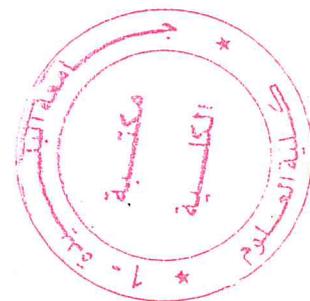


RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ BLIDA 1  
FACULTÉ DES SCIENCES  
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE



Mémoire de Master 2

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER EN PHYSIQUE**

**OPTION : MATIÈRE ET RAYONNEMENT**

**Mesure de la radioactivité dans l'eau  
à des fins dosimétriques**

Par : Oualid GHOUINI

Présenté le 21 juin 2017 devant le jury :

Mohamed Amine BENAMAR	Professeur	Président
Zohra LOUNIS-MOKRANI	Chercheur expert	Examinatrice
Anissa HAMMADI	Chercheur confirmé	Examinatrice
Abdelwahab BADREDDINE	Chercheur confirmé	Rapporteur

## Remerciements

*Je voudrais tout d'abord adresser toute ma gratitude à mon encadreur, M. BADREDDINE, pour m'avoir accueilli au sein du laboratoire de radiotoxicologie, pour sa disponibilité et surtout pour sa patience qui m'a permis d'achever ce travail.*



*Je voudrais remercier particulièrement M. BOUCHENEB pour m'avoir guidé tout au long de mon stage et M. CHERCHALI pour son apport inestimable dans un moment délicat de mon stage pratique.*

*J'adresse mes remerciements à tout le personnel du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger (CRNA) et en particulier à Mmes AIT KACI, MESSILI, MEGHARI, et MAKHOUT et Messieurs AIT ZIANE, AMRI et BENBOURENANE pour leurs conseils et leur bonne humeur à toute épreuve.*

*Enfin, j'adresse mes remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.*

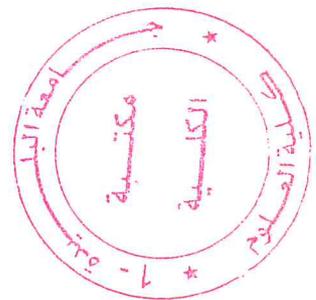
# Dédicaces

*À mon père,*

*À ma mère,*

*À mes sœurs,*

*À tous mes amis...*



## Abstract

Water is enriched with natural radionuclides when it passes through old massive rock formations. The internal exposition to ionizing radiation at low doses can cause health troubles and even cancer.

In most countries, regulation is established to ensure the safe consumption of drinking water. For instance, the national law imposes thresholds for radiological aspects of 15 pCi/L, 4 mRem/year, 100 Bq/L, 30 µg/L and 0.15 mSv/year for gross alpha, gross beta, tritium, uranium and the total indicative dose respectively

The aim of this study is to explore some techniques used to measure radioactivity in drinking water. We used an alpha-beta counter for gross alpha and gross beta measurement, liquid scintillation counter for tritium measurement, and gamma-ray spectrometry for the determination of radium 226, thorium-232 and potassium 40

All the results obtained in this study show that all the values are below the regulation thresholds.

**Key words:** internal exposition, ionizing radiation, drinking water, dosimetry, radiation protection, regulation threshold, gross alpha, gross beta, tritium, liquid scintillation, Uranium, gamma spectrometry.

## Résumé

L'eau est enrichie avec les radionucléides d'origine naturelle lors de son passage à travers les formations géologiques. L'exposition interne aux rayonnements ionisants de faible dose peut causer des problèmes de santé voire un cancer.

Dans la plupart des pays, des réglementations sont établies pour assurer la consommation saine de l'eau potable. En effet, la réglementation nationale impose des seuils radiologiques de 15 pCi/L, 4 mRem/an, 100 Bq/L, 30 µg/L et 0.15 mSv/an pour alpha total, bêta total, tritium, uranium et la dose totale indicative respectivement.

Le but de cette étude est d'explorer quelques techniques utilisées pour contrôler la radioactivité dans l'eau potable. Nous avons utilisé un compteur alpha-bêta total pour la mesure alpha-bêta total, un compteur à scintillation liquide pour la détermination du tritium et une chaîne de spectrométrie gamma pour la détermination des radionucléides radium-226 thorium-232 et potassium-40.

Tous les résultats obtenus à l'issue de cette étude montrent que toutes les valeurs sont en dessous des seuils réglementaires.

**Mots clés :** exposition interne, rayonnement ionisant, eau potable, dosimétrie, radioprotection, seuil réglementaire, alpha total, bêta total, tritium, scintillation liquide, Uranium, spectrométrie gamma.

## Table des matières

Abstract .....	iii
Listes des figures .....	1
Liste des tableaux .....	2
Introduction générale.....	3
Chapitre I : Notions de radioprotection .....	4
I.1. La désintégration radioactive .....	4
I.2 Particule alpha .....	5
I.3 Particule bêta .....	5
I.3 Mode d'interaction des particules chargées avec la matière .....	7
I.4 Rayonnement Gamma.....	8
I.4.1 Interaction des photons avec la matière.....	8
I.5 Exposition aux rayonnements ionisants.....	10
I.6 Grandeur dosimétriques .....	10
I.7 Risques des rayonnements ionisants sur la santé.....	12
Chapitre II : Cadre réglementaire pour la consommation de l'eau potable .....	14
II.1. Différents types d'eau pour la consommation humaine.....	14
II.1.1. Les eaux de surface .....	14
II.1.2. Les eaux souterraines .....	15
II.1.3. Les eaux de mer.....	15
II.2. Ressources en eaux en Algérie .....	15
II.3. Recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS).....	16
II.4. Réglementation internationale .....	20
II.5. Réglementation Nationale .....	21
II.6. Les origines de la radioactivité dans les eaux.....	22
II.6.1. Origine des particules alpha dans les eaux.....	23
II.6.2. Origine des particules bêta dans les eaux .....	23
Chapitre III : Mesure de la radioactivité Alpha-Bêta Totale dans l'eau.....	24
III.1. Principe de la mesure alpha-bêta total .....	24
III.2. Compteur proportionnel .....	24
III.3. Courbe de comptage .....	25
III.4. Discrimination entre les bêtas et les alphas.....	26
III.5. Choix du gaz.....	27
III.6. Compteur utilisé .....	27

III.6.1. Courbe de comptage .....	28
III.6.2. Calibration en efficacité.....	34
III.7. Protocole expérimental .....	36
III.8. Résultats expérimentaux.....	37
III.8.1. L'activité calculée pour une calibration par la source d'Américium .....	38
Chapitre IV : Mesure du Tritium dans l'eau par scintillation liquide .....	39
IV.1. Tritium .....	39
IV.1.1. Origines naturelles du tritium .....	39
IV.1.2. Origines artificielles du tritium.....	39
IV.2. Familles de scintillateurs .....	40
IV.3. Scintillateur liquide .....	40
IV.3.1. Le solvant .....	40
IV.3.2 Le scintillateur .....	41
IV.4. Fonctionnement.....	42
IV.5. Le phénomène de quenching.....	43
IV.5.1. Le quenching couleur .....	43
IV.5.2 Le quenching chimique .....	44
IV.6. Procédure expérimentale.....	44
IV.6.1. Distillation .....	44
IV.6.2. Enrichissement électrolytique.....	44
IV.6.3. Neutralisation.....	45
IV.6.4. Comptage .....	46
IV.7. Calcul de l'activité .....	47
IV.7.1. Facteur d'enrichissement.....	47
IV.7.2. Calcul d'incertitude .....	48
IV.8. Résultats de la scintillation liquide.....	49
CHAPITRE V : Mesure de l'Uranium dans l'eau par fluorimétrie.....	50
V.1. Principe de fonctionnement :.....	50
V.2. Matériel.....	51
V.3. Préparation de l'échantillon.....	51
V.4. Système de mesure .....	52
Chapitre VI : Mesure de la radioactivité dans l'eau par spectrométrie Gamma.....	54
VI.1. Principe de fonctionnement d'un détecteur à semi-conducteurs.....	54
VI.2. Système de mesure .....	55

VI.2.1. Fonctionnement .....	55
VI.2.2. Constitution du système .....	56
VI.3. Calcul de l'activité .....	57
VI.4. Calibration en efficacité .....	58
VI.5. Résultats .....	59
Chapitre VII : Synthèse et interprétation des résultats .....	62
VII.1. Activité alpha/Bêta totale dans l'eau .....	62
L'activité calculée pour une calibration par la source d'Américium .....	62
L'activité calculée pour une calibration à l'aide de la source d'Uranium .....	63
L'activité calculée pour une calibration à l'aide de la source de Plutonium .....	63
VII.2. Activité en tritium .....	66
VII.3. Activité en Uranium .....	68
Conclusion générale .....	72
Bibliographie .....	73

## Listes des figures

Fig. I.1 : Les chaines de désintégrations des radioéléments U-238, U-235, et Th-232 .....	5
Fig. I.2 : Spectre des particules bêtas [4].....	6
Fig. I.3 : Désintégration bêta moins .....	6
Fig. I.4 : Désintégration bêta plus.....	7
Fig. I.5 : Zones des désintégrations bêtas[4] .....	7
Fig. I.6 : Rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung .....	8
Fig. I.7 : Probabilité des phénomènes compton, photoélectrique et création de paires[5].....	9
Fig. I.8 : Les différentes origines des rayonnements ionisants .....	9
Fig. II.1 : Les précipitations en Algérie [9] .....	16
Fig. II. 2 : Approche de l'OMS pour la surveillance radiologique de l'eau[10] .....	18
Fig. III. 1 : Les différents régimes de fonctionnement d'un détecteur à gaz[18].....	24
Fig. III. 2 : Evolution d'une avalanche[19] .....	25
Fig. III. 3 : Le premier coefficient de Townsend en fonction du champ électrique[19] .....	25
Fig. III. 4 : Courbe de comptage[19].....	26
Fig. III. 5 : Le spectre d'impulsion différentiel[19].....	26
Fig. III. 6 : Appareillage de mesure et logiciel d'acquisition .....	28
Fig. III. 7 : Courbe de comptage des 3 détecteurs (Am-241) .....	29
Fig. III. 8 : Plateau de comptage des 3 détecteurs (Am-241) .....	29
Fig. III. 9 : Courbe de comptage des 3 détecteurs (U-233).....	30
Fig. III. 10 : Plateau de comptage des 3 détecteurs (U-233).....	30
Fig. III. 11 : Courbe de comptage des 3 détecteurs (Pu-239) .....	31
Fig. III. 12 : Plateau de comptage des 3 détecteurs (Pu-239) .....	31
Fig. III. 13 : Courbe de comptage des 3 détecteurs .....	32
Fig. III. 14 : Plateau de comptage des 3 détecteurs .....	32
Fig. III. 15 : Courbe de comptage des 3 détecteurs .....	33
Fig. III. 16 : Plateau de comptage des 3 détecteurs .....	33
Fig. III. 17 : Evaporation de l'eau sous lampes UV .....	36
Fig. III. 18 : Séchage des échantillons sous lampe infra-rouge .....	37
Fig. III. 19 : Dépôt final.....	37
Fig. IV. 1 : Les solvants les plus utilisés dans la scintillation liquide[21].....	41
Fig. IV. 2 : Caractéristiques des scintillants primaires[21].....	42
Fig. IV. 3 : Propriétés du scintillant secondaire [21] .....	42
Fig. IV. 4 : Phénomène de la scintillation liquide[21].....	43
Fig. IV. 5 : Processus de la scintillation liquide [23].....	43
Fig. IV. 6 : Schéma du protocole expérimental de LSC .....	44
Fig. IV. 7 : Dispositif de la 1ère distillation .....	44
Fig. IV. 8 : Les cellules d'enrichissement électrolytique.....	45
Fig. IV. 9 : Dispositif de la 2ème distillation .....	45
Fig. IV. 10 : Flacon contenant le liquide scintillant.....	46
Fig. IV. 11 : L'appareillage de mesure de la scintillation liquide Tr-iCarb.....	47
Fig. V. 1 : Mécanisme d'absorption et de fluorescence.....	51
Fig. V. 2 : Fluorimètre du laboratoire.....	53
Fig. VI. 1 : Principe de fonctionnement d'un détecteur à semi-conducteurs[28] .....	54
Fig. VI. 2 : Compteur germanium hyper pur (GeHp).....	55
Fig. VI. 3 : Schéma de principe du système de mesure [28]. .....	56
Fig. VI. 4 : Courbe de calibration en efficacité .....	59
Fig. VI. 5 : Le spectre gamma de l'échantillon 1 .....	61
Fig. VI. 6 : Spectre gamma de l'euporium-152 utilisé pour la calibration en efficacité.....	61

---

## Liste des tableaux

Tableau I. 1 : Valeurs recommandées pour les facteurs de pondération pour les rayonnements pour les neutrons voir [7] .....	11
Tableau I. 2 : Facteur de pondération tissulaire pour les différents organes [7] .....	11
Tableau I. 3 : Les symptômes cliniques en fonction de la dose.....	13
Tableau II. 1 : Seuils radiologiques recommandés par l’OMS en 1994[10].....	17
Tableau II. 2 : Seuils radiologiques recommandés par l’OMS en 2004[10].....	17
Tableau II. 3 : Les valeurs d’activité guides recommandées par l’OMS[13] .....	19
Tableau II. 4 : La réglementation française .....	20
Tableau II. 5 : Réglementation radiologique des Etats-Unis .....	21
Tableau II. 6 : Réglementation nationale pour l’eau potable en 2011[16].....	21
Tableau II. 7 : Réglementation nationale pour l’eau potable en 2014[17].....	22
Tableau II. 8 : Les modifications suggérées .....	22
Tableau III. 1: Potentiel d’ionisation et énergie moyenne pour la création d’une paire é-ion pour différents gaz[19].....	27
Tableau III. 2 : Les sources utilisées pour établir la courbe de comptage des particules .....	28
Tableau III. 3 : Les sources utilisées pour établir la courbe de comptage des particules bêta .....	28
Tableau III. 4 : Plateau et tension optimale pour le comptage des particules alpha .....	31
Tableau III. 5 : Plateau et tension optimale pour le comptage des particules bêta .....	33
Tableau III. 6 : Les sources alpha corrigées .....	34
Tableau III. 7 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source Am-241 .....	35
Tableau III. 8 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source U- 233 .....	35
Tableau III. 9 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source Pu- 239.....	35
Tableau III. 10 : Les sources bêta corrigées .....	35
Tableau III. 11 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source $\beta 1$ .....	36
Tableau III. 12 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source $\beta 2$ .....	36
Tableau III. 13 : Mesure du bruit de fond.....	37
Tableau VI. 1 : Les efficacités mesurées et calculées.....	58
Tableau VI. 2 : L’AMD pour différents radionucléides .....	60
Tableau VII. 1: Activité minimale détectable pour les 3 détecteurs.....	62
Tableau VII. 2: Résultats de l’analyse des échantillons de l’eau potable .....	62
Tableau VII. 3: Activité minimale détectable pour les 3 détecteurs.....	63
Tableau VII. 4: Résultats de l’analyse des échantillons de l’eau potable .....	63
Tableau VII. 5: Activité minimale détectable pour les 3 détecteurs.....	63
Tableau VII. 6: Résultats de l’analyse des échantillons de l’eau potable .....	63
Tableau VII. 7 : L’activité alpha total dans les échantillons portugais [31] .....	64
Tableau VII. 8: Résultats de l’analyse d’échantillons d’eau provenant de Tamanrasset (calibration à l’aide d’américium).....	65
Tableau VII. 9: Résultats de l’analyse d’échantillons d’eau provenant de Tamanrasset (calibration à l’aide d’uranium).....	65
Tableau VII. 9: Résultats de l’analyse d’échantillons d’eau provenant de Tamanrasset (calibration à l’aide d’plutonium).....	66
Tableau VII. 11: Le tableau résume les résultats de l’analyse alpha total des eaux thermales de Ankara [32] .....	66
Tableau VII. 12: Les résultats de la mesure du tritium par scintillation liquide .....	67
Tableau VII. 13 : Les résultats d’analyse du tritium de l’eau potable[33].....	68
Tableau VII. 14 : Les résultats de l’analyse des différents radionucléides par spectrométrie gamma....	69
Tableau VII. 15: Les doses dues à l’ingestion du $^{226}\text{Ra}$ , $^{232}\text{Th}$ et $^{40}\text{K}$ .....	70
Tableau VII. 16:L’activité des radionucléides contenus dans l’échantillon de l’eau potable[34] .....	71
Tableau VII. 17: La dose annuelle due à l’ingestion d’eau potable[34].....	71

---

## Introduction générale

Les réserves en eau de la terre sont estimées à 1400 millions de milliards de  $m^3$  environ soit 70% de la surface de la terre ; seulement 2,53 % (35 millions de milliards de  $m^3$ ) selon l'UNESCO-WWAP sont des eaux douces non totalement disponibles, car les 2/3 sont immobilisées sous forme de glaciers et de neiges aux pôles et en hautes montagnes. Parmi les ressources d'eaux douces disponibles, moins d'1 % soit 0,2 million de milliard de  $m^3$ , est exploité, pour la majeure partie utilisée dans l'industrie notamment pour le refroidissement au cours de la production d'électricité et pour l'irrigation. Le constat aujourd'hui est la croissance de la consommation de l'eau dans le monde, liée elle aussi à la croissance de la population mondiale : en un siècle, la population mondiale a triplé et la consommation mondiale de l'eau a été multipliée par 6 [1].

Quant à l'Algérie, la demande en eau potable a considérablement augmenté depuis les années 1970, et représente 35 % de la demande totale [2].

Afin de garantir la consommation et l'utilisation saine de l'eau, l'état algérien a établi des normes auxquelles l'eau potable doit répondre. Dans ce mémoire, nous nous intéressons aux normes radiologiques. En effet, l'eau est exposée à la pollution radioactive qui provient de deux sources principales : la radioactivité naturelle, représentée principalement par les familles radioactives  $^{238}U$ ,  $^{235}U$ ,  $^{232}Th$  et l'élément  $^{40}K$  et par les radioéléments d'origine cosmique.

L'objectif de ce travail est la mise en œuvre des différentes techniques de mesure de la radioactivité dans l'eau potable qui nous permettent de vérifier la satisfaction des exigences réglementaires.

Pour cela, le mémoire est divisé en deux parties : théorique et pratique. La partie théorique est basée sur la recherche bibliographique où l'on présente les notions de radioprotection (chapitre I) où nous décrivons toute la physique de la radioactivité et de la dosimétrie, ensuite le cadre réglementaire international et national (chapitre II). La partie expérimentale représentée par les chapitres III, IV, V et VI comporte la mise en œuvre de toutes les techniques de mesure appliquées en décrivant le matériel utilisé, les méthodes appliquées, les valeurs de mesure obtenues. Le mémoire s'achève par le chapitre VII où l'on présente une synthèse de l'ensemble des résultats avec leurs interprétations, et bien sûr les conclusions qui en découlent.

## Chapitre I : Notions de radioprotection

### I.1. La désintégration radioactive

Le phénomène de la radioactivité se produit lorsqu'un noyau instable ou un radionucléide qui possède un excès d'énergie se désintègre afin de retrouver la stabilité. Le noyau produit (noyau fils) après désintégration peut lui même être instable et par conséquent un émetteur de rayonnement, comme pour le cas de l'uranium 238 qui se désintègre en une série de noyaux jusqu'à atteindre une forme stable, le plomb 206.

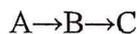
La loi qui régit ce phénomène est :

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots (I.1)$$

- A : l'activité à un temps t
- A<sub>0</sub> : l'activité à un temps initial
- t : temps écoulé
- λ : constante de décroissance radioactive (ln2/T<sub>1/2</sub>)

Le T<sub>1/2</sub> est dit période ou demi-vie correspondant au temps nécessaire pour que la moitié du nombre d'atomes initial se désintègre.

Quand il s'agit d'une désintégration en chaîne (prenons le cas de la désintégration de deux corps) c.-à-d.



La décroissance de l'élément B dépend de sa désintégration et de la désintégration du noyau A on a

$$-\frac{dN_B}{dt} = -\lambda_B N_B + \lambda_A N_A \dots\dots\dots (I.2)$$

Où N<sub>B</sub> et N<sub>A</sub> sont les nombres des noyaux B et A.

Après résolution de cette équation différentielle, on obtient [3]

$$A_B = \frac{\lambda_B \lambda_A}{\lambda_A - \lambda_B} A_A^0 (e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}) + \lambda_B A_B^0 e^{-\lambda_B t} \dots\dots\dots (I.3)$$

Avec : A = -λ N

Un cas particulier et -qui sera exploité dans ce travail, est celui où la période du noyau père (qui se désintègre) est grande devant la période du noyau fils T<sub>A</sub> >>> T<sub>B</sub>. Dans ces conditions, l'activité des deux devient la même.

$$A_A = A_B \dots\dots\dots (I.4)$$

Ceci est dit l'équilibre séculaire

La désintégration est sui vie soit par l'émission d'une

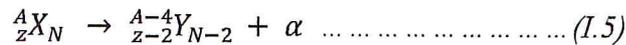
- Particule alpha ;

- Particule bêta ;
- Ou d'un rayonnement gamma.

Ces émissions sont dites rayonnements ionisants du fait qu'elles ont une énergie suffisante pour arracher un électron aux atomes du milieu traversé qui se transforment ainsi en ions positifs.

### I.2 Particule alpha

C'est un noyau d'hélium composé de deux protons et de deux neutrons, il est chargé positivement  $He^{2+}$



La radioactivité alpha est prépondérante dans les noyaux lourds comme l'uranium 238-235, le radium 226-224, le thorium-232 et le radon-222 qui peuvent être présents dans les eaux.

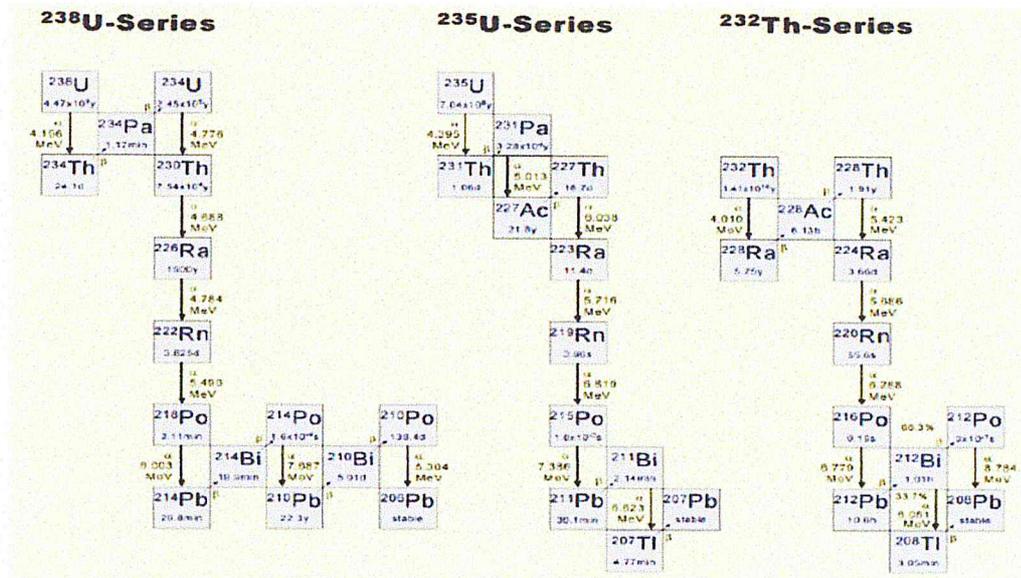


Fig. 1 : Les chaînes de désintégrations des radioéléments U-238, U-235, et Th-232

Pour que cette désintégration soit possible, il faut que la masse du noyau père soit supérieure à celle des produits [4]:

$$M_x > M_y + M_\alpha \dots \dots \dots (I.6)$$

Cette condition se traduit par :

$$Q = T_y + T_\alpha = (M_x - M_y - M_\alpha)c^2 > 0 \dots \dots \dots (I.7)$$

où Q est l'énergie libérée,  $T_y$  est l'énergie cinétique du noyau y,  $T_\alpha$  est l'énergie cinétique de la particule alpha,  $M_x$  est la masse du noyau père,  $M_y$  est le noyau fils,  $M_\alpha$  Noyau de l'hélium et c célérité de la lumière [4]

### I.3 Particule bêta

Il existe deux types de particule bêta

- Bêta moins : c'est l'émission d'électron.
- Bêta plus : c'est l'émission d'un positron.

Contrairement à la radioactivité alpha où l'énergie de la particule alpha est fixe pour une désintégration donnée, la particule bêta peut surgir avec une énergie qui varie entre 0 et  $E_{max}$  (voir Figure I.2. [4]).

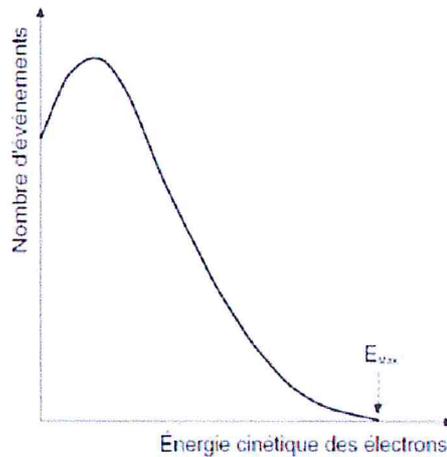
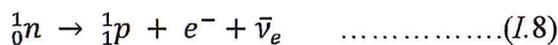


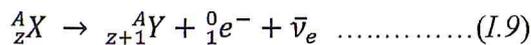
Fig. I 2 : Spectre des particules bêtas [4]

**Radioactivité bêta moins ( $\beta^-$ )**

Les noyaux riches en neutrons (situés à gauche de la vallée de stabilité voir I.5) ont tendance à émettre un électron et un anti-neutrino qui proviennent de la transformation d'un neutron en un proton :



La réaction est isobarique, c'est-à-dire que le nombre de masse "A" ne change pas:



Pour qu'il y ait une émission, il faut que la masse atomique du noyau émetteur soit supérieure à celle du noyau produit [4]

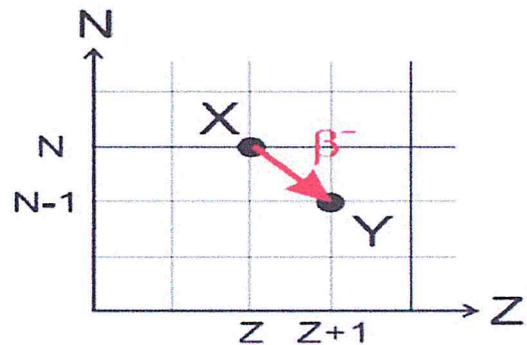


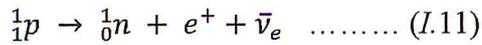
Fig.I 3 : Désintégration bêta moins

$$M_z > M_{z+1} \dots\dots\dots(I.10)$$

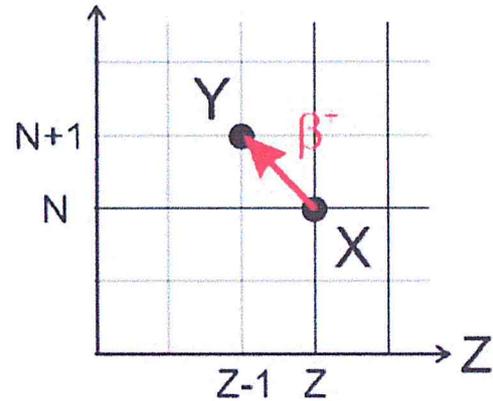
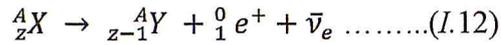
Parmi les radionucléides émetteurs  $\beta^-$  qui peuvent être présents dans l'eau, on peut citer le tritium, le potassium- 40, et le radium-228.

**Radioactivité bêta plus ( $\beta^+$ )**

Les noyaux riches en protons (situés à droite de la vallée de stabilité sur la figure I.5 émettent un positron et un neutrino lors de la transformation du proton en neutron.



La réaction globale correspond à :



La condition énergétique pour qu'un noyau puisse se désintégrer par émission  $\beta^+$  est [4]:

Fig. I.4 : Désintégration bêta plus

$$M_Z - M_{Z-1} > 2m_e \dots\dots\dots (I.13)$$

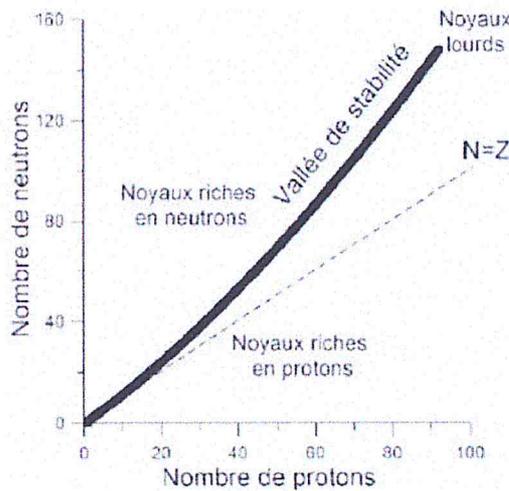


Fig. I.5 : Zones des désintégrations bêtas[4]

Lorsque le positron rencontre un électron atomique, il disparaît lors d'une réaction d'annihilation de matière - antimatière  $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ . Cette annihilation a lieu le plus souvent au repos ( $e^+$  et  $e^-$  au repos).

Pour respecter la loi de conservation de l'impulsion, il faut (au moins) 2 photons avec des impulsions égales et opposées. De plus, ces photons auront chacun une énergie de  $m_e c^2 = 511 \text{ keV}$

### I.3 Mode d'interaction des particules chargées avec la matière

En traversant la matière, les particules chargées interagissent principalement avec les électrons du cortège et très rarement avec le noyau à travers [3] :

- Ionisation : Si l'énergie transférée par l'électron incident est supérieure à l'énergie de liaison d'un électron de l'atome cible, celui-ci est expulsé du cortège électronique et il y a ionisation de l'atome
- Excitation : Si l'énergie transférée par l'électron incident est exactement égale à la différence entre les énergies de liaison de deux couches électroniques de l'atome cible, un électron de cet atome saute sur une couche moins liée et il y a excitation. Les atomes peuvent retourner à leurs états fondamentaux en émettant des photons.

Un troisième mécanisme d'interaction qui n'est pas présent chez les alphas est la dissipation de l'énergie cinétique par rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung qui est surtout prépondérant pour les bêtas dont l'énergie est supérieure à 1MeV.

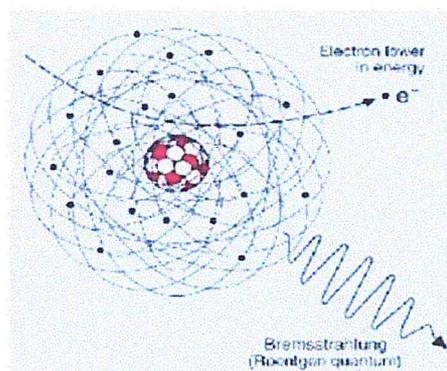


Fig. .I 6 : Rayonnement de freinage ou Bremsstrahlung

#### 1.4 Rayonnement Gamma

Généralement, les noyaux produits par radioactivité alpha ou bêta sont dans un état d'énergie excité, ce qui fait que les désintégrations par radioactivité alpha ou bêta sont souvent accompagnées par des émissions de rayonnements gamma consécutives à la désexcitation. Les photons gamma produits ont des énergies bien définies, ce qui permet d'identifier le noyau radioactif source et de quantifier son activité.

Il est à noter que certaines désintégrations donnent lieu à une émission de rayons X dont les énergies sont également bien définies. Les rayons X, qui se distinguent des rayons gamma par leur origine, ont les mêmes propriétés que des rayons gamma de basse énergie (inférieure à 100 keV), ils ne s'en distinguent pas en spectroscopie et peuvent être utilisés de la même façon [5].

L'essentiel de la radioactivité naturelle, en ce qui concerne l'émission gamma, est attribuable au potassium 40 ( $^{40}K$ ), à des radioéléments des séries de l'uranium (filiales  $^{238}U$  et  $^{235}U$ ) et du thorium ( $^{232}Th$ ), séries dites naturelles.

##### 1.4.1 Interaction des photons avec la matière

Les photons peuvent interagir avec la matière par le biais de quatre processus [5] :

**L'effet photoélectrique** prédominant à basse énergie et dans les matériaux de numéro atomique élevé.

**La diffusion Compton** qui domine aux énergies intermédiaires,

**La création de paires** qui est importante à haute énergie (. Fig. I.8) ainsi que la diffusion Rayleigh (qui est un processus négligeable devant les trois autres).

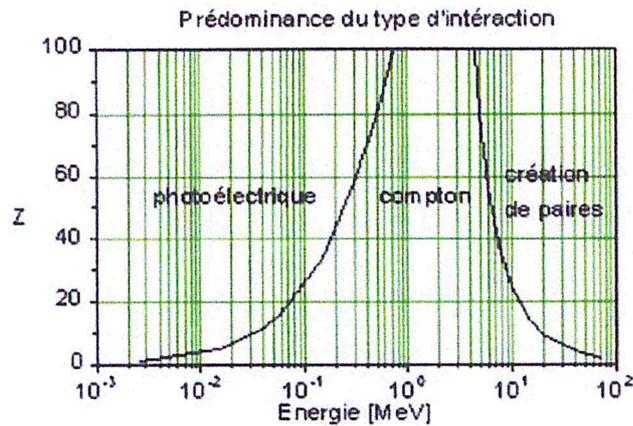


Fig. I.7 : Probabilité des phénomènes compton, photoélectrique et création de paires[5]

Dans notre quotidien, nous sommes en contact permanent avec la radioactivité, dans les proportions de la figure I.8. Cette exposition peut être d'origine naturelle, issue de la terre, du cosmos ou dans notre alimentation mais également artificielle lors d'examens ou de thérapies médicales ou encore issue des rejets d'installations nucléaires ou résultant des anciens essais d'armes nucléaires dans l'atmosphère.

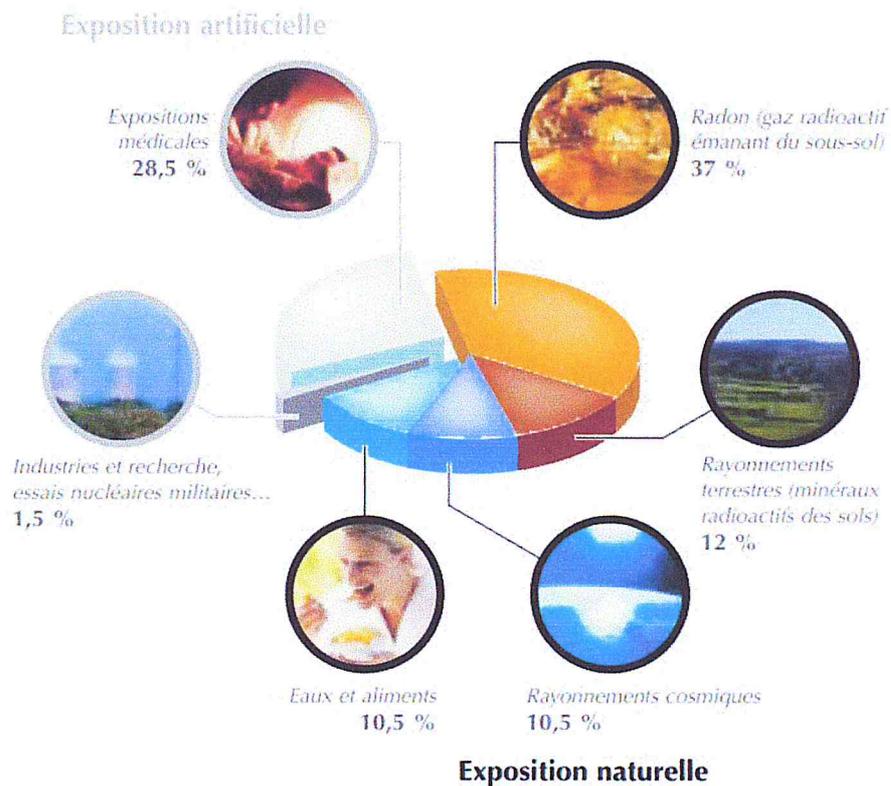


Fig.I 8 : Les différentes origines des rayonnements ionisants

### I.5 Exposition aux rayonnements ionisants

Deux types d'exposition aux rayonnements ionisants sont possibles.

- **Exposition externe**

On parle d'exposition externe lorsque celle-ci est due à des rayonnements provenant de sources extérieures et qui présentent un certain pouvoir de pénétration (X, gamma, neutrons et quelques fois bêtas et particules chargées issues d'un accélérateur). Elle s'arrête dès que l'on s'éloigne de la source des rayonnements.

- **Exposition interne**

L'exposition interne est caractérisée par le fait que les radioéléments pénètrent dans l'organisme, y séjournent, et irradient pendant ce temps de résidence, les tissus des organes et délivrent donc une dose à l'organisme. Les radioéléments atteignent l'organisme soit par inhalation, ingestion, ou par le passage à travers la peau.

Les dégâts biologiques provoqués par une exposition interne ou externe sont de même nature. Lors d'une contamination interne, les caractéristiques physico-chimiques du radionucléide déterminent le tissu ou l'organe sur lequel il se fixe. Son élimination dépend de sa période effective. Rappelons que la période effective ( $T_{eff}$ ) est liée à la période radioactive ( $T_{rad}$ ) et à la période biologique ( $T_{biol}$ ) par la relation suivante [6]:

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{rad}} + \frac{1}{T_{biol}} \rightarrow T_{eff} = \frac{T_{rad}T_{biol}}{T_{rad}+T_{biol}} \dots\dots\dots(I.14)$$

Cette période effective représente le temps au bout duquel, la radioactivité initialement incorporée dans l'organisme, est réduite de moitié comme conséquence des deux phénomènes de désintégration radioactive et d'élimination biologique qui ne peuvent être dissociés.

### I.6 Grandeur dosimétriques

Pour pouvoir estimer le risque lié aux rayonnements ionisants, il y a lieu de définir certaines grandeurs dosimétriques.

- **Dose absorbée** Grandeur fondamentale D en dosimétrie, définie par la relation

$$D = \frac{dE}{dm} \dots\dots\dots(I.15)$$

où dE est l'énergie moyenne transmise par le rayonnement ionisant à la matière dans un élément de volume, et dm la masse de matière dans cet élément de volume. On peut calculer l'énergie moyenne pour tout volume défini, la dose moyenne étant égale à l'énergie totale transmise dans ce volume divisée par la masse du volume. L'unité SI de dose absorbée est le joule par kilogramme (J/kg) appelée gray (Gy) [7].

- **Dose équivalente** Grandeur  $H_{T,R}$  définie par la relation

$$H_{T,R} = \sum_R W_R D_{TR} \dots \dots \dots (I.16)$$

Où  $D_{TR}$  est la dose absorbée moyenne à l'organe ou au tissu T délivrée par le type de rayonnement R et  $W_R$  le facteur de pondération radiologique pour le type de rayonnement R [7].

Tableau I. 1 : Valeurs recommandées pour les facteurs de pondération pour les rayonnements pour les neutrons voir [7]

Type de rayonnement	Facteur de pondération pour les rayonnements, $w_R$
Photons	1
Électrons <sup>a</sup> et muons	1
Protons et pions chargés	2
Particules alpha, fragments de fission, ions lourds	20

- **Dose efficace** Grandeur E définie comme étant la somme des produits des doses équivalentes aux tissus par leurs facteurs de pondération tissulaires respectifs :

$$E = \sum_T W_T H_T = \sum_T W_T \sum_R W_R D_{TR} \dots \dots (I.17)$$

où  $H_T$  est la dose équivalente au tissu T et  $W_T$  le facteur de pondération tissulaire pour le tissu T [7].

Tableau I. 2 : Facteur de pondération tissulaire pour les différents organes [7]

Tissu	$w_T$	$\Sigma w_T$
Moelle osseuse (rouge), côlon, poumons, estomac, sein, tissus restants*	0,12	0,72
Gonades	0,08	0,08
Vessie, œsophage, foie, thyroïde	0,04	0,16
Surface osseuse, cerveau, glandes salivaires, peau	0,01	0,04
Total		1,00

- **Dose équivalente engagée :**

Les radionucléides incorporés dans le corps humain irradient les tissus pendant des périodes de temps déterminées par leur demi-vie physique et leur rétention biologique dans le corps. Ainsi, ils peuvent donner lieu à des doses délivrées aux tissus du corps pendant de nombreux mois voire des années après incorporation.

La nécessité de réglementer les expositions aux radionucléides et l'accumulation des doses de rayonnement pendant des périodes longues a abouti à la définition des grandeurs de dose engagée. La dose engagée due à un radionucléide incorporé est la dose totale censée être reçue pendant une période de temps spécifiée. La dose équivalente engagée  $H_T(\tau)$ , reçue par un tissu ou un organe T est définie par [7] :

$$H(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}(\tau) \dots \dots \dots (I.18)$$

où  $t_0$  est le moment de l'incorporation et  $H(\tau)$  le débit de dose équivalente à l'instant  $t$  dans un organe ou un tissu  $T$ , et  $\tau$  le temps écoulé depuis l'incorporation de substances radioactives.

Lorsque  $\tau$  n'est pas spécifié, on considérera qu'il est de 50 ans pour les adultes et qu'il est de 70 ans pour les enfants.

- **Dose efficace engagée**  $E(\tau)$  est alors donnée par :

$$E(\tau) = \sum_T W_T H(\tau) \dots \dots \dots (I.19)$$

### I.7 Risques des rayonnements ionisants sur la santé

Les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme varient en fonction :

- de la dose reçue ;
- de la source : nature des rayonnements, activité de la source ou intensité de fonctionnement d'un générateur de rayonnements ;
- du mode d'exposition : temps, débit ... ;
- de la répartition des rayonnements dans les cellules : tissus ou organes touchés.

Deux mécanismes sont impliqués :

Le premier fait intervenir un **effet direct** des rayonnements ionisants. Il se traduit par des excitations et des ionisations des atomes et molécules avec lesquels les rayonnements ionisants rentrent directement en collision.

Le deuxième mécanisme est essentiellement l'oxygène provenant de la décomposition des molécules d'eau sous l'effet des rayonnements. Ces espèces réactives sont essentiellement le radical hydroxyle  $\text{OH}^\circ$ , dont la réactivité est prédominante. Toutes les molécules constitutives d'une cellule sont des (ADN), protéines, lipides, carbohydrates.

En raison de la fonction centrale de l'ADN dans la cellule, les lésions de l'ADN ont été les plus étudiées [4].

#### Il existe deux types d'effets biologiques

- **Les effets immédiats (ou déterministes)**

Une forte irradiation par des rayonnements provoque des effets immédiats sur les organismes vivants comme, par exemple des brûlures plus ou moins importantes (Voir le tableau I.5). En fonction de la dose et selon l'organe touché, le délai d'apparition des symptômes varie de quelques heures (nausées, radiodermite) à plusieurs mois. Des effets secondaires peuvent même être observés suite à une irradiation : fibroses, cataracte [4].

- **Les effets à long terme (effets aléatoires ou stochastiques)**

Les expositions à des doses plus ou moins élevées à des rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme sous la forme d'un cancer. On peut aussi observer des effets mutagènes (mutations de l'ADN transmis à la descendance). La probabilité d'apparition de l'effet augmente avec la dose. Le délai d'apparition après l'exposition est de plusieurs années [4].

Tableau I. 3 : Les symptômes cliniques en fonction de la dose

**EXPOSITION GLOBALE**

Dose	Symptômes cliniques
0 – 0.25 Gy	Aucun symptôme
0.25 – 1 Gy	Symptômes cliniques absents ou mineurs (nausées) Quelques signes biologiques
1 – 2 Gy	Signes généraux et hématologiques
2 – 4 Gy	Sévérité moyenne: atteinte du système hématopoïétique prédominante

Afin d'éviter les effets déterministes, capables de survenir notamment en cas d'accidents radiologiques, et de réduire autant que possible les risques d'apparition d'effets aléatoires, un système de radioprotection a été développé et imposé dans toutes les applications mettant en jeu des matières radioactives ou nucléaires.

Le système de radioprotection repose sur trois grands principes : Justification, limitation, et optimisation.

La **justification** signifie que toute activité comportant un risque d'exposition à des rayonnements ionisants doit apporter un bénéfice clair à l'individu ou à la société ;

La **limitation** signifie simplement que les doses d'exposition doivent être maintenues en dessous des limites établies.

L'**optimisation**, qui est le principe de base de la radioprotection, stipule que même lorsque l'activité est clairement justifiée et que les limites sont bien respectées, il faudra faire le maximum pour réduire encore et encore l'exposition à sa valeur la plus faible possible conformément au principe ALARA «As Low As Reasonably Achievable»

## Chapitre II : Cadre réglementaire pour la consommation de l'eau potable

L'eau, cette denrée rare et précieuse, a toujours été question de survie pour l'homme. De plus, elle a fait l'objet de plusieurs conflits humains à travers l'histoire. Même de nos jours, plusieurs conflits dans le monde sont basés sur l'eau (conflits arabo-israélien, égypto-éthiopien, etc.). Historiquement, l'homme a toujours choisi des lieux à proximité des sources d'eau (rivières, lacs, mers, océans) pour édifier sa civilisation.

Avoir de l'eau douce est une question de vie ou de mort pour l'être humain. L'évolution industrielle et technologique a permis de créer des systèmes d'approvisionnement en eau potable basés sur de nombreuses techniques de traitement d'eau allant jusqu'au recyclage des eaux usées. Mais, en dépit de cela, l'eau qui parvient au robinet n'est pas forcément propre à la consommation humaine et des contrôles de sa qualité sont donc nécessaires.

### II.1. Différents types d'eau pour la consommation humaine

Les eaux destinées à la consommation humaine sont les eaux de distribution publique (eau du robinet), eaux conditionnées (les eaux de source, les eaux minérales naturelles et les eaux rendues potables par traitement), et les eaux de puits privés utilisées pour la boisson.

L'eau prélevée des milieux naturels n'est généralement pas utilisable directement pour la consommation humaine. Elle doit subir des traitements selon les exigences réglementaires de qualité en tous points du réseau, pour pouvoir être consommée sans danger par l'ensemble de la population.

Il est clair que les eaux de consommation ne peuvent posséder les mêmes caractéristiques du fait qu'elles proviennent de différentes régions et prélevées à des périodes différentes. Cette différence concerne les caractéristiques bactériologiques, physico-chimiques mais également radiologiques.

Avec l'accroissement de la population mondiale et le développement économique de la planète, la consommation d'eau a presque doublé au cours de ces cinquante dernières années.

Généralement, les réserves des eaux naturelles sont constituées des eaux de surfaces qui comprennent les eaux courantes des rivières et des canaux, des eaux de surfaces stagnantes ou plan d'eau (les lacs, retenues de barrages, étangs . . .), des eaux des mers et des océans et des eaux souterraines provenant de l'infiltration des eaux de pluie dans le sol qui constituent les nappes [8].

#### II.1.1. Les eaux de surface

Les eaux de surface (douces) sont l'eau qui coule ou qui stagne à la surface du sol (rivières, lacs, étangs, barrages etc.). Elles ont pour origine, soit des nappes souterraines dont l'émergence constitue une source, soit les eaux de ruissellement. Leur composition chimique dépend de la nature des terrains rencontrés durant leur parcours.

Ces eaux sont le siège, dans la plupart des cas, d'un développement d'une vie microbienne à cause des déchets rejetés dedans et de l'importante surface de contact avec l'extérieur. Les ressources en eau douce sont essentielles pour l'homme qui les sollicite fortement, notamment dans le cadre de ses activités agricoles. Les estuaires sont des milieux de grande importance écologique et économique [8].

### II.1.2. Les eaux souterraines

Les eaux souterraines sont les eaux de sous-sol qui constituent une provision d'eau potable inestimable pour l'humanité. Les eaux souterraines sont en interaction avec les autres types de masses d'eau, d'une part les eaux douces continentales (cours d'eau, zones humides, lacs, etc.) et d'autre part avec les eaux marines en bordure littorale. Le sens de ces transferts peut varier au cours de l'année ainsi qu'en fonction des conditions hydrologiques. Elles assurent souvent le débit de base des systèmes d'eaux continentales superficielles et de ce fait influencent leur qualité. En d'autres termes, les effets de l'activité humaine sur la qualité des eaux souterraines et les débits des nappes peuvent se répercuter sur la pérennité et la qualité écologique des écosystèmes aquatiques associés et des écosystèmes terrestres directement dépendants. Les sources et les eaux souterraines sont traditionnellement les ressources en eau privilégiées pour l'eau potable, car plus à l'abri des pollutions que les eaux de surface [8].

### II.1.3. Les eaux de mer

Les mers sont les grandes masses d'eau salée qui recouvrent les deux-tiers de la surface du globe terrestre ; elles représentent près de 97,4 % de la capacité des grands réservoirs d'eau à la surface de la terre. La teneur moyenne en sel varie en fonction de l'arrivée d'eau douce (pluies et fleuves), plus il y a d'eau douce, moins il y a de sel.

Le dessalement de l'eau de mer et celui des eaux saumâtres constitue, ces dernières années, la solution à la pénurie d'eau dans de nombreuses parties du monde. Cependant, le coût de dessalement demeure encore trop élevé. L'Algérie a acquis une expérience réelle par la réalisation et l'exploitation de plusieurs unités de dessalement [8].

## II.2. Ressources en eaux en Algérie

L'Algérie est le pays le plus grand en Afrique avec une surface de presque 2.4 million km<sup>2</sup> et compte 37.1 millions d'habitants dont 90% sont installés au nord du pays soit 13% de la superficie nationale. L'Algérie est riche en matières d'hydrocarbures mais souffre d'un déficit en ce qui concerne l'eau, en effet il est classé parmi les pays arides/semi-arides, cet état est la combinaison de plusieurs facteurs [9].

La position géographique de l'Algérie et sa grande superficie donnent un climat diversifié au pays, l'Algérie peut être subdivisée ainsi en 3 zones

- La zone littorale : jouit d'un climat méditerranéen avec des hivers doux et une longue période estivale chaude ;
- Les hautes plaines : climat de type continental ;
- Le Sahara : climat aride et sec.

Cette diversité influence la pluviométrie sur le territoire national comme le montre la figure II.1.

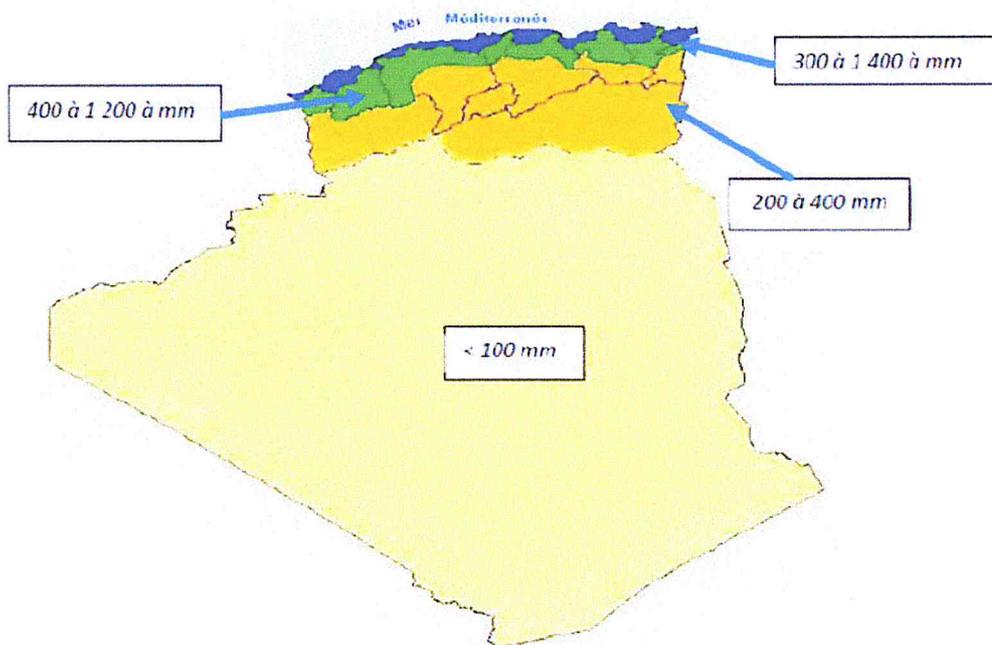


Fig..II.1 : Les précipitations en Algérie [9]

La figure II.1 montre que les pluies sont relativement abondantes sur les côtes du Tell, variables entre 300 mm et 1400 mm, et que la précipitation augmente de l'ouest vers l'est. Au sud la précipitation ne dépasse pas les 100 mm [9].

Pour qu'une eau soit potable, il faut qu'elle ne contienne pas d'organismes pathogènes (pouvant causer des maladies), de composés chimiques dangereux ni de substances radioactives. Elle a un bon goût et une belle apparence. Elle ne dégage pas d'odeur et ne présente pas une couleur désagréable.

Tenant compte de ces données et de l'importance du besoin hydrique pour la santé humaine, le présent travail est consacré à l'aspect radioactif de l'eau. En effet, si l'eau potable comporte une quantité importante de radioéléments, elle représente un danger pour la santé de l'homme par le biais de l'effet nocif des rayonnements ionisants produits par les radioéléments.

### II.3. Recommandations de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

Dans le cadre de ses activités visant la protection et l'amélioration de la santé humaine à travers le monde, l'OMS émet régulièrement des recommandations liées à la santé. A ce titre, elle a émis en 1994 des recommandations sur la radioactivité [10].

Tableau II. 1 Seuils radiologiques recommandés par l'OMS en 1994[10]

Indicateur	Valeur seuil recommandé
Activité alpha globale	0.1 Bq/L
Activité bêta globale	1 Bq/L
Dose Totale indicative (DTI)	0,1 mSv/an

Une décennie plus tard, soit en 2004, cette même organisation apporte des modifications touchant l'activité alpha globale résiduelle qui passe ainsi de 0.1 à 0.5 Bq/L.

Tableau II. 2 : Seuils radiologiques recommandés par l'OMS en 2004[10]

Indicateur	Valeur seuil recommandé
Activité alpha globale	0.5 Bq/L
Activité bêta globale	1 Bq/L
Dose Totale indicative (DTI)	0,1 mSv/an

Le changement a été suggéré après qu'une expérience ait montré que la valeur 0.1 mSv du DTI qui est défini comme la dose efficace résultant de l'incorporation des radionucléides présents dans l'eau durant une année de consommation, à l'exclusion du tritium, potassium-40 le radon et ses descendants [11], ne peut pas être dépassée tant que l'activité alpha totale n'excède pas les 0.5 Bq/L [10]. Cependant, la majorité des pays membres gardent 0.1 Bq/L et non pas 0.5 Bq/L comme valeur seuil pour l'activité alpha globale.

Comme les techniques de caractérisation des radionucléides sont relativement coûteuses, l'OMS a proposé l'approche illustrée sur la figure II.2 afin que la consommation d'eau ne provoque pas un danger pour la santé de l'homme.

- Mesure de l'activité alpha totale et bêta totale en Bq/L, si celle-ci n'excède pas la valeur seuil, alors aucune mesure n'est nécessaire [12] ;
- Dans le cas contraire, une caractérisation spécifique aux radionucléides est requise afin d'identifier l'origine de cette activité [12]

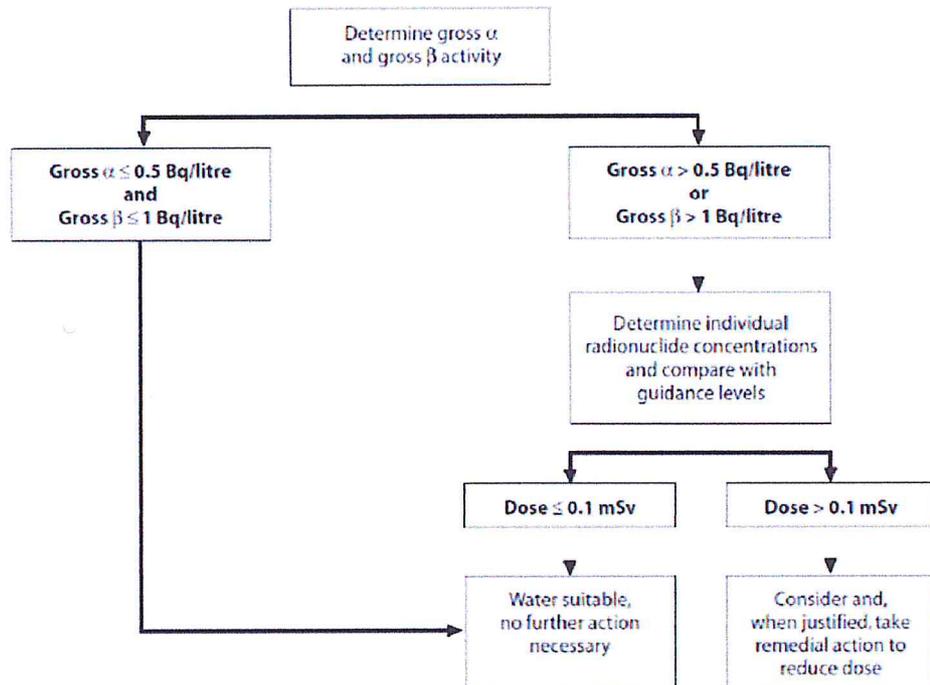


Fig. II. 2 : Approche de l'OMS pour la surveillance radiologique de l'eau[10]

Dans le cas où on est contraints de faire une analyse spécifique, l'OMS recommande des niveaux d'activité pour les radionucléides résumés dans le tableau II.3 [13]

Tableau II. 3 : Les valeurs d'activité guides recommandées par l'OMS [13]

Radionucléides	Eau potable (Bq/mL)	Radionucléides	Eau potable (Bq/mL)	Radionucléides	Eau potable (Bq/mL)
Ra-244	0.001	Cf-250	0.001	Nb-95	0.1
Ra-225	0.001	Cf-251	0.001	Mo-93	0.1
Ra-226	0.001	Cf-252	0.001	Mo-99	0.1
Ra-228	0.0001	Cf-254	0.001	Tc-96	0.1
Th-227	0.01	Es-253	0.01	Tc-97	1
Th-228	0.001	Es-254	0.01	Tc-97m	0.1
Th-229	0.0001	Es-254m	0.1	Tc-99	0.1
Th-230	0.001	H-3	10	Ru-97	1
Th-231	1	Be-7	10	Ru-103	0.1
Th-232	0.001	C-14	0.1	Rh-106	0.01
Th-234	0.1	Na-22	0.1	Pd-103	1
Pa-230	0.1	P-32	0.1	Ag-105	0.1
Pa-231	0.0001	P-33	1	Ag-110m	0.1
Pa-233	0.1	S-35	0.1	Ag-111	0.1
U-230	0.001	Cl-36	0.1	Cd-109	0.1
U-231	1	Ca-45	0.1	Cd-115	0.1
U-232	0.001	Ca-47	0.1	Cd-115m	0.1
U-233	0.001	Sc-46	0.1	In-111	1
U-234	0.001	Sc-47	0.1	In-114m	0.1
U-235	0.001	Sc-48	0.1	Sn-113	0.1
U-236	0.001	V-48	0.1	Sn-125	0.1
U-237	0.1	Cr-51	10	Sb-122	0.1
U-238	0.01	Mn-52	0.1	Sb-124	0.1
Np-237	0.001	Mn-53	10	Sb-125	0.1
Np-239	0.1	Mn-54	0.1	Te-123m	0.1
Pu-236	0.001	Fe-55	1	Te-127	1
Pu-238	0.001	Fe-59	0.1	Te-127m	0.1
Pu-239	0.001	Co-56	0.1	Te-129	1
Pu-240	0.001	Co-57	1	I-125	0.01
Pu-241	0.01	Ni-59	0.1	I-126	0.01
Pu-242	0.001	Ni-63	0.1	I-129	0.001
Pu-244	0.001	Zn-65	0.1	I-131	0.01
Am-241	0.001	Ge-71	10	Cs-129	1
Am-242	1	As-73	0.1	Cs-131	1
Am-242m	0.001	As-74	0.1	Cs-132	0.1
Am-243	0.001	Se-75	0.1	Cs-134	0.01
Cm-242	0.01	Br-82	0.1	Cs-134	0.01
Cm-243	0.001	Rb-86	0.1	Cs-135	0.1
Cm-244	0.001	Sr-85	0.1	Cs-136	0.1
Cm-245	0.001	Sr-89	0.1	Ba-131	1
Cm-246	0.001	Sr-90	0.01	Ba-140	0.1
Cm-247	0.001	Y-91	0.1	La-140	0.1
Cm-248	0.0001	Zr-93	0.1	Ce-139	1
Bk-249	0.1	Zr-95	0.1	Ce-139	1
Cf-246	0.1	Zr-93	0.1	Ce-141	0.1
Cf-248	0.01	Nb-93m	1	Ce-143	0.1

Cf-249	0.001	Nb-94	0.1	Pr-143	0.1
Nd-147	0.1	Ir-190	0.1	Yb-175	1
Pm-149	0.1	Ir-192	0.1	Ta -182	0.1
Pm-147	1	Pt-191	1	W-181	1
Sm-151	1	Pt-193m	1	W-185	1
Sm-153	0.1	Au-198	0.1	Re-186	0.1
Eu-152	0.1	Au-199	1	Os-185	0.1
Eu-154	0.1	Hg-197	1	Os-191	0.1
Eu-155	1	Hg-203	0.1	Os-193	0.1
Gd-153	1	Ti-200	1	Bi-210	0.1
Tb-160	0.1	Ti-201	1	Pb-210	0.0001
Er-169	1	Tl-202	1	Po-210	0.0001
Tm-171	1	Pb-203	1	Ra-223	0.001

#### II.4. Réglementation internationale

Chaque pays, selon ses spécificités, adapte les recommandations internationales à ses conditions et élabore des réglementations qui lui sont propres. Ainsi, en France, par exemple, la question est gérée par l'arrêté ministériel du 11 juin 2007 qui fixe 4 indicateurs de la qualité radiologique des eaux du robinet et des valeurs indicatives. L'activité alpha globale est un indicateur de présence de radionucléides émetteurs alpha ; l'activité bêta globale résiduelle (bêta global résiduel = bêta global - 27,9 x [K], avec [K] concentration totale en potassium exprimée en g/l) est un indicateur de présence de radionucléides émetteurs bêta ; le tritium est un indicateur de radioactivité issue d'activités anthropiques. La Dose Totale Indicative (DTI) représente la dose efficace résultant de l'ingestion de radionucléides présents dans l'eau durant une année de consommation [14].

Tableau II. 4 : La réglementation française

Indicateur	Valeur guide	Référence de qualité
Activité alpha globale	0,1 Bq/L	
Activité bêta globale résiduelle	1 Bq/L	
Tritium		100 Bq/L
Dose Totale indicative (DTI)		0,1 mSv/an

Aux Etats Unis d'Amérique, par contre, l'agence de protection de l'environnement américaine (EPA) a mis en place, en 2000, un niveau limite de contamination radioactive (tableau II.5) [15].

Tableau II. 5 : Règlementation radiologique des Etats-Unis

76750 Federal Register / Vol. 65, No. 236 / Thursday, December 7, 2000 / Rules and Regulations

Appendix A to Subpart O—Regulated Contaminants

Contaminant units	Traditional MCL in mg/L	To convert for CCR, multiply by	MCL in CCR units	MCLG	Major sources in drinking water	Health effects language
Radioactive contaminants:						
Beta/Photon emitters (mrem/yr).	4 mrem/yr	—	4	0	Decay of natural and man-made deposits.	Certain minerals are radioactive and may emit forms of radiation known as photons and beta radiation. Some people who drink water containing beta particle and photon radioactivity in excess of the MCL over many years may have an increased risk of getting cancer.
Alpha emitters (pCi/L).	15 pCi/L	—	15	0	Erosion of natural deposits.	Certain minerals are radioactive and may emit a form of radiation known as alpha radiation. Some people who drink water containing alpha emitters in excess of the MCL over many years may have an increased risk of getting cancer.
Combined radium (pCi/L).	5 pCi/L	—	5	0	Erosion of natural deposits.	Some people who drink water containing radium-226 or -228 in excess of the MCL over many years may have an increased risk of getting cancer.
Uranium (pCi/L)	30 µg/L	—	30	0	Erosion of natural deposits.	Some people who drink water containing uranium in excess of the MCL over many years may have an increased risk of getting cancer and kidney toxicity.

Notons que la réglementation américaine utilise le Rem et non pas le Sievert, le Curie et non pas le Becquerel comme le recommande l'ICRU.

À l'inverse de la réglementation française, un seuil à l'activité du tritium n'est pas évoqué, cependant un seuil à l'activité combinée des radiums 226 et 288 est établi.

## II.5. Réglementation Nationale

En Algérie, les premiers textes régissant la question n'ont vu le jour qu'en 2011 où l'on a promulgué le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

Ce décret prend en compte, les paramètres chimiques, les paramètres microbiologiques, les paramètres organoleptiques, les paramètres physico-chimiques en relation avec la structure naturelle des eaux et finalement les paramètres radiologiques auxquels nous nous intéressons.

Ce décret stipule que les paramètres concernant la radioactivité dans les eaux potables sont soumis aux limites suivantes (tableau. II.4) [16] :

Tableau II. 6 : Règlementation nationale pour l'eau potable en 2011[16]

Radionucléides	Particules alpha	Picocurie/l	15
	Particules bêta	Millirems/an	4
	Tritium	Becquerel/l	100
	Uranium	µg/l	15
	Dose totale indicative (DTI)	(mSv/an)	0.1

Trois années plus tard à peine, a été promulgué le Décret exécutif n°14-96 du 2 Joumada El Oula 1435 correspondant au 4 mars 2014 modifiant et complétant le décret exécutif n° 11-125 du 17 Rabie Ethani 1432 correspondant au 22 mars 2011 relatif à la qualité de l'eau de consommation humaine.

Tableau II. 7 : Règlementation nationale pour l'eau potable en 2014[17]

Radionucléides	Particules alpha	Picocuriel/l.	15
	Particules bêta	Millirems/an	4
	Tritium	Becquerel/l	100
	Uranium	µg/l	30
	Dose totale indicative (DTI)	mSv/an	0.15

Dans ce nouveau décret, la quantité limite d'uranium dans l'eau passe de 15 à 30 µg/l et la DTI de 0.10 à 0.15 mSv/an.

Signalons à l'occasion, une incohérence qui nous semble nécessaire de rectifier. En effet, les unités utilisées dans ce décret pour évaluer le niveau radiologique dans les eaux ne respectent pas le système international car l'unité pour la mesure de la radioactivité est le Bq (Becquerel) qui remplace l'ancienne unité le Ci (curie), et le Sv (Sievert) est l'unité de mesure des doses équivalente et efficace qui remplace l'ancienne unité le Rem (Röntgen Equivalent Man). De plus, dans le décret, on utilise simultanément les anciennes et les nouvelles unités.

Il serait plus judicieux de modifier le tableau II.7 pour aboutir au tableau II.8 Ce dernier tableau que nous proposons élimine l'incohérence et respecte la conformité avec le système international.

Tableau II. 8 : Les modifications suggérées

Radionucléides	Particules alpha	Bq/L	0.55
	Particules bêta	mSv/L	0.04
	Tritium	Bq/L	100
	Uranium	µg/L	30
	Dose total indicative (DTI)	mSv/an	0.15

Et nous pouvons même suggérer d'exprimer aussi bien la concentration en particules alpha qu'en particules bêta dans une même unité à savoir le Bq/L. En effet, rien ne justifie l'utilisation d'unités différentes entre les deux types de particules, et d'autre part, c'est cette dernière unité qui exprime effectivement la concentration dans l'eau, le Sv étant lié plutôt à la dose.

## II.6. Les origines de la radioactivité dans les eaux

Comme la réglementation impose des valeurs seuils à la composition radiologique, il est raisonnable de se demander quelle est l'origine de la radioactivité dans les eaux ?

Les eaux contiennent des éléments radioactifs naturels dont les concentrations varient en fonction de paramètres tels que : nature géologique des terrains traversés, temps de contact (âge de l'eau), température, solubilité de l'élément concerné, etc.

Par exemple

- Les eaux superficielles contiennent des radionucléides naturels de demi-vies longues comme le  $^{40}\text{K}$ ,  $^3\text{H}$ , et  $^{14}\text{C}$ ; ces deux derniers sont formés par l'interaction des rayonnements d'origine cosmique c'est-à-dire soit solaire ou galactique directement avec la surface de l'eau soit avec les éléments atmosphériques. Dans le second cas, ils s'introduisent dans l'eau par diffusion.
- Les eaux souterraines profondes sont infiltrées par l'uranium, le thorium, le radium qui se trouvent dans les roches et la croûte terrestre et aussi leurs produits de désintégration. Parmi ces produits, nous distinguons le radon qui est un gaz sans odeur, sans couleur et soluble dans l'eau froide sous de grandes pressions, ce qui fait de lui un élément facilement entraîné par les eaux et peut donc être facilement transporté jusqu'au robinet

#### II.6.1. Origine des particules alpha dans les eaux

Elles sont essentiellement dues aux désintégrations des U-235,238 et Th-232 (chaînes naturelles) qui se trouvent dans la croûte terrestre et les roches et qui s'introduisent au contact de l'eau.

#### II.6.2. Origine des particules bêta dans les eaux

Les chaînes naturelles contribuent également à la présence des particules bêta dans les eaux de même que le potassium 40 qui, en plus de son gamma de 1.461 MeV, émet également des particules bêta de 0.585 MeV. L'activité d'origine artificielle peut aussi, dans certaines situations, constituer une source non négligeable de particules bêta dans l'eau ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{90}\text{Sr}$ ).

## Chapitre III : Mesure de la radioactivité Alpha-Bêta Totale dans l'eau

### Introduction :

A partir des exigences réglementaires liées à la qualité de l'eau et plus particulièrement les caractéristiques radiologiques (Tableau II.7), il faut vérifier le taux des particules Alpha et Bêta. Pour cela, les échantillons d'eau subissent des traitements permettant de les mettre sous forme appropriée pour être comptés dans des compteurs alpha/Bêta total.

Le présent chapitre est consacré à cette opération ; on présentera le principe théorique de la mesure, le matériel utilisé, la méthodologie suivie ; et enfin nous présentons les résultats de mesure obtenus.

### III.1. Principe de la mesure alpha-bêta total

L'effet d'ionisation produit par le passage d'un rayonnement à travers un gaz est le principe sur lequel repose les détecteurs à gaz, même s'il peut y avoir des excitations car elles ne sont pas fondamentales pour le fonctionnement du détecteur à gaz.

Ce type de détecteur possède 3 régions de fonctionnement (Fig. III.1)

- Chambre d'ionisation ;
- Compteur proportionnel ;
- Geiger-Müller.

Dans notre cas, c'est un compteur proportionnel qui a été utilisé pour les mesures expérimentales [18].

### Compteur proportionnel

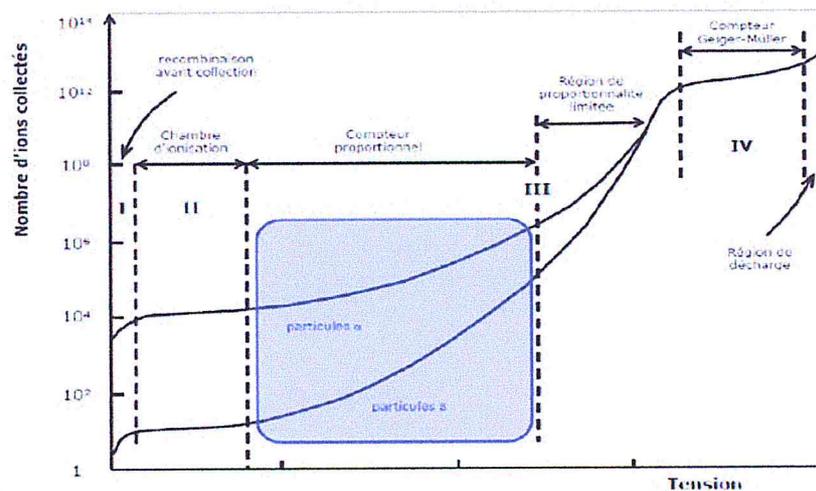


Fig. III. 1 : Les différents régimes de fonctionnement d'un détecteur à gaz[18]

### III.2. Compteur proportionnel

Dans le régime proportionnel, les charges primaires créées par le rayonnement ionisant sont amplifiées par les collisions dans le gaz, en effet à partir d'une valeur seuil ( $10^6$  V/m) le

champ électrique accélère les électrons primaires jusqu'à atteindre une énergie qui permet l'ionisation secondaire, les électrons secondaires libérés sont à leur tour accélérés et peuvent produire des ionisations, on obtient ainsi l'avalanche Townsend où un électron généré par collision peut ioniser d'autres atomes par le même mécanisme (Fig. III.2).

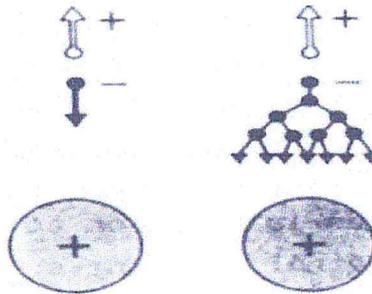


Fig. III. 2 : Evolution d'une avalanche[19]

La charge finale collectée est proportionnelle à la charge primaire ; cette linéarité est affectée lorsque le nombre d'ions positifs produits lors de l'avalanche est assez conséquent pour réduire le champ jusqu'à une valeur où les ionisations ne se produisent plus, c'est l'effet de la charge d'espace. Afin d'éviter la perte de la proportionnalité, la tension est choisie de telle sorte qu'une seule avalanche puisse se produire, ce qui nécessite d'établir une courbe de comptage.

Le nombre d'ionisations par unité de longueur est régi par l'équation de Townsend [19]

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \dots \dots \dots \text{III.1}$$

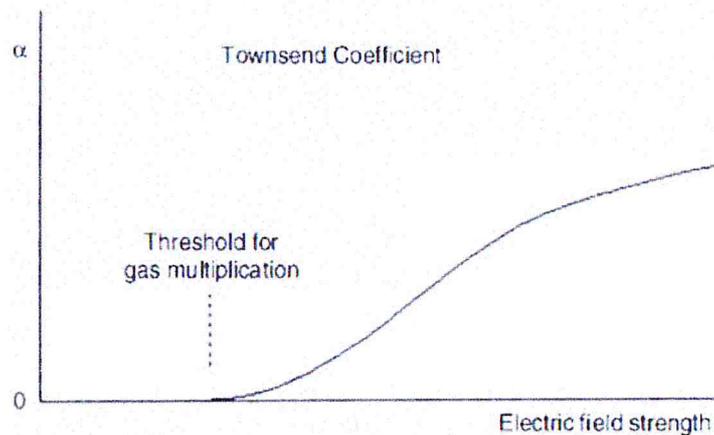


Fig. III. 3 : Le premier coefficient de Townsend en fonction du champ électrique[19]

où  $\alpha$  est la probabilité d'ionisation par unité de longueur ; connu sous le nom de coefficient de Townsend (Fig. III.3).

### III.3. Courbe de comptage

La courbe de comptage est établie en enregistrant le nombre de coups émis par une source pour différentes tensions. La tension de fonctionnement est alors choisie à partir d'un plateau où le nombre de coups devient constant pour les différentes tensions (Fig. III.4).

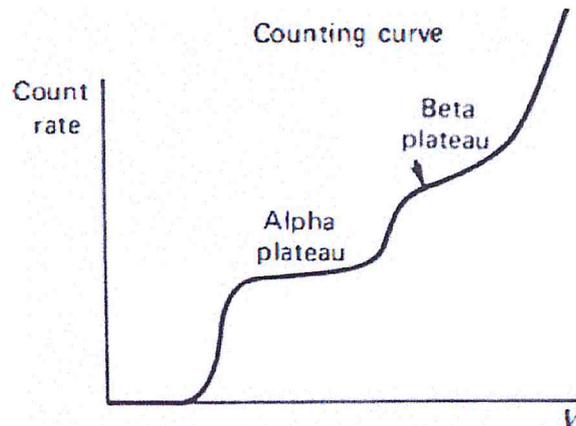


Fig. III. 4 : Courbe de comptage[19]

On peut remarquer sur la courbe de comptage que le plateau des bêtas est plus court que celui des alphas mais que sa pente est par contre plus prononcée [19].

#### III.4. Discrimination entre les bêtas et les alphas

Le parcours des bêtas excède généralement les dimensions du détecteur et donc les paires d'électron-ion ne reflètent pas l'énergie total du rayonnement incident, contrairement aux particules alpha qui perdent toute leur énergie à l'intérieur de l'enceinte contenant le gaz, par conséquent l'impulsion des alphas est différente de celle des bêtas. C'est sur ce principe que la discrimination des alphas et bêta est faite, l'impulsion des bêtas est moindre et couvre une large gamme d'amplitude que celle des alphas (Fig. III.5).

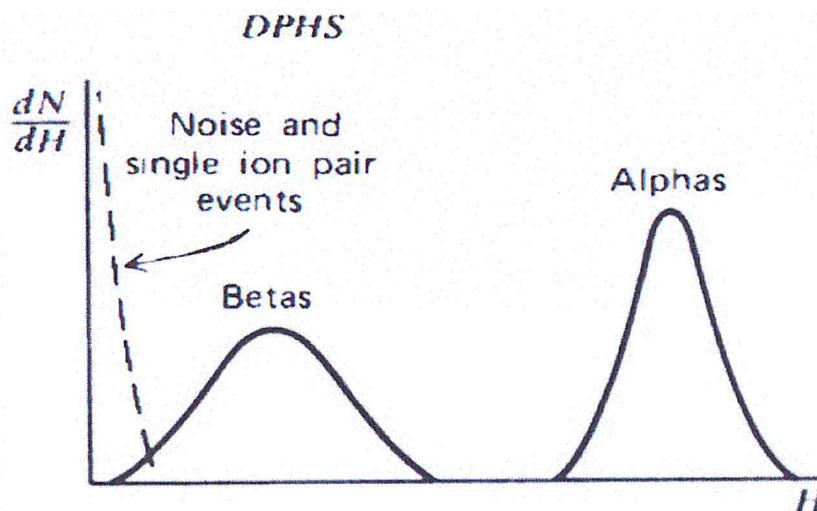


Fig. III. 5 : Le spectre d'impulsion différentiel[19]

Si la géométrie du détecteur n'est pas adéquate alors il se peut que le chevauchement entre le signal des particules alphas et bêta se produise et l'utilisateur est obligé alors de modifier la hauteur des impulsions acceptables [19].

### III.5. Choix du gaz

Comme il est indiqué plus haut, le compteur proportionnel repose sur les ionisations secondaires produites par collision, et donc le gaz dans le détecteur doit avoir une faible affinité pour les électrons pour ne pas arrêter les collisions secondaires. Les gaz nobles satisfont cette condition et de plus ils n'ont pas d'état de vibration et de rotation ce qui veut dire que la réponse au rayonnement se fait par excitation ou ionisation, ce qui se traduit par un faible potentiel de création de paires et donc un nombre élevé de paires d'électron-ion. Le tableau III.1 montre l'énergie nécessaire pour créer une paire d'ion-électron pour quelques gaz.

Tableau III. 1: Potentiel d'ionisation et énergie moyenne pour la création d'une paire é-ion pour différents gaz [19]

Gaz	Potentiel d'ionisation (eV)	w : Energie moyenne <sup>1</sup> pour création d'une paire é-ion (eV/paire)
Ar	15.7	26
He	24.5	41
Ne	21.6	36
Kr	14.0	24
Xe	12.1	22
N <sub>2</sub>	15.5	35
Air		34
O <sub>2</sub>	12.5	31
CH <sub>4</sub>	14.5	28

L'énergie d'ionisation n'est pas celle qui est impliquée dans la création de paires, car il y a le phénomène d'excitation qui intervient. La désexcitation se fait par émission de photons dont l'énergie est dans le domaine ultra-violet (UV); ces photons peuvent abimer l'anode et causer la perte de la proportionnalité en éjectant des électrons de la cathode ou dans des cas spéciaux les électrons superficiels des atomes du gaz qui vont produire une avalanche dans le gaz.

C'est pourquoi, des petites quantités d'un quenchant (Méthane CH<sub>4</sub>, Ethane C<sub>3</sub>H<sub>8</sub>, Isobutane C<sub>4</sub>H<sub>10</sub>, Ethanol HCH<sub>3</sub>CO<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>) sont ajoutées au gaz pour dissiper l'énergie apportée par les photons par des phénomènes non radiatifs (vibrations).

Le détecteur utilisé dans ce travail contient un gaz (P10) constitué de 90% d'argon et 10% de CH<sub>4</sub>.

### III.6. Compteur utilisé

L'appareil utilisé est un multi-détecteurs de type Mini 20. La chambre de comptage comprend 4 compteurs proportionnels à circulation de gaz ayant des fenêtres d'entrée en mylar aluminisé et deux détecteurs de garde pour éliminer les rayons cosmiques de hautes énergies ; la chambre est couverte par du plomb. L'appareil est connecté à un PC équipé avec le logiciel Eurisys. L'acquisition se fait en mode  $\alpha$  puis  $\beta(+\alpha)$ , la tension de fonctionnement est choisie à partir de la courbe de comptage. Les capsules de mesure sont posées sur un plateau-tiroir et introduites dans la chambre de mesure. Le comptage peut être lancé.



Fig. III. 6 : Appareillage de mesure et logiciel d'acquisition

### III.6.1. Courbe de comptage

La courbe de comptage en alpha et en bêta est établie en permutant 3 sources alpha à savoir U-233, Am-242, et Pu-239 (Tableau III.2) ainsi que 2 sources bêta à savoir Sr-90 et Sr-90/Y-90 (Tableau III.3) sur 3 détecteurs ; la tension est augmentée par des pas de 50 V en démarrant de 0 V jusqu'à atteindre 1950 V. Pour chaque tension, le comptage se fait pendant 60 secondes durant 3 cycles.

Tableau III. 2 : Les sources utilisées pour établir la courbe de comptage des particules

Source	Activité (Bq)	Date	Période radioactive (an)
Amercium-241	1204	01/01/1994	432
Uranium-233	322.8	04/03/1986	$1.6 \times 10^5$
Plutonium-239	211.7	04/12/1986	24130

Tableau III. 3 : Les sources utilisées pour établir la courbe de comptage des particules bêta

Source	Activité (Bq)	Date	Période radioactive (an)
Source ( $\beta_1$ )	$1.92 \times 10^3$	27/07/1994	29.14
Source ( $\beta_2$ )	34.7	15/01/1998	29.14

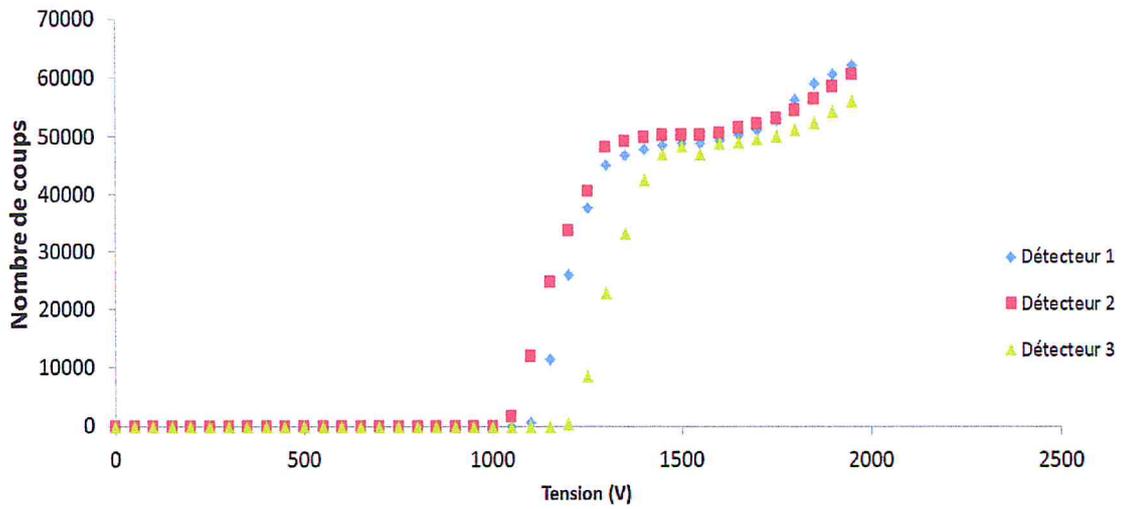


Fig. III. 7 : Courbe de comptage des 3 détecteurs (Am-241)

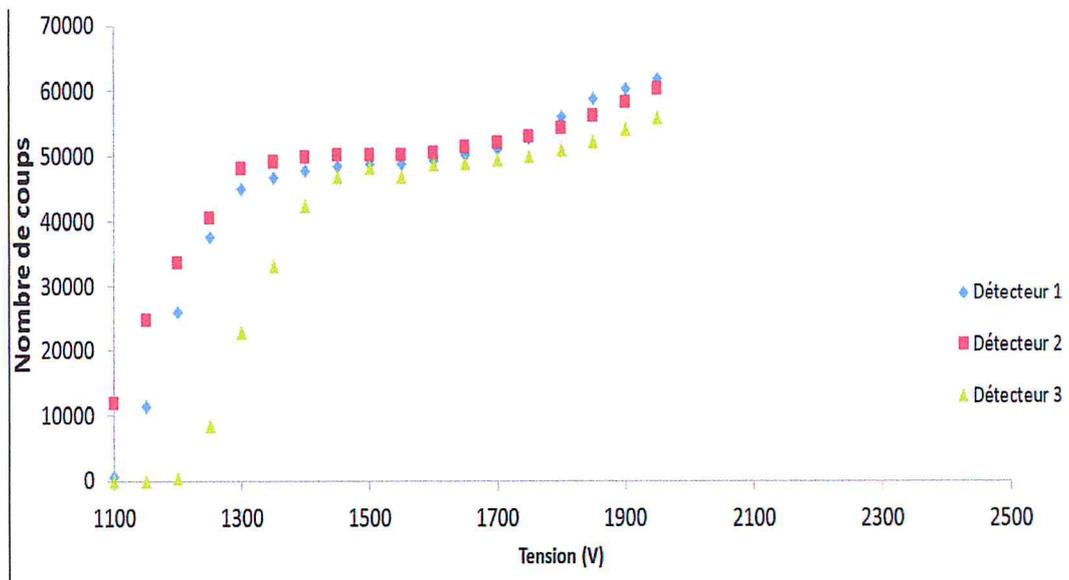


Fig. III. 8 : Plateau de comptage des 3 détecteurs (Am-241)

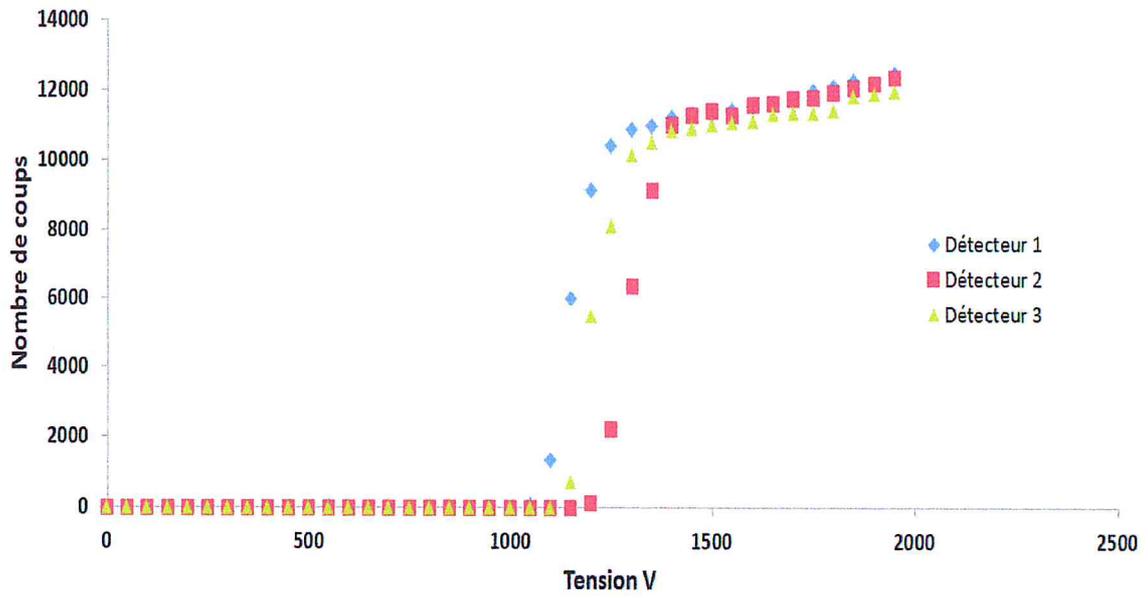


Fig. III. 9 : Courbe de comptage des 3 détecteurs (U-233)

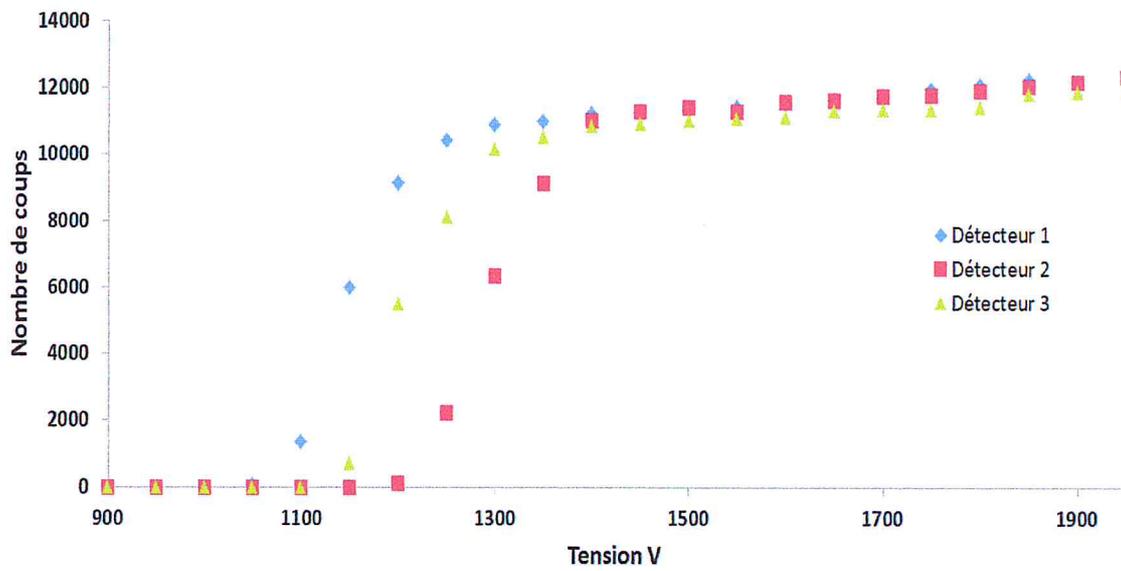


Fig. III. 10 : Plateau de comptage des 3 détecteurs (U-233)

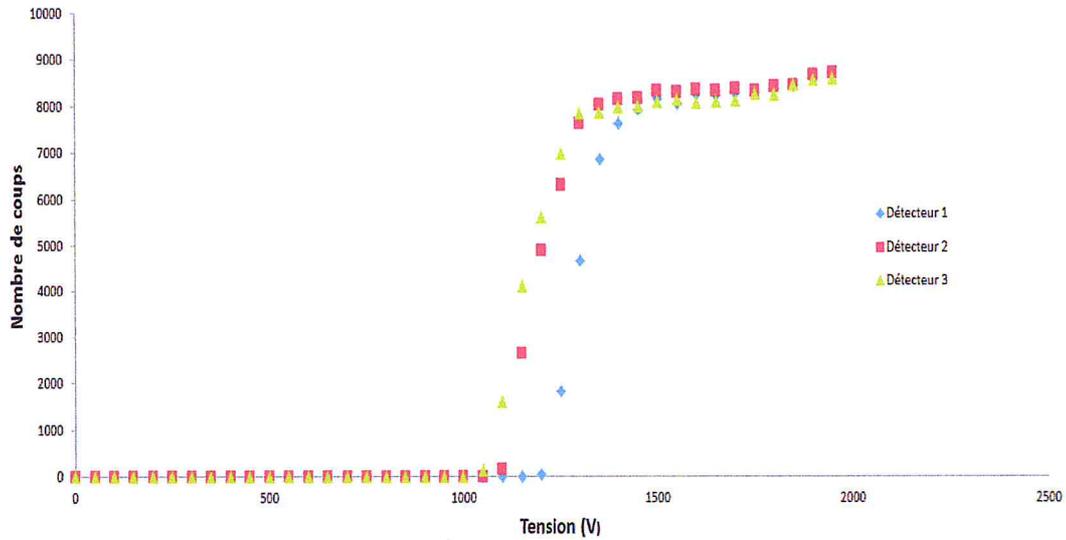


Fig. III. 11 : Courbe de comptage des 3 détecteurs (Pu-239)

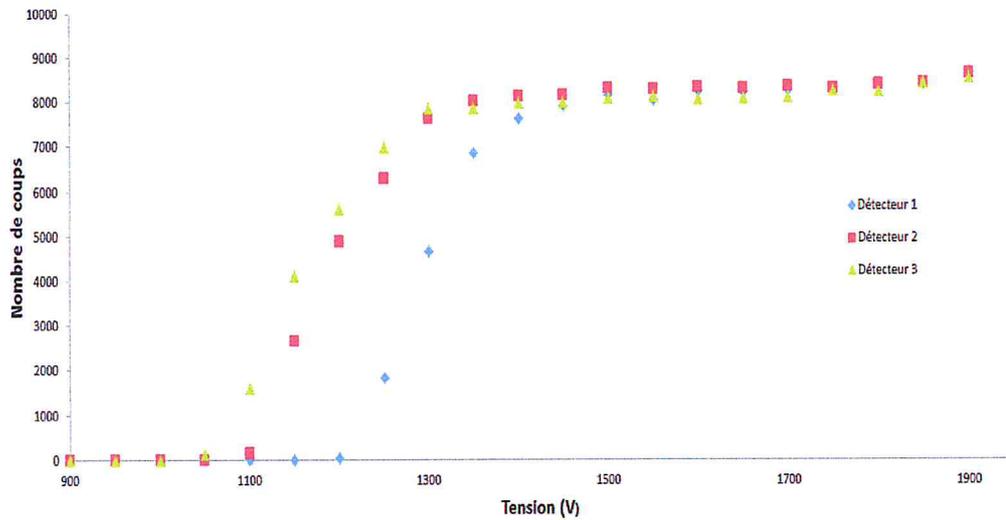


Fig. III. 12 : Plateau de comptage des 3 détecteurs (Pu-239)

Tableau III. 4 : Plateau et tension optimale pour le comptage des particules alpha

Détecteur	Source	Plateau	Tension optimale (V)		
			50%	30%	25%
Détecteur 1	Am-241	1600 - 1400	1500	1460	1450
	U-233	1550-1330	1425	1375	1362.5
	Pu-239	1850 - 1500	1675	1605	1587.5
Détecteur 2	Am-241	1600 - 1400	1500	1460	1450
	U-233	1550-1400	1475	1445	1437.5
	Pu-239	1850 - 1350	1600	1500	1475
Détecteur 3	Am-241	1750-1450	1600	1540	1525
	U-233	1600-1400	1500	1460	1450
	Pu-239	1850 - 1350	1600	1500	1475

La tension optimale pour le comptage des alphas est : 1450 V.

Nous devons signaler que lors de toute l'étude autour du compteur Alpha/Bêta total, seuls trois détecteurs des quatre dont dispose l'appareil sont utilisés. Ceci est dû au fait que le quatrième détecteur est défectueux.

### Courbe de comptage bêta

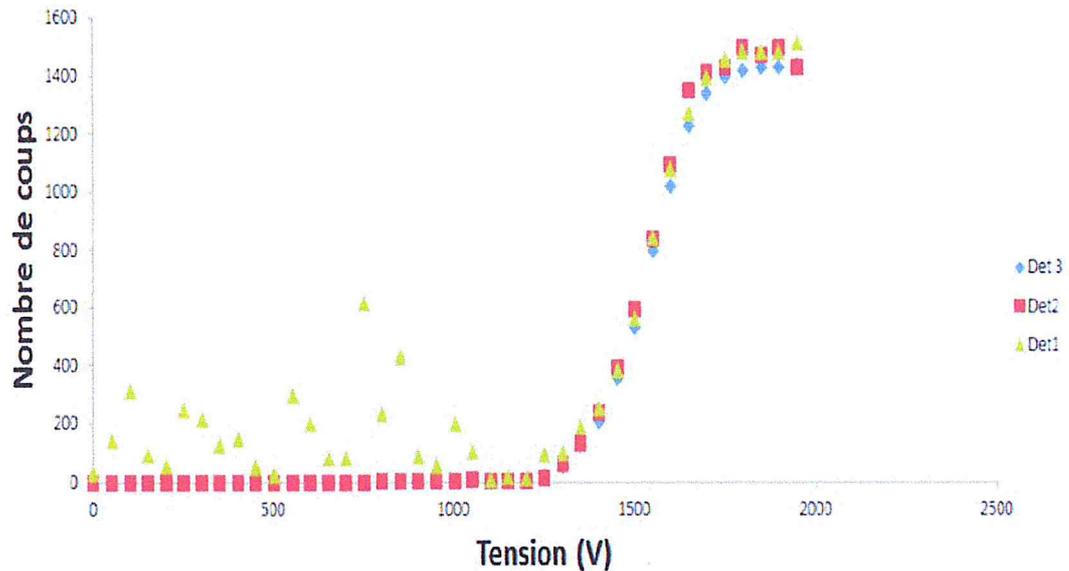


Fig. III. 13 : Courbe de comptage des 3 détecteurs

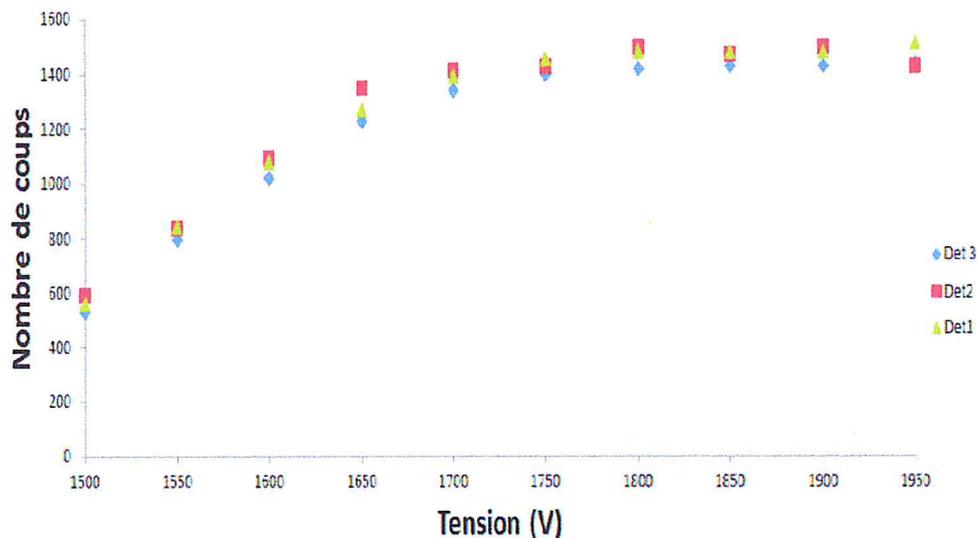


Fig. III. 14 : Plateau de comptage des 3 détecteurs

On remarque que le détecteur 1 enregistre une activité dès les faibles tensions (à partir de 50 V) ; pour des tensions si faibles, il est anormal que l'on puisse détecter ces bêtas. De plus, le nombre de coups mesuré ne suit pas une tendance bien définie ce détecteur présente une défaillance.

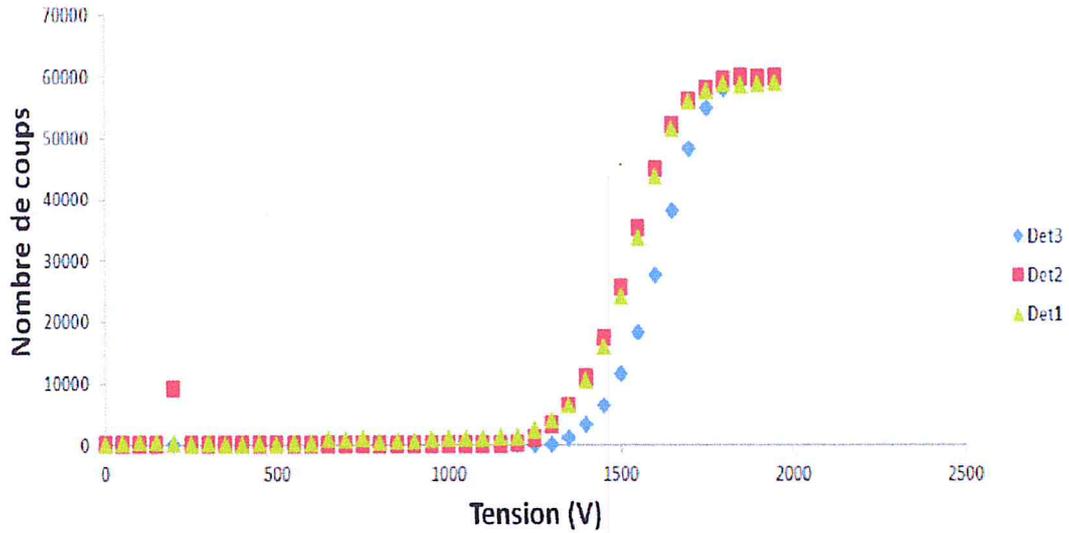


Fig. III. 15 : Courbe de comptage des 3 détecteurs

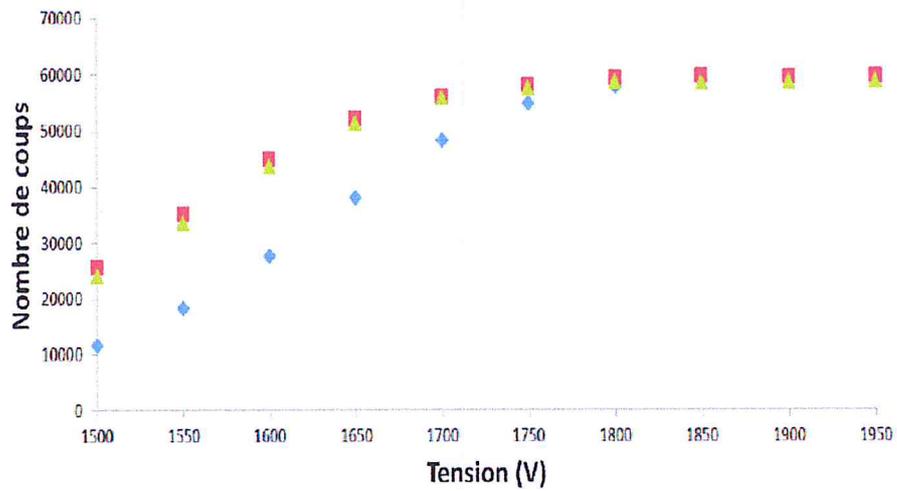


Fig. III. 16 : Plateau de comptage des 3 détecteurs

Tableau III. 5 : Plateau et tension optimale pour le comptage des particules bêta

Détecteur	Source	Plateau (V)	Tension optimale (V)		
			50%	30%	25%
Détecteur 1	Source $\beta_1$	1950 - 1800	1875	1845	1837.5
	Source $\beta_2$	1950-1650	1800	1740	1725
Détecteur 2	Source $\beta_1$	1950 - 1800	1875	1845	1837.5
	Source $\beta_2$	1700-1600	1650	1630	1625
Détecteur 3	Source $\beta_1$	1950-1850	1900	1880	1875
	Source $\beta_2$	1950-1650	1800	1740	1725

La tension optimale pour le comptage bêta est de 1837.5 V

### III.6.2. Calibration en efficacité

L'efficacité des 3 détecteurs aux particules alphas et bêtas a été déterminée en utilisant les sources Am-241, Pu-239, U-233 et également en utilisant deux sources bêta Sr + Sr/Y d'activités différentes. Le comptage a été effectué pendant 5 cycles de 5 minutes chacun. L'efficacité est déterminée à partir de la relation suivante :

$$\epsilon = \frac{N}{t \times A} \dots \dots \dots \text{III.2}$$

- $\epsilon$  : efficacité du détecteur
- N: nombre de coups
- t : temps de comptage (5 minutes)
- A : activité de la source le jour de l'expérience.

Donc pour déterminer l'efficacité, il faut corriger l'activité de la source de calibration.

#### Correction de l'activité des sources alphas

L'activité est régie par la loi suivante :

$$A(t) = A_0 \exp(-\lambda t) \dots \dots \dots \text{III.3}$$

- A(t) : activité à un temps t ;
- A0 : activité a t=0 ;
- $\lambda$ : constante de désintégration.

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} \dots \dots \dots \text{III.4}$$

À titre d'exemple, la source d'Américium-241 dont l'activité était de 1204 Bq en date du 01/01/1994, donc 23 ans 4 mois et 6 jours se sont écoulés depuis, donc l'activité à présent est :

$$A(t) = 1204 \exp\left(-\frac{\ln 2}{432} \times 23.32\right) = 1159.85 \text{ Bq} \dots \dots \text{III.5}$$

Nous pouvons tout de même remarquer que la diminution d'activité n'est pas très sensible car il s'agit d'un radioélément de longue demi-vie. D'ailleurs, cette dernière caractéristique est l'une des raisons qui font de cet élément une source appropriée pour la calibration.

Tableau III. 6 : Les sources alpha corrigées

	Correction des sources (07/05/2017)
Source Am-241	1159.85 Bq
Source U-233	332.79 Bq
Source Pu-239	211.51 Bq

L'efficacité pour chaque détecteur est déterminée en prenant la moyenne des 5 efficacités calculées à partir de chaque comptage.

Exemple :

- 1<sup>er</sup> comptage : le nombre de coups enregistré N=24318 et donc l'efficacité  $\epsilon = \frac{24318}{5 \times 60 \times 1159.85} = 0.6989$
- 2<sup>ème</sup> comptage : le nombre de coups enregistré N=244995 et donc l'efficacité  $\epsilon = \frac{244995}{5 \times 60 \times 1159.85} = 0.7041$
- 3<sup>ème</sup> comptage : le nombre de coups enregistré N=245237 et donc l'efficacité  $\epsilon = \frac{245237}{5 \times 60 \times 1159.85} = 0.7048$
- 4<sup>ème</sup> comptage : le nombre de coups enregistré N=246905 et donc l'efficacité  $\epsilon = \frac{246905}{5 \times 60 \times 1159.85} = 0.7096$
- 5<sup>ème</sup> comptage : le nombre de coups enregistré N=247083 et donc l'efficacité  $\epsilon = \frac{247083}{5 \times 60 \times 1159.85} = 0.7101$

Et donc l'efficacité du détecteur 1 est

$$\epsilon = \frac{69.89 + 70.41 + 70.96 + 71.01}{5} = 70.55\%$$

Et l'incertitude liée à l'efficacité est déterminée à partir de l'écart type de la moyenne calculée en utilisant une feuille Excel.

Tableau III. 7 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source Am-241

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
Efficacité	70.55 ± 0.35	70.43 ± 0.22	70.37 ± 0.1

Tableau III. 8 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source U- 233

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
Efficacité	58.79 ± 0.15	58.55 ± 0.36	57.92 ± 0.17

Tableau III. 9 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source Pu- 239

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
Efficacité	64.46 ± 0.21	64.32 ± 0.27	63.39 ± 0.21

### Correction de l'activité des sources bêta

$$\lambda = \frac{\ln 2}{29.14} = 0.024 \dots \dots \dots III. 6$$

$$A(t) = 1920 \exp(-0.024 \times 29.72) = 945.49 \text{ Bq} \dots III.7$$

Tableau III. 10 : Les sources bêta corrigées

	Correction des sources (07/05/2017)
Source $\beta_1$	945.49 Bq
Source $\beta_2$	21.93 Bq

Tableau III. 11 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source  $\beta 1$

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
Efficacité	/	104 %	105.81 %

Tableau III. 12 : Efficacités des 3 détecteurs en utilisant une source  $\beta 2$

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
Efficacité	/	116.18 %	111.3 %

Il est évident que les valeurs obtenues pour l'efficacité ne peuvent être acceptées car elles dépassent les 100%. Par conséquent, nous pouvons dire que le compteur n'est pas utilisable dans ces conditions.

Après investigation, nous avons su que le compteur a fait l'objet d'une maintenance qui a touché sa partie électronique. Il y a lieu donc, conformément aux exigences de la qualité qu'il soit complètement recalibré. Cette dernière opération ; réalisée par l'équipe du laboratoire, exigera du temps alors que la période de notre stage est malheureusement limitée.

### III.7. Protocole expérimental

La procédure expérimentale commence par un prétraitement consistant à ajouter 5ml d'acide nitrique  $HNO_3$  à chaque échantillon d'eau pour empêcher les éléments radioactifs de se coller à la paroi des flacons.

#### Traitement

- Avec une éprouvette graduée, on remplit 50 ml d'eau dans un bêcher (le choix de ce volume est lié à l'objectif d'obtenir un dépôt qui ne dépasse pas les  $5 \text{ mg/cm}^2$  afin d'éviter ou du moins réduire le phénomène d'auto-absorption)
- On laisse le bêcher sous une lampe UV pour évaporation (Fig. III.17).

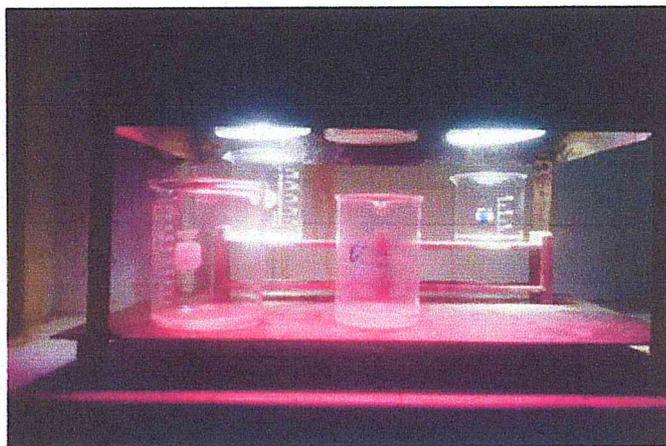


Fig. III. 17 : Evaporation de l'eau sous lampes UV

- Avec une pipette, on prélève l'échantillon concentré du bêcher et on le dépose sur une capsule (pesée au préalable vide) de façon étalée sur la capsule afin que le dépôt soit uniforme.

— Les capsules sont ensuite placées en dessous d'une lampe infrarouge (épiradiateur) pour le séchage du dépôt (Fig. III.18).



Fig. III. 18 : Séchage des échantillons sous lampe infra-rouge

Après que le dépôt se forme sur la capsule (Fig. III.19), celle-ci est passe au comptage alpha pendant 1080 minutes.

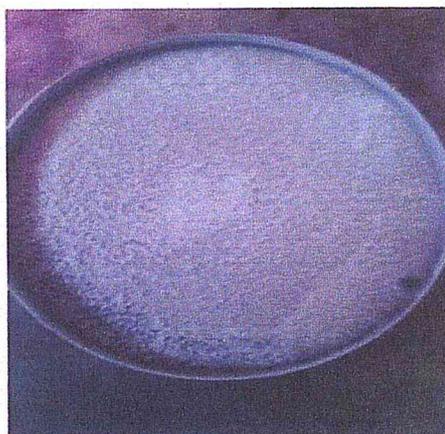


Fig. III. 19 : Dépôt final

### III.8. Résultats expérimentaux

La mesure du bruit de fond pendant 4260 minutes en mode alpha a donné les résultats suivants :

Tableau III. 13 : Mesure du bruit de fond

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
Nombre de coups	220	1031	315
CPM	0.051	0.242	0.074

### III.8.1. L'activité calculée pour une calibration par la source d'Américium

À travers la formule de Curie, l'activité minimale détectable (AMD) est calculée [20] (prenons l'exemple du détecteur 1):

$$AMD = \frac{4.65 + 2.71\sqrt{N_B}}{t \times \epsilon \times V} = \frac{4.65 + 2.71\sqrt{220}}{4260 \times 60 \times 0.05 \times 0.7055} = 0.008 \frac{Bq}{L} \dots\dots\dots III.8$$

Le calcul de l'activité dans les échantillons repose sur l'équation suivante :

$$A(Bq/L) = \frac{N_{net}}{t \times V \times \epsilon} \dots\dots\dots III.9$$

- $N_{net}$  comptage net de l'échantillon ( $N_{net}$  = nombre de comptage réel ( $N_r$ ) – nombre de comptage pour le bruit de fond)
- $t$  : temps de comptage de l'échantillon
- $V$  : volume de l'échantillon
- $\epsilon$  : efficacité de l'échantillon

Exemple : L'échantillon prélevé au CRNA donne un nombre de coups de 138, donc le nombre de coups par minute est de  $\frac{138}{18 \times 60} = 0.13$  cpm

L'activité est égale à  $A = \frac{0.13 - 0.051}{60 \times 0.7055 \times 0.05} = 0.036 \text{ Bq/L}$

L'incertitude liée à l'activité :

$$\Delta A = \frac{\sqrt{\frac{N_r}{t_r^2} + \frac{N_{Bf}}{t_{Bf}^2}}}{V \times \epsilon} = \frac{\sqrt{\frac{138}{(18 \times 3600)^2} + \frac{220}{(24 \times 3600)^2}}}{0.05 \times 0.7055} = 0.005 \frac{Bq}{L} \dots\dots\dots III.10$$

Les résultats sont présentés dans les tableaux VII.2, VII.4, VII.6, VII.8, VII.9 et VII.10.

## chapitre IV : Mesure du Tritium dans l'eau par scintillation liquide

**Introduction :** Le tritium est toujours présent dans l'eau à partir du moment que celui-ci n'est autre qu'un isotope de l'hydrogène l'un des constituants de l'eau. Toutefois ; le taux d'activité du au tritium ne doit pas dépasser les seuils définis dans la réglementation algérienne (Tableau II.7).

De par ses caractéristiques radioactives, le Tritium ne peut être mesuré que par la technique de scintillation et plus précisément la scintillation liquide. Le présent chapitre est consacré donc à la présentation de cette technique et à son application pour la mesure des taux de tritium présents dans les échantillons d'eau objet de notre étude.

### IV.1. Tritium

Le tritium est un isotope radioactif de l'hydrogène ; il est constitué de deux neutrons et un proton, représenté par  ${}^3\text{H}$  ou T. Dans la nature, il existe sous forme d'eau tritiée (HTO) qui est sa forme la plus abondante ; il peut prendre d'autres formes comme tritium gazeux (HT), tritium lié à la matière organique et méthane tritié ( $\text{CH}_3\text{T}$ ). D'un point de vue nucléaire, il possède les propriétés radiologiques suivantes [21]:

- Une période radioactive de 12.3 ans (relativement courte)
- C'est un émetteur de  $\beta^-$  L'énergie maximale de la particule  $\beta^-$  est  $E_{max} = 18.6 \text{ keV}$  et son énergie moyenne est  $E_{moy} = 5,7 \text{ keV}$
- L'activité massique du T pur est  $3,6 \times 10^{14} \text{ Bq/g}$  ; lorsqu'il est sous forme d'eau tritiée cette activité devient  $5,4 \times 10^{13} \text{ Bq/g}$

Donc, l'ingestion de tritium peut représenter un danger pour la santé de l'homme. Le tritium est généré naturellement à travers les rayons cosmiques ou artificiellement par l'activité humaine.

#### IV.1.1. Origines naturelles du tritium

Lors de l'interaction des rayons cosmiques avec les gaz de l'atmosphère terrestre plusieurs noyaux sont créés, parmi eux le noyau du tritium à travers les réactions des neutrons cosmiques avec l'azote et l'oxygène.

Une quantité faible de tritium est produite dans la croûte terrestre par l'activation neutronique du lithium-6. Environ 99 % du tritium produit dans la haute atmosphère est oxydé en eau tritiée (HTO) et se mélange aux eaux de surface. La production naturelle annuelle atmosphérique est comprise entre 0.15 et 0.20 kg, soit  $5.0$  à  $7.0 \times 10^{16} \text{ Bq}$ , en supposant que la production équilibre la décroissance physique [21].

#### IV.1.2. Origines artificielles du tritium

La présence naturelle du tritium ne fait pas l'objet d'inquiétude, contrairement à l'activité de l'homme qui présente un risque de contamination de l'environnement y compris l'eau par le tritium.

L'activité de l'homme comprend différents champs [21]:

- **essais nucléaires:**

- **installations nucléaires:**
- **les usines de retraitement**
- **autres installations :** Le tritium est aussi rejeté par d'autres installations industrielles (agent de scintillation dans des peintures luminescentes pour l'horlogerie, les boussoles, le marquage des voies de secours en aéronautique. . .), des centres nucléaires.

## IV.2. Familles de scintillateurs

Il existe deux grandes familles de détecteurs à scintillation, les scintillateurs organiques et les scintillateurs inorganiques. Les scintillateurs inorganiques tendent à avoir un meilleur output de la lumière et linéarité, cependant le temps de réponse est relativement lent (temps de désexcitation ns- $\mu$ s) et ils sont coûteux. Les scintillateurs organiques sont généralement rapides mais le rendement en lumière est moindre (jusqu'à 40000 photons par MeV pour les scintillateurs inorganiques contre 10000 photons par MeV pour les scintillateurs organiques) [19]

La valeur élevée du Z des scintillateurs inorganiques est adéquate pour leur utilisation dans la spectroscopie gamma, à la différence des scintillateurs organiques qui sont utilisés dans spectroscopie bêta et la détection des neutrons rapides. Ainsi, dans le but de mesurer l'activité du tritium qui est émetteur bêta moins :



Un détecteur à scintillation organique est utilisé. Dans cette famille de détecteurs, il existe plusieurs types :

- Cristaux organiques purs
- Scintillateurs en plastique
- Scintillateurs en film mince
- Scintillateurs liquides

C'est la dernière catégorie qui est utilisée dans notre étude.

## IV.3. Scintillateur liquide

Dans le scintillateur liquide, l'échantillon est mélangé avec un cocktail composé d'un solvant et d'un scintillateur (fluor), ceci représente un avantage majeur par rapport aux autres détecteurs puisque tous les rayonnements radioactifs sont convertis en lumière détectable. Cette technique est largement utilisée pour le comptage de particules bêta des radionucléides de faible activité comme le tritium et le carbone-14 [19].

### IV.3.1. Le solvant

Le solvant constitue (60-99%) de la composition du cocktail scintillant ce qui implique que les rayonnements ont une grande probabilité de rencontrer une molécule du solvant [Sta04], le solvant est responsable de la dissolution de l'échantillon et le scintillateur, et de transférer l'énergie des radionucléides aux molécules scintillantes sans perte significative. Les molécules de structures aromatiques sont des candidats idéaux car ils possèdent des électrons  $\pi$ ; ces électrons ne sont associés à aucune molécule et sont facilement excités à des niveaux de très hautes énergies. Le solvant doit satisfaire les critères suivants [21]:

- Contenir une quantité faible de  $^{14}\text{C}$ ;
- Capacité de dissoudre l'échantillon et les molécules du scintillant ;
- Transparent aux énergies émises par le scintillateur.

La figure IV.1 donne quelques exemples de solvants des plus utilisés.

Solvant	Chemical Structure	Puise Hégnt	Point °C
1,2,4 -Trimethylbenzene (pseudocumene)		112	50
p-Xylene		110	30
Toluene		100	5
Benzene		85	-11
1,4 -Dioxane		65	12
m-Xylene		107	25
o-Xylene		98	29
Alkylbenzene (high flash point)		91	150

Fig. IV. 1 : Les solvants les plus utilisés dans la scintillation liquide[21]

La densité électronique élevée de ces molécules permet à un grand nombre de photons de fluorescence de se produire lors du passage des rayonnements bêtas.

### IV.3.2 Le scintillateur

Selon nos besoins, parfois il est nécessaire d'utiliser deux liquides scintillants ; un liquide scintillant primaire et un secondaire. Le scintillateur primaire a pour rôle d'accepter l'énergie qui provient des molécules excitées du solvant et la réémettre vers les photomultiplicateurs.

Un bon scintillateur doit posséder les caractéristiques suivantes [21]:

- **Concentration optimum** pour éviter les détriments de l'effet quenching
- **Le pic de fluorescence** doit être compris entre 300 et 425 nm pour qu'elle puisse être captée par les photomultiplicateurs.
- **Le temps d'émission** doit être court pour que le pic des photons soit aigu et sans queue (généralement le temps est inférieur à 2 nanosecondes).
- **Le rendement de fluorescence** défini comme

$$\phi = \frac{\text{Nombre de photons émis}}{\text{Nombre de molécules excitées}} \dots\dots\dots \text{IV.2.}$$

doit être proche de l'unité.

La figure IV.2 donne quelques exemples des molécules scintillateurs avec leurs caractéristiques respectives.

Solute	Optimum solute concentration (g/liter)	Fluorescence maximum (nm)	Decay time $\tau$ (nsec)	Quantum yield $\phi$
PPO 	5-7	375	1.4	0.83
PBD 	8-10	375	1.0	0.69
Butyl-PBD 	12	385	1.0	0.69
BBOT 	7	446	1.6	0.61

Fig. IV. 2 : Caractéristiques des scintillants primaires[21]

Dans le cas où la réponse spectrale des photomultiplicateurs est dans la gamme 400 à 420 nm (comme c'est le cas pour les anciens photomultiplicateurs), un scintillateur secondaire est ajouté au cocktail pour décaler cette longueur d'onde de 370 à 420 nm (Fig. IV.3).

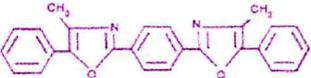
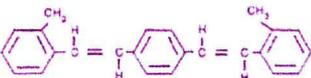
COMPOUND	ABBREVIATION	CONCENTRATION (g/liter)	FLUORESCENCE MAXIMUM WAVELENGTH (nm)
	POPOP	0.05-0.2	415
	M <sub>2</sub> -PCPOP	0.1-0.5	427
	bis-MSB	1.5	426

Fig. IV. 3 : Propriétés du scintillant secondaire [21]

Dans les détecteurs à scintillations modernes, les scintillateurs secondaires ne sont pas nécessaires sauf si le quenching de couleur pose problème [21].

#### IV.4. Fonctionnement

La technique de comptage en scintillation est basée sur les interactions des rayonnements nucléaires avec certains composés fluorescents ; ces composés appelés également scintillateurs, ont la propriété de réémettre des photons, c'est-à-dire de produire une émission de lumière fluorescente lorsqu'ils sont excités par une radiation nucléaire ; cette lumière présente une décroissance qui est fonction exponentielle du temps.

L'échantillon à compter comprendra les trois éléments suivants : la matière radioactive, un solvant organique et un ou plusieurs scintillateurs.

Les rayonnements  $\beta$  émis par le tritium sont absorbés et leur énergie est transmise au scintillateur par l'intermédiaire du solvant. Le scintillateur sous l'effet de cette excitation, produit une émission de lumière de longueur d'onde plus élevée (Wave Length Shifting

(WLS)), le nombre de photons lumineux réémis étant proportionnel au nombre d'excitations donc à l'énergie initiale de la particule (10 photons pour 1 keV)[22] (Fig. IV.4).

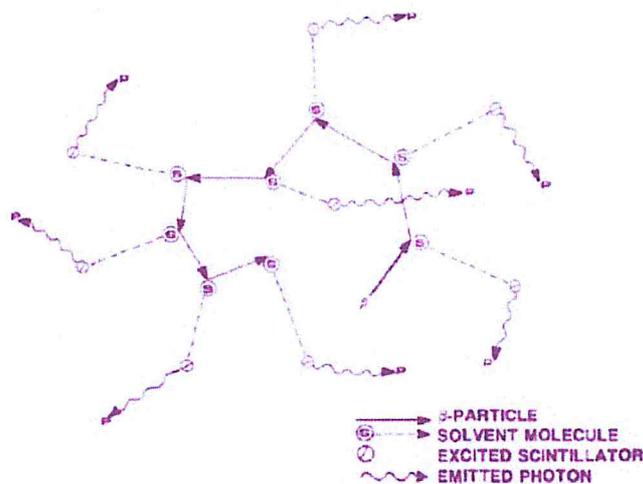


Fig. IV. 4 : Phénomène de la scintillation liquide[21]

Les photons ainsi produits sont absorbés par un photomultiplicateur hors du liquide, transformant les scintillations en impulsions électriques enregistrées et comptées hors du liquide (impulsions  $\beta$  avec des temps compris entre 2 et 10 ns); le photomultiplicateur délivre donc une impulsion électrique dont l'amplitude est proportionnelle au nombre de photons reçus, c'est-à-dire à l'énergie du rayonnement incident (Fig. IV.5 [23]).

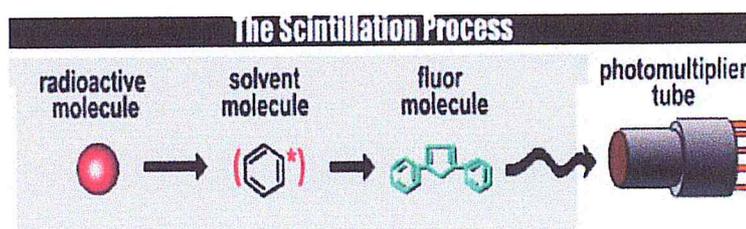


Fig. IV. 5 : Processus de la scintillation liquide [23]

#### IV.5. Le phénomène de quenching

Il est souhaitable que l'efficacité de détection soit à 100%, malheureusement il y a des facteurs qui entrent en jeu lors du processus de détection entraînant la diminution de l'efficacité notamment le phénomène de quenching (masquage) ou le phénomène d'affaiblissement lumineux. Ce phénomène peut être divisé en deux grandes catégories

##### IV.5.1. Le quenching couleur

Le quenching couleur intervient lors de la transmission de l'énergie entre les scintillateurs et les photomultiplicateurs à travers l'atténuation des photons

### IV.5.2 Le quenching chimique

Le quenching chimique est lié à la présence de substances chimiques nuisibles non scintillantes dans l'échantillon à compter (ne possédant pas une structure aromatique) ; l'énergie de radiation absorbée qui est normalement réémise sous forme de lumière, est alors dissipée en chaleur par divers processus.

## IV.6. Procédure expérimentale

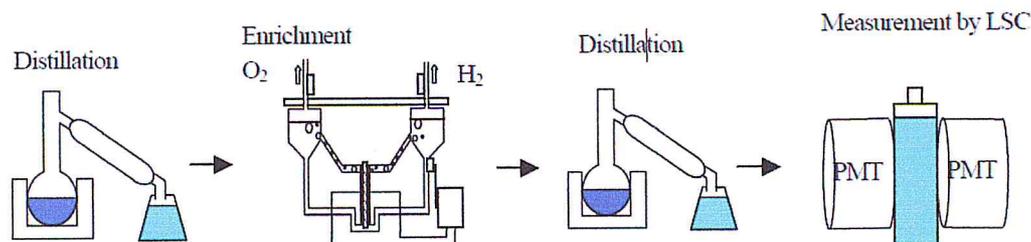


Fig. IV. 6 : Schéma du protocole expérimental de LSC

### IV.6.1. Distillation

Nous distillons 500 mL d'échantillon dans un ballon à fond rond de 500 mL dans lequel nous avons introduit plusieurs pierres ponce pour réguler l'ébullition. Nous récupérons le distillat dans un erlen rodé en verre de 500 mL, sur lequel est notée clairement l'identification de l'échantillon (fig. IV.7).



Fig. IV. 7 : Dispositif de la 1ère distillation

### IV.6.2. Enrichissement électrolytique

Après l'étape de distillation, l'eau devient neutre, c'est pourquoi on ajoute 1.6 g de peroxyde de sodium ( $Na_2O_2$ ) pour qu'elle devienne conductrice. L'échantillon est introduit dans la cellule de l'électrolyse composé d'une anode (électrode extérieure) et une cathode (électrode intérieure), les électrodes sont pesées avant l'électrolyse (vide et avec échantillon). On place les électrodes dans le bac réfrigérant puis on effectue le montage électronique en appliquant

1410 Ampère-heure. L'étape de l'électrolyse dure 6 jours, le temps que le volume final atteigne les quinze millilitres (Fig. IV.8).



Fig. IV. 8 : Les cellules d'enrichissement électrolytique

#### IV.6.3. Neutralisation

On introduit 4 g de chlorure de plomb ( $PbCl_2$ ) dans un ballon à fond rond de 50 ml pour neutraliser l'échantillon.

Ce dernier est introduit dans le ballon pour une seconde distillation afin d'éliminer les sels apparus après l'ajout du  $PbCl_2$  et  $Na_2O_2$  (Fig. IV.9).

A la fin de la distillation, on récupère le flacon contenant le distillat.



Fig. IV. 9 : Dispositif de la 2<sup>ème</sup> distillation

#### IV.6.4. Comptage

On met 8 mL d'eau et 12 mL de scintillant (Ultimat Gold LLT) (Fig. IV.10) dans des flacons de comptage en polyéthylène antistatique en notant la référence de l'échantillon sur le bouchon.



Fig. IV. 10 : Flacon contenant le liquide scintillant

Avec le même ratio, on prépare 2 répliques de la solution standard, 4 répliques du spike (2 vont subir un enrichissement électrolytique et 2 autre vont être comptées directement) et 2 solutions du bruit de fond (eau morte c.-à-d. dépourvue de tritium).

La solution standard permettra de déterminer l'efficacité de détection, elle est préparée à partir d'une source d'eau tritiée diluée 3 fois dans une eau morte de Zelfana.

On prend d'abord 5mL qui est dilué dans 1L d'eau morte (1<sup>ère</sup> dilution) ; cette solution est diluée une seconde fois en mélangeant 20 mL avec 1L d'eau morte (2<sup>ème</sup> dilution). Cette solution servira par la suite à la préparation des standards d'activité de 2145 Bq/L et des spikes de 119 Bq/L.

On laisse les flacons refroidir dans le compteur pendant 12 heures avant de lancer le comptage. Chaque flacon est compté 12 fois pendant 50 minutes.

Le comptage a été effectué à l'aide d'un analyseur à scintillation liquide de modèle Tri-Carb 2550 TR/LL à bas bruit de fond (doté d'un système de réfrigération) (Fig. IV.11).



Fig. IV. 11 : L'appareillage de mesure de la scintillation liquide Tr-iCarb

#### IV.7. Calcul de l'activité

D'après [24] l'activité du tritium est donnée par :

$$A_T = \frac{N_e A_{st}}{N_{st} Z_i} \times D \dots \dots \dots IV.3$$

$N_e$  : nombre de coups net de l'échantillon ;

$A_{st}$  : activité du standard 2145 Bq/L (18000UT) corrigée le jour de l'expérience ;

$N_{st}$  : nombre de coups du standard ;

$D$  : facteur qui prend en compte la décroissance du tritium entre le moment de l'échantillonnage et celui de la mesure ;

$Z_i$  : facteur d'enrichissement .

##### IV.7.1. Facteur d'enrichissement

Le facteur d'enrichissement est calculé à partir de [24]

$$Z_i = \exp\left(\frac{P Q}{(W_i - W_F) \times F} \times \ln \frac{W_i}{W_F}\right) \dots \dots \dots IV.4$$

$Q$  : ampère-heure appliquée 1410 (Ah) ;

$W_i$  : masse des échantillons avant l'électrolyse  $\approx 500$  g ;

$W_F$  : masse des échantillons après l'électrolyse  $\approx 15$  g ;

$F$  : constante de Faraday 2.975 (Ah/g) ;

$P$  : paramètre d'enrichissement moyen donné par

$$P = \frac{1}{n} \sum_i^n P_i \dots \dots \dots IV.5$$

où  $P_i$  est le paramètre d'enrichissement d'un comptage donné par [24]

$$P_i = \frac{F \times (W_{IS} - W_{FS})}{Q} \frac{\ln(Z_{IS})}{\frac{W_{IS}}{W_{FS}}} \dots \dots \dots IV.6$$

$W_{IS}$ : masse du spike avant l'électrolyse ;  
 $W_{FS}$ : masse du spike après l'électrolyse ;  
 $Z_{IS}$ : facteur d'enrichissement du spike.

$$Z_{IS} = \frac{N_{SPF}}{N_{SPI}} \dots \dots \dots IV7$$

$N_{SPF}$ : nombre de coups net du spike après électrolyse 76.33 cpm ;  
 $N_{SPI}$ : nombre de coups net du spike net sans l'électrolyse 5.43 cpm ;

#### IV.7.2. Calcul d'incertitude

L'incertitude sur le comptage est donnée par

$$\Delta A = \left( \sqrt{\frac{N_r + N_{bf}}{t}} \right) \dots \dots \dots IV.8$$

$N_r$ : nombre de coups réel ;  
 $N_{bf}$ : comptage du bruit de fond ;  
 $t$  : temps de comptage en secondes ;

#### Exemple : échantillon d'eau du CRNA

- L'activité du standard est connue le jour de l'expérience  $A = 2195$  Bq/L (18000 UT) le 28/05/2017 (jour du comptage)  
 $n_{st} = 83.51$  cpm
- Le bruit de fond  
 $N_{Bf} = 0.76$  cpm
- Comptage de l'échantillon  
 $n_e = 0.81$  cpm
- Le comptage net du standard et de l'échantillon  
 $N_{st} = 83.51 - 0.76 = 82.75$  cpm  
 $N_e = 0.81 - 0.76 = 0.05$  cpm
- Le jour du prélèvement de l'échantillon est le 08/05/2017, et le jour de la mesure est le 28/05/2017

$$D = \exp\left(-\frac{\ln(2)}{12.32} \times \frac{20}{365}\right) = 0.996$$

- Comme le calcul est long, le facteur d'enrichissement ( $Z$ ) pour chaque échantillon a été calculé directement à partir d'une feuille de calcul préparée par le laboratoire en utilisant les équations IV.4 à IV.7 et on obtient  $Z=17.54$  (tous les échantillons avaient un  $Z \approx 17$ )
- Finalement, en utilisant l'équation IV.3, on obtient

$$A = \frac{0.05 \times 18000}{82.75 \times 17.54} \times 0.996 = 0.60 \text{ UT}$$

$$A = 0.60 \times 0.119 = 0.07 \text{ Bq/L}$$

- L'incertitude liée à l'activité

$$\Delta A = \sqrt{\frac{0.81 + 0.76}{60 \times 600}} = 0.006 \frac{\text{Bq}}{\text{L}}$$

#### IV.8. Résultats de la scintillation liquide

Le comptage du bruit de fond a donné 0.76 cpm, ce qui permet de calculer la limite de détection et on trouve 0.81 cpm ( $Bf + \sigma$ ). La mesure du standard donne 84 cpm pour 8 ml d'où une efficacité de 8%. En utilisant ces résultats, l'activité du tritium dans nos échantillons est calculée et présentée dans le tableau VII.12.

## CHAPITRE V : Mesure de l'Uranium dans l'eau par fluorimétrie

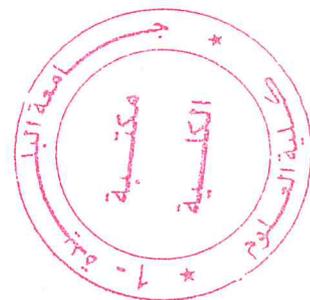
### Introduction

L'uranium est un élément radioactif naturel très répandu dans la nature possédant trois isotopes  $^{234}\text{U}$   $^{235}\text{U}$   $^{238}\text{U}$  avec une abondance de 0.0054, 0.711, et 99.2836 % respectivement ([25]), ses isotopes sont tous des émetteurs alpha.

Comme nous l'avons indiqué plus haut, il existe dans l'écorce terrestre depuis la création de la terre. Nous pouvons remarquer que dans la réglementation, il est exprimé en unité de masse et non pas d'activité comme les autres radionucléides. Cela peut être expliqué par le fait qu'en pratique, il est mesuré par des techniques d'analyse pondérales principalement la fluorimétrie. Ajoutons à cela le fait que souvent sa toxicité chimique est plus importante que sa toxicité radiologique. En effet, l'uranium est un métal lourd donc il présente des effets toxiques sur les reins ; les personnes qui ont consommé les eaux contenant une grande quantité d'uranium sont susceptibles de présenter des pathologies rénales et même manifester un cancer à la longue [26].

### V.1. Principe de fonctionnement :

Un échantillon contenant de l'uranium, excité par une source lumineuse UV, réémet par fluorescence un flux lumineux de quatre pics 540 nm, 554.6, 557.1, 601.6 nm, dont l'intensité est proportionnelle à la concentration (Fig. V.1.). Les études ont montré que lorsque l'uranium est mélangé avec le fluorure de sodium NaF, la lumière émise devient très intense. La longueur d'onde d'excitation peut être variée sur un domaine considérable mais la région qui donne le maximum d'excitation est aux alentours de 365 nm, la plupart des fluorimètres utilise un filtre pour limiter la lumière UV incidente à cette région [27]



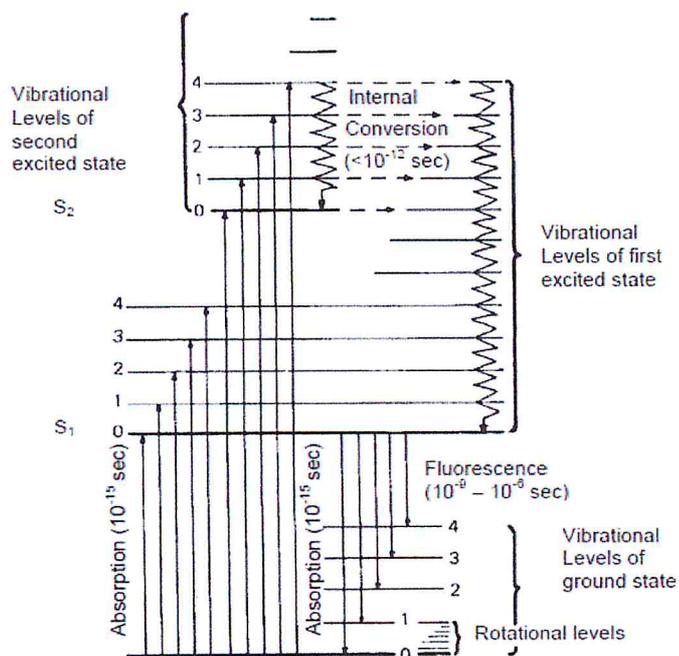


Fig. V. 1 : Mécanisme d'absorption et de fluorescence

## V.2. Matériel

Avant de passer à la mesure par fluorimétrie, l'échantillon doit être préparé. Le matériel nécessaire pour cette préparation est constitué de :

- Nacelles en platine de 10 mm de diamètres et de capacité 0.1 ml.
- Toile de nickral
- Beck Mecker forme pipe n°6 pour butane avec manchon en silice opaque
- Epiradiateur
- Fioles jaugées de 10 ml
- Bêchers en pyrex de 250ml
- Pipettes automatiques
- Pincettes types brucelle
- Chronomètre
- Fluorimètre

## V.3. Préparation de l'échantillon

- Chaque échantillon est dosé 3 fois
- On dispose les nacelles sur la toile nickral préalablement brossée. Les nacelles ne doivent pas se toucher
- On inscrit les échantillons dans l'ordre qu'ils occupent sur la toile : Blanc, Etalon, échantillon

- Le blanc est préparé en déposant 200 µL de HNO<sub>3</sub> (2 dépôt de 100 µL) dans chaque nacelle
- L'étalon est préparé en déposant 200 µL de solution étalon à 100 µg/L de HNO<sub>3</sub> [2.5M] (en 2 dépôts de 100 µl)
- 200 µl de l'échantillon sont déposés dans chaque nacelle
- On sèche sous épiradiateur 15 à 20 minutes
- On recouvre chaque nacelle d'une pastille de flux
- Le bec macker est préchauffé avant le fusion
- On place les nacelles, disposées sur la toile Nickral, sur le bec
- La fusion doit être complète en 1 min à 2 min
- On le garde sur le bac pendant 5 minutes avant de procéder à la coupe

On effectue la lecture sur le fluorimètre dans les 30 minutes (les valeurs extrêmes mesurées sont rejetées (elles ne doivent pas s'écarter de 10% de la moyenne).

$$\frac{X_i - \bar{X}}{\bar{X}} = \pm 0.1 \dots \dots \dots V .1$$

$\bar{X}$  : Valeur moyenne de 3 mesures

$X_i$  : Valeur mesurée

La concentration de l'échantillon est retrouvée en µg/L selon la relation [35] :

$$C_D = \frac{(D-B).C_E V_E}{(E-B) V_D} \dots \dots \dots V .2$$

$C_D$ : Concentration de l'échantillon d'uranium naturel en µg/l

$C_E$  : Concentration d'uranium naturel en µg/l pour l'étalon (environ 100 µg/l)

$D$  : Valeur moyenne du fluorimètre pour le dosage en µA

$B$  : Valeur moyenne du fluorimètre pour le blanc en µA

$E$  : Valeur moyenne du fluorimètre pour l'étalon en µA

$V_E$  : Volume en µl de la prise d'essai d'étalon à environ 1µg/l (200µl)

$V_D$  : Volume en µl de la prise d'essai d'échantillon à environ 1µg/l (200µl)

#### V.4. Système de mesure

Le fluorimètre du laboratoire possède une lampe LED UV couplée à un filtre UV interférentiel centré sur 360 nm avec une largeur de bande de 80 nm. La puissance de la lampe est 0.75 mW, un photomultiplicateur de haute sensibilité pour détecter la lumière UV émise par l'uranium. Afin de réduire les interférences, le photomultiplicateur est couplé à un filtre vert centré sur 540 nm et 50 nm de largeur de bande. Le fluorimètre est lié à un PC pour le traitement des données.

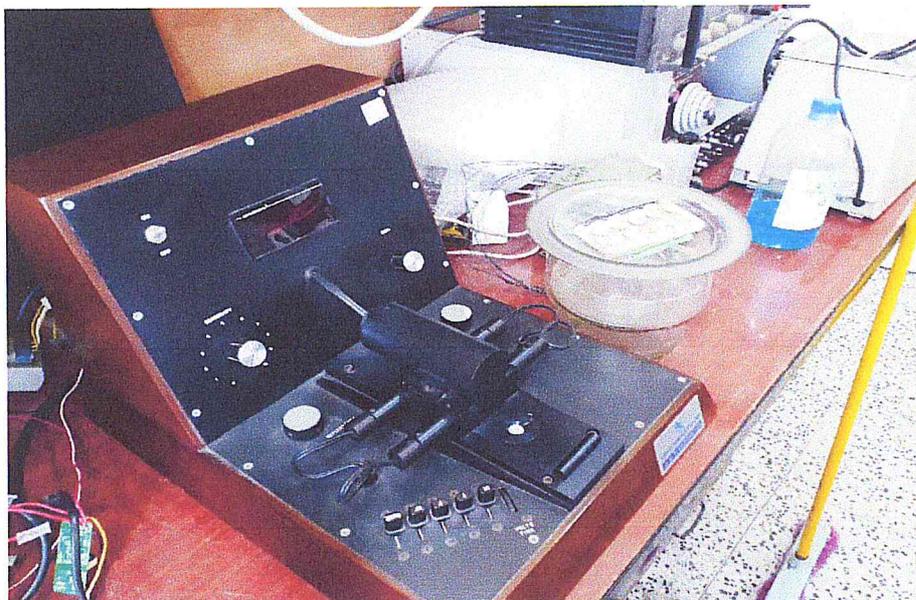


Fig. V. 2 : Fluorimètre du laboratoire

Malheureusement, le fluorimètre du laboratoire de radiotoxicologie était en panne et donc nous n'avions pas pu faire la mesure de l'uranium dans l'eau.

## Chapitre VI : Mesure de la radioactivité dans l'eau par spectrométrie Gamma

### Introduction :

Les trois chaînes radioactives naturelles comportent beaucoup de radioéléments émetteurs gamma. Par conséquent, toutes les matrices d'origine naturelle, y compris le corps humain, contiennent de la radioactivité gamma. Nos échantillons d'eau, même s'ils sont d'origines diverses, ne dérogent pas à cette règle.

Dans le présent chapitre, nous nous intéressons à la mesure de la radioactivité présente dans les échantillons d'eau, objet de notre étude, en employant la technique la plus répandue dans le domaine de la mesure de radioactivité qui est la spectrométrie gamma.

L'équipement utilisé dans notre étude étant basé sur l'emploi de détecteurs à semi-conducteurs, nous commençons par présenter ce type de détecteurs, nous passons ensuite à la présentation de l'ensemble du système de mesure, avant de passer à la mise en œuvre de la technique pour la détermination expérimentale de la radioactivité présente dans nos échantillons d'eau.

### VI.1. Principe de fonctionnement d'un détecteur à semi-conducteurs

Dans un solide cristallin, les électrons ne peuvent occuper que des niveaux d'énergie situés à l'intérieur de bandes permises comme les bandes de valence et de conduction (Fig. VI.1). Par définition, le passage des électrons de la bande de valence à celle de conduction est systématique pour un conducteur et impossible pour un isolant ; dans le cas intermédiaire, dit semi-conducteur, cette transition n'a lieu que suite à une excitation (agitation thermique ou particule ionisante). L'écart entre bandes de valence et de conduction, noté  $E_g$ , est typiquement de l'ordre de l'électronvolt pour un semi-conducteur [28].

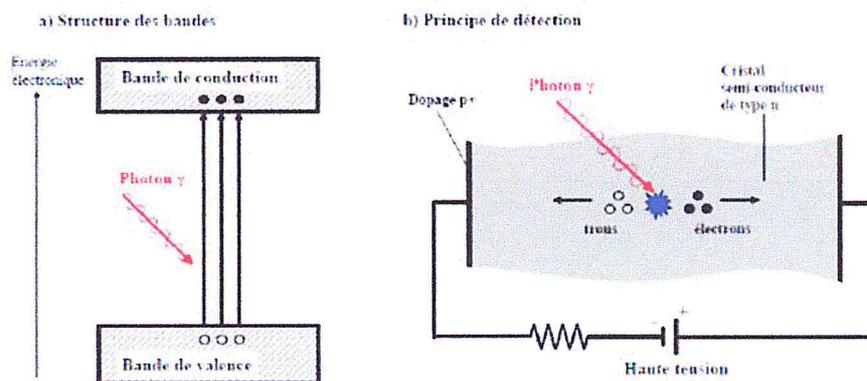


Fig. VI. 1 : Principe de fonctionnement d'un détecteur à semi-conducteurs[28]

Si un champ électrique est appliqué dans le semi-conducteur, les électrons présents dans la bande de conduction (et les trous correspondants dans la bande de valence) deviennent mobiles et créent ainsi un courant. Le dépôt d'une quantité d'énergie  $E$  par un rayonnement ionisant peut se traduire par la création d'un nombre proportionnel de paires électrons-trous :

$$N_{eh} = \frac{E_\gamma}{W_{eh}} \dots \dots \dots \text{VI.1.}$$

où  $W_{eh}$  est l'énergie nécessaire pour créer une paire électron-trou. Afin de drainer les porteurs de charge jusqu'aux bornes du semi-conducteur (électrodes de collecte) sans recombinaison, il est nécessaire de former une zone désertée de tout porteur libre. Ce type de zone, dite zone de déplétion, est obtenue avec les semi-conducteurs par une polarisation inverse des jonctions PN ou PIN [28]. Le germanium se caractérise par le fait qu'il possède une bande interdite très étroite ce qui permet de créer le plus grand nombre de porteurs de charge pour un dépôt d'énergie donné, minimisant ainsi la fluctuation statistique dans la mesure.

Par ailleurs, le germanium peut être utilisé avec des volumes importants (plusieurs dizaines de  $cm^3$ ). Sa densité et son nombre atomique élevés en font le semi-conducteur le plus approprié pour la détection des rayonnements ionisants dans une plage d'énergie très large allant de la dizaine de keV à la dizaine de MeV [28].

## VI.2. Système de mesure

La détection et la mesure des radionucléides dans les échantillons ont été effectuées par un détecteur de germanium de haute pureté (GeHp) de géométrie cylindrique coaxial vertical. Le GeHp de type N fourni par CANBERRA (modèle GC3018) a une résolution de 1.8 keV à 1332 keV et possède une efficacité relative de 30 %, le détecteur est soumis à une tension de 2500 V.

Les spectres de tous les échantillons sont analysés en utilisant le logiciel Genie- 2000 spectra. Tous les échantillons ont été comptés pendant 24 heures. Avant la mesure des échantillons, le bruit de fond a été mesuré en utilisant des flacons identiques à ceux utilisés pour l'analyse des échantillons. Les échantillons étaient scellés pendant 4 semaines avant l'analyse afin que l'équilibre séculaire soit établi c'est-à-dire que les activités du radioélément père et fils soient les mêmes.



Fig. VI. 2 : Compteur germanium hyper pur (GeHp)

### VI.2.1. Fonctionnement

Le cristal est soumis à une tension inverse créant un champ électrique à l'intérieur de la zone intrinsèque (I). Lorsqu'un photon arrive à l'intérieur de cette zone, il interagit avec le

germanium en produisant des paires électron-trou. Les porteurs de charges ainsi créés se déplacent le long des lignes de champ électrique jusqu'aux régions dopées P et N. Le nombre de paires électron-trou est proportionnel à l'énergie déposée par le photon incident. Le temps de collection de charges est une fonction de la géométrie du détecteur, de la haute tension appliquée ainsi que de la nature du cristal. C'est un facteur qui limite l'efficacité du détecteur. Pour améliorer la résolution du détecteur, celui-ci doit être refroidi, ce qui diminue l'agitation thermique des porteurs de charges. Ceci est assuré par un cryostat à la température de l'azote liquide, soit 77 K.

### VI.2.2. Constitution du système

L'ensemble de détection permet de mesurer un signal issu de l'interaction des rayonnements ionisants avec le cristal de germanium, de l'amplifier et de le mettre en forme en vue d'une analyse ultérieure. La chaîne d'acquisition est composée de cinq parties (Fig. VI.3) : le détecteur (dont la partie sensible est un cristal de germanium), le préamplificateur, l'amplificateur, le convertisseur analogique-numérique (ADC) ainsi que l'analyseur multicanaux (MCA)[28].

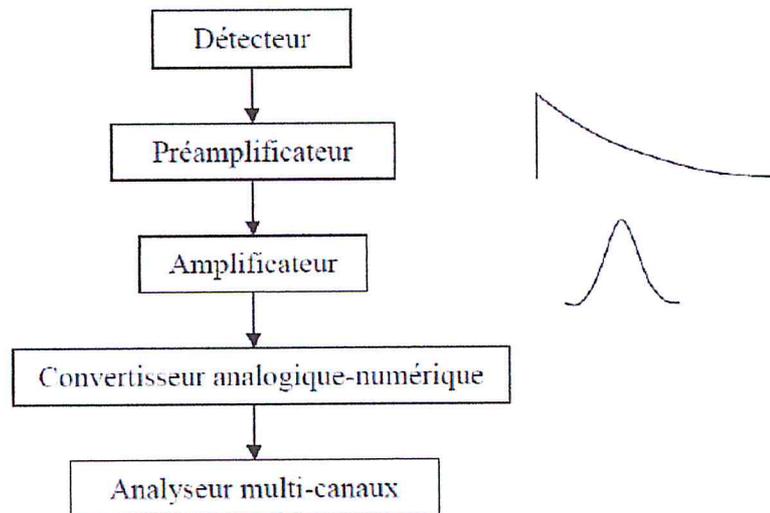


Fig. VI. 3 : Schéma de principe du système de mesure [28].

Les courbes de la Fig. VI.3 représentent la forme du signal à la sortie du préamplificateur et de l'amplificateur. Il s'agit de l'allure de la tension en fonction du temps.

#### a. Le préamplificateur et l'amplificateur

Pour diminuer le bruit électronique, le préamplificateur doit être placé le plus près possible du détecteur et il est solidaire du cryostat. Le préamplificateur est isolé de la haute tension par une capacité. Le signal à l'entrée du préamplificateur n'est pas forcément proportionnel à l'énergie déposée dans le cristal. Par contre l'intégrale de ce signal est égale à la charge collectée qui dépend de l'énergie déposée. C'est pourquoi, dans la plupart des applications spectroscopiques sont utilisés des préamplificateurs <sensibles à la charge>.

Il s'agit d'un montage intégrateur dont le signal de sortie est proportionnel à la charge en entrée de celui-ci et indépendant de la capacité du détecteur. Le temps de montée du signal de sortie est relié au temps de collection de charge alors que le temps de descente lui ne dépend que de la constante de temps RC du montage intégrateur. Le temps de montée peut varier de quelques ns à quelques  $\mu$ s. Le temps de descente est en général fixé à 50  $\mu$ s Ce qui

signifie que l'on a un temps de montée rapide et un temps de descente beaucoup plus lent (Figure IV.3.).

L'amplificateur réalise deux tâches essentielles : la mise en forme du signal et son amplification. Il s'agit de filtrer le signal de manière à avoir le meilleur rapport signal sur bruit. Le signal de sortie du préamplificateur étant assez lent, avant qu'il atteigne zéro volt, il est possible qu'un autre signal arrive. Pour éviter ceci, le signal de sortie du préamplificateur est différencié pour éliminer la composante lente.

Cela a pour effet de préserver uniquement l'information relative aux caractéristiques du détecteur contenue dans la constante de temps du signal montant. Ensuite, le signal est intégré pour réduire le bruit et on obtient un signal quasiment gaussien (Fig. IV.3). La largeur à mi-hauteur de la gaussienne obtenue s'exprime en terme de constante de temps que l'on peut régler. Si elle est choisie trop courte, le bruit est amplifié, si elle est trop longue, on peut assister à l'empilement de deux signaux électriques. En général, la constante de temps est choisie de 3 à 30  $\mu$ s suivant le type de détecteurs [28].

### b. Le convertisseur analogique-numérique et l'analyseur multicanaux

A la sortie de l'amplificateur, on a un signal continu. Pour l'acquisition, il est préférable de travailler avec des grandeurs discrètes, c'est-à-dire qui ne peuvent prendre qu'un ensemble fini de valeurs. C'est pourquoi on utilise un convertisseur analogique-numérique (ADC), qui transforme l'amplitude du signal électrique fourni par l'amplificateur en un nombre qui est alors proportionnel à l'énergie déposée dans le cristal. Cette opération nécessite entre 0,8 et 6  $\mu$ s. La sortie de l'ADC est enregistrée dans une mémoire qui possède autant d'adresses que le maximum de numéro de canaux servant à découper le spectre final. Il y a au total 8192 canaux disponibles pour l'acquisition. L'analyseur multicanaux sert à collecter et enregistrer les événements issus de l'ADC en les classant.

Dès qu'un signal a été analysé par l'ADC, l'adresse mémoire dans laquelle il a été enregistré est bloquée et son contenu est incrémenté d'un coup. Cela permet d'obtenir un histogramme en temps réel dans lequel l'énergie déposée dans le cristal est reliée au numéro de canal (plus l'énergie est élevée, plus le numéro de canal est grand) et le nombre de coups dans un canal donné est proportionnel au nombre de photons ayant déposé la même énergie dans le cristal. Cette opération nécessite entre 1,5 et 3  $\mu$ s [28].

## VI.3. Calcul de l'activité

- L'activité du  $^{226}\text{Ra}$  est déterminée à partir de la moyenne de l'activité de ses descendants  $^{214}\text{Pb}$  à 352 keV et  $^{214}\text{Bi}$  à 609 keV

$$A_{Ra} = \frac{(A_{Pb} + A_{Bi})}{2} \dots\dots\dots \text{VI.2.}$$

- L'activité du  $^{232}\text{Th}$  est déterminée à partir de la moyenne de l'activité de ses descendants  $^{208}\text{Tl}$  à 583 keV et  $^{228}\text{Ac}$  à 911 keV.

$$A_{Th} = \frac{(A_{Ac} + A_{Tl})}{2} \dots\dots\dots \text{VI.3.}$$

- L'activité du  $^{40}\text{K}$  est déterminée à partir du pic d'énergie 1460.8 keV

L'activité par litre (A) de chaque radionucléide dans chaque échantillon a été déterminée en divisant le comptage net ( $N_{\text{net}}$ ) (obtenu en retirant le bruit de fond du comptage total sous le pic choisi) par le volume de l'échantillon, l'efficacité du pic et l'intensité du pic gamma correspondant à l'énergie spécifique.

$$A = \frac{N_{net}}{I \times V \times \epsilon \times t} \dots \dots \dots \text{VI.4}$$

où :

A : activité par litre (Bq/L) de l'échantillon.

$N_{net}$  : nombre de coups net par seconde = N : nombre de coups de l'échantillon -  $N_{BF}$  comptage du bruit de fond.

V : volume de l'échantillon (1L).

I : l'intensité du pic correspondant à l'énergie spécifique.

$\epsilon$  : l'efficacité du pic de l'énergie donnée.

t : le temps de comptage 86400 s

Les erreurs des mesures sont exprimées en fonction de la déviation standard ( $2\sigma$ ), ou  $\sigma$  est [29] :

$$\sigma = \left( \frac{N_e}{T_e^2} + \frac{N_B}{T_B^2} \right)^2 \dots \dots \dots \text{VI.5}$$

$N_e$  : nombre de coups de l'échantillon.

$N_B$  : nombre de coups du bruit de fond.

$T_e$  : temps de l'analyse des échantillons 86400 s.

$T_B$  : temps de mesure du bruit de fond 86400 s.

Le résultat est exprimé en coups par seconde, et en le divisant par l'efficacité et par l'intensité du pic ; le résultat est converti en Bq/L.

#### VI.4. Calibration en efficacité

Pour établir la courbe d'efficacité, un standard a été préparé en mélangeant 16 ml d'euporium-152 avec 1 L d'eau distillée puis analysé pendant 144000 secondes. L'activité corrigée au jour de la mesure est de 577 Bq.

Pour couvrir toutes les énergies d'intérêt, nous avons également préparé un standard qui contient 100 g de KCl (1639.1 Bq) mélangé à l'eau distillée et analysé pendant 24 heures.

Tableau VI. 1 : Les efficacités mesurées et calculées

Énergie (keV)	Efficacité mesurée (%)	Efficacité calculée (%)
121	8.72	8.72
244	6.97	6.97
344	6.07	6.07
778	3.70	3.71
964	3.15	3.13
1085	2.88	2.88
1112	2.83	2.84
1408	2.38	2.37
1460.8	2.27	2.27

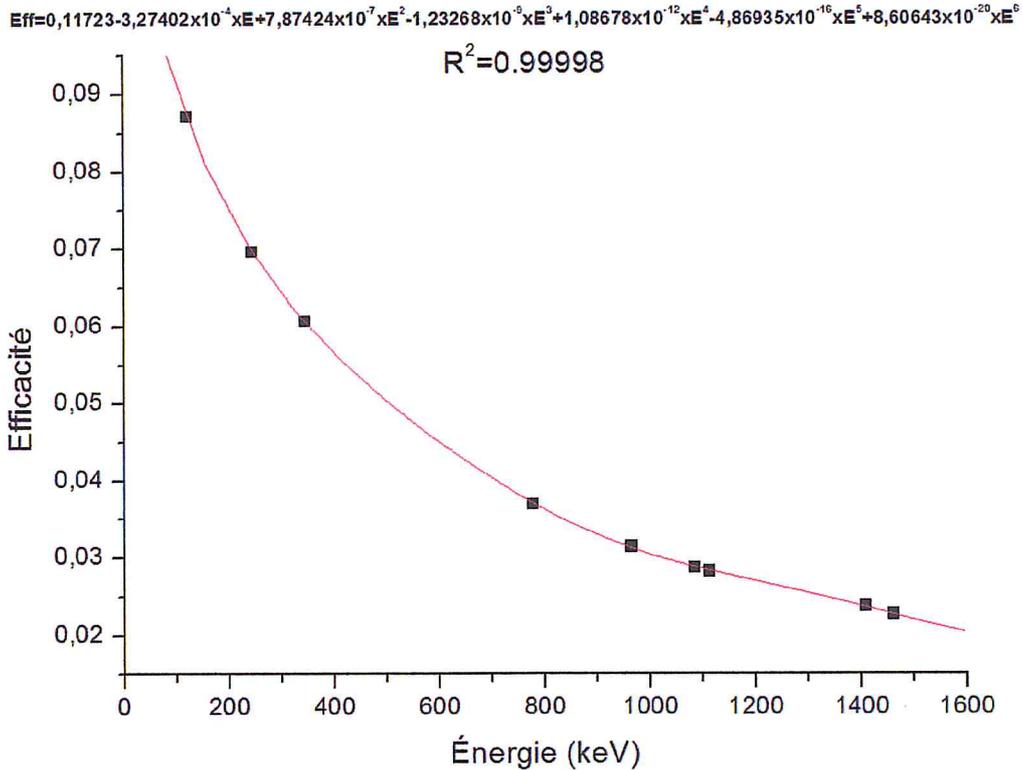


Fig. VI. 4 : Courbe de calibration en efficacité

L'équation de la courbe :

$$\epsilon = 0,11723 - (3,27402 \times 10^{-4})E + (7,87424 \times 10^{-7})E^2 - (1,23268 \times 10^{-9})E^3 + (1,08678 \times 10^{-12})E^4 - (4,86935 \times 10^{-16})E^5 + (8,60643 \times 10^{-20})E^6 \dots\dots\dots \text{VI.6.}$$

Avec l'équation VI.6, on peut calculer l'efficacité de détection comme présenté dans le tableau VI.1. Exemple (E=1640.8 keV, pic du <sup>40</sup>K)

$$\begin{aligned} \epsilon &= 0,11723 - (3,27402 \times 10^{-4}) \times 1640,8 + (7,87424 \times 10^{-7}) \times 1640,8^2 \\ &\quad - (1,23268 \times 10^{-9}) \times 1640,8^3 + (1,08678 \times 10^{-12}) \times 1640,8^4 \\ &\quad - (4,86935 \times 10^{-16}) \times 1640,8^5 + (8,60643 \times 10^{-20}) \times 1640,8^6 \\ &= 0,0227 = 2,27\% \dots\dots\dots \text{VI.7.} \end{aligned}$$

Nous remarquons que les efficacités mesurées par l'équation IV.6 sont les mêmes que les efficacités mesurées directement et donc la courbe peut être utilisée afin de trouver les activités des radionucléides d'intérêt.

### VI.5. Résultats

L'AMD pour chaque radionucléide est calculée à partir de la formule de Curie [20] (comme suit (exemple <sup>40</sup>K) :

$$AMD = \frac{2,71 + 4,65 \sqrt{N_{Bf}}}{V \times t \times I \times \epsilon} = \frac{2,71 + 4,65 \sqrt{11464}}{24 \times 3600 \times 0,1067 \times 0,0229} = 2,35 \frac{Bq}{L} \dots\dots\dots \text{VI.8.}$$

Tableau VI. 2 : L'AMD pour différents radionucléides

	<sup>214</sup> Pb	<sup>214</sup> Bi	<sup>208</sup> Tl	<sup>228</sup> Ac	<sup>40</sup> K
AMD (Bq/L)	0.074	0.097	0.036	0.2	2.35

L'activité des radionucléides (équation VI.4)

- Potassium-40 de l'eau du robinet (Koléa)

$$A = \frac{12707-11464}{0.0229 \times 24 \times 3600 \times 0.1067} = 5.85 \dots\dots\dots \text{VI.9}$$

L'incertitude liée à l'activité (équation VI.5)

$$\Delta A = 2\sigma = 2 \times \frac{\sqrt{\frac{12707+11464}{(24 \times 3600)^2}}}{0.0229 \times 0.1072} = 1.46 \dots\dots\dots \text{VI.10}$$

- Estimation de la dose

La dose efficace engagée a été calculée en utilisant l'équation introduite par l'EPA [30]

$$DR_w = A_w \times IR_w \times ID_F \dots\dots\dots \text{VI.11}$$

$DR_w$  : Dose effective (mSv /an)

A : l'activité en (Bq/L).

$IR_w$ : la consommation de l'eau par une personne (734 L/an pour une personne adulte [13])

$ID_F$ : le facteur de conversion de dose ( $2,8 \times 10^{-4}$ ,  $2,3 \times 10^{-4}$ ,  $5 \times 10^{-6} \text{ mSvBq}^{-1}$  pour  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  respectivement [7])

A titre d'exemple d'application numérique de l'équation VI.11, la dose due à l'ingestion du  $^{40}\text{K}$  présent dans l'eau sera

$$DR_w = 5.89 \times 734 \times 5 \times 10^{-6} = 0.021 \text{ mSv} \dots\dots\dots \text{VI.12}$$

Les résultats sont résumés dans les tableaux VII.14 et VII.16.

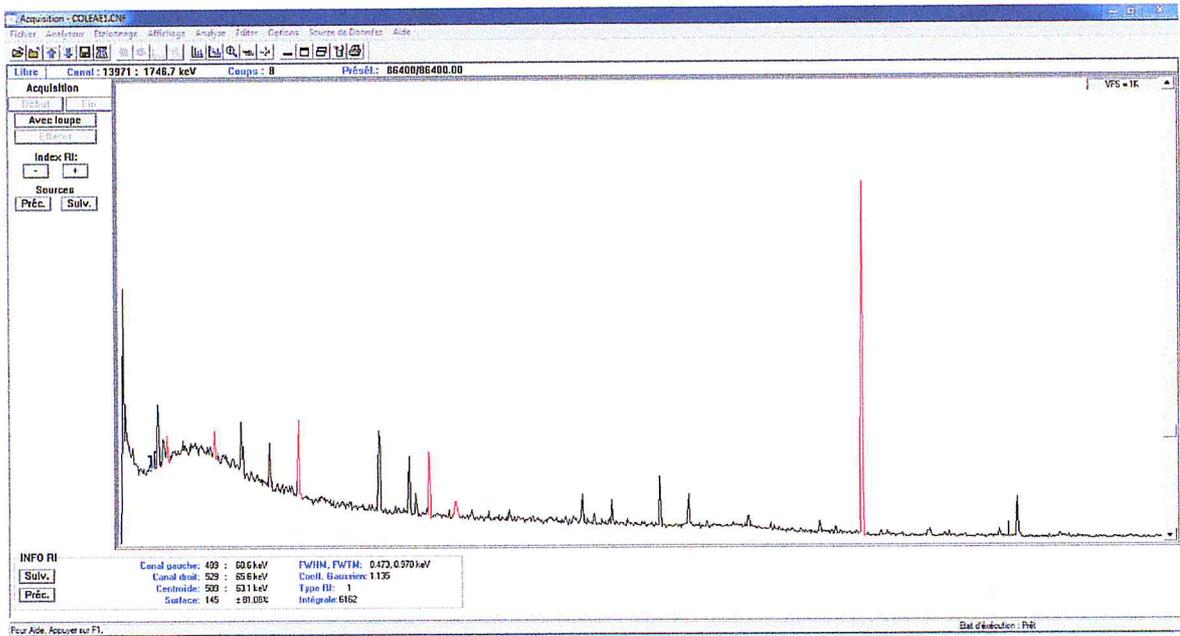


Fig. VI. 5 : Le spectre gamma de l'échantillon 1

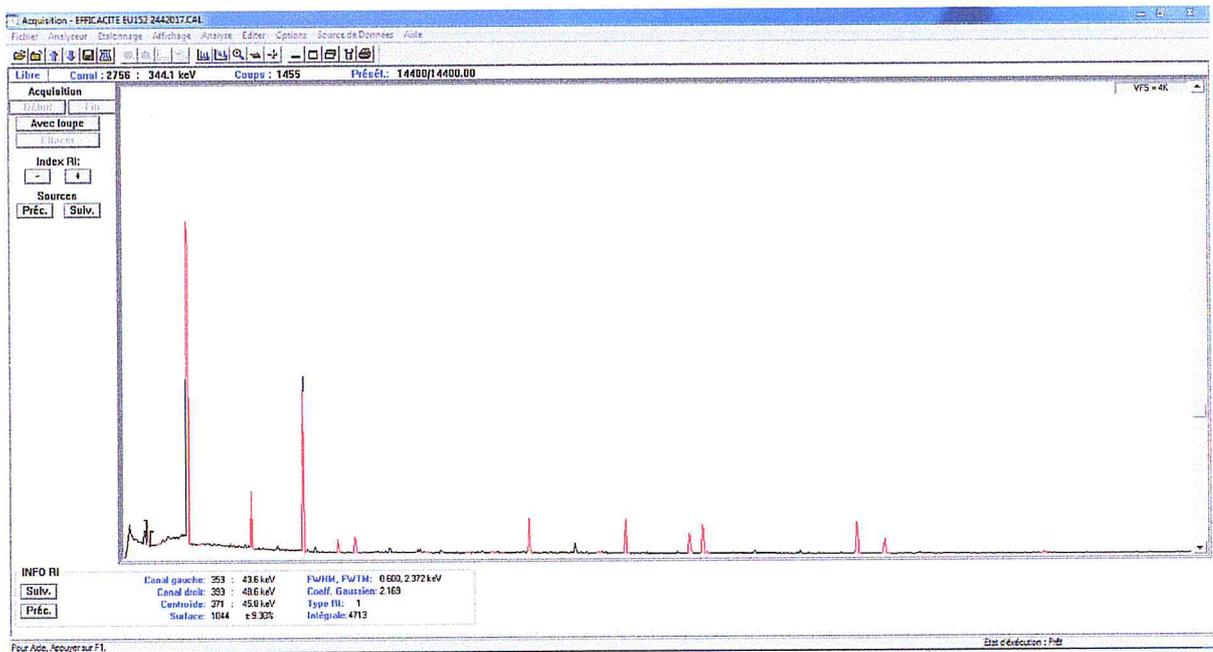


Fig. VI. 6 : Spectre gamma de l'euprem-152 utilisé pour la calibration en efficacité

## Chapitre VII : Synthèse et interprétation des résultats

Introduction :

A présent, plusieurs échantillons d'eau de différents types (eau de robinet, eau de puits, eau thermale) provenant de régions différentes choisies d'une manière aléatoire afin de ne pas influencer les résultats, ont fait l'objet de détermination de la concentration en radioactivité par différentes techniques de mesure.

Ce chapitre qui achève l'étude comporte une récapitulation de tous les résultats expérimentaux, leurs interprétations et les recommandations qui en découlent.

### VII.1. Activité alpha/Bêta totale dans l'eau

L'ensemble des valeurs obtenues par la mesure des activités Alpha/Bêta total est donné dans les tableaux VII.2, VII.4, et VII.6.

#### L'activité calculée pour une calibration par la source d'Américium

Tableau VII. 1: Activité minimale détectable pour les 3 détecteurs

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
AMD (Bq/L)	0.008	0.017	0.009

Tableau VII. 2: Résultats de l'analyse des échantillons de l'eau potable

Echantillon	Activité (Bq/L)
Eau du robinet (Koléa)	<AMD
Eau du robinet (Bab Ezzouar)	<AMD
Eau du robinet (Alger CRNA )	$0.036 \pm 0.005$
Eau du robinet (Chéraga)	<AMD
Eau du robinet (Baba Hassen)	$0.017 \pm 0.008$
Eau du robinet (Larbaa)	<AMD
Eau du robinet (Blida)	$0.022 \pm 0.004$
Eau de puits (Koléa)	$0.022 \pm 0.009$
Eau de puits (Beni Tamou)	$0.017 \pm 0.008$
Eau de puits (Oued El alleug)	<AMD

**L'activité calculée pour une calibration à l'aide de la source d'Uranium**

Tableau VII. 3: Activité minimale détectable pour les 3 détecteurs

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
AMD (Bq/L)	0.010	0.020	0.012

Tableau VII. 4: Résultats de l'analyse des échantillons de l'eau potable

Echantillon	L'activité (Bq/L)
Eau du robinet (Koléa)	<AMD
Eau du robinet (Bab Ezzouar)	<AMD
Eau du robinet (Alger CRNA)	0.044 ± 0.006
Eau du robinet (Chéraga)	<AMD
Eau du robinet (Baba Hassen)	0.020 ± 0.010
Eau du robinet (Larbaa)	<AMD
Eau du robinet (Blida)	0.024 ± 0.004
Eau de puits (Koléa)	0.026 ± 0.01
Eau de puits (Beni Tamou)	0.020 ± 0.008
Eau de puits (Oued El Alleug)	<AMD

**L'activité calculée pour une calibration à l'aide de la source de Plutonium**

Tableau VII. 5: Activité minimale détectable pour les 3 détecteurs

	Détecteur 1	Détecteur 2	Détecteur 3
AMD (Bq/L)	0.009	0.018	0.011

Tableau VII. 6: Résultats de l'analyse des échantillons de l'eau potable

Echantillon	Activité (Bq/L)
Eau du robinet (Koléa)	<AMD
Eau du robinet (Bab Ezzouar)	<AMD
Eau du robinet (Alger CRNA )	0.040 ± 0.006
Eau du robinet (Chéraga)	<AMD
Eau du robinet (Baba Hassen)	0.019 ± 0.009
Eau du robinet (Larbaa)	<AMD
Eau du robinet (Blida)	0.02 ± 0.005
Eau de puits (Koléa)	0.023 ± 0.009
Eau de puits (Beni Tamou)	0.019 ± 0.009
Eau de puits (Oued El Alleug)	<AMD

Nous pouvons remarquer que l'activité en alpha dans l'eau potable varie entre 0.017 et 0.036 Bq/L.

L'analyse alpha total de l'eau potable (l'eau de puits, l'eau du robinet et l'eau de source) prélevée dans le nord du Portugal a donné les résultats résumés dans le tableau VII.7 [31]

Tableau VII. 7 : L'activité alpha total dans les échantillons portugais [31]

Sample Reference	Gross Alpha
#A	< MDA
#B	0.017 ± 0.005
#1	< MDA
#4	< MDA
#6	0.056 ± 0.008
#8	< MDA
#9	0.019 ± 0.005
#10	0.075 ± 0.008
#11	0.017 ± 0.006
#13	< MDA
#14	0.060 ± 0.007
#15	0.017 ± 0.005
#17	0.073 ± 0.009
#18	0.020 ± 0.006
#19	0.022 ± 0.006
#20	0.021 ± 0.009
#21	0.057 ± 0.008
#22	0.161 ± 0.016
#23	0.018 ± 0.005
#24	< MDA
#25	< MDA
#29	0.179 ± 0.012
#30	0.161 ± 0.025
#31	0.038 ± 0.006
#32	< MDA
#34	0.037 ± 0.006
#36	0.124 ± 0.010
#37	0.018 ± 0.005
#39	0.162 ± 0.011
#40	0.115 ± 0.014
#41	0.019 ± 0.009
#42	0.025 ± 0.005
#43	0.032 ± 0.005
#45	0.020 ± 0.004
#46	0.039 ± 0.008
#47	0.073 ± 0.008
#49	0.330 ± 0.026
#51	0.032 ± 0.006
#52	0.023 ± 0.005
#53	< MDA

On remarque que l'activité des échantillons varie entre des activités inférieures 0.015 Bq/L (activité minimale détectable) à 0.330 ± 0.026 Bq L<sup>-1</sup>. Les activités les plus importantes sont enregistrées dans les échantillons #22, #29, #30, #36, #39, #40 et #49. Ces grandes valeurs sont en relation directe avec la nature géologique de la terre (Roche-mère composée essentiellement du granite, et enrichie avec l'activité naturelle).

Mis à part les 7 échantillons cités en haut, les résultats de l'analyse de l'eau potable dans notre étude sont approximativement les mêmes que ceux trouvés dans les eaux portugaises.

Par ailleurs, pour ce qui est des eaux thermales (Tableaux VII.8, VII.9, VII.10),

Tableau VII. 8: Résultats de l'analyse d'échantillons d'eau provenant de Tamanrasset (calibration à l'aide d'américium)

Echantillon	Activité (Bq/L)
TAM 8	<AMD
TAM 9	$0.018 \pm 0.006$
TAM 10	$0.044 \pm 0.006$
TAM 11	<AMD
TAM 12	$0.12 \pm 0.011$
TAM 13	$0.014 \pm 0.005$
TAM 14	$0.021 \pm 0.009$
TAM 15	$0.011 \pm 0.009$
TAM 17	$0.43 \pm 0.016$
TAM 18	<AMD
TAM 19	<AMD

Tableau VII. 9 : Résultats de l'analyse d'échantillons d'eau provenant de Tamanrasset (calibration à l'aide d'uranium)

Echantillon	L'activité en (Bq/L)
TAM 8	<AMD
TAM 9	$0.022 \pm 0.005$
TAM 10	$0.053 \pm 0.007$
TAM 11	<AMD
TAM 12	$0.14 \pm 0.013$
TAM 13	$0.017 \pm 0.006$
TAM 14	$0.025 \pm 0.01$
TAM 15	$0.013 \pm 0.01$
TAM 17	$0.52 \pm 0.017$
TAM 18	$0.01 \pm 0.005$
TAM 19	<AMD

Tableau VII. 10 : Résultats de l'analyse d'échantillons d'eau provenant de Tamarasset (calibration à l'aide de plutonium)

Echantillon	Activité (Bq/L)
TAM 8	<AMD
TAM 9	$0.020 \pm 0.006$
TAM 10	$0.048 \pm 0.006$
TAM 11	<AMD
TAM 12	$0.13 \pm 0.011$
TAM 13	$0.016 \pm 0.005$
TAM 14	$0.025 \pm 0.009$
TAM 15	$0.013 \pm 0.009$
TAM 17	$0.47 \pm 0.016$
TAM 18	<AMD
TAM 19	<AMD

Une comparaison avec des travaux réalisés sur des eaux thermales dans la région d'Ankara (Tableau VII.11 [32]), nous constatons que leurs valeurs se situent dans une fourchette allant de  $0,09 \pm 0.02$  à  $2.58 \pm 0.22$  Bq/L, et qui sont, par conséquent, supérieures aux résultats de notre étude.

Tableau VII. 9: Le tableau résume les résultats de l'analyse alpha total des eaux thermales de Ankara [32]

Location of sample	Gross $\alpha$ (Bq L <sup>-1</sup> )
Karakaya-Ayaş	$0.09 \pm 0.02$
İçmece-Ayaş	$2.28 \pm 0.06$
Beypazarı	$1.53 \pm 0.11$
Haymana	$2.58 \pm 0.22$
Kızılcahamam	$1.85 \pm 0.13$

## VII.2. Activité en tritium

L'ensemble des valeurs obtenues par la mesure par la technique de scintillation liquide est donné dans le tableau IV.12.

Tableau VII. 10: Les résultats de la mesure du tritium par scintillation liquide

Echantillons	L'activité du tritium (UT)	L'activité du tritium (Bq/L)
Eau du robinet (Koléa)	/	/
Eau du robinet (Bab Ezzouar )	3.93±0.31	0.47 ±0.037
Eau du robinet (Alger CRNA )	0.60±0.06	0.07 ±0.006
Eau du robinet (Chéraga)	/	/
Eau du robinet (Baba Hassen)	2.21 ±0.35	0.26±0.04
Eau du robinet (Larbaa)	/	/
Eau du robinet (Blida)	/	/
Eau de puits (Koléa)	1.18 ±0.22	0.14 ±0.026
Eau de puits (Beni Tamou)	4.44±0.25	0.53 ±0.042
Eau de puits (Oued El Alleug)	3.69 ±0.27	0.44 ±0.032

Signalons que lors de l'opération d'enrichissement, nous avons perdu les échantillons 2,5,7 et 9 à cause d'un trou dans les cellules d'électrolyse.

Les résultats de l'analyse montrent que l'activité en tritium des échantillons est bien loin du seuil établi par la réglementation algérienne.

Cela était prévisible puisque l'Algérie n'est pas un pays nucléarisé avec une industrie nucléaire. En effet, les activités mises en jeu dans les différents domaines tels que la santé, l'industrie, et la recherche ne sont pas très importantes, et nous ne possédons pas de centrales électronucléaires avec des réacteurs de puissance mais seuls deux réacteurs de recherche Nur à Draria (Alger) et Essalam à Birine (Aïn Ouessara).

Par conséquent ; seules les réactions dans les hautes atmosphères sont à l'origine du tritium dans l'eau potable algérienne.

A partir de ces résultats on peut aussi retracer l'origine de ces échantillons :

Échantillon 1 : dessalement de l'eau mer mélangé avec l'eau de forage.

Échantillon 3, 4 et 8 : eau de forage.

Échantillon 10 : dessalement de l'eau de mer.

En comparaison avec l'activité du tritium mesurée dans l'eau potable canadienne prélevée dans les provinces Ontario, Québec et New Brunswick (Tableau VII.13 [33]), nos échantillons contiennent des activités en tritium nettement inférieure aux eaux canadiennes. Ceci peut être expliqué par le fait que le Canada est un pays où l'activité nucléaire est intense. D'ailleurs, la réglementation canadienne est beaucoup moins exigeante avec un seuil en activité en tritium dans l'eau de 7000 Bq/L.

Tableau VII. 11 : Les résultats d'analyse du tritium de l'eau potable[33]

Water Source	Province	Source	Distance from Site	Tritium level (Bq/L)
Kincardine	Ontario	Bruce Power <sup>1</sup>	15 km SSW of Bruce B	6.4
Port Elgin	Ontario	Bruce Power <sup>1</sup>	17 km NE of Bruce A	17.4
Southampton	Ontario	Bruce Power <sup>1</sup>	22 km NE of Bruce A	12.0
Local deep wells	Ontario	Bruce Power <sup>1</sup>	Local to Bruce	<5.9 – 19.1
Local shallow wells	Ontario	Bruce Power <sup>1</sup>	Local to Bruce	12.3 – 58.2
Rolphton	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	28 km upstream of CRL	3.0
Deep River	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	9 km upstream of CRL	3.0
Chalk River Laboratories	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	CRL intake well	11.0
Hghview	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	8 km downstream of CRL	<15.0
Harrington Bay	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	9 km downstream of CRL	8.0
Fort William	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	14 km downstream of CRL	7.0
Petawawa	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	18 km downstream of CRL	7.0
Pembroke	Ontario	Chalk River Laboratories <sup>2</sup>	28 km downstream of CRL	7.0
Champlain	Quebec	Hydro-Québec (Gentilly) <sup>3</sup>		< 18
Gentilly	Quebec	Hydro-Québec (Gentilly) <sup>3</sup>		< 18
Trois-Rivières	Quebec	Hydro-Québec (Gentilly) <sup>3</sup>		< 18
Dipper Harbour	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	28 Ridge Rd, Dipper Harbour	15.0
Dipper Harbour	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	22 Ridge Rd, Dipper Harbour	24.5
Dipper Harbour	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	16 Ridge Rd, Dipper Harbour	20.0
Dipper Harbour	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	10 Ridge Rd, Dipper Harbour	19.0
Dipper Harbour	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	4 Ridge Rd, Dipper Harbour	18.0
Maces Bay	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	190 Welch Cove Rd, Maces Bay	39.0
Maces Bay	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	181 Ridge Rd, Maces Bay	32.5
Maces Bay	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	132 Ridge Rd, Maces Bay	22.5
Maces Bay	New Brunswick	NB Power <sup>4</sup>	68 Ridge Rd, Maces Bay	14.0

<sup>1</sup> Annual Summary and Assessment of Environmental and Radiological Data for 2006. Bruce Power. 2007.

<sup>2</sup> Annual Report of Radiological Environmental Monitoring in 2005 at Chalk River Laboratories. AECL. 2006.

<sup>3</sup> Centrale nucléaire Gentilly-2. Résultats du programme de surveillance de l'environnement du site de Gentilly. Rapport annuel 2006. Hydro-Québec. 2007.

<sup>4</sup> Point Lepreau Generating Station. Environmental Monitoring Radiation Data. NB Power. 2007.

### VII.3. Activité en Uranium

Pour cette partie du travail, nous devons utiliser un fluorimètre à phase solide qui est l'appareil habituellement utilisé pour la détermination de la concentration d'Uranium aussi bien dans l'eau que dans d'autres matrices. Durant notre stage, cet appareil était toujours en réparation.

Néanmoins, nous avons fait appel à la spectrométrie gamma c'est-à-dire que l'on a essayé de déterminer l'uranium indirectement.

Pour clarifier notre approche, il est important de signaler ce qui suit :

1. Les normes réglementaires pour l'Uranium concernent l'Uranium naturel et sont exprimées en teneur pondérale à savoir µg/L.
2. Notre approche expérimentale est radiologique basée sur la détermination des concentrations dans l'eau de différents radio-isotopes de l'Uranium.
3. La comparaison directe n'est donc pas possible.
4. En cas de présence excessive d'Uranium, dépassant les seuils réglementaires, effectivement notre approche serait entachée de beaucoup d'erreurs.

5. Mais, étant donné que notre objectif est plutôt de confirmer la non présence de taux élevés d'Uranium dépassant les normes en vigueur, et à partir du moment que notre travail a abouti à la conclusion que les concentrations, aussi bien en isotopes d'Uranium qu'en radioéléments appartenant à la même chaîne de désintégration, sont en dessous des limites, nous pouvons extrapoler pour confirmer la non présence de taux d'Uranium dépassant les seuils réglementaires.

Tableau VII. 12 : Les résultats de l'analyse des différents radionucléides par spectrométrie gamma

Echantillon	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/L)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/L)	$^{40}\text{K}$ (Bq/L)
Eau du robinet (Koléa)	0.34±0.059	<AMD	5.85±1.46
Eau du robinet (Bab Ezzouar)	0.33±0.061	<AMD	4.21±1.45
Eau du robinet (Alger CRNA)	0.27±0.06	<AMD	<AMD
Eau du robinet (Chéraga)	0.09±0.057	<AMD	<AMD
Eau du robinet (Baba Hassen)	0.4±0.063	<AMD	6.27±1.47
Eau du robinet (Larbaa)	0.36±0.061	<AMD	<AMD
Eau du robinet (Blida)	<AMD	<AMD	3.71±1.45
Eau de puits (Koléa)	0.32±0.059	<AMD	5.38±1.46
Eau de puits (Beni Tamou)	0.55±0.064	<AMD	<AMD
Eau de puits (Oued El Alleug)	0.21±0.058	<AMD	3.61±1.45

**Activité du  $^{226}\text{Ra}$ :** L'activité du  $^{226}\text{Ra}$  dans les échantillons d'eau varie entre des valeurs en dessous de L'AMD jusqu'à des concentrations de 0.55±0.064 Bq/L

**Activité du  $^{232}\text{Th}$ :** L'activité du  $^{232}\text{Th}$  dans les échantillons d'eau est en dessous de l'activité minimale détectable.

**Activité du  $^{40}\text{K}$ :** L'activité du  $^{40}\text{K}$  dans les échantillons d'eau varie entre des valeurs en dessous de L'AMD jusqu'à des concentrations de à 6.27±1.47 Bq/L.

L'ensemble des doses résultant de l'ingestion de l'eau des différents échantillons pendant 1 année sont rassemblées dans le Tableau VII.15.

Tableau VII. 13: Les doses dues à l'ingestion du  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$

Echantillon	Dose due au radionucléide (mSv/an)			Dose totale annuelle (mSv/an)
	$^{226}\text{Ra}$	$^{232}\text{Th}$	$^{40}\text{K}$	
Eau du robinet (Koléa)	0.069	<AMD	0.021	0.09
Eau du robinet (Bab Ezzouar)	0.067	<AMD	0.015	0.082
Eau du robinet (Alger CRNA )	0.056	<AMD	<AMD	0.056
Eau du robinet (Chéraga)	0.019	<AMD	<AMD	0.019
Eau du robinet (Baba Hassen)	0.08	<AMD	0.023	0.103
Eau du robinet (Larbaa)	0.074	<AMD	<AMD	0.074
Eau du robinet (Blida)	0.067	<AMD	0.014	0.082
Eau de puits (Koléa)	0.065	<AMD	0.020	0.085
Eau de puits (Beni Tamou)	0.043	<AMD	<AMD	0.043
Eau de puits (Oued El Alleug)	0.114	<AMD	0.013	0.127

Nous pouvons constater que pour tous les échantillons d'eau analysés, la dose annuelle ne dépasse pas le seuil réglementaire de 0.15 mSv/an. On peut déduire que l'eau potable de toutes ces régions est saine et donc propres à la consommation à long terme d'un point de vue radiologique.

Par ailleurs, en comparant nos résultats avec ceux existant dans la littérature tels que [34], nous constatons qu'ils sont dans les mêmes ordres de grandeurs ce qui reconforte notre approche.

Les activités du  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et  $^{40}\text{K}$  présentées dans cette étude sont comparées avec celles de l'étude effectuée en Egypte présentée dans le tableau VII.16.

Tableau VII. 14: L'activité des radionucléides contenus dans l'échantillon de l'eau potable[34]

Sample No.	Activity concentration in BqL <sup>-1</sup>		
	<sup>226</sup> Ra	<sup>232</sup> Th	<sup>40</sup> K
Sa1	0.17±0.09	0.37±0.23	5.06±3.42
Sa2	0.31±0.12	0.13±0.07	4.19±2.33
Sa3	0.23±0.15	0.08±0.07	5.73±1.97
Sa4	0.14±0.11	0.07±0.05	5.42±2.50
Sa5	0.54±0.35	0.10±0.08	6.55±1.93
Sa6	0.29±0.16	0.50±0.28	8.72±4.32
Sa7	0.22±0.13	0.12±0.09	3.25±2.09
Sa8	0.13±0.06	0.12±0.06	3.51±1.09
Sa9	0.32±0.12	0.11±0.05	3.71±1.39
Sa10	0.13±0.10	0.07±0.03	7.21±2.32
Sa11	0.13±0.07	0.06±0.03	6.02±1.90
Sa12	0.10±0.04	0.08±0.06	4.43±2.36
Sa13	0.07±0.05	0.05±0.04	5.20±2.35
Sa14	0.09±0.02	0.07±0.03	7.07±4.06
Sa15	0.19±0.12	0.08±0.07	3.39±2.13
Average	0.20±0.11	0.13±0.08	5.29±2.41

Tableau VII. 15: La dose annuelle due à l'ingestion d'eau potable[34]

Sample code	<sup>226</sup> Ra			<sup>232</sup> Th			<sup>40</sup> K			Total doses		
	Infants	Children	adults	Infants	children	adults	Infants	children	adults	Infants	children	adults
Sa1	0.024	0.047	0.042	0.024	0.037	0.042	0.003	0.008	0.012	0.053	0.094	0.079
Sa2	0.045	0.087	0.014	0.008	0.013	0.014	0.003	0.007	0.010	0.057	0.108	0.069
Sa3	0.033	0.064	0.009	0.005	0.008	0.009	0.004	0.010	0.014	0.042	0.082	0.055
Sa4	0.020	0.039	0.008	0.004	0.007	0.008	0.004	0.009	0.013	0.028	0.055	0.041
Sa5	0.077	0.151	0.011	0.006	0.010	0.011	0.004	0.011	0.016	0.089	0.172	0.103
Sa6	0.041	0.081	0.057	0.033	0.050	0.057	0.006	0.015	0.021	0.082	0.147	0.119
Sa7	0.031	0.061	0.013	0.008	0.012	0.013	0.002	0.005	0.008	0.042	0.079	0.052
Sa8	0.018	0.036	0.013	0.008	0.012	0.013	0.002	0.006	0.008	0.029	0.054	0.040
Sa9	0.046	0.089	0.012	0.007	0.011	0.012	0.002	0.006	0.009	0.056	0.107	0.066
Sa10	0.018	0.036	0.008	0.004	0.007	0.008	0.005	0.012	0.018	0.028	0.056	0.044
Sa11	0.018	0.035	0.006	0.004	0.006	0.006	0.004	0.010	0.015	0.026	0.051	0.039
Sa12	0.014	0.028	0.009	0.005	0.008	0.009	0.003	0.007	0.011	0.023	0.043	0.034
Sa13	0.010	0.0196	0.005	0.003	0.005	0.005	0.003	0.009	0.013	0.017	0.033	0.028
Sa14	0.012	0.025	0.008	0.004	0.007	0.008	0.005	0.012	0.017	0.022	0.044	0.038
Sa15	0.027	0.053	0.009	0.005	0.008	0.009	0.002	0.005	0.008	0.035	0.067	0.044

L'activité du radium trouvée dans les eaux algériennes est supérieure à celle des eaux égyptiennes ce qui implique que la dose du radium est plus grande dans les eaux algériennes. Pour le potassium 40 les valeurs sont plus au moins identiques.

Par contre, l'activité du thorium est supérieure dans les eaux égyptiennes comparativement à celle des eaux algériennes.

Par conséquent, la dose annuelle totale pour les adultes est la même dans les deux pays (Tableau VII.17).

## Conclusion générale

L'objectif de ce travail était d'évaluer le taux de la radioactivité dans l'eau potable. Ce travail s'inscrit dans le cadre de la dosimétrie interne.

Dans la première partie de ce manuscrit, nous avons présenté les notions de la radioprotection et les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme, pour ainsi justifier la nécessité d'établir une réglementation qui protège le consommateur du risque radiologique.

La deuxième partie traite de la réglementation internationale et nationale, la présentation de cette dernière nous a permis de suggérer quelques modifications au niveau des unités et pouvoir aussi recommander des normes propres au consommateur algérien, en prenant en compte les besoins qui peuvent varier en fonction du climat et des régions. Ensuite nous avons mis en lumière, l'origine de la radioactivité dans l'eau potable.

Les trois parties suivantes abordent les techniques de mesure de la radioactivité, en premier lieu la mesure de la radioactivité alpha-bêta total qui permet d'évaluer la qualité radiologique de l'eau rapidement et de manière quantitative avant de solliciter les techniques spécifiques qui peuvent être coûteuses dans le cas où il y a dépassement des limites établies par la réglementation, pour pouvoir porter un jugement final sur la qualité radiologique de l'eau. En second lieu, la technique de la scintillation liquide que nous avons appliquée pour déterminer l'activité en tritium mais qui est aussi efficace pour la détermination des émetteurs bêtas en général ; et en dernier, nous avons abordé une technique de caractère spécifique qui est la spectrométrie gamma, une méthode à la fois qualitative et quantitative, ne nécessitant presque aucune préparation préalable des échantillons à mesurer.

Les résultats obtenus suite à cette étude montrent que les activités alpha/bêta totale et celle du tritium se situent bien en deçà des seuils établis par la réglementation nationale ; ce résultat a été confirmé par la spectrométrie gamma où nous avons trouvé que la dose annuelle due aux radionucléides n'excède pas la limite préconisée par la réglementation algérienne.

## Bibliographie

- [1] Léocadie ODOULAMI. *La problématique de l'eau potable et la santé humaine dans la ville de Cotonou (République du Bénin)*. PhD thesis, Ecole Doctorale Pluridisciplinaire <Espace, Société et Développement >, décembre 2009.
- [2] Morgan Mozas & Alexis Ghosn Chefs de projet d'Ipemed, *État des lieux du secteur de l'eau en Algérie*, Octobre 2013
- [3] Michael F.L'Annunziata. *RADIOACTIVITY INTRODUCTION AND HISTORY*. Elsevier, 2007.
- [4] Christian Ngô Claude Le Sech. *PHYSIQUE NUCLÉAIRE Des quarks aux applications*. Dunod, Paris, 2010.
- [5] Fabien COURTINE. *Etalonnage d'un spectromètre gamma en vue de la mesure de la radioactivité naturelle. Mesures expérimentales et modélisation par techniques de Monte-Carlo*. PhD thesis, Université Blaise Pascal U.F.R. de Recherche Scientifique et Technique, mars 2007.
- [6] CRNS *Guide de radioprotection*, septembre 2007.
- [7] PUBLICATION 103 DE LA CIPR **Recommandations 2007 de la Commission internationale de protection radiologique**, Édition en langue française par Jean-Claude Nénot assisté de Jean Brenot, Dominique Laurier, Alain Rannou et Dominique Thierry.
- [8] Nabih ZERKI. *APPORT DE LA CHIMIOMETRIE POUR L'ANALYSE ET L'INTERPRETATION DE QUELQUES PARAMETRES PHYSICOCHEMISQUES INFLUENÇANT LA REPARTITION DES METAUX LOURDS, DES ELEMENTS NUTRITIFS ET DES ANIONS DANS LES EAUX DE L'OUED DE BOUREGREG*. PhD thesis, UNIVERSITE MOHAMMED V - AGDAL, 07/05/2013.
- [9] Ahmed Abdel Sattar. *Algeria water sector me rapid assessment report*, March, 2014.
- [10] Guidelines for third edition volume 1 **recommendations world health organization 2004 drinking-water quality**. Technical Report, WORLD HEALTH ORGANIZATION, 2004.
- [11] dwi. *GUIDANCE ON IMPLEMENTATION OF THE WATER SUPPLY (WATER QUALITY) REGULATIONS in ENGLAND*, 2000.
- [12] *Eau minérale et radioactivité*. Technical report, DIVISION NATIONALE DES EAUX BUREAU DE RECHERCHES, MINÉRALES ET THERMALES GÉOLOGIQUES ET MINIÈRES, Juillet 2000.
- [13] **Guidelines for drinking-water quality**, 2011.

- [14] Henri DAVEZAC Jeanne LOYEN Delphine CAAMAÑO, Raphaël TRACOL. **La qualité radiologique de l'eau du robinet en France**. Technical report, Autorité de sûreté nucléaire (ASN), Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire, février 2011.
- [15] EPA. 40 cfr parts 9, 141, and 142 **national primary drinking water regulations; radionuclides; final rule**. Technical report, Environmental Protection Agency., 2000.
- [16] JOURNAL OFFICIEL DE LA REPUBLIQUE ALGERIENNE N° 18, 18 Rabie Ethani 1432 23 mars 2011.
- [17] Journal officiel. Journal officiel n° 13 de la République Algérienne Démocratique et Populaire du 9 mars 2014.
- [18] Jean Peyré. **Détecteurs gazeux**. Technical report, Centre de Sciences Nucléaires et de Sciences de la Matière (CSNSM) Université Paris Sud -CNRS-IN2P3, 2015.
- [19] Glenn F. Knoll. ***Radiation Detection and Measurement***. John Wiley Sons, 2010.
- [20] GE. Powers A.M.Huffert E.W. Abelquistl, W.S. Brownz. ***Minimum detectable concentrations with typical radiation survey instruments for various contaminants and field conditions***. Technical report, Division of Regulatory Applications Office of Nuclear Regulatory Research U.S. Nuclear Regulatory Commission Washington, DC 20555-0001, December 1997.
- [21] Ph.D. Michael J.Kessler. **Liquid scintillation analysis**. Technical report, PerkinElmer, 2015.
- [22] ***Liquid Scintillation counting of H-3 and C-14***, EvgenyTaskaev Eckert and Ziegler Analytics, June 28-30, 2010.
- [23] National Diagnostics Laboratory Staff. **Principles and applications of liquid scintillation counting a primer for orientation**. **Diagnostics**, 2004.
- [24] K. ROZANSKI , M. GRÖNING **QUANTIFYING UNCERTAINTIES OF TRITIUM ASSAY IN WATER SAMPLES ELECTROLYTIC ENRICHMENT AND LIQUID SCINTILLATION SPECTROMETRY**. International Atomic Energy Agency, A-1400 Vienna, Austria.
- [25] Mulic M. Mujezinovic A. Grgic Z. Bajic .I Nuhanovic, M.\*. **Determination of gross alpha and beta activity and uranium isotope content in commercially available, bottled, natural spring waters**, 2015.
- [26] DEPRM HCHD. ***Radionuclides & Your Well Water: A Homeowners Guide***, Bureau of Environmental Health Howard County Health Department in Coordination and Consultation with the Maryland Department of the Environment and Baltimore County Department of Environmental Protection and Resource Management, September 2005.

- [27] S.K. Sahu, Sukanta Maity, R.C. Bhangare and G.G. Pandit D.N. Sharma, **DETERMINATION OF URANIUM IN GROUND WATER USING DIFFERENT ANALYTICAL TECHNIQUES**. BHABHA ATOMIC RESEARCH CENTRE MUMBAI, INDIA 2014.
- [28] Benoît Pirard. *Etude et validation d'un spectromètre gamma pour la mesure de la composition chimique des surfaces planétaires Application à une mission vers Mercure*. PhD thesis, Université Toulouse III - Paul Sabatier UFR Physique, Chimie, Automatique, le 18 décembre 2006.
- [29] M. Mehade Hasan<sup>1</sup>, M. I. Ali, D. Paul, M. A. Haydar, S. M. A. Islam  
**Natural Radioactivity and Assessment of Associated Radiation Hazards in Soil and Water Samples Collected from in and around of the Barapukuria 2×125 MW Coal Fired Thermal Power Plant, Dinajpur, Bangladesh**, Journal of Nuclear and Particle Physics 2014, 4(1): 17-24.
- [30] EPA. **Final draft for the drinking water criteria document on radium**. US Environmental Protection Agency, Washington, 1999.
- [31] I. Lopes, M. J. Madruga, G. O. Ferrador, M. M. Sequeira, E. J. Oliveira, A. R. Gomes, F. D. Rodrigues, F. P. Carvalho **MONITORING OF GROSS ALPHA, GROSS BETA AND TRITIUM ACTIVITIES IN PORTUGUESE DRINKING WATERS**, article, Nuclear and Technological Institute/Dep. of Radiological, 2010.
- [32] Orhan ACAR , Orhan Murat KALFA, Ozcan YALC INKAYA, Ali Rehber TURKER **Determination and evaluation of gross alpha and beta activity concentrations and metal levels in thermal waters from Ankara, Turkey**, Research Article , 2013.
- [33] **standards and Guidelines for Tritium in Drinking Water** Part of the Tritium Studies Project INFO-0766 Canada's Nuclear Regulator January 2008.
- [34] Hany El-Gamal and Abdallah Ibrahim Abd El-Mageed **Natural Radioactivity in Water Samples from Assiut City, Egypt**, *Research Paper*, (2014).
- [35] Commissariat à l'Energie Atomique (CEA)- **Commission d'Etablissement des Méthodes d'Analyse** - Septembre 2004.

