

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

LISTE DES ABREVIATIONS

INTRODUCTION..... 1

PARTIE THEORIQUE

REMERCIEMENTS..... 1

Chapitre 1 : LA SPIRULINE..... 2

 1.1 Généralités sur la spiruline 2

 1.2 Morphologies typiques de Spiruline..... 5

 1.3Production de la spiruline 5

 1.4 Utilisations de la spiruline et recherche en cours 6

Chapitre 2 : LA RADIOACTIVITE..... 9

 2.1 Les radiations naturelles 9

 2.2 Radiation cosmique 9

 2.3 Radiation ambiante terrestre 10

 2.4 Les sources de rayons γ 11

 2.5 Eléments radioactifs 12

Chapitre 3:LES METAUX LOURDS ET LA FLUORESCENCE X..... 16

 3.1 Généralités sur le rayon X 16

 3.2 Caractéristiques du rayonnement X..... 16

3.3 Généralités sur les métaux et minéraux	16
Chapitre 4: ECHANTILLONNAGE ET MODE DE PRELEVEMENT	19
4.1 Echantillonnage	19
4.2 Mode de prélèvement	19
Chapitre 5 : SPECTROMETRIE GAMMA.....	22
5.1 Les sources de rayons γ	22
5.2 Les interactions des rayons γ avec la matière	22
5.3 Chaîne de détection	25
5.4 Efficacité et résolution d'un détecteur.....	27
5.5 Analyse spectrométrique	29
Chapitre 6 : ANALYSE PAR FLUORESCENCE X	33
6.1 Production des rayons X.....	33
6.2 Propriétés et utilisations des rayons X.....	34
6.3 Interaction de rayons X avec la matière	34
6.4 Chaîne de spectroscopie X	37
6.5 Spectre de raies X	38
6.6 Analyse quantitative	38
6.7 Analyse par fluorescence X à excitation directe	40
Chapitre 7 : RADIOACTIVITE DES SPIRULINES	46
7.1 Préparation des échantillons	46
7.2 Mesure	46

7.3 Résultats et interprétations.....	47
Chapitre 8 : TENEUR EN ELEMENTS LOURDS	52
8.1 Préparation des échantillons	52
8.2 Mesures.....	53
8.3 Résultats et interprétations.....	53
8.4 Récapitulation.....	59
CONCLUSION.....	61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
ANNEXES	

REMERCIEMENTS

- *Premièrement, je voudrais exprimer mes chaleureux remerciements à Dieu qui me guide dans tous mes chemins.*
- *C'est un plaisir pour moi de remercier Monsieur RAOELINA ANDRIAMBOLOLONA, Professeur Titulaire de Classe Exceptionnelle, Fondateur et Directeur Général de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar), qui a bien voulu m'accueillir dans son institut et qui, malgré ses multiples obligations, m'a prodigué des précieux conseils pendant la réalisation de ce travail et me fait le grand honneur d'en présider le jury.*
- *J'adresse également toute ma gratitude à Monsieur RAVELOMANANTSOA Solofoonorina Dieudonné, Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo. Il s'est acharné à m'instruire, à m'enseigner, à me conseiller durant mes travaux de recherche. La grande disponibilité, la rigueur et la justesse de ses corrections, son ouverture d'esprit et sa grande chaleur humaine ne sont que quelques unes des qualités qui font de lui une personne hors du commun. Il a bien voulu accepter d'être mon jury pour le présent travail.*

C'est difficile pour moi d'exprimer mes remerciements en phrases pour :

- *Monsieur RABESIRANANA Naivo, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, Chef du Département d'Analyses et Techniques Nucléaires de l'INSTN de m'avoir guidée dans mon travail et aidée à tout moment,*
- *Madame RALAIARISOA Haritiana Luciette, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo de m'avoir encadrée malgré ses occupations. Sans ses aides, ses conseils et ses commentaires, ce travail ne serait pas achevé.*
- *Je tiens à remercier sincèrement Madame RAKOTOZAFY RANDRIAMANIVO Lucienne, Docteur de troisième cycle, Chef du Département Technique de la Fluorescence X et Environnement (TFXE) et toute son équipe à l'INSTN-Madagascar, de leur accueil et leurs aides pendant le travail dans ce département qui m'a apporté un réel enrichissement sur la façon d'effectuer un travail de recherche.*
- *Je prends cette opportunité pour remercier Madame Vololonavalona BEMIARANA, Docteur à l'Institut Halieutique et des Sciences Marines, Université de Toliara qui m'a aidé aux travaux d'échantillonnage ; et aussi tout le personnel de l'INSTN*

surtout l'équipe du Département Analyses et Techniques Nucléaires qui est devenue partie intégrante de ma vie quotidienne en recherche. Je n'oublierai jamais les moments agréables que j'ai partagés avec eux.

➤ *Enfin, je remercie mes parents, mon oncle RAJAONESA Britto et toute ma famille qui m'ont soutenus financièrement et moralement durant toutes mes études ainsi que, mes amis et toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de mes études.*



LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Composition générale de la spiruline	3
Tableau 2: Autres composants	4
Tableau 3 : Les différentes radiations	11
Tableau 4 : Familles radioactives.....	13
Tableau 5 : Norme journalière des éléments indispensables	18
Tableau 6 : Matériels utilisés	19
Tableau 7 : Origine des échantillons	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 8 : Sources de rayon γ pur	22
Tableau 9 : LD	42
Tableau 10 : Fichier d'étalonnage.....	43
Tableau 11 : Les éléments de références.....	45
Tableau 12 : Les paramètres de mesure pour chacun des échantillons.....	47
Tableau 13 : Valeur de l'activité pour le potassium	48
Tableau 14 : Valeur des activités pour les éléments de la famille de l'U-238.....	49
Tableau 15 : Valeur des activités pour les éléments de la famille du Th-232.....	50
Tableau 16 : Comparaison des concentrations de l'IPE221	54
Tableau 17 : Comparaison des concentrations de l'IPE214.....	55
Tableau 18 : Les éléments trouvés dans les échantillons épais.....	56
Tableau 19 : Comparaison des résultats du laboratoire de pharmacie France et celle de l'INSTN Madagascar.	60

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Morphologies typiques de Spiruline	5
Figure 2 : Cultures de la spiruline en milieu artificiel et en milieu naturel.....	6
Figure 3 : Différentes formes de la spiruline pour ses utilisations.....	7
Figure 4 : Famille de l'uranium-238	14
Figure 5 : Famille du thorium-232	15
Figure 6 : pH-mètre	20
Figure 7 : Effet photoélectrique.....	23
Figure 8 : Effet Compton.....	24
Figure 9: Création de paire	25
Figure 10 : Schéma simplifié de la chaîne de spectrométrie gamma	25
Figure 11 : Courbe d'étalonnage en énergie.....	30
Figure 12 : Courbe d'étalonnage en efficacité	32
Figure 13 : Tube à rayon X	33
Figure 14 : Atténuation des rayons X.....	35
Figure 15 : Emission des raies K de fluorescence.....	36
Figure 16 : Chaîne de spectrométrie X.....	37
Figure 17 : Module de traitement de données	38
Figure 18 : Courbe de la variation de la limite de détection en fonction du numéro atomique	43
Figure 19 : Les matériels utilisés lors de la préparation des échantillons	44
Figure 20 : Activité du potassium pour chaque échantillon en $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$	49
Figure 21 : Activité des éléments de la famille de l'uranium	50
Figure 22 : Activité des éléments de la famille du Thorium	51
Figure 23 : Exemple de pastille d'un échantillon étiqueté	52
Figure 24 : Les échantillons de référence préparés	53
Figure 25 : Histogramme de variation de concentration du potassium et du calcium pour chacun des éléments	57
Figure 26 : Histogramme de concentration du fer pour chaque échantillon	58
Figure 27 : Histogramme de concentration des oligo-éléments.....	58
Figure 28 : Histogramme de concentration du cuivre et du zinc.....	59

LISTE DES ABREVIATIONS

ATN: Analyses et Techniques Nucléaires

HPGe: High Purity of Germanium

INSTN: Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires

LD: Limite de Détection

MCA: Multi Channel Analyser

TFXE: Technique de Fluorescence X et l'Environnement

XRF: X-Ray Fluorescence



INTRODUCTION

Tant sur la terre que dans la mer, on a une grande biodiversité; il y a 1500 espèces, y compris la spiruline dont on distingue 36 espèces. C'est une algue bleu-vert cyanobactérie de longueur à peu près 0.3mm, son nom botanique est *spiruline plantensis*. Elle existe depuis plus de trois (3) milliards d'année.

Lorsque les Européens arrivent en Amérique centrale, ils découvrirent que les Aztèques tiraient d'un lac, près de Mexico, une sorte de « boue » verte à haute valeur nutritive. C'était *la spiruline*. On sait aussi qu'en Afrique, certains peuples du Sahara en récoltent depuis très longtemps et, pour Madagascar, la découverte à Toliara dans la région Sud-ouest a été faite en 1994. Cependant, les travaux de recherche et la mise en culture n'ont été menés par l'équipe de l'Institut Halieutique et Science Marine qu'en 2002.

Depuis les années 1970, la spiruline a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches.

Le travail présenté dans ce mémoire qui a pour thème: « La radioactivité de la spiruline et ses éléments lourds », a comme objectif de déterminer les éléments radioactifs par la spectrométrie gamma ainsi que les éléments lourds dans la spiruline par la spectrométrie X. En effet, la spiruline a un caractère qui accumule les éléments lourds.

Les analyses spectrométriques ont été effectuées au sein de l'INSTN Madagascar (Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires) dans les laboratoires du Département Analyses et Techniques Nucléaires (ATN) et du Département Technique de Fluorescence X et l'Environnement (TFXE).

Ce travail est divisé en trois grandes parties: en premier lieu, la partie théorique parlera de la spiruline, de la radioactivité, ainsi que de généralités sur les métaux et les minéraux. En second lieu vient la méthodologie qui abordera les techniques d'analyses par spectrométrie gamma et par technique de fluorescence X. En dernier lieu, la partie expérimentale présentera les résultats d'analyses et leurs interprétations qui feront l'objet d'une synthèse dans la conclusion générale.



PARTIE THEORIQUE

Chapitre 1 :LA SPIRULINE

1.1 Généralités sur la spiruline

La spiruline est une micro-algue qui change de forme en fonction des caractéristiques physiques et chimiques du milieu dans lequel on la trouve. Mais on remarque aussi que dans un même milieu les formes peuvent varier. C'est peut-être l'origine de la confusion entre les termes *Spirulina* et *Arthrosphaera*. Ce dernier est une cyanobactéries filamentueuse qui a la même caractéristique que la spiruline.

La spiruline a une longueur moyenne de 250µm quand elle possède 7 spires. Elle est composée de filaments mobiles (de 10 à 12µm de diamètre) non ramifiés et enroulés en spirales, qui ressemble à un minuscule ressort à boudin, d'où le nom de "Spiruline". On trouve cependant des spirulines ondulées et parfois droites (cas d'Antananarivo).

1.1.1 Composition générale

La composition chimique de la spiruline varie en fonction de la souche de spiruline, mais aussi selon les procédés de culture utilisée (moment de la récolte, mode de séchage, enrichissement des intrants...). Le tableau 1 présente cette composition chimique .

1.1.2 Autres composants

Le tableau 2 (1^{ère} et 2^e parties) illustre les autres composants de la spiruline .

Tableau 1 :Composition générale de la spiruline

	Minimum	Maximum
Humidité	4 %	7 %
Cendre	6.4 %	9.0 %
Protéines	60.0 %	71.0 %
Fibre brute	0.1 %	0.9 %
Xanthophylles	1.4 g.kg ⁻¹	1.8 g.kg ⁻¹
β-carotène	1.5 g.kg ⁻¹	1.9 g.kg ⁻¹
Chlorophylle-a	6.1 g.kg ⁻¹	7.6 g.kg ⁻¹
Calcium	1045 mg.kg ⁻¹	1315 mg.kg ⁻¹
Phosphore	7617mg.kg ⁻¹	8942mg.kg ⁻¹
Fer	475mg.kg ⁻¹	580mg.kg ⁻¹
Magnésium	1410mg.kg ⁻¹	1915mg.kg ⁻¹
Manganèse	18mg.kg ⁻¹	25mg.kg ⁻¹
Zinc	27mg.kg ⁻¹	39mg.kg ⁻¹
Potassium	13305mg.kg ⁻¹	15400mg.kg ⁻¹
Hydrates de carbone totaux	13.0 %	16.5 %

Tableau 2 :Autres composants1^{ere} partie

	Minimum	Maximum
Lipides totaux	6.0 %	7.0 %
Palmitoleique	1490 mg.kg ⁻¹	2035 mg.kg ⁻¹
Palmitolenique	1750 mg.kg ⁻¹	2565 mg.kg ⁻¹
Heptadécanonique	90 mg.kg ⁻¹	142 mg.kg ⁻¹
Oléique	1970 mg.kg ⁻¹	3009 mg.kg ⁻¹
Linoléique (essentiel)	10920 mg.kg ⁻¹	13784 mg.kg ⁻¹
linoléique (ess)	8750 mg.kg ⁻¹	11970 mg.kg ⁻¹
linoléique	699 mg.kg ⁻¹	7000 mg.kg ⁻¹

Source : Colloque international <<Spiruline et Développement>> [1]

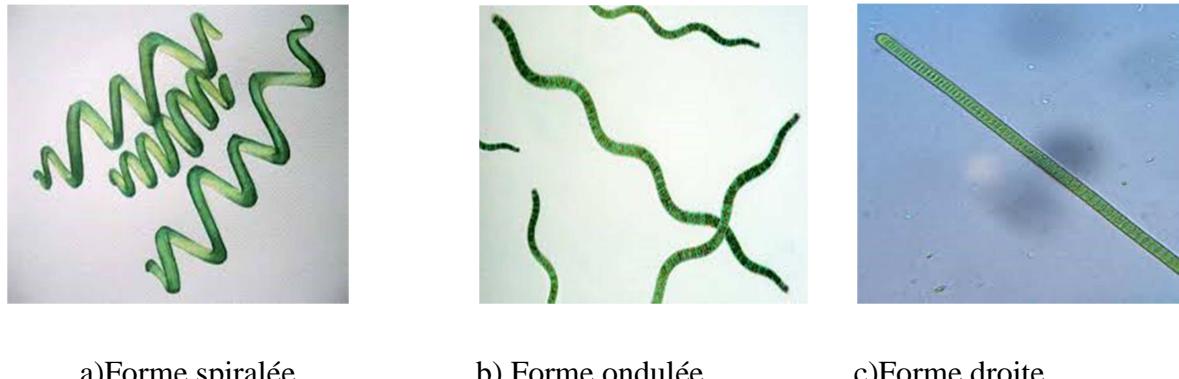
2^e partie

Vitamine	Moyenne mg.kg⁻¹	Vitamine	Moyenne mg.kg⁻¹
Biotine (H)	0.4	Tocopherol	190
Cyanocobalamine (B12)	0.4	βCarotene(pro-A)	1700
Inositol	350	Acide ascorbique (C)	90
Pyridoxine (B6)	3	Acide folique	0.5
Riboflavine (B2)	40	Acide nicotinique (PP)	118
Thiamine (B1)	55	Ca-Pantothenate	11

Source : Colloque international <<Spiruline et Développement>> [1]

1.2 Morphologies typiques de Spiruline

Comme on l'a déjà dit auparavant, l'ordre de grandeur de la longueur de la spiruline est en μm . En utilisant un microscope, on a pu voir qu'il y a trois formes de spiruline qu'on appelle morphologies typiques. La spiruline a généralement une forme spiralée (type de Toliara Madagascar) comme son nom l'indique mais on voit aussi une forme ondulée (type de Paracas Pérou) et une forme droite (type d'Antananarivo Madagascar). Les spiralées flottent plus que les ondulées et les droites, ce qui permet éventuellement leur séparation. La figure 1 montre les morphologies typiques de Spiruline.



a) Forme spiralée

b) Forme ondulée

c) Forme droite

Figure 1: Morphologies typiques de Spiruline

Les spiralées filtrent mieux et leur biomasse fait la boule facilement sur le filtre, du moins lorsque le milieu de culture est assez pur. Les spiralées ont plus tendance à former des peaux et grumeaux verts flottants, surtout à pH bas et en l'absence d'ammonium, ce qui est un inconvénient. La teneur en matière sèche dans la biomasse essorée prête au séchage est plus élevée chez les ondulées et les droites que chez les spiralées, ce qui est un avantage. La biomasse des spiralées sèches plus facilement. Les ondulées n'ont pratiquement pas tendance à devenir droites, du moins dans les conditions d'exploitation normales. Les ondulées résistent au pompage par pompe centrifuge, alors que les spiralées se cassent. Les ondulées résistent mieux au choc osmotique (on peut pratiquement laver la biomasse avec de l'eau douce sans que les cellules n'éclatent).[\[2\]](#)

1.3 Production de la spiruline

La spiruline est une algue marine mais on la trouve aussi dans les étangs de la briqueterie, dans une petite lagune et dans le lac au nord-ouest de Toliara. Cependant, on peut faire une culture dans un bassin ou sous serre pour la protéger contre le froid, l'évaporation, les insectes et la poussière, mais aussi contre les pluies diluviales comme l'orage qui peuvent faire déborder les bassins et donc provoquer une perte ou dilution du milieu de culture.

La température idéale pour la spiruline est 37 °C, elle meurt à 43 °C.

La reproduction de la spiruline se fait par division des filaments, elle est donc asexuée. La vitesse de multiplication est proportionnelle à la température; lorsque cette dernière est inférieure ou égale à 20°C, la croissance est stoppée.



a) Culture artificielle

b) Culture naturelle

Figure 2 : Cultures de la spiruline en milieu artificiel et en milieu naturel

1.4 Utilisations de la spiruline et recherche en cours

1.4.1 Utilisations

La lutte contre la malnutrition est la principale utilisation de la spiruline à Madagascar mais il y a aussi d'autres utilisations :

- en aquariophilie et en aquaculture pour favoriser la croissance des poissons et des crevettes, renforcer les défenses immunitaires des poissons d'élevage, améliorer la fertilité et stimuler la coloration des poissons d'ornement tels le *Xiphophorushelleri*.

- dans l'industrie agroalimentaire, elle est vendue pour la nutrition des animaux (chats, chiens, chevaux, vache et taureau) mais aussi dans l'alimentation humaine comme colorant naturel (chewinggums, sorbets, sucreries, produits laitiers, boissons). La phycocyanine est un des rares pigments naturels de couleur bleue.

- en cosmétologie, pour fabriquer des masques cryogéniques et de la crème anti-âge, par son action sur le renouvellement cellulaire.

N.B : Les personnes souffrant de phénylcétonurie doivent éviter la spiruline, car comme tous les aliments renfermant des protéines, elle contient de la phénylalanine.

1.4.2 Différents types de présentation de la spiruline

La spiruline est présentée sous différentes formes : en poudre ou en comprimé, en gélule ...etc, pour ses utilisations.

❖ Sur les places commerciales :



a) Spiruline en poudre



b) Nouilles de spiruline

❖ Sur les espaces médicaux :



c) Gélules de spiruline



d) Spiruline en comprimés

Figure 3 :Différentes formes de la spiruline pour ses utilisations

1.4.3 Recherche en cours

Dans le cadre du programme MELISSA, l'agence spatiale européenne s'est intéressée à la Spiruline qu'elle intégrerait dans un écosystème artificiel fermé dans le compartiment photo-autotrophe, d'une part pour équilibrer la ration alimentaire, et d'autre part pour régénérer l'atmosphère par photosynthèse.

Chapitre 2 : LA RADIOACTIVITE

La radioactivité est une réaction nucléaire spontanée. Il y a deux types de radioactivité: la radiation naturelle et la radiation artificielle.

2.1 Les radiations naturelles

La radioactivité naturelle ambiante à laquelle l'humanité a été toujours exposée a un certain nombre de composants. Chaque composant varie en fonction de l'espace et du temps. Les deux (2) principaux composants proviennent des sources de radiation extraterrestre ou radiation cosmique et des radionucléides présents dans l'écorce terrestre et dans l'atmosphère.

2.2 Radiation cosmique

2.2.1 Rayonnement primaire

Il est à son origine en partie à l'intérieur de notre galaxie et en partie à l'extérieur. Ces rayonnements cosmiques primaires d'origine extraterrestre ont une composition bien connue au-dessus de 10^{12} eV. Le rayonnement primaire est constitué de 85% de protons; 12.5% de rayon alpha (de hélions); 1.5% de composantes lourdes ($Z > 92$) et 1% de négatons. Il est accompagné d'un bruit de fond constitué par des photons et des neutrinos.

2.2.2 Rayonnement secondaire

Les particules primaires (proton, électron,...) interagissent avec les noyaux présents dans la couche supérieure de l'atmosphère et produisent le rayonnement secondaire reçu au niveau du sol. Ce sont surtout les photons qui interagissent pour donner des pions: π^+ , π^- , π^0 . Ces pions interagissent à leur tour et créent des gerbes: les pions chargés π^+ , et π^- créent des gerbes nucléaires constituées par des protons, des neutrons et des muons. Les pions neutres créent des gerbes électromagnétiques constituées par des négatons, des positons, des photons ainsi que les neutrinos et antineutrinos correspondants.

Au niveau de la mer, il n'existe plus de pions ou d'autres particules à durée de vie relativement courte. On trouve des muons d'énergie moyenne de 2GeV, des neutrons et des négatons ainsi que des photons et quelques protons.

2.3 Radiation ambiante terrestre

Les radionucléides naturels dans l'environnement de la Terre peuvent être divisés en deux (2) classes : primordiaux et cosmogéniques.

2.3.1 Radionucléides cosmogéniques

Ils sont produits quand des nucléons cosmiques de haute énergie interagissent avec des atomes cibles dans l'atmosphère, la terre ou la biosphère, et aussi par les procédés pour obtenir des isotopes radioactifs.

Les radionucléides cosmogéniques ont été détectés dans le sol, la glace polaire, les sédiments, l'atmosphère et dans l'homme. En particulier, les quatre (4) radionucléides les plus fréquents sont: ^{14}C , ^3H , ^{22}Na et ^7Be .

Les essais nucléaires dans l'atmosphère ont fait augmenter jusqu'à 50 fois les nucléides précédents.

2.3.2 Radionucléides primordiaux

Il y a 4.5 milliards d'années, la plupart des nucléides étaient radioactifs. Une majorité d'entre eux, ce sont désintégrés pour donner des noyaux stables. Mais certains avaient des périodes de désintégration suffisamment longues pour que nous puissions mesurer encore leur radioactivité.

Sur les 325 nucléides naturels, environ 50 sont radioactifs. Ce sont des radionucléides primordiaux.

Une minorité provient de divers éléments de masse moyenne. Ce sont des nucléides dont la période est comparable à l'âge de la Terre et dont les désintégrations conduisent à un noyau stable, par exemple le potassium ^{40}K de période $T=1,28 \ 10^9$ ans et le rubidium ^{87}Rb de période $T=4,47 \ 10^{10}$ ans.

2.4 Les sources de rayonsγ

Les rayons gamma sont des rayonnements électromagnétiques ionisants obtenus par la désintégration d'un noyau atomique. Il n'a pas de masse mais il est de haute énergie et constitué de photons comme la lumière.

Nous avons le tableau 3 suivant, montrant les différentes radiations, parmi lesquelles le rayon γ et le rayon X :

Tableau 3 : Les différentes radiations

CLASSE DE RAYONNEMENT		LONGUEUR D'ONDE λ (en nm)	FREQUENCE ν (en Hz)
Domaine Hertzien	Ondes radio	$> 10^9$	$< 3 \cdot 10^8$
	Micro-ondes	10^9 à 10^6	$3 \cdot 10^8$ à $3 \cdot 10^{11}$
Infrarouge		10^6 à $7 \cdot 10^2$	$3 \cdot 10^{11}$ à $4,3 \cdot 10^{14}$
Lumière visible (rouge à violet)		$7 \cdot 10^2$ à $4 \cdot 10^2$	$4,3 \cdot 10^{14}$ à $7,5 \cdot 10^{14}$
Ultraviolet		$4 \cdot 10^2$ à 10	$7,5 \cdot 10^{14}$ à $3 \cdot 10^{16}$
Rayons X		10 à $0,03$	$3 \cdot 10^{16}$ à 10^{19}
Rayons γ		$< 0,03$	$> 10^{19}$

(Les valeurs figurant dans ce tableau sont arrondies)

Ces radiations, s'étendent des rayonnements γ à très courte longueur d'onde ($\lambda = 0,001$ nm) aux ondes radioélectriques ($\lambda = 1$ km). Les rayons X occupent un domaine de $0,03$ nm à 10 nm. Bien qu'il n'y ait pas de limites bien déterminées, on sait que la longueur d'onde d'un rayon X est nettement inférieure aux dimensions d'un atome.

2.5 Eléments radioactifs

2.5.1 Radionucléides naturels

Les familles radioactives du thorium et de l'uranium contiennent les radioéléments naturels présents dans les spirulines comme le thorium-230, le potassium-40, le plomb-212 et le plomb-214.

Le potassium, très répandu dans la nature et présent dans tout organisme vivant, est constitué d'un mélange de 99,998 % de potassium stable non radioactif et de 0,012 % de potassium-40 radioactif.

L'uranium naturel est constitué d'un mélange de 99,3 % d'uranium-238 et de 0,7 % d'uranium-235, tous deux éléments radioactifs.

2.5.2 Classification des radionucléides naturels

Les radionucléides naturels sont classés en trois groupes.

- Les radionucléides de très longue période radioactive : leur période radioactive est très longue, de même ordre de grandeur que l'âge de la Terre (4,5 milliard d'années). Jusqu'à nos jours, ces noyaux n'ont pas encore eu le temps de se désintégrer en totalité. Ces nucléides sont généralement à l'origine d'une Famille radioactive. En effet, leur désintégration donne des noyaux fils, eux-mêmes radioactifs, qui se désintègrent en cascade pour aboutir à un nucléide stable.
- Les radionucléides de période radioactive courte : ce sont des noyaux fils des radionucléides précédents.
- Les radionucléides formés par impact : leur formation est provoquée par l'impact, sur un noyau stable, de particules cosmiques ou de particules issues de la désintégration de l'un des nucléides précédents.

Remarque

Tous les éléments de numéros atomiques supérieurs à 83 sont radioactifs c'est-à-dire les éléments qui se trouvent derrière le bismuth (Bi) dans le tableau périodique.

2.5.3 Familles radioactives

Certains isotopes radioactifs subissent plusieurs désintégrations successives avant d'atteindre une forme stable. L'isotope initial est appelé parent ou géniteur, les intermédiaires sont appelés progénitures et le dernier est appelé produit terminal. [3]

Il y a quatre grandes familles radioactives mais deux seulement sont utiles dans notre étude et sont présentées dans le tableau 4 puis détaillées dans les figures 4 et 5 : ce sont les familles de l'uranium 238 et du thorium 232.

Tableau 4 :Familles radioactives

Nom	Type	Noyau père	Période	Produit final
Uranium	4n+2	U-238	4.46 10^9 ans	Pb-206
Thorium	4n	Th-232	1.4 10^{10} ans	Pb-208

2.5.4 Radionucléides artificiels

Des réactions nucléaires mettant en jeu la désintégration des noyaux atomiques permettent d'obtenir des noyaux radioactifs inconnus dans la nature. On dit que ces éléments ont une radioactivité artificielle.

Les radionucléides artificiels sont nombreux et ils sont dus à l'activité humaine. On peut citer les essais nucléaires aériens et terrestres, les accidents du nucléaire civil. Par exemple l'accident de Tchernobyl en 1986 qui est aujourd'hui considéré comme l'accident de référence.

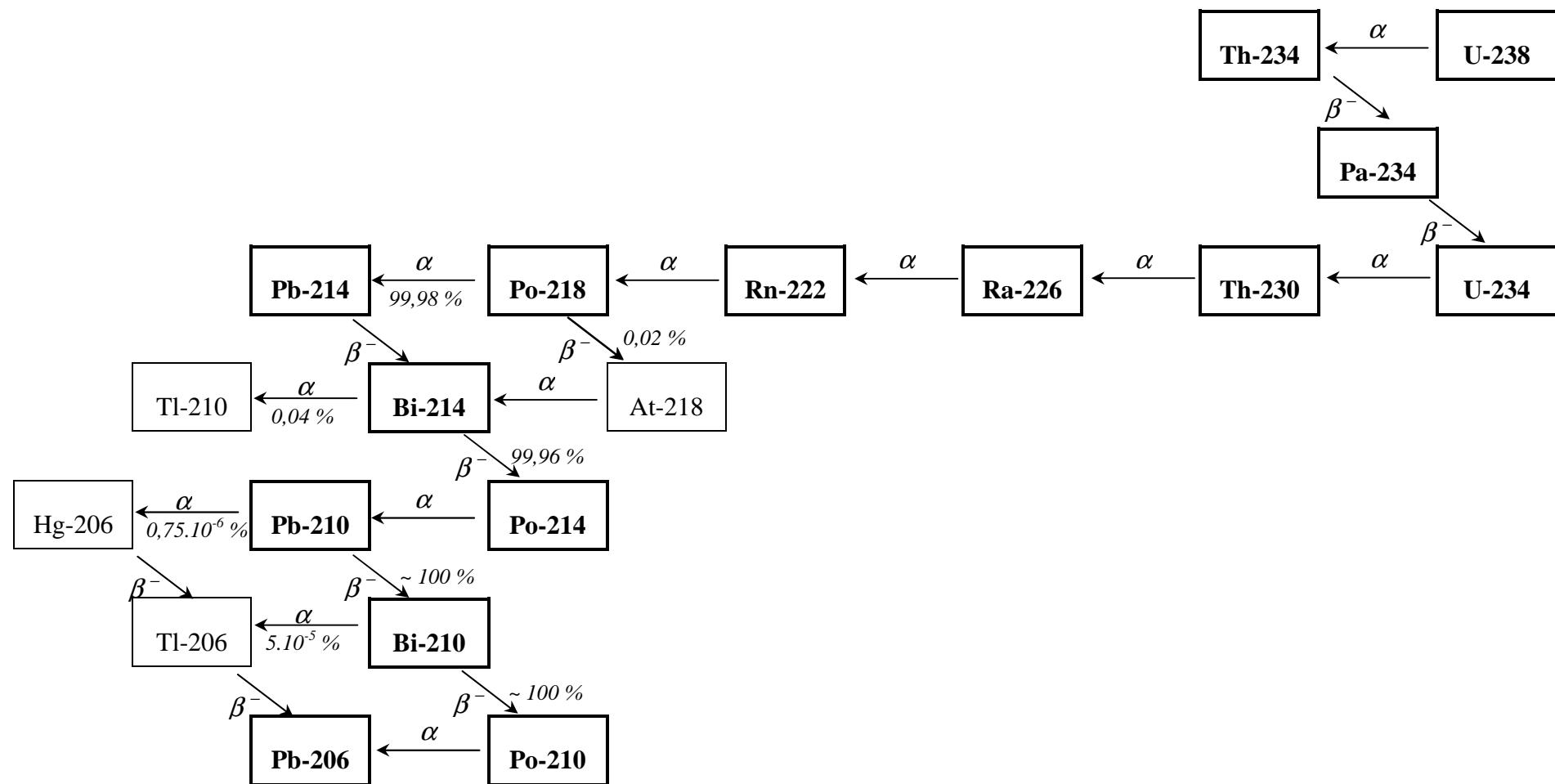


Figure 4 : Famille de l'uranium-238

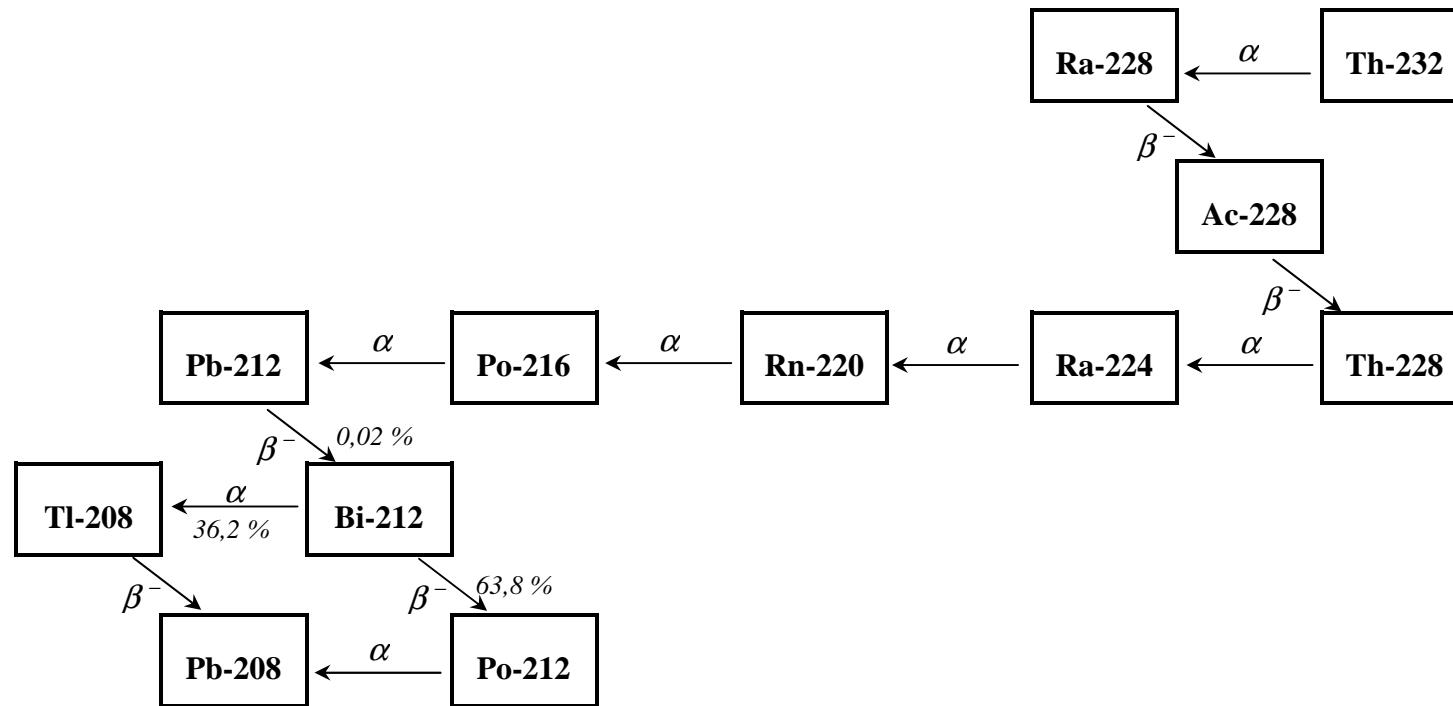


Figure 5 : Famille du thorium-232

Chapitre 3:LES METAUX LOURDS ET LA FLUORESCENCE X

3.1 Généralités sur le rayon X

Quand un atome est mis sous l'action d'une radiation incidente d'énergie suffisante, un négaton de sacouche interne est éjecté. L'atome se trouve alors dans un état instable dit excité. Pour revenir à l'état stable, un négaton d'une couche plus externe vient combler le trou laissé par le négaton éjecté. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'un rayonnement X qui est caractéristique de l'élément en question. Ces raies sont appelés raies de fluorescence X.

L'analyse par fluorescence X ou la spectrométrie XRF qui est l'ensemble des mesures effectuées sur ces raies XRF, fut née après la découverte du rayonnement X par un physicien WILHELM C. Röntgen à la fin de l'année 1895.

3.2Caractéristiques du rayonnement X

Le rayon X est une onde électromagnétique de basse énergie, de haute fréquence et de courte longueur d'onde dont le domaine se situe entre l'ultra violet et le rayonnementγ. (Voir le tableau 3)

Les rayonnements X se propagent avec la vitesse de la lumière. L'énergie est reliée à la fréquence par l'expression suivante :

$$E=h\nu = h\frac{c}{\lambda}$$

Avec λ : longueur d'onde en m

$c= 3. 10^8 \text{ m.s}^{-1}$: célérité de la lumière

$h=6.63. 10^{-34} \text{ J.s}$: constante universelle de Planck

3.3Généralités sur les métaux et minéraux

La spiruline est utilisée comme complément alimentaire. L'aliment est à la fois source de vie en tant que pourvoyeur des nutriments indispensables au développement et source de déséquilibres graves lorsqu'il n'est pas utilisé avec discernement.

Le présent travail concerne la détermination quantitative des minéraux et les métaux existants dans la spiruline par la méthode XRF classique. Les minéraux et les métaux apportés par les aliments sont classés selon les besoins. Un certain nombre de ces substances sont indispensables au bon fonctionnement de l'organisme humain, entrant dans l'équilibre et les mécanismes biologiques. Ce sont par exemple le calcium (Ca), le cobalt (Co), le chrome (Cr), le manganèse (Mn) le cuivre (Cu), le magnésium (Mg), le potassium (K), le sodium (Na), le sélénium (Se), le fer (Fe) et le zinc (Zn).

Généralement, ces éléments se présentent dans les aliments destinés à la consommation humaine à de quantité faible mais soigneusement dosés. Par contre, ils deviennent toxiques si leurs teneurs augmentent de façon incontrôlée.

Dans les métaux toxiques figurent les métaux lourds.

On considère comme métal lourd tout métal de densité supérieur à 5, de numéro atomique élevé ($Z \geq 92$) et présentant un danger pour l'environnement et ou pour l'homme.

Dans les sciences environnementales, les métaux lourds associés aux notions de pollution et de toxicité sont généralement : l'arsenic (As), le cadmium (Cd), le chrome (Cr), le cuivre (Cu), le manganèse (Mn), le mercure (Hg), le nickel (Ni), le plomb (Pb) et le zinc (Zn).

Le tableau 5 présente quelques valeurs de taux journaliers des minéraux dont le corps humain a besoin.

Tableau 5 :Norme journalière des éléments indispensables

Minéraux	Besoin quotidien en mg/kg du poids corporel
Potassium	45
Calcium	900
Magnésium	420
Phosphore	800
Fer	10
Zinc	15
Cuivre	2,5
Manganèse	4
Chrome	0,125
Cadmium	0,007
Arsenic	0,015
Plomb	0,025

Source: CodexStandard 193-1995[5]

Tous les oligo-éléments sont indispensables et interviennent dans toutes fonctions vitales. On comprend aisément qu'un déficit d'un seul et, à fortiori, de plusieurs oligo-éléments ou leurs ingestions peuvent avoir des conséquences néfastes sur les performances et la santé de l'homme. Leurs impacts sanitaires sont présentés dans l'annexe 1.



PARTIE

MÉTHODOLOGIQUE

Chapitre 4: ECHANTILLONNAGE ET MODE DE PRELEVEMENT

4.1 Echantillonnage

Les conditions de vie de la spiruline sont favorisées par la nature saline des lacs saumâtre ainsi que par le climat de la région du Sud-ouest de Madagascar qui est ni trop chaud ni trop froid. C'est pourquoi à Madagascar, la région de Toliara contient la plus grande partie de culture de cette algue bleue. Les résultats d'une étude de prospection fait en 1995, ont révélé l'existence des gisements naturels de spiruline sur un diamètre d'environ 50km autour de la ville de Toliara.

Mais à cause des difficultés qu'on a rencontrées pour faire la collecte dans la mer, il nous a fallu prélever la plupart des échantillons sur les cultures.

4.2 Mode de prélèvement

Le tableau 6 présente les matériels utilisés lors du prélèvement des échantillons.

Tableau 6 : Matériels utilisés

Matériel	Fonction
Refractomètre	mesure de la salinité
pH-mètre (Voir la figure 6)	mesure le pH
Luxe mètre	mesure la lumière
Une autopompe	aspire l'eau du lac
Groupe électrogènes	alimente l'autopompe
Tamis de différents maillages (200µm, 50µm, 30µm)	filtre la spiruline
Spatule en plastique	agit l'eau et ramasse la spiruline sur le tamis
Cuve ou Seau plastique	collecte la boue de la spiruline
Balance électronique	pèse l'échantillon
Bocal en verre ou en plastique	transporte de la spiruline



Figure 6 : pH-mètre

Aspiration et filtration: On aspire l'eau contenant de la spiruline par une autopompe électrique. Un tuyau plastique la verse directement sur les filtrations. Dans un premier temps, pour éliminer les impuretés (insectes, grumeau), un filet de 200 µm de maillage est utilisé. Vient ensuite le second filet de 50 µm pour récolter la spiruline. Ce dispositif de récolte est supporté par un cadre de bois muni d'un tamis moustiquaire.

Essorage et Presse : l'essorage consiste à enlever une partie de l'eau de la spiruline récoltée. La pâte plus ou moins molle est transférée dans une étoile de 30µm de maillage. Le manipulateur qui porte des gants stériles presse la pâte à travers la toile pour enlever l'eau.[\[11\]](#)

Premier prélèvement

Le premier échantillon codifié SP1 est prélevé dans une lagune située à 15 km au nord de la ville de Toliara gérée par l'équipe de SPIRNAM. Le prélèvement a été fait le 21 février 2014 à 8h du matin.

Deuxième prélèvement

Pour l'échantillon SP2, la collecte de spiruline a été faite le 22 février 2014 à 7h30 du matin au SPIRUSUD, dans le bassin de culture au campus universitaire Maninday Toliara. Le bassin est fermé pour garder la chaleur et il n'y a donc pas d'échange avec la fraîcheur de la nuit. Avant son ouverture, on a prélevé la température du milieu de culture à 6h du matin et on a trouvé 31°C et à cette même heure, la température extérieure (ambiante) est 25° C. Puis, on a préparé les matériels : appareils de mesure, tamis,.... Et à 7h30, on a relevé les différents paramètres :

-Température ambiante : 28° C

-Température au milieu de culture : 29,1°C

- Salinité au milieu de culture : 5 %

- Lumière = Valeur au luxe-mètre * 100 *0.9 pour ciel dégagé

= Valeur au luxe-mètre * 100 *0.8 au sombre

Lors de prélèvement, le ciel était dégagé et le luxe-mètre a donné 280, donc on a:
lumière = 25200

-Concentration de la spiruline = 2 cm

Cas des autres échantillons

Les échantillons SP5, SP6 et SP7 sont obtenus en collaboration avec les associations ou les personnels qui font la culture de la spiruline comme l'Eco Parc d'Ilay et pour le reste (SP3, SP4, SP8), on l'a acheté comme un simple consommateur.(Voir le tableau 7)

Tableau 7:Origine des échantillons

Code	Lieu de provenance	Type de culture
SP1	SPIRNAM Toliara	Milieu naturel
SP2	SPIRUSUDToliara	Milieu artificiel
SP3	SPIRMENMorondava	Milieu artificiel
SP4	SPIRMENMorondava	Milieu artificiel
SP5	EcoParcIlayTANA	Milieu artificiel
SP6	EcoParcIlayTANA	Milieu artificiel
SP7	EcoParcIlayTANA	Milieu artificiel
SP8	Bevalala TANA	En plein air

Chapitre 5 : SPECTROMÉTRIE GAMMA

5.1 Les sources de rayons γ

Les émetteurs γ purs sont des isomères nucléaires qui conduisent à un produit stable et qui sont représentés dans le tableau 8.

Tableau 8 : Sources de rayon γ pur

Noyau émetteur	Période	Energie (en keV)	Noyau produit
$^{22}_{11}Na$	2.6 ans	1274	$^{22}_{10}Ne$
$^{51}_{24}Cr$	27.7 jours	320	$^{51}_{23}V$
$^{57}_{27}Co$	272 jours	{ 14.4 122.1}	$^{57}_{26}Fe$
$^{60}_{27}Co$	5.27 ans	{ 1173.2 1332.5}	$^{60}_{28}Ni$
$^{125}_{53}I$	60.25 jours	35.5	$^{125}_{52}Te$
$^{137}_{55}Cs$	30 ans	661.6	$^{137}_{56}Ba$

5.2 Les interactions des rayons γ avec la matière

La détection du rayonnement gamma est basée sur sa manière d'interagir avec la matière. Il y a 12 modes d'interaction possibles pour le rayonnement γ , mais pour l'énergie entre de 10 keV à 10 MeV, trois (3) sont importants, ce sont: l'effet photoélectrique; l'effet Compton et la production de paire.

5.2.1 L'effet photoélectrique

C'est pour les photons incidents de basse énergie ($20 \text{ keV} < E < 100 \text{ keV}$) et pour les nucléides de numéro atomique Z élevé.

Le rayon γ transfère toute son énergie à un électron de recul. Dans ce cas, le photon disparaît complètement et un photoélectron est éjecté de la couche d'un atome.(Voir la figure 7)

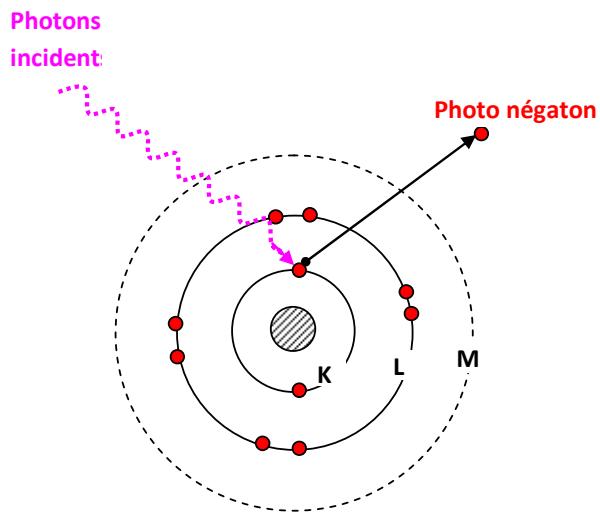


Figure 7 : Effet photoélectrique

La probabilité d'absorption photoélectrique est proportionnelle à Z , soit :

$$\alpha \frac{Z^n}{(h\nu)^3}$$

$3 \leq n \leq 4$ selon la région d'intérêt d'énergie

$h\nu$ = énergie (en J)

$h=6.62 \cdot 10^{-34}$ J.s: constante de Planck

ν : Fréquence du photon incident (en Hz)

L'absorption totale ne peut avoir lieu que par des électrons liés.

5.2.2 L'effet Compton

L'effet Compton a lieu pour toutes les énergies sauf pour les énergies faibles ($E\gamma = 150$ keV) et les plus élevées ($E\gamma = 8.5$ MeV), donc il est prédominant pour les photons d'énergie intermédiaire.

Une seule partie de l'énergie du photon γ est transférée à un électron libre de l'atome, et il y a création d'un photon diffusé d'énergie $E\gamma$. (Voir figure 8)

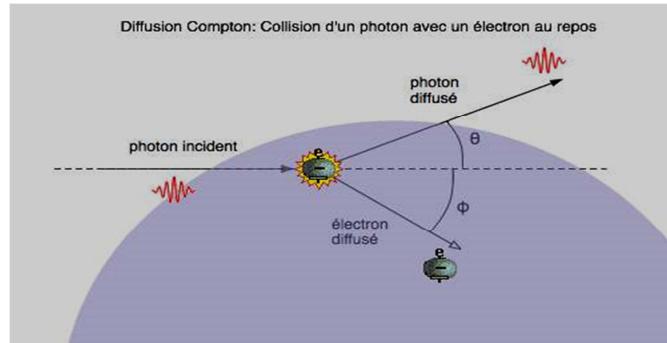


Figure 8 : Effet Compton

En utilisant la loi de conservation des énergies et des impulsions, on a :

$$E_\gamma = \frac{E_0}{1 + \alpha(1 - \cos \theta)} \text{ avec } \alpha = \frac{E_0}{mc^2}$$

Où E_0 : énergie du photon incident (eV)

m : masse d'électron (kg)

c : célérité de la lumière dans le vide (m.s^{-1})

θ : l'angle de diffusion (radian)

La probabilité de cet effet augmente pour le détecteur de volume large. [3]

5.2.3 La production de paire

Par la conservation de masse et d'énergie, il s'ensuit que le photon incident doit avoir au moins 1.02 MeV car il dépense beaucoup d'énergie pour produire la paire de négaton et positon. (Voir figure 9)

L'énergie de paire est $h\nu$, telle que :

$$h\nu = (T_+ + m_0 c^2) + (T_- + m_0 c^2) \quad \text{avec} \quad m_0 c^2 : \text{énergie au repos}$$

T_+ et T_- sont les énergies cinétiques respectives du négaton et du positon.

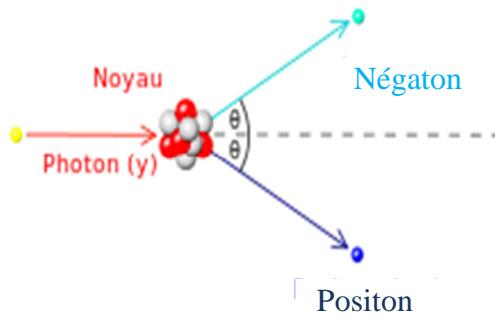


Figure 9: Création de paire

Ce processus ne peut s'effectuer que dans le domaine créé par des particules chargées [6- 7]

Faisant suite à l'interaction du positon avec un électron atomique, le phénomène d'annihilation correspond à l'émission dans des directions opposées de photons d'énergie environ 511keV.

5.3 Chaine de détection

5.3.1 Ses constituants

La figure 10 suivante représente la chaîne de détection en spectrométrie gamma.

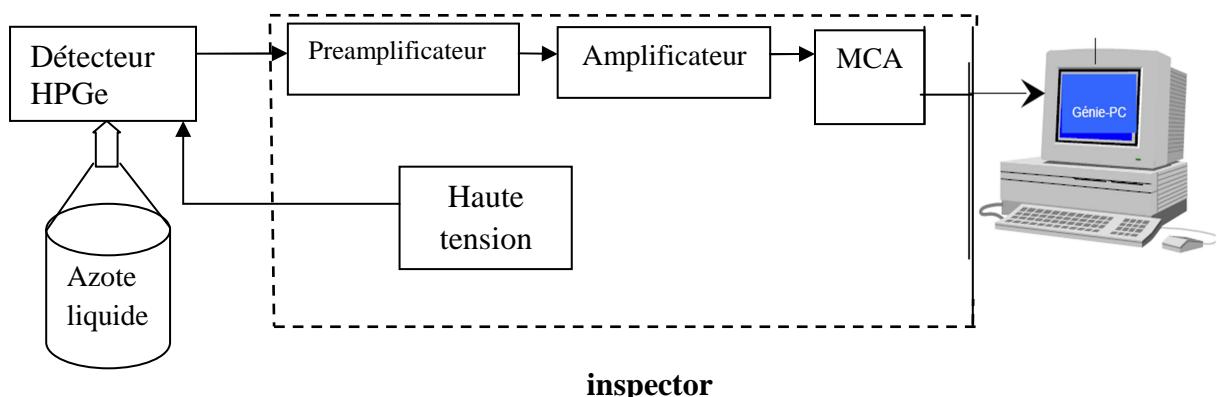


Figure 10 : Schéma simplifié de la chaîne de spectrométrie gamma

- **Détecteur:** sert à détecter les signaux émis par l'échantillon analysé.

- **Préamplificateur:** son rôle est de cueillir le signal électrique à la sortie du détecteur, de filtrer le bruit électronique et de délivrer ce signal sous forme d'impulsion électrique à sa sortie.

- **Amplificateur:** il amplifie les impulsions pour adapter leur amplitude à la gamme analysable par le système de traitement.

- **MCA :** C'est un ensemble de discriminateurs différentiels dont les fenêtres de même intervalle sont contigües. Toutes les impulsions sont logées dans un canal de numéro bien déterminé. On a alors une visualisation directe du spectre d'énergie des rayonnements gamma analysés.

5.3.2 Principe et caractéristiques du détecteur à semi-conducteur

Le détecteur occupe le rôle le plus important dans cette chaîne. Le détecteur utilisé est un détecteur à semi-conducteur de haute pureté en germanium (HPGe) de marque ORTEC type p. Le détecteur HPGe particulièrement utilisé en spectroscopie gamma.

5.3.3 Le principe du détecteur

Dans la fabrication de cristal pour le germanium de haute pureté, si le reste de l'impureté de niveau bas sont des récepteurs, la propriété électrique du cristal de germanium est à moitié de type p et si l'impureté donneur est présent, le cristal est de type n. Mais l'impureté est encore faible et nous appelons le semi-conducteur : germanium intrinsèque.

Les détecteurs au germanium sont des détecteurs dont les matériaux cibles sont des diodes semi-conductrices ayant comme structure une jonction p-i-n dans laquelle la région intrinsèque i est sensible aux rayonnements ionisants, particulièrement les rayons X et les rayons γ .

Le germanium a une bande interdite relativement faible, ces détecteurs doivent être refroidis afin de réduire l'augmentation thermique des porteurs de charges à un niveau acceptable. L'azote liquide qui a une température de 77 K est le refroidisseur commun pour les détecteurs.

Le détecteur que nous avons utilisé consomme à peu près 30 litres d'azote liquide par semaine et il est polarisé à une tension de 2700 V.

5.3.4 Les caractéristiques du détecteur

Les caractéristiques majeures du détecteur HPGe sont: le numéro atomique élevé, la concentration d'impureté faible (zone de déplétion large), l'énergie d'ionisation nécessairement faible pour produire une paire électron-trou, la haute conductivité, la réponse rapide, la haute résolution et la manipulation simple.

L'efficacité et la résolution d'un détecteur sont importantes pour une analyse en spectrométrie gamma. On va détailler dans le paragraphe suivant ces deux grandeurs.

5.4 Efficacité et résolution d'un détecteur

5.4.1 Efficacité

L'efficacité est une constante de proportionnalité. Elle fait l'objet de plusieurs notions: efficacité absolue, efficacité intrinsèque, etc, qui est utilisée pour l'étude en spectroscopie gamma. Pour les radiations sans charge comme le rayon gamma ou le neutron, il doit y avoir une interaction importante dans le détecteur avant que la détection soit possible. A cause de cette large distance que la radiation peut traverser, le détecteur a alors très souvent une efficacité inférieure à 100%.[\[3\]](#)

5.4.1.1 Efficacité absolue

Elle est définie comme étant le rapport du nombre de photons détectés par le détecteur par le nombre total des photons émis par la source. Elle ne dépend pas seulement des propriétés du détecteur mais aussi de la géométrie (distance source- détecteur, forme physique,...) et de l'énergie. Il est donc nécessaire d'avoir une figure précise pour l'efficacité de détecteur. On exprime l'efficacité absolue par :

$$\mathcal{E}_{\text{abs}} = \frac{\text{nombre de photons détectés par le détecteur}}{\text{nombre total des photons émis par la source}}$$

5.4.1.2 Efficacité intrinsèque

C'est le rapport du nombre total de pulsions enregistrées par le détecteur et le nombre de radiations incidentes au détecteur, soit :

$$\mathcal{E}_{\text{int}} = \frac{\text{nombre de photons détectés par le détecteur}}{\text{nombre total des radiations incidentes au détecteur}}$$

Elle dépend du matériau du détecteur, de l'énergie de radiation, de l'épaisseur physique de détecteur et à une petite dépendance à la distance source-détecteur et au mode de détection.

On a alors :

$$\mathcal{E}_{\text{int}} = \mathcal{E}_{\text{abs}} \left(\frac{4\pi}{\Omega} \right)$$

5.4.1.3 Efficacité relative

Elle est exprimée par :

$$\mathcal{E}_{\text{relative}} = \frac{\text{surface nette du pic}}{\text{Intensité de la source}}$$

5.4.2 La résolution

La résolution d'un détecteur est son aptitude pour différencier deux pics très proches. Si les deux pics sont plus proches que la valeur de FWHM (Full Weight Half Minimum) donc on les appelle irrésolvables. Il y a un nombre N de porteurs de charge produits en une interaction particulière de la radiation d'énergie fixée avec la matière du détecteur. La résolution d'énergie d'un détecteur est en général définie par :

$$\text{Résolution} = \frac{\text{FWHM}}{\text{Position pic}} 100\%$$

Ou encore

$$\text{Résolution} = \frac{\text{FWHM}}{\text{Energie}}$$

FWHM étant la largeur à mi-hauteur

En prenant ce nombre comme une distribution gaussienne, la FWHM est donnée par :

$$FWHM = 2.35\sigma$$

Avec $\sigma = K \sqrt{N}$

K : constante de proportionnalité

Si E est l'énergie de radiation incidente donc $E = KN$,

En remplaçant FWHM et E par leurs expressions

On a:

$$R = \frac{2.35K\sqrt{N}}{KN}$$

Après la simplification, l'expression de R est :

$$R = \frac{2.35}{\sqrt{N}}$$

Pour avoir une bonne résolution, le détecteur à semi-conducteur est préférable au détecteur à scintillation et au détecteur à gaz.

Le détecteur HPGe est la seule technologie de détecteur de radiation qui peut fournir des informations suffisantes et sûres pour identifier les radionucléides par leur émission passive, et améliorer de 20 à 30 fois la résolution par rapport au détecteur NaI.

5.5 Analyse spectrométrique

5.5.1 Etalonnage

L'Etalonnage est l'ensemble des opérations qui permettent d'établir, dans des conditions spécifiées, la relation entre la valeur indiquée par l'appareil de mesure et une grandeur connue mesurée. Dans notre cas, on relie les résultats délivrés par la chaîne de spectroscopie gamma avec les valeurs certifiées correspondant à l'étoile.

5.5.1.1 Etalonnage en énergie

On doit fournir un bon étalonnage à l'appareil de mesure pour avoir des résultats sûrs. L'etalonnage en énergie consiste à établir la relation entre le numéro de canal du MCA et l'énergie connue d'une matière de référence. Nous avons utilisé comme matière de référence un étalon liquide et le RGU-1, qui contient les radionucléides supposés présents dans la spiruline.

Il existe trois méthodes pour faire l'étalonnage en énergie, par le logiciel Génie 2000, par Excel et par le calcul manuel utilisant les moindres carrés.

L'équation de l'étalonnage[9] en énergie est de la forme:

$$E = a*c + b$$

Avec :

E : énergie correspondante (en keV)

c : numéro du canal

a et b : constantes déterminées par la méthode des moindres carrés telles que :

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})(c_i - \bar{c})}{\sum_{i=1}^n (c_i - \bar{c})^2} : \text{pente de la courbe}$$

$$\text{et } b = \bar{E} - a * \bar{c}$$

On relève le numéro du canal présentant le nombre de coups maximal et on lui associe l'énergie correspondante.

En utilisant Excel pour faire les calculs, on obtient la courbe représentée graphiquement sur la figure 11.

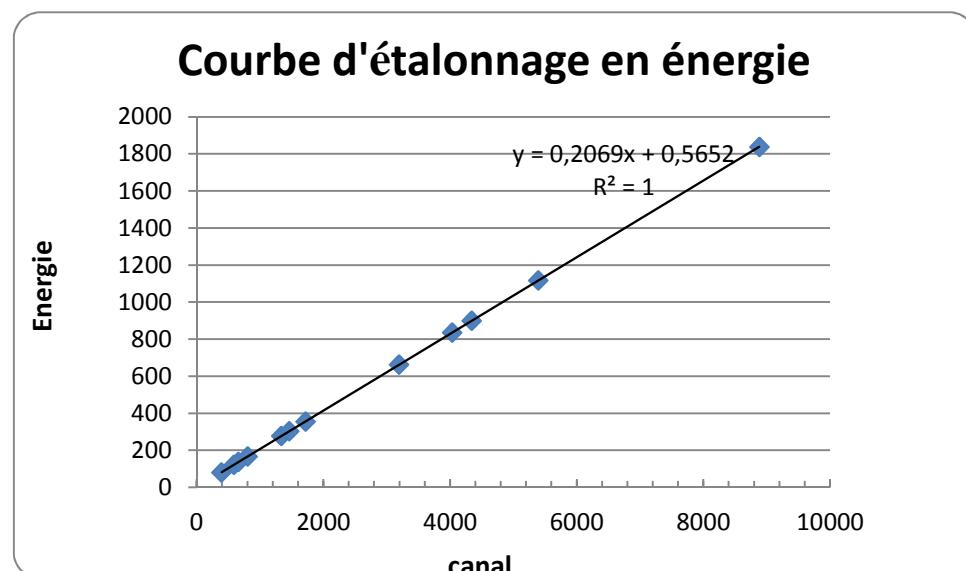


Figure 11 : Courbe d'étalonnage en énergie

5.5.1.2 Etalonnage en efficacité

L'étalonnage en efficacité consiste à établir une relation entre l'efficacité de détection de la chaîne de comptage et l'énergie de chaque élément.

L'étalonnage en efficacité dépend notamment des facteurs suivants :

- La géométrie du système de comptage

L'échantillon est conditionné dans une géométrie identique à celle de l'étalon. Dans notre cas, on a utilisé des portes échantillons cylindriques de 50 ml.

- Méthode d'étalonnage

Le principe consiste à utiliser les mêmes pics contenus dans les spectres d'énergie de l'étalon et ceux des spirulines. La méthode est de rechercher l'efficacité des pics à partir des certificats des étalons.

- L'expression analytique de l'efficacité est la suivante :

$$\mathcal{E} = \frac{N}{A \cdot m \cdot \Delta t \cdot P_\gamma}$$

\mathcal{E} : Efficacité de détection

N : Aire nette du pic d'étalonnage

A : Activité de la source ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)

P_γ : Probabilité d'émission gamma de l'élément à l'énergie E correspondante

Δt : Temps de mesure (s)

On obtient alors la courbe représentée sur la figure 12

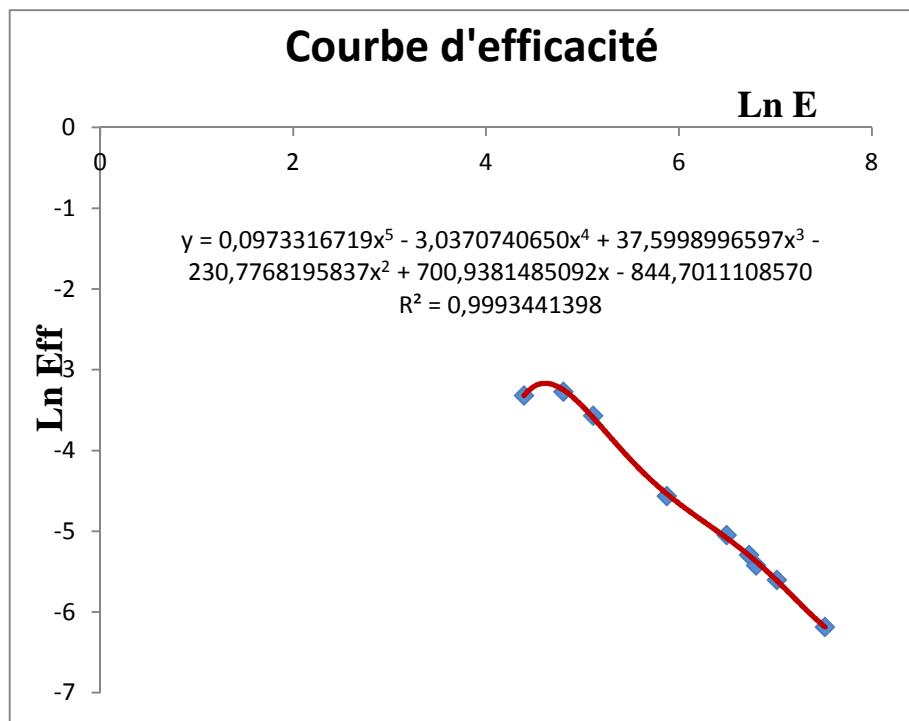


Figure 12 : Courbe d'étalonnage en efficacité

5.5.2 Les types d'analyse en spectrométrie gamma

L'analyse en spectrométrie gamma peut être qualitative ou quantitative. Dans le premier cas, le but est d'identifier les éléments présents dans l'échantillon à analyser. L'analyse quantitative vise quant à elle à déterminer la quantité d'un élément chimique quelconque dans l'échantillon en question.

Chapitre 6 : ANALYSE PAR FLUORESCENCE X

6.1 Production des rayons X

Les rayons X sont obtenus à partir des tubes cathodiques ou des sources radioactives. Ces rayons sont des rayonnements X primaires.

6.1.1 Production par des tubes cathodiques

Pour les tubes cathodiques, on accélère les électrons qui tombent sur une cible, des électrons de la cible (cathode) sont éjectés, et le retour à l'état stable produit des rayons X.

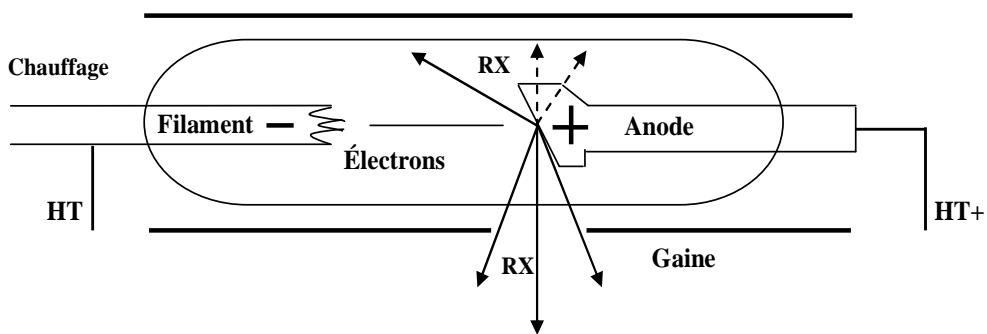


Figure 13 : Tube à rayon X

Les tubes à rayons X ont en général trois domaines d'applications :

- Radiographie et tomographie
- Radiocristallographie,
- Analyse chimique élémentaire par spectrométrie de fluorescence X.

6.1.2 Production par des sources radioactives

Les sources excitatrices telles que l'Am-241, le Cd-109 et le Fe-55 sont utilisées comme sources radioactives qui excitent la matière. Elles donnent des rayonnements monochromatiques γ ou X faibles par rapport aux rayonnements produits par le tube à rayons X mais utiles pour le besoin en rayonnement monochromatique. Toutefois

l'énergie de radiation doit être plus grande mais proche de l'énergie d'ionisation des couches K ou L de l'atome excité.

6.2 Propriétés et utilisations des rayons X

Les rayons X:

- Sont des ondes électromagnétiques donc invisibles à l'œil nu ;
- Se propagent en ligne droite à la vitesse de la lumière ;
- Donnent naissance au phénomène de la fluorescence X qui permet les analyses chimiques et la modification des cellules grâce à leur énergie importante;
- Les longueurs d'ondes des rayons X sont du même ordre que les distances interatomiques. Cette propriété est utilisée dans la diffractométrie X ;

6.3 Interaction des rayons X avec la matière

L'interaction des rayons X avec la matière se manifeste de deux façons: d'une part les rayons X perdent de l'énergie par absorption ou par diffusion en traversant la substance, et d'autre part plusieurs phénomènes peuvent se produire au sein des atomes.

6.3.1 Absorption de rayons X

Quand un rayonnement traverse une matière homogène d'épaisseur x , il y a atténuation de l'intensité du rayonnement suivant la loi de Beer-Lambert :

$$I(\lambda) = I_0(\lambda) \exp(-\mu\rho x)$$

- $I(\lambda)$ intensité du faisceau du rayon X transmis par le matériau de longueur d'onde λ
- $I_0(\lambda)$: intensité du rayon X incident de longueur d'onde λ
- μ : coefficient d'absorption massique pour la longueur d'onde (cm^2/g)
- ρ : masse volumique de la matière traversée (g/cm^3)
- x : épaisseur de la matière traversée (cm)

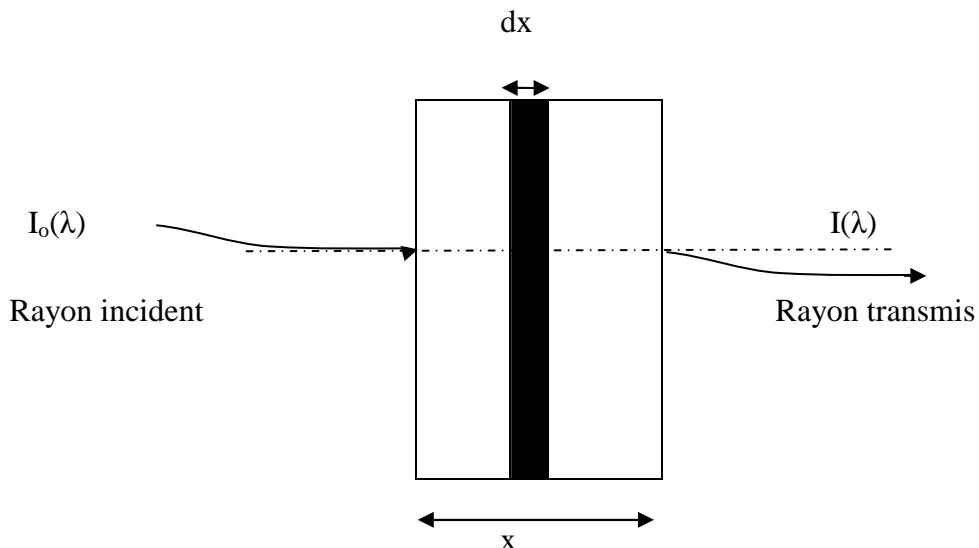


Figure 14 : Atténuation des rayons X

6.3.2 Mode d'interaction

L'interaction de rayons X avec la matière donne naissance à plusieurs effets comme l'interaction des rayons γ dont les deux premiers dominent :

- L'absorption photoélectrique
- La diffusion incohérente ou la diffusion Compton.

Pour l'interaction des rayons X avec matière, les transitions négatoniques permises suivent les règles de sélection suivantes :

$$\bullet \Delta n \neq 0 \quad \Delta l = \pm 1 \quad \Delta j = \pm 1 \text{ ou } 0$$

Où

n : nombre quantique principal (entier positif)

l : nombre quantique orbital ($l = 0; 1; 2; \dots; n-1$)

j : le moment cinétique total

6.3.3 Effet Auger

Lorsqu'une lacune est créée dans la couche K (ou L), un négatonpéripherique L ou M comble le trou en libérant la différence d'énergie entre les deux couches, sous forme de

rayon X caractéristique. Si ce photon X est assez énergétique, il peut provoquer le départ d'un deuxième négaton de la couche externe appelé électron Auger. Pour la détection, ce photon est perdu car il est absorbé par l'atome.

Des processus Auger successifs sur les couches plus externes donnent des rayons émis en concurrence avec les raies X caractéristiques. Ce phénomène domine sur les atomes légers.

L'interaction du rayon X avec la matière est presque pareille à l'interaction du rayon gamma mais l'effet Auger est plus prépondérant pour le rayon X que pour le rayon gamma.

6.3.4 Emission des raies X caractéristiques

L'émission des raies X caractéristiques provient des excitations du négaton sur la couche K qui provoque la formation du trou par un des négatons de la couche supérieure. (Voir la figure 15)

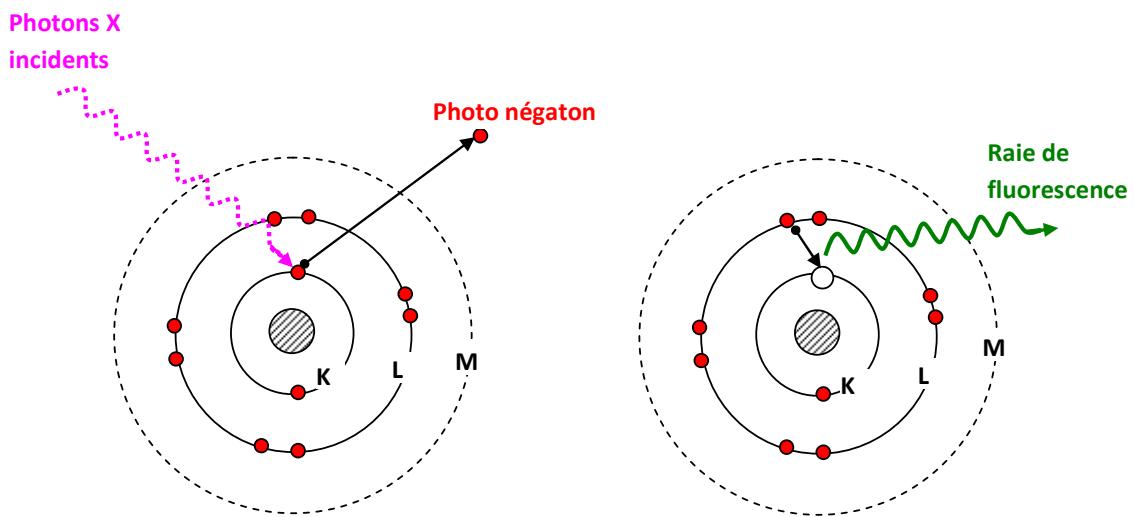


Figure 15 : Emission des raies K de fluorescence

Remarque

Lorsque les photons peuvent à leur tour provoquer une excitation des atomes voisins cela produit une fluorescence secondaire ou surexcitation.

6.4 Chaîne de spectroscopie X

La figure 16 suivante représente la chaîne de spectrométrie X du département TFXEde l'INSTN Madagascar

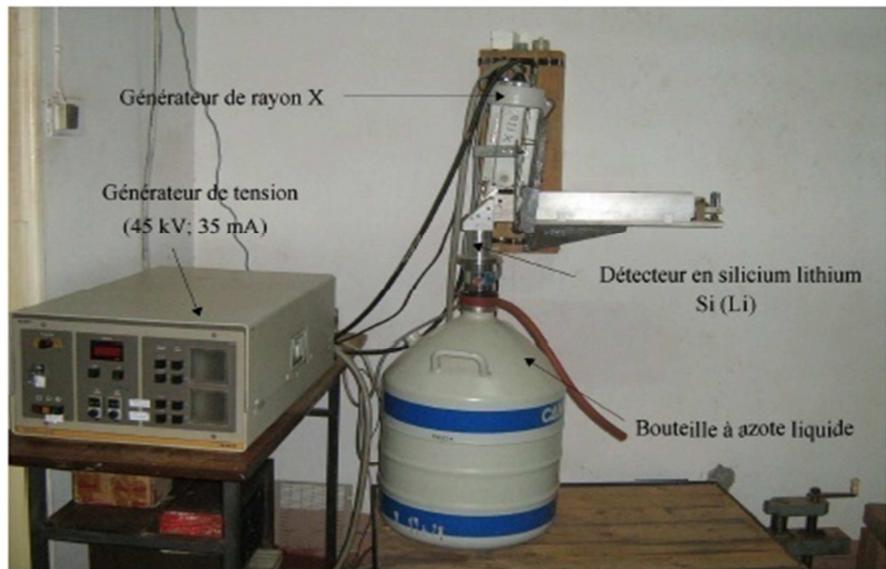


Figure 16 : Chaîne de spectrométrie X

La chaîne de spectroscopie X comprend:

- **un tube à rayons X** qui fournit le rayon X primaire excitateur
- **un détecteur à semi-conducteur Si(Li)** (marque CANBERRA) qui transforme l'énergie des photons en des impulsions électriques. Sa surface sensible est de 30mm^2 , d'épaisseur 3mm avec une résolution optimale de 170 eV à 5.9 keV.
- **un générateur de rayons X** pour la polarisation du tube à RX. Elle peut délivrer de 20kV à 55kV pour la tension et de 5mA jusqu'à 60mA pour le courant et de puissance de sortie de 2,7 kW.
- **un préamplificateur** pour la conversion de charges collectées provenant du détecteur en impulsion.
- **Un analyseur multicanaux (MCA)** qui a pour rôle de mesurer l'amplitude des impulsions et de placer les signaux dans les canaux correspondants à son énergie. Il permet

de faire des opérations simples au cours du dépouillement des spectres, par l'intermédiaire d'un microprocesseur.

- **Un terminal informatique** constitué par un microordinateur et une imprimante. Il sert à visualiser, à stocker et à traiter les données grâce aux logiciels CANBERRA S100 et AXIL.(Voir la figure 17)



Figure 17 : Module de traitement de données

6.5 Spectre de raies X

L'ensemble des raies caractéristiques et le bruit de fond est représenté par un spectre de raies X. On trouve dans ce spectre la distribution des hauteurs des différentes impulsions fournies par l'amplificateur dans les canaux du MCA

6.6 Analyse quantitative

L'analyse quantitative vise à déterminer la quantité des éléments quelconque dans la spiruline.

6.6.1 Equation de base de la Fluorescence X

Quand une source excitatrice mono-énergétique excite un élément j d'un échantillon donné, la relation entre l'intensité de fluorescence des raies caractéristiques K_α ou L_α et la concentration d'un élément j présent dans l'échantillon d'épaisseur d et de masse volumique ρ est donné par :

$$I_j = \frac{S_j C_j}{a_j \rho d} [1 - \exp(-a_j \rho d)]$$

Où S_j est la sensibilité de l'analyse par fluorescence X pour l'élément j ;

C_j est la concentration de l'élément j [g.g⁻¹];

d est l'épaisseur de l'échantillon en [cm];

ρ est la masse volumique de l'échantillon S en [g.cm⁻³]

ρd est la masse surfacique de l'élément j [g.cm⁻²]

a_j est le coefficient d'absorption massique total pour l'élément j [cm².g⁻¹]

Dans notre cas, on a analysé des échantillons épais alors :

Pour un échantillon infiniment épais : $a_j \rho d \gg 1$

Dans ce cas, l'effet d'absorption est élevée et l'expression $\exp(-a_j \rho d)$ est négligeable devant 1 ;

$$1 - \exp(-a_j \rho d) \ll 1$$

L'expression de I_j devient alors :

$$I_j = \frac{S_j C_j}{a_j \rho d}$$

6.6.2 Sensibilité du système S_j

La sensibilité S_j du système pour un élément j est le produit du facteur de constante des paramètres fondamentaux K_j et de l'efficacité de détection relative ε_j par un facteur de proportionnalité appelé facteur de géométrie G_o .

$$S_j = G_o \cdot \varepsilon_j \cdot K_j$$

6.6.3 Facteur de géométrie Go

Le facteur de géométrie détermine la constante géométrie individuelle ou moyenne d'un ou de plusieurs éléments. Il est utilisé pour calculer la sensibilité de chaque élément. Il est donné par la relation :

$$G_o = I_o \frac{\Omega_1 \Omega_2}{(4\pi)^2} \csc \psi$$

Le facteur de géométrie est exprimé en [steradian]

6.7 Analyse par fluorescence X à excitation directe

Les analyses ont été effectuées au Département de Fluorescence X et Environnement de l'INSTN-Madagascar. Ce département dispose d'une chaîne de spectroscopie X à énergie dispersive, avec les 2 variantes qui suivent :

- la Fluorescence X à réflexion totale appelée couramment TXRF (Total réflexion X-Ray Fluorescence). Ce module est conçu pour les analyses des échantillons liquides.
- la Fluorescence X à excitation directe appelée aussi la Fluorescence classique ou conventionnelle. Elle est utilisée pour les analyses des échantillons solides aussi bien biologiques que géologiques.

Et c'est ce dernier qui nous intéresse pour le cas des spirulines.

6.7.1 Principe d'analyse

L'analyse à excitation directe concerne les échantillons solides réduits en poudre puis façonnés en pastilles.

La méthodologie de travail se présente comme suit :

- ❖ Préparation des échantillons aussi bien standards purs, standards de référence que « inconnus ».

Les standards purs servent à l'étalonnage tandis que les standards de référence au contrôle qualité de la mesure.

❖ Etalonnage : elle sert à établir la relation entre le paramètre d'analyses et la concentration. Elle permet aussi de voir la stabilité de la chaîne d'analyse. La courbe d'etalonnage doit être linéaire

Pour la Fluorescence X, la courbe d'etalonnage montre la relation entre l'**intensité** (en coups/s) et la **concentration** de l'élément considéré.

❖ Contrôle qualité : Le contrôle qualité permet de vérifier si l'etalonnage est correct ou non. Effectivement, cette étape permet de rassurer sur l'exactitude des résultats des analyses des échantillons « inconnus » qui vont suivre. Il s'agit des échantillons à tester.

❖ Analyses des échantillons « inconnus » : une fois que tout est réglé, on procède aux analyses des échantillons « inconnus ». L'ensemble du système détecte les éléments et dessine des pics sur l'écran par le moyen du logiciel CANBERRA S100.

On observe alors sur l'écran une courbe à plusieurs pics. A un pic correspond un élément. Et, la surface du pic est donnée en intensité dont la valeur est proportionnelle à la quantité de l'élément formant le pic. L'identification des éléments n'est pas compliquée car leurs énergies s'affichent automatiquement. Quant aux valeurs des concentrations, le logiciel AXIL traite les données et les affichent vers la fin du traitement.

6.7.2 Limite de détection

La limite de détection représente la plus petite concentration d'un élément donné que l'on peut détecter dans un échantillon lorsqu'il subit les processus complète d'analyses. La définition suivante est généralement acceptée quelque soit la méthode utilisée :

$$LD = 3\sigma$$

Où σ est l'écart type des réplicas

On peut écrire aussi : $LD_j = 3m_j \sqrt{\frac{t}{1000}} \sqrt{N_B}$

Avec m_j : masse de l'élément j [ng ou pg]

t : temps de comptage en seconde

N_B : aire du bruit de fond

6.7.3 Valeur de la limite de détection (LD)

La limite de détection est la constante minimale que le détecteur peut détecter, elle varie d'un élément à un autre. Ses valeurs sont être présentées dans le tableau9.

Tableau 9 : LD

Z	Eléments	LD (mg.kg⁻¹)
19	K	372
20	Ca	229
22	Ti	78
23	V	41
24	Cr	13
25	Mn	9
26	Fe	11
27	Co	11
28	Ni	12
29	Cu	9
30	Zn	12
33	As	8
35	Br	7
37	Rb	8
38	Sr	9
82	Pb	13

La variation de la limite de détection en fonction du numéro atomique est représentée graphiquement sur la figure 18.

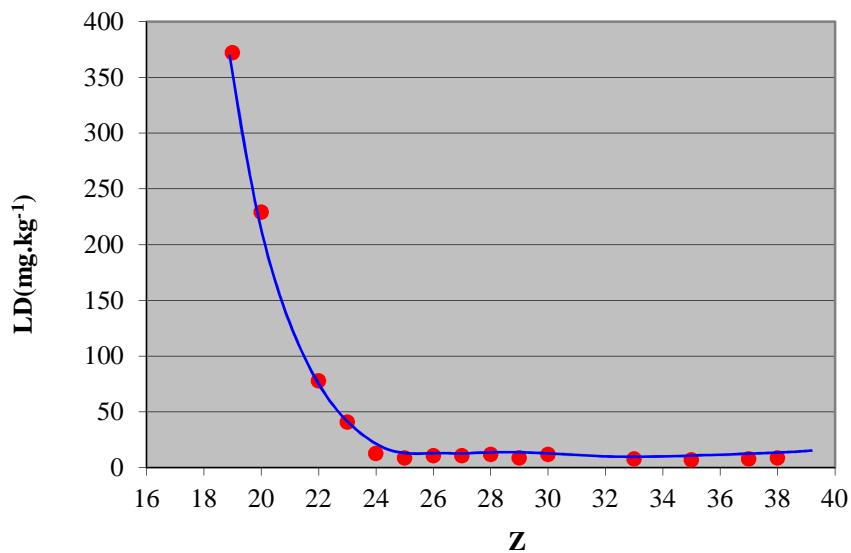


Figure 18 : Courbe de la variation de la limite de détection en fonction du numéro atomique

6.7.4 Etalonnage

Nous avons utilisé le fichier d'étalonnage (voir le tableau 10) conçu pour les échantillons biologiques qui existe déjà au département. Il a été élaboré expérimentalement à partir de standards purs.

Tableau 10 :Fichier d'étalonnage

Standards purs	Eléments d'intérêt	Raies	G ₀ individuelle
K	K	K	3.2731E-07
Br	Br	K	1.0951E-06
CaO	Ca	K	9.4863E-07
Ti	Ti	K	1.3430E-06
Mn	Mn	K	1.7489E-06
Fe	Fe	K	2.1331E-06
Cu	Cu	K	2.3909E-06
Zn	Zn	K	1.7165E-06
Rb	Rb	K	1.0522E-06
Sr	Sr	K	9.1369E-07
Pb	Pb	L	1.2192E-05

6.7.5 Préparation des échantillons

La préparation demande beaucoup de temps et d'attention à cause de la précision de la mesure. Pour cela la propreté est de rigueur : on nettoie tous les matériels à utiliser avec de l'eau déminéralisée (moule, spatule,...) et on les sèche avant de les utiliser pour la préparation d'un autre échantillon. Toutes ces précautions sont faites pour éviter la contamination des échantillons. On a utilisé les matériels suivants :

- **Balance de précision** METTLER TELLEDO : sert à mesurer la masse des échantillons,
- **Spatule** : sert à manipuler les pastilles,
- **Presse et mouleSPECAC** : pour la fabrication des pastilles,
- **Porte-échantillons** : boite ronde en polyéthylène de diamètre environ de 49mm,
- **Déioniseur MILLIPORE** : enlève les ions dans l'eau distillée pour le rinçage des matériels.

La figure 19 illustre les appareils utilisés pendant la fabrication des pastilles.



a) Balance

b) Déioniseur

c) Presse-pastille

Figure 19 : Les matériels utilisés lors de la préparation des échantillons

6.7.6 Contrôle qualité

En vue du contrôle qualité, les 2 échantillons de « Luzerne » fournis par l'AIEA lors des exercices de comparaison inter-laboratoire de 2011 et 2012 ont été utilisés en guise de matériel de référence.(voir tableau 11)

L'alpha alpha est plus connu sous le nom de luzerne. Cette plante très riche en protéine, est appréciée en phytothérapie pour ses vertus reminéralisante et nutritive.

Tableau 11: Les éléments de références

Code INSTN	Echantillons n°	Code AIEA	Nom	Pays d'origine	Référence
IPE221	2	124	Luzerne	Oosterbeek/Netherlands	IPE 2012.1
IPE214	2	159	Luzerne	Wageningen/Netherlands	IPE 2011.4



PARTIE EXPERIMENTALE

Chapitre 7 :RADIOACTIVITE DES SPIRULINES

7.1 Préparation des échantillons

La préparation d'un échantillon solide au laboratoire du département ATN à l'INSTN-Madagascar suit en général les étapes suivantes :

Séchage

Pour pouvoir broyer facilement la spiruline et enlever l'humidité, on doit la sécher dans un four à air chaud pendant la nuit à une température de 80° C. Mais pour déterminer le taux d'humidité, on pèse une partie de l'échantillon avant et après le chauffage à l'aide d'une balance à 0.01g près.

Dans ce cas, on prend un verre de montre et on le pèse, puis on mesure la masse de l'échantillon humide m_H . Après le séchage, on relève aussi la masse de l'échantillon sèche m_s . Alors le taux d'humidité t_H peut s'écrire :

$$t_H = \frac{m_H - m_s}{m_s}$$

Broyage

Il consiste à rendre la spiruline en poudre ou en granulée ; on a utilisé un mortier et pilon en agate.

Avant d'être déposée à la détection, on met la poudre ou la granulée dans un porte-échantillon en plastique bien fermé de forme cylindrique de volume de 50ml. Pour avoir la masse nette de l'échantillon, on pèse le porte-échantillon vide, on réajuste la balance et on mesure la masse de l'échantillon.

7.2 Mesure

Le tableau 12 présente les paramètres d'analyse pour la spiruline.

Tableau 12 : Les paramètres de mesure pour chacun des échantillons

Echantillons	Temps de comptage (s)	Masse en (g)	Géométrie(ml)
SP1	91067	27,79	50
SP2	169479	28,42	50
SP3	131483	28,54	50
SP4	105635	26,75	50
SP5	250697	30,08	50
SP6	167470	24,70	50
SP7	318883	27,02	50
SP8	321539	25,30	50

7.3 Résultats et interprétations

Les logiciels Gamma Vision et Génie 2000, ont permis la collection des spectres sur des fichiers à extension .CNF.

Les résultats obtenus après le dépouillement des spectres de la spiruline et le calcul des activités sont représentés dans les tableaux 12, 13 et 14 suivant les familles de radionucléides.

Pour calculer l'activité, on utilise la formule :

$$A = \frac{N}{\varepsilon \cdot m \cdot \Delta t \cdot P_\gamma}$$

A: Activité de la source (Bq.kg⁻¹)

ε : Efficacité de détection

N: Aire nette du pic d'étalonnage

P_γ : Probabilité d'émission gamma de l'élément à l'énergie E correspondante

Δt : Temps de mesure (s)

Mais comme toutes les valeurs sont presque inférieures à la limite de détection, on suppose qu'ils sont équiprobables donc on a utilisé l'équation suivante :

$$A = \frac{LD}{2} \pm \frac{LD}{2\sqrt{3}}$$

LD étant la limite de détection donnée par :

$$LD = 2LC + k^2$$

Où $LC = k\sigma_o$

$$\sigma_o = \sqrt{(\mu + \sigma^2)}$$

μ : intégrale

σ : erreur de l'intégrale

k : la constante où $LD = LC = 0$ et on a pris $k = 1,645$

Pour les détails, veuillez voir l'annexe 2.

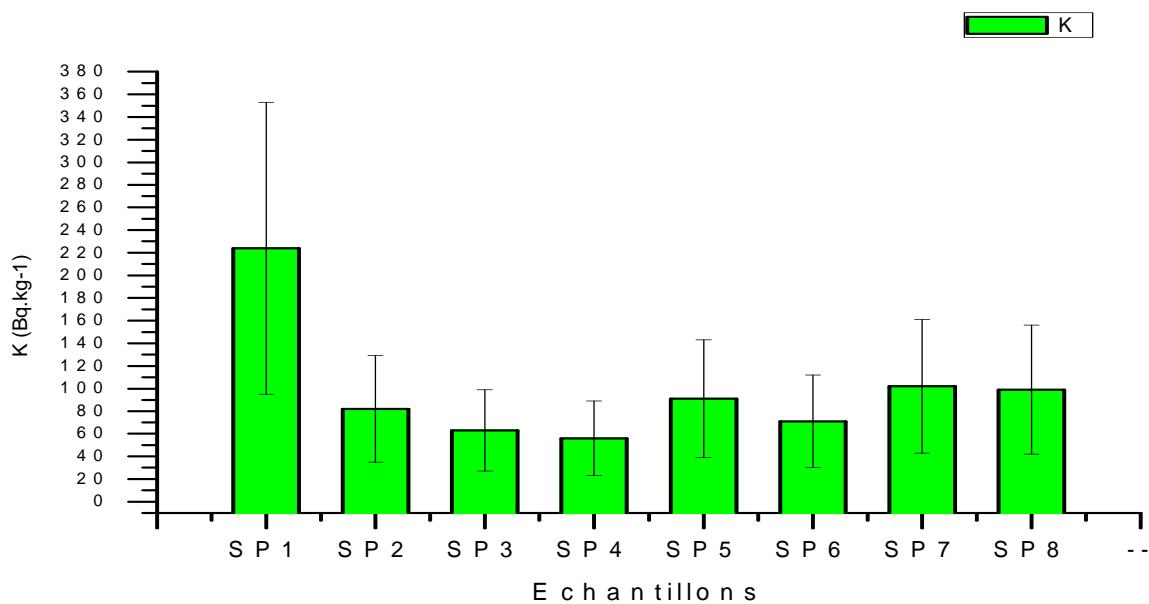
✓ Potassium

L'activité du potassium pour chaque échantillon est donnée dans le tableau 13 puis représentée sur la figure 20

Tableau 13 : Valeur de l'activité pour le potassium

Radionucléide	E (keV)	SP1	SP2	SP3	SP4	SP5	SP6	SP7	SP8	VM
⁴⁰ K (Bq.kg ⁻¹)	1461	224±129	82±47	63±36	56±32	91±52	71±41	102±59	99±57	98±56

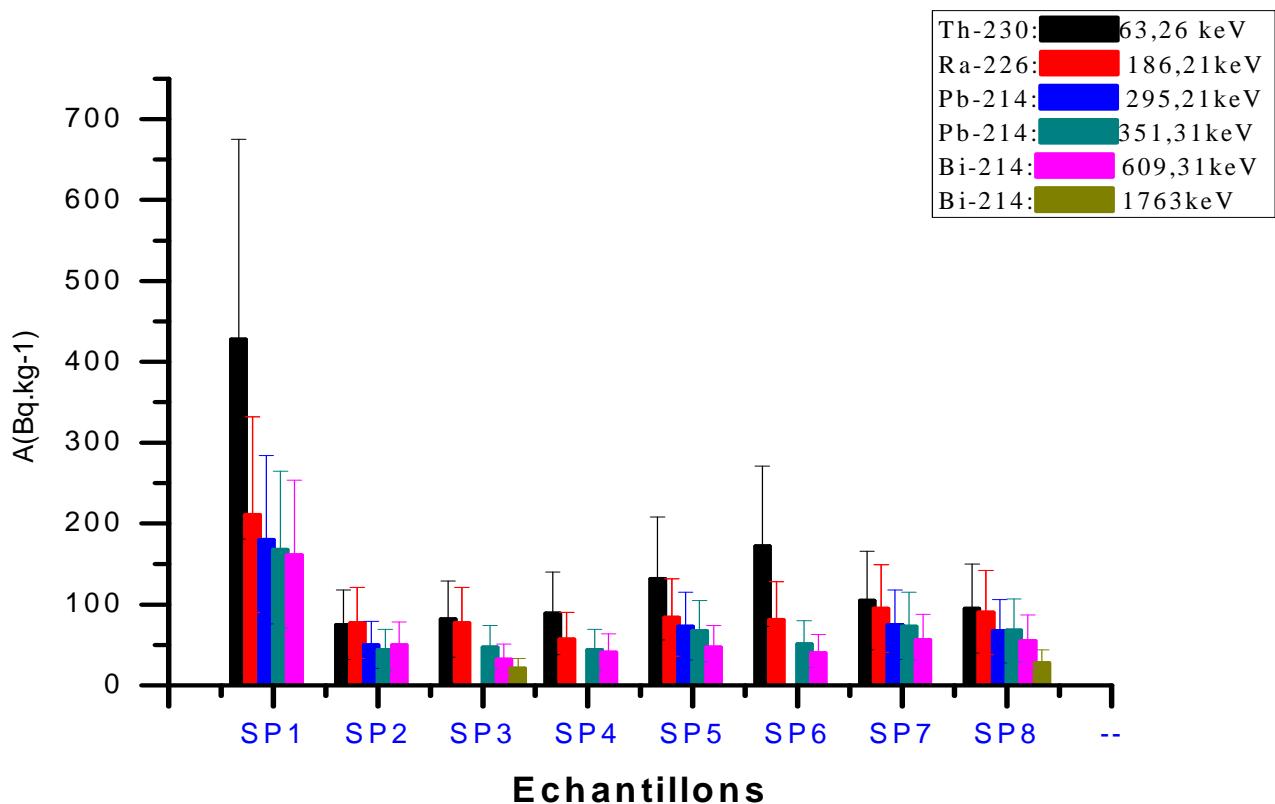
VM:valeur moyenne

Figure 20 : Activité du potassium pour chaque échantillon en $\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$

✓ Famille de l'uranium-238

Tableau 14: Valeur des activités pour les éléments de la famille de l'U-238

Radionucléides	^{230}Th ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)	^{226}Ra ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)	^{214}Pb ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)		^{214}Bi ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)	
Energie (keV)	63,26	186,21	295,21	351,31	609,31	1763
SP1	428 ± 247	211 ± 121	180 ± 104	168 ± 97	161 ± 93	<LD
SP2	75 ± 43	77 ± 44	50 ± 29	44 ± 25	50 ± 28	<LD
SP3	82 ± 47	77 ± 44	<LD	47 ± 27	32 ± 19	21 ± 12
SP4	89 ± 51	57 ± 33	<LD	44 ± 25	41 ± 23	<LD
SP5	132 ± 76	84 ± 48	73 ± 42	67 ± 38	47 ± 27	<LD
SP6	172 ± 99	81 ± 47	<LD	51 ± 29	40 ± 23	<LD
SP7	105 ± 61	95 ± 54	75 ± 43	73 ± 42	56 ± 32	<LD
SP8	95 ± 55	90 ± 52	67 ± 39	68 ± 39	55 ± 32	28 ± 16
Moyennes	147 ± 84	96 ± 55	89 ± 51	70 ± 40	60 ± 34	24 ± 14

**Figure 21** :Activité des éléments de la famille de l’uranium

✓ Famille de thorium-232

Tableau 15 : Valeur des activités pour les éléments de la famille du Th-232

Radionucléides	^{212}Pb (Bq.kg $^{-1}$)	^{208}Tl (Bq.kg $^{-1}$)	
Energie (keV)	238,3	583,1	2614,1
SP1	224 ± 129	122 ± 70	95 ± 55
SP2	75 ± 43	43 ± 25	32 ± 18
SP3	66 ± 38	33 ± 19	29 ± 16
SP4	63 ± 36	36 ± 21	26 ± 15
SP5	81 ± 47	47 ± 27	40 ± 23
SP6	58 ± 33	<LD	32 ± 18
SP7	87 ± 50	51 ± 29	42 ± 24
SP8	85 ± 49	52 ± 30	42 ± 24
Moyennes	92 ± 53	54 ± 31	42 ± 24

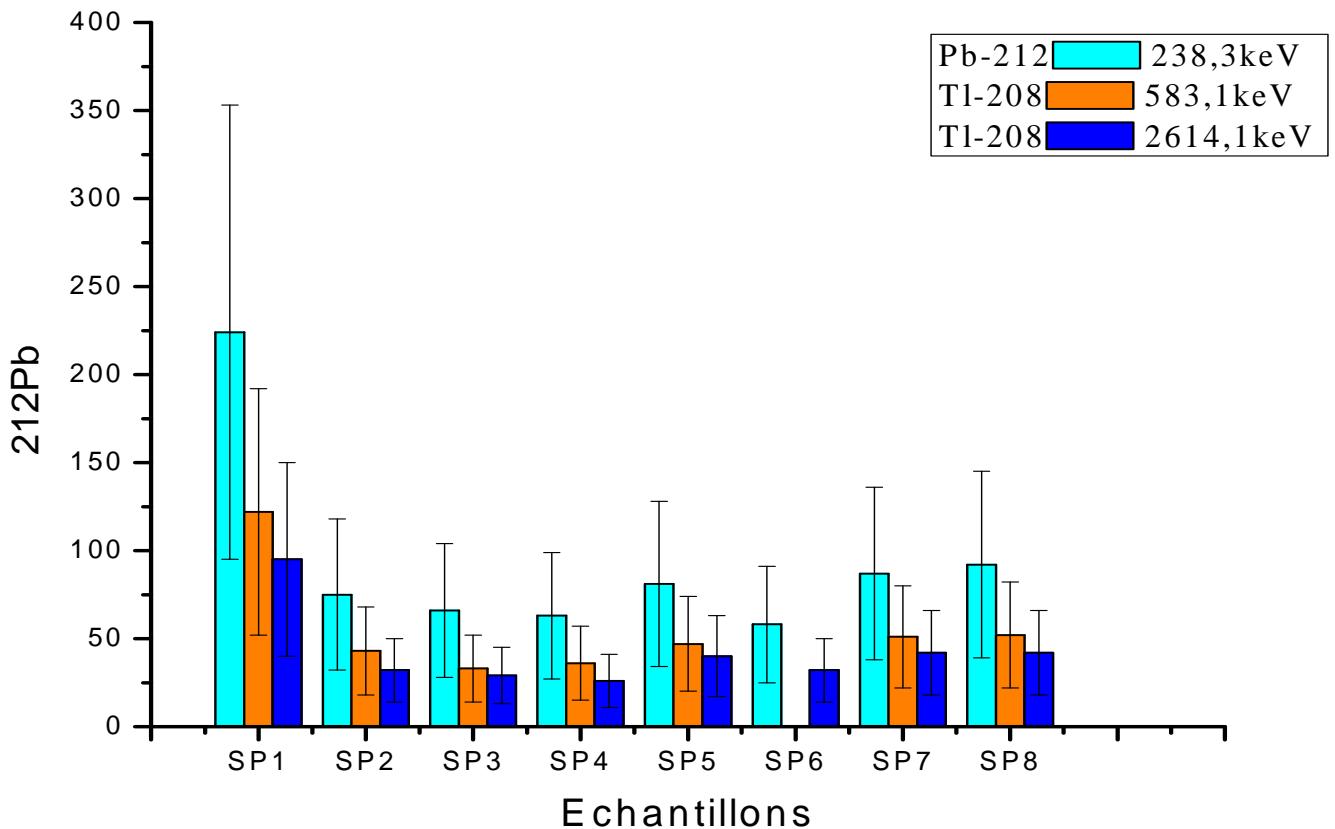


Figure 22 : Activité des éléments de la famille du Thorium

Discussions

Le thorium-230 a l'activité la plus élevée pour tous éléments radioactifs identifiés dans la spiruline, il varie de $63,26\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ à $428,77\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$.

Après le thorium, le plomb a aussi une activité élevée, sa valeur est de $58,59\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ à $224,95\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ pour le plomb-212 et pour le plomb-214, l'activité varie de $44,02\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ à $168,9\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$.

Pour le radium-226, il varie de $57,27\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ à $224,95\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$.

Le bismuth-214 et le thallium-208 sont les éléments moins radioactifs existant dans la spiruline car le bismuth n'a que $21,37\text{ Bq}.\text{kg}^{-1}$ jusqu'à $54,48\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ pour l'énergie 1763 keV et de $32,95\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ au $161,34\text{Bq}.\text{kg}^{-1}$ à 609,31 keV.

Chapitre 8 : TENEUR EN ELEMENTS LOURDS

8.1 Préparation des échantillons

Broyage

Car les échantillons sont déjà séchées avant d'être analysées au laboratoire de l'ATN, donc on a passé directement au broyage, en utilisant un mortier et un pilon en agate.

Pesage

Il consiste à peser la pastille. Il est réalisé à l'aide d'une balance de précision à 0.00001g près portant la marque METTLER TELLEDO présentée dans la figure 15-a.

Pastillage

Pour obtenir une pastille très compacte, on comprime les poudres fines sous une pression de 7 à 10 tonnes par cm^2 pour fabriquer des échantillons intermédiaires et des échantillons épais.

Les pastilles ainsi préparées sont analysées par la méthode de fluorescence X à cible secondaire en molybdène.

Etiquetage et stockage

Afin d'éviter la contamination de l'échantillon et de maintenir son intégrité, il est important de stocker la pastille dans une boîte en polyéthylène ronde fermée de diamètre 49mm et étiquetée de leur codes pour ne pas les confondre.(voir les figures 23 et 24)

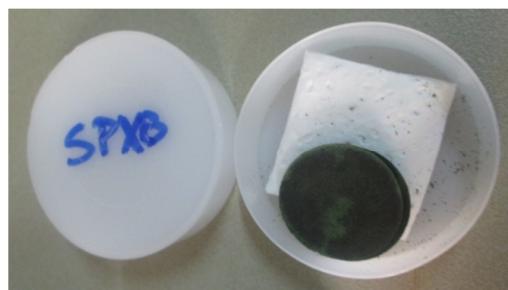


Figure 23 : Exemple de pastille d'un échantillon étiqueté

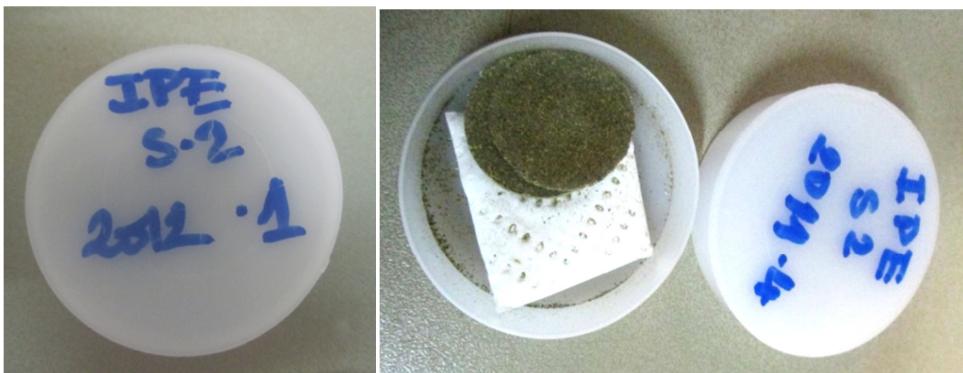


Figure 24 : Les échantillons de référence préparés

8.2 Mesures

Conditions expérimentales

Les mesures ont été effectuées sous les conditions suivantes :

- Tension du détecteur: -500V
- Tension du tube: 40kV
- Courant du tube : 10mA
- Temps d'analyse : 1000 s
- Optimisation de la chaîne de l'appareil ($Zn= 625 \pm 3$ cps)
- Cible secondaire: Molybdène

8.3 Résultats et interprétations

8.3.1 Résultats pour les éléments de référence

Les analyses des échantillons de référence IPE221 et IPE214 ont permis de faire la comparaison entre les valeurs assignées et les valeurs calculées obtenues après les mesures à l'INSTN-Madagascar.

Comparaison des valeurs

Les tableaux 16 et 17 montrent respectivement les résultats des analyses de IPE221 et IPE214 et les écarts relatifs par rapport aux valeurs assignées.

Tableau 16 : Comparaison des concentrations de l'IPE221

Eléments	Unité	Valeurs assignées	Valeurs mesurées	Écarts (%)
K	%	2.62	2,62	0,00
Ca	%	2.315	2,07	10,58
Mn	mg.kg ⁻¹	40.20	<LD	-
Fe	mg.kg ⁻¹	231.6	240,056	3,65
Co	mg.kg ⁻¹	0.3211	<LD	-
Cu	mg.kg ⁻¹	4.257	8,521	100,16
Zn	mg.kg ⁻¹	19.69	19,801	0,56
As	mg.kg ⁻¹	0.4329	< LD	-
Br	mg.kg ⁻¹	12.83	13,15	2,49
Rb	mg.kg ⁻¹	2.018	2,81	39,25
Sr	mg.kg ⁻¹	57.39	48,45	15,58
Pb	mg.kg ⁻¹	0.8371	< LD	14,68

Pour la Lucerne venant de Wageningen/Netherlands de l'IPE échantillon n°2 du 2011.4.

Tableau 17 : Comparaison des concentrations de l'IPE214

Elements	Unité	Valeurs assig nées	Valeurs mesu rées	Ecarts (%)
K	%	2,178	2,18	0,09
Ca	%	1,651	1,60	3,19
Mn	mg.kg ⁻¹	34,51	34,44	0,20
Fe	mg.kg ⁻¹	895,0	894,88	0,01
Co	mg.kg ⁻¹	0,6282	< LD	-
Cu	mg.kg ⁻¹	9,289	8,74	6,28
Zn	mg.kg ⁻¹	19,79	18,74	5,6
As	mg.kg ⁻¹	2,188	< LD	-
Br	mg.kg ⁻¹	29,75	30,21	1,52
Rb	mg.kg ⁻¹	10,926	10,67	2,40
Sr	mg.kg ⁻¹	54,84	53,46	2,58
Pb	mg.kg ⁻¹	1,5	< LD	-

On remarque dans le tableau 16, une petite différence pour quelques concentrations des éléments tandis que le manganèse est introuvable bien que l'arsenic et le cobalt soient inférieures aux limites de détection.

Le cobalt, l'arsenic et le plomb n'apparaissent pas au cours de l'analyse pour la matière IPE214. Cependant, on est tombé à la valeur approximative pour les autres éléments.

8.3.2 Résultats pour les échantillons de la spiruline

Le dépouillement des spectres collectés pendant les différentes mesures a été fait grâce à la commande du logiciel AXIL. Pour ce type d'analyse, on transforme le fichier du spectre obtenu *.MCA en fichier *.ASR.

Les éléments trouvés dans les échantillons sont présentés dans le tableau 18.

Tableau 18 : Les éléments trouvés dans les échantillons épais

	SPX1E1	SPX2E1	SPX3E1	SPX4E1	SPX5E1	SPX6E1	SPX7E1	SPX8E1	Moyenne	Unit
K	1,27	1,34	1,62	1,41	1,62	1,52	1,50	1,39	1.46	%
Ca	1842,14	732,88	452,07	1108,34	1240,87	1990,92	1526,26	3465,48	1544,87	mg.kg ⁻¹
Fe	549,28	347,75	534,12	490,85	721,95	629,10	461,11	1088,17	602,79	mg.kg ⁻¹
Co	2,58	< LD	4,99	< LD	5,53	< LD	< LD	13,02	6.53	mg.kg ⁻¹
Cu	9,00	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	< LD	9.00	mg.kg ⁻¹
Zn	18,65	66,77	31,83	27,90	29,48	25,73	24,04	48,80	34,09	mg.kg ⁻¹
Br	64,85	12,30	< LD	< LD	< LD	< LD	8,24	63,16	37,14	mg.kg ⁻¹
Rb	8,37	< LD	< LD	< LD	10,28	10,88	9,11	11,44	10,02	mg.kg ⁻¹
Sr	34,42	< LD	< LD	< LD	20,36	16,12	< LD	9,80	20,18	mg.kg ⁻¹

Discussions

On peut tirer quelques remarques de ce tableau. Les échantillons SPX1E1 et SPX8E1 contiennent une trace de plomb, car ces cultures sont en milieu naturel c'est à dire qui ne sont pas protégées alors il y a beaucoup de risque de pollution. Ces deux échantillons sont aussi parmi les échantillons dans lesquels on trouve le plus de cobalt. Ce tableau nous permet de diviser les éléments en quatre histogrammes (voir figures 25 à 28):

- du potassium et du calcium qui sont des éléments dominants dans la spiruline

- du fer qui est l'élément le plus cherché dans la spiruline,
- des oligo-éléments et
- des éléments lourds,

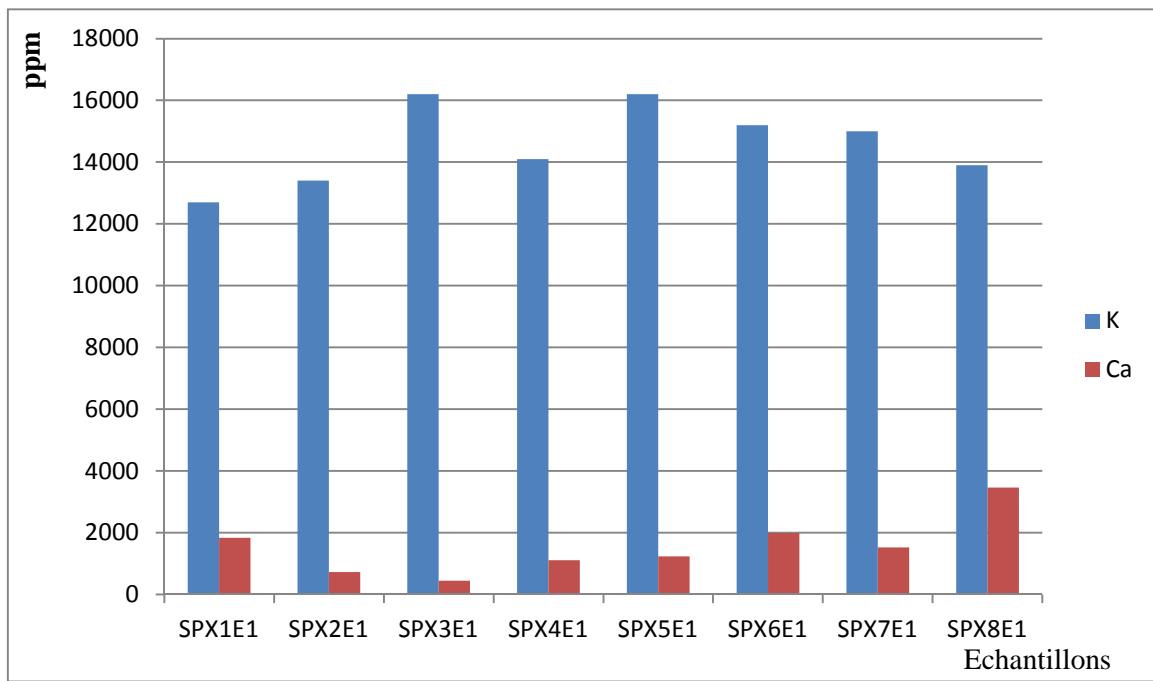


Figure 25 : Histogramme de variation de concentration du potassium et du calcium pour chacun des éléments.

Discussions

On voit que le potassium a la concentration la plus élevée. Son pourcentage pour tous les échantillons varie de 1,27% à 1,62%. Tout échantillon contient plus de potassium que de calcium car pour ce dernier, la concentration varie de $452,07 \text{ mg.kg}^{-1}$ (0,0452%) à $3465,48 \text{ mg.kg}^{-1}$ (0,3465%).

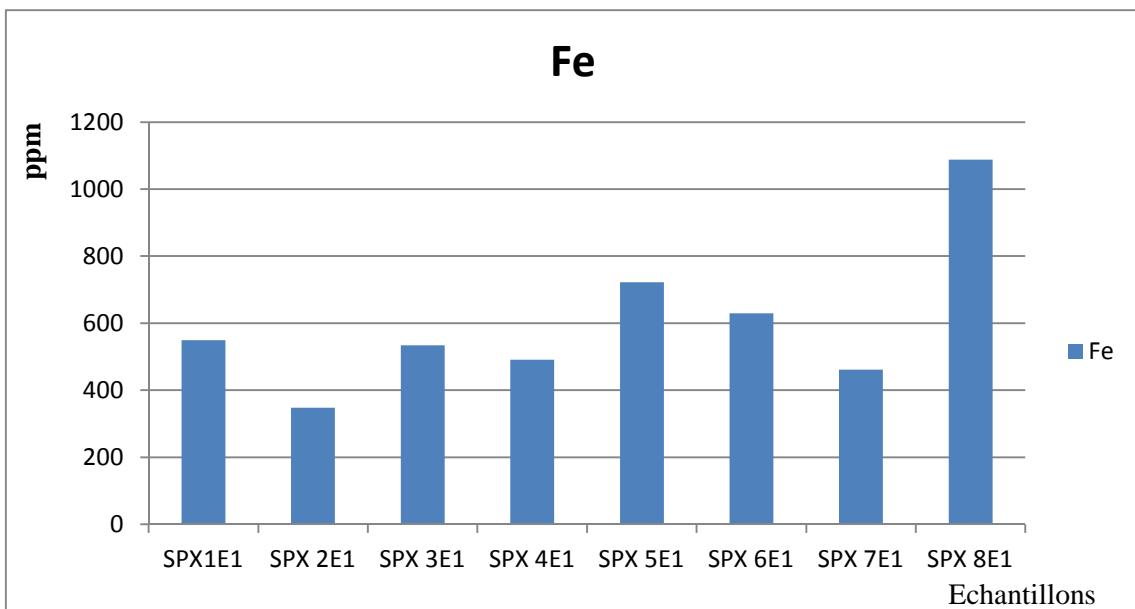


Figure 26 : Histogramme de concentration du fer pour chaque échantillon

Discussions

Le fer est parmi les éléments le plus remarquable dans la spiruline. Sa concentration est de 347,75mg.kg⁻¹ au 1088,17mg.kg⁻¹.

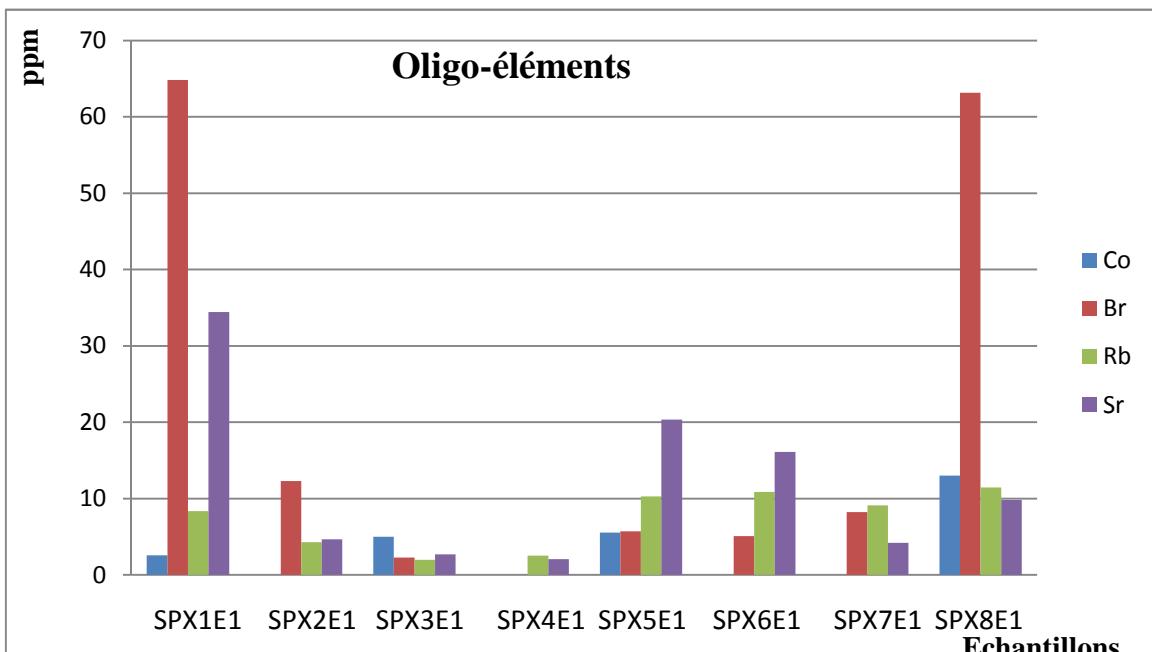


Figure 27 : Histogramme de concentration des oligo-éléments.

Discussions

Les échantillons SPX1E1 et SPX8E1 contiennent la plus grande quantité de Brome tandis que dans SPX4E1, elle est inférieure à la limite de détection.

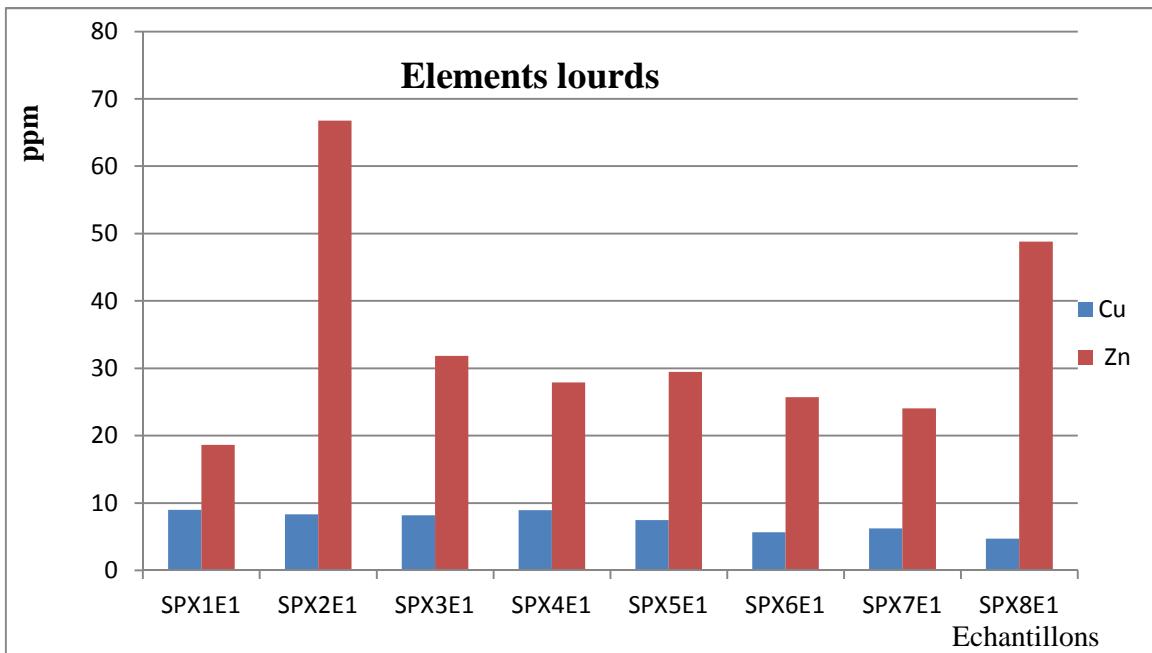


Figure 28 : Histogramme de concentration du cuivre et du zinc

Discussions

Dans tous les échantillons, on trouve du plomb mais en trace ; pour l'échantillon SPX3E1, on a une valeur inférieure à la limite de détection.

L'échantillon SPX2E1 et SPX8E1 contiennent du zinc de concentration plus élevée et tout échantillon a plus de zinc que de cuivre.

8.4 Récapitulation

L'objectif principal de cette étude a été la détermination des éléments minéraux et des métaux lourds dans la spiruline par la méthode d'analyse par fluorescence X classique. Après les étapes de préparation de l'échantillon en une pastille, on a pu faire l'identification des éléments en utilisant une chaîne de détection à semi-conducteur de bonne résolution et le logiciel AXIL.

La méthode de XRF classique ne demande qu'une faible quantité d'échantillon. Elle a l'avantage d'être rapide, moins chère et d'une grande précision, mais l'émission des raies varie dans le même sens que le numéro atomique.

On a identifié dix (10) éléments, le K, Ca, Fe, Co, Cu, Zn, Br, Rb, Sr et Pb dont la teneur est respectivement en moyenne 1,45875 %, 1660,869 ppm, 602,7913 ppm, 6,53 ppm, 7,325 ppm, 34,15 ppm, 2,27 ppm, 23,09429 ppm, 7,3575 ppm, 11,795 ppm et 0,688571 ppm. On peut constater que les éléments lourds qui sont le plomb (Pb), le cuivre (Cu) et le zinc (Zn) sont de teneur faible. L'existence d'autres éléments comme le cadmium, le mercure et le chrome est possible mais notre dispositif ne nous permet pas de les identifier.

La quantité totale des éléments minéraux est faible et varie d'un échantillon à un autre. Le maximum est de 16,2 g.kg⁻¹ de potassium qui correspond à la plus forte concentration. Le minimum est de 0,25 µg.kg⁻¹ de plomb.

La recherche faite par Carole Pierlovisi au laboratoire de pharmacie France [1] et celle faite à l'INSTN Madagascar montrent que la spiruline de Madagascar a plus de concentration en éléments que la spiruline de France ; on peut imaginer que cela est causé par une différence de température du milieu où elle vit.

Tableau 19 : Comparaison des résultats du laboratoire de pharmacie France et celle de l'INSTN Madagascar.

Eléments	Valeur moyenne de la concentration des éléments de la spiruline (mg.kg ⁻¹)		Ecart (%)
	Laboratoire de pharmacie France	INSTN Madagascar	
Potassium	14352,5	14600	1,70
Calcium	1180	1544,87	23,62
Fer	527,5	602,79	12,49
Zinc	33	34,09	3,20

CONCLUSION

Dans cette étude, la spiruline a été analysé par deux techniques nucléaires : la spectrométrie gamma et la spectrométrie X.

A travers des résultats obtenus par spectrométrie gamma, on peut dire que les échantillons de spiruline SP1 et SP8 sont plus contaminés que les autres car l'activité des radionucléides qui y sont présents est plus élevée. On voit aussi que l'application des logiciels Génie 2000 et Gamma Vision est performante pour l'identification des éléments radioactifs dans la spiruline. Les opérations au laboratoire du département ATN demandent beaucoup de temps et de la prudence car le dépouillement des spectres a été effectué manuellement.

A part l'élément potassium dont l'activité varie de $56 \pm 32 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ à $224 \pm 129 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ dans les échantillons, les radionucléides trouvés appartiennent tous à la famille des radionucléides naturels Uranium 238 et Thorium 232. Les activités calculées sont comprises entre $24 \pm 14 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$ et $428 \pm 247 \text{ Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$.

En tant que complément alimentaire, la spiruline contient plus de potassium que la viande et le foie de bœuf ou de poulet [13] ; en effet une recherche faite en TFXE par RAZAFITSALAMA Volasoa en 2009 a trouvé en moyenne $12.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ pour la viande et pour le foie $8.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; alors que pour la spiruline, la moyenne en potassium est $14.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Mais en tant que plante médicinale, la spiruline contient plus de potassium que d'extrait d'Aferotany [14], car les résultats trouvés par MANOELA Fihevera Pascal au laboratoire de TFXE en 2009 donnent la teneur maximale en potassium $1961 \pm 8 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

De même pour la technique de XRF, l'utilisation du logiciel AXIL avec la chaîne de spectrométrie X est facilitée car ce logiciel donne les résultats sans calcul manuel. Elle est appropriée pour l'identification des matériaux et des éléments lourds dans la spiruline. Les résultats obtenus au laboratoire du département ATN sont encore confirmés au laboratoire de TFXE dans ce même institut. Les échantillons SPX1E1 et SPX8E1 qui sont prélevés en même milieu que les échantillons SP1 et SP8 ont des concentrations plus élevées en brome et on suspecte aussi des traces de plomb pour ces deux échantillons. C'est peut-être à cause des lieux de provenance : ces échantillons proviennent du milieu naturel et en plein

air. Il est donc nécessaire de prendre des mesures sur la culture et la consommation de spiruline provenant de ces lieux.

Il n'y a pas de différences de composition ou de valeur nutritionnelle notables entre ces souches, par contre la couleur verte des ondulées est plus sombre; certains préfèrent la couleur et la saveur de l'une ou l'autre souche, mais ceci est affaire de goût personnel.

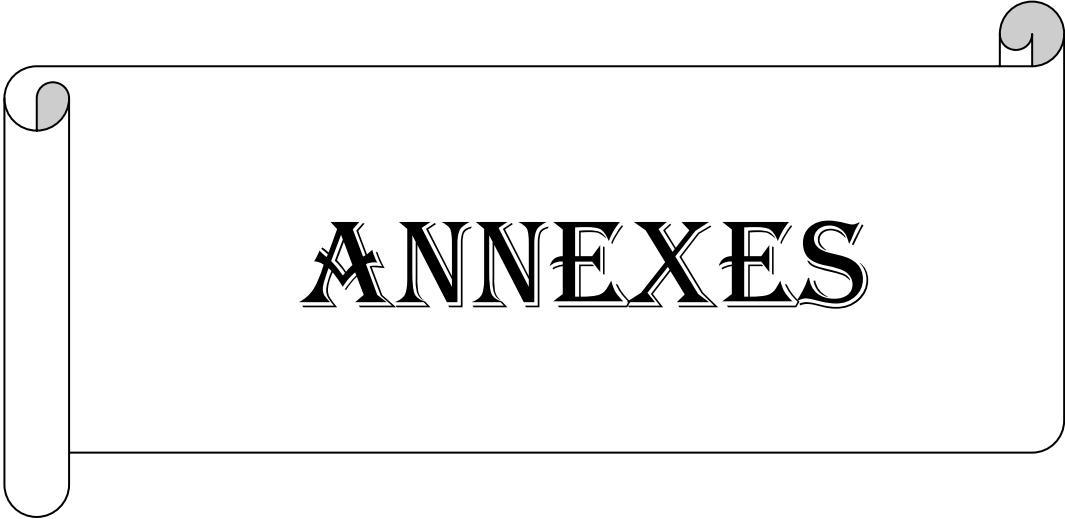
Les ondulées et les droites ont des caractères communs, mais les ondulées ne souffrent pas de la suspicion de ne pas être de "vraies" spirulines.

Pour notre part, la préférence va aux « ondulées » du point de vue pratique, bien que les « spiralées » soient plus belles d'aspect au microscope.

Les résultats peuvent contribuer à un apport de connaissance parmi tant d'autres pour les biologistes, les chimistes, les agronomes, les médecins. Ils peuvent aussi ouvrir des recherches sur plusieurs produits, les plantes alimentaires comme l'Aloès *Vera*, le *nonis* et les plantes médicinales, ainsi que des recherches en médecine et sur l'écologie comme la pollution marine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Paul Ricard, 2008.-Mémoire de l'institut océanographique.- Acte de colloque international sur Spiruline et Développement.- Toliara Madagascar, p. 25.
- [2] Jordan,J. P, 2011. -Cultiver la spiruline.- Manuel de culture artisanale.pdf.
- [3] Ansadi, M, .2004.- Détermination par spectrométrie gamma de la contamination en Cs-137 du sol et de quelques denrées alimentaires des Iles Comores.-Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
- [4]. Leo, W.R, 1987.- Technique for Nuclear and Particle Physics Experiments.- Ecole polytechnique de Lausanne, Institut de Génie atomique, Département de Physique, PHB Ecubens, CH-1015 Lausanne Switzerland.
- [5]Jecfa.-Codex general standard for contaminants and toxins in foods.CODEX STAN 193-1995, Rev. 3-2007
- [6] ANAH.-le plomb dans l'eau.-8, avenue de l'Opéra 75001 Paris • Délégations locales de l'ANAH au sein de chaque DDE.-www.anah.fr/
- [7] Evans, R, 1955. - “The Atomic Nucleus”, Edition: McGraw – Hills, New York.
- [8] Siegbahn K, 1965. - “Alpha, Beta, and Gamma-Ray Spectroscopy”, - Amsterdam: North Hoeland.
- [9]wikipedia,-2014.-Régressionlinéaire.
Wikipedia.<http://fr.wikipedia.org/w/index.php?oldid=102677400>
- [10] Dennis,- Loi empirique du rendement de fluorescence.
- [11] BocarKalidion M'BAYE 1, et all,-Science Lib Edition Mersenne,-Volume3.N°11096
- [12] B-Blooms Namur,- URBO (Blonnet)
- [13] : Razafitsalama, V.T, 2009.- Dosage de métaux lourds (Pb, Cd, Fe) par la spectrométrie d'absorption atomique dans les tissus animaux.-Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.
- [14] : Manoela, F.P, 2009.- Etude de la corrélation entre la concentration du potassium dans l'extrait d'Aferontany et effet biologique sur un cœur isole.-Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo.



ANNEXES

ANNEXE 1

Impacts sanitaires des métaux

Les impacts sur la santé quant à l'ingestion des aliments contenant les oligo-éléments suivants :

Le zinc

Il aide dans les fonctions suivantes : défense immunitaire; cicatrisation ; croissance et développement normale durant la grossesse, de l'enfant et de l'adolescent.

Le zinc se concentre dans la prostate et dans certaines parties de l'œil.

L'effet indésirable majeur de la consommation excessive du zinc est la carence en cuivre, ainsi que des maux d'estomac, nausée, irritation de la bouche et sensation de mauvais goût.

Le fer

Le fer est présent dans l'hémoglobine des globules rouges qui transportent l'oxygène vers toutes les cellules. Il est aussi présent dans la myoglobine, une substance semblable à l'hémoglobine, qui aide les muscles à mettre de l'oxygène en réserve. Le fer est essentiel à la production de l'adénosine triphosphate (ATP), source première de l'énergie corporelle. Il participe à plusieurs processus physiologiques vitaux, comme la régulation de la croissance des cellules et de leur différenciation.

Un excès de fer pourrait être associé à certaines maladies, comme : l'hémochromatose, irritations gastro-intestinales et des lésions irréversibles du cœur, du pancréas, des glandes endocrines et des articulations.[\[3\]](#)

Le plomb

Lors d'une ingestion excessive ou d'une administration parentérale du plomb ou son dérivé inorganique surviennent des douleurs abdominales, des vomissements parfois une diarrhée. Ces troubles digestifs s'accompagnent d'une hépatite cytolytique et d'une atteinte tubulaire rénale. Mais la maladie la plus fréquente provoquée par le plomb est le saturnisme, cette maladie réduit le quotient intellectuel QI d'un homme.[\[5\]](#)

L'arsenic

L'exposition à long terme à l'arsenic inorganique contribue au risque de contracter le cancer chez l'humain et elle peut affecter le tractus gastro-intestinal, les reins, le foie et l'épiderme. Mais une exposition à courte durée à des concentrations très élevées d'arsenic inorganique peut aussi provoquer divers effets pour la santé dont des nausées, des diarrhées et l'engourdissement des mains et des pieds.

Le chrome

Le chrome (III) est un nutriment essentiel pour l'homme et, une carence peut provoquer des problèmes au cœur, des perturbations du métabolisme et du diabète. Mais l'absorption excessive de chrome (III) peut aussi provoquer des problèmes de santé, par exemple :

- Eruptions cutanées
- Estomac dérangé et ulcères
- Problèmes respiratoires
- Système immunitaire affaibli
- Dommage au foie et aux reins
- Altération du système génétique et cancer des poumons
- Mort

Le strontium

Le chromate de strontium provoque le cancer de poumons.

ANNEXE 2

Calcul des activités des échantillons

SP1

Nucléides	Energies (keV)	$P\gamma$	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)
^{40}K	1461	0,107	1943±26	83	449	0,025992	224±129
^{212}Pb	238.3	0,446	52±25	83	450	0,024752	225±130
^{208}Tl	583.1	0,8577	57±34	45	244	0,018106	122±71
	2614.1	0,9984	68±23	35	192	0,013776	96±55
^{226}Ra	186.21	0,0328	110±59	78	422	0,011104	211±122
^{214}Bi	609.31	0,433	178±34	323	1763	0,006573	161±93
^{214}Pb	295.21	0,197	217±202	67	360	0,006324	180±104
	351.31	0,389	343±158	62	338	0,002863	169±98
^{230}Th	63.26	0,0351	410±146	158	858	3,19E-82	429±248

SP2

Nucléides	Energies (keV)	$P\gamma$	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A ($\text{Bq} \cdot \text{kg}^{-1}$)
^{40}K	1461	0,107	2055±13	82	166	0,025992	83±48
^{212}Pb	238.3	0,446	140±27	74	151	0,024752	75±44
^{208}Tl	583.1	0,8577	34±18	42	87	0,018106	43±25
	2614.1	0,9984	-19±12	31	65	0,013776	33±19
^{226}Ra	186.21	0,0328	87±30	76	156	0,011104	78±45
^{214}Bi	609.31	0,433	113±18	49	100	0,006573	50±29
^{214}Pb	295.21	0,197	32±20	50	102	0,006324	51±29
	351.31	0,389	-32±23	43	89	0,002863	45±26
^{230}Th	63.26	0,0351	-1837±74	74	151	0,000862	76±44

SP3

Nucléides	Energies (keV)	$P\gamma$	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A (Bq.kg ⁻¹)
⁴⁰ K	1461	0,107	1103±0,1	62	128	0,002863	64±37
²¹² Pb	238.3	0,446	173±0,3	65	133	0,018106	67±39
²⁰⁸ Tl	583.1	0,8577	16±0,3	32	66	0,006573	33±19
	2614.1	0,9984	-346±0,6	28	59	0,000862	29±17
²²⁶ Ra	186.21	0,0328	139±0,5	76	156	0,024752	78±45
²¹⁴ Bi	609.31	0,433	-8±10,9	32	66	0,006324	33±19
	1763	0.17	6±0,3	20	43	0,002169	21±12
²¹⁴ Pb	351.31	0,389	-19±14,3	46	95	0,011104	47±27
²³⁰ Th	63.26	0,0351	-1390±44,9	81	165	3,19E-82	83±48

SP4

Nucléides	Energies (keV)	$P\gamma$	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A (Bq.kg ⁻¹)
⁴⁰ K	1461	0,107	1244±29	89	180	0,013776	90±52
²¹² Pb	238,3	0,446	223±12	56	115	0,024752	57±33
²⁰⁸ Tl	583,1	0,8577	167±10	62	127	0,018106	64±37
	2614,1	0,9984	102±9	43	88	0,011104	44±25
²²⁶ Ra	186,21	0,0328	41±7	35	73	0,006573	37±21
²¹⁴ Bi	609,31	0,433	65±7	40	83	0,006324	41±24
²¹⁴ Pb	351,31	0,389	126±5	55	112	0,002863	56±32
²³⁰ Th	63,26	0,0351	172±5	25	52	0,000862	26±15

SP5

Nucléides	Energies (keV)	$P\gamma$	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A (Bq.kg ⁻¹)
⁴⁰ K	1461	0,107	2422±321	90	183	0,002863	92±53
²¹² Pb	238,3	0,446	424±214	80	163	0,018147	81±47
²⁰⁸ Tl	583,1	0,8577	105±81	46	95	0,006573	47±27
	2614,1	0,9984	438±64	39	81	0,000862	40±23
²²⁶ Ra	186,21	0,0328	566±32	83	169	0,024752	84±49
²¹⁴ Bi	609,31	0,433	164±48	46	96	0,006324	48±28
²¹⁴ Pb	295,21	0.197	70±61	72	146	0,013776	73±42
	351,31	0,389	261±32	66	134	0,011104	67±39
²³⁰ Th	63,26	0,0351	3162±2109	131	265	3,19E-82	132±76

SP6

Nucléides	Energies (keV)	$P\gamma$	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A (Bq.kg ⁻¹)
⁴⁰ K	1461	0,107	1395±13	70	143	0,002863	72±41
²¹² Pb	238,3	0,446	-27±26	57	117	0,018138	59±34
²⁰⁸ Tl	2614,1	0,9984	-18±12	31	64	0,000862	32±19
²²⁶ Ra	186,21	0,0328	149±30	81	164	0,024752	82±47
²¹⁴ Bi	609,31	0,433	17±7	39	81	0,006324	40±23
²¹⁴ Pb	351,31	0,389	-95±23	50	103	0,011126	52±30
²³⁰ Th	63,26	0,0351	1373±72	171	345	0,025992	173±100

SP7

Nucléide s	Energies (keV)	P γ	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A (Bq.kg $^{-1}$)
^{40}K	1461	0,107	3054 \pm 48	101	205	0,002863	103 \pm 59
^{212}Pb	238,3	0,446	119 \pm 94	86	175	0,018138	87 \pm 50
^{208}Tl	583	0,8577	62 \pm 41	50	103	0,006573	51 \pm 30
	2614,1	0,9984	42 \pm 26	42	86	0,000862	43 \pm 25
^{226}Ra	186,21	0,0328	-135 \pm 107	94	190	0,024752	95 \pm 55
^{214}Bi	609,31	0,433	137 \pm 62	55	112	0,006324	56 \pm 32
^{214}Pb	295,21	0,197	162 \pm 70	74	151	0,013776	75 \pm 43
	351,31	0,389	156 \pm 82	72	146	0,011126	73 \pm 42
^{230}Th	63,26	0,0351	3615 \pm 263	104	211	0,026421	106 \pm 61

SP8

Nucléides	Energies (keV)	$P\gamma$	Aire nette	LC	LD	Efficacité	A (Bq.kg ⁻¹)
⁴⁰ K	1461	0,107	2711±48	98	199	0,002863	99±57
²¹² Pb	238,3	0,446	212±95	84	170	0,018138	85±49
²⁰⁸ Tl	583	0.8577	74±63	51	105	0,006574	53±30
	2614,1	0,9984	43±40	41	85	0,000862	43±25
²²⁶ Ra	186,21	0,0328	109±53	89	181	0,024752	90±52
²¹⁴ Bi	609,31	0,433	63±55	54	111	0,006324	56±32
	1763	0.17	41±7	27	56	0,002172	28±16
²¹⁴ Pb	295,21	0,197	156±71	67	136	0,013776	68±39
	351,31	0,389	84±73	68	138	0,011127	69±40
²³⁰ Th	63,26	0,0351	-3635±267	95	192	0,025967	96±55

TITRE: LA RADIOACTIVITE ET LES ELEMENTS LOURDS DE LA SPIRULINE

RESUME

La spiruline constitue l'une des 3 classes d'algues qui ont la propriété d'accumuler les polluants du milieu dans lequel elles vivent. Le présent travail a pour objectif principal d'étudier la contamination radioactive de la spiruline par la spectrométrie gamma et de déterminer sa teneur en éléments lourds en utilisant la technique par fluorescence X.L'utilisation du détecteur et le logiciel Gamma Vision au laboratoire du département ATN à l'INSTN Madagascar, nous a permis de trouver des éléments radioactifs comme le potassium, le plomb, le thallium et le bismuth. Les éléments trouvés au laboratoire de TFXE dans ce même institut en utilisant la méthode de XRF classique accompagné du logiciel AXIL sont le calcium, le fer, le magnésium, le brome, le rubidium et le strontium ainsi que des éléments lourds: zinc et cuivre. La spiruline est riche en potassium, son activité 98 ± 56 (Bq.kg⁻¹) et la concentration moyenne de cet élément radioactif est de 16,2 g.kg⁻¹. Les résultats d'analyses nous amènent à dire qu'il est préférable de consommer la spiruline provenant de culture bien sécurisée contre la pollution (sous serre) et on peut dire qu'on a besoin d'améliorer les cultures en milieu naturel.

Mots clés : Spiruline, algue, éléments radioactifs, éléments lourds, éléments minéraux.

ABSTRACT

Spirulina is one of the three classes of algae that have the ability to accumulate contaminants from the environment in which they live. This paper mainly aims to study the radioactive contamination of Spirulina by gamma spectrometry objective and determine its content of heavy elements using the technique of X-ray fluorescence detector and Use of Gamma Vision software in the laboratory of ATN INSTN Madagascar, allowed us to find some amount of radioactive elements such as potassium, lead, thallium and bismuth. The elements found in the laboratory of the same institute TFXE using the conventional method along with the XRF AXIL software are calcium, iron, magnesium, bromine, rubidium and strontium as well as heavy elements zinc and copper. Spirulina is rich in potassium, its activity is 98 ± 56 (Bq.kg⁻¹) and the average concentration of the radioactive element is 16.2 g.kg⁻¹. Assay results leads us to say that it is best to consume spirulina from well secured against pollution (greenhouse) culture and we can say that we need to improve crops in natural environments.

Keywords: Spirulina, algae, radioactive elements, heavy elements, minerals elements.

Encadreurs : -RABESIRANANA Naivo Maître de conférences -RALAIARISOA HaritianaLuciette Maître de conférences	Impétrant : FANTARIANDRAINTSOA AnjaratolotraAvotra E-mail: fantary11@gmail.com Contact : 033 81 003 70 Bloc 28 CU Ankafotsy II
--	--

