthodique de l'évaluation.....	19

10.2. Évaluation graduelle .....	20
<b>11. LES PRINCIPES DE LA RADIOPROTECTION.....</b>	<b>21</b>
Conclusion.....	22
<b>CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES.....</b>	<b>23</b>
Introduction.....	23
<b>1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE .....</b>	<b>23</b>
<b>2. PREPARATION DES ECHANTILLONNAGES .....</b>	<b>24</b>
<b>3. PRESENTATION GENERALE DU CODE RESRAD.....</b>	<b>28</b>
<b>3.1. Famille RESRAD.....</b>	<b>28</b>
<b>3.2. RESRAD-BIOTA .....</b>	<b>29</b>
<b>3.3. Mise en œuvre d'une évaluation RESRAD-BIOTA .....</b>	<b>30</b>
<b>a. RESRAD-BIOTA niveau 1.....</b>	<b>30</b>
<b>b. RESRAD-BIOTA niveau 2.....</b>	<b>31</b>
<b>c. RESRAD BIOTA Niveau 3.....</b>	<b>33</b>
<b>3.4. Élément conceptuel de l'évaluation RESRAD-BIOTA.....</b>	<b>33</b>
<b>a. Organisme de référence et Organisme représentatif .....</b>	<b>33</b>
<b>b. Valeur repère.....</b>	<b>34</b>
<b>c. Facteur de bioaccumulation (BIV).....</b>	<b>35</b>
<b>d. Biota Concentration Guide (BCG) .....</b>	<b>36</b>
Conclusion.....	37
<b>CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSION .....</b>	<b>38</b>
Introduction.....	38
<b>1. ÉVALUATION RESRAD-BIOTA .....</b>	<b>38</b>
<b>2. RESRAD-BIOTA niveau 1 .....</b>	<b>38</b>
<b>2.1. NGOMBAS .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2. AWANDA .....</b>	<b>40</b>
<b>2.3. BIKOUÉ.....</b>	<b>40</b>

2.4. Récapitulatif RBn1 .....	40
<b>3. RESRAD BIOTA niveau 2 .....</b>	<b>41</b>
3.1. Guides de concentration dans le biote (BCG) et les facteurs de rapport de somme .....	41
3.2. Débits de dose externe, interne et totale des radionucléides étudiés dans les animaux et les plantes terrestres.....	42
3.3. Comparaison avec d'autres études .....	43
3.4. Récapitulatif RBn2.....	43
<b>4. RESRAD-BIOTA niveau 3.....</b>	<b>43</b>
4.1. Débit de doses interne, externe et total dans les organismes étudiés, évalués à partir des concentrations des radionucléides ( $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ ) dans le sol .....	44
4.2. Caractérisations des risques à NGOMBAS .....	45
4.3. Caractérisations des risques à AWANDA.....	46
4.4. Caractérisations des risques à BIKOUÉ.....	47
4.5. Relation entre les débits de dose totale .....	49
4.6. Contributions des radionucléides $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ aux débits de dose .....	49
4.7. Débit des doses dans les denrées alimentaires .....	50
4.8. Variation des débits de dose $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ dans les denrées alimentaires. ....	51
4.9. Récapitulatif RBn3.....	52
<b>Conclusion.....</b>	<b>52</b>
<b>CONCLUSION GENERALE.....</b>	<b>53</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>54</b>
<b>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>61</b>

---

## LISTE DES TABLEAUX

---

<b>Tableau 1.1</b> : Facteur de pondération .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Tableau 2.1</b> : Valeurs corrigées des concentrations de $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ , mesurées dans les échantillons de sol [32]. .....	25
<b>Tableau 2.2</b> : Concentration des échantillons de sols des localités Ngombas, Awanda et Bikoué [32]. .....	26
<b>Tableau 2.3</b> : Valeur d'entrée de concentration dans RESRAD-BIOTA [32], [33] .....	27
<b>Tableau 2.4</b> : Concentration des radionucléides dans les aliments [34] .....	27
<b>Tableau 3.1</b> : Guides de concentration dans le biote (BCG) et les facteurs de rapport de somme .....	39
<b>Tableau 3.2</b> : Guide de concentration dans le biote (BCG) et facteur de rapport de somme .....	41
<b>Tableau 3.3</b> : Les sommes des débits de dose externe, interne et totale des radionucléides étudiés dans les animaux et les plantes terrestres .....	42
<b>Tableau 3.4</b> : Organismes et paramètres (dimension, masse, facteur de surface, facteur de géométrie) utilisés pour l'évaluation du débit de dose .....	44
<b>Tableau 3.5</b> : Débit de doses internes, externes et totaux dans les organismes représentatifs des localités RBn3.....	44
<b>Tableau 3.6</b> : Débit des doses dans les denrées alimentaires des localités étudiées.....	50
<b>Tableau B-1</b> : Rapport BCG de concentration des radionucléides NGOMBAS RBn1 .....	55
<b>Tableau B-2</b> : BCG des radionucléides pour les animaux terrestres AWANDA RBn1 .....	55
<b>Tableau B-3</b> : Rapport BCG de concentration des radionucléides sur les animaux terrestres BIKOUÉ RBn1 .....	56
<b>Tableau B-4</b> : Rapport BCG de concentration des radionucléides sur les animaux terrestres RBn2 .....	56
<b>Tableau B-5</b> : Rapport général de débit de dose de concentration animal terrestre RBn2. ....	57

---

## LISTE DES FIGURES

---

<b>Figure 1.1:</b> $4n+2$ de $^{238}\text{U}$ [16].....	7
<b>Figure 1.2 :</b> Série $4n+3$ de l'actinium [17].....	8
<b>Figure 1.3 :</b> Série $4n$ du thorium [19].....	9
<b>Figure 1.4 :</b> Série $4n+1$ de neptunium [19] .....	10
<b>Figure 1.5 :</b> effet photoélectrique [23] .....	14
<b>Figure 1.6 :</b> Effet Compton [23].....	14
<b>Figure 1.7 :</b> Création de pair [23].....	15
<b>Figure 1.8 :</b> Pouvoir de pénétration de différents types de rayonnement [1] <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	
<b>Figure 1.9 :</b> voies d'exposition externe [26] .....	17
<b>Figure 1.10 :</b> principe de l'exposition interne [26].....	17
<b>Figure 1.11 :</b> articulation des trois niveaux de l'approche graduée pour l'évaluation de risque [29] .....	21
<b>Figure 2.1 :</b> Points d'échantillonnage du sol et des denrées alimentaires dans chaque district rural enquêté [31].....	24
<b>Figure 2.2 :</b> Carte géologique du Cameroun montrant la localisation de la zone étudiée [31] .....	24
<b>Figure 2.3 :</b> famille de code RESRAD [34] .....	28
<b>Figure 2.4 :</b> interface RESRAD-BIOTA [34] .....	29
<b>Figure 2.5 :</b> Analyse RESRAD-BIOTA niveau 1 de Am-140 [34] .....	31
<b>Figure 2.6 :</b> Rapport BCG niveau 2. RBn2 [34].....	32
<b>Figure 2.7 :</b> RESRAD-BIOTA niveau 2 calcul du débit de dose engagé RBn2 [34] .....	32
<b>Figure 2.8 :</b> Taux d'inhalation interne et externe par radionucléide ingéré RBn3 [34] .....	33
<b>Figure 2.9 :</b> Lien entre organisme de référence et organisme représentatif [35]. .....	34
<b>Figure 2.10 :</b> Comparaison des critères de débit de dose pour le biote du DOE avec les recommandations internationales pour les bandes DCRL de la CIPR (2014) [35].....	35
<b>Figure 3.1 :</b> Contribution des voies d'exposition à la dose totale. ....	49
<b>Figure 3.2 :</b> Relation entre les différents débits de dose des radionucléides $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ .....	50
<b>Figure 3.3 :</b> variation des débits de dose $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ dans les denrées alimentaires. ....	52

---

# LISTE DES ABREVIATIONS ET ACRONYMES

---

**ADN** : Acide Désoxyribonucléique

**AF** : Area Factor

**AIEA, IAEA** : Agence internationale de l'énergie atomique

**B<sub>iv</sub>** : bioaccumulation factor

**BCG** : Biota Concentration Guide

**Bq** : Becquerel (unité internationale de mesure de la radioactivité de toute matière)

**BRGM** : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

**DCF** : Facteur de conversion de dose

**DCRL**: Derived consideration reference level

**DL**: Limite de dose

**DL<sub>tp</sub>** : Limite de dose recommandée pour les plantes terrestres

**DL<sub>ta</sub>** : Limite de dose recommandée pour les animaux terrestres

**CR** : Concentration Ratio

**CIPR, ICRP** : Commission internationale de protection radiologique

**DOE**: Department of Energy

**EBR**: Relative biological effectiveness

**FRS**: Facteur des Rapports des Sommes

**GF** : facteur de géométrie

**IRGM** : Institut des Recherches Géologiques et Minières

**IRSN** : Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire

**K<sub>d</sub>** : solide/solution distribution coefficient

**MAX** : Maximum

**MIN**: Minimum

**RAP**: Reference animals and plants

**Rad** : Radiation Absorbed Dose

**RBn1** : RESRAG-BIOTA niveau 1

**RBn2** : RESRAG-BIOTA niveau 2

**RBn3** : RESRAG-BIOTA niveau 3

**RESRAD**: RESidual RADioactivity

**RO**: Representative organisms

**UNSCEAR**: United nations scientific committee on the effects of atomic radiation

**W<sub>t</sub>** : Tissue or organ weighting factor

---

## LISTE DES UNITES

---

**eV** : Électronvolt

**MeV** : Mega-électronvolt

**Bq** : Becquerel

**Bq/kg** : Becquerel par kilogramme

**Kg** : kilogramme

**Sev** : Sievert (1 sievert correspond à 1 joule d'énergie de rayons gamma dans un kilogramme de tissu humain)

**mSev** : Millisievert

**Gy** : Gray (unité dérivée de dose absorbée du Système international, qui correspond à 1 joule par kilogramme).

**Gy/j** : Gray par jour

**rd** : Rad dose de radiation absorbée (1 Gy = 100 rd)

**rd/j** : Rad par jour

---

## RESUME

---

L'objectif de ce travail est d'évaluer le risque radiologique lié au transfert des radionucléides du sol vers les plantes à l'aide du code RESRAD-BIOTA dans les localités de NGOMBAS, AWANDA et BIKOUÉ dans lesquelles les niveaux des rayonnements de fond sont élevés.

Pour atteindre cet objectif, les concentrations du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  mesurée dans le sol et dans les denrées alimentaires régulièrement consommées par les populations de ces zones ont été utilisées comme valeurs d'entrées dans le code RESRAD-BIOTA. Ce code utilise une approche graduée à trois niveaux. Les BCG obtenus au niveau 1 sont supérieurs aux valeurs de référence du DOE (Department of Energy) et l'indice de risque était supérieur à 1 valeur de référence du DOE, ce qui a conduit à une évaluation de niveau 2. L'évaluation du débit de dose, du BCG et de l'indice de risque obtenues à partir des concentrations dans le sol a révélé aucun risque significatif. Ainsi la situation est conforme à l'attente du DOE en situation d'exposition. Au niveau 3 les concentrations du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  dans les denrées ont été utilisées. Le débit de dose externe et interne obtenus étaient inférieurs à la valeur limite. Cependant parmi les voies d'exposition étudiées, la voie interne est celle qui contribue le plus à la dose totale avec une contribution de 93.73 %. Les contributions des radionucléides à la dose totale ont également été présentées, il en ressort que le  $^{232}\text{Th}$  est le principal contributeur à la dose interne avec une contribution de 87.23 %. Par contre, pour l'exposition externe,  $^{238}\text{U}$  a contribué à 99.19 % à la dose. Parmi les denrées étudiées, les résultats ont montré que les feuilles de manioc ont présenté des doses plus élevées. Cette étude a montré qu'il y a un risque de consommer des denrées alimentaires de la zone investiguée.

**Mots clés :** RESRAD-BIOTA, biote, radioactivité, débit de dose, denrée alimentaire.

---

## ABSTRACT

---

The aim of this work is to study the radiological risk associated with the transfer of radionuclides from soil to plants using the RESRAD-BIOTA code in the localities of NGOMBAS, AWANDA and BIKOUÉ, where background radiation levels are high.

To achieve this objective, the concentrations of  $^{232}\text{Th}$  and  $^{238}\text{U}$  measured in the soil and in the foodstuffs regularly consumed by the populations of these areas were used as input values in the RESRAD-BIOTA code. This code uses a three-level graded approach. The BCGs obtained at level 1 are higher than the DOE (Department of Energy) reference values and the risk index was higher than 1 DOE reference value, leading to a level 2 assessment. The assessment of dose rate, BCG and risk index obtained from soil concentrations revealed no significant risk. The situation is therefore in line with the DOE's expectations in an exposure situation. Level 3 used concentrations of  $^{232}\text{Th}$  and  $^{238}\text{U}$  in foodstuffs. The external and internal dose rates obtained were below the limit value. However, of the exposure pathways studied, the internal pathway contributed the most to the total pathway, with a contribution of 93.73%. The contributions of radionuclides to total dose were also presented, showing that  $^{232}\text{Th}$  was the main contributor to internal dose with a contribution of 87.23%. However, for external exposure,  $^{238}\text{U}$  contributed 99.19% of the dose. Among the foodstuffs studied, the results showed that cassava leaves showed higher doses. This study showed that there is a risk of consuming foodstuffs from the area investigated.

**Key words:** RESRAD-BIOTA, biota, radioactivity, dose rate, foodstuff.

---

# INTRODUCTION GENERALE

---

Depuis sa création, l'environnement est exposé aux rayonnements provenant de l'espace et des matières radioactives présentes dans la croûte et le noyau terrestre [1]. Ceci par le fait que la radioactivité naturelle s'est très répandue dans l'environnement. Elle est localisée dans diverses sources telles que la croûte terrestre, les roches, les sols, les plantes, l'eau et l'air. La terre et l'atmosphère contiennent des niveaux variés de radionucléides naturels tels que les chaînes de désintégration de  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ainsi que des types de radionucléides isolés comme le  $^{40}\text{K}$  [2]. Les radiations sont présentes partout et l'homme est exposé à ces radiations présentes dans l'environnement naturel qui l'entoure [3]. Selon l'UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation), les sources naturelles sont celles qui contribuent le plus à la dose externe de la population mondiale. Il est nécessaire de noter que l'exposition aux rayonnements des organismes vivants dans les écosystèmes terrestres ou aquatiques provient du sol, de l'eau et des sédiments contaminés, qui polluent ensuite l'air et diverses sources de nourriture. Ces doses varient en fonction de la concentration des radionucléides naturels présents dans le sol et les roches qui, à leur tour dépendent de la géologie de la région [4].

Suite aux multiples recherches sur les rayonnements et les radionucléides effectuées à travers le monde, des informations détaillées sur les mécanismes biologiques par lesquels, les rayonnements peuvent affecter la santé ont été recueillies [1]. Il est établi que les rayonnements peuvent produire des effets négatifs au niveau des cellules, entraînant ainsi leur mort ou leur modification en raison de lésions directes sur les brins d'acide désoxyribonucléique (ADN) d'un chromosome. Si le nombre de cellules endommagées ou mortes est important, cela peut perturber le fonctionnement d'un organe ou même causer sa mort [1].

Les denrées alimentaires sont connues pour contenir des radionucléides naturels et artificiels, qui après ingestion, contribuent à une dose interne efficace. À cet effet, les efforts considérables sont déployés par de nombreux auteurs dans diverses régions du monde pour mesurer l'activité des radionucléides dans les alimentaires (légumes verts, légumes-fruits, légumes-racines, fruits, tubercules, alliums et céréales) [5]. Les radionucléides présents dans le sol sont fréquemment transférés aux différents tissus végétaux par transfert direct via le système racinaire, ou par retombées, et par la remise en suspension du sol contaminé suivie d'un dépôt sur les feuilles des plantes [6].

L'étude du transfert sol-plante est l'un des paramètres les plus importants utilisés dans l'évaluation de la sécurité environnementale en générale et alimentaire en particulier.

Le Cameroun comme des nombreux autre pays, conscient du fait que, la contamination de l'environnement peut constituer une menace pour la santé humaine, s'est intégré aux dernières recommandations en la matière de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR, 2007). Ces recommandations visent l'atteinte de deux objectifs qui sont d'une part, de garantir pour les générations humaines présentes et futures une utilisation durable des ressources environnementales utiles à l'agriculture, l'exploitation des forêts, la pêche et le tourisme ; et d'autre de prévenir les effets des rayonnements ionisants sur les espèces non-humaines [1].

Des travaux de reconnaissance préliminaire menés entre 1978 et 1985 dans la région du sud Cameroun par le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) ont montré que certaines zones de cette région présentaient un fort potentiel uranifère et d'autres étaient à fort niveau de radionucléide naturel [5,6].

Depuis plusieurs années, nombreux sont des chercheurs Camerounais qui ont fait de cette zone leur objet d'études dans le domaine des sciences et techniques nucléaires. Les récents travaux de Elé et al. (2010) ont par exemple permis de déterminer les concentrations des radionucléides naturels à savoir  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  et  $^{40}\text{K}$  dans le sol. Ceux de Elé et al. (2012) ont permis d'estimer la concentration d'activité des radionucléides naturels  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  et  $^{40}\text{K}$  dans différents aliments de base régulièrement consommés par les habitants de cette zone. À cela, s'ajoute les travaux de Ben-Bolie et al. (2013) qui ont déterminé les facteurs de transfert (TF) de  $^{238}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$  du sol vers certaines plantes consommées par les populations de cette région. Ceux de Saïdou et al. (2016) ont permis de comparer l'exposition au rayonnement naturel de la population dans les régions uranifères de Poli et Lolodorf et dans la région pétrolière de Bakassi. Les études de Bineng et al (2015) ont quant à elle établi une carte radiologique de la région et localisé les zones à fort rayonnement naturel. Plusieurs autres activités semblables ont été effectuées dans les régions de Kribi, du Nord et de l'Est du Cameroun, avec pour but de caractériser le risque radiologique pour l'environnement.

Notre étude intitulée « Évaluation des risques radiologiques liés au transfert de  $^{238}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$  du sol vers la plante sur l'axe syénitique AKONGO-LOLODORF à l'aide du code RESRAD-BIOTA » a pour principal objectif d'évaluer le risque radiologique lié aux transferts du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  du sol à la plante dans la région du Sud Cameroun en utilisant le code RESRAD-BIOTA, il sera question

pour nous tout au long de cette étude de décrire principalement la méthode d'évaluation des risques radiologique avec le code RESRAD BIOTA.

Les trois chapitres qui meublent le présent travail sont repartis comme suit : le premier chapitre consacré à la revue de la littérature sur la radioactivité parle des différents types de rayonnement, de l'interaction des rayonnements ionisant avec la matière et les effets associés. Le Deuxième chapitre quant à lui répertorie le matériel que nous avons utilisé dans le cadre de cet exercice. Enfin, le troisième chapitre présente les résultats issus de ce travail ainsi que leur discussion.

---

# CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTÉRATURE SUR LE RAYONNEMENT

---

## Introduction

La radioactivité est la principale voie de production des rayonnements ionisants dans la nature [7]. L'évaluation de risque radiologique dans une localité nécessite d'abord les bases de la science des rayonnements. Dans ce chapitre, nous présenterons succinctement les notions de base de la physique des rayonnements : Les définitions et les propriétés des différents types de rayonnement, les différentes sources de rayonnement et interaction des rayonnements ionisants avec la matière et les effets associés.

## 1. RAYONNEMENT

D'une manière générale, on peut définir le rayonnement comme un mode de propagation de l'énergie dans l'espace, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules [1]. On distingue, selon leur énergie deux types de rayonnement dans l'environnement : les rayonnements ionisants et les rayonnements non ionisants.

### 1.1. Les rayonnements ionisants

Un rayonnement est dit ionisant lorsqu'il peut produire des ionisations, c'est-à-dire capable d'arracher un électron de la matière. On peut donc le définir comme un transport d'énergie sous la forme des particules ou d'ondes électromagnétiques pouvant produire des ions. L'énergie nécessaire pour y parvenir dépend de la composition de la matière, mais il est généralement admis qu'un rayonnement est ionisant si son énergie est supérieure à environ  $12.4 \text{ eV}$  [7]. Parmi ces rayonnements, on distingue ceux qui sont directement ionisants dits particules chargées ; et ceux qui sont dits indirectement ionisants car n'étant pas chargés.

### 1.2. Les rayonnements non ionisants

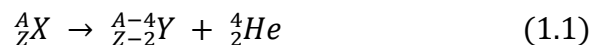
Le rayonnement non-ionisant ne porte pas suffisamment d'énergie pour ioniser un atome (énergie inférieure à  $12.4 \text{ eV}$ , pas assez pour éjecter les électrons d'un atome). Les ondes radio, les micro-ondes, la lumière sont des formes de rayonnement non-ionisant. Bien que ces rayonnements puissent causer des dommages biologiques, comme les brûlures, ils sont moins dangereux que le rayonnement ionisant [8].

## 2. GENERALITES SUR LA RADIOACTIVITE

La radioactivité est un phénomène physique, au cours duquel, des noyaux instables se transforment spontanément en d'autres noyaux (désintégration), en émettant simultanément des particules matérielles (électron, noyau d'hélium, positon...) et de l'énergie (cinétique et électromagnétique) [9]. Les noyaux radioactifs ne peuvent évoluer que selon trois types de radioactivité, alpha, beta, et gamma.

### 2.1. Désintégration alpha

Des atomes dont les noyaux radioactifs sont trop chargés en protons et en neutrons émettent souvent un rayonnement alpha [8]. Ce sont des petites particules chargées positivement qui sont éjectées spontanément des noyaux de certains éléments radioactifs. Elles sont identiques au noyau d'hélium, dont le nombre de masse est de 4 et la charge électrostatique de +2 [10]. La désintégration alpha est observée pour les éléments plus lourds que le plomb et pour quelques noyaux aussi légers que les éléments lanthanides. Elle se désintègre selon l'équation.



Où :

${}^A_ZX$  , représente l'élément radioactif de masse A et de numéro atomique Z

${}^{A-4}_{Z-2}Y$  , représente l'élément issu de la désintégration de masse A-4 et de numéro atomique Z-2.

Les rayonnements alpha sont peu pénétrants, facilement arrêtés par une feuille de papier et leur trajet ne dépasse pas quelques dizaines de micromètre dans les tissus biologiques [1]

### 2.2. Désintégration bêta

Les particules bêta ( $\beta$ ) sont considérées comme des électrons ou des positrons , qui se caractérisent par leur énergie et leur vitesse élevées, produites par la désintégration radioactive d'un noyau atomique [11]. Dans le processus de la désintégration bêta, un électron ou un positron est émis. Cette émission est accompagnée de l'émission d'un antineutrino (désintégration  $\beta^-$ ) ou d'un neutrino (désintégration  $\beta^+$ ), qui partage l'énergie et le moment de la désintégration [10].

Un noyau atomique instable ( ${}^A_ZX$ ) avec un excès de neutrons peut subir une désintégration  $\beta^-$  où un neutron est converti en un proton, en un électron et en un antineutrino électronique :



Les noyaux atomiques instables avec un excès de protons peuvent subir une désintégration  $\beta^+$ , où un noyau riche en proton émet un positron.



Des trois types courants de rayonnement émis par les matières radioactives, alpha, bêta et gamma, c'est le bêta qui a le pouvoir de pénétration moyen et le pouvoir ionisant moyen [12,13]. Bien que l'énergie de la particule bêta émise par différentes matières radioactives varie, la plupart des particules bêta peuvent être arrêtées par quelques millimètres d'aluminium.

### 2.3. Rayonnement gamma

Le rayonnement gamma est une onde électromagnétique comme la lumière visible ou les rayons X mais plus énergétique [1]. Ce rayonnement suit souvent une désintégration alpha ou bêta. Après émission de la particule alpha ou bêta, le noyau est encore excité car ses protons et ses neutrons n'ont pas trouvé leur équilibre [7]. Il se libère alors rapidement d'un trop-plein d'énergie par émission d'un rayonnement gamma : c'est la radioactivité gamma [13]. L'équation suivante décrit la désintégration gamma d'un noyau  ${}^A_ZY$  :



Le rayonnement gamma présente un risque important pour la santé. Ces rayons sont une forme de rayonnement ionisant, ce qui signifie qu'ils ont suffisamment d'énergie pour enlever les électrons des atomes et des molécules. L'énergie élevée du rayonnement signifie également que les rayons gamma ont un fort pouvoir de pénétration. Ils traversent la peau et endommagent les organes internes et la moelle osseuse [15,16]

## 3. FAMILLE RADIOACTIVE

La plupart des radionucléides primordiaux, c'est-à-dire présents lorsque la terre s'est formée il y a environ 4,5 milliards d'années, atteint la vallée de stabilité après une ou quelques désintégrations. Toutefois trois d'entre eux, situés juste au-delà de la vallée de stabilité, passent par un grand nombre de descendants avant d'arriver à un noyau stable. Les noyaux qui proviennent du noyau initial (noyau parent) constituent des séries ou des familles radioactives [7]. On connaît quatre séries ou familles radioactives, dont trois existent dans la nature puisqu'elles proviennent des radionucléides primordiaux, à ces familles s'ajoute une quatrième issue d'un élément artificiel, le Neptunium  ${}^{237}_{93}Np$  [7].

### 3.1. La série de l'uranium ( $4n + 2$ )

La série de l'uranium, également connue sous le nom de série du radium, est l'une des trois séries radioactives classiques qui commencent avec  $^{238}\text{U}$  naturel [7]. Cette chaîne de désintégration radioactive est constituée de noyaux atomiques lourds instables qui se désintègrent par une séquence de désintégrations alpha et bêta jusqu'à l'obtention d'un noyau stable. Dans le cas de la série de l'uranium, le noyau stable est le  $^{206}\text{Pb}$ . Cette série commence par l'isotope  $^{238}\text{U}$ , qui a une demi-vie de  $4,5 \times 10^{10}$  ans, comme le montre la figure 1.1 [16]. Cette série se compose de huit désintégrations  $\alpha$  et de six désintégrations  $\beta$ .

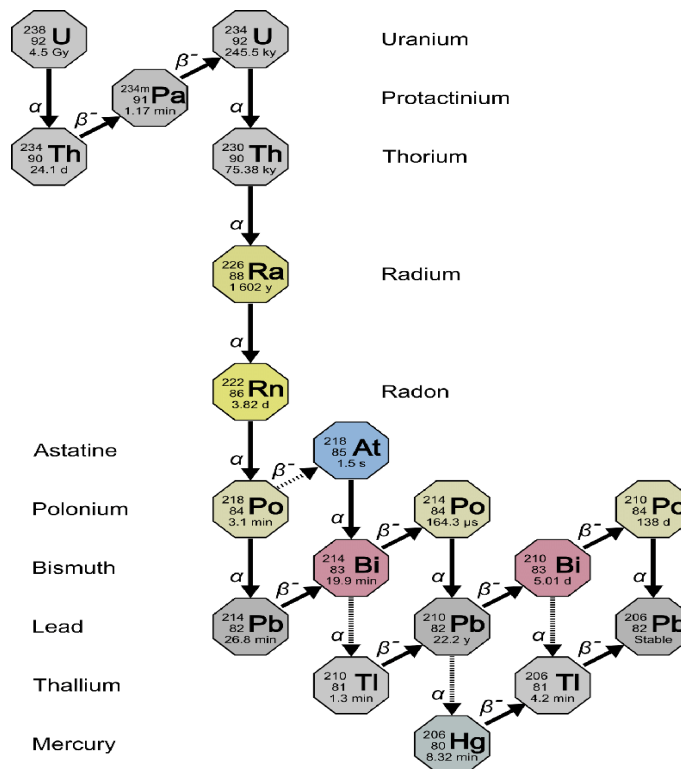


Figure 1.1: Série de  $4n+2$  de  $^{238}\text{U}$  [16]

### 3.2. La série de l'actinium ( $4n+3$ )

La série de l'actinium, également connue sous le nom de cascade de l'actinium, est l'une des trois séries radioactives classiques commençant par  $^{235}\text{U}$  d'origine naturelle [7]. Cette chaîne de désintégration radioactive est constituée de noyaux atomiques lourds instables qui se désintègrent par une séquence de désintégrations alpha et bêta jusqu'à l'obtention d'un noyau stable. Dans le cas de la série de l'actinium, le noyau stable est le  $^{207}\text{Pb}$  [17]. Comme la désintégration alpha représente la transformation d'un noyau père en un noyau fille avec émission du noyau d'un atome d'hélium (qui

contient quatre nucléons), il n'y a que quatre séries de désintégration. Dans chaque série, par conséquent, le nombre de masse des membres peut être exprimé comme quatre fois un nombre entier approprié (n) plus la constante pour cette série. Par conséquent, la série de l'actinium est connue comme la série  $4n+3$  [17].

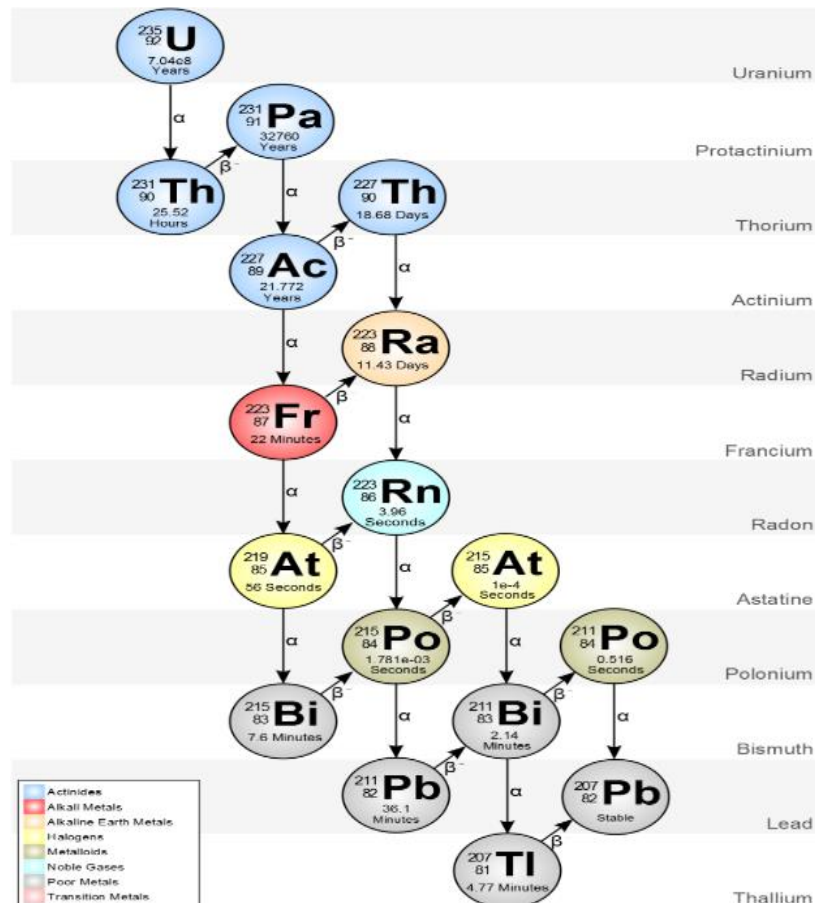


Figure 1.2 : Série  $4n+3$  de l'actinium [17]

### 3.3. La série du thorium ( $4n$ )

La série du thorium est l'une des trois séries radioactives classiques commençant par le  $^{232}\text{Th}$  d'origine naturelle [7]. Cette chaîne de désintégration radioactive est constituée des noyaux atomiques lourds instables qui se transforment par une séquence de désintégrations alpha et bêta jusqu'à l'obtention d'un noyau stable. Dans le cas de la série du thorium, le noyau stable est le  $^{208}\text{Pb}$  [17].

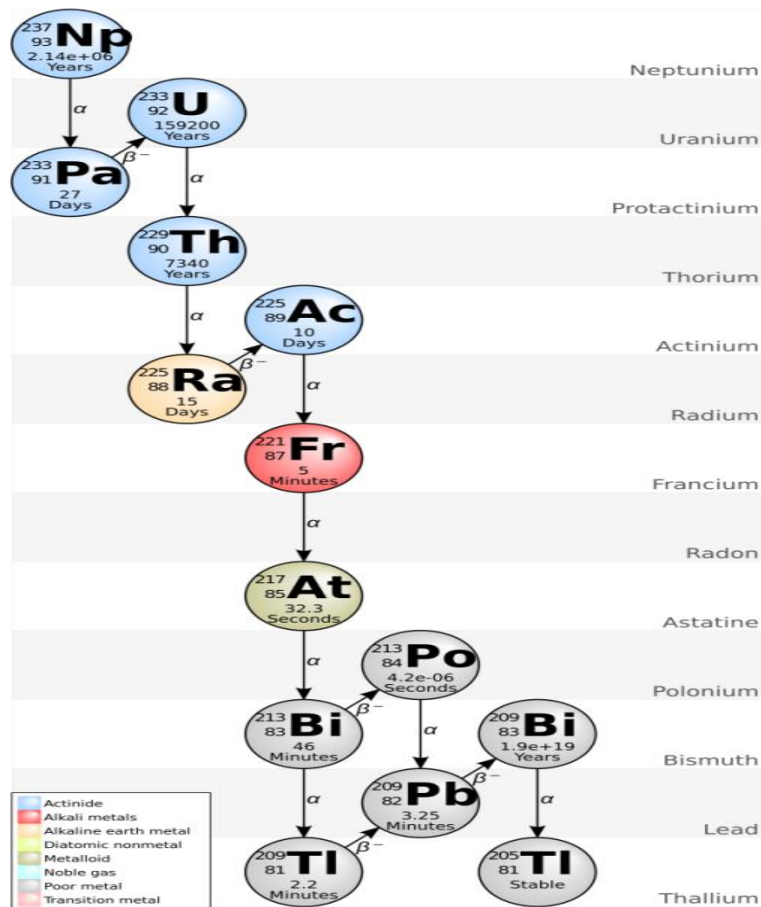


Figure 1.3 : Série 4n du thorium [19]

### 3.4. La série des neptuniums (4n+1)

La série des neptuniums est une série radioactive commençant par le  $^{237}\text{Np}$ . Ses membres sont produits artificiellement par des réactions nucléaires et ne se produisent pas naturellement, car la demi-vie de l'isotope le plus long de la série est courte par rapport à l'âge de la terre [16]. Cette chaîne de désintégration radioactive est constituée des noyaux atomiques lourds instables qui se désintègrent par une séquence de désintégrations alpha et bêta jusqu'à l'obtention d'un noyau stable. Dans le cas de la série du neptunium, les noyaux stables sont le  $^{209}\text{Bi}$  (avec une demi-vie de  $1,9 \times 10^{19}$  ans) et le  $^{205}\text{Tl}$  [18].

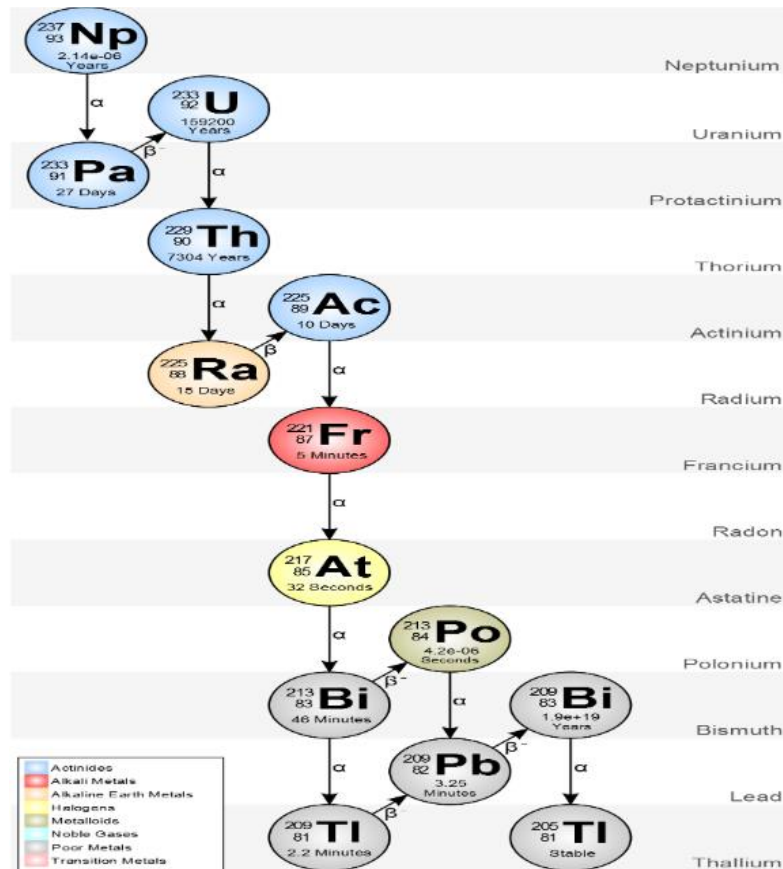


Figure 1.4 : Série 4n+1 de neptunium [19]

#### 4. FILIATION RADIOACTIVE

Le problème de chaîne radioactive a été résolu pour la première fois par Harry Bateman en utilisant la transformée de Laplace pour résoudre un système d'équation différentielle. Quand la chaîne est courte, les équations peuvent aussi évoluer de façon plus classique [19]. Nous nous limiterons ici à deux maillons, soit X un noyau qui se désintègre à un noyau Y de constante de temps  $1/\lambda_1$  et le noyau Y qui se désintègre en suite en un noyau Z de constante de temps  $1/\lambda_2$  [10]. Les populations moyennes  $N_X$  et  $N_Y$  satisfont les équations différentielles suivantes :

$$\frac{dN_X}{dt} = -\lambda_1 N_X \tag{1.12}$$

$$\frac{dN_Y}{dt} = -\lambda_2 N_Y + \lambda_1 N_X \tag{1.13}$$

La population  $N_Y$  diminue par décroissance radioactive mais est aussi alimentée par la décroissance du noyau père. En supposant qu'à l'instant initial  $t = 0$ , il n'y a que  $N_0$  noyaux X, les populations s'écrivent facilement en fonction du temps.

$$N_X(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1.14)$$

$$N_Y(t) = N_0 \lambda_1 \frac{e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1.15)$$

On a supposé ici que  $\lambda_1$  est différent de  $\lambda_2$

#### 4.1. Équilibre radioactive

Si  $T_1 \ll T_2$ , c'est à dire si  $\lambda_1 \gg \lambda_2$ , la population X disparaît rapidement pour donner Y qui va croître rapidement, puis décroître lentement, comme s'il était seul :

$$N_Y(t) = N_0 e^{-\lambda_2 t} \quad (1.16)$$

Pour des temps suffisamment longs ( $\lambda_1 t \gg 1$ ).

Pour des temps courts ( $\lambda_1 t \ll 1$ ), on peut négliger l'activité du fils,

$$N_Y(t) = N_0 \lambda_1 (1 - e^{-\lambda_1 t}) \quad (1.17)$$

#### 4.2. Équilibre séculaire

Ce type de relation entre activité mère et fille intervient quand la demi-vie du noyau mère est beaucoup plus grande que celle du noyau fille.  $T_1 \gg T_2$ , c'est à dire si  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ , la population Y va disparaître au fur et à mesure qu'elle est créée par décroissance du noyau X [10]. On dit alors que le noyau fils est en équilibre séculaire avec le noyau père, elle se traduit par :

$$N_X(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1.18)$$

$$N_Y(t) \simeq \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_0 e^{-\lambda_1 t} \quad (1.19)$$

Pour des temps suffisamment longs ( $\lambda_1 t \gg 1$ ). Généralement, on dit que ce 'équilibre est réalisé au bout de dix périodes. L'activité du noyau fils est égale à celui de l'activité du noyau père [20].

$$A_X = A_Y \quad (1.20)$$

#### 4.3. Équilibre Transitoire

Ce type de relation entre activité père et fils intervient quand la demi-vie du noyau père est plus grande que celle du noyau fils  $T_1 > T_2$  c'est-à-dire  $\lambda_1 < \lambda_2$ , (mais pas beaucoup plus grand contrairement au cas de l'équilibre séculaire  $T_1 \gg T_2$ , c'est à dire si  $\lambda_1 \ll \lambda_2$ ) [10]. Ici, les activités des deux nucléides évoluent en restant dans un rapport constant. L'activité du noyau fils est reliée à celle du père par :

$$\frac{A_1}{A_2} \simeq \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} \quad (1.21)$$

## 5. SOURCE D'EXPOSITION AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Toutes les espèces vivantes sur la Terre ont existé et évoluent dans des environnements où elles sont exposées à des rayonnements issus du milieu naturel [14]. L'exposition aux rayonnements ionisants est classée selon les différentes sources.

### 5.1. Source naturelle

Depuis sa création, l'environnement sur Terre a été exposé aux rayonnements provenant de l'espace et des matières radioactives présentes dans la croûte et le noyau terrestre [1]. Selon UNSCEAR, l'exposition due aux sources naturelles représente plus de 98 % de la dose totale de rayonnement reçue par la population, à l'exclusion de l'exposition médicale [15].

#### a. Source cosmique

Les sources cosmiques ou les rayons cosmiques représentent le rayonnement dominant dans l'espace et la principale source naturelle d'exposition externe aux rayonnements ionisants [1]. La majorité de ces rayons proviennent de l'espace interstellaire lointain ; certains sont émis par le soleil lors d'éruptions solaires. Ils irradient directement la Terre et entrent en interaction avec l'atmosphère, produisant différents types de rayonnement (de rayons X et de rayons gamma) et de substances radioactives cosmogéniques ( $^3\text{H}$ , le  $^{14}\text{C}$ , le  $^{22}\text{Na}$  et le  $^7\text{Be}$  ...) [7]. Bien que l'atmosphère et le champ magnétique terrestres réduisent considérablement le rayonnement cosmique, le globe n'est pas épargné. Certaines parties du globe sont plus exposées que d'autres puisque le rayonnement cosmique est dévié par le champ magnétique aux pôles Nord et Sud, ces régions reçoivent davantage de rayonnement que les régions équatoriales. La dose de rayonnement due au rayonnement cosmique varie également en fonction de l'altitude. Plus l'altitude est élevée, plus l'exposition au rayonnement cosmique est importante, étant donné qu'il y a moins d'air pour servir d'écran [4]

#### b. Sources terrestres

Tout ce qui se trouve à la surface de la Terre et dans le noyau terrestre contient des radionucléides primordiaux. Ces radionucléides à vie très longue que l'on trouve dans le sol, comme le  $^{232}\text{Th}$ , le  $^{40}\text{K}$ , le  $^{235}\text{U}$  et le  $^{238}\text{U}$ , ainsi que les radionucléides issus de leur désintégration, comme le radium ( $^{226}\text{Ra}$ ) et le radon ( $^{222}\text{Rn}$ ), ont commencé à émettre des rayonnements avant même la formation de la Terre. Selon les calculs de l'UNSCEAR, chaque personne sur la Terre reçoit en moyenne une dose efficace

annuelle d'environ 0,48 mSv liés à l'exposition externe aux sources terrestres [21]. L'exposition du au rayonnement terrestre varie considérablement d'un endroit à un autre. Des études menées en France, en Allemagne, en Italie, au Japon et aux États-Unis suggèrent qu'environ 95 % de leur population vit dans des zones où la dose annuelle moyenne externe varie de 0,3 à 0,6 mSv [1]. Cependant dans certaines régions du monde les habitants peuvent recevoir des doses supérieures à 1 mSv par an [1].

## 5.2. Sources artificielles

Les utilisations des rayonnements ionisants ont considérablement augmenté au cours des dernières décennies, au fur et à mesure que les scientifiques ont appris à maîtriser l'énergie de l'atome pour diverses applications [1]. Du militaire au médical (traitement du cancer par exemple) et de la production d'électricité aux applications domestiques (comme les détecteurs de fumée), ces sources artificielles viennent s'ajouter à la dose de rayonnement provenant des sources naturelles et reçue par les individus et la population en général. Les doses individuelles venant des sources artificielles varient énormément. La plupart des gens reçoivent une dose relativement faible de ces sources, mais certaines personnes reçoivent plusieurs fois la dose moyenne. De manière générale, les sources de rayonnement artificielles sont bien contrôlées par des mesures de radioprotection [1].

## 6. INTERACTION DES RAYONNEMENTS AVEC LA MATIERE

### 6.1. Interaction des photons avec la matière

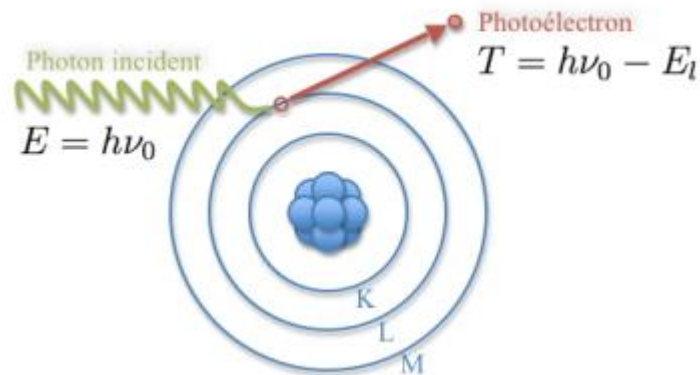
Un photon pénétrant dans la matière peut interagir avec les électrons atomiques, le noyau ou les champs électromagnétiques présents autour des électrons ou du noyau. Lors d'une interaction, le photon peut "rebondir" sans perte d'énergie (diffusion élastique), perdre une partie de son énergie (diffusion inélastique), ou perdre toute son énergie (absorption).

#### a. Effet photoélectrique

Ce processus correspond au transfert intégral de l'énergie du photon incident à un électron du cortège atomique [22]. Le photon est ainsi totalement absorbé, tandis que le photoélectron est éjecté de l'atome avec une énergie cinétique  $E_C$  donnée par :

$$T_C = h\nu_0 - E_I \quad (1.22)$$

C'est un phénomène d'absorption totale. Le photon incident disparaît après avoir donné toute son énergie à un électron d'un atome du milieu. L'électron éjecté emporte une énergie cinétique  $E_c$  égale à la différence entre l'énergie  $E_{h\nu}$  du photon incident et son énergie de liaison  $W$ .



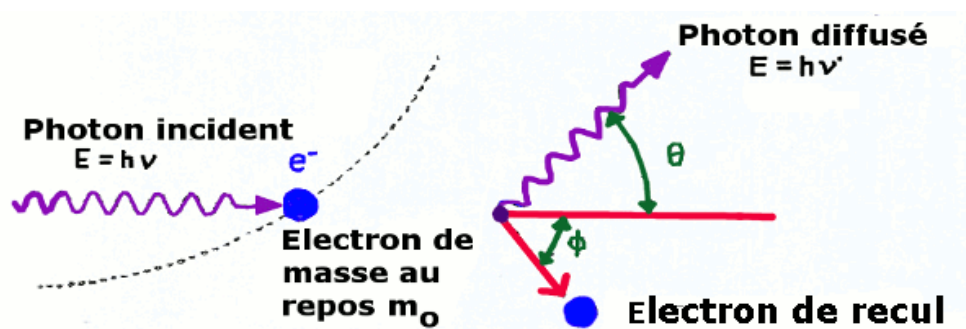
**Figure 1.5 :** Effet photoélectrique [23]

À la suite de l'expulsion de l'électron par effet photoélectrique, il y a réarrangement électronique de l'atome, comblant la lacune. Deux phénomènes entrent alors en concurrence : la fluorescence et l'effet Auger [8].

### b. Effet Compton

La diffusion Compton correspond à un choc entre un photon  $h\nu$  et un électron de valence faiblement lié. Le photon  $h\nu'$  est alors diffusé avec une énergie inférieure à son énergie incidente. L'électron dit de recul est éjecté avec une énergie cinétique  $h\nu_{ci}$  complémentaire de l'énergie du photon [10]

$$h\nu = h\nu' + h\nu_{ci} \quad (1.22)$$



**Figure 1.5 :** Effet Compton [23]

### c. Effet de création de paire

L'effet de création de paires a lieu avec des photons de haute énergie, et représente un processus de matérialisation de l'énergie au sens de la mécanique relativiste. Le phénomène qui se produit est la disparition du photon dans le champ du noyau, et la création à sa place d'une paire positron-électron [24]. Le principe de conservation de l'énergie s'exprime ici comme suit :

$$h\nu = 2m_0c^2 + E_+ + E_- \quad (1.23)$$

Où  $E_+$  et  $E_-$  représentent respectivement les énergies cinétiques du positron et de l'électron. Le processus de formation des paires est représenté de manière schématique dans la figure 1.6. La création est impossible pour les photons dont l'énergie est inférieure à 1,02 MeV, cette valeur est donc le seuil d'énergie du processus [24]

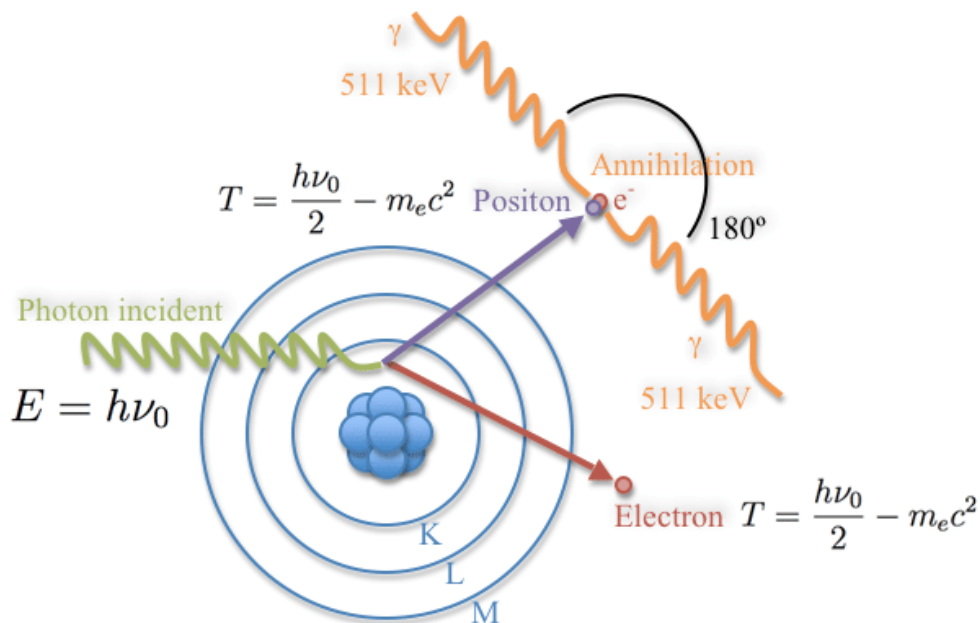


Figure 1.6 : Création de pair [23]

## 6.2. Interaction des particules avec la matière

Les interactions particules-matière sont liées au transfert d'énergie de la particule vers les atomes de la matière :

### a. Interaction des particules chargée lourde

L'ionisation et l'excitation des atomes (Excepté à faible vitesse, une particule chargée lourde perd une quantité négligeable d'énergie dans les collisions nucléaires). La particule chargée en mouvement

exerce des forces électromagnétiques sur les électrons atomiques et leur transmet de l'énergie [4]. L'énergie transférée peut être suffisante pour faire tomber un électron d'un atome et ainsi l'ioniser, ou elle peut laisser l'atome dans un état excité, non ionisé. Par contre, une particule lourde chargée ne peut transférer qu'une petite fraction de son énergie dans une seule collision électronique. Sa déviation dans la collision est donc négligeable. Ainsi, une particule lourde chargée parcourt un chemin presque rectiligne à travers la matière, perdant presque continuellement de l'énergie en petites quantités par des collisions avec les électrons atomiques, et laissant dans son sillage des atomes ionisés et excités [25].

### **b. Interaction des particules chargée légère**

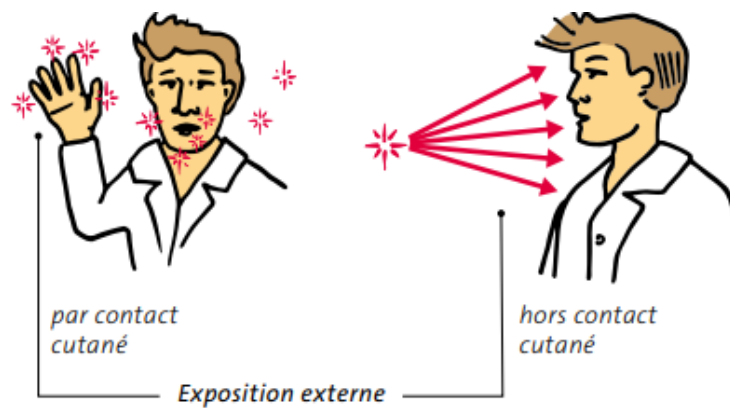
En comparaison aux particules chargées lourdes, les électrons perdent leur énergie à un rythme plus lent et suivent un chemin beaucoup plus tortueux à travers les matériaux absorbants. Les électrons diffèrent également des particules chargées lourdes en ce que l'énergie peut être perdue par des processus radiatifs ainsi que par des interactions coulombiennes. Ces pertes radiatives prennent la forme de Bremsstrahlung ou de rayonnement électromagnétique, qui peut émaner de n'importe quelle position le long de la trajectoire de l'électron. D'après la théorie classique, toute charge doit émettre de l'énergie lorsqu'elle est accélérée, et les déviations de l'électron dans ses interactions avec l'absorbeur correspondent à cette accélération [26].

## **8. VOIES D'EXPOSITION**

L'évaluation du risque radiologique pour les organismes nécessite de connaître les voies par lesquelles ils sont exposés. La voie d'exposition est le parcours physique d'un agent environnemental depuis sa source jusqu'à ceux qui le reçoivent c'est à dire éventuellement lorsqu'un, agent chimique, physique ou biologique nous atteint. La voie d'exposition est dans ce cas la façon dont il pénètre dans notre corps [4].

### **8.1. Voie externe**

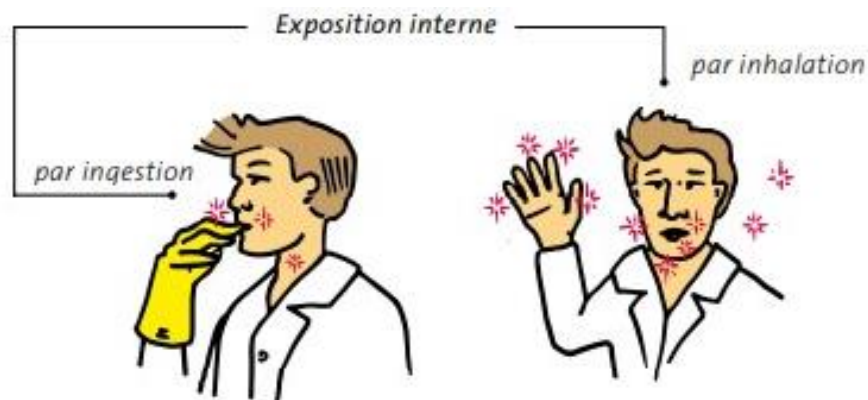
L'exposition externe résulte de la présence d'un organisme dans un milieu (air, eau, sol, sédiment) contenant des radionucléides, elle intègre à la fois le contact (immersion dans un milieu contenant des radionucléides) et l'irradiation sans contact [10].



**Figure 1.7 :** Voies d'exposition externe [26]

## 8.2. Voie interne

L'exposition interne résulte de l'incorporation des radionucléides par les organismes, quel que soit le processus à l'origine de la pénétration des radionucléides dans l'organisme par inhalation (gaz, aérosols), par ingestion, par voie oculaire, par voie percutanée (altération cutanée, plaie, ou plus rarement à travers une peau saine) [10]. Après pénétration dans l'organisme, l'exposition interne se poursuivra tant que la substance radioactive continuera d'émettre des rayonnements ionisants et n'aura pas été éliminée par l'organisme [4].



**Figure 1.9 :** Principe de l'exposition interne [26]

Il est également à noter que le mode d'exposition a énormément d'impact sur la nature et l'importance des effets recensés. Une exposition interne aux rayonnements  $\beta$  sera ainsi plus nocive qu'une exposition externe à ce rayonnement  $\beta$ .

## **9. EFFET BIOLOGIQUE DES RAYONNEMENTS IONISANTS LA SANTE**

### **9.1. Effets chez l'être humain**

Sur la base de leur délai d'apparition, les effets d'une exposition aux rayonnements sur la santé sont définis comme effets à court terme ou à long terme.

#### **a. Effet sur la sante à court terme**

Les effets sur la santé à court terme sont causés par l'accumulation de nombreuses lésions cellulaires ou par la mort des cellules. Ils incluent entre autres les brûlures cutanées, la chute des cheveux et l'altération de la fertilité [1]. Ces effets se caractérisent par l'existence d'un seuil de dose relativement élevé qui doit être dépassé sur une courte période avant que l'effet ne se produise. Au-delà de ce seuil, la gravité de l'effet croît en fonction de l'augmentation de la dose [10]

#### **b. Effets sur la santé à long terme**

Les effets à long terme surviennent longtemps après l'exposition. En général, la plupart des effets à long terme sont également des effets stochastiques, pour lesquels la probabilité d'apparition dépend de la dose reçue. Ces effets seraient attribuables aux modifications du matériel génétique d'une cellule suite à une exposition aux rayonnements [27]. Parmi les effets à long terme, on peut citer les tumeurs solides et la leucémie qui se déclarent chez les personnes exposées, ainsi que les anomalies génétiques dont souffrent les enfants de personnes ayant été exposées aux rayonnements [14]. La fréquence d'apparition (et non pas la gravité) de ces effets dans une population augmente selon la dose reçue [1].

### **9.2. Effets sur les animaux et les plantes**

On accorde plus d'attention aux effets de l'exposition aux rayonnements ionisants sur les animaux et les plantes aujourd'hui qu'auparavant [4]. Au cours de ces dernières décennies, on s'accordait à dire que si la vie humaine était correctement protégée, il en allait de même pour les plantes et les animaux. Avec l'émergence de cette thématique dans les années 2000 et la genèse des méthodes et outils d'évaluation de risque radiologique, des normes (DOE Order 458.1) visant à protéger les populations d'animaux aquatiques, les plantes et animaux terrestres des écosystèmes ont été définis [5]. En accord avec cette ligne directrice et avec son statut de référent international en matière de radioprotection, la CIPR a considéré que le principe de limitation de doses adopté pour la

protection radiologique de l'homme était inapproprié à celle du biote [28]. La CIPR a proposé un système de radioprotection de l'environnement basé sur le principe de l'écart à la référence pour permettre l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvage. Elle a donc introduit un nouveau concept, le DCRL (Derived Consideration Reference Level) comme points de référence pour caractériser les effets d'une exposition aux rayonnements ionisants. IL est admis qu'une dose théorique comprise entre 1 et 10 Gy, valeur définis par la CIPR [15] ne devrait pas causer d'effets sur les populations animales et végétales, et que les réponses individuelles à une exposition aux rayonnements variaient (les mammifères étant les plus sensibles de tous les animaux) [28]. Les effets supposés être significatifs au niveau de la population concernent la fertilité, la mortalité et l'induction de mutations. Les modifications au niveau de la reproduction, comme le nombre de descendants, constituent un indicateur plus sensible des effets des rayonnements [1,3].

## **10. GENERALITES SUR LA METHODE D'EVALUATION DE RISQUE RADIOLOGIQUE**

La prise de conscience de l'importance de protéger l'environnement des risques liés à l'utilisation des rayonnements ionisants date du début des années 2000. C'est dans ce cadre que l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA), intégrant les recommandations de la Commission internationale de protection radiologique (CIPR), a révisé en 2014 les normes internationales en matière de protection contre les risques liés à l'utilisation des rayonnements ionisants, en faisant explicitement mention de la protection de l'environnement en tant que tel. Cette révision visait l'atteinte de deux objectifs. Il s'agissait d'une part de garantir pour les générations présentes et futures une utilisation durable des ressources environnementales utiles à l'agriculture, l'exploitation des forêts, la pêche, le tourisme, et d'autre part de prévenir les effets potentiels des rayonnements ionisants sur les espèces non-humaines [29].

### **10.1. Cadre méthodique de l'évaluation**

L'évaluation d'un risque radiologique est réalisée par écart à une valeur repère. Il s'agit de comparer le niveau d'exposition observé ou prédit d'un organisme avec un niveau dit "sans effet", constituant la référence. Le risque ne peut être négligé dès lors que le niveau d'exposition, mesuré ou calculé, est supérieur à la valeur repère. Ce principe d'écart à la référence est appliqué en suivant la méthodologie d'évaluation du risque, qui repose sur quatre composantes [29] :

Une fois le contexte de travail clairement établi, la mise en œuvre de ce principe se fait en déroulant les trois autres composantes usuelles de l'évaluation :

- **Analyse des expositions** : Phase d'appréciation technique des données d'exposition. Elle a pour objectif de quantifier, pour chacune des voies d'exposition des organismes à protéger et les niveaux auxquels ils sont exposés.
- **Analyse des effets** : Elle est destinée à identifier ou à déterminer des valeurs repères par la caractérisation des relations entre exposition et effets écotoxiques.
- **Caractérisation du risque** : La confrontation des données issues des deux composantes précédentes permet de caractériser pour les organismes exposés la probabilité d'observer des dommages et leur sévérité, c'est à dire le risque.

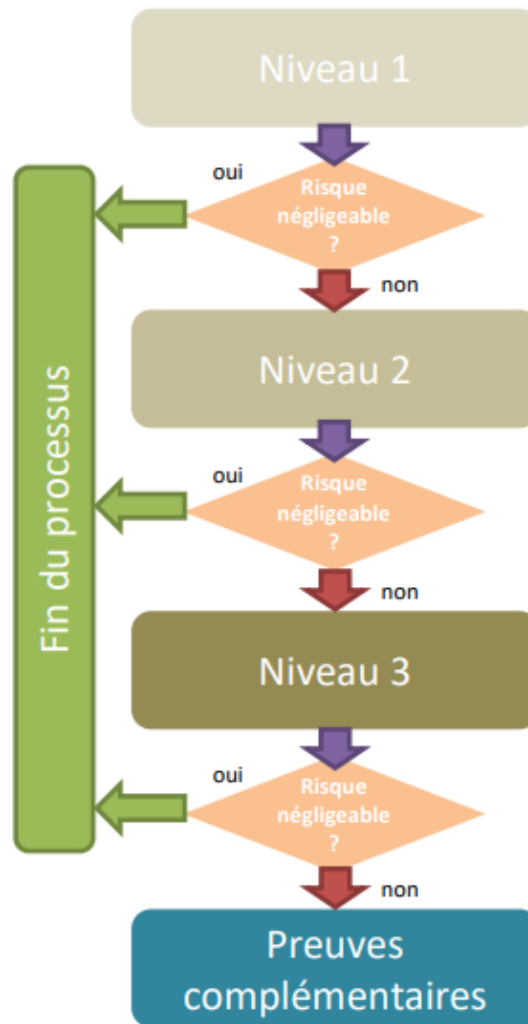
## 10.2. Évaluation graduelle

Dans l'approche dite graduée, une démarche à 03 niveaux est déroulée une première fois avec un conservatisme volontairement important des hypothèses. Ainsi, si le risque estimé ne peut être négligé, renouveler l'évaluation une à deux fois en réduisant le conservatisme. À chaque niveau, les hypothèses présentent un degré de réalisme croissant résultant de l'usage de paramètres de plus en plus spécifiques de l'écosystème étudié. Au fil de cette évolution, l'évaluation se resserre ainsi autour de la situation réelle [29].

Niveau 1 : approche conservatrice basée sur des hypothèses visant à majorer l'évaluation de risque (par exemple en utilisant les valeurs maximales pour les données d'exposition)

Niveau 2 : reposant sur la mise en œuvre de données génériques et des hypothèses moins conservatrices (par exemple, valeurs moyennes pour les données d'exposition)

Niveau 3 : nécessitant des informations locales, justifiées et dont l'origine est clairement référencée.



**Figure 1.10 :** Articulation des trois niveaux de l’approche graduée pour l’évaluation de risque [29]

Il est à noter que les ressources à mettre en œuvre et la quantité d’information nécessaire augmentent de façon significative d’un niveau à l’autre. Lorsque le niveau ultime ne conduit pas à qualifier le risque comme négligeable, un complément de preuves doit être apporté. C’est par exemple en utilisant des résultats d’observations issues de la surveillance environnementale ou d’investigations écologiques, ou par des études ciblées destinées à évaluer l’impact réel sur les organismes exposés

## 11. LES PRINCIPES DE LA RADIOPROTECTION

La radioprotection, qui a pour objectif de prévenir et de limiter les risques sanitaires dus aux rayonnements ionisants quelles que soient leurs origines, constitue le socle sur lequel sont fondées les règles de prévention qui doivent être mises en place par l’employeur. Ces principes sont entre autres :

- La justification : Toute activité entraînant une exposition aux rayonnements ionisants doit être justifiée par une analyse des avantages qu'elle procure sur le plan individuel ou collectif, notamment en matière sanitaire, sociale, économique ou scientifique [23].
- L'optimisation : Le niveau d'exposition des personnes aux rayonnements ionisants, la probabilité de la survenue de cette exposition et le nombre de personnes exposées doivent être maintenus au niveau le plus faible qu'il est raisonnablement possible d'atteindre (principe ALARA : contraction de l'expression « As Low As Reasonably Achievable»), compte tenu de l'état des connaissances techniques, des facteurs économiques et sociétaux) [23].
- La limitation des expositions individuelles : Les expositions individuelles doivent être maintenues en dessous des limites pour lesquelles le risque est jugé acceptable [23]. Ces limites sont telles qu'elles permettent de :

## **Conclusion**

Ce chapitre intitulé revue de la littérature présente, les bases de la physique des rayonnements (la généralité sur la radioactivité, les différentes sources de rayonnement et interaction des rayonnements ionisants avec la matière et les effets associés) ainsi que la généralité sur la méthode d'évaluation des risques. Le chapitre suivant matériel et méthode, présente le code et la méthode d'évaluation RESRAD-BIOTA.

---

## CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

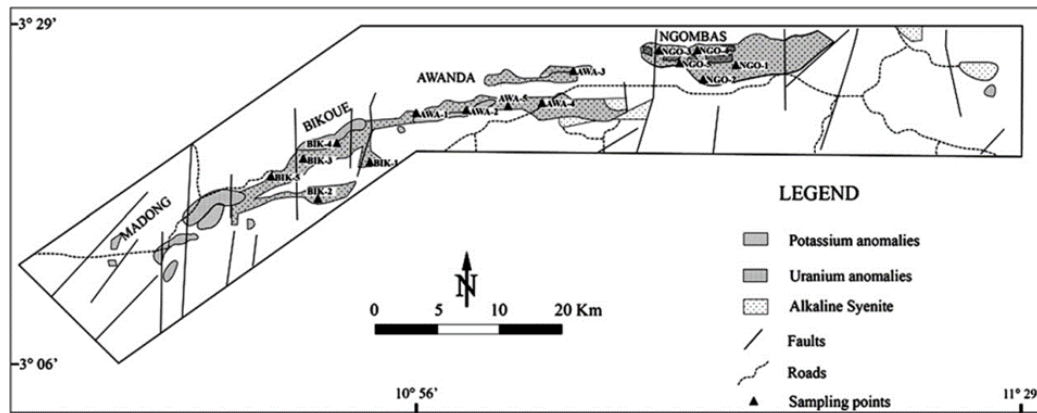
---

### Introduction

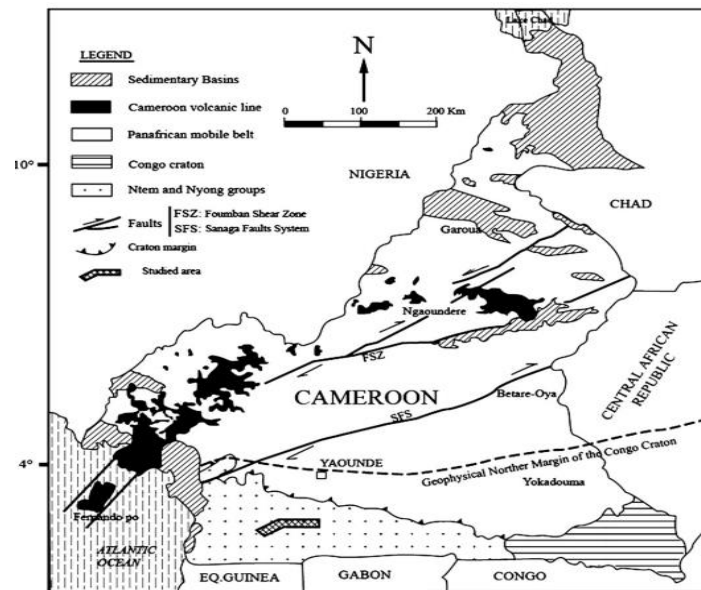
Dans ce chapitre dédié aux matériels utilisés, il sera question pour nous de présenter la zone d'étude, la méthode d'évaluation de risque radiologique, le code RESRAD-BIOTA et l'utilisé dans le cadre de notre étude pour estimer les risques d'exposition radiologique.

### 1. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Notre zone d'étude se trouve sur l'axe syénitique Akongo-Lolodorf qui s'étend sur plus de 75 km<sup>2</sup> dans la région du Sud-Cameroun. La population de cette région est de 374 000 personnes et la densité moyenne de la population est d'environ huit (08) habitants par km<sup>2</sup> [31]. Les formations géologiques de cette zone datent du Précambrien. Celles étudiées dans ce travail sont Paléoprotozoïque et appartiennent au groupe du Nyong (Figure : 2.1) [5]. La ferralitisaiton étant le processus pédogénique le plus important au Cameroun, les sols étudiés dans le cadre de ce travail sont de deux types : les sols ferralitiques de couleur rouge-foncée et jaune-rouge et les sols hydromorphiques qu'on retrouve spécifiquement dans les régions du Sud-Cameroun (Sighomnou, 2004). Les températures moyennes de ces régions varient entre 25 et 26°C. Le climat de cette localité est de type équatorial avec 4 saisons : deux saisons de pluie et deux saisons sèches. La saison sèche est causée par les masses d'air tropical provenant du désert du Sahara entre Décembre-Février et Juillet-Août. La saison de pluie provient des masses d'air frais venant de l'océan Atlantique entre Septembre-Novembre et entre Mars-Juin. La quantité moyenne de pluie annuelle dans cette régions du Sud est d'à peu près de 1500 à 2000 mm, avec une humidité relative entre 70% et 80% par an [5], [31].



**Figure 2.1** : Points d'échantillonnage du sol et des denrées alimentaires dans chaque district rural enquêté [31]



**Figure 2.2** : Carte géologique du Cameroun montrant la localisation de la zone étudiée [31]

## 2. PREPARATION DES ECHANTILLONNAGES

Dans le cadre de ce travail, nous utiliserons les concentrations de radionucléides dans le sol et dans les denrées alimentaires obtenus par Ele et al [31,32].

Pour ce qui est de la collecte d'échantillon des denrées alimentaires, cinq ménages représentatifs ont été sélectionnés. Les cultures vivrières ont été échantillonnées à partir du matériel déjà récolté. Différents échantillons de denrées alimentaires pesant 1 à 2 kg au frais ont été collectés. Les échantillons des 5 ménages ont ensuite été combinés, ce qui a donné 25 échantillons de denrées

alimentaires. Tous les échantillons de denrées alimentaires ont été prétraités conformément aux recommandations de l'AIEA [32].

Les sous-échantillons de sol ont été collectés autour de chaque point d'échantillonnage des roches fixes. Les sous-échantillons de sol collectés ont été mélangés pour constituer un échantillon de sol. Par cette technique d'échantillonnage, un total de quinze (15) échantillons a été prélevé du sol à raison d'un échantillon composé par point de prélèvement [31].

La mesure des concentrations d'activité des radionucléides dans l'échantillon a été déterminée à l'aide d'un système de comptage gamma. Ce système est constitué d'un détecteur au Germanium hyperpur HPGe de type p (GR3019) et attaché à un analyseur multicanal intégré de 16K canaux (modèle DESA 1000). L'acquisition et l'analyse des données ont été quant à eux effectuées avec le logiciel Genie 2000.

La méthode de l'échantillonnage, le conditionnement des échantillons et la mesures de déconcentration sont décrite par Ele et al [31,32]. Les concentrations des radionucléides dans le sol et dans les aliments obtenus seront utilisées comme valeurs d'entrée dans RESRAD-BIOTA (Tableau 2.1 et 2.2).

**Tableau 1.1:** Valeurs corrigées des concentrations de  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$ , mesurées dans les échantillons de sol [32].

Localisation	Sample I.D.	$^{226}\text{Ra}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{232}\text{Th}$ (Bq kg <sup>-1</sup> )	$^{40}\text{K}$ (kBq kg <sup>-1</sup> )
Ngombas	NGO-08-S1	60 ± 10	170 ± 10	400 ± 20
	NGO-08-S2	130 ± 10	260 ± 20	470 ± 40
	NGO-08-S3	140 ± 10	510 ± 40	510 ± 40
	NGO-08-S4	270 ± 20	680 ± 50	490 ± 30
	NGO-08-S5	230 ± 20	740 ± 50	370 ± 20
Awanda	AWA-08-S1	120 ± 10	240 ± 20	700 ± 50
	AWA-08-S2	160 ± 20	350 ± 20	750 ± 60
	AWA-08-S3	80 ± 10	530 ± 20	700 ± 50
	AWA-08-S4	80 ± 10	420 ± 30	700 ± 50
	AWA-08-S5	100 ± 10	350 ± 20	790 ± 60
Bikoué	BIK-08-S1	110 ± 10	700 ± 50	1220 ± 80
	BIK-08-S2	80 ± 10	100 ± 10	1400 ± 100
	BIK-08-S3	190 ± 20	230 ± 20	1530 ± 110
	BIK-08-S4	80 ± 10	190 ± 20	1340 ± 100
	BIK-08-S5	110 ± 10	400 ± 20	1410 ± 110
	Valeurs moyennes	130 ± 10	390 ± 30	850 ± 70

**Tableau 2.2** : concentration des échantillons de sols des localités Ngombas, Awanda et Bikoué [32].

<b>Localités</b>		<b>Radionucléide</b>		
		$^{226}\text{Ra}$ (kBq kg <sup>-1</sup> )	$^{232}\text{Th}$ (kBq kg <sup>-1</sup> )	$^{40}\text{K}$ (kBq kg <sup>-1</sup> )
<b>Ngombas</b>	Min	0.08 ± 0.01	0.21 ± 0.01	0.46 ± 0.03
	Max	0.33 ± 0.03	0.91 ± 0.06	0.63 ± 0.05
<b>Awanda</b>	Min	0.08 ± 0.01	0.30 ± 0.02	0.84 ± 0.06
	Max	0.20 ± 0.02	0.65 ± 0.03	0.97 ± 0.07
<b>Bikoué</b>	Min	0.10 ± 0.01	0.12 ± 0.01	1.50 ± 0.10
	Max	0.24 ± 0.02	0.86 ± 0.06	1.89 ± 0.13
	Moy	0.16 ± 0.01	0.48 ± 0.04	1.05 ± 0.27

L'uranium et le thorium naturel peuvent être identifiés par la présence de leurs chaînes de désintégration en équilibre séculaire (période où la quantité d'un radioisotope reste constante du fait que son taux de production est égal à son taux de désintégration) avec le composé mère de l' $^{238}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$  comme indiqué dans la figure 1.1 du chapitre précédent. Ainsi le  $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ , et le  $^{232}\text{Th}$  sont évalués en équilibre séculaire dans la chaîne de descendance appartenant à la famille de chacune de ces radionucléides comme présenté à la figure 1. Les tableaux 6 présente la liste de tous les radionucléides pris en équilibre séculaire dans la famille de désintégration de l' $^{238}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$ , avec les différentes valeurs de concentrations en entrée.

Tableau 2.3 : Valeur d'entrée de concentration dans RESRAD-BIOTA [31,32]

Radionucléide	Concentration en Bq kg <sup>-1</sup>						
	Ngombas		Awanda		Bikoué		
	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum	Minimum	Moyenne
<sup>40</sup> K	630	460	970	840	1890	1500	1040
<sup>210</sup> Pb	330	80	200	80	240	100	160
<sup>210</sup> Po	330	80	200	80	240	100	160
<sup>226</sup> Ra	330	80	200	80	240	100	160
<sup>228</sup> Ra	910	210	520	230	860	120	480
<sup>228</sup> Th	910	210	520	230	860	120	480
<sup>230</sup> Th	330	80	200	80	240	100	160
<sup>232</sup> Th	910	210	52	230	860	120	480
<sup>234</sup> Th	330	80	200	80	240	100	160
<sup>234</sup> U	330	80	200	80	240	100	160
<sup>238</sup> U	330	80	200	80	240	100	160

Tableau 2.4 : Concentration des radionucléides dans les aliments [32]

Groupe d'aliment	Type d'aliment	Nom latin	Concentration en Bq kg <sup>-1</sup>					
			<sup>226</sup> Ra		<sup>228</sup> Ra		<sup>40</sup> K	
			Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne	Maximum	Moyenne
Légumineuse	Arachide	<i>Arachis hypogaea</i>	26	6.00	1	0.20	240	195
Fruit	Banane plantain	<i>Musa sp.</i>	0.04	0.20	1	0.20	115	107
Feuille de Légume	Feuille de Manioc	<i>Manihot esculenta</i>	11	4.00	13	6.20	234	160
Tubercule	Racine de Manioc	<i>M. esculenta</i>	4	1.30	1.10	0.80	132	83
	Macabo	<i>Xanthosoma sagittifolium</i>	2	0.70	1	0.40	193	158

### 3. PRESENTATION GENERALE DU CODE RESRAD

#### 3.1. Famille RESRAD

La famille de codes RESRAD est développée au laboratoire d'Argonne pour analyser les expositions potentielles aux rayonnements humains, non humain et biologiques provenant de la contamination environnementale des matériaux résiduels radioactifs. Les codes utilisent l'analyse des voies pour évaluer l'exposition aux rayonnements et les risques associés ; et pour dériver des critères de nettoyage ou des limites autorisées pour les concentrations de radionucléides dans le milieu source contaminé. La famille de codes RESRAD est largement utilisée par les organismes de réglementation, la communauté de l'évaluation des risques et les universités dans plus de 100 pays à travers le monde.

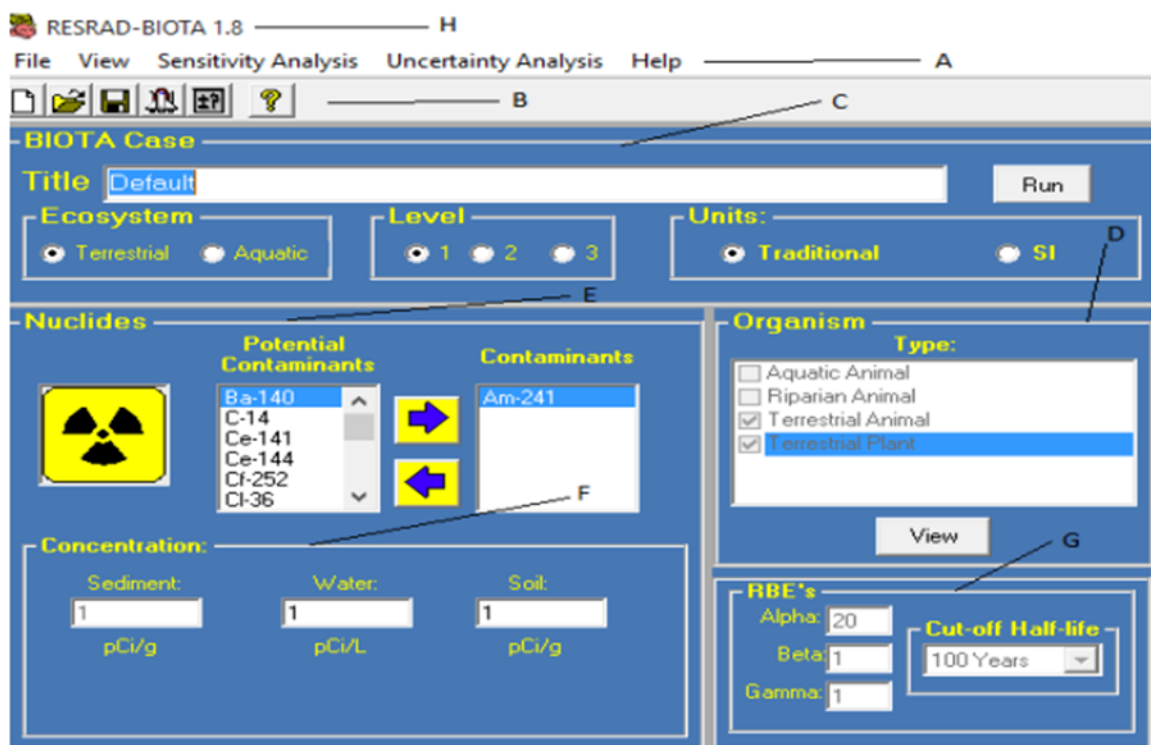
Nous distinguons entre autres les codes RESRAD-ONSITE, RESRAD-OFFSITE, RESRAD-BUILD, RESRAD-RDD et RESRAD-BIOTA. Pour la présente étude, RESRAD-BIOTA a été utilisé pour évaluer les doses.



**Figure 2.3 :** famille de code RESRAD [34]

### 3.2. RESRAD-BIOTA

Le code RESRAD-BIOTA est un logiciel informatique d'évaluation des doses de biote qui utilise des RC (rapport de concentration) et d'autres paramètres ainsi que diverses méthodes pour estimer les concentrations de radionucléides chez les animaux et les végétaux aux fins du calcul des doses [27]. Un RC est conventionnellement appelé Biv dans RESRAD-BIOTA et d'autre famille de codes RESRAD. Le symbole Biv signifie facteur de concentration (facteur de bioaccumulation ou d'absorption) pour l'indice  $i$  des radionucléides et l'indice de voie de végétation. Un ensemble de BIV par défaut est utilisé dans l'analyse préalable de niveau 1 de RESRAD-BIOTA pour calculer les valeurs de concentration environnementale de dépistage appelées guides de concentration du biote (BCG) en tenant compte des expositions radiologiques externes et internes. Le code RESRAD-BIOTA dispose d'une interface de saisie conviviale permettant de simplifier l'entrée des paramètres nécessaires impliqués dans le processus de dépistage et d'analyse [34].



**Figure 2.4 :** interface RESRAD-BIOTA [34]

Où

A : la barre de titres

B : la barre d'outils standard : composée de file, view, analyse de sensibilité et aide

C : la case biota : composée du type écologique, du niveau d'évaluation, et de la barre des unités

D : type d'organisme étudié

E : radionucléides

F : concentration en entrée

G : particules émises

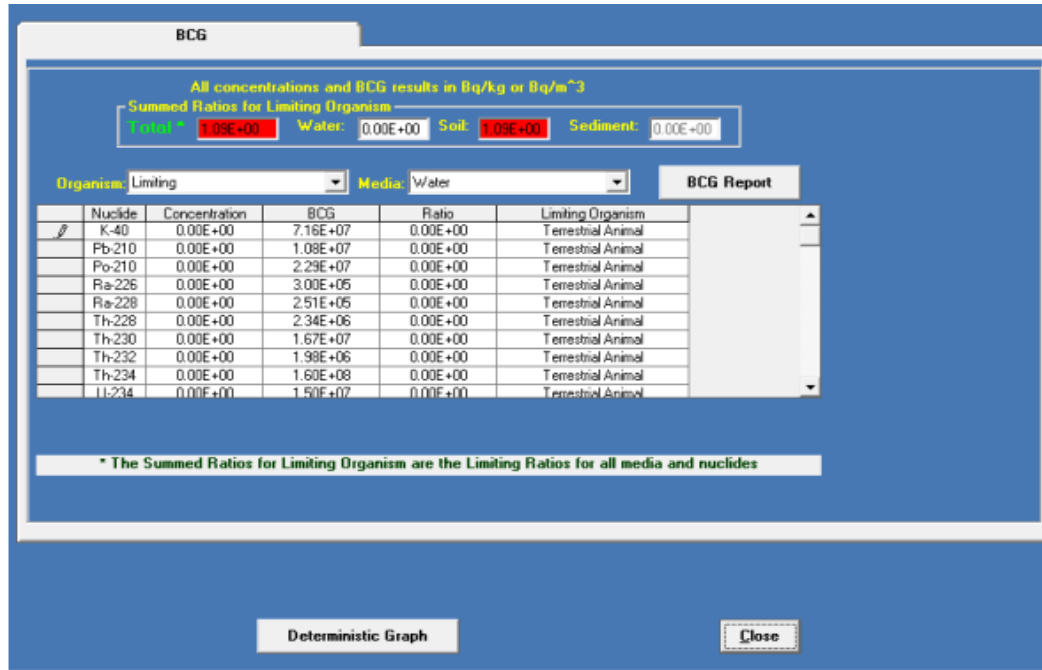
H : Titre de l'évaluation

### 3.3. Mise en œuvre d'une évaluation RESRAD-BIOTA

Le code RESRAD-BIOTA utilise une approche progressive à trois niveaux d'analyse. Au niveau 1, les BCG (Biota Concentration Guide) sont évalués pour les écosystèmes sol, l'eau et les sédiments contaminés, en utilisant quatre catégories d'organismes par défaut, les animaux terrestres, les plantes terrestres, les animaux riverains et les animaux aquatiques [34]. Ces BCG des milieux environnementaux sont comparés afin de déterminer si la limite de dose biotique recommandée n'est pas dépassée. Aux niveaux 2 et 3, des données d'entrée plus spécifiques au site et à l'organisme sont prises en compte pour effectuer un calcul plus précis de la dose à comparer avec la limite de dose recommandée [35]. Le calcul de la dose tient compte à la fois du rayonnement externe et du rayonnement interne. Le calcul de la dose externe doit tenir compte des périodes de temps que l'organisme passe à proximité ou dans le milieu contaminé. Pour le calcul des doses interne trois options sont disponibles. Il s'agit des concentrations mesurées dans les tissus, le rapport entre la concentration dans le milieu et la concentration dans les tissus, ou les équations allométriques qui évaluent la concentration maximale dans les tissus, en tenant compte des taux d'inhalation et d'absorption, de la désintégration biologique et radiologique, de la masse corporelle et la durée de vie de l'organisme [34].

#### a. RESRAD-BIOTA niveau 1

Le niveau 1 d'évaluation de risque RESRAD-BIOTA correspond à une approche générique destinée à estimer de façon majorée le risque tout en minimisant les ressources nécessaires à la conduite de l'évaluation. Le paramétrage par défaut est retenu, et la valeur repère destinée à assurer la protection des espèces présentes dans les écosystèmes (aquatique et terrestre) est retenue à  $10 \mu\text{Gy}\cdot\text{h}^{-1}$ , les organismes génériques sont considérés exposés de façon maximale [34].



**Figure 2.5** : Analyse RESRAD-BIOTA niveau 1 de Am-140 [33]

Cette phase permet d'obtenir une première visibilité sur l'état de contamination ou de risque de contamination du site. Ceci à partir de la détermination des BCG (biote concentration guide) génériques. Si le BCG total (somme des ratios ou fraction de concentration) est inférieur à 1 alors le site ne présente aucun risque de contamination Ce qui marque la fin de l'analyse. Si le BCG générique est supérieur à 1 le risque d'apparition des conséquences écologiques négatives pour la faune et la flore n'est donc pas négligeable. Dans ce cas, il faudra passer l'étape suivante.

## b. RESRAD-BIOTA niveau 2

Conduire une évaluation RESRAD-BIOTA niveau 2 signifie que le risque caractérisé au niveau précédent ne peut être considéré comme négligeable, et qu'il est nécessaire de commencer l'évaluation par une étude générique plus réaliste. En effet, au lieu d'utiliser les valeurs des paramètres et des hypothèses par défaut de la phase précédente, RESRAD-BIOTA niveau 2 permet d'appliquer la connaissance des conditions et des récepteurs spécifiques au site dans l'évaluation de la dose au biote. On peut envisager utiliser les concentrations moyennes de radionucléides à la place des valeurs maximales précédentes, tenir compte de la dépendance temporelle et de l'étendue spatiale de la contamination. Les paramètres représentatifs du site ( $K_b$ ,  $B_{iv}$ ...) peuvent également si nécessaire être utilisés à la place des valeurs par défaut [34].

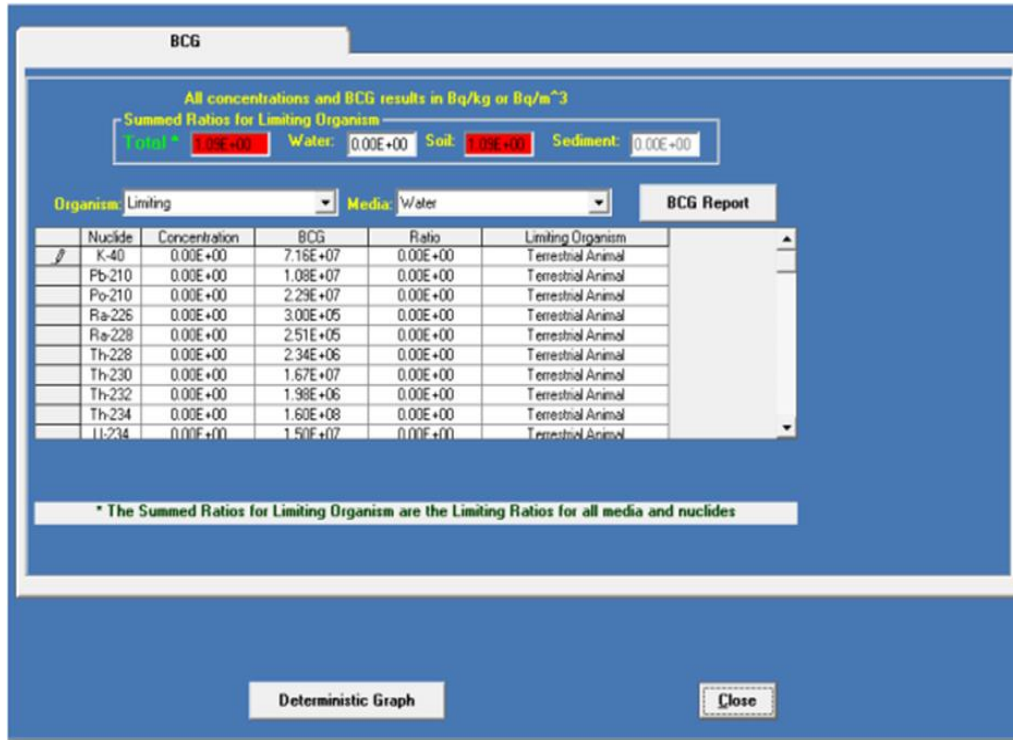


Figure 2.6 : Rapport BCG niveau 2. RBn2 [33]

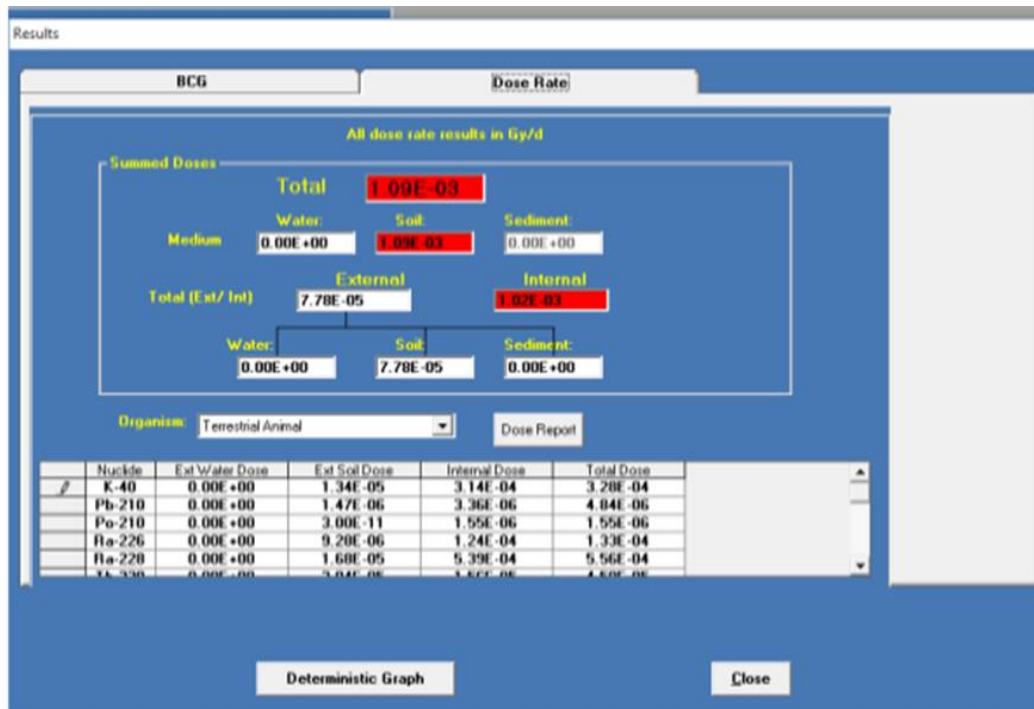


Figure 2.7 : RESRAD-BIOTA niveau 2 calcul du débit de dose engagé RBn2 [33]

### c. RESRAD BIOTA Niveau 3

Une analyse supplémentaire est justifiée si les évaluations des doses reçues par le biote, décrites jusqu'à présent continuent d'indiquer qu'il existe un impact négatif potentiel. C'est-à-dire que les BCGs sont dépassés. De nombreux facteurs doivent être pris en compte après avoir déterminé que les BCGs sont dépassés. Par exemple, la pertinence écologique et la vulnérabilité de la population affectée (facteurs de conversion de dose (DCF), le facteur de bioaccumulation (BIV)...), la taille de la zone contaminée et la persistance des contaminants...



**Figure 2.8 :** Taux d'inhalation interne et externe par radionucléide ingéré RBn3 [33]

## 3.4. Élément conceptuel de l'évaluation RESRAD-BIOTA

### a. Organisme de référence et Organisme représentatif

Un organisme de référence ou RAP (animaux ou plantes de référence) est considéré comme le représentant au sein d'un écosystème (terrestre, eau douce, marin, etc.) des espèces appartenant à un même taxon (oiseau, poisson, etc.) [34]. Ces organismes sont des entités hypothétiques présentant des

expositions contrastées en lien avec leur habitat et leur mode de vie, et autorisant la caractérisation dosimétrique des différents stades de leur cycle de vie.

L'augmentation du réalisme de l'évaluation, mis en œuvre si nécessaire, repose entre autres sur l'utilisation d'un organisme représentatif (OR), qui représente l'espèce ou le groupe d'espèces à protéger plus particulièrement [34].



**Figure 2.9 :** Lien entre organisme de référence et organisme représentatif [34].

### **b. Valeur repère**

Le principe de l'écart à la référence, qui est la base de l'évaluation calculatoire du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages suppose la comparaison d'une grandeur caractérisant l'exposition envisagée ou avérée des organismes à des valeurs repères garantissant la protection d'une espèce, ou d'une population, et voire même d'une communauté. Ces valeurs repères sont associées à des débits de dose DCRL (Derived Consideration Reference Levels) en dessous desquels la fréquence d'apparition d'effets nocifs pour les organismes ciblés n'est pas significative [34]. Le tableau ci-

dessous présente les critères de débit de dose DOE utilisés dans le calcul du RESRAD pour les plantes terrestres et les animaux terrestres.

DOE Category & Criteria	Reference Organism	DCRL mGy/d	DCRL rad/d
Aquatic Animals 10 mGy/d 1 rad/d	Crab	10 to 100	1 to 10
	Trout	1 to 10	0.1 to 1
	Flatfish	1 to 10	0.1 to 1
Riparian Animals 1 mGy /d 0.1 rad/d	Frog	1 to 10	0.1 to 1
	Duck	0.1 to 1	0.01 to 0.1
Terrestrial Plants 10 mGy/d 1 rad/d	Pine tree	0.1 to 1	0.01 to 0.1
	Wild grass	1 to 10	0.1 to 1
Terrestrial Animals 1 mGy/d 0.1 rad/day	Deer	0.1 to 1	0.01 to 0.1
	Bee	10 to 100	1 to 10
	Earthworm	10 to 100	1 to 10
	Rat	0.1 to 1	0.01 to 0.1
None	Brown seaweed	10 to 100	1 to 10

**Figure 2.10 :** Comparaison des critères de débit de dose pour le biote du DOE avec les recommandations internationales pour les bandes DCRL de la CIPR (2014) [33]

### c. Facteur de bioaccumulation (BIV)

Les facteurs de bioaccumulation,  $B_{ivs}$  sont des rapports entre la concentration de radionucléide (contaminant) dans l'organisme et la concentration de contaminant dans un milieu ambiant résultant de l'absorption du contaminant par une ou plusieurs voies d'exposition [1]. Ils mesurent la concentration d'une substance dans un organisme vivant relativement à sa concentration dans le milieu ambiant. Les facteurs de bioaccumulation sont utilisés dans l'approche graduelle pour fournir des estimations de la concentration dans les tissus des organismes et, en fin de compte, pour dériver le BCG correspondant à chaque radionucléide, milieu et type d'organisme.

#### d. Biota Concentration Guide (BCG)

Le BCG est l'activité massique ou volumique maximale du radionucléide dans le sol, l'eau ou le sédiment qui ne conduit pas au dépassement de la dose assurant la protection des populations d'organismes aquatiques ou terrestres. Dans le code RESRAD BIOTA, les BCGs sont déterminées pour l'ensemble des combinaisons (radionucléides, milieux) d'intérêt pour les quatre organismes de référence considérés par cette méthode (23 radionucléides relativement courants dans les rejets antérieurs de radionucléides dans l'eau, le sédiment et le sol pour des organismes du type animal aquatique, animal rivulaire, plante et animal terrestres).

Ainsi les BCG évalués dans RESRAD BIOTA sont automatiquement calculés et ont été programmés dans le logiciel suivant les paramètres spécifiques à une catégorie écologique bien définie. Nous utiliserons dans le présent travail les valeurs des BCG plante terrestre et animal terrestre. Le terme BCG générique est donné par les expressions suivantes [34].

$$BCG_{sol,plante\ terrestre,i} = \frac{365.25 \times DL_{tp}}{CF_{ta} \times [(B_{iv,tp,i} \times DF_{int,i}) + DCF_{ext,sol,i}]} \quad (2.1)$$

$BCG_{sol,plante\ terrestre,i}$  : est la concentration de nucléide  $i$  dans le sol qui, sur la base des hypothèses du niveau de dépistage, équivaut numériquement à un débit de dose de  $DL_{tp}$  ( $0,01\text{Gy d}^{-1}$ ) pour la plante terrestre

$DL_{tp}$  : est la limite de dose recommandée pour les plantes terrestres

$CF_{ta}$  : (sans dimension) est le facteur de correction pour la surface ou le temps. Ce facteur de correction est fixé par défaut à 1

$B_{iv,tp,i}$  : (Sans dimension) est le facteur de concentration de la masse fraîche des plantes terrestres par rapport au sol

$DCF_{ext,sol,i}$  : est le facteur de conversion de dose utilisé pour estimer le débit de dose aux tissus de la plante à partir du nucléide  $i$  dans les sols environnants

$$BCG_{sol,animal\ terrestre,i} = \frac{365.25 \times DL_{ta}}{CF_{ta} \times [(B_{iv,ta,i} \times DF_{int,i}) + DCF_{ext,sol,i}]} \quad (2.2)$$

$BCG_{sol,animal\ terrestre,i}$  : est la concentration de nucléide  $i$  dans le sol qui, sur la base des hypothèses du niveau de dépistage, équivaut numériquement à un débit de dose de  $DL_{ta}$  (0,001 Gy/j) pour l'animal terrestre

$DL_{ta}$  : (0,001 Gy/j) est la limite de dose recommandée pour les animaux terrestres

$B_{iv,ta,i}$  : (sans dimension) est le facteur de concentration du nucléide  $I$  dans la masse fraîche des animaux terrestres par rapport au sol

$CF_{ta}$  : (sans dimension) est le facteur de correction pour la surface ou le temps de séjour de l'organisme terrestre. Ce facteur de correction est fixé à 1 pour la phase d'examen préalable général des calculs ;

Lorsque plusieurs radionucléides sont présents dans plusieurs milieux environnementaux, la règle de la somme des fractions doit être appliquée pour tenir compte de toutes les sources d'exposition. Par conséquent, la somme des rapports entre la concentration mesurée de chaque radionucléide et son BCG correspondant pour chaque milieu est ensuite additionnée pour tous les milieux, et la somme totale des fractions (RATIOS) ne doit pas dépasser 1,0 [33].

$$\left[ \frac{C_A}{BCG_A} + \frac{C_B}{BCG_B} + \dots + \frac{C_N}{BCG_N} \right]_{eau} + \left[ \frac{C_A}{BCG_A} + \frac{C_B}{BCG_B} + \dots + \frac{C_N}{BCG_N} \right]_{sol} < 1 \quad (2.3)$$

## Conclusion

Dans ce chapitre, il a été question de décrire la méthode d'évaluations de risques radiologique pour la faune et la flore sauvages, ainsi que le code utilisé pour caractériser le risque radiologique dans le sol et les aliments.

---

---

# CHAPITRE 3 : RÉSULTATS ET DISCUSSION

---

## Introduction

Le chapitre 3 présente les résultats des BCG, les indices de risque et les débits de doses calculés à partir des données de concentrations des radionucléides dans les échantillons du sol et les aliments des sites de NGOMBAS, AWANDA et de BIKOUÉ en utilisant le code RESRAD-BIOTA comme présenté au chapitre précédent. Enfin les propositions en vue de la protection des valeurs écologique sont faites en se basant sur les recommandations des organisations internationales de radioprotection.

## 1. ÉVALUATION RESRAD-BIOTA

L'analyse complète pour une étude peu approfondie en radioprotection environnemental a nécessité la prise en compte dans l'évaluation, des données de concentrations, maximales et moyennes dans chacune des étapes du RESRAD-BIOTA. Les paramètres spécifiques du site, dépendance temporelle et de l'étendue spatiale de la contamination  $K_b$ ,  $B_{iv}$ ... peuvent également être utilisés en cas de nécessité à la place des valeurs par défaut pour plus de réalisme.

## 2. RESRAD-BIOTA niveau 1

Au premier niveau, l'approche est dite conservative. Les organismes génériques sont considérés exposés de façon maximale, destinée à conférer un haut niveau de confiance dans les résultats. Les organismes de référence (animaux et plantes) et d'autres paramètres de l'outil ont été définis par défaut pour écosystème terrestre. L'utilisation de code RESRAD-BIOTA donne libre choix de la valeur repère. Au niveau 1 de l'évaluation, il est décidé de retenir le paramétrage par défaut de cet outil, et donc d'utiliser comme valeur repère  $1 \times 10^{-3}$  Gy/j pour les animaux terrestre et  $1 \times 10^{-2}$  Gy/j pour les plantes terrestres. Ces valeurs représentent les valeurs limites recommandées par le DOE pour l'animal et la plante terrestre respectivement.

**Tableau 3.1:** Guides de concentration dans le biote (BCG) et les facteurs de rapport de somme

Localisées	Paramètre de risque	Radionucléides	Animal Terrestre	Plante Terrestre
NGOMBAS	Biota	$^{226}\text{Ra}$	$1.87 \times 10^3$	$1.06 \times 10^4$
	Concentration Guide (BCG) (Bq $\text{kg}^{-1}$ )	$^{232}\text{Th}$	$5.57 \times 10^4$	$8.68 \times 10^5$
		$^{40}\text{K}$	$4.40 \times 10^3$	$5.11 \times 10^4$
	Sum ratio factor		$9.63 \times 10^{-1}$	$1.50 \times 10^{-1}$
AWANDA	Biota	$^{226}\text{Ra}$	$1.87 \times 10^3$	$1.06 \times 10^4$
	Concentration Guide (BCG) (Bq $\text{kg}^{-1}$ )	$^{232}\text{Th}$	$5.57 \times 10^4$	$8.68 \times 10^5$
		$^{40}\text{K}$	$4.40 \times 10^3$	$5.11 \times 10^4$
	Sum ratio factor		$9.63 \times 10^{-1}$	$1.50 \times 10^{-1}$
BIKOUÉ	Biota	$^{226}\text{Ra}$	$1.87 \times 10^3$	$1.06 \times 10^6$
	Concentration Guide (BCG) (Bq $\text{kg}^{-1}$ )	$^{232}\text{Th}$	$5.57 \times 10^4$	$8.68 \times 10^5$
		$^{40}\text{K}$	$4.40 \times 10^3$	$5.11 \times 10^4$
	Sum ratio factor		1.16	$1.60 \times 10^{-1}$

## 2.1. NGOMBAS

Les calculs effectués à l'aide du code RESRAD-BIOTA pour la localité de NGOMBAS ont révélé que les niveaux de BCG des radionucléides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$  sont respectivement de  $1.87 \times 10^3$  Bq/kg,  $1.62 \times 10^3$  Bq/kg,  $5.57 \times 10^4$  Bq/kg,  $1.90 \times 10^5$  Bq/kg et  $5.84 \times 10^4$  Bq/kg pour les animaux terrestres et de  $1.06 \times 10^4$  Bq/kg,  $9.08 \times 10^3$  Bq/kg,  $8.68 \times 10^5$  Bq/kg,  $1.91 \times 10^6$  Bq/kg et  $5.82 \times 10^5$  Bq/kg pour les plantes terrestres. Ces concentrations sont supérieures aux valeurs de BCG recommandées par le DOE, qui sont  $5 \times 10^1$  Bq/kg pour le  $^{226}\text{Ra}$ ,  $4 \times 10^1$  Bq/kg pour le  $^{228}\text{Ra}$ ,  $2 \times 10^3$  Bq/kg pour le  $^{232}\text{Th}$ ,  $2 \times 10^3$  Bq/kg pour le  $^{238}\text{U}$  et  $5 \times 10^3$  Bq/kg pour le  $^{235}\text{U}$  [5]. Ces guides de concentration du biote (BCG) représentent la concentration critique de radionucléides dans le sol à laquelle les critères de niveau de dose pour la protection du biote terrestre ne seraient dépassés [33].

Une autre observation du tableau (3.1) montre que les valeurs de l'indice de risque (SRF) sont de  $9.63 \times 10^{-1}$  pour les animaux terrestres et de  $1.50 \times 10^{-1}$  pour les plantes terrestres. L'indice de risque pour l'organisme plante terrestre répond à l'exigence du DOE selon laquelle ce facteur doit être inférieure à un ( $<1$ ) [33]. Par contre l'indice de risque des animaux terrestres est voisin à l'unité (1), la valeur repère en dessus de laquelle le risque d'apparition des conséquences écologiques négatives pour les animaux

n'est négligeable. L'analyse des résultats pour la localité de NGAMBAS montre que les animaux terrestres sont significativement plus exposés.

## 2.2. AWANDA

Les BCGs des radionucléides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  et celle du  $^{238}\text{U}$  calculés dans la localité d'AWANDA étaient respectivement  $1.87 \times 10^{03}$  Bq/kg,  $1.62 \times 10^{03}$  Bq/kg,  $5.57 \times 10^{04}$  Bq/kg,  $1.90 \times 10^{05}$  Bq/kg et  $5.84 \times 10^{04}$  Bq/kg pour les animaux terrestres et respectivement  $1.06 \times 10^{04}$  Bq/kg,  $9.08 \times 10^{03}$  Bq/kg,  $8.69 \times 10^{05}$  Bq/kg,  $1.91 \times 10^{06}$  Bq/kg et  $5.82 \times 10^{05}$  Bq/kg pour les plantes terrestres. Ces concentrations sont supérieures aux limites recommandées de la ligne directrice sur les BCGs dans le biote du DOE [5].

Les indices de risque évalués sont respectivement  $6.96 \times 10^{-01}$  et  $9.90 \times 10^{-02}$  pour les animaux terrestres et les plantes terrestres. Ces indices de risque sont inférieurs à 1 tel que recommandé par le DOE. Le risque est par conséquent négligeable pour l'écosystème terrestre d'AWANDA. Une analyse plus poussée n'est pas davantage au regard de la valeur de l'indices de risque.

## 2.3. BIKOUÉ

Les niveaux des BCGs évalués à BIKOUÉ pour les radionucléides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$  s'étaient respectivement  $1.87 \times 10^{03}$  Bq/kg,  $1.62 \times 10^{03}$  Bq/kg,  $5.57 \times 10^{04}$  Bq/kg et  $5.84 \times 10^{04}$  Bq/kg pour les animaux terrestres et respectivement  $1.06 \times 10^{06}$  Bq/kg,  $9.08 \times 10^{03}$  Bq/kg,  $8.68 \times 10^{05}$  Bq/kg,  $1.02 \times 10^{06}$  Bq/kg et  $5.82 \times 10^{06}$  Bq/kg pour les plantes terrestres. Ces concentrations ne répondent pas aux exigences du DOE, car ces concentrations sont toute supérieures aux valeurs de BCG recommandées.

L'évaluation de l'indice de risque montre que les valeurs du facteur de rapport de somme (SRF) sont de 1.16 pour les animaux terrestres et de  $1.60 \times 10^{-01}$  pour les plantes terrestres. L'indice de risque évaluée pour l'organisme plante terrestre répond à l'exigence du DOE selon laquelle ce facteur doit être inférieure à un (<1). Par contre le SRF des animaux terrestres est supérieur à un (>1), la valeur repère considérée comme "sans effet" pour l'écosystème, Le risque d'apparition des conséquences écologiques négatives pour les animaux n'est donc pas négligeable. L'analyse des résultats, pour la localité de Bikoué étudié, montre que les animaux terrestres sont significativement plus exposés que les plantes.

## 2.4. Récapitulatif RBn1

En somme, les résultats obtenues au RESRAD-BIOTA niveau 1 pour le scénario des différentes localités étudiées, révèlent que les niveaux de BCG des radionucléides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  et  $^{238}\text{U}$  sont supérieurs aux BCG recommandés par le DOE [5]. Ces niveaux pourraient s'expliquer par la présence des minéraux lourds radioactifs d'uranium tels que la coffinite, l'uraninite et le zircon dans le

sol de la zone d'étude. En effet, la plupart des échantillons de sol ont été prélevés dans les zones identifiées comme présentant des anomalies d'uranium par le BRGM [5]. L'indice de risque (SRF) pour l'écosystème terrestre d'AWANDA est inférieur à 1, ce qui respecte les critères du DOE. Ainsi, une évaluation de niveau 2 n'est donc pas nécessaire pour cette localité. L'indice de risque de NGONBAS et de Bikoué indique des risques significatifs non négligeables pour les animaux car le critère  $SRF < 1$  n'a pas été respecté. Il est donc nécessaire de conduire une évaluation de niveau 2 pour introduire plus de réalisme dans l'approche appliquée.

### 3. RESRAD BIOTA niveau 2

Les résultats de l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages de niveau 1 ont révélé un risque non négligeable pour les organismes récepteurs. Une évaluation de niveau 2 s'impose donc à cet effet. L'évaluation du niveau 2 consiste à réduire le conservatisme. Les données d'entrées plus spécifiques que celles du niveau 1 ont été utilisées. Les valeurs maximales des concentrations sont remplacées par les valeurs moyennes, les  $b_{iv}$  et d'autres paramètres sont maintenus par défaut. Les BCG, les SRF et les débits de dose d'exposition sont calculés

#### 3.1. Guides de concentration dans le biote (BCG) et les facteurs de rapport de somme

Le tableau 3.2 présente les guides de concentration dans le biote (BCG), les facteurs de rapport de somme, les sommes des débits de dose externe, interne et totale des radionucléides étudiés dans les animaux et les plantes terrestres.

*Tableau 3.2 : Guide de concentration dans le biote (BCG) et facteur de rapport de somme*

Paramètre de risque	Radionucléides	Animal Terrestre	Plante Terrestre
<b>Biota Concentration Guide (BCG) (Bq kg<sup>-1</sup>)</b>	<sup>226</sup> Ra	$1.87 \times 10^3$	$2.37 \times 10^{-05}$
	<sup>232</sup> Th	$1.62 \times 10^3$	$5.53 \times 10^{-04}$
	<sup>40</sup> K	$4.4 \times 10^3$	$5.11 \times 10^4$
<b>Sum ratio factor</b>		$6.61 \times 10^{-01}$	$9.18 \times 10^{-02}$

Les calculs effectués pour le niveau 2 ont révélés que les niveaux de BCG des radionucléides <sup>226</sup>Ra, <sup>228</sup>Ra, <sup>232</sup>Th, <sup>234</sup>U et celle du <sup>238</sup>U sont respectivement  $1.87 \times 10^3$  Bq/kg,  $1.62 \times 10^3$  Bq/kg,  $5.57 \times 10^4$  Bq/kg,  $1.90 \times 10^5$  Bq/kg et  $5.94 \times 10^4$  Bq/kg pour les animaux terrestres et de  $1.06 \times 10^4$  Bq/kg,  $9.08 \times 10^3$

Bq/kg,  $6.68 \times 10^5$  Bq/kg,  $1.91 \times 10^6$  Bq/kg et  $5.82 \times 10^5$  Bq/kg pour les plantes terrestres. Ces concentrations sont supérieures aux valeurs de BCG préconisées par le DOE [28].

Les indices de risque évalués pour le niveau 2 RESRAD-BIOTA sont de  $6.61 \times 10^{-01}$  pour les animaux terrestres et de  $9.18 \times 10^{-02}$  pour les plantes terrestres, le critère  $SRF < 1$  a été respecté dans les deux cas [36]. Le risque radiologique est ainsi négligeable dans la zone d'étude.

### 3.2. Débits de dose externe, interne et totale des radionucléides étudiés dans les animaux et les plantes terrestres

Le tableau ci-dessous les sommes des débits de dose externe, interne et totale des radionucléides étudiés dans les animaux et les plantes terrestre.

*Tableau 3.3 : les sommes des débits de dose externe, interne et totale des radionucléides étudiés dans les animaux et les plantes terrestres*

Orgasmes de référence	Dose Externe Gy/j	Dose Interne Gy/j	Dose Totale Gy/j
Animaux Terrestre	$4.59 \times 10^{-05}$	$6.16 \times 10^{-04}$	$6.62 \times 10^{-04}$
Plante Terrestre	$4.59 \times 10^{-05}$	$8.74 \times 10^{-04}$	$9.20 \times 10^{-04}$

Le tableau 3-3 et les résultats (voir Annexe tableau B-5 et B-6) montrent les débits de dose externe et interne ainsi que la dose totale des radionucléides auxquels les animaux et les plantes terrestres ont été exposés. Il en ressort que le débit de dose interne et externe dû à tous les radionucléides dans le sol était respectivement de  $4.59 \times 10^{-05}$  Gy/j et  $6.16 \times 10^{-04}$  Gy/j pour les animaux terrestres et respectivement  $4.59 \times 10^{-05}$  Gy/j et  $8.74 \times 10^{-04}$  Gy/j pour les plantes terrestres. Ainsi, il apparaît que le  $^{40}\text{K}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  et  $^{228}\text{Ra}$  sont les principaux contributeurs aux débits de dose.

La valeur du débit de dose totale due à l'exposition de tous les radionucléides dans le sol est de  $0.66 \times 10^{-03}$  Gy/j pour les animaux terrestres et de  $0.92 \times 10^{-03}$  Gy/j pour les plantes terrestres. Les plantes terrestres paraissent plus exposées que les animaux terrestres. Ces valeurs sont inférieures aux valeurs limite recommandée par le DOE qui n'entraînerait pas de risque. Il est recommandé d'utiliser 1 mGy/j pour les animaux terrestres et 10 mGy/j pour les plantes terrestres [37]. Le risque de contamination radiologique peut ainsi être négligé, et une évaluation plus poussée n'est donc pas nécessaire dans ce cas.

### 3.3. Comparaison avec d'autres études

Une étude similaire des animaux terrestres menée à Poli dans le Nord par MAGNI a montré que les débits de dose externe et interne des radionucléides étudiés auxquels les animaux terrestres ont été exposés étaient respectivement de  $7.76 \times 10^{-05}$  Gy/j et  $1.02 \times 10^{-03}$  Gy/j avec un total  $1.09 \times 10^{-03}$  Gy/j. Ce niveau exposition est supérieur aux résultats obtenus dans cette étude. Cela pourrait être dû au fait que les concentrations de Poli ont été prélevé dans les galeries.

À Lomié dans la région de l'Est Cameroun, les travaux effectués par Gondji et al.[37] ont révélés que les débits de dose externe et interne des radionucléides étudiés auxquels les animaux et plantes terrestres ont été exposés sont toutes inférieure à celles obtenues dans ce travail. La différence observée entre ces mesures pourrait s'expliquer par le fait que les échantillons de sol analysés par Gondji et al.[38], ont été prélevés aux voisinages des habitations et des milieux fréquentés en permanence par le public. Tandis que pour la présente étude, La cible était le voisinage des points où les anomalies d'uranium et de thorium ont été révélées par le BRGM.

### 3.4. Récapitulatif RBn2

Le risque radiologique estimé par la mise en œuvre d'une évaluation de niveau 2 révèle un risque négligeable pour les animaux terrestre et les plantes terrestres. Malgré cela dans le but d'évaluer l'impact environnemental de l'exploitation de la zone minière, une évaluation de niveau 3 (RBn3) ayant pour but d'obtenir les doses internes, externe et dans les tissus des denrées alimentaire a été faite.

## 4. RESRAD-BIOTA niveau 3

Pour une évaluation plus approfondie du risque radiologique pour les plantes terrestres et afin de s'assurer que la sécurité alimentaire n'est pas compromise dans la localité du Sud-ouest, cinq (05) organismes ont été sélectionnés à savoir l'Arachide, la Banane plantain, la Feuille de manioc, la Racine de manioc et le Macabo. En absence des données afférentes aux cinq organismes dans la base RESRAD-BIOTA, ces organismes ont été conçus grâce à la fenêtre « new organism » dans RESRAD-BIOTA du niveau 3. Le tableau 3-4 présente les paramètres utilisés pour ces organismes : les masses (kg), les géométries (longueur x, hauteur y, largeur z), les facteurs géométriques (GF) et les facteurs de surface (AF) pour les cinq organismes sélectionnés représentatifs de la zone d'étude. Deux méthodes ont été utilisées pour analyse les débits de dose. Le tableau 3-5 présente les débits de dose externe, interne ainsi que la moyenne évaluée à partir des concentrations moyennes d'activité (Bq/kg) de  $^{238}\text{U}$  et  $^{232}\text{Th}$ . Le tableau 3-6 présente le débit de dose dans les tissus évalué à partir des concentrations moyennes des plantes de référence des différentes localités.

**Tableau 3.4 :** Organismes et paramètres (dimension, masse, facteur de surface, facteur de géométrie) utilisés pour l'évaluation du débit de dose

Organisme	Géométrie					AF	GF
	N	Dimension (cm)			Masse (Kg)		
		X	Y	Z			
Arachide	2	2.5	1.2	0.62	0.036	1	1
Banane plantain	7	270	66	48	100	0.5	1
Feuille de manioc	1	0.2	0.2	0.2	0.0001	0.5	1
Racine de manioc	3	2.5	1.2	0.62	5	1	1
Macabo	3	2.5	1.2	0.62	2	1	1

#### 4.1. Débit de doses interne, externe et total dans les organismes étudiés, évalués à partir des concentrations des radionucléides ( $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ ) dans le sol

**Tableau 3.5 :** Débit de doses internes, externes et totaux dans les organismes représentatifs des localités RBn3

Village	Organisme	Données	Dose Externe			Dose Interne			DOSE TOTAL
			$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Total	$^{232}\text{Th}$	$^{238}\text{U}$	Total	
NGOMBAS	Arachide	Max	$7.20 \times 10^{-09}$	$7.69 \times 10^{-07}$	$7.76 \times 10^{-07}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$8.69 \times 10^{-06}$	$9.46 \times 10^{-06}$
		Min	$1.65 \times 10^{-09}$	$2.01 \times 10^{-07}$	$2.03 \times 10^{-07}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.69 \times 10^{-07}$	$2.03 \times 10^{-06}$	$2.23 \times 10^{-06}$
		Moy	$1.44 \times 10^{-09}$	$4.95 \times 10^{-07}$	$5.00 \times 10^{-07}$	$4.89 \times 10^{-06}$	$7.44 \times 10^{-07}$	$5.63 \times 10^{-06}$	$6.13 \times 10^{-06}$
	Banane plantain	Max	$3.28 \times 10^{-10}$	$2.51 \times 10^{-08}$	$2.54 \times 10^{-08}$	$7.67 \times 10^{-06}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$8.70 \times 10^{-06}$	$8.72 \times 10^{-06}$
		Min	$7.53 \times 10^{-11}$	$5.57 \times 10^{-09}$	$5.65 \times 10^{-09}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.70 \times 10^{-07}$	$2.03 \times 10^{-06}$	$2.04 \times 10^{-06}$
		Moy	$2.09 \times 10^{-10}$	$1.54 \times 10^{-08}$	$1.56 \times 10^{-08}$	$4.89 \times 10^{-06}$	$7.45 \times 10^{-07}$	$5.64 \times 10^{-06}$	$5.65 \times 10^{-06}$
	Feuille de manioc	Max	$6.26 \times 10^{-09}$	$1.31 \times 10^{-06}$	$1.32 \times 10^{-06}$	$7.65 \times 10^{-06}$	$1.20 \times 10^{-06}$	$8.68 \times 10^{-06}$	$9.80 \times 10^{-06}$
		Min	$1.44 \times 10^{-09}$	$2.90 \times 10^{-07}$	$2.91 \times 10^{-07}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.67 \times 10^{-07}$	$2.03 \times 10^{-06}$	$2.32 \times 10^{-06}$
		Moy	$3.99 \times 10^{-09}$	$8.03 \times 10^{-07}$	$8.07 \times 10^{-07}$	$4.88 \times 10^{-06}$	$7.39 \times 10^{-07}$	$5.62 \times 10^{-06}$	$6.43 \times 10^{-06}$
	Racine de manioc	Max	$4.55 \times 10^{-09}$	$4.19 \times 10^{-07}$	$4.23 \times 10^{-07}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$8.69 \times 10^{-06}$	$9.05 \times 10^{-06}$
		Min	$1.04 \times 10^{-09}$	$9.31 \times 10^{-08}$	$9.41 \times 10^{-08}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.69 \times 10^{-07}$	$2.03 \times 10^{-06}$	$2.12 \times 10^{-06}$
		Moy	$2.90 \times 10^{-09}$	$2.58 \times 10^{-07}$	$2.61 \times 10^{-07}$	$4.89 \times 10^{-06}$	$7.44 \times 10^{-07}$	$5.63 \times 10^{-06}$	$5.89 \times 10^{-06}$
	Macabo	Max	$4.55 \times 10^{-09}$	$4.19 \times 10^{-07}$	$4.23 \times 10^{-07}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$8.69 \times 10^{-06}$	$9.05 \times 10^{-06}$
		Min	$1.04 \times 10^{-09}$	$9.31 \times 10^{-08}$	$9.41 \times 10^{-08}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.69 \times 10^{-07}$	$2.03 \times 10^{-06}$	$2.12 \times 10^{-06}$
		Moy	$2.79 \times 10^{-09}$	$2.58 \times 10^{-07}$	$2.60 \times 10^{-07}$	$4.70 \times 10^{-06}$	$7.44 \times 10^{-07}$	$5.44 \times 10^{-06}$	$5.70 \times 10^{-06}$
AWANDA	Arachide	Max	$4.18 \times 10^{-09}$	$5.35 \times 10^{-07}$	$5.38 \times 10^{-07}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$7.17 \times 10^{-07}$	$5.83 \times 10^{-06}$	$6.10 \times 10^{-06}$
		Min	$1.81 \times 10^{-09}$	$2.68 \times 10^{-07}$	$2.70 \times 10^{-07}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$3.38 \times 10^{-07}$	$3.02 \times 10^{-06}$	$3.42 \times 10^{-06}$
		Moy	$3.03 \times 10^{-09}$	$3.61 \times 10^{-07}$	$3.64 \times 10^{-07}$	$3.93 \times 10^{-06}$	$4.80 \times 10^{-07}$	$4.41 \times 10^{-06}$	$4.78 \times 10^{-06}$
	Banane plantain	Max	$1.81 \times 10^{-09}$	$1.49 \times 10^{-08}$	$1.51 \times 10^{-08}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$7.19 \times 10^{-07}$	$5.94 \times 10^{-06}$	$5.95 \times 10^{-06}$
		Min	$1.06 \times 10^{-10}$	$1.49 \times 10^{-09}$	$1.96 \times 10^{-09}$	$2.49 \times 10^{-06}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.03 \times 10^{-06}$	$3.04 \times 10^{-06}$
		Moy	$5.46 \times 10^{-10}$	$8.84 \times 10^{-09}$	$9.39 \times 10^{-09}$	$4.31 \times 10^{-06}$	$4.85 \times 10^{-07}$	$4.80 \times 10^{-06}$	$4.81 \times 10^{-06}$
	Feuille de manioc	Max	$8.96 \times 10^{-09}$	$7.74 \times 10^{-07}$	$7.83 \times 10^{-07}$	$5.48 \times 10^{-06}$	$7.13 \times 10^{-07}$	$5.84 \times 10^{-06}$	$6.62 \times 10^{-06}$
		Min	$2.03 \times 10^{-09}$	$3.87 \times 10^{-07}$	$3.91 \times 10^{-07}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$3.02 \times 10^{-06}$	$3.60 \times 10^{-06}$
		Moy	$4.11 \times 10^{-09}$	$6.00 \times 10^{-07}$	$6.04 \times 10^{-07}$	$3.93 \times 10^{-06}$	$4.82 \times 10^{-07}$	$4.41 \times 10^{-06}$	$5.02 \times 10^{-06}$

BIKOUÉ	Racine de manioc	Max	$3.25 \times 10^{-09}$	$2.48 \times 10^{-07}$	$2.50 \times 10^{-07}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$7.18 \times 10^{-07}$	$5.85 \times 10^{-06}$	$5.98 \times 10^{-06}$
		Min	$1.47 \times 10^{-09}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$1.26 \times 10^{-07}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.02 \times 10^{-06}$	$3.21 \times 10^{-06}$
		Moy	$2.33 \times 10^{-09}$	$1.67 \times 10^{-07}$	$1.70 \times 10^{-07}$	$3.93 \times 10^{-06}$	$4.85 \times 10^{-07}$	$4.42 \times 10^{-06}$	$4.59 \times 10^{-06}$
	Macabo	Max	$2.64 \times 10^{-09}$	$2.48 \times 10^{-07}$	$2.50 \times 10^{-07}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$7.18 \times 10^{-07}$	$4.90 \times 10^{-06}$	$5.06 \times 10^{-06}$
		Min	$1.47 \times 10^{-09}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$1.27 \times 10^{-07}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.02 \times 10^{-06}$	$3.21 \times 10^{-06}$
		Moy	$2.31 \times 10^{-09}$	$1.67 \times 10^{-07}$	$1.70 \times 10^{-07}$	$3.89 \times 10^{-06}$	$4.85 \times 10^{-07}$	$4.37 \times 10^{-06}$	$4.54 \times 10^{-06}$
	Arachide	Max	$6.81 \times 10^{-09}$	$6.36 \times 10^{-07}$	$6.38 \times 10^{-07}$	$7.24 \times 10^{-06}$	$8.51 \times 10^{-07}$	$7.73 \times 10^{-06}$	$8.11 \times 10^{-06}$
		Min	$9.73 \times 10^{-10}$	$2.68 \times 10^{-07}$	$2.69 \times 10^{-07}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$3.58 \times 10^{-07}$	$1.39 \times 10^{-06}$	$1.66 \times 10^{-06}$
		Moy	$3.13 \times 10^{-09}$	$3.82 \times 10^{-07}$	$3.85 \times 10^{-07}$	$3.33 \times 10^{-06}$	$5.11 \times 10^{-07}$	$3.84 \times 10^{-06}$	$4.23 \times 10^{-06}$
	Banane plantain	Max	$3.10 \times 10^{-10}$	$1.76 \times 10^{-08}$	$1.77 \times 10^{-08}$	$7.26 \times 10^{-06}$	$8.54 \times 10^{-07}$	$7.75 \times 10^{-06}$	$7.76 \times 10^{-06}$
		Min	$8.42 \times 10^{-11}$	$7.43 \times 10^{-09}$	$7.51 \times 10^{-09}$	$1.04 \times 10^{-08}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.69 \times 10^{-07}$	$3.84 \times 10^{-07}$
		Moy	$1.51 \times 10^{-10}$	$1.21 \times 10^{-08}$	$1.22 \times 10^{-08}$	$3.13 \times 10^{-06}$	$5.12 \times 10^{-07}$	$3.64 \times 10^{-06}$	$3.66 \times 10^{-06}$
	Feuille de manioc	Max	$5.92 \times 10^{-09}$	$9.19 \times 10^{-07}$	$9.21 \times 10^{-07}$	$4.03 \times 10^{-06}$	$8.47 \times 10^{-07}$	$4.52 \times 10^{-06}$	$5.06 \times 10^{-06}$
		Min	$1.61 \times 10^{-09}$	$3.87 \times 10^{-07}$	$3.89 \times 10^{-07}$	$4.90 \times 10^{-07}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$9.80 \times 10^{-07}$	$1.52 \times 10^{-06}$
		Moy	$2.89 \times 10^{-09}$	$6.29 \times 10^{-07}$	$6.32 \times 10^{-07}$	$1.98 \times 10^{-06}$	$5.08 \times 10^{-07}$	$2.49 \times 10^{-06}$	$3.12 \times 10^{-06}$
	Racine de manioc	Max	$4.29 \times 10^{-09}$	$2.95 \times 10^{-07}$	$2.96 \times 10^{-07}$	$7.25 \times 10^{-06}$	$8.53 \times 10^{-07}$	$7.74 \times 10^{-06}$	$7.92 \times 10^{-06}$
		Min	$6.13 \times 10^{-10}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$1.25 \times 10^{-07}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$1.40 \times 10^{-06}$	$1.53 \times 10^{-06}$
		Moy	$1.97 \times 10^{-09}$	$1.78 \times 10^{-07}$	$1.80 \times 10^{-07}$	$3.34 \times 10^{-06}$	$5.12 \times 10^{-07}$	$3.85 \times 10^{-06}$	$4.03 \times 10^{-06}$
	Macabo	Max	$4.29 \times 10^{-09}$	$2.95 \times 10^{-07}$	$2.96 \times 10^{-07}$	$7.25 \times 10^{-06}$	$8.53 \times 10^{-07}$	$7.74 \times 10^{-06}$	$7.92 \times 10^{-06}$
		Min	$6.13 \times 10^{-10}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$1.25 \times 10^{-07}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$1.40 \times 10^{-06}$	$1.53 \times 10^{-06}$
		Moy	$1.97 \times 10^{-09}$	$1.78 \times 10^{-07}$	$1.80 \times 10^{-07}$	$3.34 \times 10^{-06}$	$5.12 \times 10^{-07}$	$3.85 \times 10^{-06}$	$4.03 \times 10^{-06}$

Le tableau 3.5 présente les débits de dose externe et interne ainsi que le débit de dose totale dans les 5 organismes étudiés, évalués à partir des concentrations des radionucléides ( $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$ ) dans le sol.

## 4.2. Caractérisations des risques à NGOMBAS

### a. Arachide

Le débit de dose total externe et interne due à l'exposition au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  pour l'organisme représentatif arachide variait de  $2.03 \times 10^{-07}$  à  $7.76 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $5.00 \times 10^{-07}$  pour la voie externe, et de  $2.03 \times 10^{-06}$  à  $8.69 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $5.63 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à l'exposition du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  variait de  $2.23 \times 10^{-06}$  à  $9.46 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne  $6.13 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose obtenues sont inférieures à la valeur limite de dose de 0,01 Gy/j, valeur recommandée par le DOE. Ces résultats indiquent que les débits de dose sont négligeables, par conséquent ne constituer pas un risque pour les populations.

### b. Banane plantain

Le niveau d'exposition due au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  pour l'organisme « banane plantain » a révélé que le débit de dose externe variait de  $5.65 \times 10^{-09}$  à  $2.54 \times 10^{-08}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $1.56 \times 10^{-08}$  Gy/j et le débit de dose interne variait de  $2.03 \times 10^{-06}$  à  $8.70 \times 10^{-08}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $5.64 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le débit de dose totale variait de  $2.04 \times 10^{-06}$  à  $8.72 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne  $5.65 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la valeur limite de 0.01 Gy/j pour la plante donnée par le DOE.

### c. Feuille de manioc

Le débit de dose due au  $^{232}\text{Th}$  et à l' $^{238}\text{U}$  pour l'organisme « Feuille de manioc » a révélé que le débit de dose externe variait de  $2.91 \times 10^{-07}$  à  $1.32 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $8.07 \times 10^{-07}$  Gy/j et le débit de dose interne variait  $2.03 \times 10^{-06}$  à  $8.68 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $5.62 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le débit de dose total (externe et interne) dû à l'exposition du  $^{232}\text{Th}$  et l' $^{238}\text{U}$  variait  $2.32 \times 10^{-06}$  à  $9.80 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $6.43 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le critère de dose du DOE selon lequel la dose doit être inférieure à 0.01 Gy/j a été respecté.

### d. Racine de manioc

En ce qui concerne la racine de manioc le débit de dose total dû à l'exposition du  $^{232}\text{Th}$  et de l' $^{238}\text{U}$  variait de  $9.41 \times 10^{-08}$  à  $4.23 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $2.61 \times 10^{-07}$  pour la voie externe et de  $2.03 \times 10^{-06}$  à  $8.69 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $5.63 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à au  $^{232}\text{Th}$  et à l' $^{238}\text{U}$  variait de  $2.12 \times 10^{-06}$  à  $9.05 \times 10^{-06}$  Gy/j, avec une valeur moyenne de  $5.89 \times 10^{-06}$  Gy/j. Ces résultats indiquent que les débits de dose sont négligeables. Par conséquent, ils ne constituent pas une menace pour les populations

### e. Macabo

Le niveau d'exposition due au  $^{232}\text{Th}$  et à l' $^{238}\text{U}$  pour l'organisme « Macabo » a révélé que le débit de dose variait de  $9.41 \times 10^{-08}$  à  $4.23 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $2.60 \times 10^{-07}$  pour la voie externe et de  $2.03 \times 10^{-06}$  à  $8.69 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $5.44 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à au  $^{232}\text{Th}$  et à l' $^{238}\text{U}$  variait  $2.12 \times 10^{-06}$  à  $9.05 \times 10^{-06}$  Gy/j, avec une valeur moyenne de  $5.70 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le critère de dose du DOE a été respecté.

## 4.3. Caractérisations des risques à AWANDA

### a. Arachide

Les débits de dose total externe et interne dû au  $^{232}\text{Th}$  et à l' $^{238}\text{U}$  pour l'organisme représentatif arachide variait de  $2.70 \times 10^{-07}$  à  $5.38 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $3.64 \times 10^{-07}$  Gy/j pour la voie externe et de  $3.02 \times 10^{-06}$  à  $5.83 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $4.41 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à au  $^{232}\text{Th}$  et à l' $^{238}\text{U}$  variait  $3.42 \times 10^{-06}$  à  $6.10 \times 10^{-06}$  à Gy/j avec une moyenne  $4.78 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la limite de dose recommandée DOE des États-Unis, qui est de 0,01 Gy/j pour les plantes [33]. Ces résultats indiquent que les débits de dose ne peuvent pas constituer une menace pour les populations.

### **b. Banane plantain**

Le niveau d'exposition due au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  pour l'organisme « banane plantain » a révélé que le débit de dose variait de  $1.96 \times 10^{-09}$  à  $1.51 \times 10^{-08}$  Gy/j avec une moyenne de  $9.39 \times 10^{-09}$  pour la voie externe et variait de  $3.03 \times 10^{-06}$  à  $5.94 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $4.80 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Si l'on considère la dose externe et interne de tous les radionucléides, le débit de dose varie de  $3.04 \times 10^{-06}$  à  $5.95 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne  $4.81 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la limite de dose recommandée pour les plantes.

### **c. Feuille de manioc**

Le débit de dose due au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  pour l'organisme « Feuille de manioc » a révélé que le débit de dose externe variait de  $9.91 \times 10^{-07}$  à  $7.83 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $6.04 \times 10^{-07}$  Gy/j et de  $3.02 \times 10^{-06}$  à  $5.84 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $4.41 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait de  $3.60 \times 10^{-06}$  à  $6.62 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $5.02 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le critère de dose du DOE a été respecté.

### **d. Racine de manioc**

En ce qui concerne la racine de manioc le total du débit de dose externe et interne dû à l'exposition du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  variait de  $1.26 \times 10^{-07}$  à  $2.50 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $1.70 \times 10^{-07}$  pour la voie externe et de  $3.02 \times 10^{-06}$  à  $5.85 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $4.42 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait de  $3.21 \times 10^{-06}$  à  $5.98 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $4.59 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le critère de dose du DOE a été respecté.

### **e. Macabo**

Le niveau d'exposition due au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  pour l'organisme « Macabo » a révélé que le débit de dose externe variait de  $1.27 \times 10^{-07}$  à  $2.50 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $1.70 \times 10^{-07}$  pour la voie externe et de  $3.02 \times 10^{-06}$  à  $4.90 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $4.37 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait de  $5.06 \times 10^{-06}$  à  $3.21 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $4.54 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le critère de dose du DOE a été respecté.

## **4.4. Caractérisations des risques à BIKOUÉ**

### **a. Arachide**

Le débit de dose total externe et interne dû à l'exposition au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait de  $2.69 \times 10^{-07}$  à  $6.38 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $3.85 \times 10^{-07}$  Gy/j pour la voie externe et de  $1.38 \times 10^{-06}$  à  $7.73 \times 10^{-06}$  avec une moyenne de  $3.84 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à l'exposition au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait de  $1.66 \times 10^{-06}$  à  $8.11 \times 10^{-06}$  à Gy/j avec une valeur moyenne

$4.23 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la limite de dose recommandée par DOE, qui est de 0,01 Gy/j pour les plantes. Ces résultats indiquent que les débits de dose ne constituent pas une menace pour les populations.

### **b. Banane plantain**

Le niveau d'exposition due au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  a révélé que le débit de dose externe variait de  $7.51 \times 10^{-09}$  à  $1.77 \times 10^{-08}$  avec une moyenne de  $1.22 \times 10^{-08}$  Gy/j pour la voie externe et de  $3.69 \times 10^{-07}$  à  $7.75 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $3.64 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Si l'on considère la dose externe et interne de tous les radionucléides, le débit de dose variait de  $3.84 \times 10^{-07}$  à  $7.76 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne  $3.66 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la limite de dose recommandée par le DOE pour les plantes. Ces résultats indiquent que les débits de dose ne constituent pas une menace pour les populations.

### **c. Feuille de manioc**

Le débit de dose dû au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait de  $9.99 \times 10^{-07}$  à  $9.21 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $6.32 \times 10^{-07}$  pour la voie externe et de  $9.80 \times 10^{-07}$  à  $4.52 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $2.49 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû à l'exposition au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait de  $1.52 \times 10^{-06}$  à  $5.06 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une valeur moyenne de  $3.12 \times 10^{-06}$  Gy/j. Le critère de dose du DOE a été respecté.

### **d. Racine de manioc**

En ce qui concerne la racine de manioc le total du débit de dose externe et interne dû au  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  variait de  $1.25 \times 10^{-07}$  à  $2.96 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $1.80 \times 10^{-07}$  pour la voie externe et de  $1.40 \times 10^{-06}$  à  $7.74 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $3.85 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû au  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$  variait  $1.53 \times 10^{-06}$  à  $7.92 \times 10^{-06}$  Gy/j, avec une valeur moyenne de  $4.03 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la limite de dose recommandée par DOE, qui est de 0,01 Gy/j pour les plantes. Ces résultats indiquent que les débits de dose ne constituent pas une menace pour les populations.

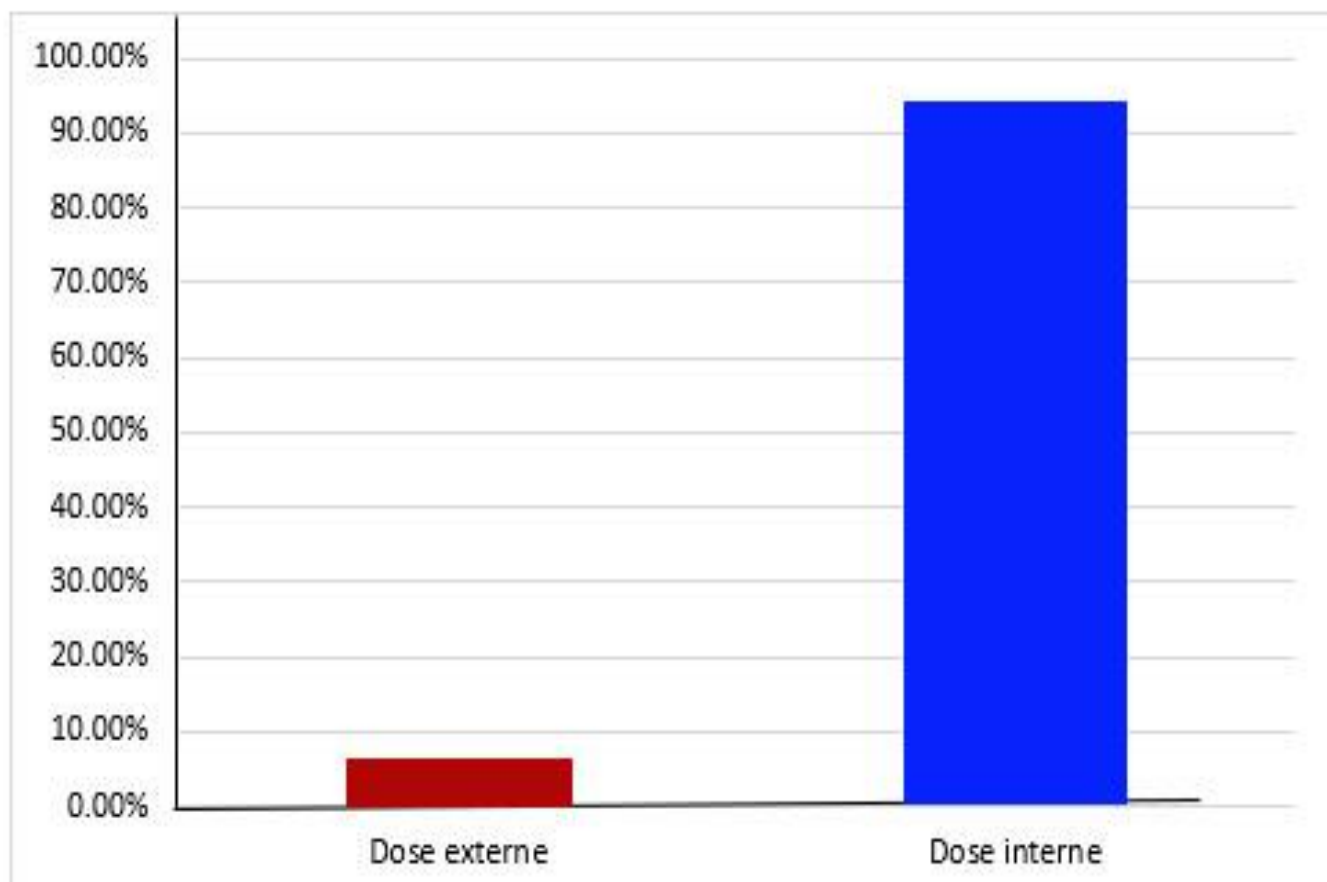
### **e. Macabo**

Le niveau d'exposition due au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  pour l'organisme « Macabo » a révélé que le débit de dose externe variait de  $1.25 \times 10^{-07}$  à  $2.96 \times 10^{-07}$  Gy/j avec une moyenne de  $1.80 \times 10^{-07}$  pour la voie externe et de  $1.40 \times 10^{-06}$  à  $7.74 \times 10^{-06}$  Gy/j avec une moyenne de  $3.85 \times 10^{-06}$  Gy/j pour la voie interne. Le débit de dose total (externe et interne) dû au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  variait  $1.53 \times 10^{-06}$  à  $7.92 \times 10^{-06}$  Gy/j, avec une valeur moyenne de  $4.03 \times 10^{-06}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la limite

de dose recommandée par DOE, qui est de 0,01 Gy/j pour les plantes [33]. Ces résultats indiquent que les débits de dose ne constituent pas une menace pour les populations.

#### 4.5. Relation entre les débits de dose totale

La figure 3.1 montre la contribution des voies d'exposition (externe et interne) à la dose totale. Les résultats obtenus dans cette étude ont montré que la voie externe contribue de 93.73 % à la voie totale, par conséquent elle est considérée comme la principale voie d'exposition.



**Figure 3.1** : Contribution des voies d'exposition à la dose totale.

#### 4.6. Contributions des radionucléides $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ aux débits de dose

La figure 3.2 montre les contributions des radionucléides ( $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$ ) à la dose pour chaque voie d'exposition. Il en ressort que, le  $^{232}\text{Th}$  est le principal contributeur à la dose interne avec une contribution de 87.23 %. Par contre pour l'exposition externe, l' $^{238}\text{U}$  a contribué 99.19 %.

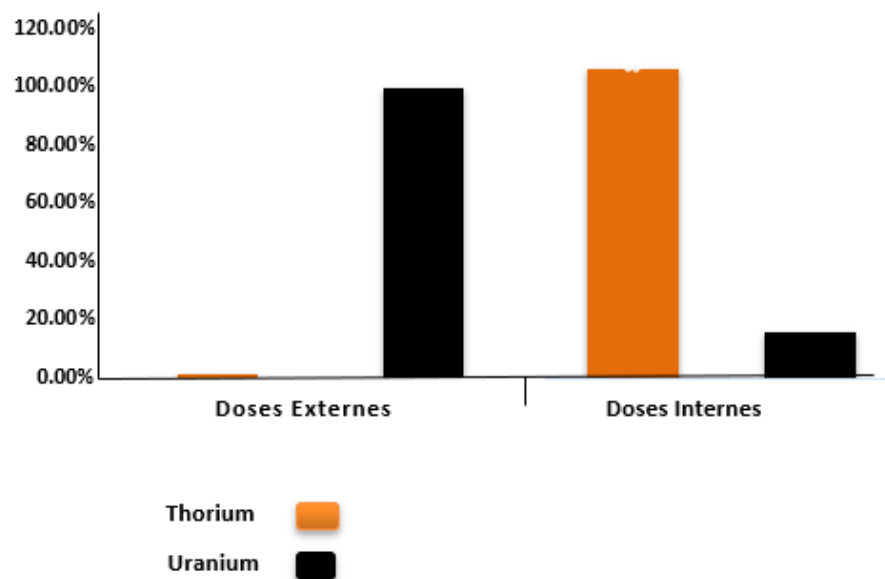


Figure 3.2 : Relation entre les différents débits de dose des radionucléides  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$

#### 4.7. Débit des doses dans les denrées alimentaires

Tableau 3.6 : Débit des doses dans les denrées alimentaires des localités étudiées

Localité	Plante	Débit de dose dans le tissu		
		$^{238}\text{U}$	$^{232}\text{Th}$	Total
NGOMBAS	Arachide	$2.37 \times 10^{-06}$	$1.05 \times 10^{-05}$	$1.29 \times 10^{-05}$
	Banane plantain	$1.19 \times 10^{-06}$	$3.04 \times 10^{-05}$	$3.16 \times 10^{-05}$
	Feuille de manioc	$2.88 \times 10^{-04}$	$7.08 \times 10^{-03}$	$7.37 \times 10^{-03}$
	Racine de manioc	$1.22 \times 10^{-04}$	$1.13 \times 10^{-03}$	$1.25 \times 10^{-03}$
	Macabo	$2.29 \times 10^{-04}$	$1.20 \times 10^{-03}$	$1.43 \times 10^{-03}$
AWANDA	Arachide	$2.37 \times 10^{-06}$	$1.05 \times 10^{-05}$	$1.29 \times 10^{-05}$
	Banane plantain	$1.19 \times 10^{-06}$	$3.04 \times 10^{-05}$	$3.16 \times 10^{-05}$
	Feuille de manioc	$3.89 \times 10^{-04}$	$5.46 \times 10^{-04}$	$9.35 \times 10^{-05}$
	Racine de manioc	$3.47 \times 10^{-04}$	$9.21 \times 10^{-04}$	$1.27 \times 10^{-03}$
	Macabo	$2.29 \times 10^{-04}$	$1.20 \times 10^{-03}$	$1.43 \times 10^{-03}$
BIKOUÉ	Arachide	$2.06 \times 10^{-04}$	$5.16 \times 10^{-04}$	$7.22 \times 10^{-04}$
	Banane plantain	$2.38 \times 10^{-06}$	$7.50 \times 10^{-04}$	$7.52 \times 10^{-04}$
	Feuille de manioc	$5.78 \times 10^{-05}$	$4.18 \times 10^{-03}$	$4.24 \times 10^{-03}$
	Racine de manioc	$4.63 \times 10^{-05}$	$2.45 \times 10^{-03}$	$2.50 \times 10^{-03}$
	Macabo	$4.51 \times 10^{-05}$	$1.00 \times 10^{-03}$	$1.05 \times 10^{-03}$

Le tableau 3-6 présente le débit de dose due au  $^{232}\text{Th}$  et à  $^{238}\text{U}$  dans les denrées alimentaires (Macabo, Arachide, Banane plantain, Feuille de manioc, Racine de manioc et Macabo) des différentes localités.

Le débit de dose interne et externe pour l'arachide étaient respectivement de  $2.37 \times 10^{-06}$  et de  $1.05 \times 10^{-05}$  Gy/j pour la localité de NGOMBAS, de  $2.37 \times 10^{-06}$  et de  $1.05 \times 10^{-05}$  Gy/j pour AWANDA et enfin de  $2.06 \times 10^{-04}$  et de  $5.16 \times 10^{-04}$  Gy/j pour BIKOUÉ avec des débits de dose totale respectifs de  $1.29 \times 10^{-05}$ , de  $1.29 \times 10^{-05}$  et de  $7.22 \times 10^{-04}$  Gy/j. Ces débits de dose respectent les recommandations du DOE. Une investigation supplémentaire pour cet organisme n'est donc pas nécessaire.

En ce qui concerne les bananes plantains, le débit de dose interne et externe étaient respectivement de  $1.19 \times 10^{-06}$  et de  $3.04 \times 10^{-05}$  Gy/j pour la localité de NGOMBAS, de  $1.19 \times 10^{-06}$  et de  $3.04 \times 10^{-05}$  Gy/j pour AWANDA, enfin de  $2.38 \times 10^{-06}$  et de  $7.50 \times 10^{-04}$  Gy/j pour BIKOUÉ, avec des débits de dose totale respectifs de  $3.16 \times 10^{-05}$  et de  $7.52 \times 10^{-04}$  Gy/j. Toutes les valeurs de débit de dose sont inférieures à la limite de dose recommandée par le DOE, qui est de 0,01 Gy/d pour les plantes.

Le débit de dose interne et externe des feuilles de manioc étaient respectivement de  $2.88 \times 10^{-04}$  et de  $7.08 \times 10^{-03}$  Gy/j pour la localité de NGOMBAS,  $3.89 \times 10^{-04}$  et  $5.46 \times 10^{-04}$  Gy/j pour AWANDA, et respectivement  $5.78 \times 10^{-05}$  et  $4.18 \times 10^{-03}$  Gy/j pour BIKOUÉ, avec des débits de dose totale respectifs  $7.37 \times 10^{-03}$ ,  $9.35 \times 10^{-05}$  et  $4.24 \times 10^{-03}$  Gy/j. Ces débits de dose respectent les recommandations du DOE, une investigation supplémentaire pour cet organisme n'est donc pas nécessaire.

Le débit de dose interne et externe dans les racines de manioc étaient respectivement  $1.22 \times 10^{-04}$  et  $1.13 \times 10^{-03}$  Gy/j pour la localité de NGOMBAS,  $3.47 \times 10^{-04}$  et  $9.21 \times 10^{-04}$  Gy/j pour AWANDA, et respectivement  $4.63 \times 10^{-05}$  et  $2.45 \times 10^{-03}$  Gy/j pour BIKOUÉ, avec des débits de dose totale respectifs  $1.25 \times 10^{-03}$ ,  $1.27 \times 10^{-03}$  et  $2.50 \times 10^{-03}$  Gy/j. Ces débits de dose respectent les recommandations du DOE, une investigation supplémentaire pour cet organisme n'est donc pas nécessaire.

En ce qui concerne les macabos, le débit de dose interne et externe étaient respectivement de  $2.29 \times 10^{-04}$  et de  $1.20 \times 10^{-03}$  Gy/j pour la localité de NGOMBAS, de  $2.29 \times 10^{-04}$  et de  $1.20 \times 10^{-03}$  Gy/j pour AWANDA, et respectivement de  $4.51 \times 10^{-05}$  et de  $1.00 \times 10^{-03}$  Gy/j pour BIKOUÉ, avec des débits de dose totale respectifs  $1.43 \times 10^{-03}$ ,  $1.43 \times 10^{-03}$  et  $1.05 \times 10^{-03}$  Gy/j. Ces débits de dose sont conformes aux attentes du DOE et une investigation supplémentaire pour cet organisme n'est donc plus nécessaire.

#### **4.8. Variation des débits de dose $^{232}\text{Th}$ et $^{238}\text{U}$ dans les denrées alimentaires.**

La figure 3.3 montre les débits de dose dans les denrées alimentaires des différents sites investigués. Les résultats ont montré que les valeurs les plus élevées étaient de  $7.37 \times 10^{-03}$  Gy/j et de  $2.50 \times 10^{-03}$  Gy/j obtenus respectivement dans les feuilles et les racines de manioc de NGOMBAS. Ces dernières étant les

principales denrées qui contribuent le plus à la dose. Ces résultats sont en accord avec les résultats obtenus par Ben-Bolie et al. [6]. Cela pourrait être lié à son mode de nutrition (ils absorbent la plupart des nutriments de l'atmosphère et une bonne partie par un système racinaire bien développé) [38].

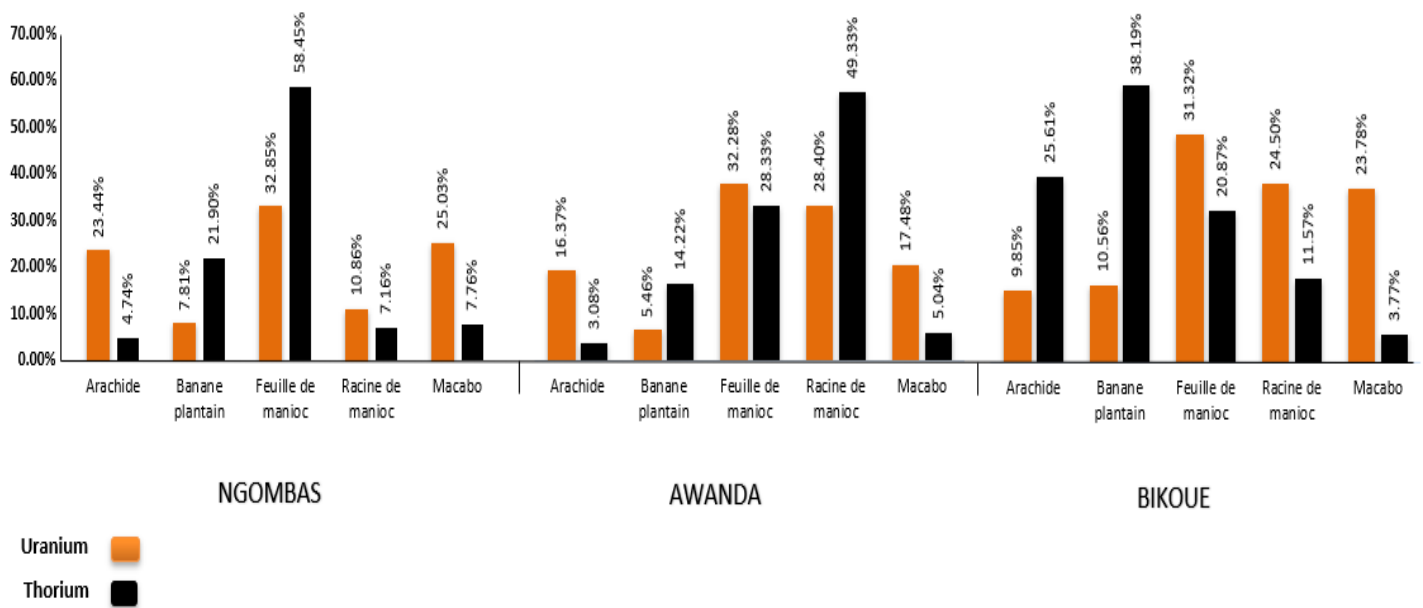


Figure 3.3 : variation des débits de dose  $^{232}\text{Th}$  et  $^{238}\text{U}$  dans les denrées alimentaires.

## 4.9. Récapitulatif RBn3

Dans cette partie de travail, le débit de dose externe, interne et dans les denrées évaluées à partir des concentrations du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  dans le sol et les denrées alimentaire des différentes localités étudiées ont révélé aucun risque significatif, Cette situation est par conséquent conforme aux attentes du DOE en situation d'exposition, et ne demanderait pas une investigation supplémentaire pour ces organismes. Cependant parmi les voies d'exposition étudiés, la voie interne est celle qui contribue le plus à la voie totale avec une contribution de 93.73 %. Les contributions des radionucléides à la dose totale ont également été présenté dans ce travail. Ainsi, le  $^{232}\text{Th}$  est le principal contributeur à la dose interne avec une contribution de 87.23 %. Par contre pour l'exposition externe,  $^{238}\text{U}$  a contribué 99.19 %. Aussi les valeurs les plus élevées de la dose ont été obtenues dans l'arachide et la feuille de manioc.

## Conclusion

Ce chapitre a présenté les résultats du présent travail. Les données d'exposition ont été confrontées avec les données d'effet. Cela à révéler des situations contrastes en fonction des organismes et des localités. L'analyse des résultats révèle une situation conforme aux attentes de la CIPR en situation d'exposition. Cependant, ce niveau peut augmenter par conséquent une analyse dans un future proche est nécessaire. S'il existe un infime risque de contamination elle ne serait que par ingestion des aliments.

---

## CONCLUSION GENERALE

---

En définitive, il a été question d'évaluer les risques radiologiques dues au transfert du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  du sol vers les plantes sur l'axe syénitique AKONGO-LOLODORF par le code RESRAD-BIOTA. Les résultats de l'évaluation RESRAD-BIOTA pour le niveau 1 et 2 ont révélé que les BCG des radionucléides  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{234}\text{U}$  et celle du  $^{238}\text{U}$  sont supérieurs aux valeurs de référence du DOE. L'indice de risque obtenue (niveau RBn1) était supérieur à 1 ce qui montre un risque significatif. Le total du débit de dose (interne et externe) évalué au niveau 2 (RBn2) était de  $0.66 \times 10^{-03}$  Gy/j pour les animaux terrestres et de  $0.92 \times 10^{-03}$  Gy/j pour les plantes terrestres. Les plantes terrestres reçoivent plus de dose que les animaux terrestres. Les débits de dose évalués sont inférieurs aux valeurs limites du DOE, qui sont de 1 mGy/j pour les animaux terrestres et 10 mGy/j pour les plantes terrestres. Les valeurs d'indice de risque (animaux terrestres et les plantes terrestres) répondent également à l'exigence du DOE. Le risque de contamination radiologique est négligeable dans le sol.

Dans le but d'évaluer le niveau d'exposition de la population à la radioactivité dans les denrées alimentaires, une évaluation de niveau 3 (RBn3) a été faite. Les débits obtenus dans les denrées étaient inférieurs à la valeur limite du DOE. Cette étude a montré que la voie interne est celle qui contribue le plus à la dose totale avec une contribution de 93.73 %. Les contributions des radionucléides à la dose totale ont également été évaluées. Ainsi, le  $^{232}\text{Th}$  est le principal contributeur à la dose interne avec une contribution de 87.23 %. Par contre pour l'exposition externe,  $^{238}\text{U}$  a contribué 99.19 %. Aussi, parmi les denrées étudiées, les résultats ont montré que le manioc (feuille et racine) et l'arachide ont présenté les plus élevées.

Au final, l'utilisation du code RESRAD-BIOTA est un moyen simplifié et efficace utilisé pour évaluer l'exposition du biote (faune et flore). Les résultats de cette étude ont montré que lorsque les concentrations du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  dans le sol sont utilisées le risque est négligeable. Lorsque les concentrations du  $^{232}\text{Th}$  et de  $^{238}\text{U}$  dans les denrées de la zone investiguée sont utilisées, les doses sont plus ou moins variables en fonction des denrées et des localités, consommer le manioc (feuille et racine) et l'arachide de ces localités pendant une longue durée peut présenter un risque. Ces résultats peuvent être utilisés comme base de données dans la gestion des risques et la prise de décision lors des mesures préventives pour protéger la santé et la vie des populations de NGOMBAS, de AWANDA et de BIKOUÉ de contre l'exposition aux rayonnements ionisants.

---

---

# ANNEXES

---

## Annexe A : Lexique

**Conservatisme** : principe consistant à fonder l'étude de l'évolution d'un milieu naturel en tenant compte de l'état des sciences et des techniques et en procédant par extrapolation des lois connues, en retenant par principe les hypothèses les plus pessimistes, de façon à préserver l'environnement.

**Domage** : dégât causé à quelque chose.

**Effet** : phénomène biologique ou systémique provoqué par les propriétés d'une substance.

**Espèce** : groupe d'individus pouvant potentiellement se reproduire en nature en générant des descendants viables et féconds, présentant de fortes similarités d'apparence génétiques.

**Facteur de transfert** : rapport entre l'activité massique ou volumique dans le compartiment cible du transfert et l'activité massique ou volumique dans le compartiment source.

**Population** : ensemble des individus d'une même espèce trouvés dans une station donnée

**Risque** : la probabilité d'occurrence d'un impact non désiré. Il naît de la coexistence dans un même espace-temps du danger et de l'exposition, sachant que la vision de cet espace-temps doit être dynamique pour tenir compte de la persistance du danger (par exemple dégradation des substances toxiques, décroissance radioactive, etc.) et de sa localisation (par exemple mobilité des substances dans l'environnement).

**Valeur repère** : valeur sans connotation réglementaire permettant d'orienter le déroulement de l'évaluation de risque et d'en interpréter le résultat

## Annexe B : tableaux

### Résultat RESRAD-BIOTA niveau 1

Tableau B-2 : Rapport BCG de concentration des radionucléides NGOMBAS RBn1

Radionucléide	Concentration <i>n</i> (Bq/m <sup>3</sup> )	Organisme animal		Organisme plante	
		BCG (Bq/kg)	Ratio	BCG (Bq/kg)	Ratio
<i>K-40</i>	630	$4.40 \times 10^{03}$	$1.43 \times 10^{-03}$	$5.11 \times 10^{04}$	$1.23 \times 10^{-02}$
<i>Pb-210</i>	330	$5.15 \times 10^{04}$	$6.40 \times 10^{-03}$	$4.79 \times 10^{05}$	$6.89 \times 10^{-04}$
<i>Po-210</i>	330	$1.60 \times 10^{05}$	$2.06 \times 10^{-03}$	$6.76 \times 10^{06}$	$4.88 \times 10^{-05}$
<i>Ra-226</i>	330	$1.87 \times 10^{03}$	$1.76 \times 10^{-01}$	$1.06 \times 10^{04}$	$3.10 \times 10^{-02}$
<i>Ra-228</i>	910	$1.62 \times 10^{03}$	$5.60 \times 10^{-01}$	$9.08 \times 10^{03}$	$1.00 \times 10^{-04}$
<i>Th-228</i>	910	$1.96 \times 10^{04}$	$4.64 \times 10^{-02}$	$2.37 \times 10^{05}$	$3.83 \times 10^{-03}$
<i>Th-230</i>	330	$3.69 \times 10^{05}$	$8.94 \times 10^{-04}$	$6.49 \times 10^{06}$	$5.09 \times 10^{-05}$
<i>Th-232</i>	910	$5.57 \times 10^{04}$	$1.63 \times 10^{-02}$	$8.68 \times 10^{05}$	$1.05 \times 10^{-03}$
<i>Th-234</i>	330	$8.00 \times 10^{04}$	$4.12 \times 10^{-03}$	$8.00 \times 10^{05}$	$4.13 \times 10^{-04}$
<i>U-234</i>	330	$1.90 \times 10^{05}$	$1.74 \times 10^{-03}$	$1.91 \times 10^{06}$	$1.73 \times 10^{-04}$
<i>U-238</i>	330	$5.84 \times 10^{04}$	$5.65 \times 10^{-03}$	$5.82 \times 10^{05}$	$5.67 \times 10^{-04}$
<i>Somme</i>	-	-	$9.63 \times 10^{-01}$	-	$1.50 \times 10^{-01}$

Tableau B-3 : BCG des radionucléides pour les animaux terrestres AWANDA RBn1

Radionucléide	Concentration (Bq/m <sup>3</sup> )	Organisme animal		Organisme plante	
		BCG (Bq/kg)	Ratio	BCG (Bq/kg)	Ratio
<i>K-40</i>	970	$4.40 \times 10^{03}$	$2.21 \times 10^{-01}$	$5.11 \times 10^{04}$	$1.90 \times 10^{-02}$
<i>Pb-210</i>	200	$5.15 \times 10^{04}$	$3.88 \times 10^{-03}$	$4.79 \times 10^{05}$	$4.18 \times 10^{-04}$
<i>Po-210</i>	200	$1.60 \times 10^{05}$	$1.25 \times 10^{-03}$	$6.76 \times 10^{06}$	$2.96 \times 10^{-05}$
<i>Ra-226</i>	200	$1.87 \times 10^{03}$	$1.07 \times 10^{-01}$	$1.06 \times 10^{04}$	$1.88 \times 10^{-02}$
<i>Ra-228</i>	520	$1.62 \times 10^{03}$	$3.20 \times 10^{-01}$	$9.08 \times 10^{03}$	$5.73 \times 10^{-02}$
<i>Th-228</i>	520	$1.96 \times 10^{04}$	$2.65 \times 10^{-02}$	$2.37 \times 10^{03}$	$2.19 \times 10^{-03}$
<i>Th-230</i>	200	$3.69 \times 10^{05}$	$5.42 \times 10^{-04}$	$6.49 \times 10^{06}$	$3.08 \times 10^{-05}$
<i>Th-232</i>	520	$5.57 \times 10^{04}$	$9.33 \times 10^{-03}$	$8.69 \times 10^{05}$	$5.99 \times 10^{-04}$
<i>Th-234</i>	200	$8.00 \times 10^{04}$	$2.50 \times 10^{-03}$	$8.00 \times 10^{05}$	$2.50 \times 10^{-04}$
<i>U-234</i>	200	$1.90 \times 10^{05}$	$1.05 \times 10^{-03}$	$1.91 \times 10^{06}$	$1.05 \times 10^{-04}$
<i>U-238</i>	200	$5.84 \times 10^{04}$	$3.43 \times 10^{-03}$	$5.82 \times 10^{05}$	$3.44 \times 10^{-04}$
<i>Somme</i>	-	-	$6.96 \times 10^{-01}$	-	$9.90 \times 10^{-02}$

**Tableau B-4 : Rapport BCG de concentration des radionucléides sur les animaux terrestres BIKOUÉ RBn1**

Radionucléide	Concentration (Bq/kg)	Organisme animal		Organisme plante	
		BCG (Bq/kg)	Ratio	BCG (Bq/kg)	Ratio
<b>K-40</b>	1890	$4.40 \times 10^{03}$	$4.30 \times 10^{-01}$	$5.11 \times 10^{04}$	$3.70 \times 10^{-02}$
<b>Pb-210</b>	240	$5.15 \times 10^{04}$	$4.66 \times 10^{-03}$	$4.79 \times 10^{05}$	$5.01 \times 10^{-05}$
<b>Po-210</b>	240	$1.60 \times 10^{05}$	$1.50 \times 10^{-03}$	$6.76 \times 10^{06}$	$3.55 \times 10^{-05}$
<b>Ra-226</b>	240	$1.87 \times 10^{03}$	$1.28 \times 10^{-01}$	$1.06 \times 10^{06}$	$2.26 \times 10^{-02}$
<b>Ra-228</b>	860	$1.62 \times 10^{03}$	$5.29 \times 10^{-01}$	$9.08 \times 10^{03}$	$9.48 \times 10^{-02}$
<b>Th-228</b>	860	$1.96 \times 10^{04}$	$4.38 \times 10^{-02}$	$2.37 \times 10^{05}$	$3.62 \times 10^{-03}$
<b>Th-230</b>	240	$3.69 \times 10^{05}$	$6.50 \times 10^{-04}$	$6.49 \times 10^{06}$	$3.70 \times 10^{-05}$
<b>Th-232</b>	860	$5.57 \times 10^{04}$	$1.54 \times 10^{-02}$	$8.68 \times 10^{05}$	$9.91 \times 10^{-04}$
<b>Th-234</b>	240	$8.00 \times 10^{04}$	$3.00 \times 10^{-03}$	$8.00 \times 10^{05}$	$3.00 \times 10^{-04}$
<b>U-234</b>	240	$1.03 \times 10^{05}$	$2.34 \times 10^{-03}$	$1.02 \times 10^{06}$	$2.36 \times 10^{-04}$
<b>U-238</b>	240	$5.84 \times 10^{04}$	$4.11 \times 10^{-03}$	$5.82 \times 10^{06}$	$4.13 \times 10^{-04}$
<b>Somme</b>	-		1.16		$1.60 \times 10^{-01}$

## Résultat RESRAD-BIOTA niveau 2

**Tableau B-5 : Rapport BCG de concentration des radionucléides sur les animaux terrestres RBn2**

RADIONUCLÉIDE	CONCENTRATION (BQ/KG)	ORGANISME ANIMAL		ORGANISME PLANTE	
		BCG (Bq/Kg)	Ratio	BCG (Bq/Kg)	Ratio
<b>K-40</b>	1040	$4.4 \times 10^{03}$	$2.36 \times 10^{-01}$	$5.11 \times 10^{04}$	$2.03 \times 10^{-02}$
<b>Pb-210</b>	160	$5.15 \times 10^{04}$	$3.11 \times 10^{-03}$	$4.79 \times 10^{05}$	$3.34 \times 10^{-04}$
<b>Po-210</b>	160	$1.60 \times 10^{05}$	$9.98 \times 10^{-04}$	$6.76 \times 10^{06}$	$2.37 \times 10^{-05}$
<b>Ra-226</b>	160	$1.87 \times 10^{03}$	$8.55 \times 10^{-02}$	$1.06 \times 10^{04}$	$2.37 \times 10^{-05}$
<b>Ra-228</b>	480	$1.62 \times 10^{03}$	$2.95 \times 10^{-01}$	$9.08 \times 10^{03}$	$1.29 \times 10^{-02}$
<b>Th-228</b>	480	$1.96 \times 10^{04}$	$2.45 \times 10^{-02}$	$2.37 \times 10^{05}$	$2.02 \times 10^{-03}$
<b>Th-230</b>	160	$3.69 \times 10^{05}$	$4.33 \times 10^{-04}$	$6.49 \times 10^{06}$	$2.47 \times 10^{-05}$
<b>Th-232</b>	160	$5.57 \times 10^{04}$	$8.61 \times 10^{-03}$	$6.68 \times 10^{05}$	$5.53 \times 10^{-04}$
<b>Th-234</b>	160	$8.00 \times 10^{04}$	$2.00 \times 10^{-03}$	$8.00 \times 10^{05}$	$2.00 \times 10^{-04}$
<b>U-234</b>	160	$1.90 \times 10^{05}$	$8.43 \times 10^{-04}$	$1.91 \times 10^{06}$	$8.38 \times 10^{-05}$
<b>U-238</b>	160	$5.94 \times 10^{04}$	$2.74 \times 10^{-03}$	$5.82 \times 10^{05}$	$2.75 \times 10^{-04}$
<b>Somme</b>	-		$6.61 \times 10^{-01}$	-	$9.18 \times 10^{-02}$

**Tableau B-6 : Rapport général de débit de dose de concentration animal terrestre RBn2.**

<i>Animal terrestre</i>				
<i>Nucléide</i>	<i>Dose Externe Gy/j</i>	<i>Dose Interne Gy/j</i>	<i>Dose Total Gy/j</i>	
<b>K-40</b>	$9.69 \times 10^{-06}$	$2.27 \times 10^{-04}$	$2.37 \times 10^{-04}$	
<b>Pb-210</b>	$9.48 \times 10^{-07}$	$2.16 \times 10^{-06}$	$3.11 \times 10^{-06}$	
<b>Po-210</b>	$1.93 \times 10^{-11}$	$9.98 \times 10^{-07}$	$9.98 \times 10^{-07}$	
<b>Ra-226</b>	$5.97 \times 10^{-06}$	$7.95 \times 10^{-05}$	$8.55 \times 10^{-05}$	
<b>Ra-228</b>	$8.94 \times 10^{-06}$	$2.87 \times 10^{-04}$	$2.96 \times 10^{-04}$	
<b>Th-228</b>	$1.62 \times 10^{-05}$	$8.28 \times 10^{-06}$	$2.45 \times 10^{-05}$	
<b>Th-230</b>	$3.15 \times 10^{-08}$	$4.02 \times 10^{-07}$	$4.33 \times 10^{-07}$	
<b>Th-232</b>	$7.89 \times 10^{-08}$	$8.46 \times 10^{-06}$	$8.54 \times 10^{-06}$	
<b>Th-234</b>	$2.00 \times 10^{-06}$	$2.27 \times 10^{-10}$	$2.00 \times 10^{-06}$	
<b>U-234</b>	$2.81 \times 10^{-08}$	$8.14 \times 10^{-07}$	$8.42 \times 10^{-07}$	
<b>U-238</b>	$2.02 \times 10^{-06}$	$1.22 \times 10^{-07}$	$2.74 \times 10^{-06}$	
<b>Somme</b>	$4.59 \times 10^{-05}$	$6.16 \times 10^{-04}$	$6.62 \times 10^{-04}$	

**Tableau B-6 : Rapport général de débit de dose de concentration plante terrestre. RBn2**

<i>Plante terrestre</i>				
<i>Radionucléide</i>	<i>Dose Externe Gy/j</i>	<i>Dose Interne Gy/j</i>	<i>Dose Total Gy/j</i>	
<b>K-40</b>	$9.69 \times 10^{-06}$	$1.94 \times 10^{-04}$	$2.04 \times 10^{-04}$	
<b>Pb-210</b>	$9.48 \times 10^{-07}$	$2.40 \times 10^{-06}$	$3.35 \times 10^{-06}$	
<b>Po-210</b>	$1.93 \times 10^{-11}$	$2.37 \times 10^{-07}$	$2.37 \times 10^{-07}$	
<b>Ra-226</b>	$5.97 \times 10^{-06}$	$4.44 \times 10^{-04}$	$1.50 \times 10^{-04}$	
<b>Ra-228</b>	$8.94 \times 10^{-06}$	$5.21 \times 10^{-04}$	$5.30 \times 10^{-04}$	
<b>Th-228</b>	$1.62 \times 10^{-05}$	$4.44 \times 10^{-06}$	$2.06 \times 10^{-05}$	
<b>Th-230</b>	$3.15 \times 10^{-08}$	$2.15 \times 10^{-07}$	$2.47 \times 10^{-07}$	
<b>Th-232</b>	$7.89 \times 10^{-08}$	$5.40 \times 10^{-06}$	$5.48 \times 10^{-06}$	
<b>Th-234</b>	$2.00 \times 10^{-06}$	$2.06 \times 10^{-09}$	$2.00 \times 10^{-06}$	
<b>U-234</b>	$2.81 \times 10^{-08}$	$8.09 \times 10^{-07}$	$8.37 \times 10^{-07}$	
<b>U-238</b>	$2.02 \times 10^{-06}$	$7.31 \times 10^{-07}$	$2.75 \times 10^{-06}$	
<b>Somme</b>	$4.59 \times 10^{-05}$	$8.74 \times 10^{-04}$	$9.20 \times 10^{-04}$	

Tableau B-7 : débits de dose internes, externes et totaux RBn3

Localités	Echantillons	<sup>232</sup> Th			<sup>238</sup> U		
		dose externe	dose interne	total	dose externe	dose interne	total
Arachide	NGO-08-S1	$1.65 \times 10^{-09}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.01 \times 10^{-07}$	$2.69 \times 10^{-07}$	$4.70 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S2	$2.53 \times 10^{-09}$	$2.69 \times 10^{-06}$	$2.69 \times 10^{-06}$	$4.35 \times 10^{-07}$	$5.83 \times 10^{-07}$	$1.02 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S3	$4.96 \times 10^{-09}$	$5.28 \times 10^{-06}$	$5.28 \times 10^{-06}$	$4.68 \times 10^{-07}$	$6.27 \times 10^{-07}$	$1.10 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S4	$6.62 \times 10^{-09}$	$7.04 \times 10^{-06}$	$7.04 \times 10^{-06}$	$6.03 \times 10^{-07}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$2.11 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S5	$7.20 \times 10^{-06}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$7.69 \times 10^{-07}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$1.80 \times 10^{-06}$
Banane plantain	NGO-08-S1	$7.53 \times 10^{-11}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$5.57 \times 10^{-09}$	$2.70 \times 10^{-07}$	$2.75 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S2	$1.15 \times 10^{-10}$	$2.70 \times 10^{-06}$	$2.70 \times 10^{-07}$	$1.21 \times 10^{-08}$	$5.84 \times 10^{-07}$	$5.96 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S3	$2.26 \times 10^{-10}$	$5.29 \times 10^{-06}$	$5.29 \times 10^{-06}$	$1.30 \times 10^{-08}$	$6.29 \times 10^{-07}$	$56.42 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S4	$3.01 \times 10^{-10}$	$7.05 \times 10^{-06}$	$7.05 \times 10^{-06}$	$2.51 \times 10^{-8}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$1.24 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S5	$3.28 \times 10^{-10}$	$7.67 \times 10^{-06}$	$7.67 \times 10^{-06}$	$2.14 \times 10^{-8}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$1.05 \times 10^{-06}$
Feuille de manioc	NGO-08-S1	$1.44 \times 10^{-9}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.90 \times 10^{-07}$	$2.67 \times 10^{-07}$	$5.58 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S2	$2.20 \times 10^{-9}$	$2.69 \times 10^{-06}$	$2.69 \times 10^{-06}$	$6.29 \times 10^{-07}$	$5.76 \times 10^{-07}$	$1.21 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S3	$4.31 \times 10^{-9}$	$5.27 \times 10^{-06}$	$5.28 \times 10^{-06}$	$6.77 \times 10^{-07}$	$6.24 \times 10^{-07}$	$1.30 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S4	$5.75 \times 10^{-9}$	$7.03 \times 10^{-06}$	$7.04 \times 10^{-06}$	$1.31 \times 10^{-6}$	$1.20 \times 10^{-06}$	$2.51 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S5	$6.26 \times 10^{-9}$	$7.65 \times 10^{-06}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$1.11 \times 10^{-6}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$2.14 \times 10^{-06}$
Racine de manioc	NGO-08-S1	$1.04 \times 10^{-09}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$9.31 \times 10^{-08}$	$2.69 \times 10^{-07}$	$3.62 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S2	$1.59 \times 10^{-09}$	$2.69 \times 10^{-06}$	$2.69 \times 10^{-06}$	$2.02 \times 10^{-07}$	$5.83 \times 10^{-07}$	$7.83 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S3	$3.13 \times 10^{-09}$	$5.28 \times 10^{-06}$	$5.28 \times 10^{-06}$	$2.17 \times 10^{-07}$	$6.28 \times 10^{-07}$	$8.46 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S4	$4.17 \times 10^{-09}$	$7.04 \times 10^{-06}$	$7.04 \times 10^{-06}$	$4.19 \times 10^{-07}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$1.63 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S5	$4.55 \times 10^{-09}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$1.66 \times 10^{-06}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$1.36 \times 10^{-06}$
Macabo	NGO-08-S1	$1.04 \times 10^{-09}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$9.31 \times 10^{-08}$	$2.69 \times 10^{-07}$	$3.62 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S2	$1.04 \times 10^{-09}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$1.76 \times 10^{-06}$	$2.02 \times 10^{-07}$	$5.83 \times 10^{-07}$	$7.83 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S3	$3.13 \times 10^{-09}$	$5.28 \times 10^{-06}$	$5.28 \times 10^{-06}$	$2.17 \times 10^{-07}$	$6.28 \times 10^{-07}$	$8.46 \times 10^{-07}$
	NGO-08-S4	$4.17 \times 10^{-09}$	$7.04 \times 10^{-06}$	$7.04 \times 10^{-06}$	$4.19 \times 10^{-07}$	$1.21 \times 10^{-06}$	$1.63 \times 10^{-06}$
	NGO-08-S5	$4.55 \times 10^{-09}$	$7.66 \times 10^{-06}$	$1.66 \times 10^{-06}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$1.36 \times 10^{-06}$
Arachide	AWA-08-S1	$2.34 \times 10^{-09}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$2.29 \times 10^{-06}$	$4.01 \times 10^{-07}$	$5.38 \times 10^{-07}$	$9.39 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S2	$3.41 \times 10^{-09}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.63 \times 10^{-06}$	$5.35 \times 10^{-07}$	$7.17 \times 10^{-07}$	$1.25 \times 10^{-06}$
	AWA-08-S3	$4.18 \times 10^{-09}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$2.68 \times 10^{-07}$	$3.58 \times 10^{-07}$	$6.27 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S4	$1.81 \times 10^{-09}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$2.68 \times 10^{-07}$	$3.38 \times 10^{-07}$	$6.26 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S5	$3.41 \times 10^{-09}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.63 \times 10^{-06}$	$3.33 \times 10^{-07}$	$4.48 \times 10^{-07}$	$7.83 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S1	$1.06 \times 10^{-10}$	$2.49 \times 10^{-06}$	$2.49 \times 10^{-06}$	$1.11 \times 10^{-08}$	$5.39 \times 10^{-07}$	$5.50 \times 10^{-07}$

Banane plantain	AWA-08-S2	$1.55 \times 10^{-10}$	$3.63 \times 10^{-06}$	$3.63 \times 10^{-06}$	$1.49 \times 10^{-08}$	$7.19 \times 10^{-07}$	$7.34 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S3	$1.91 \times 10^{-10}$	$4.46 \times 10^{-06}$	$4.46 \times 10^{-06}$	$7.43 \times 10^{-9}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.67 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S4	$4.70 \times 10^{-10}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$4.46 \times 10^{-06}$	$1.49 \times 10^{-9}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.67 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S5	$1.81 \times 10^{-09}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$9.29 \times 10^{-9}$	$4.49 \times 10^{-07}$	$4.59 \times 10^{-07}$
Feuille de manioc	AWA-08-S1	$2.03 \times 10^{-09}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$5.81 \times 10^{-07}$	$5.35 \times 10^{-07}$	$1.12 \times 10^{-06}$
	AWA-08-S2	$2.96 \times 10^{-09}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$7.74 \times 10^{-07}$	$7.13 \times 10^{-07}$	$1.49 \times 10^{-06}$
	AWA-08-S3	$3.64 \times 10^{-09}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$3.87 \times 10^{-07}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$7.44 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S4	$8.96 \times 10^{-09}$	$5.48 \times 10^{-06}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$7.74 \times 10^{-07}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$1.13 \times 10^{-06}$
	AWA-08-S5	$2.96 \times 10^{-09}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$4.84 \times 10^{-07}$	$4.46 \times 10^{-07}$	$9.30 \times 10^{-07}$
Racine de manioc	AWA-08-S1	$1.47 \times 10^{-09}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$2.49 \times 10^{-06}$	$1.86 \times 10^{-07}$	$5.39 \times 10^{-07}$	$7.25 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S2	$2.15 \times 10^{-09}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$2.48 \times 10^{-07}$	$7.18 \times 10^{-07}$	$9.66 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S3	$2.15 \times 10^{-09}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S4	$3.25 \times 10^{-09}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$5.49 \times 10^{-06}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S5	$2.64 \times 10^{-09}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$1.55 \times 10^{-07}$	$4.49 \times 10^{-07}$	$6.04 \times 10^{-07}$
Macabo	AWA-08-S1	$1.47 \times 10^{-09}$	$2.48 \times 10^{-06}$	$2.49 \times 10^{-06}$	$1.86 \times 10^{-07}$	$5.39 \times 10^{-07}$	$7.25 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S2	$2.15 \times 10^{-09}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$3.62 \times 10^{-06}$	$2.48 \times 10^{-07}$	$7.18 \times 10^{-07}$	$9.66 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S3	$2.64 \times 10^{-09}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S4	$2.64 \times 10^{-09}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	AWA-08-S5	$2.64 \times 10^{-09}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$4.45 \times 10^{-06}$	$1.55 \times 10^{-07}$	$4.49 \times 10^{-07}$	$6.04 \times 10^{-07}$
Arachide	BIK-08-S1	$6.81 \times 10^{-09}$	$7.24 \times 10^{-06}$	$7.25 \times 10^{-06}$	$3.68 \times 10^{-07}$	$4.93 \times 10^{-07}$	$8.61 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S2	$9.73 \times 10^{-10}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$2.68 \times 10^{-07}$	$3.58 \times 10^{-07}$	$6.26 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S3	$2.24 \times 10^{-09}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$6.36 \times 10^{-07}$	$8.51 \times 10^{-07}$	$1.49 \times 10^{-06}$
	BIK-08-S4	$1.85 \times 10^{-09}$	$1.97 \times 10^{-06}$	$1.87 \times 10^{-06}$	$2.68 \times 10^{-07}$	$3.58 \times 10^{-07}$	$6.26 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S5	$3.80 \times 10^{-09}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$3.68 \times 10^{-07}$	$4.93 \times 10^{-07}$	$8.61 \times 10^{-07}$
Banane Plantain	BIK-08-S1	$3.10 \times 10^{-10}$	$7.26 \times 10^{-06}$	$7.26 \times 10^{-06}$	$1.02 \times 10^{-08}$	$4.94 \times 10^{-07}$	$5.04 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S2	$8.66 \times 10^{-11}$	$1.04 \times 10^{-08}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$1.49 \times 10^{-08}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.74 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S3	$1.02 \times 10^{-10}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$1.76 \times 10^{-08}$	$8.54 \times 10^{-07}$	$8.71 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S4	$8.42 \times 10^{-11}$	$1.97 \times 10^{-06}$	$1.97 \times 10^{-06}$	$7.43 \times 10^{-9}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$3.67 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S5	$1.73 \times 10^{-10}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$1.02 \times 10^{-08}$	$4.94 \times 10^{-07}$	$5.04 \times 10^{-07}$
Feuille de Manioc	BIK-08-S1	$5.92 \times 10^{-09}$	$4.90 \times 10^{-07}$	$1.02 \times 10^{-06}$	$5.32 \times 10^{-07}$	$4.90 \times 10^{-07}$	$1.02 \times 10^{-06}$
	BIK-08-S2	$1.69 \times 10^{-09}$	$1.03 \times 10^{-06}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$7.74 \times 10^{-07}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$1.13 \times 10^{-06}$
	BIK-08-S3	$1.95 \times 10^{-9}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$9.19 \times 10^{-07}$	$8.47 \times 10^{-07}$	$1.77 \times 10^{-06}$
	BIK-08-S4	$1.61 \times 10^{-09}$	$1.96 \times 10^{-06}$	$1.87 \times 10^{-06}$	$3.87 \times 10^{-07}$	$3.57 \times 10^{-07}$	$7.44 \times 10^{-07}$

	BIK-08-S5	$3.30 \times 10^{-09}$	$4.03 \times 10^{-06}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$5.32 \times 10^{-07}$	$4.90 \times 10^{-07}$	$1.02 \times 10^{-06}$
Racine de manioc	BIK-08-S1	$4.29 \times 10^{-09}$	$7.25 \times 10^{-06}$	$7.25 \times 10^{-06}$	$1.71 \times 10^{-07}$	$4.94 \times 10^{-07}$	$6.64 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S2	$6.13 \times 10^{-10}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$1.27 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S3	$1.41 \times 10^{-09}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$2.95 \times 10^{-07}$	$8.53 \times 10^{-07}$	$1.15 \times 10^{-06}$
	BIK-08-S4	$1.16 \times 10^{-09}$	$1.97 \times 10^{-06}$	$1.97 \times 10^{-06}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S5	$2.39 \times 10^{-09}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$1.71 \times 10^{-07}$	$4.94 \times 10^{-07}$	$6.64 \times 10^{-07}$
Macabo	BIK-08-S1	$4.29 \times 10^{-09}$	$7.25 \times 10^{-06}$	$7.25 \times 10^{-06}$	$1.71 \times 10^{-07}$	$4.94 \times 10^{-07}$	$6.64 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S2	$6.13 \times 10^{-10}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$1.04 \times 10^{-06}$	$1.27 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S3	$1.41 \times 10^{-09}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$2.38 \times 10^{-06}$	$2.95 \times 10^{-07}$	$8.53 \times 10^{-07}$	$1.15 \times 10^{-06}$
	BIK-08-S4	$1.16 \times 10^{-09}$	$1.97 \times 10^{-06}$	$1.97 \times 10^{-06}$	$1.24 \times 10^{-07}$	$3.59 \times 10^{-07}$	$4.83 \times 10^{-07}$
	BIK-08-S5	$2.39 \times 10^{-09}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$4.04 \times 10^{-06}$	$1.71 \times 10^{-07}$	$4.94 \times 10^{-07}$	$6.64 \times 10^{-07}$

---

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

- [1] M. CRICK, et F. SHANNOUN. Effets et sources des rayonnements, (2016).
- [2] L. Najam, S. Ali, et al «Assessment of Natural Radioactivity Level in Soil Samples for Selected Regions in Nineveh Province (IRAQ) », International Journal of Novel Research in Physics Chemistry & Mathematics, vol. 2, p. 1-9, mai (2015).
- [3] L. A. Najam, A. Laith, et al «A Comparative Study of the Results of Natural Radioactivity and the Associated Radiation Hazards of Na (Tl) and HPGe Detectors ». International Journal of Recent Research and Review, Vol. VIII, June (2015).
- [4] Bonzom, IRSN–crédits JM. "Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages.", p. 165, juillet (2021).
- [5] P. Ele Abiama. Evaluation de l'exposition externe au rayonnement tellurique gamma sur l'axe syénitique Akongo-Lolodorf. Diss. Thèse de Doctorat/PhD, Université de Yaoundé I, (2010).
- [6] G. H. Ben-Bolie, P. Ele Abiama, et al. Transfer of  $^{238}\text{U}$  and  $^{232}\text{Th}$  from soil to plant in a high background radiation area of the southwestern region of Cameroon. Radiation protection dosimetry, 2013, vol. 157, no 2, p. 298-302. déc. (2013)
- [7] L. Sech, Claude et al. Physique nucléaire-2e éd.: Des quarks aux applications. Cours et exercices corrigés. Dunod, (2020).
- [8] O. Nabil University of Jijel, Jijel JIJEL, ResearchGate. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.researchgate.net/profile/Ounoughi-Nabil> Consulté le : 7 décembre (2022)
- [9] L. Najam, S. Ali, et al « Assessment of Natural Radioactivity Level in Soil Samples for Selected Regions in Nineveh Province (IRAQ) », International Journal of Novel Research in Physics Chemistry & Mathematics, vol. 2, p. 1-9, mai (2015).
- [10] C. Simenel. DYNAMIQUE NUCLEAIRE AUTOUR DE LA BARRIERE. Diss. Université de Lyon, (2003).
- [11] J. Magill et J. Galy « Types of Radioactive Decay »; Radioactivity Radionuclides Radiation: Including the Universal Nuclide Chart on CD-ROM, p. 59-87; (2005).

- [12] M. Pfützner, M. Karny, et al; « Radioactive decays at limits of nuclear stability », *Reviews of modern physics*, vol. 84, n° 2, p. 567, (2012).
- [13] G. H. Ben-bolie, et al « Physique atomique et nucléaire ». Université de Yaoundé I, 2020 (2019).
- [14] A. C. Upton, et al « The biological effects of low-level ionizing radiation », *Scientific American*, vol. 246, n° 2, p. 41-49, (1982).
- [15] A. Chaturvedi et V. Jain, et al; « Effect of ionizing radiation on human health », *International Journal of Plant and Environment*, vol. 5, n° 03, p. 200-205, (2019).
- [16] L. Foulquier, et al « Radioecology. Origin of radioelements », *Techniques de l'ingénieur. Génie nucléaire*, n° BN180, p. BN3908-1, (2002).
- [17] C. L. Tan, et al « Big gaps and short bridges: A model for solving the discontinuity problem », *Answers Research Journal*, vol. 9, n° 6, p. 149-162; (2016).
- [18] Hewlett, G. Richard et al. Des atomes pour la paix et la guerre, 1953-1961 : Eisenhower et la Commission de l'énergie atomique. (Histoire de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis, vol. III). Vol. 4. Presses de l'Université de Californie, (2023).
- [19] H. Cember et T. E. Johnson, et al « Introduction to Health Physics » Fourth Edition. McGraw Hill Professional, (1969).
- [20] F. Giammarile; « La loi de décroissance radioactive » Tutorat Santé Lyon Sud, (2017).
- [21] L. Gilli, R. Velez, et al. Baromètre IRSN : La perception des risques et de la sécurité par les Français (Doctoral dissertation, IRSN) (2020).
- [22] S. Degl'Innocenti, L. Lamia, et al. Nuclear Reactions of Astrophysical Interest. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, vol. 8, p. 691596, (2021).
- [23] N. Stan, et al « Étude et construction d'un tomographe TEP/TDM pour petits animaux, combinant modules phoswich à scintillateurs et détecteur à pixels hybrides », these, Université de la Méditerranée, Aix-Marseille Ii, Marseille, (2010).
- [24] J. H. Hubbell, et al « Electron positron pair production by photons: A historical overview », *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 75, n° 6, p. 614-623, (2006).

- [25] S. Nicol, Étude et construction d'un tomographe pour petits animaux, combinant modules phoswich à scintillateurs et détecteur à pixels hybrides. Diss. Université de la Méditerranée-Aix-Marseille II, (2010).
- [26] Y. Hatano, Y. Katsumura, et al « Charged particle and photon interactions with matter: recent advances, applications, and interfaces », (2010).
- [27] N. Beresford et al., « An INTEGRATED APPROACH to the assessment and management of environmental risks from ionising radiation ».
- [28] M. Sotiropoulou et H. Florou et al, « Radiological risk assessment in the terrestrial ecosystem: comparative study of two software tools used for dose rate calculations », Environmental Science and Pollution Research, vol. 27, n° 15, p. 18488-18497, mai (2020)
- [29] Bonzom, IRSN–crédits JM. "Guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvages.". [En ligne]. Disponible sur : <https://www.irsn.fr/rapport-dexpertise/guide-methodologique-pour-levaluation-du-risque-radiologique-pour-la-faune-et-la>, Consulté le : 3 mai (2023).
- [30] D. Sighomnou "Analyse et redéfinition des régimes climatiques et hydrologiques du Cameroun : perspectives d'évolution des ressources en eau." These doct Etat Univ Yaoundé I, Cameroun (2004).
- [31] P. Ele Abiama, P. Owono Ateba et al, « High background radiation investigated by gamma spectrometry of the soil in the southwestern region of Cameroon », J Environ Radioact, vol. 101, n° 9, p. 739-743, sept. (2010)
- [32] P. Ele Abiama, G. H. Ben-Bolie et al « Annual intakes of  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{228}\text{Ra}$  and  $^{40}\text{K}$  in staple foodstuffs from a high background radiation area in the southwest region of Cameroon », Journal of Environmental Radioactivity, vol. 110, p. 59-63, (2012).
- [33] C. Yu, Zielen, A. J. Cheng, et al. Manuel d'utilisation de la version 6 de RESRAD. Argonne National Lab., IL (États-Unis), (2001).
- [34] K. Beaugelin, et M. Simon-Cornu, Vers un guide méthodologique pour l'évaluation du risque radiologique pour la faune et la flore sauvage. In : 13ème congrès national de radioprotection. (2021).

- [35] A. CSORDÁS, M. NOVÁK, et al. Assessment of anthropogenic impacts on the radioecological status of the Bakony region, Hungary. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, p. 1-12, (2023).
- [36] L. Foulquier; Radioécologie, Origine des radioéléments : Dossier complet Techniques de l'Ingénieur ; [En ligne] Disponible sur : <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-genie-nucleaire-tiabn/archive-1/radioecologie-bn3908>  
Consulté le : 11 octobre (2023).
- [37] G. D. Souffit, L. Mohamadou et al, « Assessment of trace elements pollution and their potential health risks in the cobalt–nickel bearing areas of Lomié, East Cameroon, *Environ Monit Assess*, vol. 194, n° 2, p. 127, janv. (2022).
- [38] M. Čujić, et S. Dragović. Assessment of dose rate to terrestrial biota in the area around coal fired power plant applying ERICA tool and RESRAD BIOTA code. *Journal of environmental radioactivity*, vol. 188, p. 108-114, (2018).