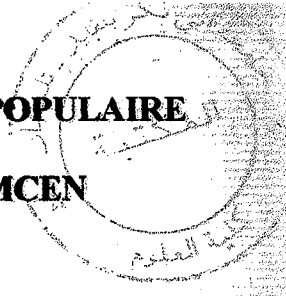


M/547-77/01



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCEM

Faculté des Sciences  
Département de Chimie

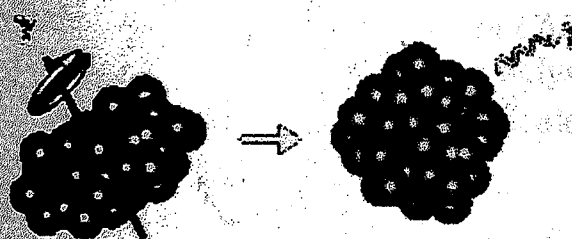
Laboratoire de recherche spectrochimie et pharmacologie structurale  
(S.P.S)

# Mémoire

Post-Graduation de *Magister en Chimie*  
Spectrochimie et Méthodes d'Analyse

## Thème

**Etude de l'impact des rayonnements isotopiques sur l'environnement**



Présenté par : M<sup>me</sup> BELARBI NADIA

Soutenu en Septembre 2007

**Commission du jury**

**Président**

**M. SAL MEKELLECHE**

Professeur

Université UABB Tlemcen

**Examinateurs**

**M. HA. BENAMAR**

Maître de Conférences

Université de Blida

**M. EL BELAMRI**

Chargé de Recherche

CRN Alger

**Encadrement**

**M. A. KADUM** Co-encadreur

M. C.

Université UABB Tlemcen

**M. R. BARRIANI** Encadreur

M. C.

Université UABB Tlemcen

2728  
03 NOV. 2007

# DEDICACES

A mes très chers parents

Pour leur soutien inconditionnel, Leur sacrifices, leur tendresses, leurs amours infinies,.....

Je souhaite trouveront en ce modeste travail le témoignage de ma reconnaissance et tous mes affections.

A mon frère,

Je lui souhaite tout le bonheur durant sa vie.

A mes chers sœurs,

Que dieu me les gardes

A MOHAMED ANNES et MARWA NORHANE

A toute ma famille et tous mes amis (es).

A tous ceux qui me sont chers.

Je tiens à témoigner mes vifs remerciements à Monsieur M.A. Bennamar, maître de conférence à l'université de Blida, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de juger ce travail, ainsi que pour l'aide qu'il nous a apporté.

J'exprime ma sincère et profonde gratitude à madame F. Hadji chargé de cours à l'université de Tlemcen pour sa sympathie, son encouragement, mais aussi pour ses conseils et ses qualités humaines.

Je remercie également Chafika et O.Leila ainsi que tout l'ensemble du personnel du C.R.N.A pour l'aide qu'il m'a été offert de leur part.

Je ne saurais oublier tous mes collègues du laboratoire de spectrochimie, qui m'ont toujours témoigné sympathie et gentillesse ainsi que tous mes camarades de post -graduation, que tous veuillent bien trouver ici, l'expression de ma reconnaissance et de mon amitié.

Que tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation et à l'élaboration de ce mémoire puissent trouver ici l'expression de toute ma reconnaissance.

## INTRODUCTION

C'est seulement au cours des dernières années, que l'opinion publique a commencé à manifester de très vives préoccupations pour l'environnement concernant les effets des rayonnements ionisants, qui sont dus à l'existence de substances radioactives dans l'environnement dont les populations humaine, animale et végétale vivent [1].

Le fait est malgré tout, que les substances radioactives naturelles existaient déjà au commencement de l'univers et que depuis lors, elles n'ont cessé de se trouver dans la nature [2,1]. Il faut aussi prendre conscience des émissions croissantes dans l'environnement de radionucléides provenant d'activités humaines comme l'industrie nucléaire, les essais d'armes nucléaires à grande échelle et notamment les accidents tel que ceux de three mile Island et de Tchernobyl [ 3 ].

Pour l'évaluation de la radioactivité dans l'environnement, il convient toujours de garder à l'esprit que la vie sur terre a été, de manière régulière et permanente, soumise à l'influence des rayonnements ionisants provenant de radionucléides naturels. Mais, quelque soit leur origine, les effets de ces rayonnements sont identique sur l'environnement [4,5]. C'est ce qui a poussé les chercheurs à étudier les différentes voies de transfert de la radioactivité et son comportement dans les divers compartiments de l'environnement pour se protéger.

A l'initiative du Laboratoire de Recherche de Spectrochimie et Pharmacologie Structurale, un programme destiné à mieux connaître la radioactivité naturelle dans notre environnement a été élaboré. Notre étude de l'impact des rayonnements sur l'environnement n'est qu'une partie de cet ensemble.

Nous avons effectué une étude de la radioactivité des échantillons de l'environnement après leurs prélèvement dans quelques milieux naturels et industriels par la technique de spectrométrie gamma qui s'avère la plus performante pour effectuer des mesures environnementaux, à l'aide de détecteurs NaI (TI) de dimensions 2 x 2 et 3 x 3 et Ge (Hp) et qui a pour objectifs:



## SOMMAIRE:

INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE I: <b>La Radioactivité</b> .....	4
I.1 Noyau atomique et radioactivité.....	5
I.1.1: Définition de la radioactivité.....	6
I.1.2: Processus de désintégration radioactive.....	6
I.1.2.1: Désintégration alpha.....	6
I.1.2.2: Désintégration bêta.....	7
a- l'émission de négatron ( $\beta^-$ ):.....	7
b- l'émission de positron ( $\beta^+$ ):.....	8
c- La capture d'un électron:.....	9
I.1.2.3: Emission de rayonnements gamma.....	10
I.1.3: Schéma de désintégration.....	11
I.1.4 Loi de la désintégration radioactive.....	11
I.1.5: Unités radiologiques.....	13
a- l'activité.....	13
b- L'activité spécifique.....	13
c- La dose absorbée (D).....	14
d- La dose équivalente (H).....	14
e- Facteur de qualité (FQ).....	15
f- Débit de dose.....	15
I.2: Origines de la radioactivité dans l'environnement.....	15
I.2.1: Radioactivité naturelle.....	16
I.2.1.1: Radionucléides d'origine terrestre (ou primordiaux).....	16

• Les séries (ou famille) radioactives:.....	18
a) La série de l'uranium 238.....	18
b) La série de l'uranium 235.....	20
c) La série du thorium 232.....	21
d) La série du neptunium.....	22
<b>I.2.1.2: Radionucléides d'origine cosmique.....</b>	<b>22</b>
<b>I.2.2: Radioactivité artificielle .....</b>	<b>26</b>
<b>I.2.2.1: Essais nucléaires.....</b>	<b>27</b>
<b>I.2.2.2: Accidents nucléaires.....</b>	<b>28</b>
<b>I.2.2.2.1: Accident de Windscale.....</b>	<b>28</b>
<b>I.2.2.2.2: Accident de Three Mile Island .....</b>	<b>29</b>
<b>I.2.2.2.3: Accident de Tchernobyl.....</b>	<b>29</b>
<b>I.2.2.2.4: Installations nucléaires.....</b>	<b>31</b>
<b>I.2.2.2.5: Sources de la radioactivité liées aux activités industrielles.....</b>	<b>31</b>
<b>I.3: Comportement des radionucléides dans l'environnement.....</b>	<b>31</b>
<b>I.4: Principales voies de contamination.....</b>	<b>32</b>
<b>I.4.1: Contamination a partir de l'air.....</b>	<b>32</b>
<b>I.4.2: Contamination à partir de l'eau.....</b>	<b>32</b>
<b>I.4.3: Contamination à partir du sol.....</b>	<b>33</b>
<b>I.5: Effet des rayonnements ionisant sur l'environnement.....</b>	<b>33</b>
<b>I.5.1: Effets sur les espèces non humains.....</b>	<b>33</b>
<b>I.5.1.1: plantes:.....</b>	<b>33</b>
<b>I.5.1.2: Animaux.....</b>	<b>34</b>
<b>I.5.1.3: Microbes:.....</b>	<b>34</b>
<b>I.5.2: Effets sur les être humains:.....</b>	<b>35</b>

I.5.2.1:- Effets déterministes (ou non stochastique).....	35
I.5.2.2: Les effets stochastiques (ou tardifs):.....	36
<b>CHAPITRE II: Interaction Des Rayons Gamma Avec La Matière.....</b>	<b>37</b>
<b>II.1: Processus d'interaction des rayons gamma avec la matière.....</b>	<b>38</b>
II.1.1: Effet photoélectrique.....	38
II.1.2: l'effet Compton.....	39
II.1.3: Effet de création de paires (ou effet de matérialisation).....	43
<b>II.2: Domaine de prédominance des différents effets.....</b>	<b>43</b>
<b>II.3: Loi d'atténuation des photons.....</b>	<b>44</b>
<b>II.3.1: Sections efficaces d'interactions.....</b>	<b>44</b>
• Le processus photoélectrique:.....	44
• Processus Compton.....	45
• Processus de matérialisation.....	46
<b>II.3.2: Coefficient d'atténuation.....</b>	<b>47</b>
<b>CHAPITRE III: Mesure De la Radioactivité par Spectrométrie Gamma.....</b>	<b>51</b>
<b>III.1: Technique de spectrométrie gamma.....</b>	<b>52</b>
<b>III.1.1: Les détecteurs utilisés en spectrométrie gamma.....</b>	<b>53</b>
• Propriétés d'un détecteur.....	53
a- La résolution en énergie:.....	53
b- L'efficacité (ou rendement de détection).....	54
c- Le temps mort.....	54
<b>III.1.1.1: Les détecteurs à semi-conducteur.....</b>	<b>55</b>
<b>III.1.1.2: Les détecteurs à scintillations:.....</b>	<b>57</b>
a -Le scintillateur: .....	57

b- Le photomultiplicateur.....	59
III.1.2: L'électronique de détection et d'acquisition.....	60
• Le préamplificateur.....	61
• L'amplificateur.....	62
• Convertisseur analogique digital ou codeur.....	62
• L'unité de traitement.....	63
III.1.3: Le bruit.....	63
III.1.3.1: sources du bruit.....	63
CHAPITRE IV: Partie expérimentale.....	65
IV.1: Choix des radioéléments à identifier.....	66
IV.2: Echantillons étudiés.....	67
a-Prélèvements.....	67
b- Identification des échantillons.....	67
IV.3: Préparation des échantillons.....	68
IV.4: Description et fonctionnement des chaînes de mesure utilisés.....	68
IV.4.1: Chaîne Ge (Hp).....	68
IV.4.1.1: Structure du blindage.....	69
IV.4.1.2: Caractéristiques du détecteur Ge (Hp)...	69
IV.4.1.3: Calibration en énergie de la chaîne de mesure.....	70
IV.4.2: Chaîne NaI (TI).....	73
IV.4.2.1: Utilisation d'un scintillateur NaI (TI) 3×3.....	74
IV.4.2.1.1: Description du détecteur.....	74
IV.4.2.1.2: Calibration en énergie de la chaîne de mesure.....	74
IV.4.2.2: Utilisation d'un scintillateur NaI (TI) 2×2.....	76
IV.4.2.2.1: Blindage de plomb.....	76

IV.4.2.2.2: Spécification du détecteur.....	77
IV.4.2.2.3: Calibration en énergie de la chaîne de mesure.....	77
IV.5: Mesure du bruit de fond.....	78
IV.6: Etude des échantillons.....	79
IV.7: Méthode de quantification.....	79
<b>CHAPITRE V: Présentation Et Interprétation Des Résultats.....</b>	<b>81</b>
V.1: Présentation des résultats.....	82
V.1.1 : Résultats obtenus avec le scintillateur NaI (Tl) 3 inch.....	83
V.1.1.1: bruit de fond.....	83
V.1.1.2: Echantillon bentonite.....	85
V.1.1.3: Echantillon calcaire.....	87
V.1.1.4: Echantillon ciment.....	89
V.1.1.5: Echantillon clinker.....	91
V.1.2: Résultats obtenus avec le scintillateur NaI (Tl) 2 inch.....	93
V.1.2.1 Bruit de fond.....	93
V.1.2.2 Echantillon bentonite.....	95
V.1.2.3 Echantillon calcaire.....	97
V.1.2.4 Echantillon ciment.....	99
V.1.2.5 Echantillon clinker.....	101
V.1.3 : Résultats obtenus avec le semi-conducteur Ge (Hp).....	103
• échantillon bentonite.....	103
V.1.4: Comparaison entre les comptages nets du $^{40}\text{K}$ , $^{232}\text{Th}$ et d' $^{238}\text{U}$ dans les échantillons analysés par le scintillateur 3×3 :.....	106
V.2 : Discussion des résultats.....	109
<b>CONCLUSION:.....</b>	<b>114</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES:.....</b>	<b>117</b>

# INTRODUCTION

# CHAPITRE: 1 LA RADIOACTIVITE



**RADIOACTIVITE**

En décembre 1895, le physicien Allemand Wilhelm Conrad Roentgen découvre les rayons x. Après une conférence à l'académie des sciences, où les hypothèses de Roentgen sont énoncées, Becquerel, spécialiste de la fluorescence s'efforce de les vérifier. Il expose une plaque photographique à des sels d'uranium et découvre que celui-ci émet spontanément un rayonnement pénétrant. Il présente sa découverte à l'académie des sciences le 2 Mars 1896. Ceci ouvre un nouveau champ pour les scientifiques à l'étude des substances radioactives et les rayonnements qu'ils émettent.

En 1898, Marie et Pierre Curie parviennent à extraire de plusieurs tonnes de minerai d'uranium, deux corps fortement radioactifs naturels: le polonium ( ${}_{84}\text{Po}$ ) et le radium ( ${}_{88}\text{Ra}$ ). Le radium acquiert rapidement une grande notoriété et trouve de multiples usages. Ainsi, ses qualités phosphorescentes seront mises à profit dans l'industrie horlogère pour rendre les cadrans et chiffres lumineux. L'uranium a, quant à lui, été utilisé pour donner la coloration du verre, des poteries, des faïences, des carrelages, etc... [6].

Pendant les années 1934, Irène et Frédéric Joliot-Curie synthétisèrent les premiers éléments radioactifs artificiels en bombardant le bore ( ${}_{5}\text{B}$ ) et l'aluminium ( ${}_{13}\text{Al}$ ) avec des particules, pour former des isotopes radioactifs de l'azote ( ${}_{7}\text{N}$ ) et du phosphore ( ${}_{15}\text{P}$ ) [7].

La découverte de cette radioactivité artificielle a permis d'obtenir des isotopes radioactifs de tous les éléments et ainsi d'ouvrir un immense domaine à l'analyse par les isotopes.

**I.1 Noyau atomique et radioactivité**

Un noyau se caractérise par son numéro atomique  $Z$  ainsi que par son nombre de masse  $A$ .  $Z$  représente le nombre de proton et  $A$  le nombre total de nucléons, de sorte que le nombre de neutron  $N$  est égal à  $A-Z$ .  $Z$  donne le nombre de charges et

donc permet d'identifier l'atome correspondant. La notation standard des noyaux est illustrée par  ${}^A_Z X_N$  [8].

Les espèces nucléaires, ayant le même numéro atomique mais des nombres de neutrons différents sont appelées isotopes.

Les isotopes radioactifs subissent une désintégration spontanée, qui aboutit finalement à la formation d'isotopes stables, à l'opposé, les isotopes stables sont ceux pour lesquels ce phénomène n'a jamais été observé [2].

### I.1.1: Définition de la radioactivité

La radioactivité est un processus par lequel certains nucléides subissent une désintégration spontanée, aboutissant généralement à la formation de nouveaux nucléides, appelés pour cette raison radionucléides ou radio-isotopes [9,2].

Sur près de 2000 nucléides connus, seulement 250 sont stables, le reste est instable [10], c'est-à-dire radioactif. Ils sont instables à cause de l'excès de nucléons (protons et neutrons) qui constituent le noyau [9,11].

La radioactivité est en fait une recherche spontanée de la stabilité nucléaire, elle s'accompagne de l'émission de rayonnement particulaire alpha ou bêta et de rayonnement électromagnétique gamma [2,11].

### I.1.2: Processus de désintégration radioactive

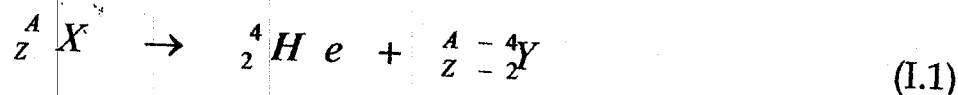
#### I.1.2.1: Désintégration alpha

Ce type d'émission, le premier historiquement mis en évidence, intéresse surtout les noyaux lourds, ceux dont le nombre de nucléons sont supérieurs à 200.

On rencontre donc la majorité des émetteurs  $\alpha$  parmi les éléments de numéro atomique  $Z$  compris entre  $82 < Z < 92$  [12].

Les particules alpha sont des noyaux d'hélium  ${}^4_2\text{He}$  composés de 2 neutrons et 2 protons, elles sont donc chargées positivement (+2) [13].

La réaction de désintégration s'écrit:



Tel que:

X: représente le symbole chimique du noyau père (càd celui qui subit la désintégration)

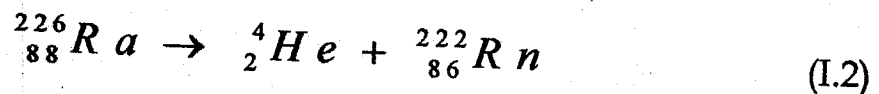
Y: représente le symbole chimique du noyau fils (càd celui formé après la désintégration).

Le noyau fils contient deux protons et deux neutrons de moins que le noyau de départ, Ainsi le numéro atomique est réduit de 2 unités et le nombre de masse de quatre, et il peut être stable ou radioactif (possibilité de filiations successives, comme c'est le cas pour les familles radioactives naturelle).

Les particules alpha sont émises avec de très grande énergie (entre 2 et 11 Mev), spécifiques du radionucléide émetteur, et le spectre de l'énergie de ces particules est un spectre de raies [2].

En traversant la matière (air, eau, solide, tissu vivant...) ces particules restitue leur énergie en provoquant une ionisation fortes. Leur trajet dans la matière est relativement court, ils sont peut pénétrant: 3.5 cm dans l'air, 0.03mm dans les tissus [14], avec une vitesse relativement faible ne dépassant pas 20000 km/s. ils sont arrêtées par une mince feuille de papier [15] (figure I.1).

Exemple:



Les particules alpha émises lors d'une désintégration sont monoénergétiques [14], elles constituent un risque de radiation externe et interne.

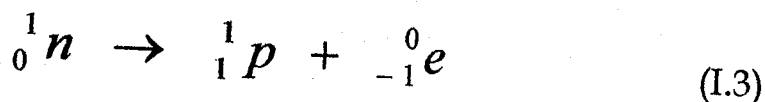
### I.1.2.2: Désintégration bêta

Cette émission se caractérise par une modification de la nature d'un nucléon. Elle a lieu lorsque le noyau présente un excès de proton ou de neutrons.

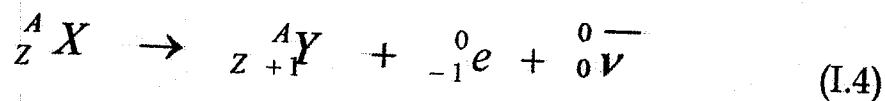
Il existe trois types de désintégration bêta: l'émission de négatron ( $\beta^-$ ), l'émission de positron ( $\beta^+$ ) et la capture d'électron [2].

a- l'émission de négatron ( $\beta^-$ ):

Ce type d'émission correspond à l'expulsion d'un électron d'un noyau qui possède un excès de neutrons par rapport au nombre de protons, il s'interprète comme la transformation d'un neutron du noyau en un proton, avec en plus émission d'un antineutrino ( $\bar{\nu}$ ) (particule non chargée de masse extrêmement faible) [2].

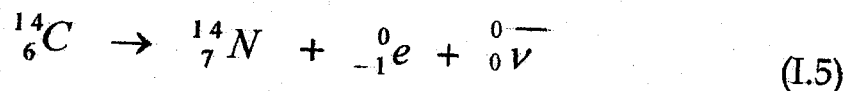


L'équation de cette émission s'écrit



Lors de cette émission, le nombre de masse du noyau demeure constant mais le nombre de charge Z augmente d'une unité.

Exemple:



L'émission  $\beta^-$  n'est pas mono énergétique comme l'émission  $\alpha$ . il y a deux particules: la particule  $\beta^-$  et l'antineutrino qui se partagent de façon aléatoire l'énergie émise lors de la réaction. Il possède un spectre continu s'étendant depuis la valeur 0, quand l'antineutrino emporte toute l'énergie de la réaction, jusqu'à une valeur maximale  $E_{max}$  quand l'antineutrino n'emporte aucune énergie [16].

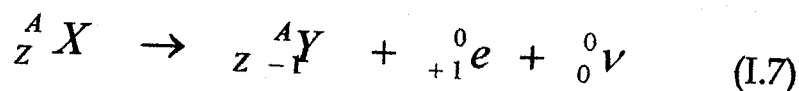
b- l'émission de positron ( $\beta^+$ ):

L'émission  $\beta^+$  concerne les noyaux présentant un excédent de protons [17,16].

Un des protons au sein du noyau se transforme en un neutron [2], avec en plus émission d'un neutrino [17].

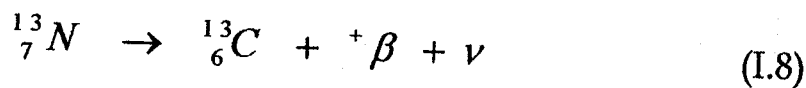


L'équation de la désintégration  $\beta^+$  s'écrit:



Le noyau garde le même nombre de nucléons mais le numéro atomique se réduit d'une unité.

Exemple:



Comme dans le cas de l'émission  $\beta^-$ , on a toujours deux particules qui se partagent de façon aléatoire l'énergie libérée au cours de la réaction: une antiparticule et une particule.

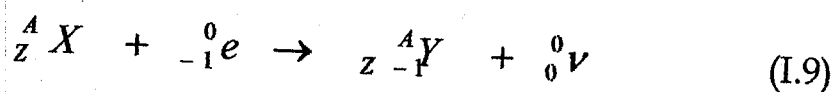
On a donc également un spectre continu en ce qui concerne la distribution de l'énergie des positons.

Cependant la durée de vie des positons est très courte, et lorsqu'un positon rencontre un électron, il se produit le phénomène d'annihilation, avec disparition de la masse des deux particules, et production de deux photons de 511 keV (émis à  $180^\circ$  l'un de l'autre) [16].

Les ( $\beta$ ) sont plus légères et moins énergétiques que les particules  $\alpha$  (entre 0.02 à 3 Mev) [15]. Ils peuvent avoir une vitesse élevée, voisine de celle de la lumière, leur pouvoir ionisant est plus faible que celui des particules  $\alpha$  mais ils sont beaucoup plus pénétrant [16]. Ils sont arrêtés par une feuille d'aluminium [15] (figure I.1).

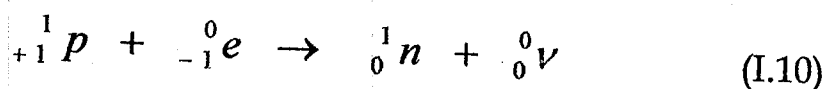
### C - La capture d'un électron:

Survenant, comme la transformation  $\beta^+$ , pour des noyaux présentant un excès de protons. La capture électronique consiste non plus en l'émission d'un corpuscule mais en l'intégration au noyau de l'un des électrons périphériques, en général l'un des deux électrons de la couche K [16].



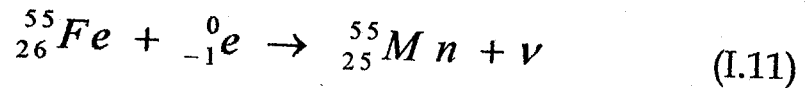
Le numéro atomique diminue d'une unité tandis que le nombre de masse reste constant ( ${}_Z^A Y$ ).

A l'intérieur du noyau, la capture de l'électron conduit à la transformation d'un proton en neutron.



Ce pendant, La vacance créée par la capture de l'électron dans la couche K conduit à un réarrangement de tout le cortège électronique, qui se traduit par l'émission de rayonnements X [16].

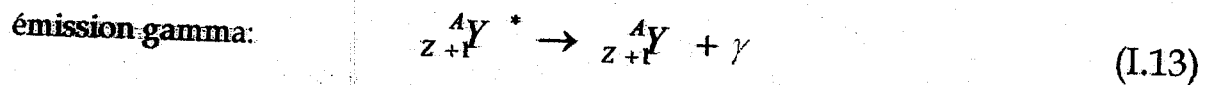
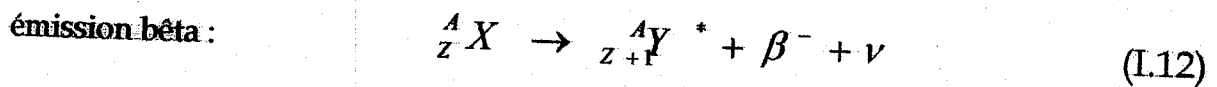
Exemple:



### I.1.2.3: Emission de rayonnements gamma

Le rayonnement gamma est un rayonnement électromagnétique de même nature que la lumière ou les rayons X mais plus énergétique. Il suit souvent une désintégration alpha ou bêta, ou encore la capture électronique [2].

Cette émission peut être exprimé par les réactions suivantes:



\*: représente l'état excité.

En général lorsqu'un noyau est formé lors d'une désintégration  $\alpha$  ou  $\beta$ , il n'atteint pas immédiatement son état fondamental: il se trouve dans un état excité [11]. Le passage de l'état excité à l'état fondamental (désexcitation) libère un photon  $\gamma$  ou une cascade de photons. Ce rayonnement se présente sous forme d'ondes électromagnétiques de longueur d'onde  $\lambda$  comprise entre  $10^{-10}$  et  $10^{-12}$  m et d'énergie:

$$E = h\nu$$

Où

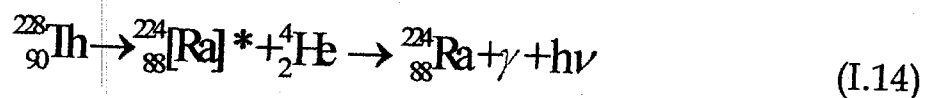
$h$ : est la constante de planck.

$\nu$ : est la fréquence du photon.

Les rayons gamma ont une énergie environ  $10^5$  fois plus forte que la lumière visible et sont très pénétrants, il ne peut être atténué ou arrêté que par des épaisseurs significatives de plomb ou de béton [15] (figure I.1).

La composition du noyau en nucléons n'est pas modifiée par la deseexcitation.

Exemple:



Les émissions de rayonnements gamma ont des niveaux d'énergie bien définis, en effet un noyau peut émettre plusieurs rayonnements gamma, mais chacun de ces derniers est caractérisé par sa propre énergie. Par conséquent chaque noyau a un spectre caractéristique qui peut être utilisé pour l'identification de ce noyau [18].

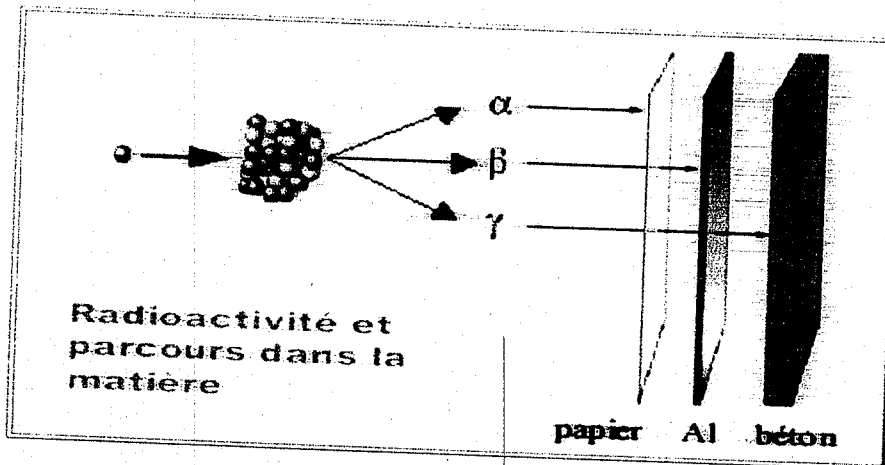


Figure I.1 pouvoir de pénétration des rayonnements

I.1.3: Schéma de désintégration

Un noyau  ${}^A_ZX$  peut le plus souvent suivre plusieurs voies de transformation qui entrent en compétition et aboutissent au même noyau stable  ${}^A_{Z\pm Y}$  dans son état fondamental. Ces différentes Voies, qui n'ont pas toutes la même probabilité, peuvent être représentées sur un schéma appelé schéma de désintégration [19].

A titre d'exemple, nous représentons ci-après le schéma de désintégration simplifié du potassium 40:

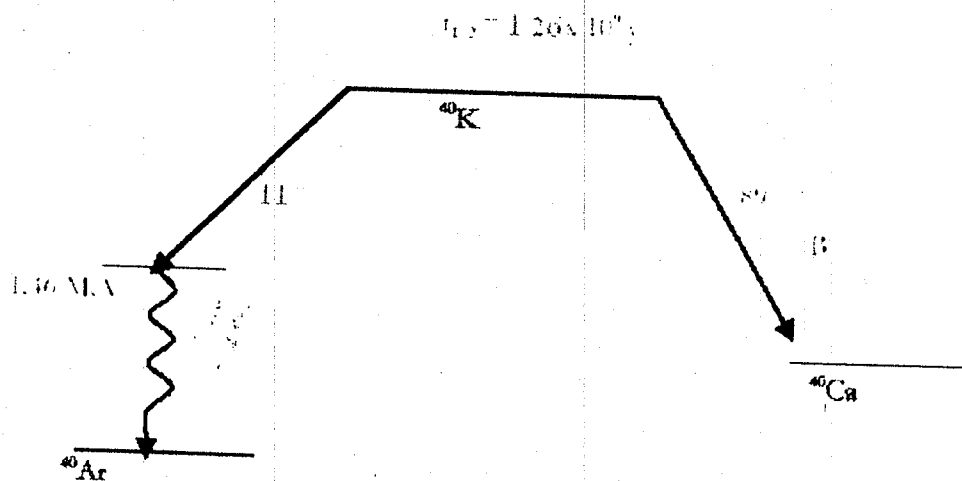


Figure I.2: Schéma de désintégration du  ${}^{40}\text{K}$  [20].



Le potassium 40 possède la particularité de se désintégrer en deux noyaux différents [20]:

- dans 89 % des cas en calcium 40 par désintégration bêta moins ;
- dans 11 % des cas en argon 40 par capture électronique suivie d'un rayonnement gamma de 1,46 MeV.

#### I.1.4: Loi de la désintégration radioactive

Le phénomène de désintégration radioactive est un phénomène aléatoire [8]. Ceci signifie que si l'on considère un noyau radioactif donné, il est impossible de prédire à quel instant la désintégration va se produire [2]. Il ne dépend ni de la température, ni des combinaisons chimiques dans lesquelles les atomes radioactifs sont engagés [11].

En revanche, en présence d'une source radioactive comportant un très grand nombre de noyaux, il est statistiquement établi avec une grande précision combien de noyaux vont se désintégrer au cours d'un intervalle de temps donné.

La loi de décroissance exprime ainsi la variation du nombre, en fonction du temps,  $N(t)$  d'atomes radioactifs contenus dans une préparation qui renferme initialement, au temps  $t = 0$ ,  $N_0$  atomes.

Sous une forme différentielle, on peut écrire que le nombre d'atomes  $dn$ , qui se désintègrent au cours d'un temps  $dt$  s'exprime ainsi:

$$\boxed{dN = -\lambda \cdot N \cdot dt} \quad (I.15)$$

Avec un coefficient  $\lambda$  qui s'appelle « constante radioactive » exprimé en (temps)<sup>-1</sup> et un signe (-) qui traduit le fait qu'il s'agit d'une décroissance (fonction à dérivée négative) [8].

Cette relation signifie simplement que le nombre de désintégrations qui se produisent à un instant donné est proportionnel au nombre d'atomes  $N(t)$  encore radioactifs à cet instant. Comme ce nombre décroît au cours du temps, l'« activité » de la source, définie comme le nombre de désintégrations par unité de temps ( $dN/dt$ ), décroît parallèlement à  $N(t)$ .

L'intégration de cette équation différentielle du premier ordre à coefficients constants conduit très simplement à la loi de variation de  $N(t)$  [14,9]:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} \quad (I.16)$$

La constante de désintégration  $\lambda$  est liée à la demi-vie (ou période) par la relation suivante:

$$T_{1/2} = \frac{\log 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (I.17)$$

Tel que:

$T_{1/2}$  (période ou demi-vie): est le temps écoulé pour que la moitié des noyaux initialement présents se soient désintégrés [2].

L'activité  $A$  d'une substance radioactive se définit comme le rapport [10,2]:

$$A = -dN/dt = \lambda.N \quad (I.18)$$

et représente le nombre de désintégrations par unité de temps.

De même, on peut écrire que l'activité d'une source diminue au cours du temps de la même manière que le nombre de noyaux radioactifs:

$$A = A_0.e^{-\lambda t} \quad (I.19)$$

### 1.1.5: Unités radiologiques

#### a- Activité:

L'activité  $A$  d'un radioélément est, par définition égale à sa vitesse de désintégration [2].

L'unité d'activité en système international (SI) est le Becquerel (Bq) qui correspond à une désintégration par seconde [21,22].

L'ancienne unité, le curie (Ci) est encore utilisée [22], elle correspond à l'activité de 1g de radium (période 1600 ans) [9]:

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq.}$$

Exemple:

L'activité naturelle du corps humain est environ 4500 Bq en  $^{40}\text{K}$  et 3700 Bq en  $^{14}\text{C}$  [23].

#### b- Activité spécifique:

L'activité spécifique exprime la quantité d'atomes radioactifs par gramme ou par mole de substance; l'activité spécifique s'exprime en Bq/mole, Bq/kg ou en Bq/g [21].

Le tableau suivant donne les activités spécifiques représentatives de quelques matériaux d'après [24].

**Tableau I.1: Activités spécifiques de quelques matériaux (en Bq/kg)**

matériaux	$^{40}\text{K}$ (Bq/kg)	$^{226}\text{Ra}$ (Bq/kg)	$^{232}\text{Th}$ (Bq/kg)
granite	700	60	60
sable	200	10	10
calcaire	60	10	5
ciment	200	20	15
marbre	150	10	5
clinker	600	60	70

Les nombres figurant dans le tableau peuvent varier dans des proportions non négligeables suivant l'origine ou la méthode de fabrication des matériaux, mais ils fixent les ordres de grandeur à atteindre [23].

La présence de la radioactivité dans un milieu ne signifie pas l'existence d'un danger, tout dépend de la dose.

#### C - La dose absorbée (D)

C'est la quantité d'énergie transmise par tous rayonnement ionisant à l'unité de masse de substance exposée [22,17].

La dose absorbée s'exprime en gray (Gy) [21,22].

1 Gray correspond à l'énergie absorbée de 1J par kg de matière irradié.

On utilise encore l'unité du système conventionnel qui est le rad.

Tel que:

$$1\text{Gy} = 100 \text{ rad}$$

#### d- La dose équivalente (H)

La dose équivalente mesure l'effet des rayonnements sur l'organisme, elle est égale à la dose absorbée multiplié par le facteur  $W_R$  [23,22], elle s'exprime en sievert.

$$H \text{ (Sv)} = D \cdot W_R \quad (\text{I.20})$$

$W_R$ : représente le facteur de pondération du rayonnement ou facteur de qualité (FQ) [23].

Le sievert étant une unité relativement grande, on utilise souvent ses sous multiples, le millisievert (mSv) ou le micro sievert ( $\mu$ sv).

Dans le système ancien, l'unité de dose équivalente est le rem [22].

$$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$$

La dose équivalente annuelle naturelle à laquelle nous sommes exposés dans les conditions normales est d'environ 0.24 rem/an [22,25].

**e-Facteur de qualité (FQ):**

Du point de vue protection, tous les rayonnements ne produisent pas le même effet, ils sont affectés d'un facteur de qualité.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs du facteur  $W_R$  pour les différents rayonnements cité précédemment:

**Tableau I.2: facteurs de pondération du rayonnement [26,27].**

rayonnement	énergie	Facteur de pondération
Photons $\gamma$	toutes	1
Electron $\beta$	toutes	1
Alpha, noyaux lourds	toutes	20

**e-Debit de dose**

Le débit de dose mesure la dose absorbée par unité de temps. L'unité légale est le gray par second (Gy/S), mais le Gy/mn est couramment utilisé [10,21].

**I.2: Origines de la radioactivité dans l'environnement**

La radioactivité est un phénomène naturel auquel nous sommes exposés quotidiennement. Elle provient de nombreuses sources, tant naturelles qu'artificielles qui émettent des rayonnements d'intensité variable [28].

### I.2.1: Radioactivité naturelle

La radioactivité naturelle existe depuis la création de la terre, elle dépend principalement des conditions géologique et géographique [29,30]. Plus des 2/3 des rayonnements ionisants dans l'environnement (environ 85%) proviennent de la nature et constituent ce qu'on appelle le bruit de fond [28].

Il existe environ 60 radionucléides naturels présents dans l'environnement, on les classe en deux groupes selon leur origine: terrestre ou cosmique [31,5].

#### I.2.1.1: Radionucléides d'origine terrestre (ou primordiaux)

Les radionucléides naturels d'origine terrestre (dits encore terrigènes) sont présents à des teneurs diverses dans tous les milieux de notre environnement (l'air, roches, sol, denrées alimentaires...). Ils existaient déjà dans les roches et minerais de l'écorce terrestre à l'époque de sa formation [31,32]. Ils ont toujours fait partie de la terre [33]. Certains de ces radionucléides primordiaux font partie de longues chaînes de désintégration, souvent associées à l'uranium. En outre, il existe quelques radionucléides abondants coexistants avec leurs isotopes stables (seul) qui ne font pas partie de ces longues chaînes de désintégrations (Tableau I.3). Parmi ces radionucléides le potassium 40 et le rubidium 87 sont les plus importants. Leur comportement dans l'environnement est similaire à celui de leurs isotopes stables [22,33].

Le potassium 40, que l'on trouve à l'état de traces dans le potassium naturel est très abondant dans l'écorce terrestre et le corps humain et les rend donc naturellement radioactifs. Son activité dépend de la concentration totale du potassium stable dans le sol. Dans le corps humain, l'activité du  $^{40}\text{K}$  est de 30Bq par gramme de potassium naturel [3].

Le potassium 40 fournit une dose annuelle de 0.18 mSv (18 mrem) aux tissus mous et 0.14mSv (14 mrem) à l'os [3,22].

Le rubidium 87 représente environ 28% du rubidium total dans la nature, son activité dans la majorité des sols est similaire à celle du  $^{40}\text{K}$ . La dose annuelle moyenne due au  $^{87}\text{Rb}$  varie de 3 à 6  $\mu\text{Sv}$  (0.3-0.6 mrem) [34].

Les radionucléides d'origine terrestre constituent la source principale de rayonnement gamma dans l'environnement [28].

La dose due aux rayonnements terrestres varie en fonction de la nature et la composition du sol, les roches granitiques sont plus radioactives que les roches sédimentaires [29], à l'exception des schistes et des phosphates naturels fortement radioactifs.

Des sables contenant de la monazite riche en thorium délivrent des débits de dose jusqu'à 100 fois supérieurs à ceux du bruit de fond naturel de rayonnement.

Au Brésil dans les régions de Guarapi, de Meaipe et de Pocos de Caldas, les débits de dose peuvent atteindre des valeurs 100 fois supérieures au niveau normal [35].

**Tableau I.3: Principaux radionucléides existant seuls [22].**

Radionucléide	Demi-vie (années) $T_{1/2}$	Principales radiations	Typical crustal concentration (Bq/kg)
$^{40}\text{K}$	$1.28 \times 10^9$	$\beta, \gamma$	630
$^{50}\text{V}$	$1.4 \times 10^{17}$	$\gamma$	$2 \times 10^{-5}$
$^{87}\text{Rb}$	$4.75 \times 10^{10}$	$\beta$	70
$^{113}\text{Cd}$	$9 \times 10^{15}$	$\beta$	$< 2 \times 10^{-6}$
$^{115}\text{In}$	$6 \times 10^{14}$	$\beta$	$2 \times 10^{-5}$
$^{138}\text{La}$	$1.05 \times 10^{11}$	$\beta, \gamma$	$2 \times 10^{-2}$
$^{142}\text{Ce}$	$> 5 \times 10^{16}$	$\beta$	$< 1 \times 10^{-5}$
$^{144}\text{Nd}$	$2.29 \times 10^{15}$	$\alpha$	$3 \times 10^{-4}$
$^{147}\text{Sm}$	$1.06 \times 10^{11}$	$\alpha$	0.7
$^{152}\text{Gd}$	$1.08 \times 10^{14}$	$\alpha$	$7 \times 10^{-6}$
$^{174}\text{Hf}$	$2.0 \times 10^{15}$	$\alpha$	$2 \times 10^{-7}$
$^{176}\text{Lu}$	$3.73 \times 10^{10}$	$\beta, \gamma$	0.04
$^{187}\text{Re}$	$4.3 \times 10^{10}$	$\beta$	$1 \times 10^{-3}$
$^{190}\text{Pt}$	$6.5 \times 10^{11}$	$\alpha$	$7 \times 10^{-8}$

- **Les séries (ou famille) radioactives**

Lors d'une désintégration, le noyau formé peut être radioactif, engendrant lui-même un autre noyau instable, et ainsi de suite jusqu'à ce que à la fin d'une longue série de transmutation apparaisse un nucléide stable, non radioactif (généralement un isotope du plomb) [11,16].

Ils existe 4 familles radioactives, trois de ces familles sont trouvés dans la nature, commençant avec leurs parents de très longue-vis  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{238}\text{U}$  et  $^{235}\text{U}$  et qui sont représentées par les figures 1,2, 3 respectivement, ainsi que leurs produits de filiation.

Une quatrième famille, la série du neptunium qui a provenu de l'élément  $^{241}\text{Pu}$ , est connu d'être exister en un certain temps [3, 14].

**a) Série de l'uranium 238**

Les nucléides de cette famille sont caractérisé par des nombres de masses égaux à  $4n+2$  (ou  $n$ : étant un nombre entier) [16,33]. Le nucléide parent  $^{238}\text{U}$  représente 99.2% de l'uranium total, sa concentration dans le sol est environ 10 Bq/kg et dans l'eau de mer 40 Bq/m<sup>3</sup> [33]. Il a une demi-vie (4.5 milliard d'année) du même ordre que l'age de la terre, de sorte que la moitié de la quantité originale de  $^{238}\text{U}$  soit encore présente depuis la formation de la terre.

Les quantités d'  $^{238}\text{U}$  varient largement avec le type de sol, les activités correspondantes des produits de désintégration varient en conséquence. Les descendants de longues périodes les plus importants sont:  $^{234}\text{U}$ , le  $^{230}\text{Th}$ , le  $^{226}\text{Ra}$ , le  $^{210}\text{Pb}$ , et le  $^{210}\text{Po}$  [3,31].

Les autres éléments sont des éléments à vie très courtes dont la radioactivité se met rapidement à l'équilibre avec celle de l'élément a vie longue immédiatement situé au dessus dans la succession familiale. Leurs durées de vie sont suffisamment courtes pour qu'ils n'aient pas le temps d'avoir un comportement environnemental spécifique [33].





b) Série de l'uranium 235

Les nucléides de cette série sont caractérisés par des nombres de masses égaux à  $4n+3$ . Le nucléide parent U-235 est présent en faible quantité 0.72% et en rapport constant avec l'uranium-238 (99,28%) [22,33]. Sa demi-vie est de l'ordre de 0.7 milliard d'année et c'est la plus longue de la chaîne engendrant différentes désintégrations radioactives. Le protactinium 231 et l'actinium 227 sont les seuls descendant ayant des demi-vies plus d'un an. La série se termine au nucléide stable  $^{210}\text{Pb}$  [3].

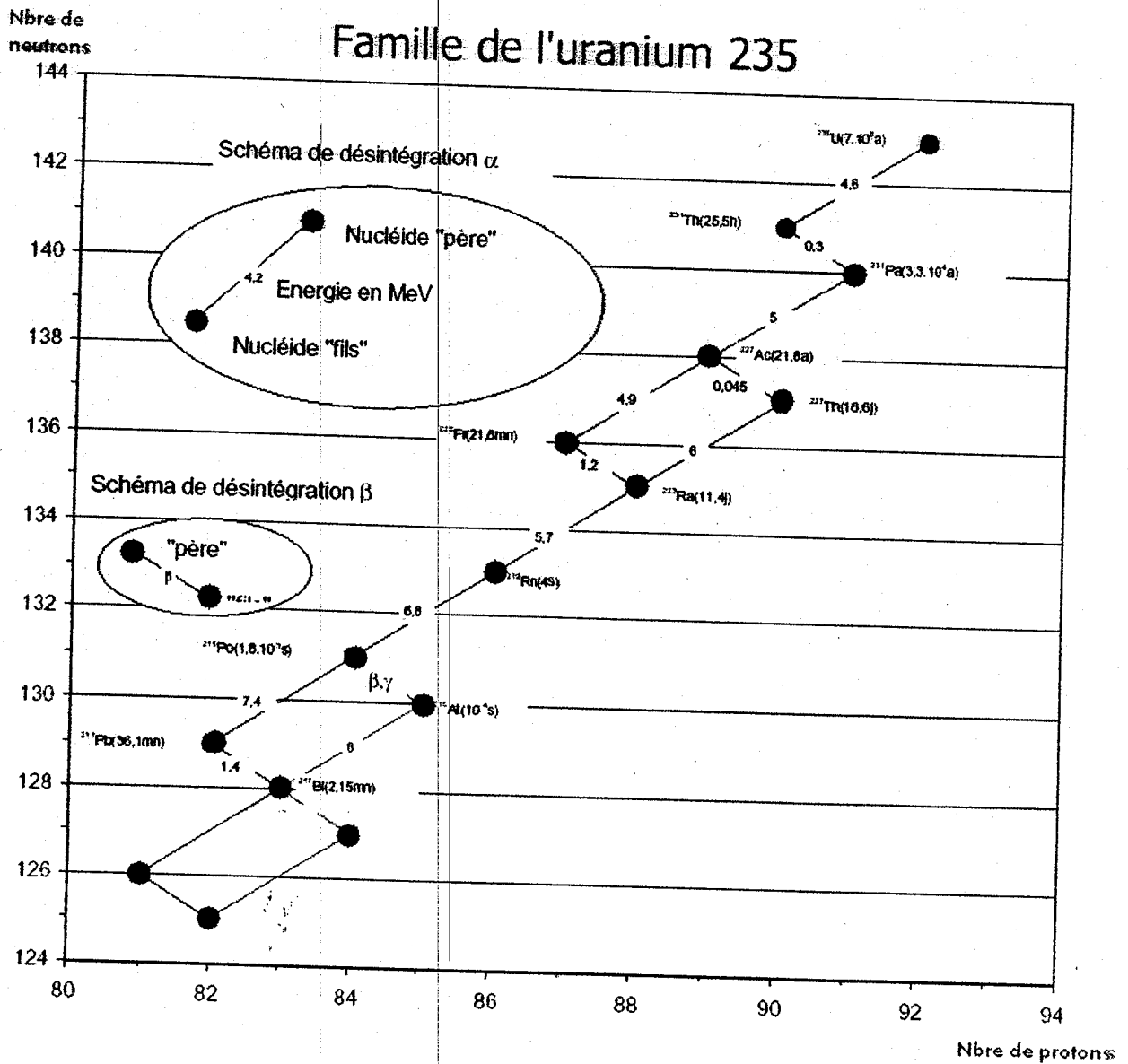


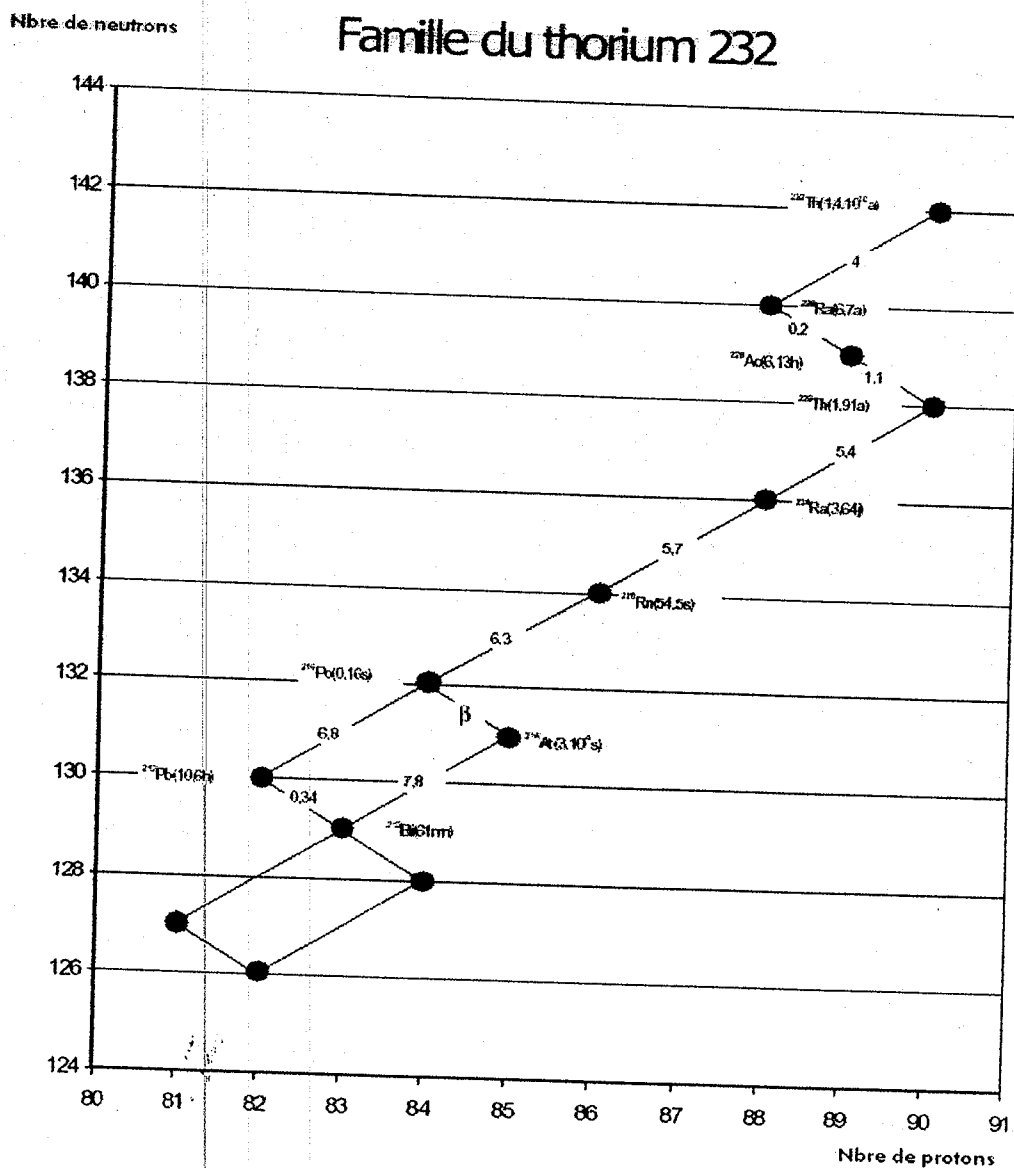
Figure 4: famille de l'Uranium-235 [15].

c) Série du thorium 232

Cette série commence par le nucléide naturel  $^{232}\text{Th}$  et se termine au nucléide stable  $^{208}\text{Pb}$ . Les nombres de masse des nucléides sont égaux à  $4n$  (FigI.4).

Le nucléide parent  $^{232}\text{Th}$  a une demi-vie égale à 14 milliards d'année, sa concentration dans le sol est comprise entre 7 et 50 Bq/kg et dans l'eau de mer est environ 4 mBq/m<sup>3</sup>.

La majeure partie de la progéniture du  $^{232}\text{Th}$  a des demi-vies relativement courtes, avec seulement  $^{228}\text{Ra}$  et le  $^{232}\text{Th}$  ayant des demi-vies plus grandes qu'un an [33].



FigureI.5: famille du thorium 232 [15].

**d) Série du neptunium:**

Cette série n'existe plus naturellement puisque tous ces membres ont des demi-vies relativement courtes comparées à l'âge de la terre [22,33]. Le nucléide parent est le  $^{241}\text{Pu}$ . Les nombres de masse des nucléides sont égaux à  $4n+1$ .

Les membres de cette filière de désintégration sont:  $^{241}\text{Pu}$  (14.4ans),  $^{241}\text{Am}$  (430 ans),  $^{237}\text{Np}$  (2.1 million d'année),  $^{233}\text{Pa}$  (27 jours),  $^{233}\text{U}$  (0.16 million d'année),  $^{229}\text{Th}$  (7340 année),  $^{225}\text{Ra}$  (14.8 jours) et  $^{229}\text{Ac}$  (10 jours).

Actuellement, cette série de désintégration est produite artificiellement par des réactions nucléaires, telles qu'il existe quelques quantités de ces radionucléides maintenant dans l'environnement. La concentration du  $^{241}\text{Pu}$  dans le sol est environ 2000 Bq/kg [33].

Les deux premières familles sont les plus importantes du point de vue radiologique, à cause de certains de leurs descendants tel que le radon, ce dernier produit par la désintégration du  $^{226}\text{Ra}$  issu de la famille de l' $^{238}\text{U}$  ( $^{222}\text{Rn}$ ), et du  $^{224}\text{Ra}$  issu de la famille du  $^{232}\text{Th}$  ( $^{220}\text{Rn}$  "thoron") joue, avec leurs produits de filiation à vie courte, un rôle beaucoup plus important. C'est un gaz qui émane du sol, des matériaux de construction et des eaux. Sa concentration varie considérablement dans l'air libre selon la nature des terrains et dans l'atmosphère des habitations selon la nature des matériaux de construction et la façon dont ces habitations sont aérées [3,22].

Le radon entraîne une contribution importante à l'exposition de l'homme aux sources naturelles de rayonnement.

**1.2.1.2: Radionucléides d'origine cosmique**

Ils sont produits en permanence dans l'atmosphère de la terre par des réactions nucléaires entre des atomes gazeux (hydrogène, oxygène, azote, argon, etc.) et des particules du rayonnement cosmique telles que des protons de haute énergie, provenant de l'espace interstellaire [32,3].

Ces radionucléides sont déposés à la surface de la terre par des précipitations et des retombées sèches, ou bien ils entrent directement dans des processus géochimique se produisant dans une phase gazeuse à la surface ou au-dessus de la terre. Bien que des isotopes stables de tous les radionucléides connus d'origine

cosmique existent dans la nature, le degré de l'échange isotopique entre ces radionucléides et leurs isotopes stables respectifs dépend des formes sous lesquelles ils sont introduits au sein des processus géochimiques [3,5].

La variabilité spatiale de ces radionucléides est partiellement due à la variation du flux du rayonnement cosmique qui change dans l'espace avec l'altitude et latitude et temporellement avec des changements des taux de production de rayonnement [33,36].

La dose efficace annuelle moyenne pondérée par la population est évaluée à environ  $380\mu\text{Sv}/\text{an}$  par l'UNSCEAR (1993), les populations vivant en altitude reçoivent des doses plus élevées. Par exemple, la dose moyenne reçue en une année par les habitants de Mexico (2240m) est estimée à  $820\mu\text{Sv}$ , celle des habitants de la Paz en Bolivie (3900m) à  $2\text{mSv}$  [6].

Les radionucléides d'origine cosmique comprennent l'hydrogène 3 (ou tritium,  $^3\text{H}$ ), ( $T_{1/2}=12$  année), le carbone 14 ( $^{14}\text{C}$ ) ( $T_{1/2}=5730$  année),  $^7\text{Be}$  ( $T_{1/2}=53.3$  jours),  $^{22}\text{Na}$  ( $T_{1/2}=2.6$  ans) comme principaux éléments (Tableau I.4) [22,36].

C'est l'incorporation (inhalation et ingestion via la chaîne alimentaire) de ces différents radionucléides qui est responsable de l'exposition interne de l'individu.

L'essentiel de l'exposition des populations provient du  $^{14}\text{C}$  issu de l'interaction des neutrons cosmiques avec le  $^{14}\text{N}$ . Transformé en  $^{14}\text{CO}_2$ , il participe au cycle de la photosynthèse. La principale source de tritium d'origine naturelle est due à l'interaction des rayonnements cosmiques avec les noyaux d'azote ( $\text{N}_2$ ) et d'oxygène ( $\text{O}_2$ ). Le tritium est présent dans la biosphère le plus souvent sous forme d'eau tritiée. En incorporant cette eau, l'homme reçoit une dose efficace annuelle de l'ordre de  $0.01\mu\text{Sv}$  [37]. Le  $^7\text{Be}$  résulte des phénomènes de spallation des noyaux de C, N, O lorsqu'ils absorbent les protons et neutrons. Une fois formé dans la troposphère, le  $^7\text{Be}$  se fixe rapidement sur les aérosols ambiants avec lesquels il finit par se déposer au niveau du sol, notamment sur les surfaces foliaires. La dose annuelle via la consommation de légumes frais, est évaluée à  $0.03\mu\text{Sv}$ . Enfin le  $^{22}\text{Na}$  apporte de la même façon une dose annuelle de l'ordre de  $0.15\mu\text{Sv}$  [6].

Le rayonnement gamma provient de ces radionucléides représente la source extérieure principale de l'irradiation que subit l'homme [31,3].

Tableau [I.4]: Concentrations des principaux radionucléides formés par interaction avec les constituants de l'atmosphère [22].

Radionucléide	Période	Principales radiations	Concentration typique (Bq/kg)		
			Air (troposphère)	Rain water	Océan water
<sup>10</sup> Be	2500000 ans	β	11.84 × 10 <sup>-11</sup>	—	2 × 10 <sup>-8</sup>
<sup>26</sup> Al	716000 ans	γ	12.58 × 10 <sup>-2</sup>	—	2 × 10 <sup>-10</sup>
<sup>36</sup> Cl	300000 ans	β	25.16 × 10 <sup>-11</sup>	—	1 × 10 <sup>-5</sup>
<sup>14</sup> C	5730 ans	β	—	—	5 × 10 <sup>-3</sup>
<sup>32</sup> Si	650 ans	β	19.98 × 10 <sup>-9</sup>	—	4 × 10 <sup>-7</sup>
<sup>39</sup> Ar	269 ans	β	—	—	6 × 10 <sup>-8</sup>
<sup>3</sup> H	12.33 ans	β	1.2 × 10 <sup>-3</sup>	—	7 × 10 <sup>-4</sup>
<sup>22</sup> Na	2.60 ans	β, γ	1 × 10 <sup>-6</sup>	2.8 × 10 <sup>-4</sup>	—
<sup>35</sup> S	87.51 jours	β	1.3 × 10 <sup>-4</sup>	7.7 × 10 <sup>-3</sup> à 10.7 × 10 <sup>-3</sup>	—
<sup>7</sup> Be	53.29 jour	γ	0.01	0.66	—
<sup>33</sup> P	35.0 jours	β	1.3 × 10 <sup>-3</sup>	—	—
<sup>32</sup> P	14.26 jours	β	2.3 × 10 <sup>-4</sup>	—	—
<sup>28</sup> Mg	20.91 h	β	—	—	—
<sup>24</sup> Na	14.96 h	β, γ	—	3.0 × 10 <sup>-3</sup> à 5.9 × 10 <sup>-3</sup>	—
<sup>38</sup> S	2.84 h	β, γ	—	6.6 × 10 <sup>-2</sup> à 21.88 × 10 <sup>-2</sup>	—
<sup>31</sup> Si	2.6 h				
<sup>34</sup> Cl	32 m				
<sup>38</sup> Cl	37.3 m	β, γ	—	15.17 × 10 <sup>-2</sup> à 25.012 × 10 <sup>-1</sup>	
<sup>39</sup> Cl	56 m	β, γ	25	16.65 × 10 <sup>-2</sup> à 83.25 × 10 <sup>-2</sup>	



### I.2.2: Radioactivité artificielle:

En plus de la radioactivité naturelle qui est constituée essentiellement par les rayonnements cosmiques et les radiations des radionucléides primordiaux, la radioactivité artificielle a considérablement augmenté le niveau de radioactivité à l'échelle mondiale. Cette nouvelle source de radioactivité est apparue juste après la seconde guerre mondiale [25]. Depuis cette époque, un apport continu et important de matières radioactives ne cesse de contaminer les différents compartiments de l'environnement (air, eau et sol).

Diverses sources ayant pour origine la radioactivité artificielle peuvent exister, on peut citer les plus importants à savoir les retombées des essais et explosions nucléaires, l'exploitation des installations nucléaires ainsi que certaines activités humaines telle que la médecine et l'industrie. Les principaux radionucléides rejetés peuvent être classés selon trois catégories: produits de fission, produits d'activation et les transuraniens [19], comme le montre le tableau I.5 donné ci-dessous.

Tableau I.5: les principaux radionucléides artificiels [19].

Produits de fissions		Produits d'activations		transuraniens	
radionucléides	périodes	radionucléides	périodes	radionucléides	périodes
<sup>90</sup> Sr	28.6 a	<sup>60</sup> Co	5.3 a	<sup>238</sup> Pu	87.8 a
<sup>137</sup> Cs	30.2 a	<sup>65</sup> Zn	244 j	<sup>240</sup> Pu	6537 a
<sup>89</sup> Sr	50.5 j	<sup>51</sup> Cr	28 j	<sup>241</sup> Pu	14.9 a
<sup>91</sup> Y	58.8 j	<sup>54</sup> Mn	312 j	<sup>241</sup> Am	433 a
<sup>95</sup> Zr	64.0 j	<sup>55</sup> Fe	2.7 a	<sup>242</sup> Cm	163 j
<sup>95</sup> Nb	35.2 j	<sup>59</sup> Fe	45 j	<sup>244</sup> Cm	18 a
<sup>99</sup> Tc	2.1×10 <sup>9</sup> a	<sup>58</sup> Co	71 j		
<sup>103</sup> Ru	39.4 j	<sup>63</sup> Ni	100 a		
<sup>106</sup> Ru	368 j	<sup>110</sup> Ag	250 j		
<sup>125</sup> Sb	2.77 a	<sup>134</sup> Cs	2.06 a		
<sup>131</sup> I	8.04 j				
<sup>129</sup> I	1.57×10 <sup>7</sup> a				
<sup>136</sup> Cs	13 j				
<sup>140</sup> Br	12.8 j				
<sup>141</sup> Ce	32.5 j				
<sup>144</sup> Ce	285j				
<sup>154</sup> Eu	8.5 a				
<sup>155</sup> Eu	4.96 a				

### 1.2.2.1: Essais nucléaires

Durant la période allant de 1945 à 1990, 423 explosions nucléaires ont eu lieu dans l'atmosphère à titre d'essais [37]. Les retombées des explosions dans l'atmosphère contiennent plusieurs centaines de radioéléments dont les plus importants sont ceux présentant une longue période radioactive et qui concernent donc les populations actuelles et futures.

Parmi ces derniers, on peut citer le carbone 14 (période 5730 ans), le césium 137 (période 30 ans) et le tritium (période de 12 ans).

Le carbone 14 et le tritium sont présent dans l'atmosphère et le milieu aquatique. Ils sont formés par interaction des neutrons produits dans les explosions, avec les constituants de l'atmosphère [38,39]. Quant aux Cs et Sr, qui sont des produits de fission, après un certain temps de séjour dans la haute atmosphère, ils rejoignent le milieu terrestre.

### I.2.2.2: Accidents nucléaires

Les accidents survenus dans le monde ont conduit à l'augmentation de la radioactivité ambiante de l'environnement. Parmi les plus importants du point de vue radiologique, on distingue l'accident de Windscale (Grande-Bretagne), de Three Mile Island (USA) et celui de Tchernobyl (URSS) [3].

#### I.2.2.2.1: Accident de Windscale

Cet accident s'est produit le 7/10/1957 dans un réacteur à Uranium modéré au graphite, refroidi à l'air et utilisé pour la production du Plutonium fissile. Suite à l'accumulation d'une quantité excessive de chaleur. Dans le graphite qui résulte de l'irradiation par les neutrons de ce dernier, il y a eu combustion du cœur du réacteur. Ceci a conduit à la libération de quantités importantes de produits de fission [19] (voir tableau I.6).

La majeure partie de la radioactivité libérée a été déposée en grande Bretagne, alors qu'une autre partie moins importante s'est orientée vers l'Europe de l'Ouest. La voie de contamination par le lait a été la plus importante de toutes les voies de transfert de la radioactivité dans l'environnement, vue les grandes quantités d<sup>131</sup>I rejetées [4]

Tableau I.6: quantités radioactives rejetées par Windscale (1957) [19,39]

Radionucléides	Quantités libérées (Bq)
<sup>131</sup> I	$740 \times 10^{12}$
<sup>137</sup> Cs	$22 \times 10^{12}$
<sup>89</sup> Sr	$3 \times 10^{12}$
<sup>90</sup> Sr	$3.3 \times 10^{12}$
<sup>133</sup> Xe	$1.2 \times 10^{15}$

### I.2.2.2: Accident de Three Mile Island (TMI)

Cet accident s'est produit le 28/03/1979 aux Etats Unis dans l'état de Pennsylvanie, dans un réacteur à eau pressurisée de puissance électrique 880 Mégawatt (MW). Il a causé de graves dégâts dans le cœur du réacteur et son blindage entraînant l'échappement de matières radioactives sous forme de gaz et d'aérosols [37]. Le tableau I.7 donne les quantités libérées par certains produits de fission gazeux.

Tableau I.7: les gaz de fissions libérés par TMI (1979) [37].

Nucléides	Périodes	Quantités rejetées (Bq)
$^{85}\text{Kr}$	2.8 h	$1.4 \times 10^{15}$
$^{133}\text{Xe}$	5.2 j	$5.55 \times 10^{10}$
$^{135}\text{Xe}$	9.1 j	$1.11 \times 10^{10}$
$^{131}\text{I}$	8.1 j	$55.5 \times 10^{10}$

### I.2.2.3: Accident de Tchernobyl

L'accident de Tchernobyl survenu le 26/04/86 en Ukraine, il est reconnu comme étant le plus grave des accidents nucléaires. Il s'est produit pendant un essai technique à faible puissance, alors que les systèmes de sécurité étaient déconnectés, ce qui a provoqué des explosions dans le cœur du réacteur et endommagé ses structures de confinement [40].

Des gaz et des aérosols ont été rejetés dans l'atmosphère, 25% le premier jour et 75% au cours des neuf jours qui suivent l'accident. Ceci a entraîné l'émission totale de  $1.85 \times 10^{18}$  Bq de matières radioactives constituées essentiellement d' $^{131}\text{I}$ , de  $^{137}\text{Cs}$  et de  $^{134}\text{Cs}$ , principaux responsables de l'irradiation externe par contamination du sol, et interne par ingestion d'aliments contaminés.

La contamination a été transportée sur plusieurs milliers de kilomètres et a été détectée dans la plus part des régions de l'hémisphère nord. Cette large contamination est due au fait qu'il n'existerait pas une seconde enceinte de

confinement qui permet d'isoler l'ensemble du réacteur et les circuits en contact direct avec le cœur [41].

La moyenne régionale de dégagement de dose efficace due à l'accident de Tchernobyl est donnée par la figure suivante:

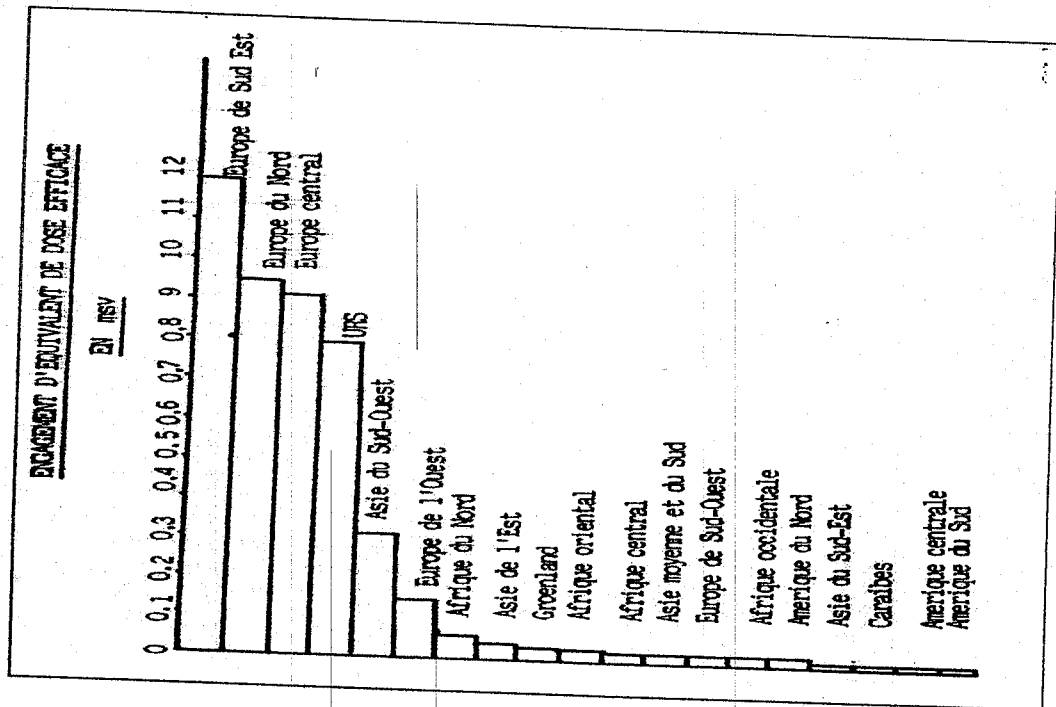


Figure L6 : moyenne régionale de l'engagement du dose efficace dû à l'accident de Tchernobyl.

#### I.2.2.2.4: Installations nucléaires

Les installations nucléaires sont constituées de centrales nucléaires et d'usines de retraits du combustible. Elles contribuent avec une grande part dans la radioactivité artificielle, à travers les rejets d'effluents radioactifs (gazeux ou liquides). Ces rejets sont formés essentiellement de gaz de fission et de produits d'activation qui sont libérés dans l'air et le milieu aquatique [25].

#### I.2.2.2.5: Sources de la radioactivité liées aux activités industrielles

L'utilisation de sources radioactives, appareils générateurs de rayonnement ionisant dans le domaine industriel, médical ou de la recherche peut conduire à des accidents radiologiques qui contribuent à la contamination de l'homme et de son environnement [25].

La majorité de ces accidents ont pour origine des sources radioactives d'appareils de radiothérapie perdue. D'autres activités humaines, utilisant la combustion de charbon, l'exploitation de l'énergie géothermique et le traitement des phosphates augmentent la concentration de certains radionucléides naturels. L'utilisation du charbon pour diverses activités (les centrales à charbon, cycle du combustible ou chauffage) entraîne la libération dans l'air de cendres avec des concentrations importantes en  $^{238}\text{U}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  et de  $^{222}\text{Rn}$  [4].

L'exploitation de l'énergie géothermique ainsi que le traitement des phosphates (pour la fabrication des engrais) conduisent à l'augmentation de la concentration de certains radioéléments naturels contenus dans le sol.

### I.3: Comportement des radionucléides dans l'environnement

Les radionucléides se trouvent de façon ubiquiste dans tous les compartiments de l'environnement quelle que soit leur forme physique, ils sont entraînés dans les mouvements de l'air et de l'eau autour de la planète, sous forme de gaz et d'aérosols dans la circulation générale de l'atmosphère, et sous forme d'espèces dissoutes, dans l'écoulement des nappes souterraines, des rivières et dans la circulation océanique.

Cependant, les radionucléides sont aussi soumis, depuis l'atmosphère, à des dépôts sur le sol, et dans l'hydrosphère, à la précipitation ou à la sédimentation [42]. Ils sont chimiquement identiques aux éléments stables, ce qui signifie que leur comportement biogéochimique dans l'environnement est similaire à celui de ces derniers et dépend de leurs propriétés chimiques [5].

C'est notamment le cas des radionucléides naturels coexistant dans l'environnement avec leurs isotopes stables.

Par exemple, le potassium-40, élément radioactif se comporte in situ exactement comme le potassium 39 stable ( $^{39}\text{K}$  abondance isotopique naturelle 93%) et le potassium-41 ( $^{41}\text{K}$  abondance isotopique naturelle 7%), bien que son abondance isotopique n'atteigne que 0,01%. De même, les radionucléides artificiels, tels que le cobalt 60 ( $^{60}\text{Co}$ ), le césium 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ) etc., dont l'introduction dans l'environnement résulte des activités humaines ont un comportement similaire à celui de leurs analogues stables naturels, le cobalt 59 ( $^{59}\text{Co}$  abondance isotopique naturelle: 100%), le césium 133 ( $^{133}\text{Cs}$ ; abondance isotopique naturelle: 100%), etc., à condition que les formes chimiques et physiques des radionucléides artificiels introduits soient identiques à celles de leurs isotopes stables [22,5].

#### **I.4: Principales voies de contamination**

##### **I.4.1: Contamination à partir de l'air**

L'introduction de la radioactivité dans l'atmosphère est surtout due aux effluents gazeux rejetés par les installations nucléaires et à la libération des radionucléides suite aux essais et accidents nucléaires. Le polluant radioactif peut atteindre l'homme soit par inhalation, soit par transfert percutané (à travers la peau). Mais avant d'atteindre l'homme, il parcourt des cheminements plus ou moins longs et complexe. Il se dépose sur les autres milieux, par voie sèche (aérosol) ou par voie humide (précipitation) en suite, il peut atteindre l'homme notamment par sa chaîne alimentaire [42].

##### **I.4.2: Contamination à partir de l'eau:**

La contamination de l'eau, peut provenir des rejets d'effluents liquides radioactifs, des retombées nucléaires et de l'infiltration de radioéléments dans le sol. L'eau peut contaminer l'homme directement ou à travers sa chaîne alimentaire [42].

### I.4.3: Contamination à partir du sol:

La contamination du sol a en général trois origines:

- L'atmosphère qui elle même est contaminée suite aux retombées radioactives et rejets défluents gazeux d'installations nucléaires.
- Les eaux contaminées.
- Les matériaux contaminés.

Lorsqu'une matière radioactive est introduite dans le sol ou déposée à la surface, elle subit une dispersion et une dilution, une partie est retenue dans le sol, une autre migre en profondeur dans les nappes d'eaux, une autre partie est libérée dans l'atmosphère (resuspension) [42].

Le reste atteint les organismes vivants dans le sol ainsi que les plantes, qui peuvent être ultérieurement consommés par les animaux, ces derniers véhiculent les contaminations à l'homme. C'est le cas par exemple du lait ingéré par une personne et qui provient d'une vache ayant consommé de l'herbe contaminée par de l'iode radioactive, qui par la suite se fixe sur la thyroïde de l'homme [40,4].

### I.5: Effet des rayonnements ionisant sur l'environnement

Les radiations ionisantes interagissent avec la matière en transférant leur énergie aux molécules, ce qui peut modifier leur structure et leur fonctionnement. La gravité de ces effets dépend du type de radiation (alpha, bêta, gamma), de la dose absorbée, et aussi de la sensibilité des tissus concernées [10,42]. Ces rayonnement influent sur tout les compartiments de l'environnement parmi lesquels on site: les plantes, les animaux les microbes et bien sur les êtres humain.

#### I.5.1: Effets sur les espèces non humains

##### I.5.1.1: plantes:

Les plantes se développent activement dans beaucoup de secteurs de radioactivité élevée, mais des effets négatifs sont observés seulement aux doses très élevées. Ces effets peuvent être exprimés en tant qu'aberrations morphologiques, telles que la croissance anormale de feuille, mais ceux-ci tendent à être des effets mineurs qui n'affectent pas la population de plantes [33]. Une forte radiation peut



Les niveaux de fond du rayonnement environnemental sont beaucoup plus bas que les taux de dose ou on s'attend à ce que des microbes montrent des effets, cependant, d'après des données sur les expositions aiguës, il est évident que les microbes puissent tolérer des taux de dose très élevée [44,45].

### I.5.2: Effets sur les être humains:

Les effets sur les humains se répartissent en deux catégories:

- ❖ Les effets déterministes provoqué par des expositions brève et intense aux doses élevées.
- ❖ les effets stochastiques provoqués par des expositions plus inférieures [28,46].

Les données sur des effets déterministes, viennent des effets secondaires de la radiothérapie, des effets de la bombe atomiques au Japon et de quelques accidents graves.

Les données sur les effets stochastiques sont la plus part du temps basées sur des études épidémiologiques sur les survivants des détonations de bombe atomique au Japon, sur des patients exposés au traitement médicaux, et sur des expositions industrielles aux ouvriers [46,47].

#### I.5.2.1:- Effets déterministes (ou non stochastique)

Les effets déterministes sont ceux qui se produisent systématiquement lorsque l'organisme est soumis à une certaine dose de rayonnement, il s'agit également d'effets à seuil, qu'ils ne se manifestent qu'au dessus d'une certaine dose. Il n'y a pas d'effets déterministes pour les doses de moins de 100 mSv [27]. Ces effets se manifestent de quelques minutes à plusieurs semaines après l'irradiation. Leur gravité varie selon la dose reçue et la nature des organes irradiés. Les effets graves incluent la suppression de la fonction de moelle, des dommages à l'appareil gastro-intestinal, des brûlures de peau, des cataractes, et des lymphocytes réduits. Les symptômes incluent la nausée, douleur, vomissant et rougissant de la peau [33]. Une dose plus grande que 10 Sv est souvent mortelle.

**I.5.2.2: Les effets stochastiques (ou tardifs):**

Les effets stochastiques sont ceux dont l'apparition n'est pas liée à une dose précise, il s'agit aussi d'effets aléatoires ou sans seuil [46,47]. Ces effets incluent le cancer et les dommages génétiques. Le cancer résulte des modifications cellulaires.

Un indice important est que le cancer ne peut être exprimé jusqu'aux décennies suivant l'exposition.

Les données d'une étude sur des survivants Japonais, inclut un groupe d'étude d'environ 80 000 individus, indiquent une augmentation statistique des malignités aux doses au dessus de 0.2 Sv [33,47]. L'ICRP estime le risque mortel du cancer à un taux de l'ordre de 0.04sv pour les ouvriers adulte et 0.05Sv à la population générale. La probabilité d'apparition des effets héréditaires augmente avec l'intensité de la dose reçue [28].

## CHAPITRE:2

# INTERACTION DES RAYONS GAMMA AVEC LA MATIERE

Interaction des rayons gamma avec la matière

Cette partie détaille les interactions des rayons gamma avec la matière, qui aboutissent au dépôt de leur énergie dans un détecteur. Cette énergie est mesurée pour obtenir un spectre en énergie.

II.1: Processus d'interaction des rayons gamma avec la matière :

Lorsqu'un faisceau de rayons  $\gamma$  pénètre dans la matière, on constate une diminution progressive du nombre de photons, L'énergie de ceux qui reste dans le faisceau n'étant pas affectée [48] Cette disparition des photons incidents, appelée atténuation, est due à l'interaction des photons avec les particules matérielles, et plus particulièrement avec les électrons atomiques. Les photons peuvent subir essentiellement les trois types d'interactions suivants : Effet photoélectrique, Effet Compton et la création de paires électron - positon [20,49].

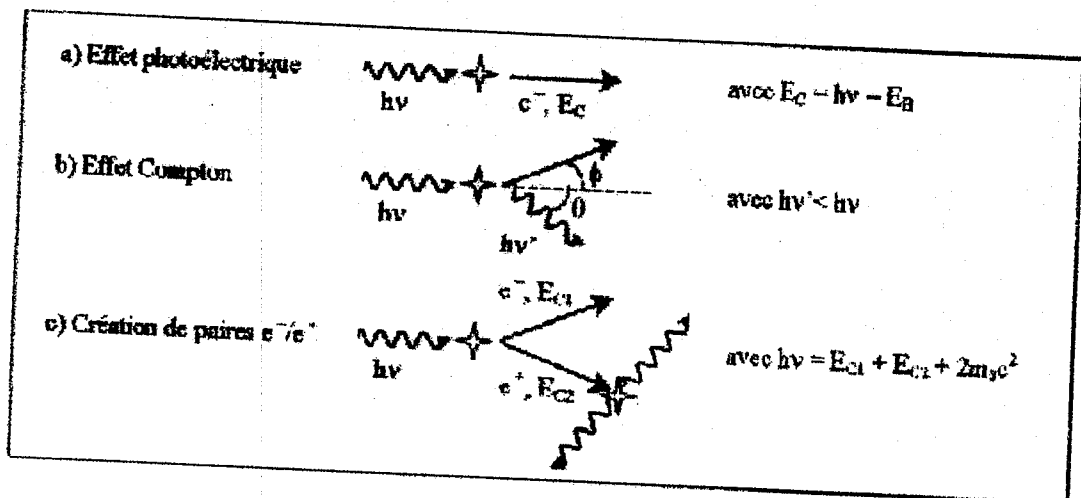


Figure II.1: Processus d'interaction des rayons gamma avec la matière.

II.1.1: Effet photoélectrique

Lorsqu'un photon entre en collision avec les électrons des couches internes d'un atome, en particulier k et l, on parle d'effet photoélectrique. Dans ce cas, la totalité de l'énergie du photon incident est absorbée par l'atome. Cette énergie est transférée à un électron qui est éjecté de sa couche électronique (énergie de liaison) et emporte l'excédent d'énergie sous forme d'énergie cinétique [20] (figure:II.a)

$$E_c = h\nu - E_L \quad (\text{II.1})$$

Où

$h\nu$ : représente l'énergie du photon incident.

$E_L$ : représente l'énergie de liaison de l'électron.

L'atome reste dans un état excité avec un excédent d'énergie  $E_L$ . Il se désexcite par réarrangement du cortège électronique (un électron des couches supérieures prend la place laissée vacante par l'électron éjecté) [20], en émettant des photons de fluorescences.

La figure ci-dessous donne une schématisation de cet effet

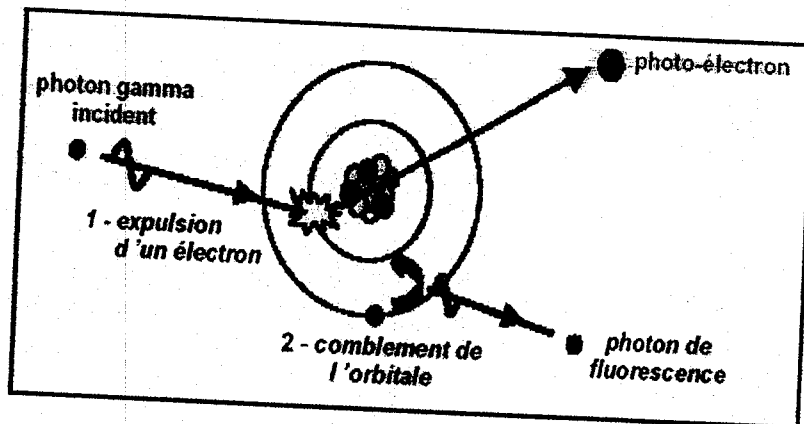


Figure II.2: effet photoélectrique.

Lors d'un processus photoélectrique, toute l'énergie du rayonnement incident est absorbée [50].

### II.1.2: l'effet Compton

Il peut être considéré comme une collision élastique entre le photon incident, d'énergie  $E_\nu$ , et un électron libre ou presque libre de la cible [48]. Pendant cette collision, une petite partie de l'énergie  $h\nu$  du photon incident est absorbée par le milieu (énergie de liaison de l'électron) et l'énergie restante est emportée par les particules diffusées (figure II.3).

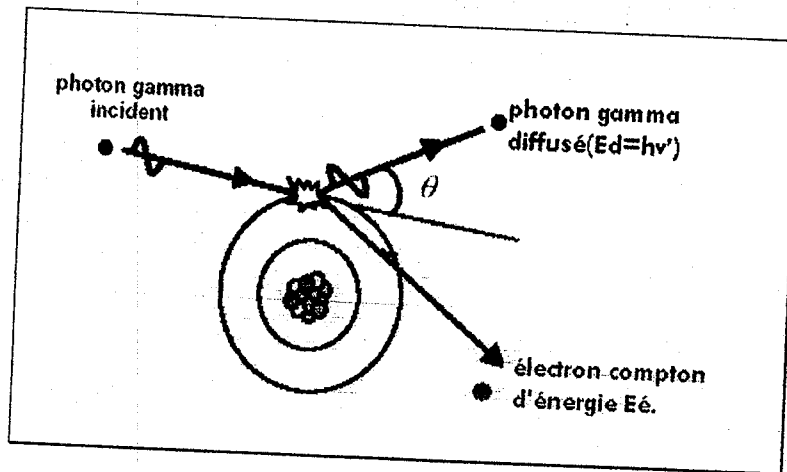


Figure II-3: Diffusion Compton.

La proportion de l'énergie  $E_e$  emportée par l'électron Compton est d'autant plus grande que l'énergie du photon incident est élevée.

$$E_e = hv - hv' \tag{II.2}$$

Tel que:

$hv$ : représente l'énergie du photon incident,

$hv'$ : représente l'énergie du photon diffusée [20].

$$hv' = \frac{hv}{\left(1 + \frac{hv}{m_0c^2} (1 - \cos \theta)\right)} \tag{II.3}$$

Avec:

$m_0c^2$ : L'énergie de masse de l'électron, vaut: 511 keV .

$\theta$ : L'angle de déviation des photons diffusée par rapport à la direction du faisceau incident.

D'où :

$$E_e = hv - hv' = hv \left[ \frac{\frac{hv}{m_0c^2} (1 - \cos \theta)}{1 + \frac{hv}{m_0c^2} (1 - \cos \theta)} \right] \tag{II.4}$$

Deux cas peuvent se présenter [20]:

1-cas d'un choc tangentiel

$$\theta = 0 \quad 1 - \cos\theta = 0 \quad h\nu \cong h\nu' \quad \text{et donc } E_{e^-} \cong 0 \quad (\text{II.5})$$

Dans ce cas, le photon diffusé emporte une énergie égale à celle du photon incident.

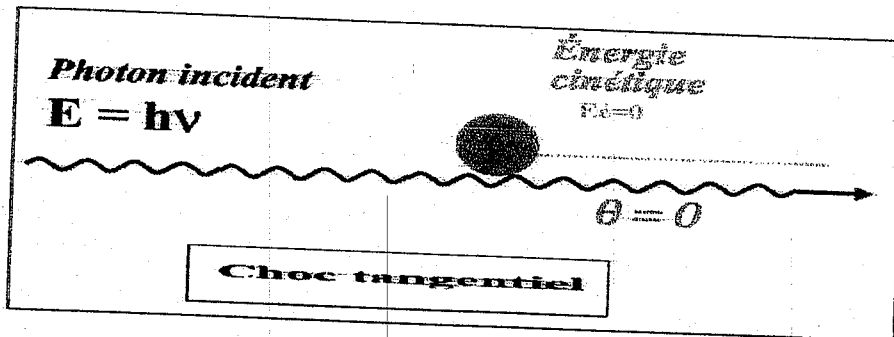


Figure II-4: Choc tangentiel.

2-cas d'un choc frontal avec l'électron

$$\theta = \pi \quad h\nu' ]_{\theta=\pi} = \frac{h\nu}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}} \quad (\text{II.6})$$

$$E_{e^-} ]_{\theta=\pi} = h\nu \left[ \frac{\frac{2h\nu}{m_0c^2}}{1 + \frac{2h\nu}{m_0c^2}} \right] \quad (\text{II.7})$$

Dans ce cas, le photon est rétrodiffusé (il repart en sens inverse).

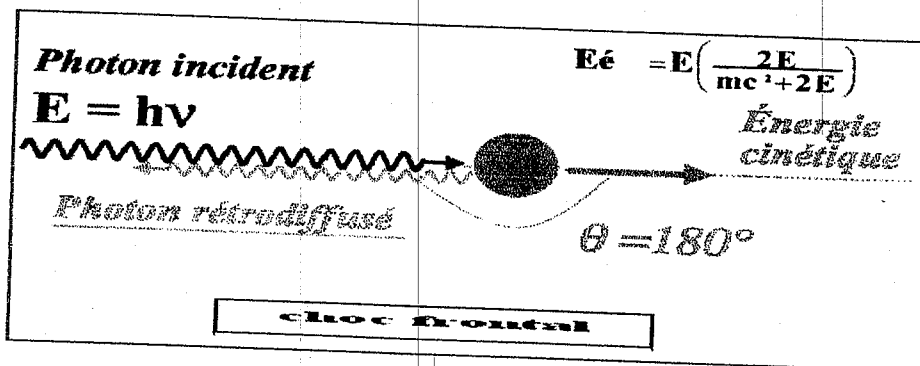


Figure II.5: Choc frontal.

D'une façon générale, Le photon diffusé peut:

- Soit être absorbé par le milieu.
- Soit s'échapper du détecteur.

Le spectre Compton est un spectre continu, car une partie des rayonnements diffusés s'échappe du détecteur et une énergie variable est cédée à l'électron Compton qui interagit avec le milieu [51].

Lorsque les photons diffusés sont absorbés dans le détecteur, ils contribuent au pic d'absorption totale (figure II.6).

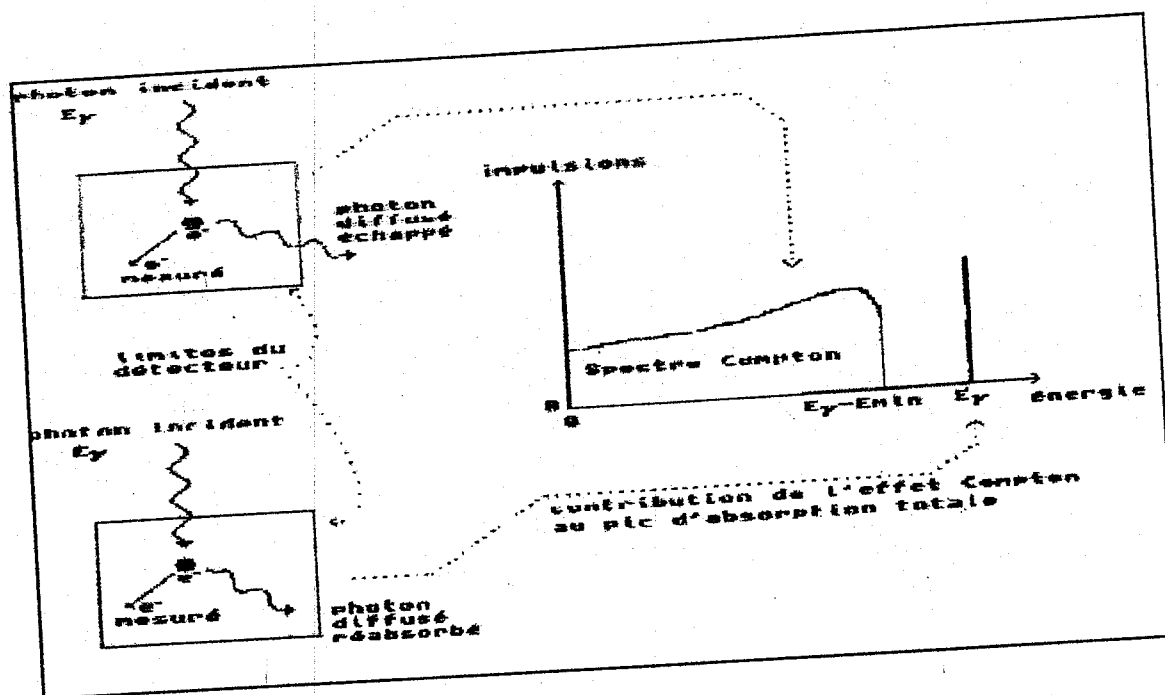


Figure II-6: Schéma général d'interaction Compton

La probabilité d'apparition de cet effet diminue lorsque l'énergie du photon incident augmente et elle varie peu avec le Z de l'absorbant [20].

### II.1.3: Effet de création de paires (ou effet de matérialisation)

Dans la matérialisation, le photon cède son énergie par création d'une paire d'ions (électron - positon). Cette production résulte d'une interaction du photon avec le champ coulombien du noyau [50].



Pour créer ces deux particules, une énergie égale à  $2m_0c^2 = 2 \times 511 \text{ keV}$  est dépensée.

C'est pour cette raison que la matérialisation n'a lieu que pour des photons avec une énergie supérieur à 1022 Kev [20].

L'énergie cinétique totale de la paire est donnée par l'équation suivante:

$$E_{e^-} + E_{e^+} = h\nu - 2m_0.c^2 \quad (\text{II.8})$$

L'électron et le positon sont ensuite ralentis dans la matière par suite de collisions. Lorsqu'il est suffisamment lent, le positon rencontre un électron du milieu et les deux particules s'annihilent en émettant deux photons de 0.511Kev (émission à  $180^\circ$ ) [48].

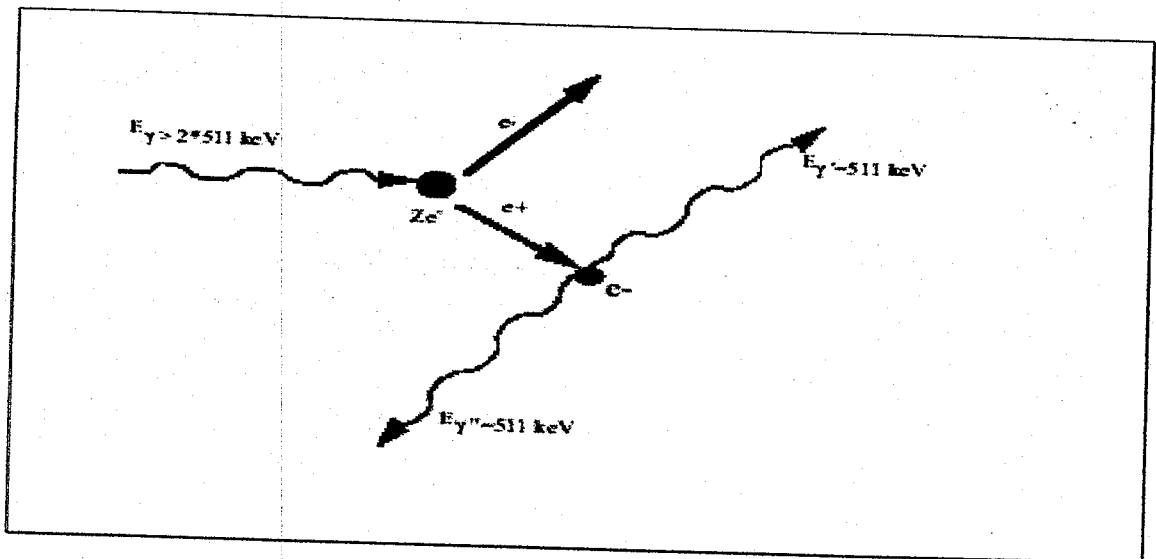


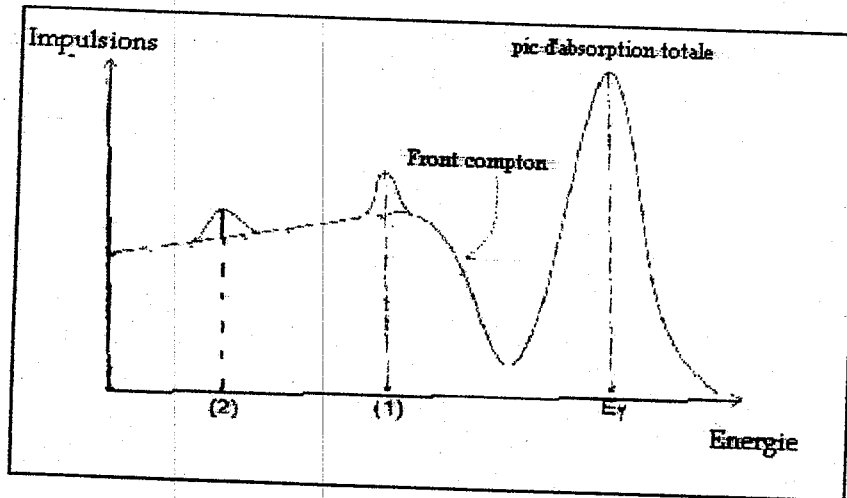
Figure II.7: Création d'une paire d'électrons positons par interaction du photon avec le champ du noyau.

$$e^+ + e^- = 2\gamma \quad (\text{II.9})$$

- Si les 2  $\gamma$  perdent toute leur énergie dans le détecteur, l'amplitude de l'impulsion produite se situera dans le pic d'absorption totale.
- Si l'un des photons d'annihilation ressort du détecteur, on observera un pic de simple échappement à  $E_\gamma - 511 \text{ keV}$  (1) (figure II.8).

- Si les deux photons s'échappent, on observera un second pic à  $E_{\gamma} - 2 \times 511 \text{keV}$  (2).

En général, ces deux pics viennent se superposer au palier Compton:



**Figure II.8: schéma montrant le pic d'annihilation**

## II.2: Domaine de prédominance des différents effets

La figure II.9 récapitule les 3 effets précédemment vus en indiquant bien leurs zones d'influence respectives.

Pour des photons traversant un milieu donné, les trois effets peuvent se produire, mais avec une probabilité différente selon l'énergie des photons et la nature du milieu.

Schématiquement, l'effet photoélectrique est nettement prépondérant pour des photons  $\gamma$  de faible énergie et dans les matériaux plus lourds [20]. La création de paire est l'effet principal pour les photons de haute énergie (entre 5 et 10 Mev).

L'Effet Compton est systématiquement le mode principale d'interaction pour des photons d'énergie comprises entre 1 et 5Mev, pour des énergies plus basses, l'effet Compton prédomine seulement pour les matériaux légers (tissus biologiques).

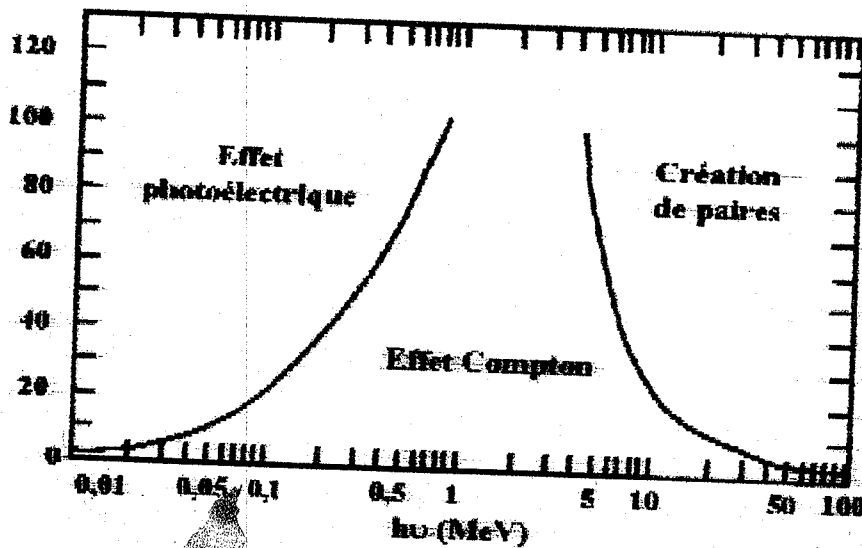


Figure II.9: Domaine de prédominance des 3 effets

### II.3: Loi d'atténuation des photons

#### II.3.1 Sections efficaces d'interactions

A chacun de ces modes d'interaction est associé une section efficace, qui dépend de l'énergie des photons incidents et du numéro atomique  $Z$  du matériau traversé [52].

- Le processus photoélectrique:

L'effet photoélectrique est prédominant pour des photons de basse énergie ( $< 100\text{Kev}$ ) et dans les matériaux de numéro atomique élevé [20,50] (figure II.9).

C'est ce qui explique l'utilisation de matériaux à  $Z$  élevée tel que le plomb pour la protection contre les rayonnements gamma [20].

La section efficace pour cet effet est de la forme [52]:

$$\sigma_c = \frac{8\pi r_0^2}{3} \cdot \frac{Z^2}{(137)^4} \cdot 4\sqrt{2} (\alpha)^{-7/2} \quad (\text{II.10})$$

Avec

$$\alpha = \frac{E_\gamma}{E_0}$$

Où:

$Z$  : le numéro atomique de la cible.

$E_\gamma$  : L'énergie du photon incident ( $=h\nu$ ).

$E_0$  : L'énergie d'électron au repos.

$r_0$  : rayon classique d'électron ( $=2,818 \text{ fm}$ ).

D'une façon générale:

$$\sigma_{ph} \propto \frac{Z^n}{E_\gamma^3} \quad (\text{II.11})$$

Où

$n$ : varie de 4 à 5 [20].

Pour un élément donné, l'effet photoélectrique diminue lorsque l'énergie du photon incident augmente (Figure II.9).

- **Processus Compton**

La section efficace de diffusion Compton prend en compte l'ensemble des électrons, elle est de la forme [52]:

$$\sigma_c = 2\pi r_0^2 Z^2 \cdot \frac{\alpha^2 + 2\alpha}{2\alpha^3} \cdot \ln(1+2\alpha) + \frac{\alpha^3 + 9\alpha^2 + 8\alpha + 3}{\alpha^2(1+\alpha)} \quad (\text{II.12})$$

La probabilité pour qu'un photon interagisse avec un atome est proportionnelle au nombre d'électrons  $Z$  [20]. Pour un matériau donné, cette probabilité est proportionnelle à la densité d'électrons, or la masse atomique  $A$  est approximativement proportionnelle au numéro atomique  $Z$ . L'effet Compton, pour une énergie donnée, est donc approximativement proportionnel à la densité du matériau.

$$\sigma_c \propto \frac{Z}{E} \quad (\text{II.13})$$

- Processus de matérialisation

La section efficace pour la création de paire est:

$$\sigma_{pair} = \alpha r_0^2 Z^2 \left[ \frac{28}{9} \log\left(\frac{2E_\gamma}{E_0}\right) - \frac{218}{27} \right] \text{ si } 2E_0 < E_\gamma < \frac{E_0}{\alpha} Z^{-1/3} \quad (\text{II.14})$$

$$\sigma_{pair} = \alpha r_0^2 Z^2 \left[ \frac{28}{9} \log(183 \cdot Z^{-1/3}) - \frac{2}{27} \right] \text{ Si } E_\gamma > \frac{E_0}{\alpha} \times Z^{-1/3} \quad (\text{II.15})$$

Ainsi L'interaction des photons avec la matière a comme section efficace la somme de toutes les sections efficaces des différents processus. Elle est donnée par [50]:

$$\sigma_{tot} = \sigma_{ph} + \sigma_c + \sigma_{pair} \quad (\text{II.16})$$

### II.3.2: Coefficient d'atténuation d'un faisceau de photons

L'absorption des photons dans la matière dépend de la nature du milieu ainsi que de l'énergie du photon incident.

La loi d'atténuation des photons s'exprime par le coefficient d'atténuation qui présente la fraction des photons incidents interagissant par unité de longueur. Ce coefficient tient compte des sections efficaces des trois processus de pertes d'énergie. Ainsi, pour  $N_0$  photons incidents, le nombre  $N$  de photons qui traversent une épaisseur  $x$  de matériau sans interagir est donné par la relation suivante:

$$N(x) = N_0 e^{-\mu x} \quad (\text{II.17})$$

Avec:

$\mu$ : représente le coefficient d'atténuation linéaire qui est proportionnel à la section efficace d'interaction:

$$\mu = n \sigma_{tot} \quad (\text{II.18})$$

Où :

$n$ : représente le nombre de noyaux ou d'électrons atomiques par  $\text{cm}^3$ .

$$n = \frac{N_A \rho}{M} \quad (\text{II.19})$$

Avec

$N_A$ : le nombre d'avogadro.

$\rho$ : La densité et  $M$ : la masse molaire.

$\mu$  a la dimension inverse d'une longueur, il augmente quand  $Z$  augmente et diminue quand l'énergie du rayonnement augmente [52].

L'intensité du rayonnement électromagnétique décroît exponentiellement en fonction de l'épaisseur de la matière traversée. Pour chacune des interactions mentionnées précédemment, on peut définir un coefficient d'atténuation particulier, la somme de ces coefficients est égale au coefficient global:

$$\mu = \tau(\text{photoélectrique}) + \sigma(\text{compton}) + \kappa(\text{pair}) \quad (\text{II.20})$$

L'utilisation du coefficient d'atténuation  $\mu$  est limitée par le fait qu'il change avec la densité de l'absorbant quoique ce dernier soit le même.

On définit alors un coefficient massique d'atténuation  $\mu_m$  qui est beaucoup plus largement utilisé, donné par:

$$\mu_m = \mu / \rho \quad (\text{II.21})$$

$\mu_m$ : à la dimension d'une surface par unité de masse ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ).

Pour une énergie gamma donnée le coefficient d'atténuation massique ne change pas avec l'état physique de l'absorbant. Par exemple il est le même pour l'eau s'il présente sous forme liquide ou de vapeur [20].

Exemple:

Les figures II.10, II.11 représentent respectivement la variation du coefficient d'atténuation massique en fonction de l'énergie dans le plomb et dans l'aluminium.

Les coefficients pour l'effet photoélectrique  $\frac{\mu_e}{\rho}$ , l'effet Compton  $\frac{\mu_c}{\rho}$  et l'effet de paires sont indiqués séparément.

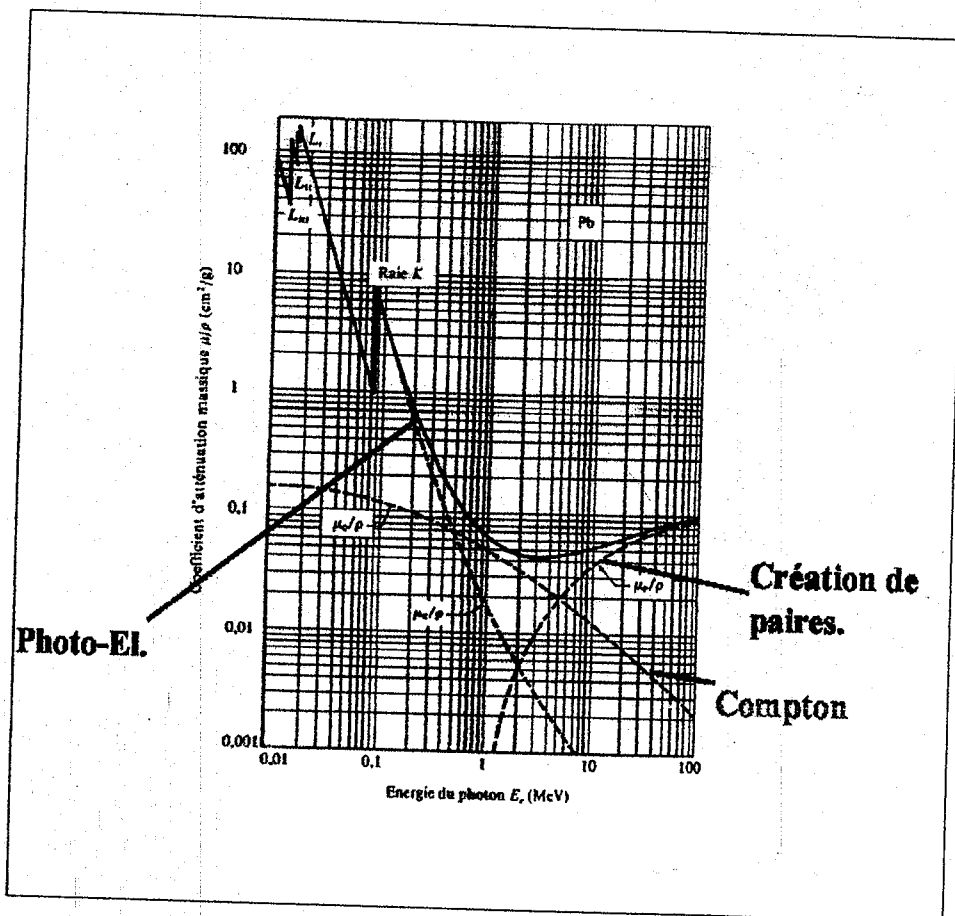


Figure II.10 : le coefficient d'atténuation massique pour les rayons gamma dans le plomb en fonction de l'énergie du rayonnement gamma.

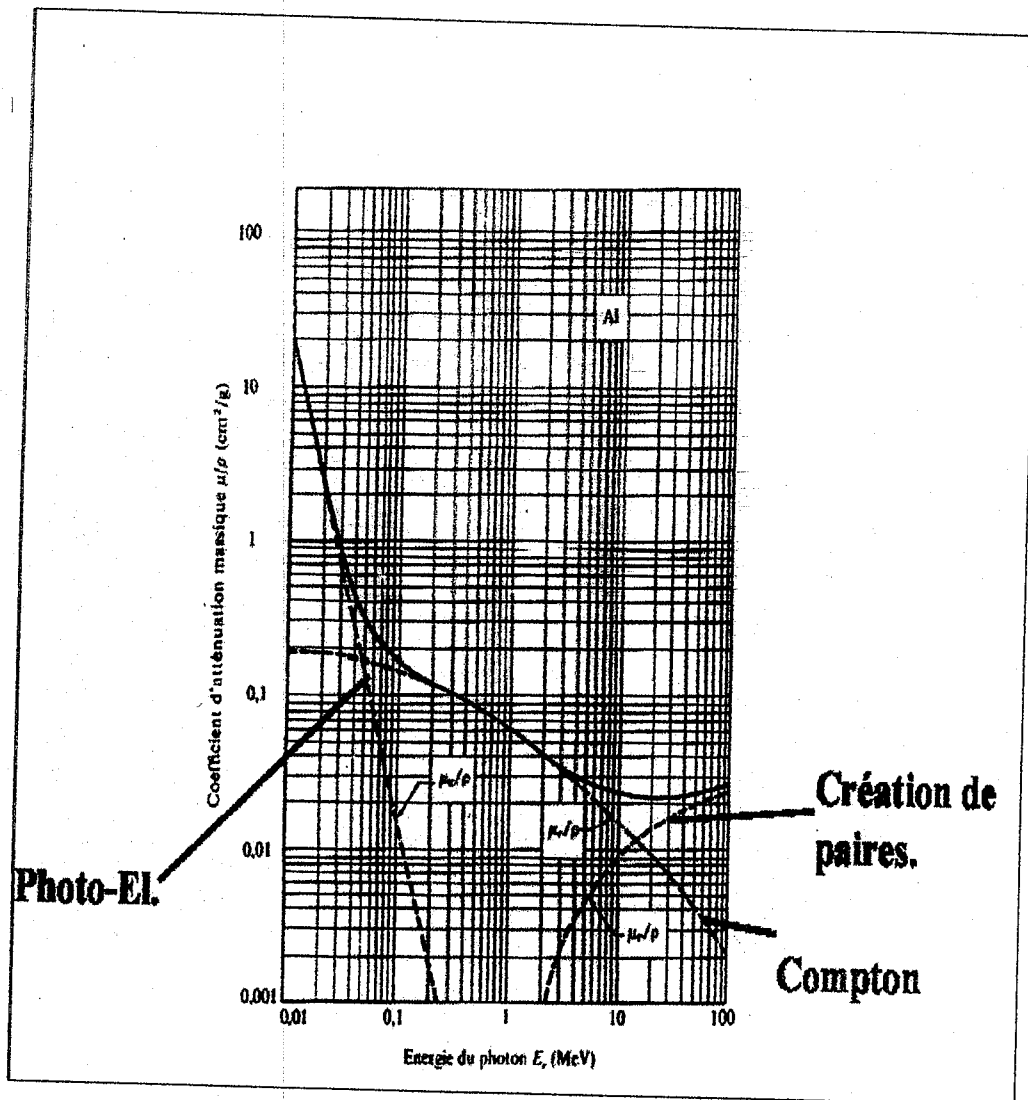


Figure II.11 : le coefficient d'atténuation massique pour les rayons gamma dans l'Aluminium en fonction de l'énergie du rayonnement gamma.

Les discontinuités pour le plomb correspondent aux énergies de liaison des électrons des couches K (88 keV) et L ( $\cong$  15 keV).



## CHAPITRE 3

# MESURE DE LA RADIOACTIVITE PAR SPECTROMETRIE GAMMA

## Mesure de la radioactivité par Spectrométrie gamma

La mesure de la radioactivité naturelle ou artificielle dans les différents compartiments de l'environnement s'effectue à travers des techniques variées. ces mesures s'effectuent soit sur site en utilisant un matériel portable, soit au laboratoire après un prélèvement d'échantillon, et peuvent nécessiter une analyse qualitative et (ou) quantitative selon le but recherché.

La mesure qualitative repose principalement sur l'identification des radioéléments présents dans l'échantillon, elle peut être utilisée dans le cas où on s'intéresse à l'évaluation de l'activité totale et pas de la précision de la mesure.

La mesure quantitative permet en plus de l'identification des radioéléments, la détermination de la concentration de chaque radioélément à l'aide des techniques spectrométriques qui sont basées sur le traitement des spectres énergétiques des différents radioéléments.

Pour les rayonnements  $\gamma$ , il est possible d'effectuer une étude spectrométrique qui permet à partir des énergies émises, d'identifier les différents radioéléments.

### III.1: Technique de spectrométrie gamma:

La spectrométrie gamma est une méthode de mesure relativement simple permettant la mesure non destructive des radioéléments émetteurs gamma des différentes matrices de l'environnement [53].

Elle a l'avantage de permettre aussi bien l'identification que la quantification des radioéléments présents dans l'échantillon considéré [53,54].

Elle permet la détermination simultanée d'un éventail de radionucléides émetteurs gamma d'origine naturel et synthétiques [55].

Cette méthode offre un outil d'analyse performant pour effectuer des mesurages environnementaux, elle permet de doser en une seule mesure l'ensemble des radioéléments émetteurs  $\gamma$  d'énergie  $> 20$  keV pour le germanium et  $> 50$  keV pour le détecteur NaI(Tl) [53].

### III.1.1: Les détecteurs utilisés en spectrométrie gamma:

La détection et la mesure des rayonnements est un vaste problème, délicat, souvent difficile. Le détecteur idéal et universel n'existant pas [50], on doit toujours chercher un compromis pour utiliser celui qui apparaît le mieux approprié pour une mesure particulière. Ce choix va dépendre du but ultime de la mesure (simple comptage, mesure d'énergie...), du type de rayonnement et de son énergie. Seule une connaissance approfondie des mécanismes d'interaction des rayonnements avec la matière, du principe de fonctionnement des divers détecteurs et des possibilités de l'électronique associée permet de définir la chaîne d'analyse la mieux adaptée [56].

Les détecteurs ne sont sensibles qu'aux particules chargées, dans le cas de particules neutres, ici les photons  $\gamma$ , le détecteur doit en plus assurer leur conversion en particules chargées avec la plus grande efficacité possible [50].

Le principe d'une chaîne de détection gamma est de convertir chaque photon en un signal mesurable, proportionnel à l'énergie du photon incident.

On peut distinguer principalement deux types de détecteurs d'après leurs principes de fonctionnement: ceux pour lesquels le signal est élaboré à partir des ionisations de la matière (cas de détecteur à semi-conducteur) et ceux pour lesquels on utilise les excitations (cas des détecteurs à scintillations) [57].

Mais, avant d'aborder leur étude, il est nécessaire d'avoir une bonne connaissance des principales caractéristiques d'un détecteur.

- Propriétés d'un détecteur

#### a- La résolution en énergie:

La qualité d'une chaîne de spectrométrie est donnée par sa résolution, c'est-à-dire sa possibilité de différencier entre deux pics d'énergies voisines.

La résolution est définie par la largeur de l'impulsion à mi-hauteur et dépend du type de détecteur ainsi que de l'énergie considérée. Elle est souvent exprimée en pourcentage comme l'indique l'équation suivante [20]:

$$R (\%) = \frac{FWHM}{H} \times 100$$

Où:

*FWHM* : est la largeur à mi-hauteur.

*H* est la hauteur de l'impulsion.

**b- L'efficacité (ou rendement de détection) :**

Parmi toutes les particules émises par la source, une fraction seulement arrive dans le détecteur, et, parmi celles-ci, toutes n'interagissent pas dans son volume utile (cas des photons en particulier) [50]. pour accéder au nombre de particules émises par la source, il faut donc connaître l'efficacité du détecteur utilisé pour les particules détectées.

- **Définition:**

L'efficacité d'un instrument définit sa capacité à délivrer un signal par rapport à la quantité de particules présentes dans le champ de radiations [58].

On distingue:

- **L'efficacité absolue ( $\epsilon_{abs}$ ):** elle s'exprime par le rapport du nombre d'impulsions enregistrées par l'instrument ( $N_{imp}$ ) sur le nombre de particules émises par la source ( $N_{ém}$ ) [20].

$$\epsilon_{abs} = \frac{N_{imp}}{N_{ém}}$$

- **L'efficacité intrinsèque:** elle s'exprime par le rapport du nombre d'impulsions enregistrées par l'instrument ( $N_{imp}$ ) sur le nombre de particules incidents ( $N_{inc}$ ) sur le détecteurs (càd arrivant sur le détecteurs).

$$\epsilon_{int} = \frac{N_{imp}}{N_{inc}}$$

Souvent on ne s'intéresse qu'à la surface des pics. on parle alors d'efficacité au pic (absolue ou intrinsèque) [50].

L'efficacité de détection dépend de la géométrie du détecteur et de sa forme, elle dépend également de la distance entre la source et le détecteur, et de l'angle solide sous tendu par le détecteur vue depuis la source [24].

Elle est généralement calculée à partir d'une source standard tout en se plaçant dans les mêmes conditions de mesure que celle de l'échantillon à mesurer (volume, densité..) [53,24].

Les détecteurs de grand volume présentent un rendement de détection plus élevé que celui de petit volume.

### **C-Le temp mort:**

C'est le temps minimal entre deux événements successifs pour que l'on puisse réellement observer deux signaux [20].

#### **III.1.1.1: Les détecteurs à semi-conducteur:**

Les détecteurs utilisant des semi-conducteurs ont commencé à apparaître au début des années 1960. d'abord réservés à la spectroscopie alpha, les progrès technologique ont permis d'étendre leur application à la spectroscopie gamma de haute résolution et il sont devenus d'un emploi assez universel [50].

Ces détecteurs sont en fait de simples chambres d'ionisation dont le milieu actif est constitué d'un cristal semi-conducteur.

On distingue 2 types de cristaux semi-conducteurs différents :

Le type n prédominé par les porteurs de charge négatives (électrons) et le type p par les porteurs positives (trous). l'association de ces deux cristaux (n et p) forme une jonction p-n, entre laquelle règne un champ électrique sur une faible épaisseur appelé zone de déplétion ou zone sensible.

Lorsqu'une particule interagit avec le cristal, elle crée par ionisation des paires électron-trou, qui après collection, donnent lieu à une impulsion relativement rapide (de l'ordre de la microseconde) et de hauteur proportionnelle à l'énergie reçue [59].

Le potentiel d'ionisation (de 2 à 3 ev) étant pour ce type de détecteur beaucoup plus faible que par exemple pour un détecteur à scintillation, il possède en général une résolution en énergie beaucoup plus élevée.

Actuellement, les détecteurs à semi-conducteurs les plus répandus sont en germanium Ge(li) ( $Z = 14, \rho = 5.68 \text{ g/cm}^3$ ) ou en silicium Si(li) ( $Z = 32, \rho = 2.33 \text{ g/cm}^3$ ) [51].

Ils possèdent en effet un certain nombre d'inconvénients, comme par exemple une faible efficacité de détection et la nécessité de travailler, pour certains, à une très basse température pour ramener le bruit thermique à un niveau raisonnable [59].

La figure suivante présente un exemple caractéristique du détecteur germanium. Le détecteur, pour être conservé à basse température, est en contact avec une canne plongeant dans une réserve d'azote liquide (Dewar). Pour éviter la condensation, le détecteur est placé dans une enceinte sous vide. L'ensemble constitue le cryostat. Face au détecteur, on ménage une fenêtre en matériau aussi mince et aussi peu absorbant que possible. C'est souvent une mince feuille d'aluminium (0,5 mm) pour les gros détecteurs utilisés en spectroscopie  $\gamma$ , mais parfois une fenêtre aussi mince que 6  $\mu\text{m}$  de béryllium [50].

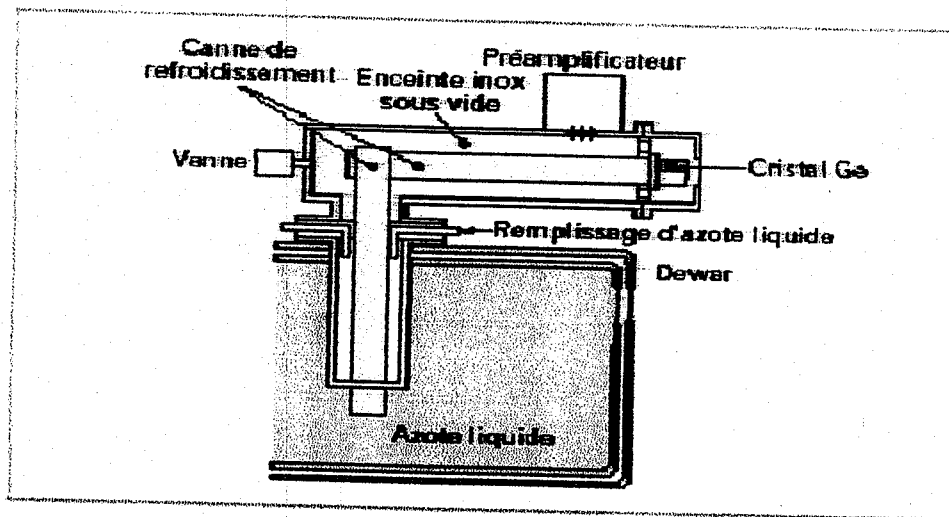


Figure III.1 : principe d'un détecteur Ge utilisé en spectroscopie gamma [50].

La technologie actuelle a permis l'obtention de gros cristaux de germanium de haute pureté Ge(Hp) qui peuvent en principe être stockés à la température ambiante [51]. Ces détecteurs remplacent de plus en plus les détecteurs Ge (li) et Si (li) de petit volume [50], et c'est ce genre de détecteur qui est utilisé dans notre présente étude.

- **Résolution:**

Une caractéristique dominante de toute cette classe de détecteurs est leur excellente résolution en énergie comparée à celle des scintillateurs. Pour cette raison, les détecteurs semi-conducteurs sont pratiquement les seuls utilisés actuellement pour la spectroscopie fine dans le domaine gamma [50].

Pour ces détecteurs, la largeur à mi-hauteur est typiquement fournie pour des énergies de 122 keV ( $^{57}\text{Co}$ ) et 1,33 MeV ( $^{60}\text{Co}$ ). Elles varient respectivement entre 800 eV et 1, 2 keV d'une part et entre 1,75 keV et 2,2 keV d'autre part selon le volume du détecteur.

• Efficacité :

À cause du numéro atomique relativement faible du germanium et du petit volume de ces détecteurs (souvent de l'ordre de  $10\text{ cm}^3$ ), l'efficacité est très faible.

En effet, elle ne dépasse pas, pour les plus gros d'entre eux, un dixième de celle d'un scintillateur NaI de 3 in de diamètre par 3 in d'épaisseur pour le pic d'absorption totale de la raie gamma 1, 33 MeV de  $^{60}\text{Co}$ .

III.1.1.2: Les détecteurs à scintillations:

Ce type de détecteurs de rayonnement gamma utilisent, pour l'élaboration du signal, l'excitation du milieu traversée. le nombre de désexcitations produites le long de la trajectoire d'une particule est proportionnel à l'énergie perdue par cette particule [20]. ils comprennent un milieu scintillant, associé à un tube photomultiplicateur, qui permet de compter les photons de désexcitation [50].

Le schéma d'un détecteur à scintillation est donné par la figure suivante:

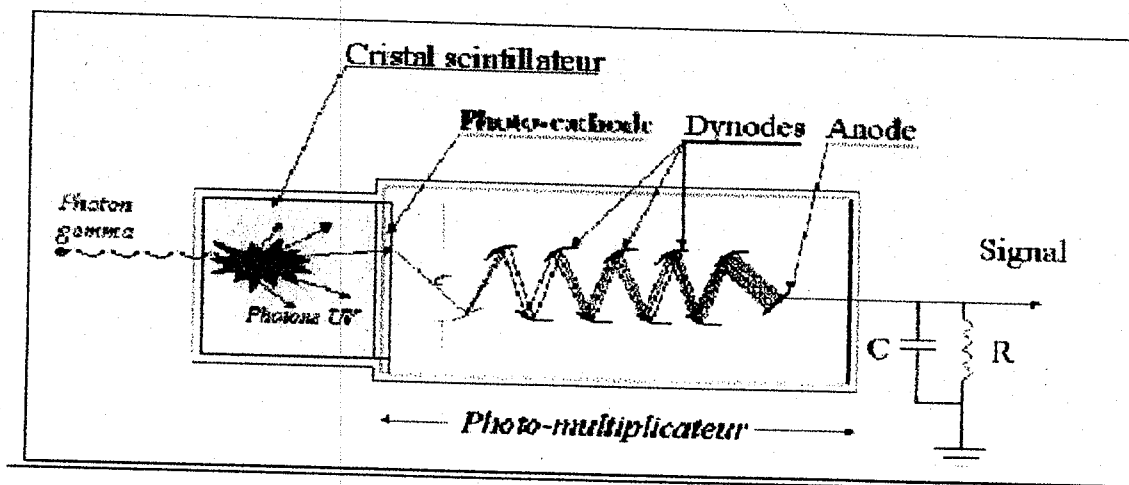


Figure III-2 : principe de fonctionnement d'un détecteur NaI (TI).

a-Le scintillateur:

Le scintillateur est constitué par un milieu solide ou liquide dans lequel se déroulent deux phénomènes distincts:

### Chapitre III : Mesure de la radioactivité par spectrométrie gamma

- Absorption de l'énergie du rayonnement (photon gamma par exemple) amenant des excitations des atomes ou molécules du milieu.
- Emission de photons (scintillation) lors de la désexcitation.

La quantité de lumière émise est proportionnelle à l'énergie absorbée dans le cristal. Le choix d'un scintillateur est guidé par son rendement lumineux, c'est-à-dire par son aptitude à transformer l'énergie du rayonnement incident en énergie lumineuse, il devra donc avoir fort pouvoir d'absorption pour le rayonnement gamma détecté, avoir un bon coefficient de scintillation et transmettre un maximum de photons lumineux vers le photomultiplicateur [59].

Il doit en plus assurer la transformation photon → électrons avec la plus grande efficacité possible [50].

Les principales caractéristiques de ces cristaux sont reportées dans le tableau suivant:

**Tableau III.1: principales caractéristiques des scintillateurs.**

Principales caractéristiques des scintillateurs					
Matériau	Longueur d'onde d'émission (nm)	Durée de vie (μs)	Indice de réfraction	Masse volumique (g · cm <sup>-3</sup> )	Efficacité γ relative à NaI(Tl) (1)
NaI(Tl)	410	0,23	1,85	3,67	100
CsI(Nb)	420	0,63	1,84	4,51	85
CsI(Tb)	565	1,0	1,80	4,51	45
<sup>6</sup> LiI(Eu)	470-485	1,4	1,96	4,08	35
ZnS(Ag)	450	0,20	2,36	4,09	130
CaF <sub>2</sub> (Eu)	435	0,9	1,44	3,19	50
Bi <sub>4</sub> Ge <sub>3</sub> O <sub>12</sub>	480	0,03	2,15	7,13	8
CsF	390	0,005	1,48	4,11	5

(1) L'efficacité γ correspond à l'intensité de la lumière émise par le milieu scintillant comparée à celle de NaI.

L'iodure de sodium activé au thallium (0.1%), est le plus ancien scintillateur connue (vers 1950). C'est le scintillateur qui a le meilleur rendement lumineux et la présence d'iode le rend très efficace pour la détection des photons [50]. Cependant ces cristaux sont assez fragiles et hygroscopiques ce qui oblige à les enfermer dans une enceinte hermétique.



**b- Le photomultiplicateur:**

Le tube photomultiplicateur est un organe essentiel du détecteur, il s'agit d'une ampoule de verre contenant principalement une photocathode, un dispositif multiplicateur d'électrons qui est constitué par les dynodes et une anode.

Son rôle est de transformer les photons de scintillation qu'il reçoit en un signal exploitable et dont la hauteur soit proportionnelle à l'énergie perdue par la particule détectée.

Le photomultiplicateur remplit deux fonctions bien distinctes:

D'abord il transforme les photons de scintillation en électrons (c'est le rôle de la photocathode) puis il multiplie ce nombre d'électrons (c'est le rôle de la structure multiplicatrice). à la sortie du PM, on recueille donc des charges en nombre proportionnel au nombre de photons de scintillations donc à l'énergie de la particule, ensuite un système, transforme ce flux d'électrons en une impulsion [61].

Les différents constituants classiquement rencontrés dans les tubes photomultiplicateurs sont schématisés dans La figure III.2.

En arrivant dans le PM, les photons émis par le cristal sont recueillis par la photocathode, certains d'entre eux sont absorbés et donnent un nombre de photo-électron (environ 1 électron pour 4 ou 5 photons incidents) qui est proportionnel à l'énergie perdue par la particule détectée. une fois que les électrons sont émis par la Photocathode, ils sont accélérés et focalisés sur une première électrode (dynode) qui utilise le phénomène d'émission électronique secondaire selon lequel une partie de l'énergie perdue par un électron frappent une surface sert à éjecté plusieurs électrons secondaires. ce processus est ensuite répété sur les différents étages de dynodes [61,62]. les électrons sont alors collectés sur l'anode ou ils donnent naissance à une impulsion électrique. l'électronique d'acquisition viendra donc lire une charge.

- **Résolution du scintillateur:**

Le scintillateur est un détecteur de moyenne résolution, tout à fait dépassé à l'heure actuelle pour la spectroscopie gamma à haute résolution. Par convention, les scintillateurs utilisés en spectroscopie gamma sont comparés par leur résolution sur le pic d'absorption totale de la transition de 661 keV de  $^{137}\text{Cs}$ . Les meilleures chaînes permettent d'avoir une résolution de 6 à 7 % à cette énergie. Cela représente une

largeur à mi-hauteur de 40 à 50 keV à cette énergie et interdit l'observation de transitions proches en énergie [50].

- **L'efficacité:**

Les scintillateurs sont caractérisés par une haute efficacité comparée à celle des semi-conducteurs.

Elle est habituellement donnée pour le pic de  $^{137}\text{Cs}$ , d'énergie gamma 662 keV. Elle dépend fortement du nombre atomique efficace du scintillateur [24].

Le rendement de détection (ou de comptage) augmente avec l'utilisation de scintillateur de grandes dimensions [62].

Le tableau ci-après donne le rendement de comptage obtenu avec des cristaux de NaI(Tl), en fonction de leurs dimensions et de l'énergie de rayonnement.

**Table III.2: rendement de comptage.**

Dimension du cristal	2 × 2	1 × 1
Energie(keV)		
0.3	95%	80%
0.66	75%	50%
1.3	60%	37%
2.6	50%	30%
4.5	48%	28%

### III.1.2: L'électronique de détection et d'acquisition:

La figure III.3 montre la disposition des différents sous-ensembles d'une chaîne de spectrométrie gamma.

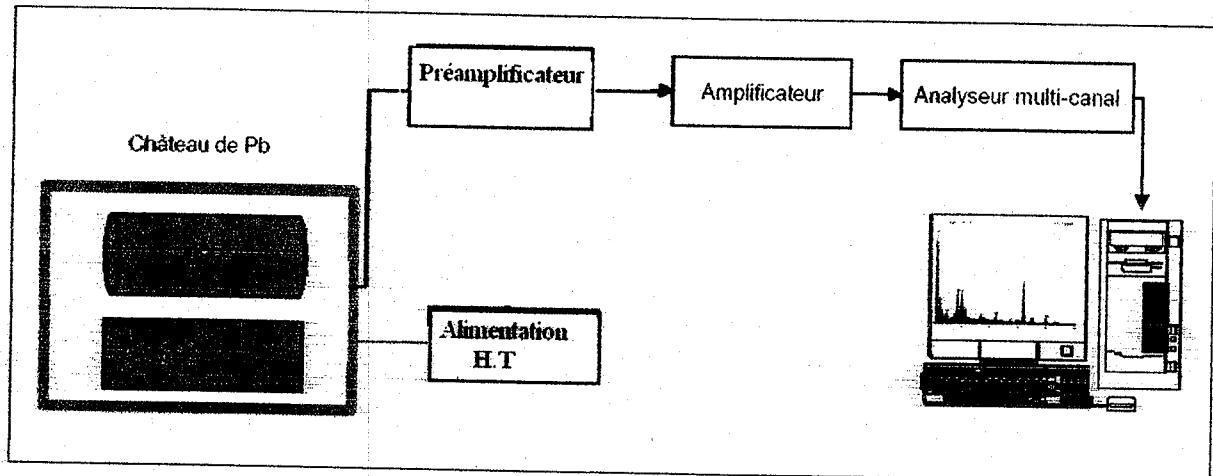


Figure III.3: l'électronique de détection d'une chaîne de spectrométrie gamma.

Ceux-ci peuvent être agencés d'une façon modulaire ou être intégrés dans un même appareil.

- **Le préamplificateur**

L'électronique de détection fournit un signal électrique d'amplitude proportionnel à l'énergie cède au détecteurs. le détecteurs peut être présenté comme une capacité à l'intérieur de laquelle vient se déposer une charge. la polarisation du détecteurs, obtenue grâce à la haute tension fournit une différence de potentiel qui facilite la collection de cette charge. la chute de tention à travers une résistance fournit une impulsion électrique qui va être détectée par le préamplificateur et qui est proportionnelle à l'énergie déposés sur le détecteurs [51].

Le préamplificateur amplifie initialement ces impulsions pour qu'elles puissent être discriminées du bruit électronique.

Il doit impérativement placé le plus près possible du détecteur afin d'éviter les pertes de signal engendrés par les câbles de liaison reliant le préamplificateur à l'amplificateur [50].

- **L'amplificateur**

A la sortie du préamplificateur, on a un signal dont l'amplitude est encore relativement faible (une dizaine de mV par MeV). Il est donc indispensable d'amplifier ces signaux, le gain de l'amplificateur doit donc être élevé.

D'une manière générale quand un amplificateur reçoit une impulsion d'une forme déterminée, il produit une impulsion de même allure et forme, mais d'amplitude plus grande comme il est indiqué dans le schéma suivant :

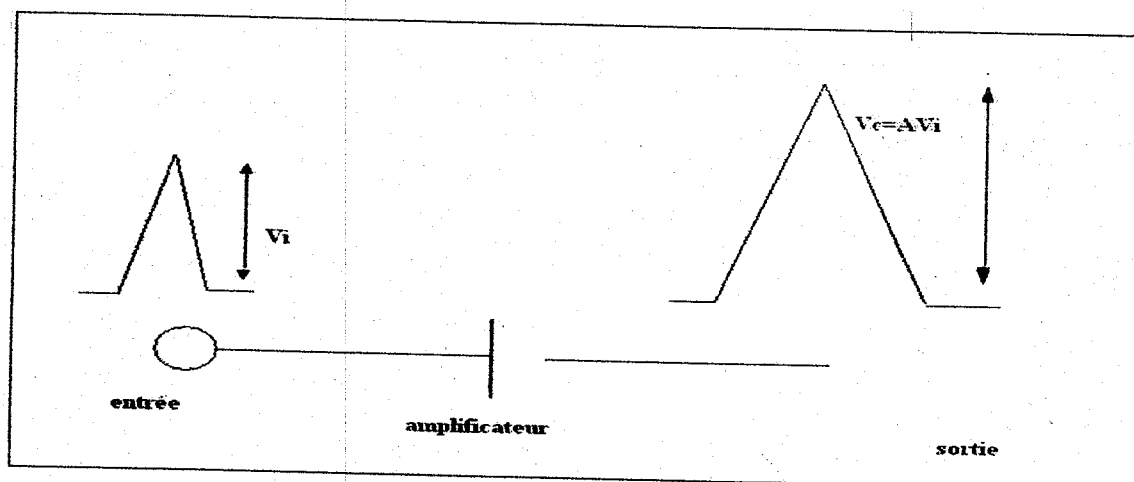


Figure III.4 principe d'un amplificateur.

- **convertisseur analogique digital ou codeur:**

Il convertit les signaux analogiques venant de l'amplificateur en signaux logiques (numériques).

L'analyse du signal est fondée sur une conversion amplitude-temps puis une conversion temps-numériques. L'amplitude du signal issu de l'amplificateur sert à charger une capacité qui ensuite se décharge linéairement avec le temps. La durée de décharge, proportionnelle à l'amplitude du signal est mesurée avec un générateur d'impulsion de fréquence élevée (de 50 à 500 MHz). Lors du codage, le système est paralysé pendant une durée égale à la conversion de la valeur crête d'une impulsion en valeur numérique.

A cette durée s'ajoute un temps mort fixe correspondent aux fonctions d'inspection d'entrer et de stockage de l'impulsion [51].

Le codeur fournit une suite de valeurs numériques et non plus analogiques à l'unité de traitement.

- **l'unité de traitement:**

IL est destiné à établir automatiquement le classement d'événements codés dans un bloc mémoire.

L'unité de traitement comporte un ensemble de mémoires appelées canaux. le contenu de chacune d'elles est augmenté d'une unité à chaque réception d'une valeur correspondante, c'est le rôle de l'analyseur multi-canal.

On a ainsi une distribution du nombre d'événements en fonction de leur énergie, c'est à dire le spectre.

En pratique, des valeurs de 1024 canaux avec un détecteurs NaI et de 4096 canaux avec un détecteur Ge sont utilisées et permettent d'obtenir des spectres de qualité compte tenu des performances de ce type de détecteurs (résolution en particulier) [51].

### **III.1.3:Le Bruit :**

En raison des rayonnements cosmiques qui bombardent sans interruption l'atmosphère, et l'existance de la radioactivité naturelle dans l'environnement, tous les détecteurs de rayonnement indiquent la présence d'un certain bruit dans les signaux.

La nature de ce bruit change considérablement avec la taille et le type du détecteur et avec l'ampleur de l'armature qui peut être placé autour de lui [20].

#### **III.1.3.1: sources du bruit :**

Il existe plusieurs sources de rayonnement de fond parmi lesquelles on site:

- la radioactivité naturelle des matériaux constitutifs du détecteur lui-même, certains matériaux tel que le verre du pyrex contiennent le potassium et du thorium comme constituant normal et présente donc un niveau de fond élevé.
- Les rayonnement ambiant provenant de la surface de la terre, de l'immeuble abritant le laboratoire, ou d'autres structures lointains. L'uranium, le thorium

et le radium ainsi que le  $^{40}\text{K}$  constituent la principale sources qui contribue à ce rayonnement.

- la radioactivité naturelle des équipements secondaires (auxiliaires) du détecteur, des supports, et du blindage placée au voisinage du détecteur.
- Les composantes primaires et secondaires du rayonnement cosmique.
- la radioactivité dans l'air entourant le détecteur, une quantité mesurable de fond peut provenir avec la radioactivité porté par l'air ambiant, sous forme de traces de gaz tel que le radon, ou de particules radioactifs de la poussière [63].

Parmi ces sources la radioactivité ambiante représente la principale source qui contribue le plus à l'augmentation du bruit de fond surtout aux faibles énergies. pour réduire sa contribution, le détecteur est montée dans une chambre blindée et un endroit bien approprié en effet, l'effet du blindage diminue le bruit de fond de la radioactivité ambiante, mais il ne peut jamais être totalement éliminé [20].

CHAPITRE 4:  
PARTIE EXPERIMENTALE

## Partie expérimentale

La méthode d'analyse mise en œuvre consistait en une mesure sélective des diverses émissions  $\gamma$  issus des échantillons, la détection et la séparation des photons gamma d'énergies différentes étant obtenues grâce à l'usage de détecteurs de germanium Ge (Hp) et à scintillation NaI (TI) (2 x 2 et 3 x 3).

Les analyses spectrométriques que nous avons effectuées avaient pour objectifs l'identification des éléments radioactifs, existant dans les échantillons et donc dans l'environnement, ainsi que la classification de ces éléments selon leur famille radioactive, par conséquent ces analyses permettent d'étudier les échantillons qualitativement.

Dans ce chapitre sont présentés les détails concernant les prélèvements, la préparation, les conditions expérimentales, la mesure et l'analyse des échantillons collectés.

### IV.1: Choix des radioéléments à identifier

Le but essentiel de notre étude est l'évaluation de la radioactivité d'origine naturelle et artificielle présente dans les échantillons pris dans l'environnement et en particulier dans le ciment, clinker, bentonite et le calcaire qui sont des matières qui nous entoure et sont en contact direct avec la population, les animaux et la végétation.

- Pour la radioactivité naturelle, la majorité des émetteurs gamma proviennent du:

$^{40}\text{K}$  et des familles de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$  dont les plus importants

sont :

$^{212}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$  et  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{227}\text{Th}$ .

- Pour ce qui est de la radioactivité artificielle, on s'est intéressé au  $^{137}\text{Cs}$ , qui se fixe dans les couches superficielles du sol tout en se concentrant en quantité lui permettant d'être détecté.

Ces différents radioéléments apparaissent sous forme de pics d'énergie distinctes, certains plus intenses que d'autres, selon que leurs probabilité d'émission est grande.



## IV.2: Echantillons étudiés

Nous avons effectués nos mesure sur quatre échantillons qui sont: ciment, clinker, bentonite et le calcaire.

### a-Prélèvements:

Le prélèvement a été fait sur deux sortes d'échantillons:

- La collecte des échantillons à l'état naturel tel que:

La bentonite prélevée de la région de Hammam Boughrara, Maghnia.

Le calcaire, prélevé de l'unité de sidi Bel Abess, montagne de Tenouchfi au sud de Rarouba.

- La collecte des échantillons fabriqué tel que:

Le ciment et le clinker qui ont été prélevé à la cimenterie de Béni Saf.

### b-Identification des échantillons:

- **Le ciment**

Le ciment est une substance minérale artificielle, fabriqué à partir d'un mélange d'argile (25%) et de calcaire (75%) broyé, que l'on calcine, cette opération dégage 50% en production sous forme de  $\text{CO}_2$  dans l'atmosphère et que l'on cuit pour donner un clinker avant d'être réduit en une poudre fine et est mélangé avec les ajouts naturels tel que le gypse, le calcaire, la pouzzolane et divers autre constituants qui donnent les différents types de ciments [64].

Les composés actifs du ciment sont des silicates tricalciques  $3 \text{CaO}, \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_3\text{S}$ ) bicalciques  $2\text{CaO}, \text{SiO}_2$  ( $\text{C}_2\text{S}$ ), et des aluminates tricalciques  $3\text{CaO}, \text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\text{C}_3\text{A}$ ).

- **Clinker**

Le clinker est la base constitutive du ciment (75% à 95%), se forme à la suite d'une réaction chimique de cuisson dans un four rotatif pour former des silicates de chaux tels  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$  et  $\text{C}_3\text{A}$  [64].

- **Calcaire**

Les calcaires sont des roches sédimentaires qui constituent le sol où nous existons, et sont composées de calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), et souvent accompagnée de dolomite ( $\text{Ca}, \text{Mg}$ )  $(\text{CO}_3)_2$  et d'aragonite. Lorsqu'elle est calcinée, cette roche produite de la chaux (oxyde de calcium,  $\text{CaO}$ ) et du  $\text{CO}_2$  qui est transféré dans l'atmosphère [65].

- **Bentonite**

La bentonite se forme par altération de roches volcaniques, elle est classée parmi les argiles, est constituée principalement de montmorillonite (85%-93%) et d'autres smectites (beidelite, nontronite, saponite et hectorite), et ce, quel qu'en soit l'origine ou l'environnement dont elle provient.

La bentonite est composée de feuillets de silice et d'alumine non consolidés. Ces feuillets sont facilement séparés, ce qui favorise leur dispersion dans l'eau [65].

#### IV.3: Préparation des échantillons

Après leurs collections, les échantillons prélevés sont mis dans des sachets en polyéthylène avec des étiquettes portant les informations nécessaires. Ils sont ensuite portés au laboratoire où ils subissent une préparation préalable avant l'analyse.

Celle-ci consiste d'abord en un séchage [29,66], à l'étuve à une température de 110 °C pendant 24 h [66]. Après le séchage, les échantillons sont broyés à l'aide d'un mortier à fin de les réduire en poudre, par suite ils subissent un tamisage par un tamis de 1 mm [66], de façon à exclure les éléments gênants tel que l'herbe, les cailloux....etc, puis une pesée de la quantité tamisée obtenue et qui servira pour l'analyse.

Des quantités de 100g sont mises dans des récipients de 100 ml, ils sont par suite scellés et stockés pendant 30 jours avant le comptage, pour établir l'équilibre entre le  $^{226}\text{Ra}$  (série  $^{238}\text{U}$ ) et  $^{232}\text{Th}$  et leur produits de filiations gazeux [66,29].

#### IV.4: Description et fonctionnement des chaînes de mesure utilisés

Les chaînes de mesure utilisées, nous ont permis l'identification des isotopes tant naturels qu'artificiels présent dans les échantillons analysés, ainsi que la comparaison entre les différents spectres obtenus.

##### IV.4.1: Chaîne Ge (Hp)

Cette chaîne de spectromètre gamma se compose d'un détecteur Ge(Hp) (ORTEC-GMX-15190P), confiné dans une enceinte blindée, d'un Dewar contenant de l'azote liquide (77 K), d'une capacité (20l), d'un rack contenant l'amplificateur, le moniteur d'azote et la haute tension.

Le rack est relié à l'unité centrale d'un ordinateur par une carte " génie pc".

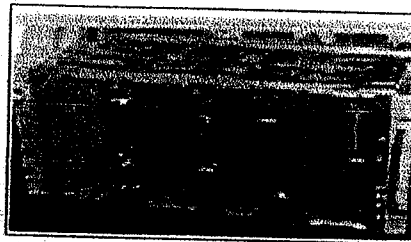


Figure IV.1: rack d'alimentation.

#### IV.4.1.1: Structure du blindage

Le détecteur est protégé des rayonnements environnant par un blindage à l'aide d'une épaisse paroi absorbante en plomb (environ 8 cm d'épaisseur).

Le château est de forme parallélépipédique comme la montre la figure IV.2.

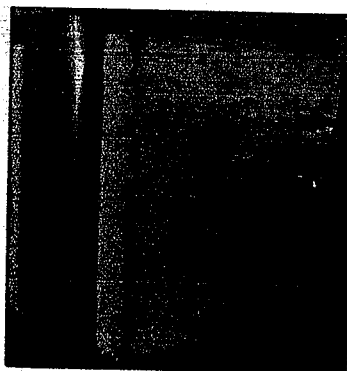


Figure IV.2: Blindage en plomb.

Le plomb constitue un bon matériel servant au blindage à cause de sa haute densité et de son numéro atomique élevé [24]. Il permet de réduire le mouvement propre, qui est due à deux origines potentielles:

- Le rayonnement naturel et
- l'interférence électronique utilisée.

En ce sens l'électronique peut influencer la détection, même en l'absence de tout rayonnement, car le compteur émet de très faibles signaux (parasites) peuvent être amplifiés et traduits en impulsions (bruit de fond) [60].

#### IV.4.1.2: Caractéristiques du détecteur Ge (Hp)

Le détecteur Ge (Hp) utilisé est coaxial ORTEC P-type (model GMX-15190P), c'est le détecteur le plus approprié pour la mesure directe des faibles activités dans les échantillons de l'environnement. Il est caractérisé par une résolution de 1.88 keV pour le pic 1.33 MeV du  $^{60}\text{Co}$  et par une efficacité relative de 15 % pour la transition  $\gamma$

d'énergie 1333 Kev  $^{60}\text{Co}$ . Son volume peut aller jusqu'à  $100 \text{ cm}^3$ . La haute tension de polarisation de ce détecteur est de 3000V, le cristal à un diamètre de 49.5 mm et une longueur égale à 52.6 mm avec une fenêtre d'entré en béryllium de 0.5 mm.

#### IV.4.1.3: Calibration en énergie de la chaîne de mesure

Avant d'entamer l'analyse des échantillons de l'environnement prélevé, nous avons procédé à la calibration de la chaîne de mesure utilisée. Cette calibration étant nécessaire, pour le bon fonctionnement des installations de mesure, et la fiabilité des résultats analytiques.

Elle s'obtient grâce à l'utilisation de sources ponctuelles standards, d'énergies donc connues [53], à partir des quelles on trace une droite de calibration, Qui nous permettra d'avoir les différentes énergies des radioéléments détectés dans les échantillons de l'environnement soumis à l'analyse.

L'objectif ici est de dériver un rapport entre la position des pics dans le spectre et l'énergie de rayon gamma correspondante.

Nous avons choisi une pente de calibration de 0.8 kev/canal, en prenant des sources ponctuelles de  $^{137}\text{Cs}$  ( $E=661.6 \text{ kev}$ ), du  $^{60}\text{Co}$  ( $E_1=1173.2 \text{ kev}$ ,  $E_2=1332.1 \text{ kev}$ ) et d' $^{152}\text{Eu}$  qui émet plusieurs raies  $\gamma$  allant de 121.78 kev à 1408.3 kev, dont les caractéristiques sont mentionnées dans le tableau suivant:

Sources utilisées	Demi-vie	Date de fabrication	Activité
$^{137}\text{Cs}$	30.0 ans	18/10/1988	$3.504 \cdot 10^4 \text{ } \gamma/\text{sec}$
$^{60}\text{Co}$	5.27 ans	19/10/1988	$4.898 \cdot 10^4 \text{ } \gamma/\text{sec}$
$^{152}\text{Eu}$	13.3 ans	30/07/1984	$0.164 \cdot 10^4 \text{ } \mu\text{Ciu}$

Le tableau suivant indique les énergies des sources étalons utilisées et les canaux correspondant.

Tableau IV.1 : Correspondance énergie canal

Energie (kev)	Canal
244.7	302
344.3	400
444	540
661.6	819
1085.9	1340
1112.1	1382
1117.24	1401
1299.2	1612
1332.5	1670
1408	1743

Les spectres de la calibration en énergie sont représentés par la figure suivante:

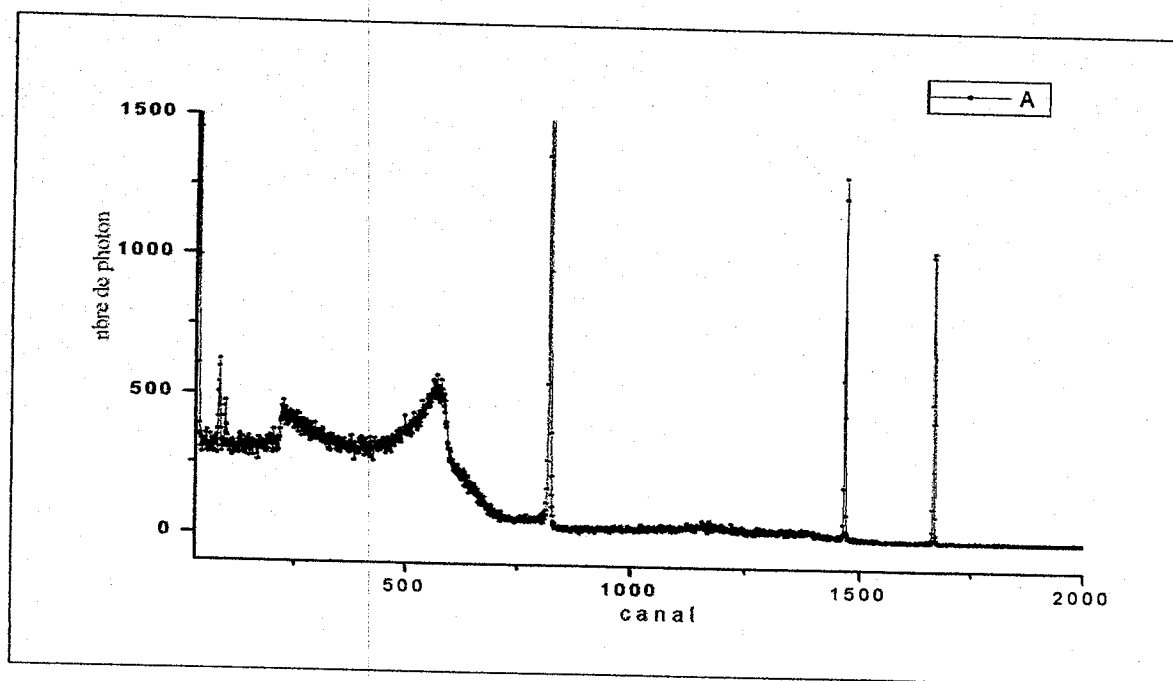


Figure IV.3 Spectre de calibration en énergie ( $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}$ ) montrant les pics utilisés pour réaliser la calibration.

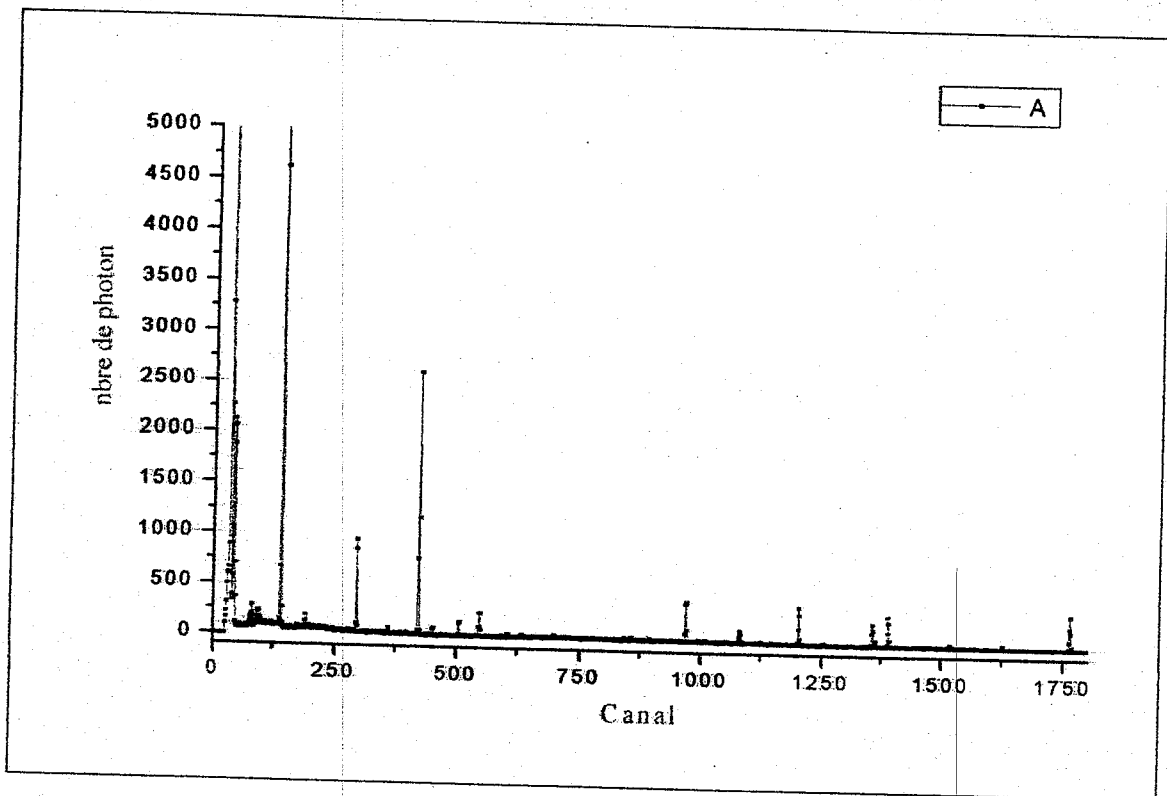


Figure IV.4: spectre de calibration en énergie (source:  $^{152}\text{Eu}$ ).

L'équation de la droite de calibration s'écrit comme suit:

$$E = A * (ch) + B$$

Tel que:

**E:** représente l'énergie du canal en Kev.

**Ch:** est le numéro du canal correspond a l'énergie E.

**A et B :** sont des constantes.

La droite de la calibration en énergie est montrée dans la figure suivante:

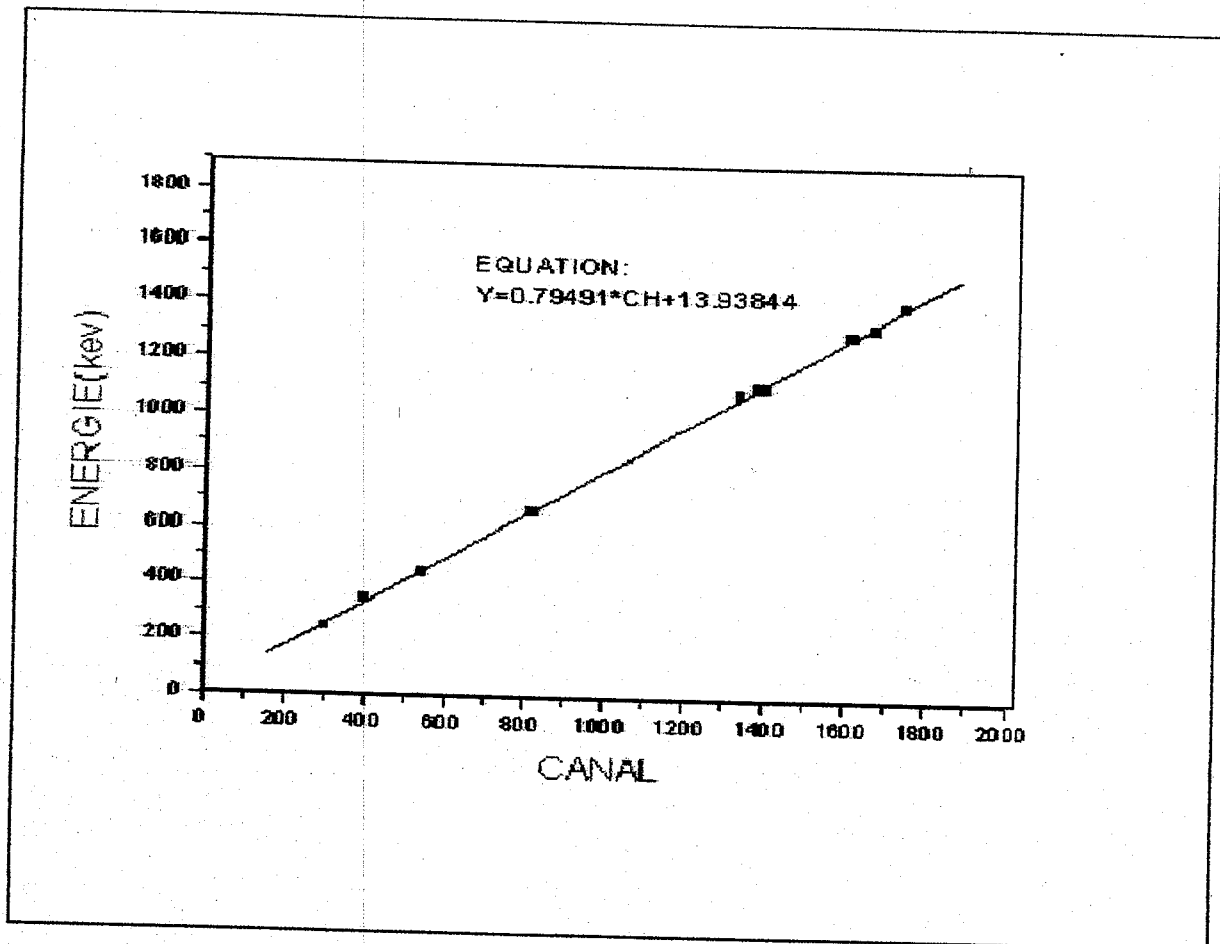


Figure IV.5 : Droite d'étalonnage de la chaîne Ge (Hp).

#### IV.4.2: Chaîne NaI (TI):

Cette chaîne de spectrométrie gamma, se compose d'un détecteur à scintillation iodure de sodium activé au thallium, couplé à un tube photomultiplicateur.

L'ensemble scintillateur-photomultiplicateur est relié d'une part à une haute tension et d'autre part, à l'électronique de détection.

Deux cristaux d'iodure de sodium dopé au thallium NaI (TI) sont utilisés pour nos mesures:

Un cristal "NaI (TI) 2 x 2" que nous disposons dans notre laboratoire, et un cristal "NaI (TI) 3 x 3" que nous avons utilisée dans le centre de recherche nucléaire d'Alger (CRNA).

#### IV.4.2.1: Utilisation d'un scintillateur NaI (Tl) 3×3:

On a utilisé la même installation expérimentale décrite précédemment pour le détecteur Ge (Hp) à l'exception on a fait un changement du détecteur et des réglages dans la chaîne de mesure.

##### IV.4.2.1.1: Description du détecteur

Le détecteur iodure de sodium activé au thallium "NaI (Tl) 3 x 3" utilisée est de type "Bicron" model 266 de forme plat, caractérisé par une résolution de 7% mesuré pour le pic du  $^{137}\text{Cs}$  à l'énergie 662 kev. La haute tension de ce détecteur est de 700V. Le cristal à un diamètre de 76 mm et une longueur égale aussi à 76 mm.

##### IV.4.2.1.2: Calibration en énergie de la chaîne de mesure:

La calibration est réalisée sur la base de 2 sources standard ponctuelles qui sont le  $^{137}\text{Cs}$  et le  $^{60}\text{Co}$ .

Les énergies des sources étalons utilisées et les canaux correspondants sont donnés dans le tableau suivant:

Tableau IV.2: Correspondance énergie canal.

Source	Energie (Kev)	Canal
$^{137}\text{Cs}$	661.6	225
$^{60}\text{Co}$	1173.2	390
$^{60}\text{Co}$	1332.5	441

Le spectre de la calibration en énergie est donné par la figure suivante:



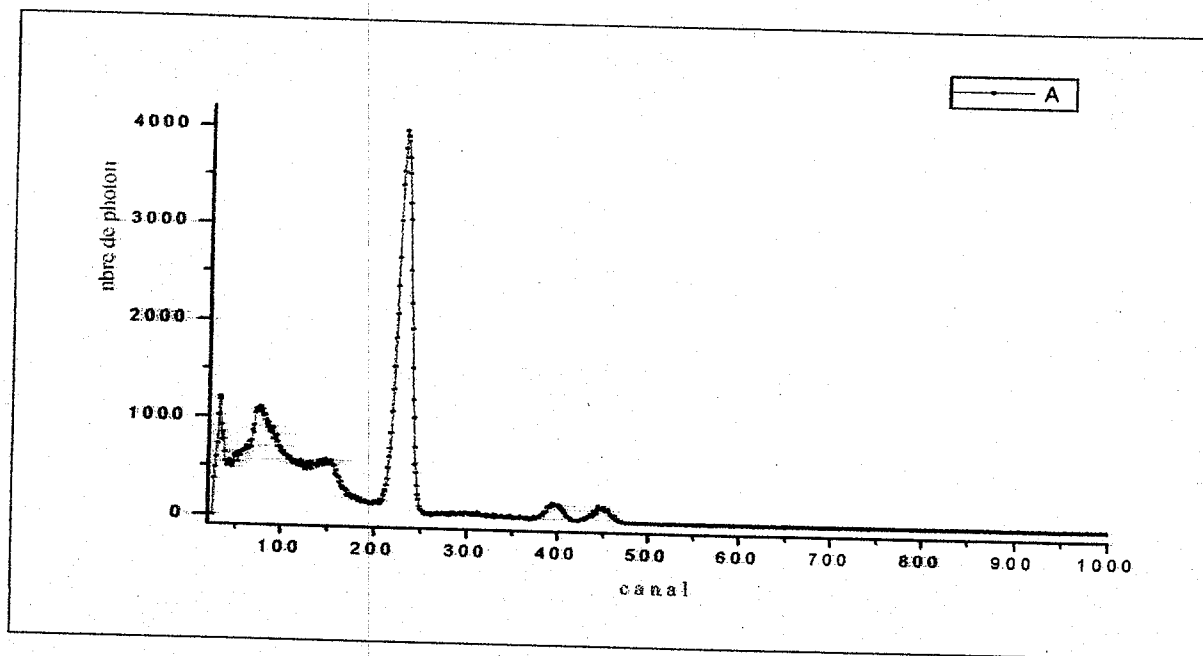


Figure IV.6 : spectre de calibration en énergie ( $^{137}\text{Cs}+^{60}\text{Co}$ ).

La droite d'étalonnage est représentée par la figure suivante:

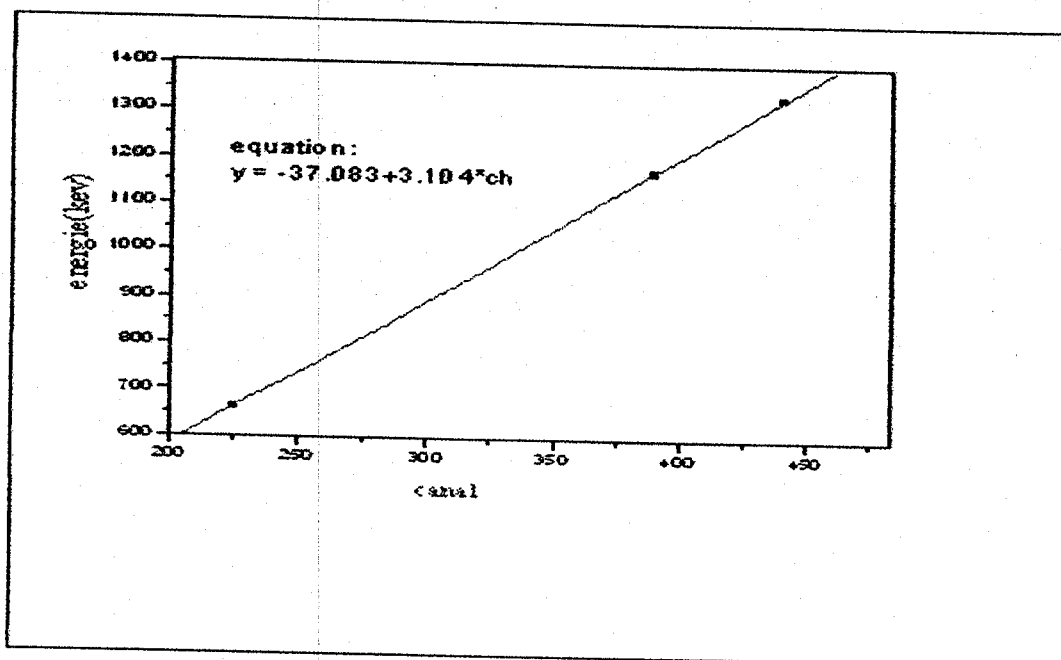


Figure IV.7: droite d'étalonnage.

#### IV.4.2.2: Utilisation d'un scintillateur NaI (TI) 2×2:

La chaîne de mesure utilisée dans notre laboratoire est constituée d'un détecteur NaI (TI) de dimension 2 × 2.

##### IV.4.2.2.1: Blindage de plomb

Nous disposons d'un château en plomb de forme cylindrique, Canberra model 727, de 5 cm d'épaisseur destinée à la protection des émissions gamma extérieures et à réduire ainsi le bruit de fond ambiant (figure IV.8).

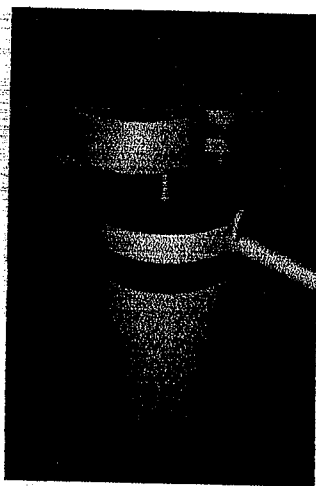


Figure IV.8 structure du blindage.

L'intérieur du château en plomb est composé d'une couche de cuivre de 6 mm d'épaisseur dont le but est d'atténuer les rayons x provenant du plomb[24], et est revêtu d'une plaque de 0.6 centimètre d'acier.

Le poids total de l'ensemble est d'environ 127 kg. La partie supérieure est amovible et permet d'accéder à la cuve et au détecteur.

##### IV.4.2.2.2: Spécification du détecteur

Le détecteur NaI (TI) utilisée est de type Canberra model 802-2×2 de forme puits, caractérisé par une résolution de 8.5% mesuré pour le pic du  $^{137}\text{Cs}$  à l'énergie 662 keV. Le cristal a un diamètre de 51mm et une longueur égale aussi à 51 mm.

Sa haute tension est de 1000V. Il est enfermé dans un boîtier étanche en aluminium (figure IV.9).

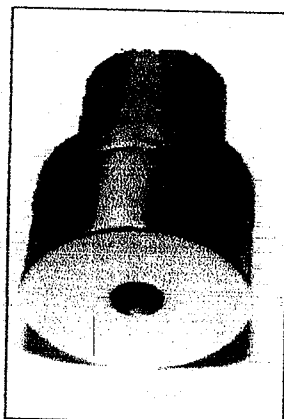


Figure IV.9: détecteur NaI (Tl) 2 x 2.

#### IV.4.2.2.3: Calibration en énergie de la chaîne de mesure

La calibration en énergie a été effectuée à l'aide du logiciel "génie 2000" par entrée en utilisant plusieurs pics.

Le tableau suivant donne les énergies des pics utilisés et les canaux correspondants.

Tableau IV.3: Correspondance énergie canal.

Energie (Kev)	Canal
114.80	40
162.19	64
288.56	128
414.94	192
691.38	332
963.88	470
1200.83	590
1485.17	734
1805	896

La courbe de la calibration en énergie est donnée par la figure suivante:

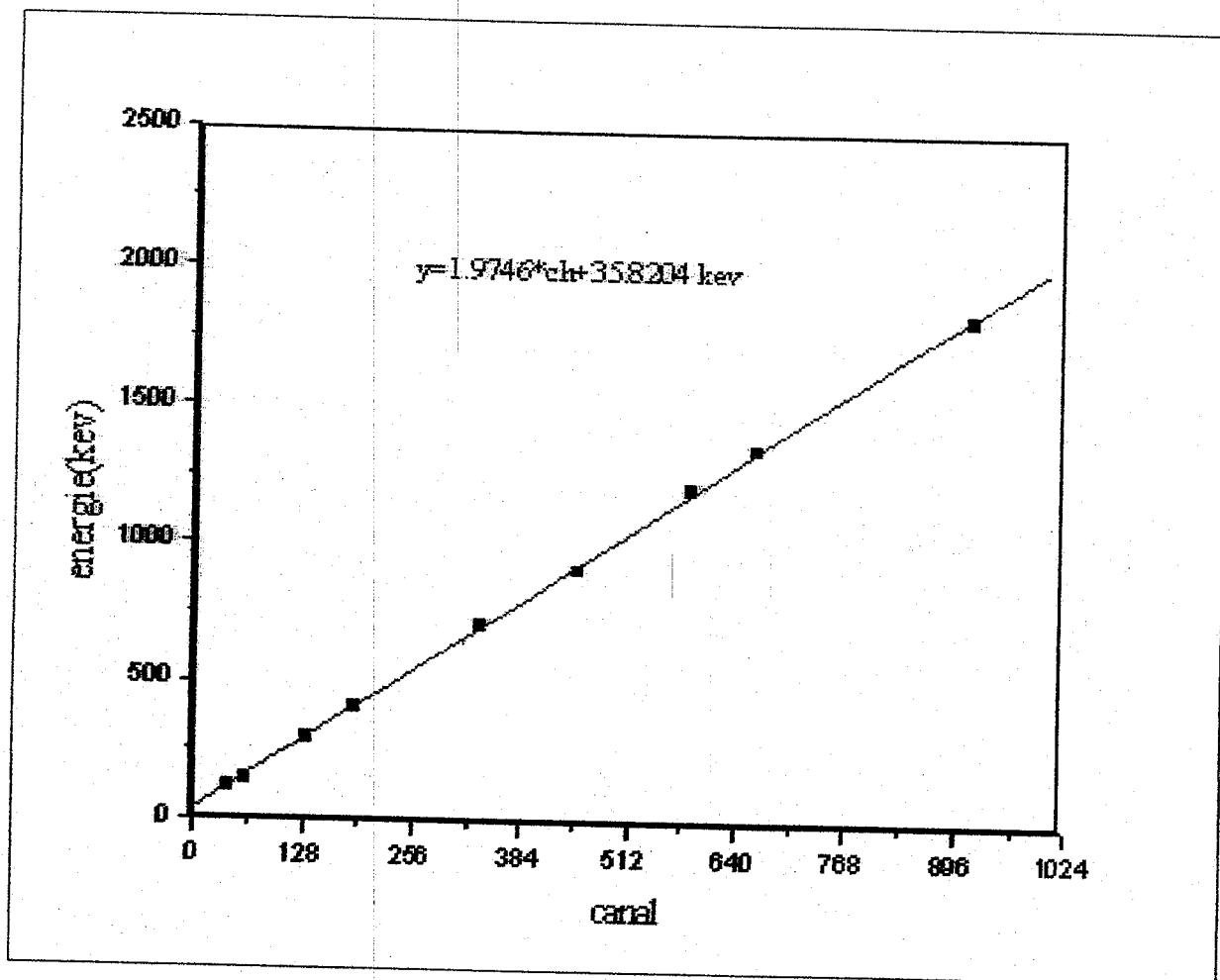


Figure- IV.10- courbe de calibration en énergie

#### IV.5: Mesure du bruit de fond

Avant de procéder au comptage des échantillons, on évalue en premier lieu la valeur du bruit de fond [29], qui représente l'ensemble des interférences de rayonnements cosmiques, terrestres et le rayonnement présent dans les matériaux de structure du détecteur.

Ceci nous permet de connaître éventuellement la contribution de ces différentes sources radioactives dans le comptage des échantillons à analyser.

Pour cela, on place le récipient vide à l'intérieur de l'enceinte blindé au voisinage du détecteur pour le comptage pendant un temp de collection de 24 h [29, 66].

#### IV.6: Etude des échantillons:

Après avoir préparé les échantillons, nous avons procédé leur comptage à l'aide de la chaîne de spectrométrie gamma décrite précédemment.

Le temps de collection pour chaque échantillon est de 24 h [29, 66].

#### IV.7: Méthode de quantification

La détermination de la radioactivité contenue dans un échantillon s'effectue après identification des différents radioéléments d'intérêt et le calcul des efficacités de détection pour chaque radioélément.

L'activité d'un nucléide se calcule à partir de la relation définie dans la norme suivante [67]:

$$A = \frac{S}{V \cdot \varepsilon \cdot I \cdot T_{actif} \cdot K_c \cdot K_w} \quad (IV.1)$$

Avec:

$S$ : est l'air ou comptage net du pic.

$V$ : est le volume de l'échantillon (ou masse).

$\varepsilon$ : est l'efficacité de détection pour l'énergie du pic en question.

$I$ : est le pourcentage d'embranchement du pic.

$T_{actif}$ : est le temps actif de l'acquisition.

$K_c$ : est le coefficient de correction de la décroissance de l'échantillon durant l'acquisition:

$$K_c = \frac{T_{1/2}}{\ln(2) \cdot t_{réel}} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{\ln(2) \cdot t_{réel}}{T_{1/2}}\right) \right] \quad (IV.2)$$

$t_{réel}$ : est le temps réel d'acquisition (dans la même unité que  $T_{1/2}$ ).

$K_w$ : est le facteur de correction de la décroissance du nucléide entre l'instant où l'échantillon a été obtenu et le début de l'acquisition:

$$K_w = \exp\left[-\frac{\ln(2) \cdot t_w}{T_{1/2}}\right] \quad (IV.3)$$

Avec:

$t_w$ : temps écoulé entre la prise de l'échantillon et le début de l'acquisition.

Cette activité A par unité de volume (ou de masse) se calcule pour chaque raie d'énergie du nucléide qui est à la fois présente dans le spectre et dans la bibliothèque (càd présente dans la matrice d'identification).

Dans cette étude, nous nous sommes intéressé par l'identification des radioéléments donc on n'a pas fait un calcul de la concentration, notre comparaison entre les échantillon a été faite en se basant sur les surfaces nettes, puisque  $V, \epsilon, I, T_{\text{actif}}, K_c, K_w$  restent constant pour le même élément et pour la même chaîne de mesure.

**CHAPITRE 3**  
**PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS.**

**Présentation et Interprétation des résultats**

Cette étude nous a permis d'identifier les éléments radioactifs aussi bien naturels qu'artificiels présents dans l'environnement à l'aide des échantillons analysés et leur classification selon leur origine, ainsi que la comparaison des résultats obtenue par les deux types de détecteurs utilisés.

Nous représentons dans ce chapitre les spectres du bruit de fond et des échantillons analysés.

La comparaison entre les détecteurs a été faite en se basant sur le rendement de détection et la résolution de chacun d'eux.

On a aussi fait une comparaison entre les comptages nets du  $^{40}\text{K}$ , des éléments issue des familles du  $^{232}\text{Th}$  et d' $^{238}\text{U}$  pour les quatre échantillons analysés par le scintillateur NaI(Tl)  $3 \times 3$ .

**V.1: Présentation des résultats**

L'analyse des échantillons par spectrométrie gamma donne naissance à des spectres qui représente le nombre de photons détectés en fonction de leur énergie, et puisque le numéro de canal est proportionnel à l'énergie, l'échelle en énergie est alors convertie en échelle de canaux.

Les spectres sont caractérisés par un fond continu (bruit de fond) décroissant avec l'énergie et par la présence de plusieurs pics.

Chaque pic correspond à un rayonnement gamma issu de la désexcitation des noyaux instables ou atome radioactifs présent dans l'échantillon.

L'intensité des pics varie d'un radioélément à l'autre et d'une chaîne à l'autre.

Les surfaces nettes (comptages nets) des pics du spectre d'acquisition pour chaque radioélément sont calculées par l'analyseur multicanaux, elles sont présentées dans les tableaux qui suivent.

Les spectres ont été collectés pour une durée de 24 heures dans un château blindé à très faible bruit de fond.



La comparaison des comptages net des constituent des quatre échantillons est données sous formes d'histogrammes. Ces graphiques sont représentatifs de la variation du comptage net des radionucléides concerné en fonction du radioélément présent dans chaque échantillon.

Le comptage est un comptage net sur 86400 secondes, on le convertit en comptage par seconde (Cps).

**V.1.1 : Résultats obtenus avec le scintillateur NaI (Tl) 3 x 3****V.1.1.1: bruit de fond**

Le spectre de bruit de fond montre l'existence de plusieurs radioéléments qui appartiennent aux différentes familles radioactives.

Nous avons classé les éléments identifiés selon leur origines dans le tableau suivant:

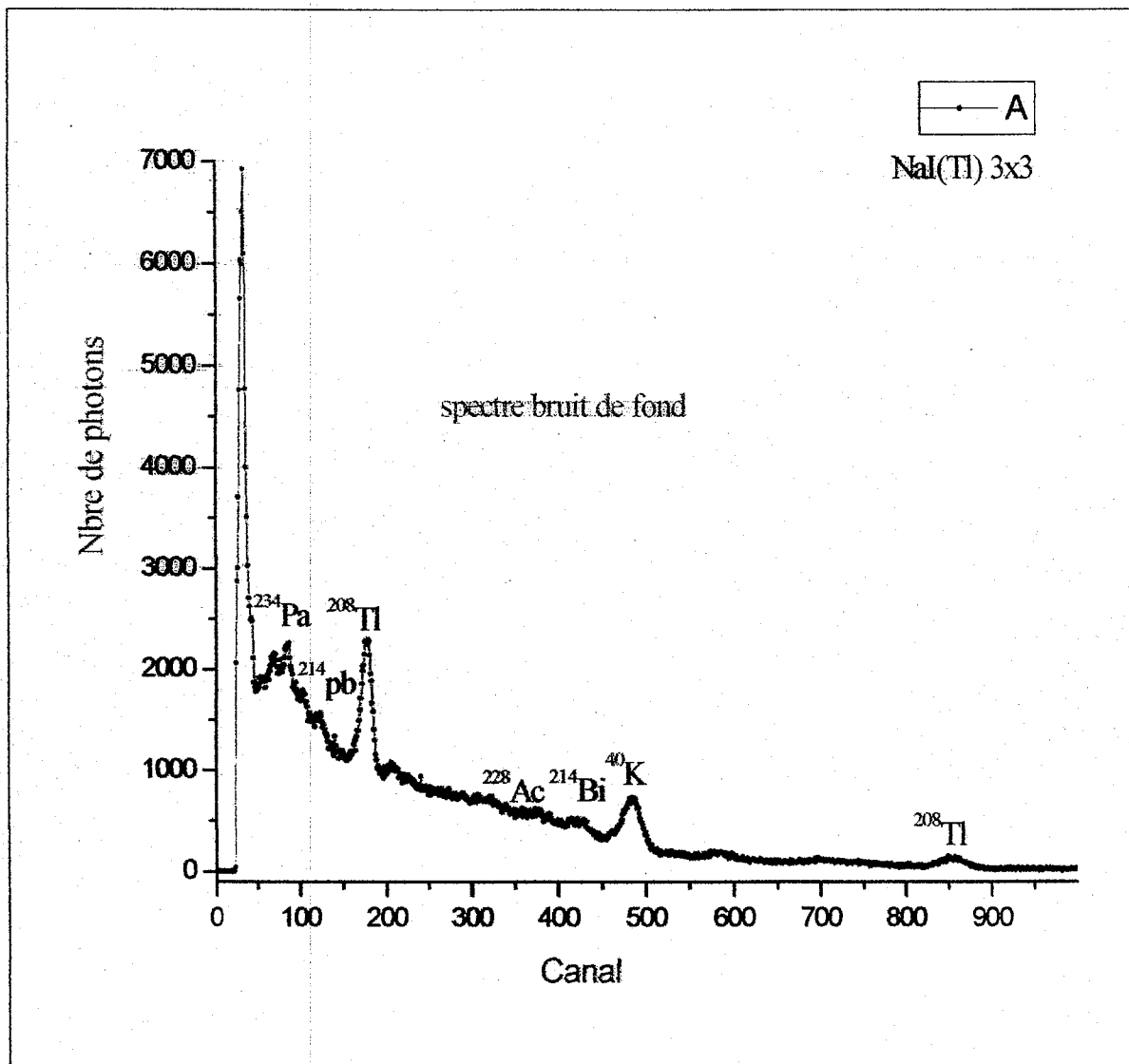
**Tableau V.1: classification des radioéléments identifiés dans le bruit de fond**

Ordre	Série Uranium 238	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>234</sup> Pa	226.47	8241	0.0953
2	<sup>214</sup> Pb	346.15	671	0.0077
3	<sup>214</sup> Bi	606.85	444	0.0051
4	<sup>214</sup> Bi	1131	557	0.0064
5	<sup>214</sup> Bi	1287	1112	0.0128

Ordre	Série Thorium 232	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec.	Cps
1	<sup>208</sup> Tl	509.83	17990	0.2082
2	<sup>228</sup> Ac	961.90	816	0.0094
3	<sup>208</sup> Tl	2642.56	2139	0.0247

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1465.46	9168	0.1061

- **présentation du spectre:**



**Figure V.1: Spectre du bruit de fond**

## V.1.1.2: Echantillon bentonite

Le spectre de l'échantillon bentonite (fig V.2) montre l'existence de plusieurs radioéléments qui sont représentées dans le tableau suivant:

Tableau V.2: classification des radioéléments identifiés dans la bentonite.

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>214</sup> Bi	599	6990	0.0809
2	<sup>214</sup> Bi	1114	1864	0.0215
3	<sup>214</sup> Bi	1752	1626	0.0188

Ordre	Série Thorium 232	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>212</sup> Pb	234	21181	0.2451
2	<sup>228</sup> Ac	345	8763	0.1014
3	<sup>208</sup> Tl	509	15972	0.1848
4	<sup>228</sup> Ac	919	6676	0.0772
5	<sup>208</sup> Tl	2106	1367	0.0158
7	<sup>208</sup> Tl	2617	4375	0.0506

Ordre	Potassium 40	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1455	13119	0.1518

- présentation du spectre:

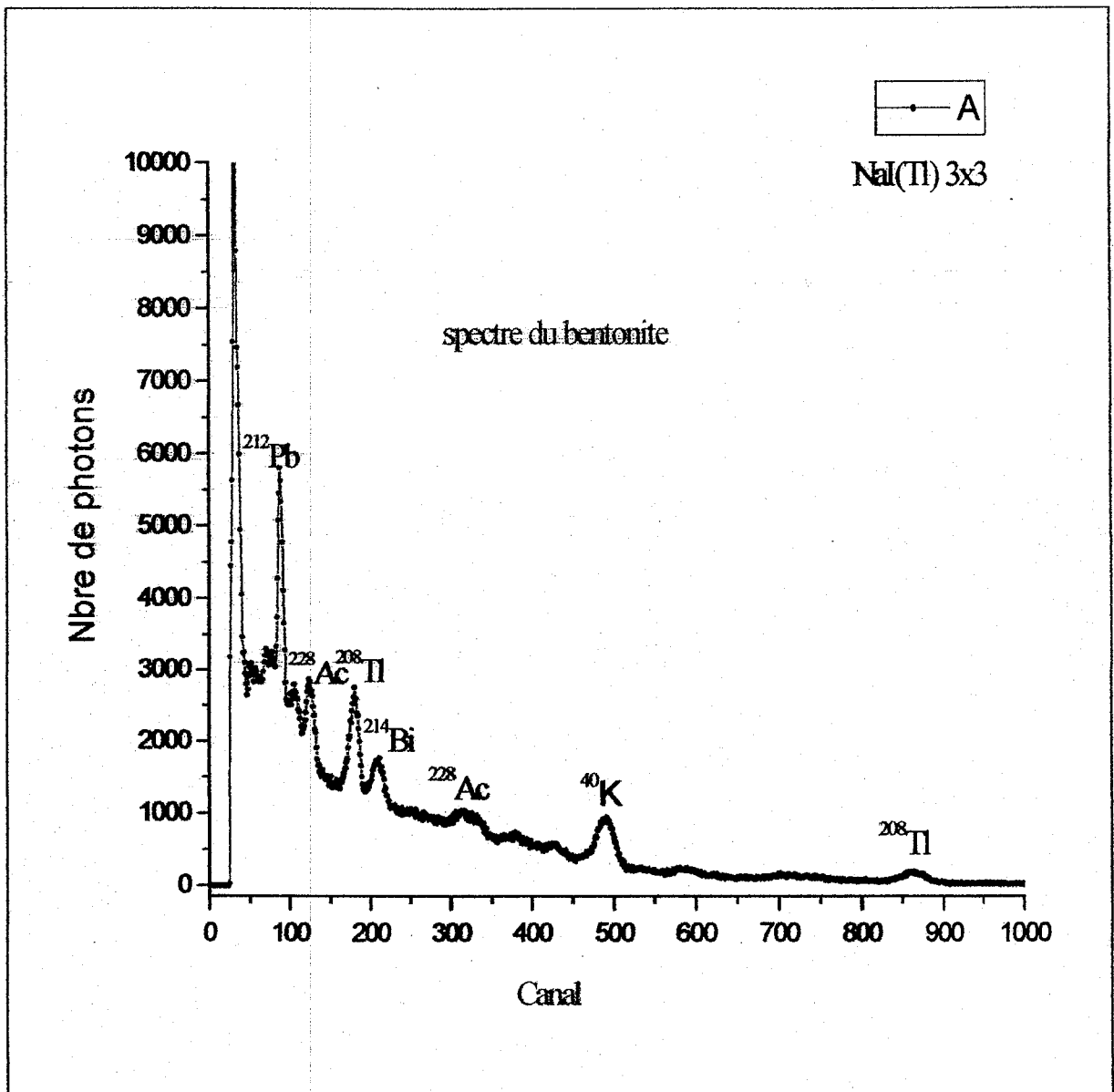


Figure V.2: Spectre de la bentonite

V.1.1.3: Echantillon calcaire

Le spectre de l'échantillon calcaire (fig.V.3) a révélé la présence de plusieurs éléments tel que:  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{234}\text{Pa}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{208}\text{Tl}$ , ces éléments sont classés selon leur famille radioactives :

Tableau V.3:classification des radioéléments identifiés dans le calcaire

Ordre	Série Uranium 238	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{234}\text{Pa}$	225.41	3650	0.0422
2	$^{214}\text{Bi}$	600.25	2230	0.0258
3	$^{214}\text{Bi}$	1118.95	706	0.0081
4	$^{214}\text{Bi}$	1749.49	1174	0.0135

Ordre	Série Thorium 232	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{228}\text{Ac}$	342.64	1504	0.0174
2	$^{208}\text{Tl}$	504.15	11054	0.1279
3	$^{228}\text{Ac}$	954	1670	0.0193
4	$^{208}\text{Tl}$	2594	2577	0.0298

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{40}\text{K}$	1454.45	10897	0.1261

Ordre	Cosmique	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{22}\text{Na}$	1272.3	751	0.0086
2	$^{38}\text{Cl}$	2143.02	1130	0.0130

• présentation du spectre

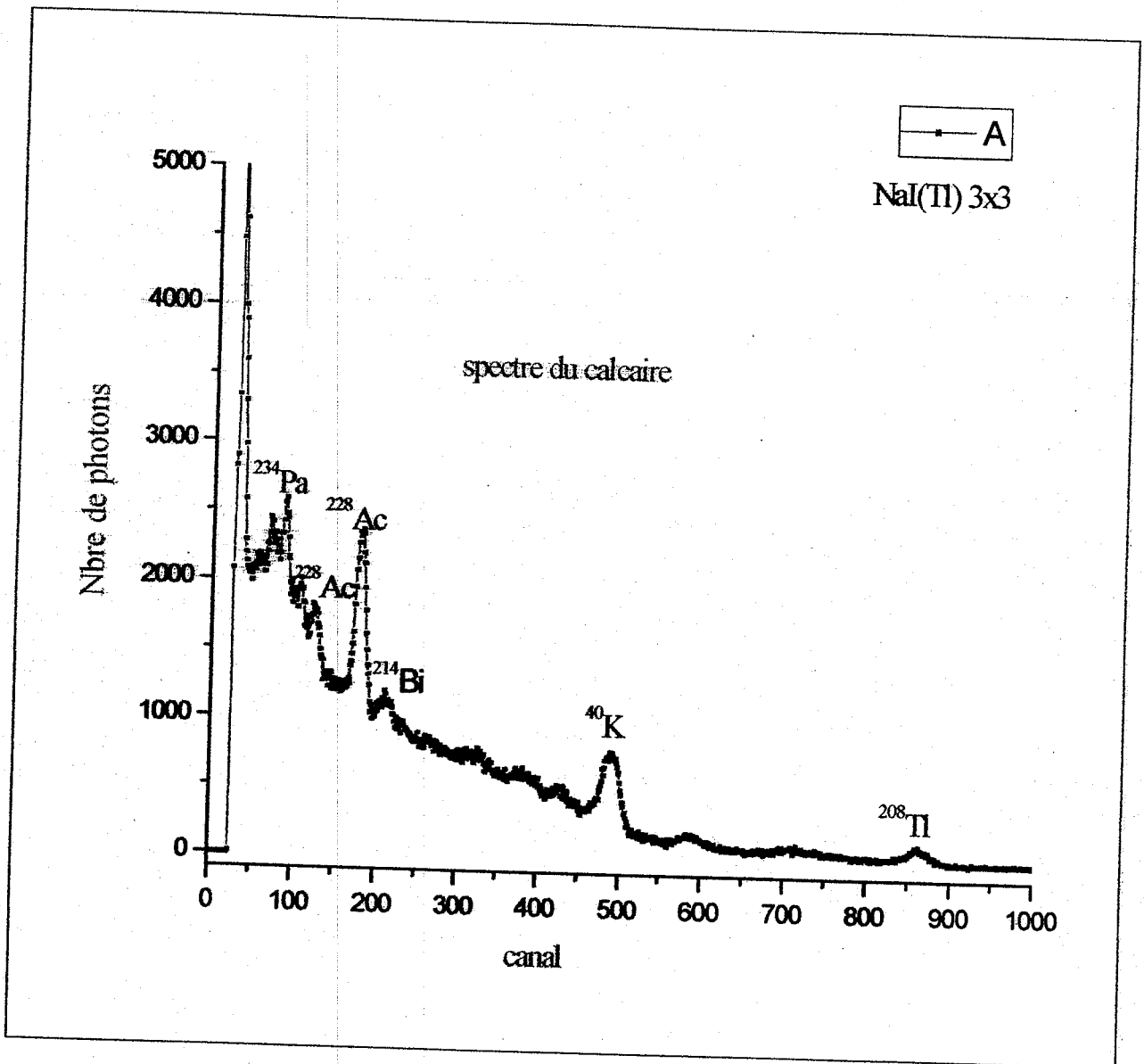


Figure V.3: Spectre du calcaire.

V.1.1.4: Echantillon ciment

L'analyse de l'échantillon a donnée le spectre (fig.V.4), on remarque l'existence des même radioéléments  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{40}\text{K}$  avec une abondance du  $^{214}\text{Bi}$ , ils sont présentés dans le tableau ci-après:

Tableau V.4: classification des radioéléments identifiés dans le ciment

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{234}\text{Pa}$	223.79	6901	0.0798
2	$^{214}\text{Bi}$	601	5494	0.0635
3	$^{214}\text{Bi}$	930.43	3088	0.0375
4	$^{214}\text{Bi}$	1142.8	1995	0.0230
5	$^{214}\text{Bi}$	1277.07	1030	0.0119
6	$^{214}\text{Bi}$	1751.71	1156	0.0133
7	$^{214}\text{Bi}$	2134.84	1056	0.0122

Ordre	Série Thorium 232	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{228}\text{Ac}$	340	4200	0.0486
2	$^{208}\text{Tl}$	502.42	13649	0.1579
3	$^{208}\text{Tl}$	2592.76	2273	0.0263

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{227}\text{Th}$	51.6	36118	0.4180

Ordre	Potassium 40	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{40}\text{K}$	1453.73	9901	0.1145



• présentation du spectre

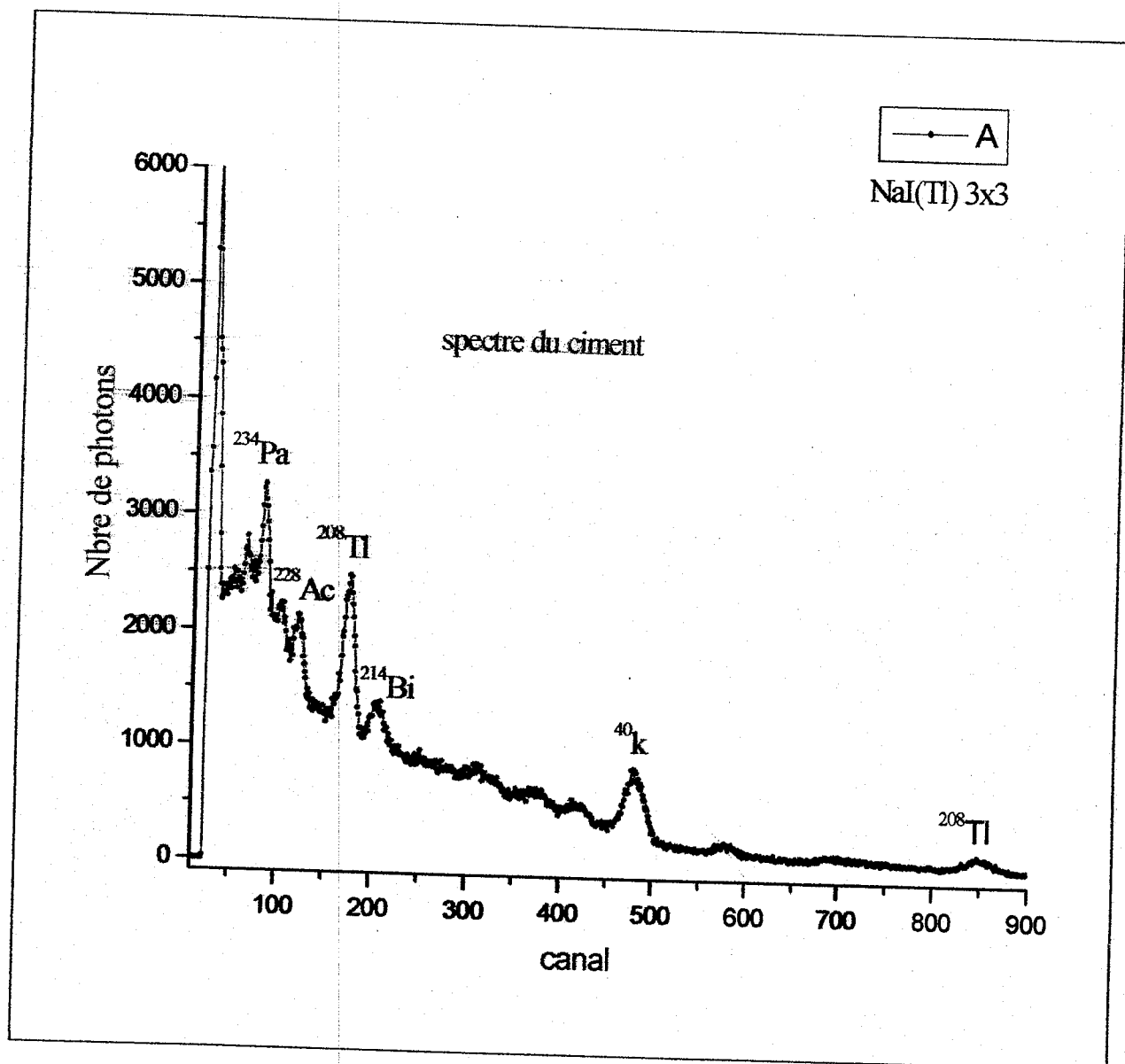


Figure V.4 : Spectre du ciment

V.1.1.5: Echantillon clinker

Le spectre de l'échantillon (figV.5) montre la présence des mêmes radioéléments, qui sont présentés dans le tableau suivant:

Tableau V.5: classification des radioéléments identifiés dans le Clinker.

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>234</sup> Pa	223.83	5516	0.0638
2	<sup>214</sup> Bi	599	3205	0.0370
3	<sup>234</sup> Pa	923.40	2784	0.0322
4	<sup>214</sup> Bi	1145	1536	0.0177
5	<sup>214</sup> Bi	1279	942	0.0109
6	<sup>214</sup> Bi	1747.35	1686	0.0195

Ordre	Série Thorium 232	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>228</sup> Ac	341.31	3172	0.0367
2	<sup>208</sup> Tl	503.51	13966	0.1616
3	<sup>208</sup> Tl	2601.76	1843	0.0213

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>227</sup> Th	50.85	32929	0.3811

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1456.6	9548	0.1105

- Présentation du spectre:

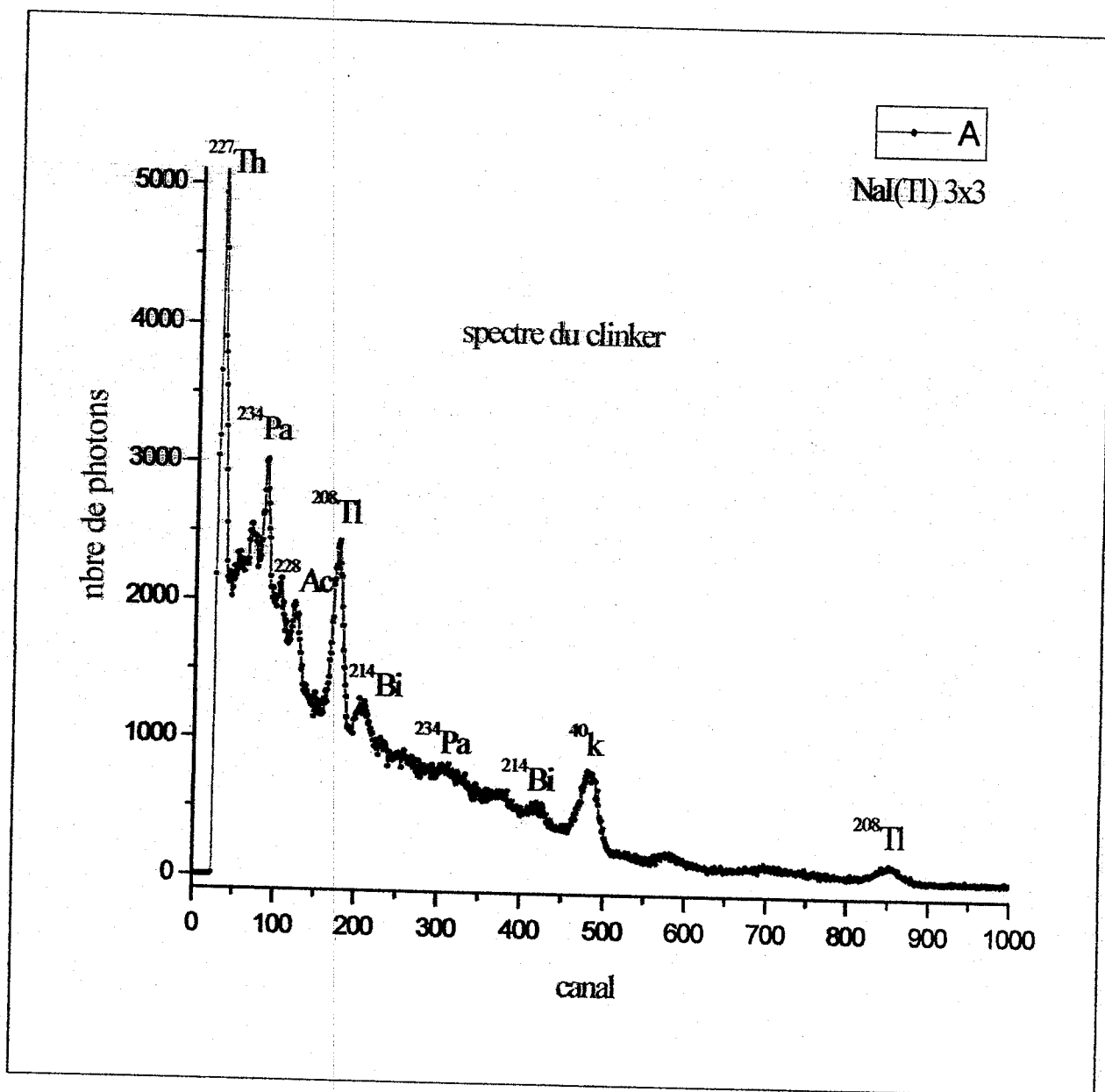


Figure V.5 : Spectre du clinker

V.1.2: Résultats obtenus avec le scintillateur NaI (TI) 2 x 2

V.1.2.1 Bruit de fond

L'analyse a révélé les radioéléments qui sont schématisés dans la figure V.6, ils sont présentés et classés dans le tableau ci-dessous :

Tableau V.6: classification des radioéléments identifiés dans le bruit de fond

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>214</sup> Bi	610.19	1504	0.0174
2	<sup>214</sup> Bi	767.54	67	0.0077
3	<sup>214</sup> Bi	1759.4	62	0.0071

Ordre	Série Thorium 232	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>232</sup> Th	83.56	10722	0.1240
2	<sup>228</sup> Ac	211.23	15426	0.1785
3	<sup>212</sup> Bi	739.11	3914	0.0453
4	<sup>208</sup> Tl	874.35	5187	0.0600

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>235</sup> U	180.38	20671	0.2392

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1461.2	1290	0.0149

Ordre	Cosmique	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>7</sup> Be	505.5	460	0.0053

• Présentation du spectre

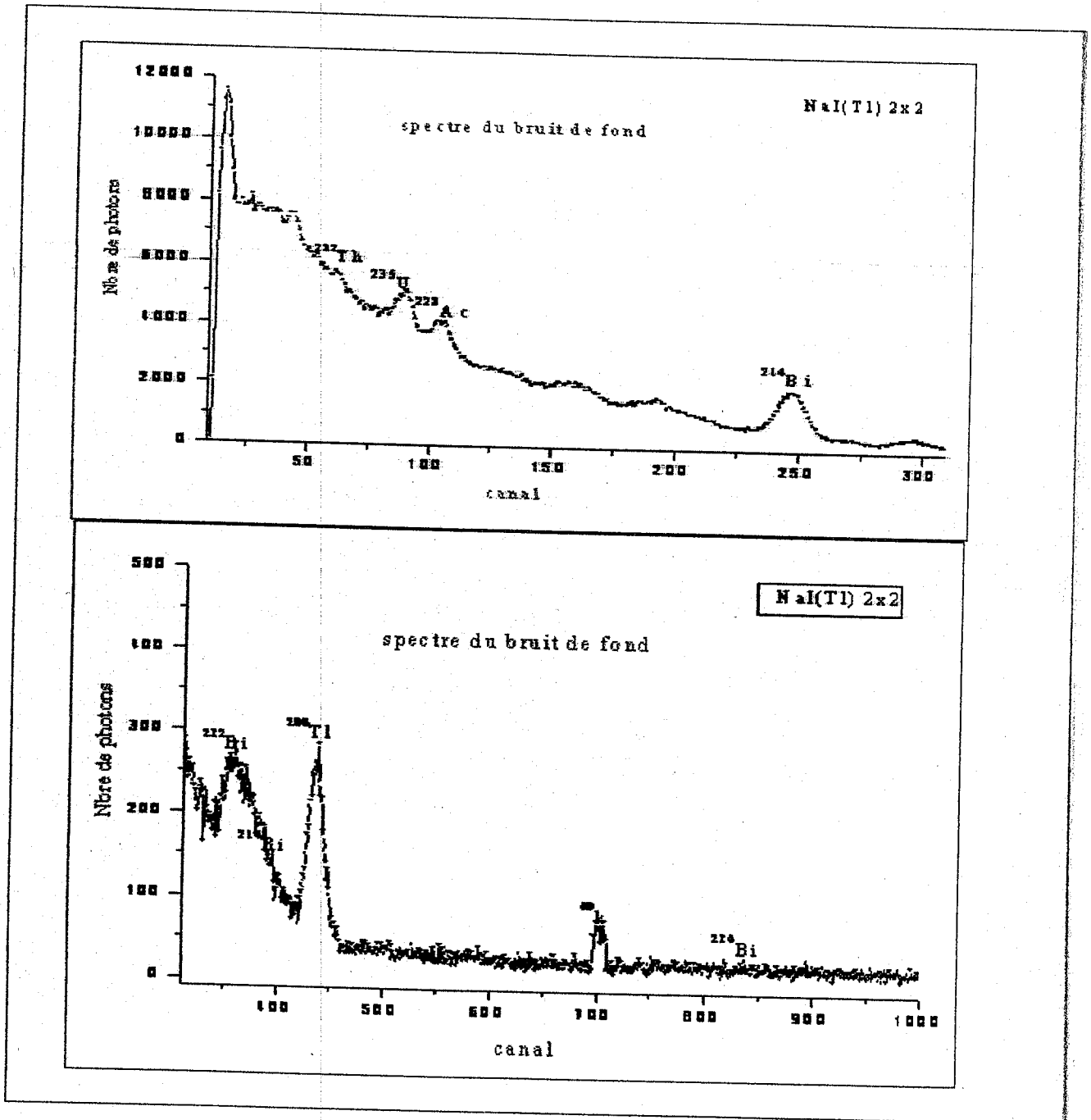


Figure: V.6: Spectre du bruit de fond

V.1.2.2 Echantillon bentonite

Les éléments identifiés dans l'échantillon bentonite sont classés selon les familles radioactives dans le tableau suivant:

Tableau V.7: classification des radioéléments identifiés dans la bentonite.

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>214</sup> Bi	641.36	4686	0.0542
2	<sup>214</sup> Bi	1154.7	115	0.0013

Ordre	Série Thorium 232	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>228</sup> Ac	331.8	5865	0.0648
2	<sup>208</sup> Tl	524.08	1548	0.0179
3	<sup>208</sup> Tl	583	1044	0,0120
4	<sup>228</sup> Ac	755.83	3408	0,0394
5	<sup>212</sup> Bi	1623.2	484	0,0056

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>235</sup> U	182.72	6400	0.0740
2	<sup>227</sup> Th	739.11	3914	0.0453
3	<sup>211</sup> Bi	831.8	15426	0.1785

Ordre	Potassium 40	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1465.7	4234	0.0490

Ordre	Cosmique	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>7</sup> Be	465.3	17623	0.2039

• Présentation du spectre

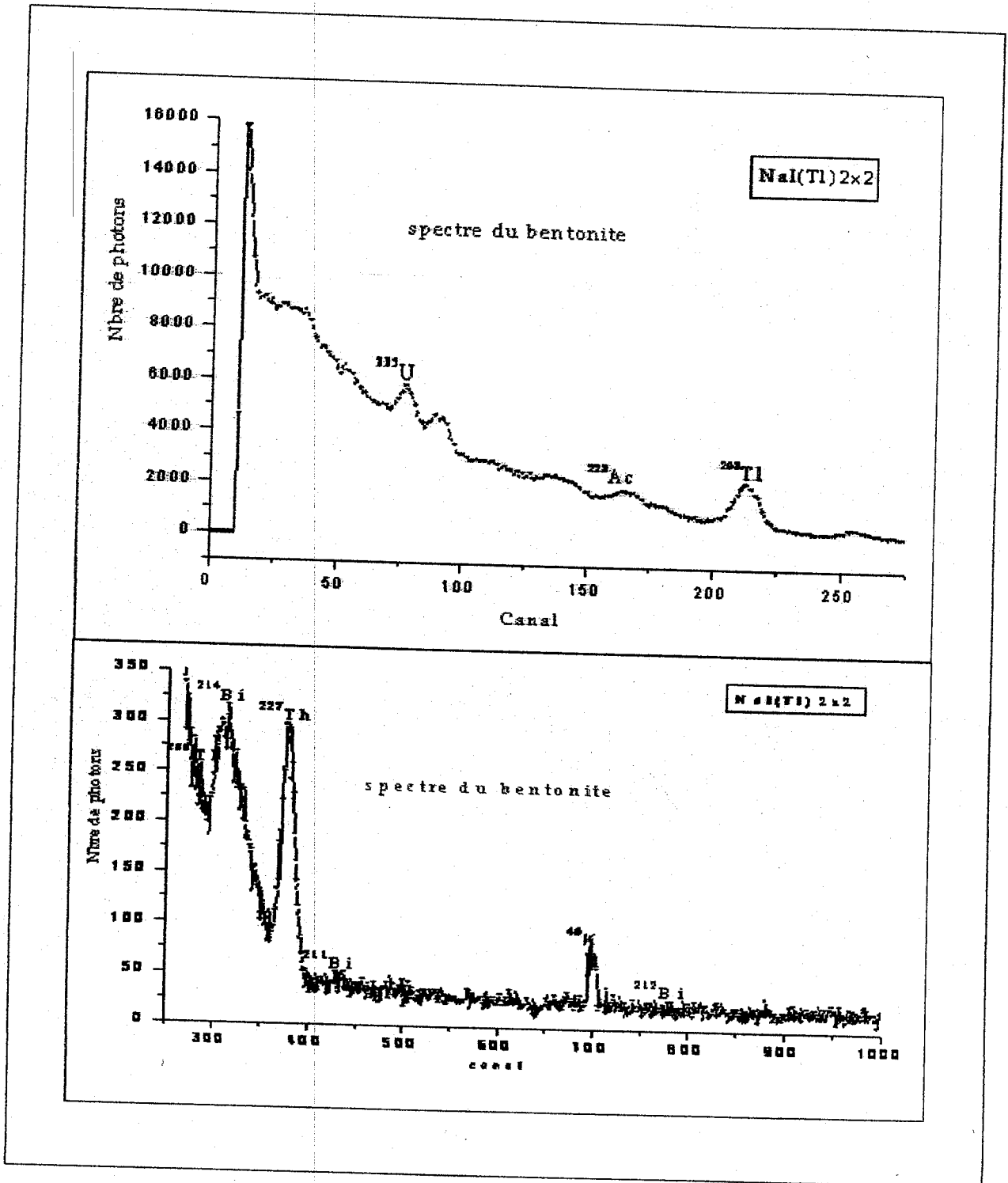


Figure V.7 : Spectre de la bentonite

## V.1.2.3 Echantillon calcaire

Les radioéléments identifiés sont illustrés dans la figure V.8 et présentés dans le tableau ci-dessous:

Tableau V.8: classification des radioéléments identifiés dans le calcaire.

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>214</sup> Bi	620.86	5477	0.0633
2	<sup>234</sup> Pa	884.7	679	0.0078
3	<sup>214</sup> Bi	1505.1	316	0.0036

Ordre	Série Thorium 232	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>212</sup> Pb	223.83	15823	0.1831
2	<sup>208</sup> Tl	562.3	778	0.0090
3	<sup>228</sup> Ac	751.55	12800	0.1481
4	<sup>228</sup> Ac	902.5	112	0.0012
5	<sup>212</sup> Bi	1626.4	76	0.00087

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>235</sup> U	159.48	42598	0.4930
2	<sup>227</sup> Th	739.11	1477	0,0170
3	<sup>235</sup> U	831.8	8634	0,0999

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1479.3	2740	0,0317



• Présentation du spectre:

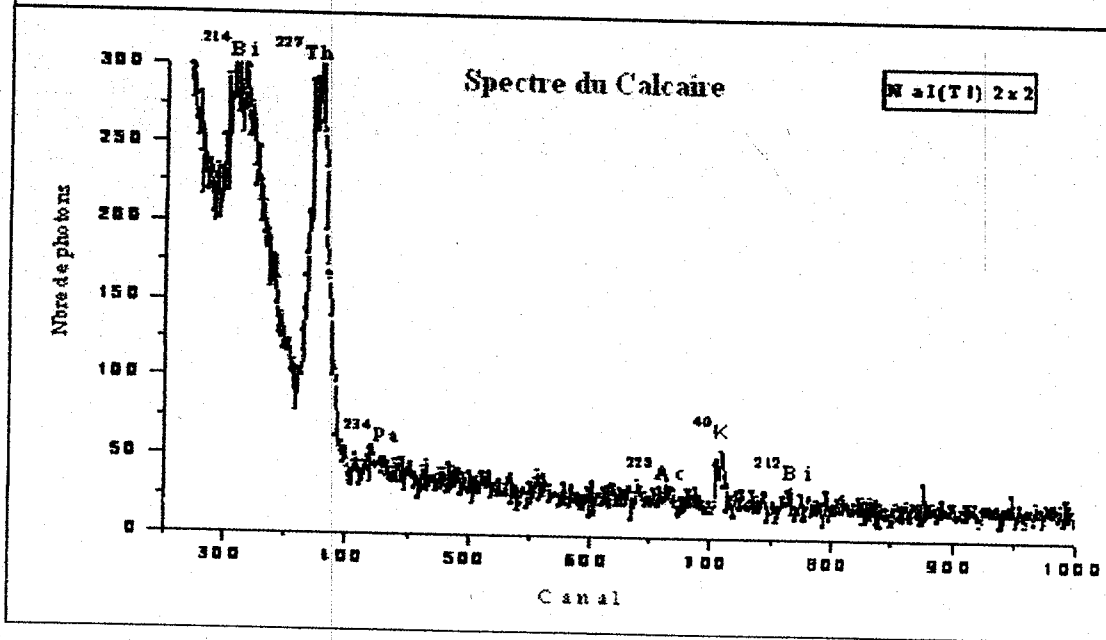
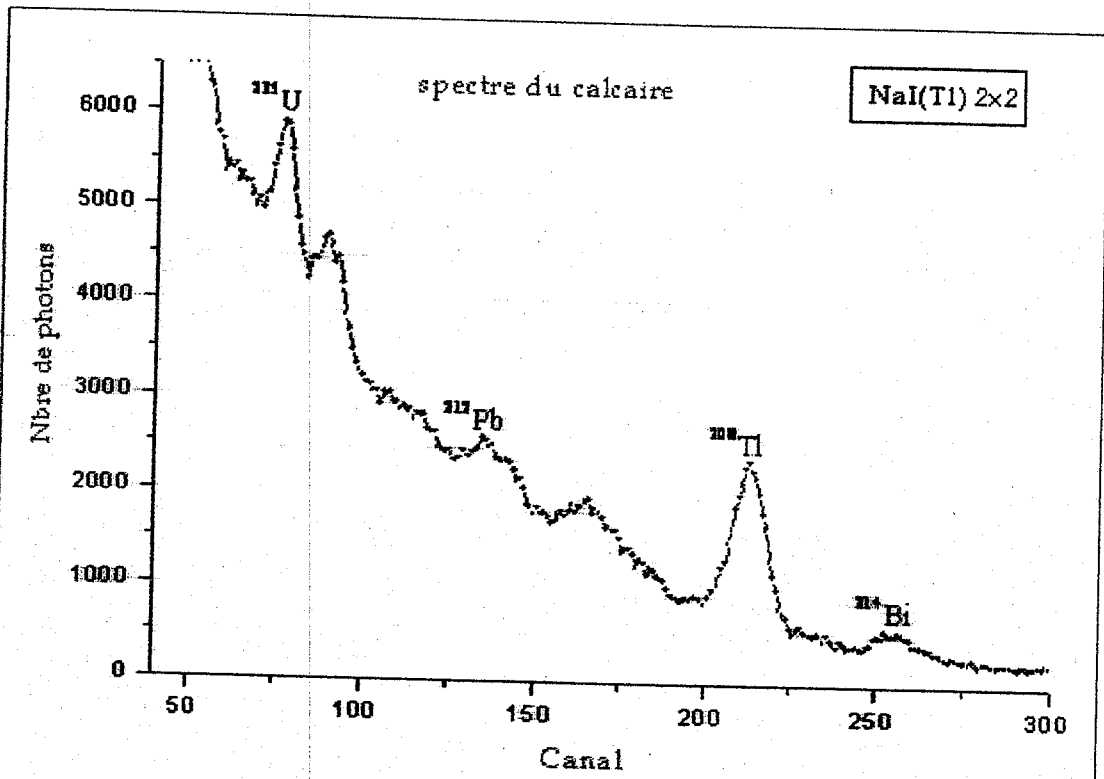


Figure V.8 : Spectre du calcaire

V.1.2.4 Echantillon ciment

Les éléments identifiés sont classés dans le tableau suivant:

Tableau V.9: classification des radioéléments identifiés dans le ciment.

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>214</sup> Pb	79.21	71060	0,8224
2	<sup>214</sup> Pb	345.36	21558	0,2495
3	<sup>214</sup> Bi	645.61	21389	0,2475
4	<sup>214</sup> Bi	1792	677	0,0805

Ordre	Série Thorium 232	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>228</sup> Ac	217.42	52	0.0006
2	<sup>228</sup> Ac	271.42	15987	0.1850
3	<sup>228</sup> Ac	418.82	60972	0,7056
4	<sup>208</sup> Tl	578.65	60	0.0006
5	<sup>212</sup> Bi	732.56	11478	0,1328
6	<sup>228</sup> Ac	754.12	68	0.0007

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>235</sup> U	165.17	21561	0,2495

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1460.7	2415	0,0277

Ordre	Cosmique	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>7</sup> Be	477.8	14016	0,1622

• Présentation du spectre:

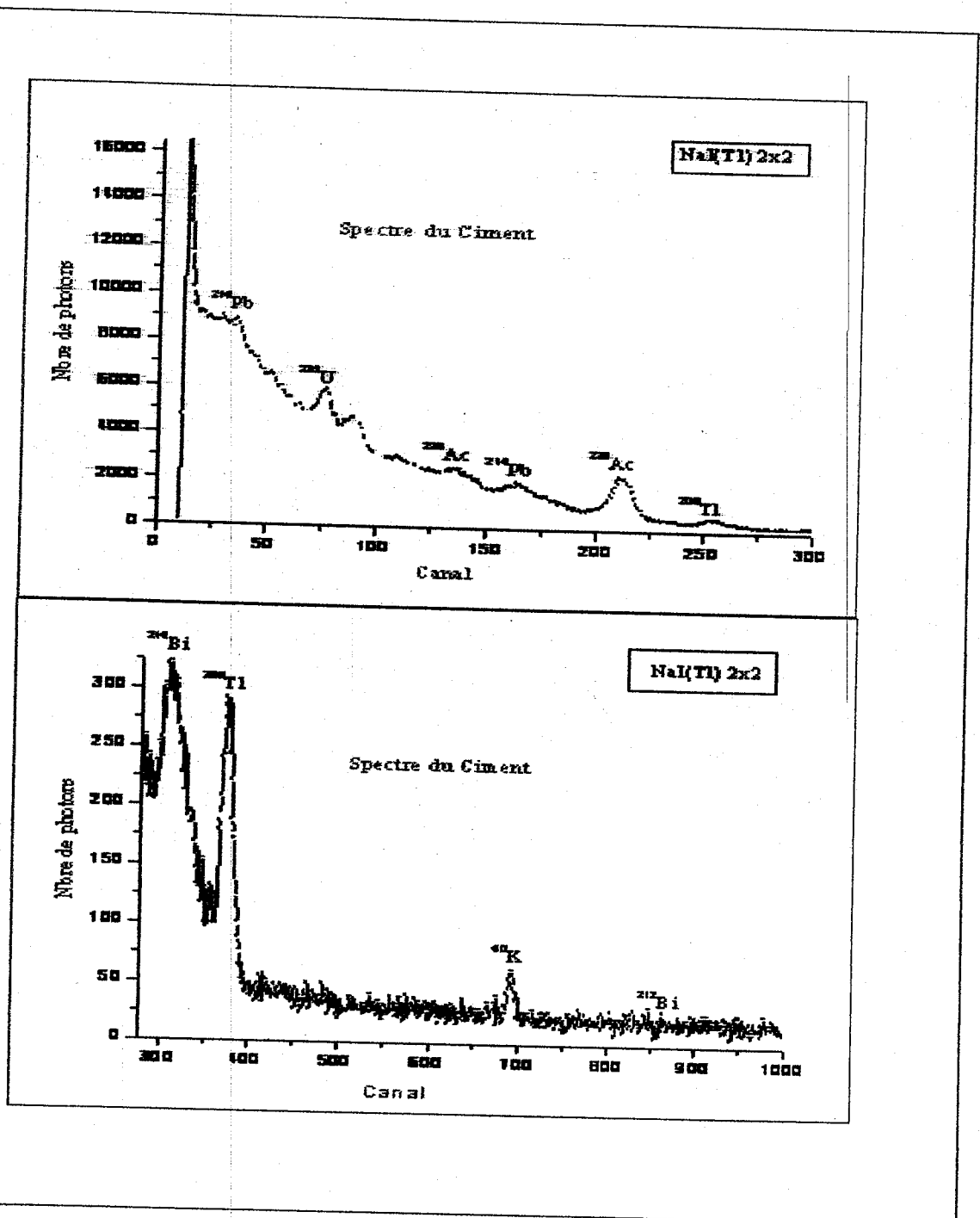


Figure V.9 : Spectre du ciment

V.1.2.5 Echantillon clinker

Les éléments identifiés dans l'échantillon clinker sont regroupés dans le tableau suivant:

Tableau V.10 : classification des radioéléments identifiés dans le clinker.

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>214</sup> Pb	86.53	10357	0,1198
2	<sup>214</sup> Bi	637.61	61	0.0007

Ordre	Série Thorium 232	Énergie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>212</sup> Pb	307.81	9302	0,1076
2	<sup>228</sup> Ac	379.77	15125	0,1750
3	<sup>208</sup> Tl	583.65	9871	0,1142
4	<sup>208</sup> Tl	864.65	3688	0,0426
5	<sup>212</sup> Bi	728.79	4532	0,0524

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>235</sup> U	177.84	12585	0,1456
2	<sup>235</sup> U	206.64	10896	0,1261
3	<sup>227</sup> Th	234.3	607	0,0070

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1478.9	2210	0,0255

Ordre	Cosmique	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>7</sup> Be	498.5	416	0,0048

- Présentation du spectre :

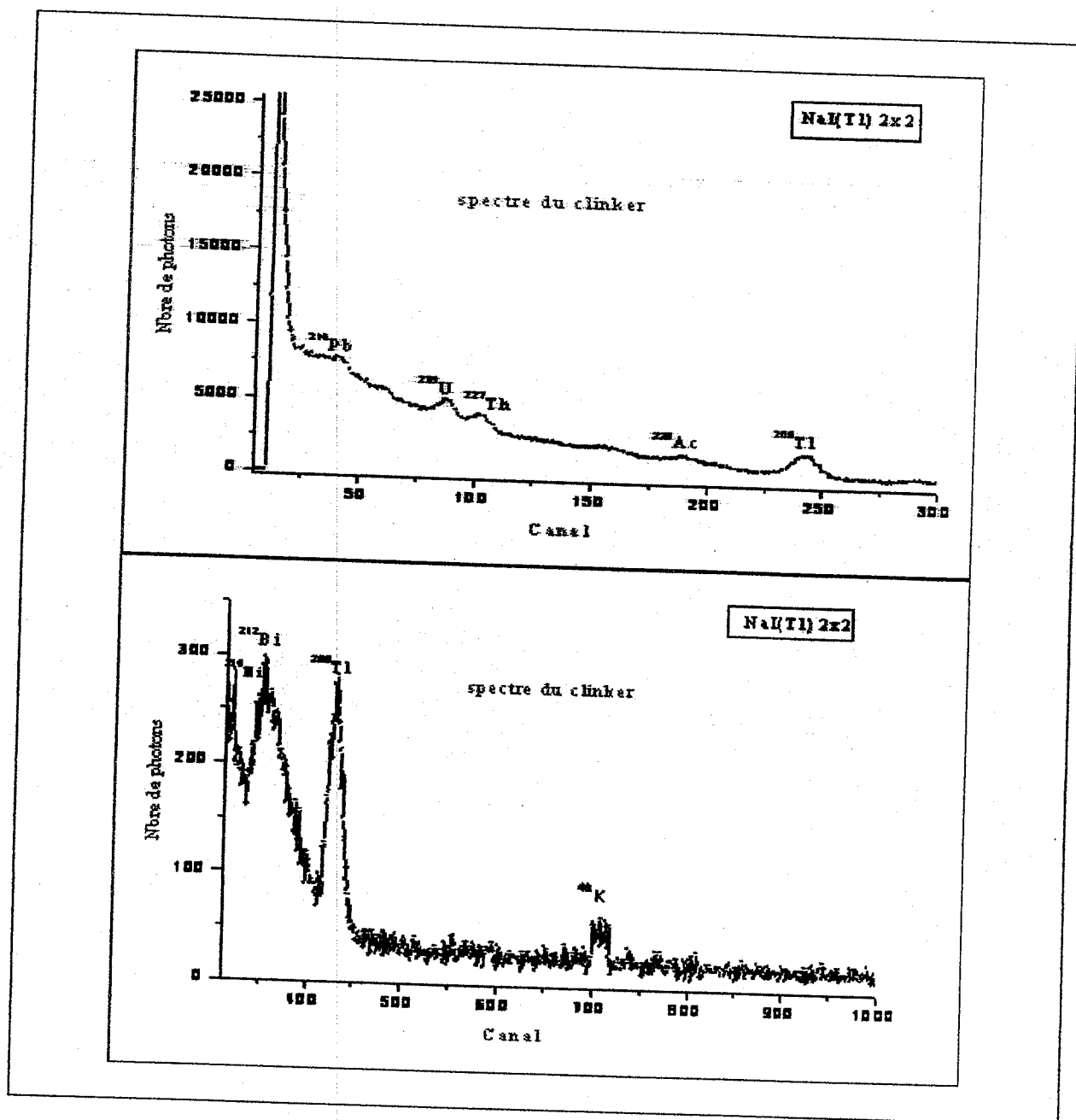


Figure V.10 : Spectre du clinker

V.1.3 : Résultats obtenus avec le semi-conducteur Ge (Hp)

- échantillon bentonite

Le spectre de l'échantillon (fig.V.11), décele tous les radioéléments existant dans ce matériau a savoir:  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{212}\text{Bi}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{40}\text{K}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ , qui sont représentés dans le tableau suivant:

Tableau V.11:classification des radioéléments identifiés dans la bentonite.

Ordre	Série Uranium 238	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{234}\text{Th}$	93.02	6454	0,0746
2	$^{226}\text{Ra}$	186.13	1418	0,01641
3	$^{214}\text{Pb}$	295.44	1425	0,01649
4	$^{214}\text{Bi}$	609.4	1274	0,0147
5	$^{214}\text{Bi}$	934.3	60	0.0006
6	$^{214}\text{Bi}$	1120.53	306	0,0035
7	$^{214}\text{Bi}$	1238.26	120	0,0013
8	$^{214}\text{Bi}$	1377.68	80	0.0009
9	$^{214}\text{Bi}$	1509.58	53	0.0006
10	$^{214}\text{Bi}$	1729.91	81	0,0009
11	$^{214}\text{Bi}$	1764.85	376	0,0043
12	$^{214}\text{Bi}$	2204.74	153	0,0017

Ordre	Série Thorium 232	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	$^{228}\text{Ac}$	129.17	347	0,0040
2	$^{228}\text{Ac}$	154.38	256	0,0029
3	$^{228}\text{Ac}$	209.22	447	0,0051
4	$^{228}\text{Ac}$	270.35	874	0,0101
5	$^{228}\text{Ac}$	328.08	260	0,0030
6	$^{228}\text{Ac}$	409.86	116	0,0013
7	$^{228}\text{Ac}$	463.07	249	0,0028

8	<sup>208</sup> Tl	510.99	1869	0,0216
9	<sup>208</sup> Tl	583.31	1339	0,0154
10	<sup>212</sup> Bi	727.24	269	0,0031
11	<sup>228</sup> Ac	795.14	152	0,0017
12	<sup>208</sup> Tl	860.69	132	0,0015
13	<sup>228</sup> Ac	911.38	839	0,0097
14	<sup>228</sup> Ac	969.01	762	0,0088
15	<sup>228</sup> Ac	1592.74	226	0,0026
16	<sup>208</sup> Tl	2103.77	148	0,0017
17	<sup>208</sup> Tl	2615.28	765	0,0088

Ordre	Série Uranium 235	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>235</sup> U	143.76	288	0,0033

Ordre	Potassium 40	Energies KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>40</sup> K	1461.08	2631	0,0304

Ordre	Radionucléide artificiel	Energie KeV	Comptage net Tcoll=86400sec	Cps
1	<sup>137</sup> Cs	661.57	249	0,0028





V.1.4: Comparaison entre les comptages nets du  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et d'  $^{238}\text{U}$  dans les échantillons analysés par le scintillateur 3x3 :

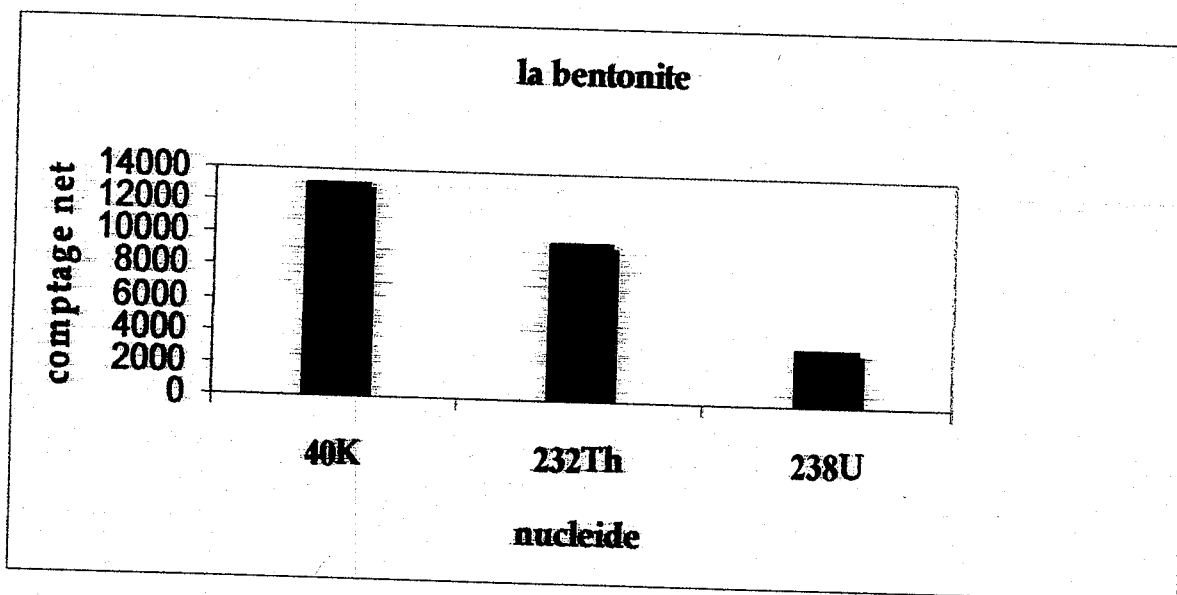


Figure: V.12 Comparaison des comptages nets des trois nucléides dans la bentonite

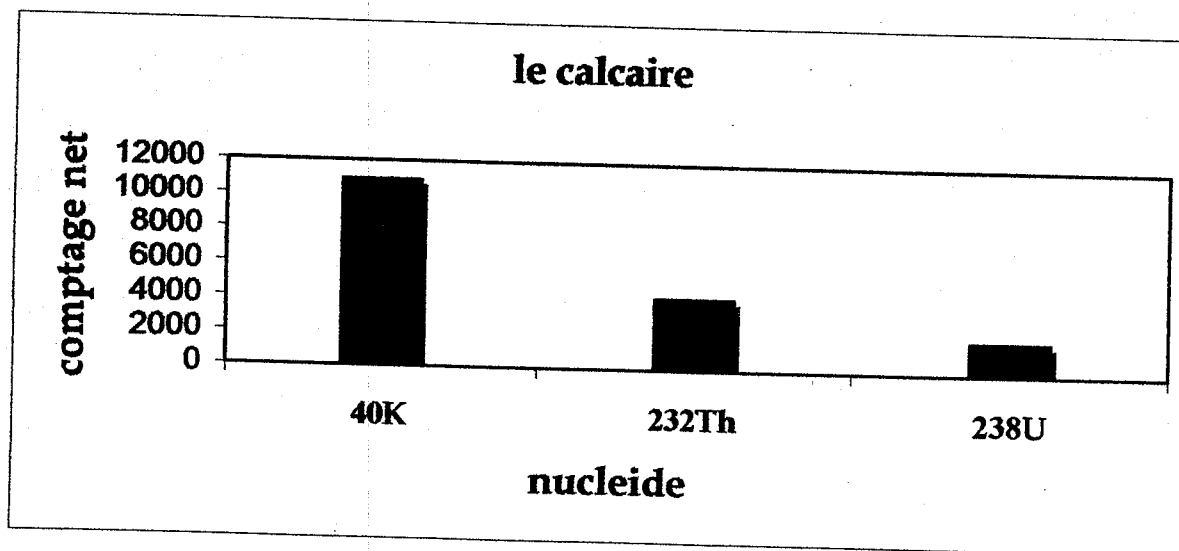


Figure: V.13 comparaison des comptages nets des trois nucléides dans le calcaire

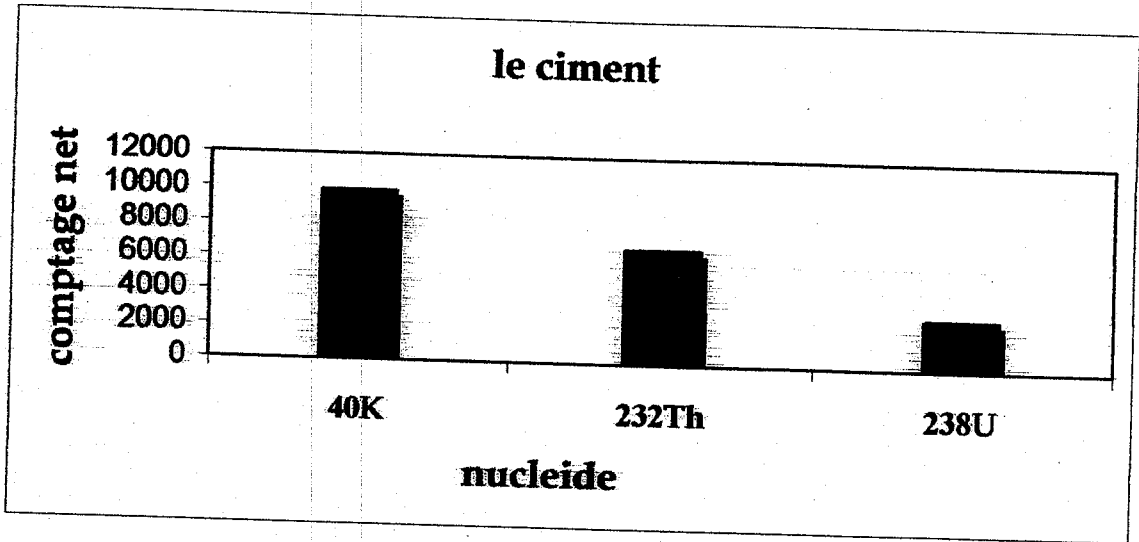


Figure: V.14 comparaison du comptage net des trois nucléides dans le ciment.

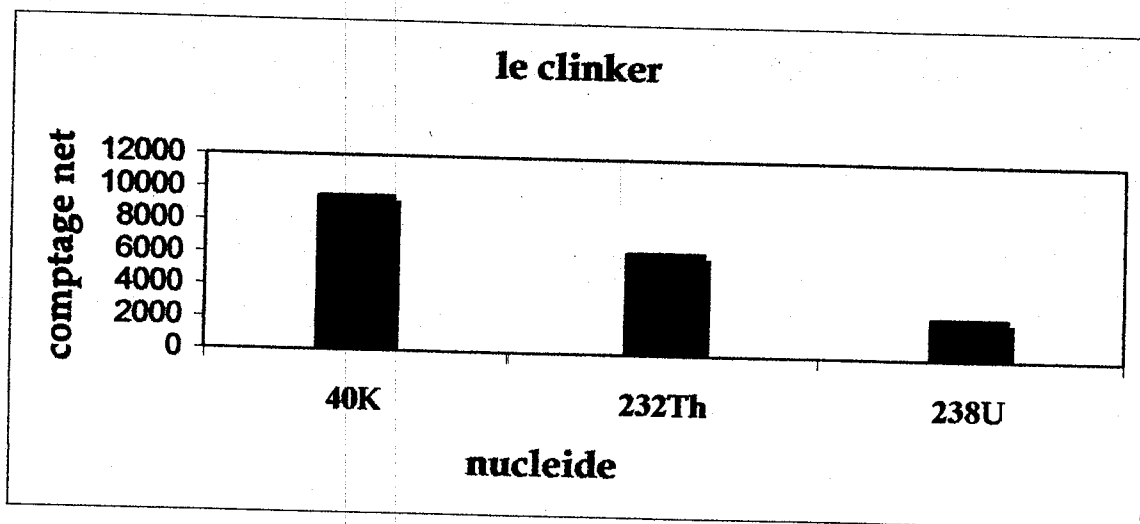


Figure V.15: Comparaison des comptages nets des trois nucléides dans le clinker

## V.2 : Discussion des résultats

### 1.) - Identification des éléments présents

D'après les résultats obtenus, on constate que les radionucléides mesurés correspondent aux familles radioactives naturelles de l' $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  et du  $^{232}\text{Th}$ , qui existe dans l'environnement, ainsi qu'à leurs descendants, parmi les plus importants on note:

$^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Pb}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{212}\text{Pb}$ ,  $^{227}\text{Th}$  et  $^{228}\text{Ac}$ .

On note aussi la présence du  $^{40}\text{K}$ , du  $^7\text{Be}$  et  $^{22}\text{Na}$ , radioéléments d'origines cosmiques, et du  $^{137}\text{Cs}$ , élément artificiel très important à cause de sa longue durée de vie (30 ans) qui lui permettra de persister dans l'environnement et constituer ainsi une contamination de plusieurs décennies.

La radioactivité due aux familles de l'Uranium 238, Uranium 235 et du Thorium 232 provient du sol qui constitue l'environnement et qui est la principale activité du bruit de fond naturel.

La présence du  $^{40}\text{K}$ , radionucléide naturel dans tous les échantillons justifie sa quantité appréciable dans l'écorce terrestre et dans le sol, par conséquent dans l'environnement.

Le béryllium 7 et sodium 22 produit dans la haute atmosphère, ils ne peuvent provenir que des retombés radioactifs entraînés au sol généralement par les eaux de pluie.

Le  $^{137}\text{Cs}$  ne peut provenir que des retombées radioactives dues aux explosions nucléaires opérées en atmosphères.

### 2.) - Comparaison entre les comptages nets du $^{40}\text{K}$ , $^{232}\text{Th}$ et d' $^{238}\text{U}$ dans les échantillons analysés par la chaîne NaI (TI) 3x3:

La quantité des différents radioéléments naturels dans le sol, donc dans l'environnement, varie en fonction des caractéristiques physico-chimique de ce dernier, à savoir la présence des minéraux, et de la matière organique.

L'allure générale des graphiques représentatives (figures :V.12, V.13, V.14, V.15) montre que le comptage net en  $^{40}\text{K}$  et donc sa quantité est la plus importante

si l'on la compare à celle des autres radioéléments, La valeur la plus élevée a été observée pour la bentonite.

Paradoxalement, le ciment présente la plus faible valeur en  $^{40}\text{K}$  avec un net comptage de "9901" et donc la plus faible quantité de ce radioélément.

Les comptages en  $^{232}\text{Th}$  et d' $^{238}\text{U}$  dans le calcaire sont respectivement "4201" et "1940", ces deux valeurs sont assez faible comparé aux autres échantillons.

Pour les trois radionucléides étudiés, le ciment présentes des quantités un peu plus élevé que le clinker, cette différence est probablement due aux ajouts naturels (gypse, calcaire et pouzzolane) ajoutés au clinker pour la fabrication du ciment.

Ces variations en quantité des 3 radioéléments, d'un échantillon à l'autre, laisse prévoir que le niveau de radioactivité est plutôt fonction de la composition et aux types de roches desquels les sols sont à l'origine.

### 3.) Comparaison entre les spectres de l'échantillon bentonite analysée par les trois détecteurs

Nous observons que le spectre obtenu avec la chaîne Ge (Hp) (figure V.11) montre l'existence d'une multitude de pics d'intensités variables et d'énergies voisines (différence de quelque Kev), et par conséquent l'existence de tous les éléments émetteurs gamma contenu dans l'environnement par l'échantillon tels que le  $^{137}\text{Cs}$  (661.6 keV),  $^{214}\text{Bi}$  (609.4 keV),  $^{208}\text{Tl}$  (583.31)....etc , comme il est indiqué dans le tableau V.11, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres spectres obtenus avec les 2 détecteurs à scintillation (tableau V.2 et V.7 ) qui présentent des pics assez large et moins fines qu'avec le Ge(Hp) à énergie égale, et un nombre limité des éléments identifié, qu'ils ne peuvent pas différencier entre deux éléments d'énergie très proches.

Cette différence entre les détecteurs est essentiellement due au caractéristiques de chaque détecteur et en particulier au pouvoir de résolution en énergie de chaque type de détecteur, tel qu'un détecteur à semi-conducteur Ge(Hp) présente un pouvoir de résolution d'autant meilleur ( 5 keV) qu'il permet de séparer des raies d'énergies plus rapprochés dans un spectre de rayonnement complexe, tandis qu'un détecteur à scintillation ne fournit pas en fait des impulsions présentant un pic de distribution d'amplitude bien net et caractéristique de l'énergie de rayonnement,

mais un doublet ou un triplet de pics plus ou moins bien définis à partir d'une seule énergie de rayonnement.

Si on compare le spectre de la bentonite obtenue avec Ge (Hp) avec un autre spectre du même échantillon réalisé par Michalis et al [29] (Figure V.16), on note la présence des mêmes éléments qui appartiennent aux familles de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  ainsi que le  $^{40}\text{K}$  (1460 keV), mais on remarque que les pics sont plus intenses, par exemple plus de  $3 \times 10^3$  coups a été observé pour le  $^{40}\text{K}$  (1460), environ  $2.5 \cdot 10^3$  coups pour le  $^{208}\text{Tl}$  (583 keV),  $10^4$  coups pour  $^{212}\text{Pb}$  (220 KeV) contre 900 coups pour  $^{40}\text{K}$ , 750 coups pour le  $^{208}\text{Tl}$  (583 keV), 1050 coups pour le  $^{212}\text{Pb}$  pour notre spectre expérimentale.

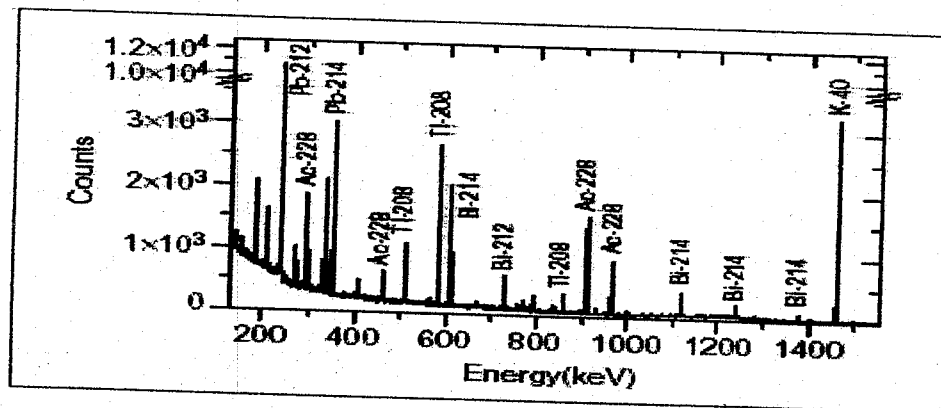


Figure: V.16 spectre de la bentonite.

Cette différence dans l'intensité entre les 2 spectres du même échantillon, nous a permis de dire que les rayonnements dans l'environnement ne dépendent pas seulement de la nature du sol ou de type de roche, mais aussi des conditions géologiques et géographiques dans laquelle sont constitué.

4.) Comparaison des rendements de comptages :

Les comptages nets (surfaces) en  $^{40}\text{K}$ , élément identifiés par les trois détecteurs dans l'échantillon bentonite sont donnés dans le tableau suivant :

détecteur	3 in×3in	2 in×2 in	Ge (Hp)
Comptage net en $^{40}\text{K}$	13119	4234	2631
Cps	0.15	0.05	0.03

D'après ce tableau, on remarque que le scintillateur  $3 \times 3$  indique la valeur du comptage la plus élevée "13119", ce qui correspond à 0.15 cps, alors que la valeur la plus basse a été observé pour le détecteur Ge(Hp) "2631" (0.03 Cps).

Cela veut dire que:

- Le scintillateur  $3 \times 3$  a permis de collecté 0.15 photon gamma par seconde.
- Le scintillateur  $2 \times 2$  a permis de collecté 0.05 photon gamma par seconde.
- Le Ge (Hp) a permis de collecté 0.03 photon gamma par seconde.

Cette différence dans le rendement de comptage entre les 2 scintillateurs est probablement due à la différence dans leurs dimensions et forme, tel que l'utilisation d'un scintillateur de grandes dimensions permet d'augmenter le rendement de comptage, puisque le nombre de photons absorbés augmente avec l'épaisseur traversée, il semble donc qu'à tous points de vue on ait intérêt à utilisé un scintillateur aussi grande que possibles.

Le faible rendement de comptage que présente le Ge(Hp) résulte de la faible efficacité (15%) qui caractérise ce type de détecteur.

CONCLUSION

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES



## Conclusion:

Le travail présenté dans ce mémoire a pour objectif principale l'identification des éléments radioactifs présent dans les échantillons analysé et leur classification selon les familles radioactives, ainsi que la comparaison des résultats obtenus par les trois détecteurs utilisés.

Cette étude nous a permis la maîtrise des procédés et techniques de conditionnements des échantillons, ainsi que la familiarisation avec la spectrométrie gamma et le logiciel de traitement "Génie-pc".

L'analyse par spectrométrie gamma des échantillons a révélé pour l'ensemble des matrices traité, la présence d'éléments tant naturels qu'artificiels.

En effet, pour ce qui est des éléments naturels, on note l'existence de  $^{234}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$ ,  $^{214}\text{Bi}$ ,  $^{228}\text{Ac}$ ,  $^{212}\text{Bi}$  et du  $^{40}\text{K}$ , qui appartiennent aux chaînes radioactives naturelle, quant aux éléments artificiels, nous avons identifié la présence du césium 137.

La présence de ces radioéléments dans le bruit de fond et dans les échantillons étudié et donc dans l'environnement, nous laisse prévoir qu'il y a un certain impact des rayonnement qui sont émis par ces radionucléides sur l'environnement, donc il faut toujours gardé à l'esprit que la radioactivité nous entoure, et il est donc nécessaire d'établir un programme de contrôle ou de surveillance de l'environnement, a fin de veiller a ce que les niveaux d'exposition ne dépassent pas les limites fixées par les autorités.

La radioactivité d'un milieu donné dépend de sa composition, de sa nature, mais aussi des conditions géologiques et géographiques dans laquelle il est constitué.

Le choix de l'un ou l'autre des détecteurs est dicté par l'objectif de l'étude, les détecteurs à scintillation sont utilisés dans le cas ou l'on s'intéresse à une grande

## Références Bibliographiques

- [1] Rapport IRSN, « Guide méthodologique pour l'acceptation de déchets présentant une radioactivité naturelle dans les installations classées d'élimination en France », Partie 22006.
- [2] P. SKoog, M. West, B. Holler, «Principe instrumental» Edition de boek université, 2002.
- [3] M.EISENBUD, «Environmental Radioactivity», Edition Academic Press, 1973.
- [4] Rapport UNSCEAR, «Rayonnement Ionisant, Sources et Effets Biologiques », AIEA, VIENNA 1977.
- [5] UNEP/IAEA: «Assessment of the State of Pollution of the Mediterranean Sea by Radioactive Substances». MAP Technical Reports Series No. 62, UNEP, Athens, 1992.
- [6] A.Rannou, « Connaissance actuelle des sources d'irradiation naturelle », Radioprotection, vol.34, N° 4 (1999).
- [7] Catalogue de l'exposition, Musée national d'histoire naturelle « Histoire naturelle de la radioactivité », Paris (1996).
- [8] .Kane, M. Sternheim, « physique », inter-editions Paris (1986).
- [9] D .Bard, B. Lévesque, P. Pirard, P. Hubert et P. Verger, « Rayonnements Ionisants ». Edition : M. Gérin et coll., 2003.
- [10] E.Gerber, M. Typografik, N. Berne « Radioactivité et radioprotection », Office fédéral de la santé publique, mars 1999.
- [11] R.Ouahes et B.Dévallez, «chimie générale », édition 2003.
- [12] E.Ralph et H. Andrews, « Nuclear Radiation Physics». 4<sup>th</sup> edition, Prentice- Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey (1972).
- [13] C. McQuarrie, D. McQuarrie, P.Rock « chimie générale », édition De boeck université, 2003.
- [14] W.B.Marn, A.Rytz, A.Spernoz « Radioactivity measurements: principles and practice», Edition pergamon press, 1991.
- [15] Division national des eaux minérales et thermales (DNEMT) «Eau minérale et radioactivité en France », note technique n° 15, juillet 2000.

- [16] I. G. Draganic, Z. D. Draganic, et J.P. Adolph, « Radiation and Radioactivity on Earth and Beyond », 2<sup>nd</sup> ed, CRC Press, Boca Raton, FL, (1993).
- [17] F. Jacques, « Constantes nucléaires », Techniques de l'ingénieurs, 1996.
- [18] S. Berredjem, « Contrôle radiologique du sol autour de l'installation nucléaire de Birine » Rapport de stage, 2002.
- [19] R.L. KATHREN, « Radioactivity in the Environmental, Sources Distribution and Surveillance ». Harwood Academic Publishers, 1984.
- [20] G.F. Knoll, « Radiation detection and measurement », 2<sup>nd</sup> Edition, 1989.
- [21] « Radiation Measurement », Department of Health and Human Services centers for diseases control and prevention, FACT SHEET, December 23, 2003.
- [22] BERNARD D. GOLDSTEIN, « Evaluation of Guidelines for Exposures to Technologically Enhanced Naturally Occurring Radioactive Materials », National Academy Press Washington, 1999.
- [23] Etienne ROTH, « Méthodes nucléaires d'analyse », Notions de radioprotection, Techniques de l'Ingénieur, 1996.
- [24] I. Zvara, P. Povinec et I. Sykora. « Determination of very low levels of radioactivity », Pure and Appl. Chem., vol. 66, n° 12, 1994.
- [25] A. Fred., J. Chairman « Potential Radiation Exposure in Military Operations: Protecting the Soldier Before, During, and After », National Academy Press, Washington, D.C. (1999).
- [26] « Sources and Effects of Ionizing Radiation », United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR); New York. (2000).
- [27] H. De Choudens et G. Troesch « Radioprotection dans les installations nucléaires », Lavoisier, 1997.
- [28] H. Gentilly « Les effets biologiques des rayonnements ionisants », Hydro Québec, Revision 2001.
- [29] M. Tzortzisa, H. Tsertosa et al « Gamma-ray measurements of naturally occurring radioactive Samples from Cyprus characteristic geological rocks », Elsevier science, 2003.

- [30] H.Florou et P.Kritidis « Gamma radiation measurements and dose rate in the coastal areas of a volcanic island, Aegean Sea, Greece». *Radiat. Prot. Dosim.* 45(1992) 277.
- [31] E.Merril et G.Thomas , «Environmental Radioactivity: from natural, industrial and military Sources». 4<sup>th</sup> edition, Academic press, publishers San Diego (1997).
- [32] R.Fukai,Y. Yokoyama« Natural radionuclides in the environment», Vol. I,Part B, Springer-Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1982.
- [33] M. Eisenbud "Environmental Radioactivity," Academic Press, Orlando, 1987.
- [34] M.Bethesda "Ionizing Radiation Exposure of the Population of the United Stat", NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements, Report No. 93, 1987.
- [35] Bulletin AIEA « Radioactives sources», vol 31, N° 02 (Vienne-Autriche) ,1999.
- [36] « Expertise de la situation radioécologique du site COGEMA des Bois-Noirs Limouzat », Synthèse du Comité de Suivi Scientifique et Technique, Version 2003.
- [37] D.LAL et E.PETERS "Cosmic ray produced radioactivity on earth. In: Encyclopedia of physics", Springer-Verlag, New York, 1967.
- [38] J.N.Capdevielle «les rayons cosmiques»,Coll.Que Sais-Je.N° 729. 1984.
- [39] E.Holm, «Radioécologie, lectures in the Environnemental Radioactivity», World scientific, 1994.
- [40] B.V.Baron «Tchernobyl vingt ans après, Nouveau regard sur Tchernobyl, L'impact sur la santé et l'environnement». Extrait de la Revue Générale Nucléaire N°2, Mars-Avril 2006.
- [41] « Contrôle des sources radioactives »Bulletin AIEA (International Atomic Energy Agency), volume 32, 1989.
- [42] C. Dupont, « De la source à l'homme», Revue: LEFS CEA-N°48, 2003.
- [43] « Saisine de la commission nationale du débat public (CNDP) sur les options générales en matière de gestion des déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue». France, 2006.
- [44] « Sources and Effects of Ionizing Radiation», United Nations Publication Sales No. E.96.IX.3, United Nations, New York. (UNSCEAR) (1996).
- [45] S.Yamashita et Y.Shibata « Chernobyl: A decade», Elsevier Science, New York.1997.
- [46] M. Trottier «Impact sur la santé», Proxim Educ. Inc, Décembre 2003.

- [47] V.Beir « Health Effects of Exposure to Low Levels of Ionizing Radiation». Washington, DC: National Academy Press. 1990.
- [48] G.Blasse et B.C.Grabmaier «luminescent materials», Springer Verlag (1994)
- [49] D. Lesueur, « Détection de rayonnement à très basse température», 3<sup>ème</sup> Ecole d'Automne d'Aussois, Sept.1996.
- [50] P.Chevallier «Detection et mesure des rayonnements nucléaires».Techniques de l'ingénieur, 1996.
- [51] «Spectrométrie gamma», notice technique de base, Savigny-Le- temple, 30 mars 2005.
- [52] K. Siegbahn, «Alpha, beta and gamma-ray spectroscopy», North Holland Publishing Company (1965).
- [53] «The procedures Manual of the Environmental Measurements Laboratory». U.S. Department of energy. HASL-300, 28<sup>th</sup> Edition, Vol. 1, 1997.
- [54] S.Lenore S, W .Chair et al “standard methods for the examination of water and waste water”, American public health association, 20<sup>th</sup> Edition 1998.
- [55] «Measurement of radioactivity in the environment – Soil- »Part 1, DRAFT International Organization for Standardization, ISO/DIS 18589-1.
- [56] R.L. William, «Techniques for nuclear and particle physics experiments», Springer Verlag Berlin (1987).
- [57] «Methodes spectrométriques d'analyses et de caractérisation», génie des procédés, école des mines de Saint-Étienne.
- [58] «Cours de radiophysique», volume 1, version 2004.
- [59] S. Legoupil, «Tomographie d'émission gamma a partir d'un nombre limité de détecteurs appliqué a la visualisation d'écoulements», Thèse de doctorat, CEA/Saclay, 1999.
- [60]J. Dutreix; A.Desgree; D.Bok; J.H.Vinot"Biophysique des Radiations" Masson, 1980.
- [61] K.Hamamatsu «Photomultiplier Tube Handbook», Revision 2.
- [62] J. P. Harrison, «Characterization and Analysis of NaI (TI) and BGO Detectors», Los Aiamos National Laboratory, Maryland 20910.
- [63] «Background Radiation, Natural versus Man-Made», Environmental Health, Office of Radiation

Protection, Washington State, Fact Sheet 10, July 2002.

[64] Documents et rapports annuels du syndicat français de l'industrie cimentière.

[65] « Bentonite, Calcaire », encyclopédie Encarta 2006, Microsoft Encarta.

[66] **R. Veigaa, N. Sanches, R.M. Anjosa, K. Macarioa, et al**, « measurement of natural Radioactivity in Brazilian beach sands », Elsevier Science, 2005.

[67] « Génie 2000 », logiciel de spectrométrie, Manuel d'utilisateur, Canberra Eurisys S.A, France, 2005.

## الملخص

إن الهدف من هذا العمل هو دراسة تأثير النظائر المشعة الطبيعية على البيئة. التعريف بالعناصر المشعة المتواجدة في العينات المدروسة سواء في أي وسط طبيعي أو صناعي (الكلس، الطين، الأسمنت، الكنكر) قد تم بتحليل هذه الأخيرة بمطيافية غاما (spectrométrie gamma) مستعملين في ذلك ثلاث عدادات مختلفة. تشير نتائج هذه الدراسة إلى تواجد هذه العناصر طبيعيا و اصطناعيا بحيث نجد أن العناصر المشعة طبيعيا ممثلة في  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{40}\text{K}$ , أما بالنسبة لغير الطبيعية فهي ممثلة في  $^{137}\text{Cs}$ . فيما يخص التعريف و التحليل الكمي أين تتطلب دراسة جميع العناصر المتواجدة يتم استعمال العدادات نصف موصلة (semi-conducteur).  
الكلمات المفتاحية: مطيافية غاما، البيئة، النظائر، العناصر المشعة، قراءة الإشعاعات.

## Résumé

L'objectif de ce travail est l'étude de l'impact des rayonnements isotopiques sur l'environnement. L'identification des éléments radioactifs présents dans les échantillons prélevés dans quelques milieux naturels et industriels (calcaire, bentonite, ciment et clinker) a été faite par spectrométrie gamma en utilisant trois détecteurs différents.

Cette analyse a révélé pour l'ensemble des matrices traitées, la présence d'éléments tant naturels qu'artificiels. En effet, pour ce qui est des éléments naturels, on note l'existence de  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  et du  $^{40}\text{K}$ , qui appartiennent à la chaîne radioactive naturelle. Quant aux éléments artificiels, la présence du  $^{137}\text{Cs}$  a été identifiée.

Dans le cas de l'identification et de la quantification des différents radionucléides présents dans l'échantillon, où un grand pouvoir de résolution s'impose, on utilise des détecteurs à semi-conducteur.

Mots clés: environnement, isotopes, radioactivité, spectrométrie gamma, détection des rayonnements.

## Abstract

The aim of this work is the impact study of the isotopic radiations (NORM) on the environment. The identification of the radioactive elements present in the samples taken in some natural and industrial environments (limestone, bentonite, cement and clinker) was released by gamma spectrometry using three different detectors. This analysis revealed for the treated matrices, the presence of elements as well natural as artificial. Indeed, as regards to the natural elements, one notes the existence of  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$  and of  $^{40}\text{K}$ , which belong to the natural radioactive chain. As for the artificial elements, the presence of  $^{137}\text{Cs}$  was identified.

In the case of the identification and quantification of the various radionuclides present in samples, where a great resolution is essential, one uses detectors with semiconductor.

Key words: environment, isotopes, radioactivity, ionizing radiations, Gamma spectrometry, radiation detection.