

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira- Bejaia



Faculté des sciences exactes
Département de Physique
Option : Biophysique et Imagerie

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de master

Thème

Détermination de l'activité de l'iode-131 dans les échantillons biologiques par spectrométrie gamma

Au niveau de CRNA

Présenté par : M^{elle} MEZOUAR Nassima & M^{elle} TAZAMOUCHT Dalila.

Soutenu publiquement le 17 juin 2015 devant le jury composé de :

M ^{me} N. Oulebsir	MCB (UAMB)	Présidente
M ^{me} M. Mezaguer-Lekouaghet	Attachée de recherche (CRNA)	Promotrice
M ^f M. Arib	Directeur de recherche (CRNA)	Examineur
M ^f T. Mostfaoui	MCA (UAMB)	Examineur

Année Universitaire : 2014/2015



Remerciement

Nous remercions le bon Dieu de nous avoir donnée la force, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

On tient tout particulièrement à exprimer nos profondes gratitude ainsi que nos sincères reconnaissances à notre promotrice M^{me} M. Mezaguer-Lekouaghet, attachée de recherche au CRNA pour nous avoir proposée ce sujet, guidée par ses conseils judicieux et avisée et encouragée tout au long de notre stage.

On tient à remercier très respectueusement M^{me} Z. Lounis-Mokrani, et M^r Arib de nous avoir accueillies dans leurs divisions et laboratoire, nous tenons à remercier également M^{elle} D. Mebhah, M^r M. Ait Ziane, et M^r D. Tayeb Erahmani pour leurs aides et discussions fructueuses et constructives qu'ils ont apportés.

Nous remercions vont également à nos parents et aux membres de nos famille pour leurs soutiens incommensurables tout au long de nos études, pour leurs encouragements et leurs motivations.

On remercie aussi les membres de jury qui ont accepté d'examiner notre travail grâce à qui nos travaux de recherche prennent de la valeur suite à leurs critiques constructives.

On tient finalement à remercier tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin.

Nassima et Dalila



Dédicace

Je dédie ce modeste travail à ...

La lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, celle qui m'a éclaircie les chemins, celle qui n'a cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, celle qui est présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait, rien que pour toi maman, tous les mots du monde ne suffiront pas pour te remercier.

L'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, la personne qui m'a donné la force, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir rien que pour toi papa, que Dieu te préserve, t'accorde santé, bonheur, et te protège de tout mal inchallah.

Mes chers frères & sœurs, Raida, Yazid, Mahdia, Noureddine, Karim en souvenir d'une enfance dont nous avons partagé les meilleurs et les plus agréables moments. Ce travail est un témoignage de mon attachement et de mon amour.

Toute la famille Mezouar et Touahri.

Tous mes amis (es) en cas particulière Katia, Lynda, Sabrina et Dalila.

Toute la promotion Biophysique et Imagerie sans oublier tous ceux qui m'ont enseignés tout au long de ma vie scolaire.

Toutes personnes qui me connaissent de près ou de loin.

Nassima



Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux personnes les plus chères au monde :

*Mes parents qui m'ont toujours aidé et encouragé dans mon parcours
universitaire,*

Sans oublié leurs sacrifice et leurs amour.

A mon cher et unique frère.

A mes sœurs, leurs maris et mes deux adorables neveux.

A mes meilleures amies Nassima, Yasmina et tous mes amis(es).

A toute la promotion de Master Biophysique et Imagerie.

A ceux qui m'ont chers, la ou ils pourraient se trouver.

Dalila

Table des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste d'abréviations	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les rayonnements	3
I.1. Différents types des rayonnements ionisants	3
I.2. Interaction des rayonnements ionisants avec la matière	6
I.2.1. Interaction des rayonnements alpha (α) avec la matière	6
I.2.2. Interaction des rayonnements bêta (β) avec la matière	7
I.2.3. Interaction des rayonnements photoniques avec la matière	7
I.2.4. Atténuation et absorption d'un faisceau de photons	10
I.3. Différents type d'exposition aux rayonnements ionisants	11
I.3.1. Exposition externe	11
I.3.2. Contamination externe	12
I.3.3. Contamination interne	13
I.4. Effets biologiques des rayonnements ionisants	14
Chapitre II : Généralités sur l'iode-131	16
II.1. Origines de l'iode-131	16
II.1.1. Explosions nucléaires atmosphériques	16
II.1.2. Production au sein des réacteurs nucléaires	16
II.1.3. Rejets des installations nucléaires	16
II.2. Propriétés de l'iode-131	17
II.2.1. Propriété radio-physique	17
II.2.2. Propriété biologique	18
II.3. Toxicité	18
II.3.1. Effet de l'iode-131 sur la santé	18
II.3.2. Effet de l'iode-131 sur l'environnement	18
II.4. Utilisation de l'iode-131 en diagnostique et en thérapie	19
II.4.1. Utilisation de l'iode-131 en diagnostique	19
II.4.2. Utilisation de l'iode-131 en thérapie	20

Chapitre III : Spectrométrie gamma	22
III.1. Principe de la technique de spectrométrie gamma	22
III.2. Chaîne d'acquisition	23
III.3. Détecteurs	24
III.3.1. Principe de fonctionnement	24
III.3.2. Détecteur au Germanium Hyper Pur (GeHP)	25
III.3.3. Détecteur à Iodure de Sodium (NaI(Tl))	25
III.4. Calibration de la chaîne spectrométrie	26
III.4.1. Calibration analogique	26
III.4.2. Calibration en énergie	27
III.5. Calcul de l'activité	28
Chapitre IV : Matériels et méthodes	30
IV.1. Mesures de radioprotection	30
IV.1.1. Moyens de surveillance	30
IV.1.2. Moyens de protection	32
IV.2. Matériels nécessaires à l'expérimentation	34
IV.3. Conditions de vie des rats	37
IV.4. Préparation des solutions de l'iode-131	39
IV.5. Mode opératoire	39
IV.6. Récupération des urines	41
IV.7. Analyse du corps entier	41
IV.8. Sacrifice des rats et la récupération de la thyroïde	42
IV.9. Préparation des standards pour les analyses anthropogammamétrique et spectrométrie gamma	43
Chapitre V : Résultats et discussions	45
Conclusion générale	58
Références bibliographiques	
Annexes	
Glossaire	

Liste des figures

Figure 1. Emission alpha (α)	4
Figure 2.a. Emission bêta plus (β^+)	5
Figure 2.b. Emission bêta moins (β^-)	5
Figure 3. Emission d'un rayonnement gamma(γ)	6
Figure 4. Effet Photoélectrique	8
Figure 5. Effet Compton	9
Figure 6. Création d'une paire électron-positron à proximité d'un noyau par un photon incident	9
Figure 7. Prédominance des interactions photon-matière en fonction de l'énergie du photon incident $h\nu$ et du numéro atomique Z	10
Figure 8. Risques dus aux différents modes d'expositions	11
Figure 9. Pouvoir de pénétration des différents rayonnements	12
Figure 10. Fission nucléaire du noyau de l'uranium pour la production de l'iode-131	16
Figure 11. Désintégration de l'iode-131	17
Figure 12. Différents forme de l'iode-131 utilisé en médecine nucléaire	19
Figure 13. Scintigraphie de la thyroïde	20
Figure 14. Thérapie a l'iode-131 dans le cas d'un cancer de la thyroïde	21
Figure 15. Chaîne d'acquisition de la spectrométrie gamma	23
Figure 16. Détecteur de GeHP	25
Figure 17. Détecteur de NaI(Tl)	26
Figure 18. Comparaison de la mesure d'une source de ^{137}Cs émettrice de rayonnement gamma de 662 KeV par un détecteur GeHP et un détecteur NaI(Tl)	28
Figure 19. Dosimètre thermoluminescent pour le corps entier	31
Figure 20. Dosimètre thermoluminescent de type bague	31
Figure 21. Radiamètre γ muni d'une sonde α, β	32
Figure 22. Gants et tablier plombé	32
Figure 23. Seringue plombé	33
Figure 24. Papier absorbant	33
Figure 25. Hotte à flux laminaire avec trois châteaux de plomb	33
Figure 26. (A) Conditionnement externe	34
(B) Conditionnement interne de l'iode 131	34

Figure 27. Rat Wistar	34
Figure 28. Sonde de gavage	35
Figure 29. Activimètre	35
Figure 30. Chaîne de spectrométrie gamma	36
Figure 31. Appareillage d'anthropogammamétrie	36
Figure 32. Cage ordinaire	37
Figure 33. Cage métabolique	38
Figure 34. Grains de céréales	38
Figure 35. Biberons à eau	38
Figure 36. Pesé du rat	40
Figure 37. Gavage du rat	41
Figure 38. Analyse du corps entier par anthropogammamétrie	42
Figure 39. Fixation de rat avec des épingles piquées aux mains et pieds	42
Figure 40. Ouverture au niveau de l'axe horizontal des urines	43
Figure 41. Procédure de récupération de la trachée portant la thyroïde	43
Figure 42. Spectre du standard des urines	46
Figure 43. Spectre du standard de la thyroïde	47
Figure 44. Evolution de l'activité du corps entier en fonction du temps pour le rat n°05	49
Figure 45. Activité normalisées du corps entier en fonction du temps pour le rat n°05	50
Figure 46. Spectre de l'échantillon urinaire du rat n° 02,24h après gavage	51
Figure 47. Activité normalisée en fonction du temps pour les urines	54
Figure 48. Spectre obtenu avec le comptage de la thyroïde du rat n° 03	55
Figure 49. Cinétique de fixation thyroïdienne de l'iode-131	56
Figure 50. a- Poubelle plombée, b- Fut de stockage, et c- Jerrican pour l'entreposage des déchets	

Liste des tableaux

Tableau 1. Activité massique et période des principaux radio-isotopes de l'iode	15
Tableau 2. Poids des rats et l'activité des solutions de contamination	45
Tableau 3. Paramètres pour le calcul de l'efficacité de détection de l'iode dans des Urines	46
Tableau 4. Calcul de l'efficacité de détection du standard corps entier	47
Tableau 5. Calcul de l'efficacité du standard de la thyroïde	48
Tableau 6. Activités du corps entier à différent intervalle de temps	49
Tableau 7. Périodes effective et période biologique de l'iode-131 chez le rat Wistar	50
Tableau 8. Paramètres et activités calculés pour l'échantillon d'urines du rat n°2, récoltés 24h après gavage	52
Tableau 9. Moyenne des activités normalisées pour les urines	53
Tableau 10. Poids de la thyroïde des rats après le sacrifice	54
Tableau 11. Calcul des activités normalisées des thyroïdes	55

Liste d'abréviations

^3H	Tritium.
$\text{R}\gamma$	Rayon gamma.
${}_{-1}^0\text{e}$	Négaton.
${}_{+1}^0\text{e}$	Positron.
Z	Numéro atomique.
N	Nombre de neutron.
A	Nombre de masse.
$^{\circ}\text{C}$	Degré celsius.
$\%$	Pourcentage.
atm	Atmosphère.
cm^{-1}	Centimètre moins un.
Km/s	Kilomètre par seconde.
ml	Millilitre.
h	Heure.
min	Minute.
s	Second.
Bq	Becquerel.
MeV	Méga électron Volt.
keV	kilo electron Volt.
MWe	Méga Watt.
eV	Electro Volt.
Bq/g	Becquerel par gramme.
SV/Bq	Sievert par Becquerel.
Cp	Coup.
Std	Standard.
TLD	Thermo luminescent.
kBq	kilo Becquerel.
MBq	Mega Becquerel.
T_b	Période biologique.
T_P	Période physique.
T_{eff}	Période effective.

L'iode-131 est utilisé depuis plus de 50 ans pour le traitement du cancer de la thyroïde, de métastases, de l'hyperthyroïdie et du goitre bénin. C'est un outil de choix pour les applications médicales en raison de sa fixation préférentielle par la glande thyroïde. Il est utilisé à faible dose comme traceur pour des diagnostics en médecine nucléaire. A fortes doses, il est aussi utilisé dans les radiothérapies des cancers différenciés de la thyroïde et des hyperthyroïdies et ce par voie orale [1].

Comme l'iode-131 est un isotope à haut risque en raison de sa grande mobilité dans l'environnement, sa manipulation nécessite des conditions spécifiques en matière de protection radiologique des travailleurs notamment contre le risque de contamination. En effet, d'un point de vue radiotoxicologique, l'iode-131 présente une bonne assimilation dans l'organisme et surtout une accumulation d'un organe cible qui est la glande thyroïde. L'élimination de l'iode-131 de l'organisme est régit par deux phénomènes à savoir l'élimination physique due à sa période radioactive (8.02j) et l'élimination biologique qui dépend principalement du métabolisme de l'iode [2].

Pour mesurer la contamination à l'iode-131 présent dans l'organisme, deux techniques sont possibles à savoir la mesure *in vivo*, qui consiste à mesurer directement les rayonnements émis par les radionucléides présents dans l'organisme, et la mesure *in vitro*, qui déduit des mesures d'activité effectuées sur plusieurs excréta (urines ou fèces) [3].

Lors d'une contamination à l'iode-131, les mesures directes par anthropogammamétrie (*in vivo*) révèle que l'iode-131 ne se fixe pas uniquement au niveau de la glande thyroïde mais se trouve en circulation dans l'organisme corps entier.

Dans ce modeste travail on s'intéresse à la détermination des périodes effective et biologique de l'iode-131 a travers les mesures des activités , à travers la mesure corps entier et dans deux échantillons biologiques à savoir les urines et un tissus biologique, et cela en utilisant la spectrométrie gamma qui est un outil de choix dans le cas de la détermination de l'activité de l'iode-131 dans un échantillon donné même à de très faible concentration et sur des échantillons non traités.

A cet effet, un modèle expérimental animal, le rat de race Wistar, a été utilisé, le choix de ce modèle est justifié par le fait qu'environ 90 % des gènes du rat sont partagés avec

l'homme et que tous les gènes humains connus pour être associés à des maladies ont des équivalents dans le génome du rat.

Le travail que nous présenterons dans ce mémoire se divise en deux parties : une partie théorique et une partie pratique.

Dans la partie théorique nous allons commencer par donner les bases physiques des rayonnements ionisants et leurs interactions avec la matière ainsi que leurs effets biologiques puis on parlera de l'iode-131, de son origine, de ses caractéristiques, de ses propriétés, de son utilisation ainsi que ses effets sur la santé et sur l'environnement et enfin on traitera du principe et du fonctionnement de la spectrométrie gamma.

Dans la partie expérimentale nous allons détailler le contexte de cette étude ainsi qu'une description des matériels et méthodes utilisés. Et enfin, les résultats de nos travaux seront présentés et discutés, et on finira par une conclusion.

D'une manière générale, on peut définir un rayonnement ou radiation comme un mode de propagation de l'énergie dans la matière, sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. Les rayonnements ne peuvent être détectés et caractérisés que grâce à leurs interactions avec la matière dans laquelle ils se propagent. Ils peuvent céder au milieu qu'ils traversent, la totalité ou une partie de leur énergie au cours de leurs interactions avec ce milieu. Parmi ces rayonnements, les rayonnements ionisants et les rayonnements non ionisants dont des applications importantes ont été développées en médecine, particulièrement au diagnostic et au traitement des cancers.

Ce chapitre présente une synthèse des caractéristiques générales sur les rayonnements ionisants.

I. Généralités sur les rayonnements ionisants

I.1. Différents types des rayonnements ionisants

Un rayonnement est dit ionisant quand il est susceptible d'ioniser la matière, directement ou indirectement [4]:

- Les rayonnements directement ionisants sont des particules chargées tels que les électrons, les protons, les particules alpha et les ions lourds.
- Les rayonnements indirectement ionisants sont des particules non chargées tels que les neutrons et les photons (rayons X et rayonnement gamma).

Dans la nature, la plupart des noyaux d'atome sont stables, d'autres non. Ces derniers se transforment alors spontanément, et de façon irréversible, en d'autres atomes plus stables. Ces transformations successives, appelées désintégrations, s'accompagnent d'émissions de différents types de rayonnements: alpha, bêta et photons [5] :

➤ Rayonnement alpha (α)

Le rayonnement α est un noyau d'hélium émis suite à une désintégration (Figure 1), constitué de deux protons de charge positive et deux neutrons de charge nulle, il est caractérisé par:

- Une énergie élevée.

- Un parcours dans la matière est court (quelques centimètres dans l'air).

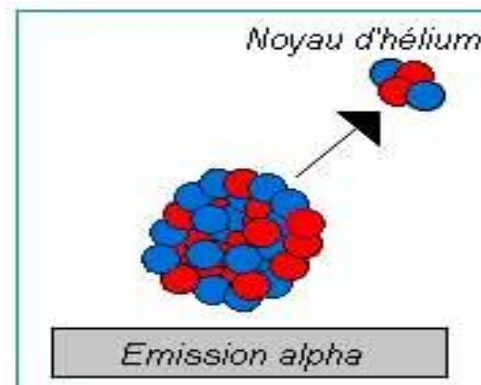


Fig.1. Emission alpha (α).

Des atomes dont les noyaux sont trop chargés en protons ou en neutrons émettent souvent un rayonnement α . Ils se transforment en un autre élément chimique dont le noyau est plus léger.

A titre d'exemple, l'uranium-238 (^{238}U) est un élément radioactif émetteur α et qui se transforme spontanément en thorium-234 (^{234}Th) [6]:



➤ Rayonnement bêta (β)

Le rayonnement β est constitué d'une particule de masse faible (1800 fois plus faible que celle du proton ou du neutron), porteur d'une charge électrique, positive (positron ou positon, β^+) (Figure 2.a) ou négative (électron, β^-) (Figure 2.b). Le rayonnement β provient des réactions de désintégration nucléaire et est associé ou non à une émission gamma.

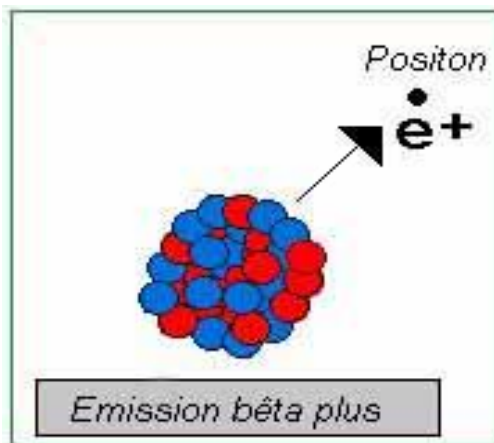


Fig.2.a. Emission bêta plus (β^+).

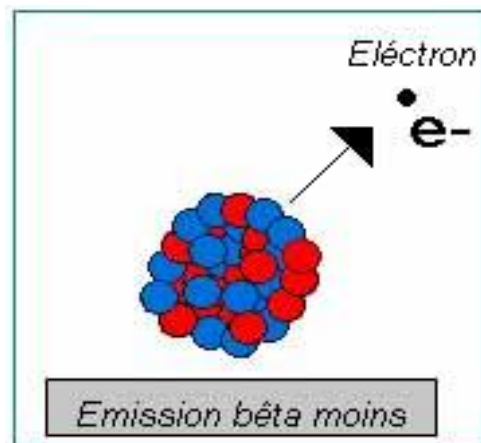
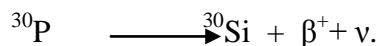


Fig.2.b. Emission bêta moins (β^-).

L'émission naturelle de rayonnements β^- concerne les noyaux instables ayant d'un excès de neutrons alors que pour l'émission naturelle de rayonnements β^+ les noyaux sont instables à cause d'un excès de protons.

Par exemple le tritium (^3H) est un émetteur β^- pur dont l'énergie maximale est 18.6 KeV [7], le phosphore-30 est radioactif β^+ se désintègre en un noyau de silicium-30:



➤ Rayonnements photoniques ou photons (rayon X et gamma)

Les photons désignent rayons X et rayonnement gamma (γ) qui ont des origines différentes. Le rayonnement γ est produit pratiquement après chaque transformation radioactive α ou β . En effet, lors de la désintégration radioactive, le noyau fils est à l'état excité, le retour à l'état stable se produit par l'émission d'énergie due à la désexcitation de ce noyau (Figure 3) [8]. Alors que le rayonnement γ résulte de transitions nucléaires, les rayons X sont émis suite à des changements de niveaux énergétiques des électrons orbitaux ou transitions atomiques. Les photons peuvent être produits par d'autres mécanismes tels que la création de paire.

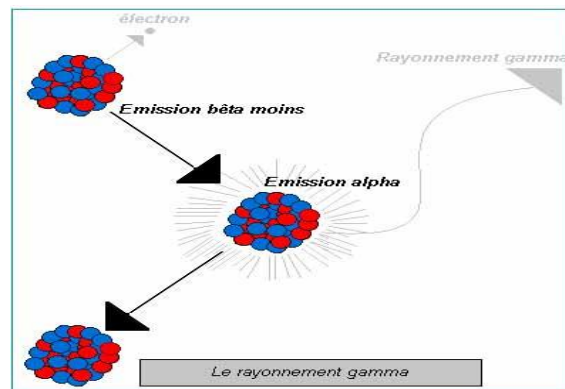


Fig.3. Emission d'un rayonnement gamma (γ).

I.2. Interaction des rayonnements ionisants avec la matière

Les interactions du rayonnement avec la matière décrivent les effets d'un rayonnement sur un atome. Le terme rayonnement désigne également, l'énergie émise et propagée à travers la matière. L'interaction rayonnement-matière produit un transfert d'énergie de la particule ou du photon, il en résulte des ionisations et des excitations de la matière [9]. La nature de ces interactions dépend du type de rayonnement considéré et de son énergie.

I.2.1. Interaction des rayonnements alpha (α) avec la matière

Les rayonnements α constitués de noyau d'hélium sont fortement ionisants. Ils interagissent principalement avec les électrons de la matière, leurs vitesses relativement de l'ordre de 1500 à 3500 Km/s, leur trajectoire est linéaire [10]. Le rayonnement α est relativement peu pénétrant par rapport au rayonnement β et γ .

Un rayonnement α d'énergie de 4 MeV parcourt quelques centimètres dans l'air et quelques dizaines de μm dans une solution. Le parcours maximal des α dans l'air sec à 15 °C sous une pression de 1 atm est approximativement représenté par la formule suivante:

$$R_{\alpha} = 0.318.E^{3/2}$$

Où : R est le parcours et E est l'énergie de α [11].

I.2.2. Interaction des rayonnements bêta (β) avec la matière

Les rayonnements β^- ou électrons interagissent avec la matière selon deux modes principaux:

- par ionisations ou excitation de la matière si leur énergie est faible,
- par interaction avec champ coulombien du noyau appelée effet de freinage (ou effet Bremsstrahlung) en produisant un rayonnement électromagnétique lorsque les électrons ont une énergie cinétique élevée supérieure à 1 MeV.

Comme pour le cas des rayonnements α , des formules empiriques ont été établies. Pour des rayonnements β^- ou électrons d'énergie comprise entre 0.8 et 3.7 MeV, le parcours maximal R_{β^-} est donné en fonction de l'énergie maximale des électrons E_{\max} par la relation empirique :

$$R_{\beta^-} (\text{g.cm}^2) = 0.542 E_{\max} - 0.133$$

Où R_{β^-} est le parcours maximal dans la matière en g.cm^{-2} , et E_{\max} est l'énergie maximale des électrons en MeV.

Les rayonnements β^- constitués d'un flux d'électrons de faibles énergies ont une trajectoire sinueuse et peuvent être arrêtés par une simple feuille d'aluminium [12]. Ils sont beaucoup plus pénétrants que les rayonnements α [13].

Les rayonnements β^+ ou positrons émis par les radioéléments interagissent avec la matière principalement par collisions avec des électrons. Lorsque son énergie devient faible le positon subit la désintégration par annihilation avec un électron (voir création de paire).

I.2.3. Interaction des rayonnements photoniques avec la matière

Les rayonnements photoniques ou photons sont constitués d'un flux électromagnétiques de même nature que les ondes radio, la lumière visible ou les ultraviolets, mais dont l'énergie est beaucoup plus grande. Les photons ont un fort pouvoir de pénétration dans la matière comparé aux autres rayonnements alpha et bêta. Le parcours de rayonnements γ d'énergie élevée est peut grand, de grandes épaisseurs de plomb ou de béton sont

nécessaires pour les arrêter. Les rayonnements X ont généralement des énergies plus faibles que les rayonnements γ , donc ils sont moins pénétrants.

En traversant la matière, les photons interagissent principalement par trois effets, selon leur énergie [14]:

➤ Effet Photoélectrique

Dans ce phénomène, il y a absorption totale de l'énergie du photon incident $h\nu$ par l'ensemble des électrons de l'atome, le photon interagit principalement avec un électron fortement lié. Cet effet ne peut se produire que si l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de liaison E_L de l'électron qui se trouve alors éjecté avec une énergie cinétique ($T = h\nu - E_L$) (Figure 4) [15].

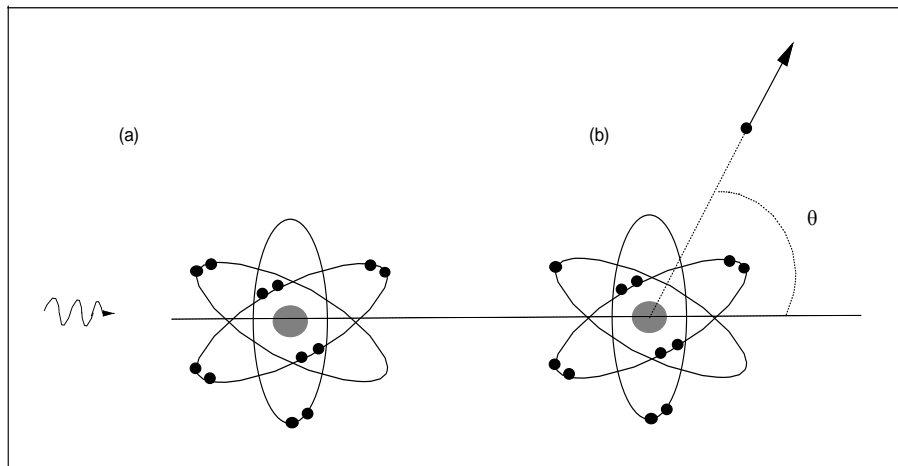


Fig.4. Effet photoélectrique : un photon est absorbé par un électron (a), puis est éjecté hors de l'atome (b).

L'effet photoélectrique est donc caractérisé par l'absorption d'un photon par un milieu et l'éjection d'un électron lequel va interagir par ionisation ou excitation avec ce milieu. La probabilité d'une telle interaction dépend de l'énergie du photon et du numéro atomique du milieu considéré.

➤ Effet Compton

Dans certains cas, le photon cède une partie de son énergie par un choc avec un électron libre du milieu. Il en résulte un photon diffusé d'énergie moindre que celle du photon incident et l'éjection d'un électron. Ce phénomène se produit avec les électrons libres ou peu liés à l'atome (Figure 5) [15].

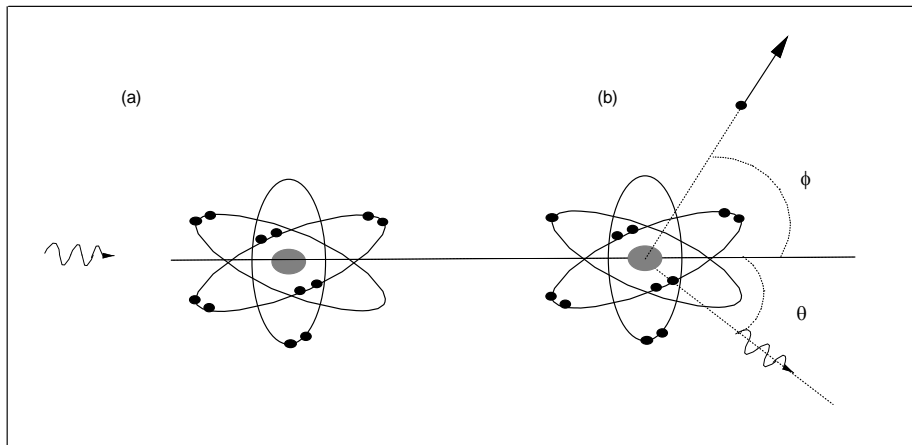


Fig.5. Effet Compton : un photon est diffusé par un électron qui est éjecté hors de l'atome.

➤ Effet de création des paires

Ce mode d'interaction n'est possible que pour des photons d'énergie supérieure ou égale à 1.02 MeV. En pénétrant dans un champ électrique intense qui entoure le noyau, ces photons vont former une paire électron-positron, dans ce cas il y'a conversion d'énergie en matière (Figure 6). Une réaction matière-antimatière conduit à la formation de deux rayonnements γ ayant chacun une énergie de 511KeV [15].

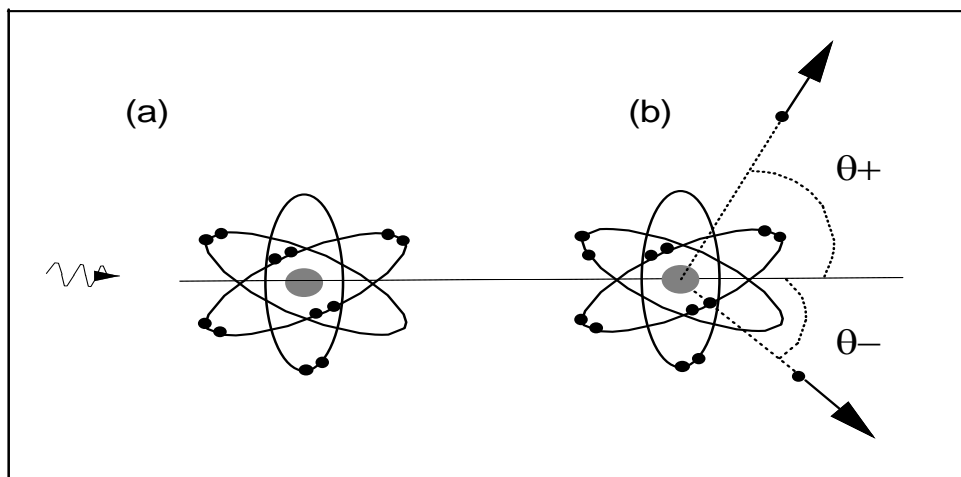


Fig.6. Effet de création d'une paire électron-positron à proximité d'un noyau par un photon incident.

L'interaction de photons avec un milieu conduit à des ionisations et excitations par les électrons éjectés mais également à des photons et des photons créés par effet de création de paires qui vont à leur tour éjecter d'autres électrons par effet Photoélectrique ou Compton.

I.2.4. Atténuation et absorption d'un faisceau de photons

L'intensité $I(x)$ d'un faisceau de photons mono-énergétiques est atténuée par un matériau d'épaisseur x suivant la relation:

$$I(x) = I_0 e^{-\mu(h\nu, Z)x}$$

Où I_0 est l'intensité initiale du faisceau et $\mu(h\nu, Z)$ le coefficient linéaire d'atténuation qui dépend de l'énergie du photon $h\nu$ et du nombre atomique Z du milieu.

Le coefficient linéaire d'atténuation total est la somme de tous les coefficients linéaires d'atténuation pour les différentes interactions:

$$\mu = \tau_{ph} + \zeta + \kappa + \dots$$

L'importance relative des différentes interactions est déterminée par la valeur de leur section efficace. En fonction de l'énergie du rayonnement et du numéro atomique du milieu, on peut reporter dans le plan $(h\nu, Z)$ les lieux d'iso-probabilité des effets (Figure 7). Ceci permet de définir trois zones :

- Pour des faibles énergies des photons et un milieu de Z élevé : prédominance de l'effet Photoélectrique
- Pour des énergies moyennes : prédominance de l'effet Compton.
- Pour des énergies élevées et un milieu de Z élevé : prédominance de la production de paires.

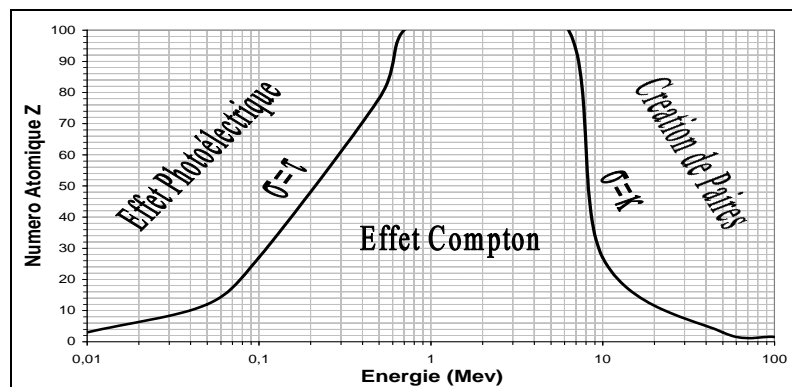


Fig.7. Prédominance des interactions photon - matière en fonction de l'énergie du photon incident et du numéro atomique du milieu.

I.3. Différents type d'exposition aux rayonnements ionisants

Les rayonnements ionisants sont utilisés dans de nombreux domaines tels que la médecine, l'industrie ou l'agriculture. En médecine, ils sont exploités dans les traitements du cancer mais aussi en imagerie diagnostique au moyen des rayons X ou de radio-isotopes. Cependant les risques liés aux effets biologiques que produisent les rayonnements ionisants dans le corps humain imposent le respect des règles de radioprotection en présence de ces rayonnements.

L'exposition aux rayonnements ionisants peut prendre trois formes distinctes, qui peuvent parfois être combinées: l'exposition externe (ou irradiation externe), la contamination externe et la contamination interne (Figure 8) [5].

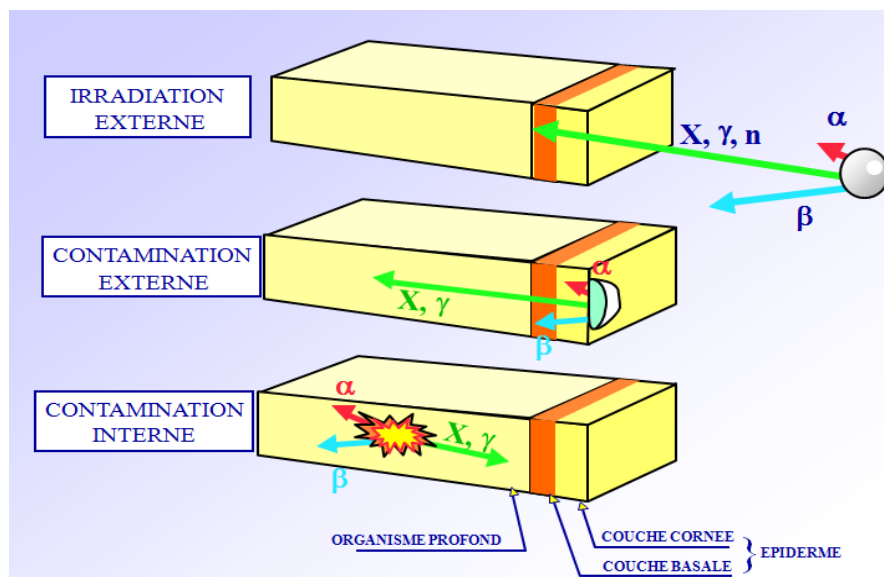


Fig.8. Risques dus aux différents modes d'exposition.

I.3.1. Exposition externe

Les rayonnements ionisants émis par une source à distance de l'organisme peuvent atteindre celui-ci, soit directement, soit indirectement après diffusion sur les objets situés dans le champ de rayonnements. Lorsque l'organisme n'est plus exposé à la source, l'irradiation externe cesse immédiatement.

Les risques liés à une exposition externe dépendent de type de rayonnement incident.

- Les rayonnements α ont un parcours (profondeur de pénétration ou distance parcourue dans un milieu donné) dans l'air de quelques centimètres et sont arrêtés par la couche de peau constituée de cellules mortes. Ils ne présentent aucun risque en exposition externe.
- Les rayonnements β ont un parcours de l'ordre du mètre dans l'air et de quelque millimètre dans les tissus vivants: ils peuvent donc être à l'origine d'une exposition de la peau et du derme profond. Aux énergies élevées, ils peuvent provoquer une exposition en profondeur due aux rayonnements de freinage générés.
- Les rayonnements γ ont un parcours de plusieurs kilomètres dans l'air et de quelques mètres dans les tissus vivants. Ils atteignent la peau, le derme et tous les tissus profonds (Figure 9) [5].

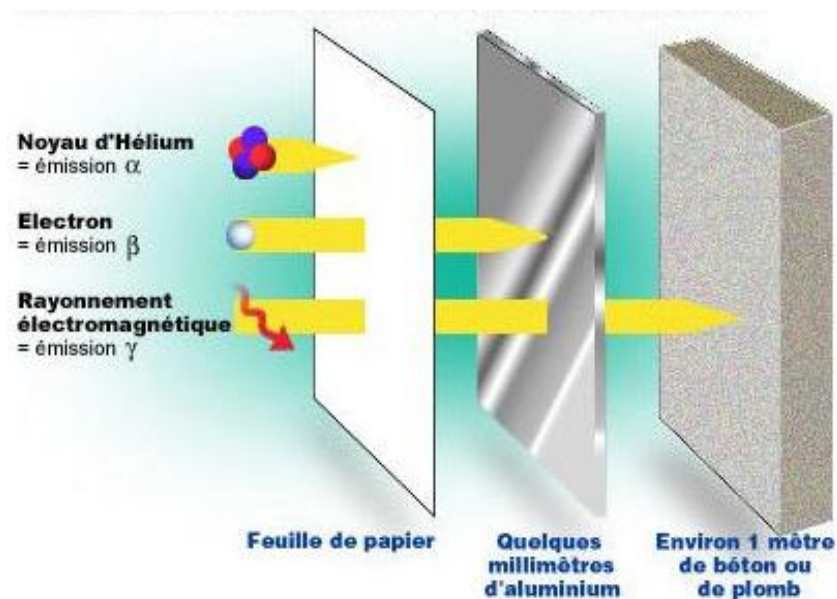


Fig.9. Pouvoir de pénétration des différents rayonnements.

I.3.2. Contamination externe

Tout dépôt de radioéléments sur la peau ou les phanères, à la suite d'une retombée ou d'un contact direct avec des radioéléments en source non scellée, constitue une contamination externe et exposition externe cutanée. L'irradiation consécutive à la contamination perdure tant qu'une décontamination externe n'a pas été réalisée.

Les risques liés à une exposition cutanée externe diffèrent selon le type de rayonnements:

- Les radioéléments émetteurs α ne présentent a priori aucune risque en contamination externe;
- Les radioéléments émetteurs β présentent un risque particulier car ils entraînent une exposition quasiment exclusive de la peau ;
- Les radioéléments émetteurs γ posent les mêmes problèmes en contamination externe qu'en exposition externe [5].

I.3.3. Contamination interne

Encore appelée exposition interne, c'est la pénétration de radioéléments dans l'organisme. Cette incorporation peut se faire par différentes voies:

- Respiratoire ;
- Digestive ;
- Transcutanée (iode et tritium essentiellement) ou à la faveur d'une effraction cutanée.

L'inhalation et les blessures sont les portes d'entrée les plus fréquentes. Même lorsque le sujet n'est plus exposé à la source de contamination, l'irradiation due à l'incorporation de radioéléments perdure tant que la contamination n'a pas été éliminée. Ceci se fait soit spontanément, soit après traitement spécifique adapté au contaminant. Dans le cas d'une contamination interne, les radioéléments sont au contact des cellules vivantes. Cette situation modifie peu le risque induit par les rayonnements β , γ ou X. En revanche, le risque lié aux rayonnements α est majeur, alors qu'il est inexistant pour les autres modes d'exposition. En effet, aucun écran ne sépare ces cellules vivantes de l'émetteur α et le dépôt d'énergie des particules α , qui se fait sur un parcours très court, induit des lésions cellulaires très importantes.

La présence de radioéléments dans l'organisme n'est pas toujours pathologique, un certain nombre d'atomes qui composent l'organisme étant des radioéléments. Ainsi, sur les

trois isotopes naturels du potassium, le potassium-40 est le seul radioactif. Il représente 0.012 % du potassium de l'organisme, soit environ 7000 Bq pour un homme adulte [5].

I.4. Effets biologiques des rayonnements ionisants

L'homme est donc exposé en permanence à des rayonnements d'origine naturelle ou artificielle. Les rayonnements ionisants sont émis lors de la désintégration de ces radionucléides qui donne naissance à de nouveaux éléments, radioactifs ou non. Ils se présentent sous la forme de particules (alpha, neutrons ou bêta) ou de rayonnements électromagnétiques ou photons (rayons X et rayonnements gamma). Ils sont appelés ionisants car l'énergie qu'ils déposent dans un milieu est suffisamment importante pour ioniser ses molécules ou atomes. Cette énergie peut entraîner des modifications de la matière vivante, au niveau cellulaire où ces rayonnements induisent des lésions. Les effets des rayonnements ionisants sur l'organisme varient en fonction de nombreux facteurs: la source (activité ou intensité, nature et énergie des rayonnements émis,...), le mode d'exposition ainsi que la durée et débit de dose, et la cible (tissus ou organes touchés, âge de l'individu ...) [16].

Il existe deux types d'effets biologiques: des effets obligatoires ou déterministes, liés à la forte mort cellulaire, et des effets aléatoires ou stochastiques, liés à la survie de cellules dont l'ADN reste lésé [5].

➤ Les effets à court terme (obligatoire ou déterministes)

Une irradiation à des doses relativement élevées par des rayonnements ionisants provoque des effets immédiats sur les organismes vivants par exemple, des brûlures plus ou moins importantes. En fonction de la dose et selon l'organe irradié, le délai d'apparition des symptômes varie de quelques heures (nausées, radiodermite) à plusieurs mois. Des effets secondaires peuvent même être observés des années après une irradiation (fibroses, cataracte) [16].

➤ Les effets à long terme (effets aléatoires ou stochastiques)

Les expositions à des doses plus ou moins élevées de rayonnements ionisants peuvent avoir des effets à long terme tels que des cancers et des leucémies. La probabilité d'apparition de l'effet augmente avec la dose. Le délai d'apparition après l'exposition est de plusieurs années [16].

L'iode fait partie de la famille chimique des halogènes. Il se vaporise à une température légèrement supérieure à 100° C. Très mobile dans l'environnement, il est présent à peu près partout mais de façon hétérogène.

L'iode peut exister sous forme minérale et organique. Sous forme élémentaire (I), l'iode présente un aspect légèrement métallique, ses cristaux se subliment en vapeurs violettes à la température « ordinaire ». Cet élément peut se combiner à de nombreux métalloïdes et métaux. Parmi ceux-ci, les iodures (I) qui sont des agents d'oxydoréduction. L'iode possède un seul isotope stable, l'iode-127 (^{127}I), et de nombreux isotopes radioactifs.

Les applications de certains de ses isotopes sont nombreuses et variées : en chimie, en pharmacie, en médecine, en biologie...etc. A titre d'exemple, l'iode stable sert en pharmacie pour la teinture, alors que l'isotope radioactif l'iode-131 est utilisé depuis plus de 50 ans en médecine nucléaire [17].

Dans l'environnement, aux côtés de l'iode-127 largement majoritaire, deux isotopes radioactifs sont couramment rencontrés. Il s'agit de l'iode-131 et de l'iode-129, les deux sont des produits de fission du combustible. Les autres isotopes de l'iode sont tous radioactifs (Tableau 1), ils sont produits en grande masse dans les produits de fission de l'uranium et du plutonium de l'industrie nucléaire [18].

Tableau 1. Activité massique et période des principaux radio-isotopes de l'iode.

Radionucléide	Activité massique en Bq/g	Période
^{123}I	$7.14 \cdot 10^{16}$	13 heures
^{125}I	$6.45 \cdot 10^{14}$	60 jours
^{131}I	$4.61 \cdot 10^{15}$	8 jours

Dans ce présent travail on s'intéresse à l'iode noté l' I^{131} en raison de ses applications en médecine nucléaire et des risques qu'il présente du point de vue de la radioprotection.

II. Généralités sur l'iode-131

L'iode-131 (^{131}I) est un isotope radioactif dont le nombre de masse est égal à 131, son noyau atomique compte 53 protons et 78 neutrons avec un spin $7/2^+$. Il est obtenu par fission de l'uranium.

II.1. Origines de l'iode-131

L'iode-131 a deux origines soit une origine naturelle lors des quelques fissions spontanées qui se produisent dans l'uranium, mais disparaît rapidement compte tenu de sa période. Soit une origine artificielle suite aux explosions nucléaires ou à une production au sein des réacteurs nucléaires ou encore lors des rejets des installations nucléaires [19].

II.1.1. Explosions nucléaires atmosphériques

Pendant la période 1945-1962, les essais nucléaires atmosphériques ont libéré dans l'environnement une quantité d'iode-131 estimée à 6.1020 Bq. En raison de sa décroissance rapide, la quantité d'iode-131 déposée sur le sol de l'ensemble de la planète, a actuellement disparu [19].

II.1.2. Production au sein des réacteurs nucléaires

Dans les réacteurs nucléaires, de grandes quantités d'iode-131 sont produites par fission de l'uranium et du plutonium (Figure 10) [19].

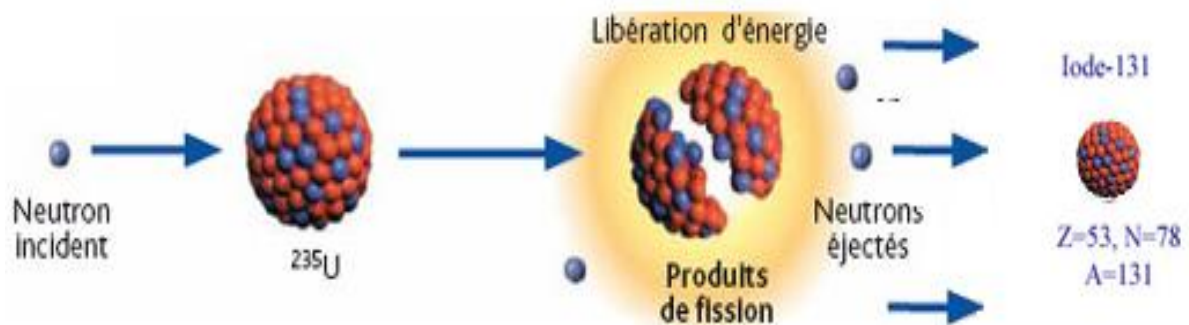


Fig.10. Fission nucléaire du noyau de l'uranium-235 pour la production de l'iode-131.

II.1.3. Rejets des installations nucléaires

Au cours du fonctionnement normal d'un réacteur et au cours des opérations de retraitement du combustible, une très faible fraction des éléments radioactifs est trouvée dans

les effluents rejetés de façon contrôlée dans l'environnement. Pour un réacteur à eau pressurisé de 1300 MWe, le rejet annuel d'iode-131 est de l'ordre de 1.10^8 Bq dans les effluents gazeux. L'activité rejetée dans les effluents liquides est légèrement inférieure.

Pour l'usine de retraitement de La Hague (France), l'activité d'iode-129 rejetée annuellement dans les effluents était égale à $1,84.10^{12}$ Bq en 1999 dont 99% dans les effluents liquides. Le rejet d'iode-131 est au moins 100 fois plus faible.

Pour l'usine de Sellafield (Royaume-Uni), en 1997, les rejets gazeux d'iode-131 se sont élevés à $2,6.10^9$ Bq [20].

II.2. Propriétés de l'iode-131

II.2.1. Propriété radio-physique

L'iode-131 donne du Xénon-131 par désintégration β^- avec une période de 8.02 jours, en émettant des rayons γ de 364.5 keV et des rayons β^- de 606 keV (Figure 11) [21].

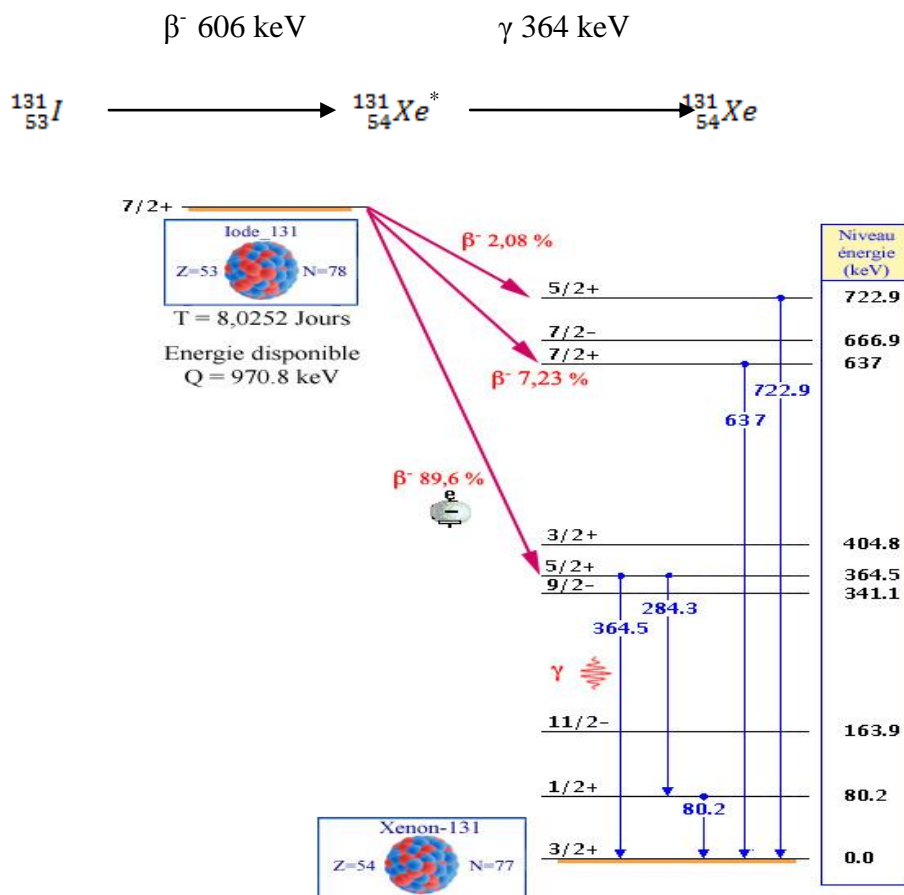


Fig.11. Désintégration de l'iode-131.

II.2.2. Propriété biologique

Lors de son introduction dans l'organisme, l'iode libre se concentre majoritairement dans la thyroïde. La concentration y est maximale 4 heures environ après l'incorporation, cependant son absorption par voie cutanée est très importante en raison de son caractère lipophile. Son élimination se fait selon deux modes:

- La fraction fixée dans la thyroïde est éliminée avec une période effective d'environ 7 jours.
- La fraction répartie dans le reste de l'organisme est éliminée majoritairement par voie rénale avec une période effective d'environ de 6 heures, et une faible proportion est éliminée dans les selles, par la salive, la sueur et l'air exhalé [22].

II.3. Toxicité

Du point de vue radiotoxicologique, l'iode-131 est un isotope à haut risque en raison de sa grande mobilité dans l'environnement, de sa bonne assimilation dans l'organisme et de son accumulation dans la thyroïde [23].

II.3.1. Effet de l'iode-131 sur la santé

La toxicité radiologique de l'iode-131 est mesurée par un facteur appelé « facteur de dose par ingestion », dont l'unité est le Sv/Bq. Cette radiotoxicité varie considérablement avec l'âge de la personne exposée. En effet, l'iode se fixe sur la thyroïde qui joue notamment un rôle essentiel dans la croissance. C'est pourquoi les nourrissons et les enfants sont plus sensibles que les adultes à l'ingestion d'iode radioactif [23].

II.3.2. Effet de l'iode-131 sur l'environnement

Dans l'environnement, l'iode-131 suit les processus de transfert habituel : dispersion aérienne, dépôt et captation par les végétaux, absorption par les racines, ingestion par l'animal.

Lors d'un accident nucléaire, la teneur en iode-131 est hautement surveillée dans la chaîne alimentaire durant plusieurs semaines, les contrôles de radioactivité concernent principalement l'eau, lait et les légumes à grande feuilles comme les épinards et les laitues.

Toutefois, du fait de sa courte période radioactive, la quantité d'iode-131 est divisée par deux tous les 8 jours, et est ainsi rapidement éliminée [23].

II.4. Utilisation de l'iode-131 en diagnostique et en thérapie

L'iode-131 a été appliqué pour la première fois en médecine nucléaire juste après la seconde guerre mondiale. Actuellement un plus grand nombre de radio-isotopes est utilisé, mais l'iode-131 demeure largement exploité dans le domaine du diagnostic et en thérapie.

En médecine nucléaire l'iode-131 est livré soit sous la forme solution liquide d'iodure de sodium (NaI) d'activité massique connue, soit sous forme de capsule de gélatine renfermant de l'iode-131 (Figure 12). Cette dernière forme est souvent utilisée car elle est la plus sûre du point de vue de radioprotection pour le personnel médical [24].



Fig.12. Différente forme de l'iode-131 utilisé en médecine nucléaire.

II.4.1. Utilisation de l'iode-131 en diagnostique

A faible dose, l'iode-131 est utilisé comme traceur en raison de ses rayonnements γ . A l'aide de gamma-caméra, il est facile de suivre le devenir de ce radio-isotope à travers l'organisme. L'iode se fixant sélectivement sur la thyroïde, cette technique d'imagerie (scintigraphie) est particulièrement intéressant puisqu'elle permet d'observer l'activité de la thyroïde et la présence d'éventuelles anomalies comme les nodules chauds ou froids (Figure 13).

Toutefois l'iode-131 est de plus en plus remplacé pour ces scintigraphies par un autre radio-isotope de l'iode, l'iode-123, également émetteur gamma mais dont la période est plus courte (13.3 heures) [23].

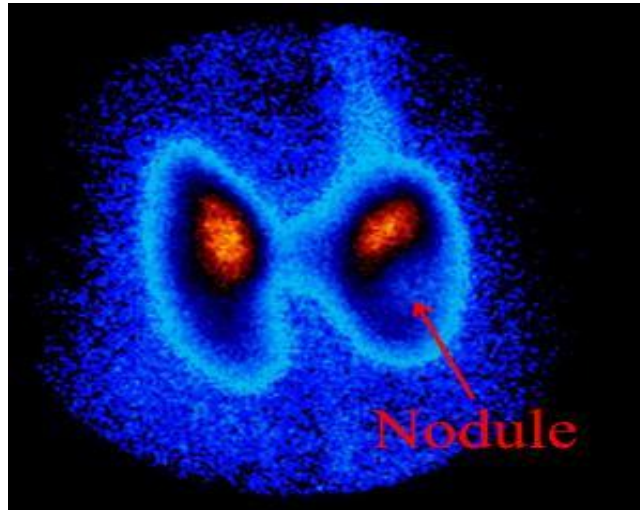


Fig.13. Scintigraphie de la thyroïde.

II.4.2. Utilisation de l'iode-131 en thérapie

A plus forte dose, l'iode-131 est utilisé pour les radiothérapies des cancers de la thyroïde. En effet, les rayons β émis par l'iode-131 permettent de détruire les cellules qui l'ont fixé. De plus, les rayons β ayant un faible parcours, l'irradiation est limitée à la zone à traiter. Ce traitement permet de réduire l'activité de la glande thyroïde ou de ses nodules en cas d'hyperthyroïdie, de compléter une ablation chirurgicale de la glande dans le cas d'un cancer. Le traitement par des modules marqués de l'iode-131 est en outre indiqué pour détruire ou réduire le volume de certaine tumeur surrénalienne ou hépatique (Figure 14)

L'administration des différents isotopes d'iode radioactif se fait sous la forme d'iodures de sodium (NaI) ou de potassium (KI) ou d'iodate de potassium (KIO_3) [23].



Fig.14. Thérapie a l'iode-131 dans le cas d'un cancer de la thyroïde

La spectrométrie gamma consiste à mesurer l'énergie et à compter le nombre de photons γ émis d'un échantillon pendant une durée donnée. A partir de l'histogramme enregistré ou spectre, il est alors possible d'identifier différents radioéléments (analyse qualitative) et de déterminer leur concentration (analyse quantitative) dans l'échantillon étudié. La spectrométrie gamma est aujourd'hui une technique très largement utilisée par ce qu'elle permet des mesures directes sur des échantillons bruts contrairement à la spectrométrie alpha qui nécessite une préparation minutieuse de l'échantillon en raison du parcours très court des particules alpha dans la matière.

La spectrométrie gamma s'appuie notamment sur la physique des semi-conducteurs mis en jeu dans la détection tels que des détecteurs au germanium ou au silicium [25].

Les trois grandes familles de détecteurs utilisés en spectrométrie gamma sont:

- Détecteur à scintillation ;
- Détecteur à semi-conducteur ;
- Détecteur à gaz.

Dans ce chapitre sont décrits le principe de la spectrométrie gamma, les détecteurs utilisés dans ce mémoire ainsi que le principe d'identification et de quantification des énergies d'un élément radioactif par cette technique.

III.1. Principe de la technique de spectrométrie gamma

La technique de spectrométrie gamma permet d'identifier les rayonnements émis par un radioélément, principalement ceux qui lui sont spécifiques. Il est rappelé que les noyaux atomiques ont une structure en niveaux d'énergie analogue à celle des niveaux d'énergie des atomes, de sorte qu'ils peuvent émettre des photons d'énergie particulière. Les noyaux sont caractéristiques de chaque espèce d'atome, de sorte que les énergies des rayonnements gamma émis correspondent aux différences d'énergie des noyaux, ils peuvent être utilisés pour identifier des éléments radioactifs. La distinction entre des rayonnements γ d'énergie légèrement différente est très importante dans l'analyse de spectres qui peuvent être complexes. L'aptitude d'un spectromètre à identifier des rayonnements gamma d'énergie très proche est appelée résolution en énergie.

La détection des rayonnements γ est obtenue à l'aide de matériaux sensibles au dépôt d'énergie des interactions de γ [26]. En plus de la résolution en énergie d'un détecteur, l'efficacité de détection est également une caractéristique importante surtout pour la mesure des faibles concentrations de radioéléments.

III.2. Chaîne d'acquisition

Une chaîne d'acquisition permet la mise en forme et l'amplification du signal généré dans le détecteur par les rayonnements émis par l'échantillon radioactif mesuré puis son traitement afin de fournir des informations relatives aux rayonnements détectés. Un système d'affichage indique l'énergie des rayonnements ionisants (le spectromètre), l'intensité du signal généré permet de calculer l'activité du radioélément ou sa concentration dans l'échantillon mesuré

Le schéma d'une chaîne d'acquisition de spectrométrie gamma est représenté ci-dessous (Figure 15).

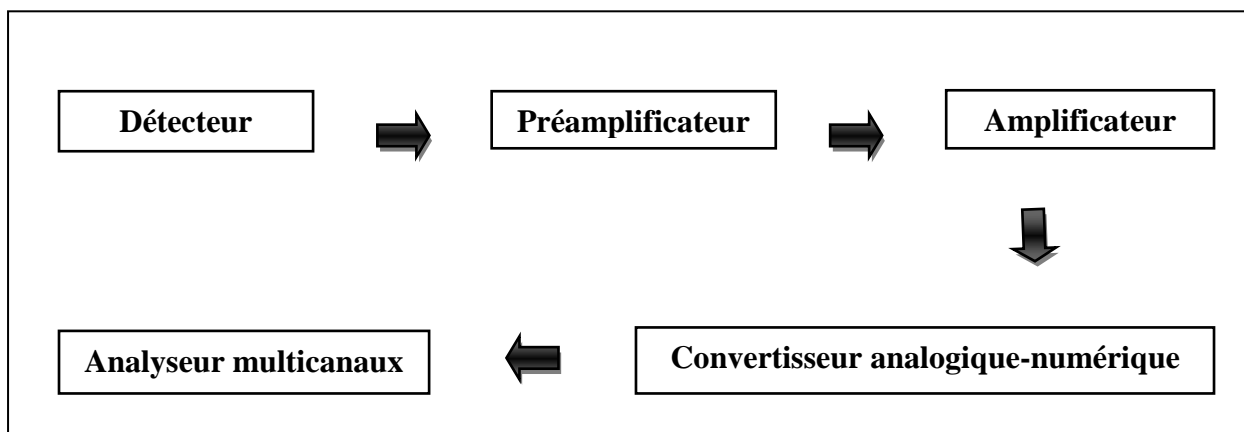


Fig.15. Chaîne d'acquisition de la spectrométrie gamma.

➤ **Préamplificateur**

Le préamplificateur est en général placé à proximité du détecteur, sous le même capot que le détecteur dans le cas d'un semi conducteur au germanium de sorte que les composants sensibles à la température soient refroidis et le bruit thermique généré par ses composants minimisé. Dans le cas de l'utilisation d'un détecteur bas-bruit, le préamplificateur est déporté à l'extérieur du blindage pour diminuer le bruit de fond que peuvent apporter ses éléments constitutifs [27].

➤ **Amplificateur**

L'amplificateur porte l'impulsion fournie par le préamplificateur à plusieurs volts sous une forme quasi gaussienne qui permettra au codeur de quantifier très précisément sa hauteur. De plus, il permet de filtrer des signaux parasites de fréquences élevées [27].

➤ **Convertisseur analogique-numérique et l'analyseur multicanaux**

Le signal à la sortie de l'amplificateur est continu, le convertisseur transforme l'amplitude de ce signal en un nombre proportionnel à l'énergie déposée dans le détecteur.

L'analyseur multicanaux collecte, classe et enregistre les informations dans différents canaux. Chaque canal correspond à une énergie.

Ce traitement de l'information permet d'obtenir un histogramme en temps réel dans lequel l'énergie déposée dans le détecteur est reliée au numéro d'un canal. Le nombre de coups dans un canal donné est proportionnel aux nombres de photons ayant déposé la même énergie dans le détecteur [28].

III.3. Les détecteurs

Les détecteurs à semi-conducteur peuvent être assimilés à des chambres d'ionisation, exception faite de la charge des particules est transportée par des électrons-libres que par des électrons et des ions positifs pour les chambres d'ionisation.

Les détecteurs à semi-conducteur présentent deux avantages par rapport aux détecteurs à gaz du fait que la densité du solide est très supérieure à celle des gaz. Ainsi une basse énergie est nécessaire pour la production d'une paire d'électron cavité, 3.5 eV pour le Silicium comparé à celle de 30 eV pour un gaz; d'où une meilleure énergie de résolution car la probabilité de collection de charge qui est grande.

III.3.1. Principe de fonctionnement

Un photon issu de l'élément radioactif interagit avec le cristal par l'effet Photoélectrique, l'effet Compton ou par effet de Création de paire ce qui aura pour effet de céder de l'énergie aux électrons du détecteur. Ces électrons peuvent ainsi passer le gap énergétique et être accélérés par une haute tension ce qui fourni un courant dont la quantité de

charges obtenue est proportionnelle à l'énergie déposée dans le détecteur par les rayonnements [28].

III.3.2. Détecteur au Germanium hyper pur (GeHp)

Constitué d'un cristal du germanium hyper pur (GeHp), protégé d'une structure en plomb permettant d'atténuer les rayonnements ionisants provenant de l'extérieur (rayonnements cosmiques...), et d'une structure en cuivre (cage de faraday). Un cryostat permet de baisser la température du cristal (Figure 16), donc réduire l'agitation thermique ce qui limite le bruit de fond du cristal et le stabilise [28].



Fig.16. Détecteur de GeHp.

III.3.3. Détecteur à iodure de sodium (NaI(Tl))

Les détecteurs à iodure de sodium dopé au thallium (NaI(Tl)) sont des cristaux scintillants dopés. Les rayonnements ionisants interagissent avec le cristal scintillant par ionisations et excitations des atomes ou molécules, il en résulte en l'émission d'une luminescence dans le visible détectée par un photomultiplicateur ou photodiode. L'énergie déposée est convertie en luminescence avec une grande efficacité d'où l'intérêt de ce détecteur.

Ce type de détecteur est exploité en anthropogammamétrie encore appelée mesure in vivo dans lesquelles un ou plusieurs des détecteurs de NaI(Tl) sont utilisés pour leur efficacité élevée aux photons et leur usinage facile (détecteur de grand volume). La protection ou blindage de l'anthropogammamétrie consiste généralement en des murs de plomb ayant plusieurs dizaines de centimètres d'épaisseur, des couches de cuivre pour réduire le bruit de fond naturel (Figure 17). Trois types de mesures de contamination du corps sont effectués dans l'anthropogammamètre du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger : le corps entier, les poumons et la thyroïde.



Fig.17. Détecteur de NaI (Tl).

III.4. Calibration de la chaîne spectrométrie

III.4.1. Calibration analogique

Une calibration analogique est réalisée périodiquement. A la sortie du détecteur, un oscilloscope visualise le signal suivant ; sur l'abscisse le temps et sur l'ordonnée le voltage. Une série de réglages est nécessaire pour bien optimiser le signal :

- La première calibration consiste à changer les paramètres du préamplificateur et de l'amplificateur afin d'obtenir un signal gaussien optimum, de sorte qu'il croît et décroît

suffisamment rapidement ce qui permet d'éviter l'empilement de deux différents signaux.

- Régler le temps d'occupation ou temps d'échantillonnage : durée pendant laquelle le signal est enregistré, s'il est trop court le signal risque de ne pas être pris dans son intégralité, s'il est trop long il risque de cumuler deux signaux en même temps.
- Enfin le réglage du gain qui permet de ne pas prendre en compte les rayons X se situant entre 0 - 100 keV [28].

III.4.2. Calibration en énergie

La calibration en énergie est une étape très importante pour la spectrométrie des rayonnements ionisants, car elle permet de corrélérer les numéros des canaux aux énergies des rayonnements ionisants détectés.

Le logiciel Génie™ 2000 est un logiciel commercialisé par la société Canberra. Il permet de visualiser en temps réel la sortie de l'analyseur multicanaux, à savoir un spectre avec en abscisse, le numéro de canal et en ordonnée le nombre de coups dans le canal. De manière à pouvoir identifier les désintégrations radioactives mises en jeu, le spectre doit être étalonné en énergie. Cela consiste à établir une relation polynômiale entre le numéro de canal et l'énergie déposée dans le cristal. Le spectre obtenu est alors un ensemble de pics distribués en énergie se rajoutant à un fond [29].

L'identification d'un radioélément à partir des rayonnements qu'il émet dépend de la calibration de la chaîne de spectrométrie gamma mais également de la résolution du détecteur de cette chaîne. Les détecteurs aux germaniums (GeHp) ont une très bonne résolution en énergie comparé aux détecteurs scintillateurs (NaI(Tl)) (Figure 18). Cependant ces types de scintillateur ont une bonne efficacité en comptage. Dans les semi-conducteurs, une paire d'électron-trou est créée par quelques eV, ceci est environ 10 fois moins que l'ionisation d'un gaz, et 100 fois moins qu'avec l'excitation dans un scintillateur. Cela se traduit par une meilleure résolution en énergie, puisque la statistique sur le nombre de charges élémentaires créées est plus favorable [15].

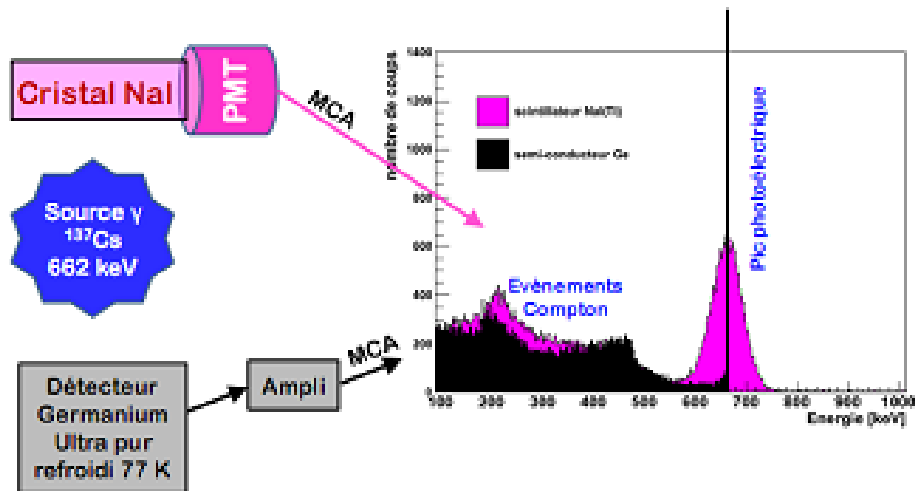


Fig. 18. Comparaison de la mesure d'une source de ^{137}Cs émettrice de rayonnements gamma de 662 keV par un détecteur GeHp et un détecteur NaI(Tl).

III.5. Calcul de l'activité

L'activité d'un échantillon est proportionnelle à la surface du pic obtenue c'est à dire au nombre de coups total collecté. Ce dernier est divisé par le temps total de l'acquisition en seconde. Pour déterminer l'activité d'un échantillon, il faut tout d'abord connaître l'efficacité de détection du détecteur pour l'énergie du rayonnement considéré. L'utilisation d'une source d'activité connue, appelée source étalon ou standard, est nécessaire pour pouvoir calculer l'efficacité du détecteur [28]. L'activité est mesurée en Bq, 1 Bq étant égal à 1 désintégration par seconde,

L'efficacité (E_{ff}) se calcule comme suit :

$$E_{ff} = \frac{S_s}{I * t_s * A_s}$$

Avec :

- S_s est la surface du pic du standard en coup;
- I est l'intensité du pic de l'iode-131 ;
- t_s est le temps de l'acquisition du spectre (s) ;
- A_s est l'activité du standard (Bq).

Une fois l'efficacité est déterminée pour chaque standard, le calcul de l'activité pour chaque échantillon se fait suivant l'équation suivante:

$$A_e = \frac{S_e}{I * t_e * E_{ff}}$$

Avec:

- S_e est la surface du pic de l'échantillon ;
- I est l'intensité du pic de l'iode-131 ;
- t_e est le temps de l'acquisition du spectre (s).

Cette partie du mémoire est consacrée à la description de l'approche suivie pour la détermination expérimentale de période effective de l'iode-131 pour le corps entier et la thyroïde pour le modèle animal choisi à savoir le rat Wistar. Les méthodes mise en œuvre et les moyens matériels utilisés pour la réalisation de l'objectif. L'approche consiste en une contamination par voie orale des rats avec l'iode-131 suivie par :

- une étude radiotoxicologie visant l'établissement d'une cinétique d'excrétion ainsi que la cinétique d'élimination par le radioélément par le corps entier des rats.
- puis le sacrifice des rats et la récupération de la trachée portant la thyroïde pour une mesure de l'activité de l'iode-131 par spectrométrie gamma.

L'étude radiotoxicologique permettra de déterminer la période effective de l'iode-131 pour le modèle du rat Wistar, alors que la récupération de la thyroïde permettra de connaître la cinétique de fixation de l'iode-31 dans la thyroïde.

L'utilisation de l'iode-131 impose des mesures de radioprotection adaptée aux risques spécifique à ce radioélément à savoir l'irradiation externe et la contamination. Les mesures de radioprotection appliquées sont également décrites.

Les paragraphes de ce chapitre sont consacrés à une description du matériel utilisé ainsi que des procédures suivies.

IV. Matériels

Deux types de matériels sont nécessaires à la réalisation de l'étude expérimentale de la période effective de l'iode-131 sur le modèle du rat Wistar: le premier type concerne l'aspect de radioprotection et le second type est consacré à la réalisation de l'étude elle-même.

IV.1. Mesures de radioprotection

IV.1.1. Moyens de surveillance

Avant de pénétrer dans un laboratoire où est manipulée de la radioactivité, appelé laboratoire chaud, le manipulateur doit être doté d'un dosimètre adéquat au risque d'irradiation externe.

Dans le présent cas, il s'agit de la manipulation d'une source non scellée d'élément émetteur γ et β . Pour cela deux types de dosimètres ont été portés à savoir un dosimètre corps entier et un dosimètre d'extrémité (bague).

- Le dosimètre corps entier (Figure 19) permet de connaître la quantité d'énergie déposée par les rayonnements dans le corps du manipulateur. Le dosimètre corps entier utilisé est un Dosimètre de type ThermoLuminescent (TLD).



Fig.19. Dosimètre thermoluminescent pour le corps entier.

- Les dosimètres d'extrémités sont utilisés dans des situations à haut risque d'expositions des extrémités telles que les mains, les pieds et les yeux. Dans le présent cas un dosimètre thermoluminescent d'extrémités type bague a été porté (Figure 20).



Fig.20. Dosimètre thermoluminescent de type bague.

Au cours d'une manipulation de source radioactive, le manipulateur doit être muni en permanence d'un dispositif de contrôle de contamination pour pouvoir détecter à tout moment une éventuelle contamination de surface. Le radiamètre utilisé tout le long de l'étude est un radiamètre γ muni d'une sonde α, β (Figure 21).



Fig.21. Radiamètre γ muni d'une sonde α, β .

IV.1.2. Moyens de protection

- **Tablier et gants plombés** : Des moyens de protection contre l'irradiation externe ont été utilisés systématiquement. Il s'agit de tablier plombé et de gants plombés lesquels servent à réduire au maximum le risque d'une irradiation du tronc du corps et des mains (Figure 22).



Fig.22. Gants et tablier plombé.

- **Seringue plombée** : La seringue ordinaire utilisée pour l'injection des éléments radioactifs est montée sur un manchon en plomb pour la protection contre l'irradiation des mains (Figure 23).

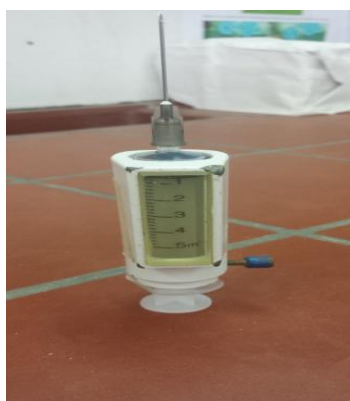


Fig.23. Seringue plombée.

- **Papier absorbant:** Ce type de papier est nécessaire lors des manipulations de sources non scellées. Il s'agit d'un papier à double faces, une face absorbante et une face étanche, pour garder le liquide absorbé sur le papier en cas de présence des fuites (Figure 24).



Fig.24. Papier absorbant.

- **Une hotte aspirante :** vu le caractère volatile de l'iode-131, la hotte est tapissé d'un film en plastique sur tous ses murs ainsi que sur la façade où est disposé un château de plomb pour réduire l'exposition du manipulateur au maximum (Figure 25).



Fig.25. Hotte à flux laminaire avec trois châteaux de plomb.

IV.2. Matériels nécessaire à l'expérimentation:

- **La source** : il s'agit d'un flacon scellé en verre contenant une solution d'iodure de sodium provenant de la firme IBA. Ce flacon est logé dans un container en plomb pour éviter l'émission de tout rayonnement vers l'extérieur (Figure 26).
Pour minimiser l'exposition, le manipulateur doit utiliser une pince adéquate.



(A)



(B)

Fig.26. (A) Le conditionnement externe et (B) Le conditionnement interne de l'iode 131.

- **Rats** : Des rats blancs d'âge adulte, de race « Wistar » mâles, fournis par l'institut pasteur d'Alger de kouba (IPA), pesant entre 250-300 g. Ces rats sont caractérisé par une tête large, de longues oreilles, et ayant une longueur de queue toujours inférieure à celle du corps (Figure 27).



Fig.27. Rat Wistar.

- **Sonde de gavage** : Cette sonde est constituée d'un tube et d'une pointe de boule en acier inoxydable, elle est légèrement courbée pour un déplacement optimal (Figure 28).



Fig.28. Sonde de gavage.

- **Activimètre** : Un appareil permettant de mesurer l'activité des radionucléides (Figure 29).

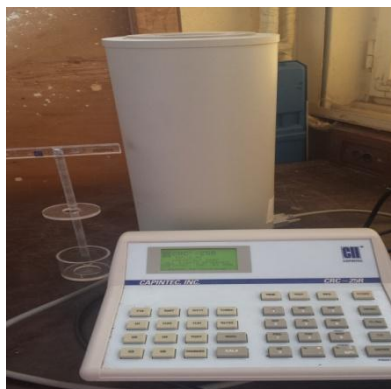


Fig.29. Activimètre.

- **Chaîne de spectrométrie gamma** : Le comptage des échantillons a été réalisé avec une chaîne de spectrométrie gamma de marque CAMBERRA muni d'un logiciel GENIE™ 2000 model S501 pour l'acquisition et le traitement des spectres (Figure 30).

Cette chaîne est constituée d'un détecteur, préamplificateur, amplificateur, Convertisseur-analogique-numérique, Analyseur multicanaux.



Fig.30. Chaîne de spectrométrie gamma.

- **Anthropogammamétrie** : La mesure de l'activité en iode dans le corps entier des rats a été réalisée avec un détecteur à scintillation NaI(Tl) de 7'' (15cm de diamètre), placé verticalement par rapport à l'échantillon (Figure 31).



Fig.31 : Appareillage d'Anthropogammamétrie.

En plus de tous ce matériel nous avons aussi besoin de :

- Cage ordinaire pour le transport ;
- Boite à couvercle perforé ;
- Instrument de dissection ;
- Plateau de dissection ;
- Balance de mesure ;
- Tube en polyéthylène ;

- Boite à pétrir ;
- Seringue ;
- Epingle ;
- Bistouri ;
- Flacon ;
- Pince ;
- Fiole ;
- Marqueur permanent ;
- Registre pour prendre des notes.

IV.3. Conditions de vie des rats

- **Hébergement**

Les rats sont hébergés au calme et surveillés pendant une période d'acclimations. Celle-ci leur permet de récupérer du stress lié au transport et de s'adapter aux nouvelles conditions de vie. Ce n'est qu'à l'issue de cette période qu'ils pourront être inclus dans une étude.

Toutes les activités physiologiques des rats sont effectuées la nuit, par contre la journée ils s'endorment, donc pour garder un bon équilibre il faut qu'ils bénéficient de la condition, 12h de veille et 12h de sommeil.

Il s'agit de deux types de cages; des cages ordinaires et de cages métaboliques.

- **Les cages ordinaires** : sont constituées d'une boîte en plastique transparente pour mieux observer les rats en cas de problème (mort d'un rat...etc.) et d'un grillage en acier inoxydable sont les matériaux couramment utilisés (Figure 32).



Fig.32. Cage ordinaire.

- **Cage métabolique** : Les cages métaboliques sont constituées de deux compartiments, le compartiment haut où sont hébergés le rat et le compartiment bas où sont récoltées les urines et la matière fécale (Figure 33).



Fig.33. Cage métabolique.

- **Alimentation et Eau**

Elle doit être disponible sans discontinuité, sauf en cas de besoins expérimentaux comme la mise à jeun avant le prélèvement et consiste le plus souvent en alimentation sec comme les grains de céréales (Figure 34) ainsi que de l'eau dans des biberons (Figure 35).



Fig.34. Grains de céréales. Fig.35. Biberons à eau.

- **Température et Humidité**

Les variations de température et d'humidité suggérées pour les rats sont de 20°-25°C et 50-55% respectivement.

IV.4. Préparation des solutions de l'iode-131

Des solutions d'iode-131 avec une activité volumique d'environ 370 kBq/ flacon sont préparées initialement.

Le flacon mère a une activité de 185 MBq avec un volume de 1.67 ml. Une dilution avec de l'eau est effectuée. Les activités des solutions préparées sont vérifiées au moyen de l'activimètre. En dernier, les solutions sont montées dans des seringues munies d'une sonde de gavage et mesurées une deuxième fois dans l'activimètre. Toutes les valeurs des mesures effectuées doivent être notées.

IV.5. Mode opératoire

L'administration orale des substances est une procédure commune à des expériences scientifiques utilisant des animaux de laboratoire à l'aide de la technique de gavage, suivant les étapes suivantes :

- Un lot de 5 rats est préparé, pour chaque rat un tableau mentionnant le poids du rat, l'activité de la solution de gavage ainsi que l'heure de gavage est dressé;
- Le manipulateur doit être doté de toutes les protections citées au paravant;
- L'opération de gavage doit être faite obligatoirement sous hotte vu la forte volatilité de l'iode-131;
- L'identification des rats ainsi que la vérification de leurs états général doit être vérifié avant de commencer et toute anomalie observée doit être notée;
- La pesée du rat permet de calculer l'activité ou dose adéquate avant l'injection. Ainsi, chaque rat reçoit une quantité identique (mg/kg) afin de normaliser l'analyse des résultats et de s'assurer de ne pas administrer une "surdose" ou une "sous-dose" (Figure 36);



Fig.36. Pesée du rat.

- Une vérification de la longueur de tube de gavage en mesurant de la pointe de la tête de rat à la dernière côte est effectuée;
- La seringue doit être remplie avec le volume approprié et les bulles d'air présentes doivent être éliminées;
- Si le produit administré s'écoule pendant ou après l'administration, il faut noter cette perte afin qu'elle soit prise en considération lors de l'analyse des résultats des mesures par l'activimètre;
- Les seringues et aiguilles utilisées doivent être déposées immédiatement dans une hotte;
- L'aiguille doit être changée pour chaque rat afin d'éviter la contamination croisée;
- Le maintien du rat dans une position verticale, afin d'éviter qu'il ne bouge lors du gavage, en appliquant le pouce sous le menton et l'index tournant délicatement les oreilles en arrière;
- La sonde est placée du côté gauche de la bouche du rat avec un angle de 45^0 et insérée en longeant délicatement le palais (Figure 37);
- La seringue est redressée à la verticale en douceur puis la descendre dans l'œsophage vers l'estomac sans jamais forcer;
- La solution est administrée puis la sonde est retirée doucement;



Fig.37. Gavage du rat.

➤ A la fin, les rats sont remis dans les cages métaboliques et surveillés pendant 5-10 minutes.

IV.6. Récupération des urines

A des intervalles de temps choisis, les urines sont collectées et mises dans des tubes en polyéthylène gradués pour pouvoir prélever le volume à mesurer. Sur chaque tube sont notés le numéro du rat et la date du prélèvement.

Les tubes en polyéthylène ont été choisis pour éviter l'adsorption de l'iode-131 sur les parois du tube.

IV.7. Analyse du corps entier

Les rats sont mis dans des boîtes munies de couvercles perforés pour permettre aux rats de respirer. Par mesures de radioprotection, les rats sont transportés au service d'Anthropogammamétrie dans des caisses blindées, une fois sur place ils sont positionnés un par un sous le détecteur pour un comptage durant 900s. Une géométrie de comptage bien déterminée a été réalisée (distance du flacon et du détecteur) comme le montre la figure 38.



Fig.38. Analyse du corps entier par anthropogammamétrie.

IV.8. Sacrifice des rats et la récupération de la thyroïde

Le sacrifice des rats contaminés s'est fait sous hotte. Le matériel nécessaire est déposé sur du papier absorbant afin d'éviter toute contamination de la hotte.

Le rat est anesthésié à la Kétamine, puis posé sur sa face dorsale contre le plateau de dissection tapissé de papier absorbant. Ses membres sont étirés et fixés en extension par un fil et des épingles par les mains et les pieds (Figure 39).

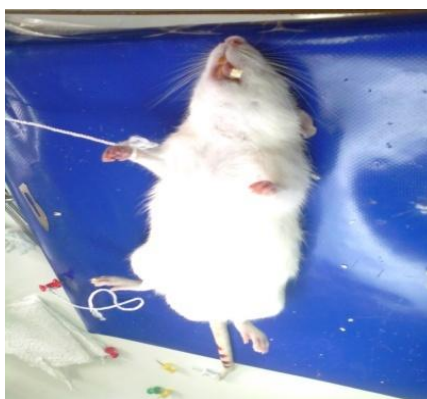


Fig.39. Fixation de rat avec des épingles piquées au des mains et des pieds.

Une ouverture au niveau de l'axe horizontal des oreilles (Figure 40) est effectuée, les glandes salivaires sont dégagées. Une ouverture verticale est faite dans le muscle sterno thyroïdien pour dégager la trachée. La thyroïde repérée, la trachée est coupée de part et

d'autre de la thyroïde (Figure 41). L'échantillon est mis dans un flacon destiné à l'analyse spectrométrie gamma.

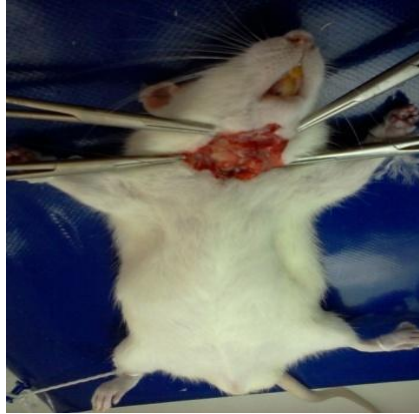


Fig.40. Ouverture au niveau de l'axe horizontal des oreilles.

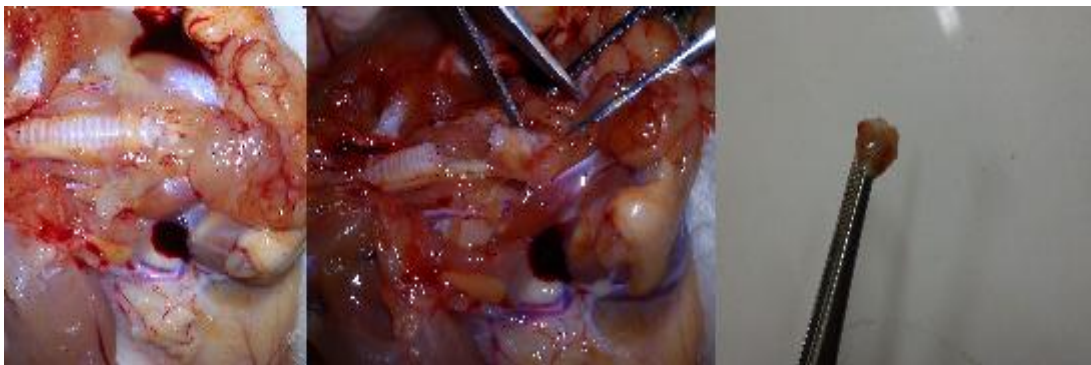


Fig.41. Procédure de récupération de la trachée portant la thyroïde.

IV.9. Préparation des standards pour les analyses anthropogammamétrique et spectrométrie gamma

Pour toute analyse quantitative la préparation des standards est une étape très importante. Dans cette étude trois types de standards ont été préparés à savoir :

- Le standard urine ;
- Le standard corps entier ;
- Le standard trachée portant la thyroïde.

Les standards doivent être mesurés dans les mêmes conditions que les échantillons.

- **Standard urine**

Une matrice en l'eau a été utilisée pour le standard urine, à laquelle a été ajoutée une quantité connue d'iode-131.

Notre standard contient un volume total de 0.5ml et une activité de 18870 Bq.

- **Standard corps entier**

Un rat sain a été contaminé par des injections d'une solution connue d'iode-131 en différents points pour servir de standard corps entier. Les injections ont été faites sur tous le corps avec une prédominance au niveau du cou pour simuler un rat contaminé. Une solution de 0.2ml d'activité de 74000 Bq a été utilisée pour cette opération.

La boîte contenant le rat standard a été placée sous le détecteur avec la même géométrie déjà déterminée pour les échantillons.

- **Standard de la trachée portant la thyroïde**

Une trachée portant la thyroïde d'un rat sain dans laquelle une solution connus d'iode-131 a été injectée puis mise dans un flacon du même type que celui utilisé pour l'analyse des échantillons.

La solution injectée est d'environ 0.02ml d'activité de 11100 Bq.

L'étude radiotoxicologique menée a pour objectif la détermination de la période effective de l'iode-131 pour le modèle du rat Wistar en analysant la cinétique d'élimination par de ce radioélément par le corps entier dans une première étape. La seconde étape consiste en que l'observation de la cinétique de fixation de l'iode-131 dans sa thyroïde puis son élimination a été menée sur un lot de cinq rats et de la cinétique d'élimination de l'iode dans les urines.

- **Contamination des rats par iode-131**

Les cinq rats ont été pesés puis ils ont été gavés avec une solution d'iode-131 dont l'activité massique d'environ 1000 Bq par g de poids corporel du rat. Les poids des rats et les activités incorporées sont rapportés sur le tableau 2.

Tableau 2. Poids des rats et l'activité des solutions de contamination.

Nom du rat	Poids (g)	Activité en (kBq)
Rat 1	228	311
Rat 2	262	222
Rat 3	225	333
Rat 4	265	296
Rat 5	240	296

- **Calcul de l'efficacité de détection de la chaîne de spectrométrie gamma**

- **Standard des urines du rat**

Un standard des urines du rat a été préparé selon la méthode décrite (§IV.9). Le spectre obtenu est représenté sur la figure 42.

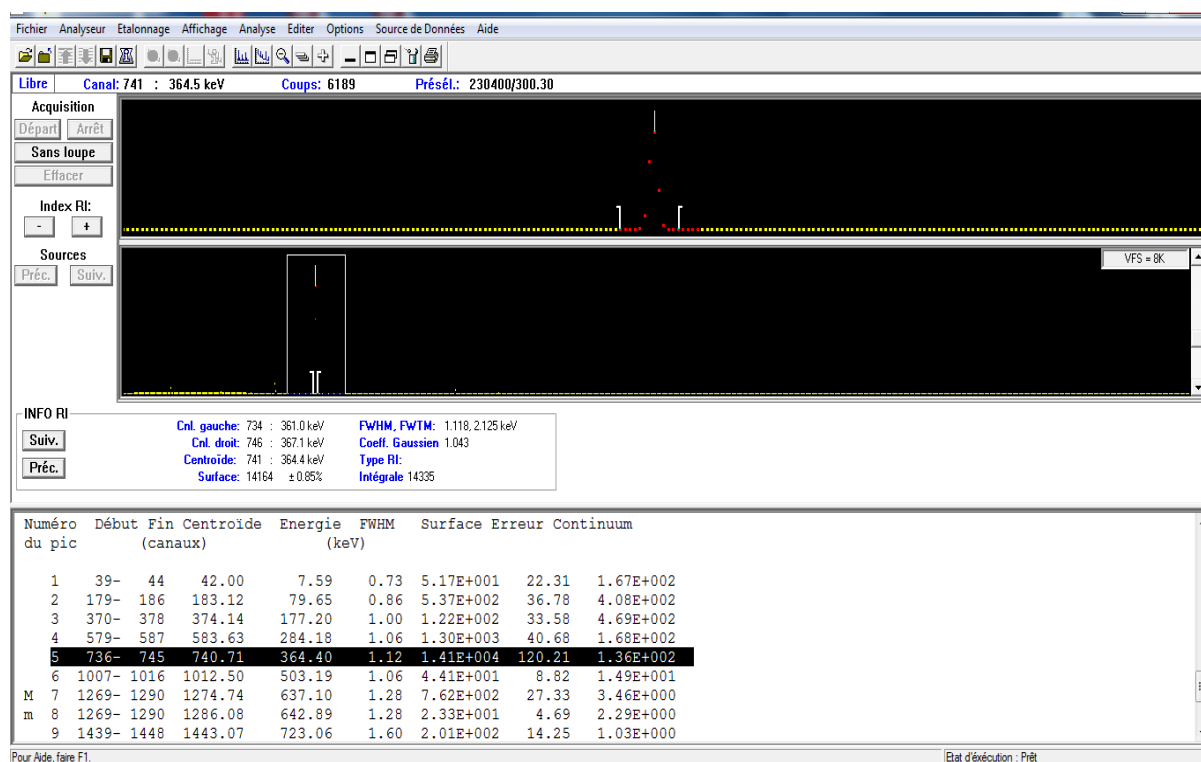


Fig.42. Spectre du standard des urines.

A partir du spectre mesuré est calculée l'efficacité de détection du détecteur pour l'iode-131 d'urines. Les paramètres extraits du spectre sont remplacés dans l'équation de l'efficacité de détection. Les paramètres utilisés ainsi que les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 3.

$$E_{ff} = \frac{S_s}{I * t_s * A_s}$$

Avec $I = 0.81$

Tableau 3. Paramètres pour le calcul de l'efficacité de détection de l'iode dans des urines.

Echantillon	Activité du std (Bq)	Temps de comptage(s)	Surface (Cp)	Efficacité
Urine	18870	300.30	14100	0.0031

➤ **Standard corps entier du rat**

De même que pour les urines, l'efficacité de détection de l'iode-131 pour le corps entier a été calculée à partir de paramètre du spectre mesuré. Le standard du corps entier a été conditionné comme décrit précédemment (§IV.9). Les paramètres ainsi que les résultats de la mesure de l'efficacité de détection fournis sont présentés dans le tableau 4.

Tableau.4. Calcul de l'efficacité de détection du standard corps entier.

Echantillon	Activité du std (Bq)	Temps de comptage(s)	Surface (Cp)	Efficacité
Corps entier	74000	900	1165580	0.021

➤ **Standard thyroïde**

Les mesures sur la glande thyroïde sont délicates compte tenu de son volume très réduit. Le spectre obtenu par spectrométrie gamma pour le standard la cet organe est présenté sur la figure 43.

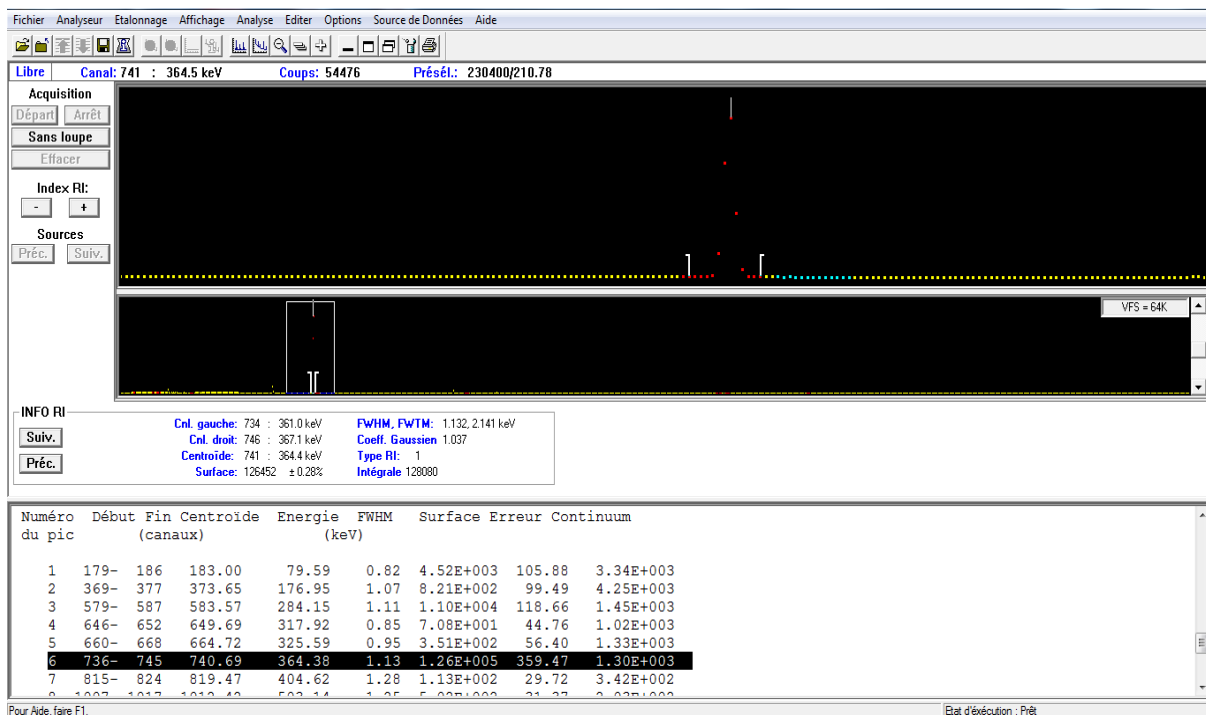


Fig.43. Spectre du standard de la thyroïde.

A partir du spectre on calcule l'efficacité du détecteur pour l'analyse de la thyroïde. Les paramètres tirés du spectre sont remplacés dans l'équation de l'efficacité.

$$E_{ff} = \frac{S_s}{I * t_s * A_s}$$

L'efficacité de détection de l'iode-131 pour la thyroïde est donnée dans le tableau 5 ainsi que les paramètres et les mesures obtenus.

Tableau.5. Calcul de l'efficacité du standard de la thyroïde.

Echantillon	Activité du std (Bq)	Temps de comptage(s)	Surface (Cp)	Efficacité
Thyroïde	11100	210.78	126144	0.067

Résultats de l'analyse des échantillons

➤ Analyse Corps entier

A différents intervalles de temps, les rats ont été mis dans des boîtes pour des mesures par anthropogammamétrie en respectant la géométrie de comptage choisie (Figure 38). Le temps de comptage a été fixé à 900s.

Les mesures sur le rat standard pour la détermination de l'efficacité de détection et les mesures sur les rats étudiés se sont faites dans les mêmes conditions (même géométrie et même matrice).

Les intervalles de temps choisis pour cette étude sont de: 5h, 24h, 48h, 192h, 216h, 264h, 336h et 384h.

Les spectres obtenus ont été analysés, leurs surfaces ont été converties en activité en utilisant l'efficacité de détection du détecteur calculée auparavant.

La détermination des périodes effective et biologique du modèle animal choisi a été à partir des résultats de l'analyse anthropogammamétrique du rat n° 05.

Les résultats des mesures des activités corps entier à différents intervalles de temps sont mentionnés dans le tableau 6.

Tableau 6. Activités du corps entier à différents intervalles de temps.

Intervalle de temps (h)	Activité (Bq)
24	99311,2
48	90207
192	31763
216	25000
264	17631
336	10453
384	5079

L'évolution de l'activité du corps entier pour le rat n° 05 en fonction du temps est donnée en Figure 44.

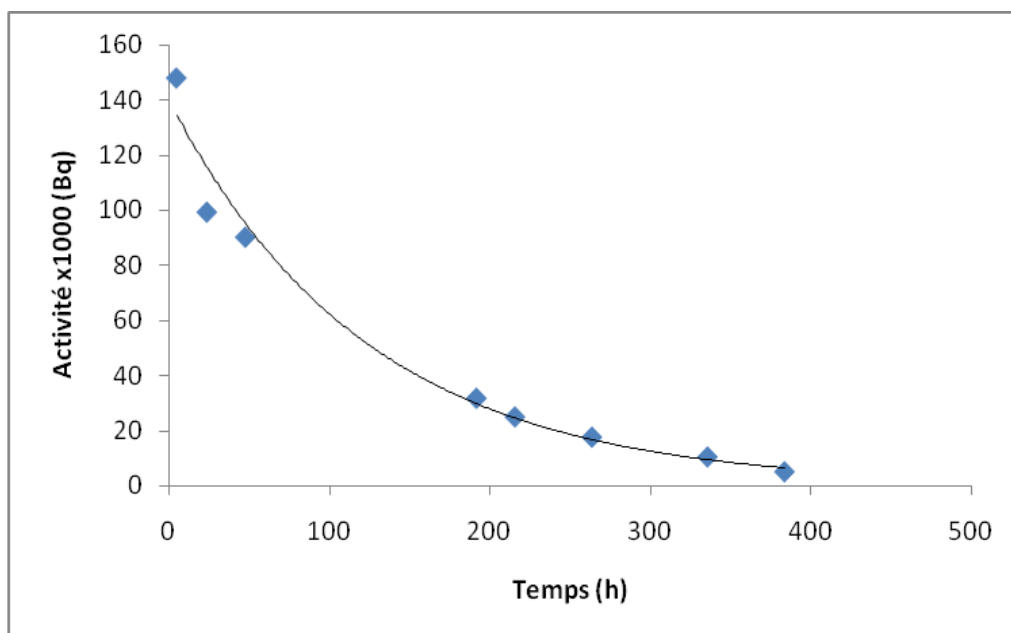


Fig.44. Evolution de l'activité du corps entier en fonction du temps pour le rat n° 05.

➤ **Détermination des périodes effective et biologique**

Pour déterminer graphiquement la période effective, c'est-à-dire la période au bout de laquelle la moitié de la radioactivité est éliminée du corps, à partir de la figure 44 a été effectuée suite à une représentation linéaire.

L'activité initiale de gavage du rat n° 05 est de 296000 Bq. Chaque activité du corps entier à un temps t est divisée par l'activité initiale et convertie en valeurs de logarithme népérien. De la représentation linéaire de l'évolution de l'activité relative du corps entier en fonction du temps (Figure 45), on obtient la pente représente le λ Avec $\lambda = \frac{\ln(2)}{T_{eff}}$

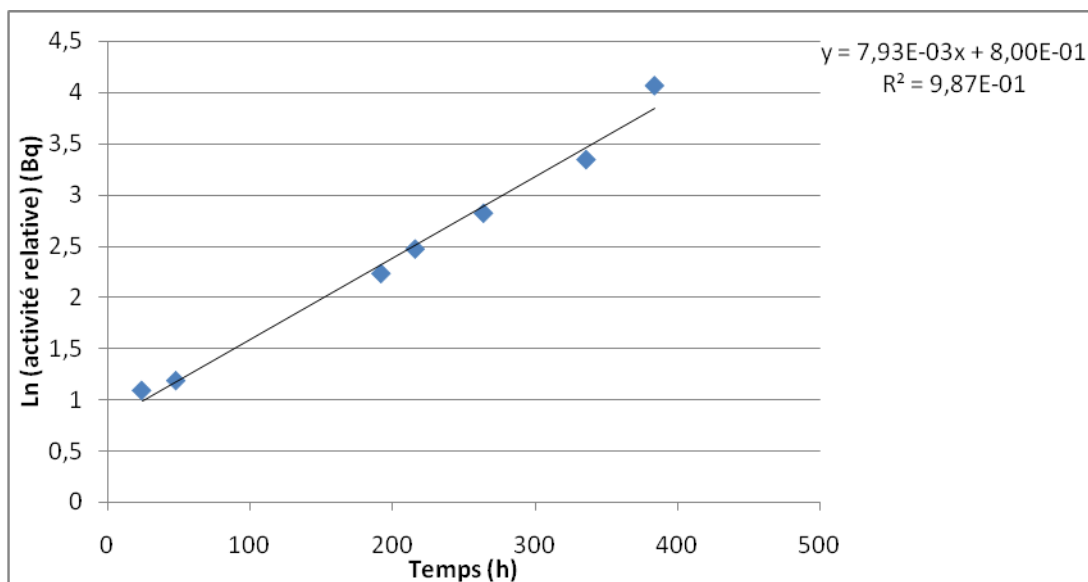


Fig.45. Activité normalisées du corps entier en fonction du temps pour le rat n° 05.

Le tableau 7 représente la période effective et la période biologique du notre modèle animal le rat Wistar.

On a la loi suivante : $1/T_{eff} = 1/T_p + 1/T_b$

Tableau 7. Période effective et période biologique de l'iode-131 chez le rat Wistar.

Pente	T _p (h)	T _{eff} (h)	T _b (h)
7.93 10 ⁻³	192,48	87,4	160

➤ Calcul de l'activité des échantillons urinaires

Les rats ont été mis dans des cages métaboliques pour la collecte des urines. Les intervalles de temps choisis pour cette étude sont 5h, 24h, 48h, 72h, 120h, 144h, 168h, 192h, 216h et 288h.

De chaque échantillon des urines collecté, on prélève 0.5 ml que l'on met dans un flacon identique à celui utilisé pour le standard, puis mis au compter dans la chaîne de mesure gamma.

Dans cette partie, un seul exemple de calcul de l'activité d'un échantillon d'urine est donné. Il s'agit du prélèvement d'urines du rat n° 02, 24h après le gavage. Le volume des urines collecté est de 5ml. Le spectre obtenu de l'échantillon choisi est représenté dans la figure 46.

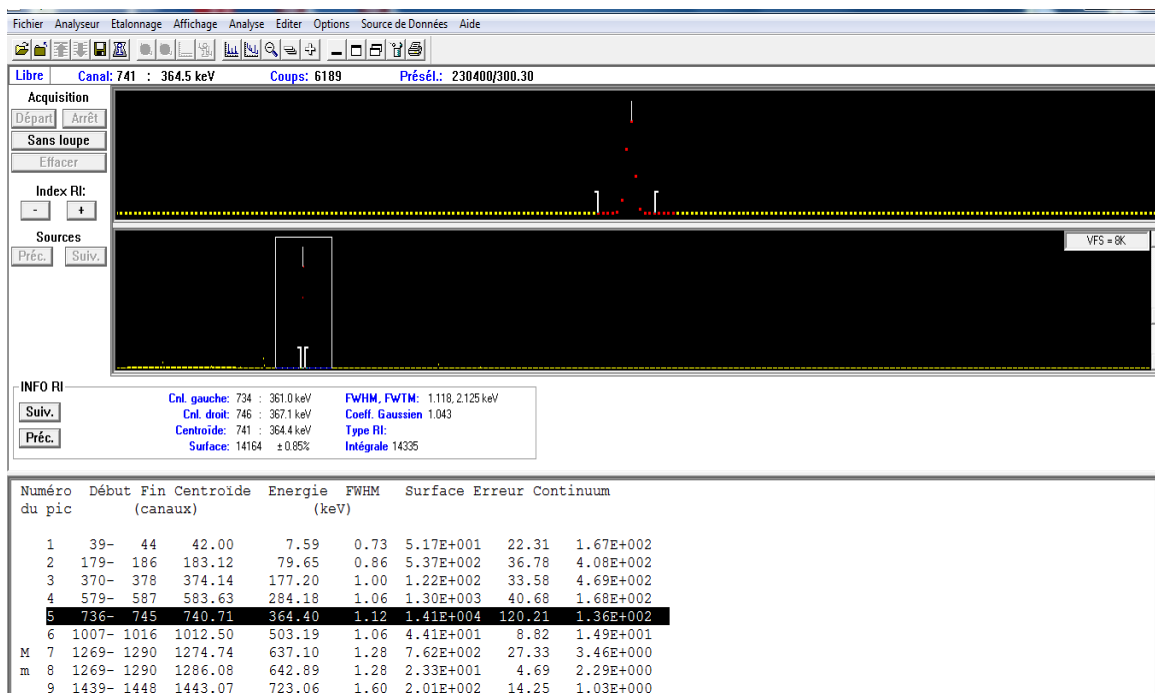


Fig.46. Spectre de l'échantillon urinaire du rat n°02, 24h après gavage

Les spectres obtenus ont été analysés, les surfaces ont été converties en activité grâce à l'efficacité de détection du détecteur calculée précédemment.

$$A_s = \frac{S_s}{I * t_s * E_{ff}}$$

En pratique le comptage des échantillons a été effectué en décalage avec le prélèvement en raison de non disponibilité de la chaîne de spectrométrie gamma. A titre d'exemple, le temps écoulé entre le prélèvement et le comptage pour un des échantillons a été de 15j. Compte tenu de la désintégration radioactive (période physique « T »), l'activité réelle (A_0) des échantillons au moment du prélèvement doit être déterminée. Sachant que l'activité au moment du comptage « A » est:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{Avec } \lambda = \frac{\ln 2}{T}$$

La période physique de l'iode -131 est de 8.02 jours.

Les activités corrigées par rapport à la désintégration physique sont présentées dans le tableau 8.

Une fois l'activité est calculée, il faut revenir au volume réel étant donné que le comptage a été effectué pour un volume d'urines de 0.5ml.

$$A_{\text{réel}} (\text{Bq}) = \frac{A_{\text{corr.}} \text{volume de l'urine}}{0.5\text{ml}}$$

Pour uniformiser les résultats, l'activité mesurée dans les urines est divisée par le poids du rat en (g) et par l'activité injectée en (Bq).

Tableau 8. Paramètres et activités calculés pour l'échantillon d'urines du rat n°02, récoltés 24h après gavage.

N° échantillon	Urine 24h
Surface	14100
Temps de comptage (s)	300,30
Efficacité du détecteur	0,0031
Activité calculée (Bq)	18698,94343
Activité corrigée/désintégration (Bq)	68366,0913
Activité corrigée/volume (Bq)	683660.913
Activité normalisée/poids du rat/ A_0 (Bq)	0,001175402

Le tableau 9 représente les moyennes des activités (n=5) normalisées pour chaque intervalle du temps.

Tableau.9. Moyenne des activités normalisées pour les urines.

Temps (h)	Activité normalisée(Bq)
0	0
5	0,000165281
24	0,005365332
48	0,00085952
72	0,000198796
120	0,00019412
144	0,000112317
168	2,02346E-05
192	9,31386E-06
216	5,21605E-06
288	1,14002E-05

La cinétique d'élimination de l'iode-131 par les urines est donnée dans la figure 47,

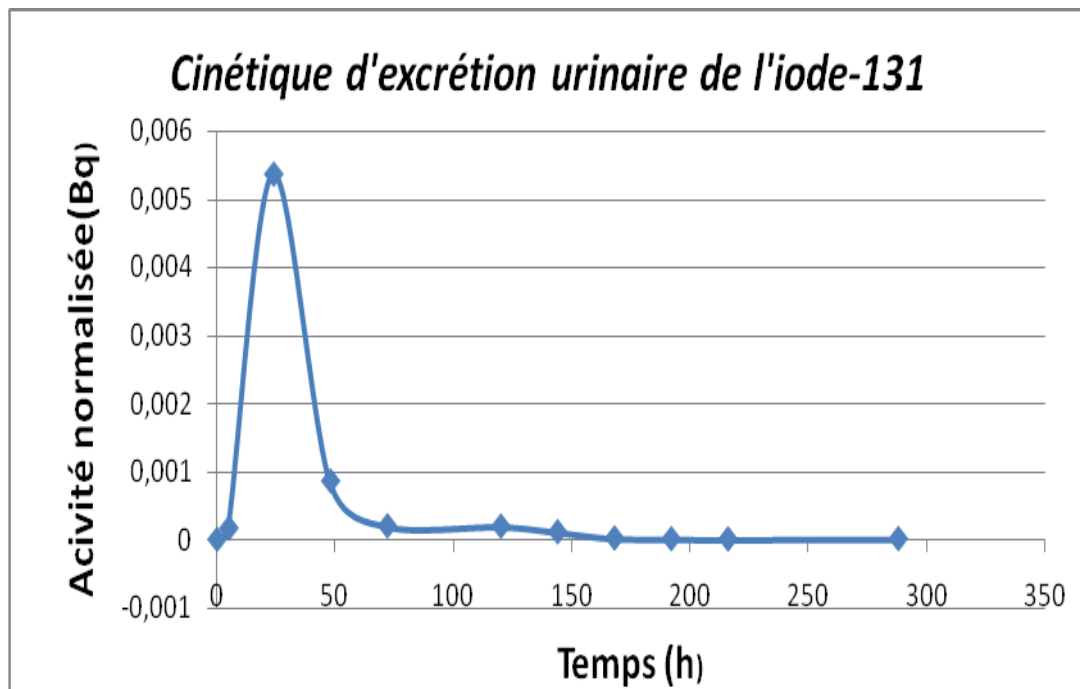


Fig.47. Evolution de l'activité normalisée en fonction du temps pour les urines.

➤ **Calcul de l'activité de la thyroïde portée par la trachée**

Les rats contaminés ont été sacrifiés après le gavage à des intervalles de temps de : 5h, 24h, 48h, 72h et 168h. Les thyroïdes sont prélevées, pesées (tableau 10) puis mises dans des flacons pour un comptage gamma.

Tableau 10. Poids de la thyroïde des rats après le sacrifice.

Rat	Poids (g)
Thy 1	0,1119
Thy 2	0,1566
Thy 3	0,0902
Thy 4	0,138
Thy 5	0,0979

Les flacons contenant les thyroïdes ont été couverts d'un film en plastique avant de les mettre dans l'enceinte du détecteur pour éviter toute contamination (figure 48).

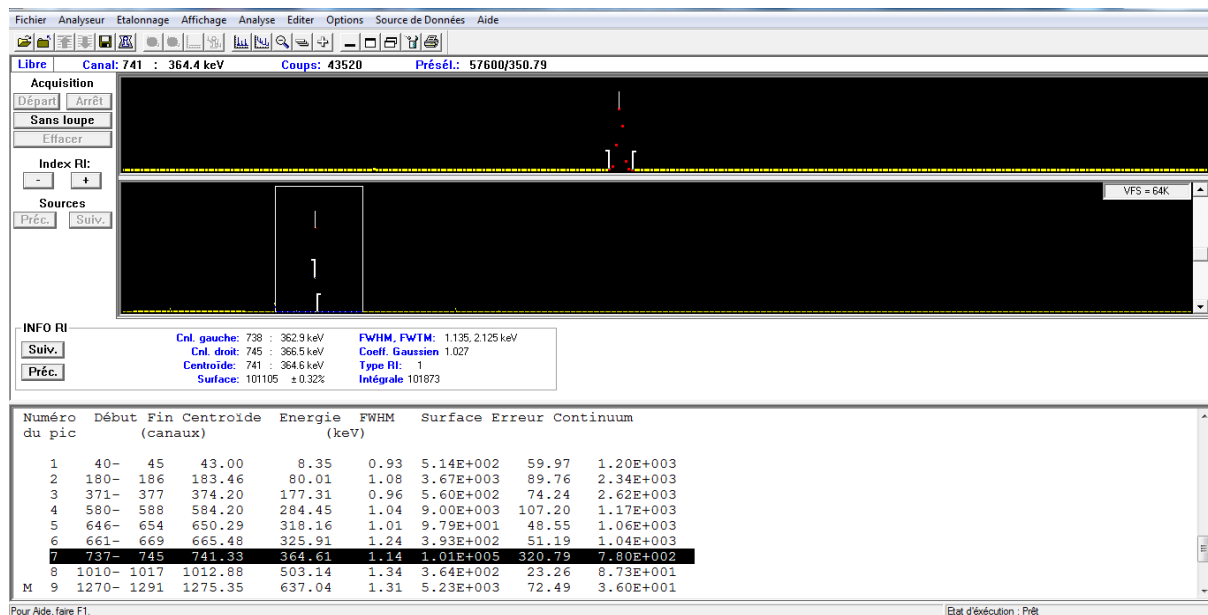


Fig.48. Spectre obtenu avec le comptage de la thyroïde du rat n° 03.

Le comptage n° a pu être effectué directement après le sacrifice, un temps s'est écoulé entre ces deux moments ce qui amène à faire une correction de la décroissance radioactive// en prenant en considération la période physique de l'iode-131.

De même que pour les urines, pour uniformiser les résultats, l'activité mesurée a été divisée par le poids du rat en (g), par l'activité injectée en (Bq) et par le poids de l'organe (g).

Tableau 11. Calcul des activités normalisées des thyroïdes.

Echantillon	Activité (Bq)	Activité corrigée (Bq)	Activité uniformisée
Thy1	10594,6959	15024,22557	0,00189022
Thy2	9708,45183	16365,2818	0,00179671
Thy3	5312,76024	6191,39218	0,00091613
Thy4	1157,75346	1180,91283	0,00010909
Thy5	1468,51425	1564,97729	0,00022502

A partir des activités normalisées on peut tracer la représentation graphique de la cinétique de fixation de l'iode-131 sur la thyroïde dans le cas du modèle animal choisi (figure 49).

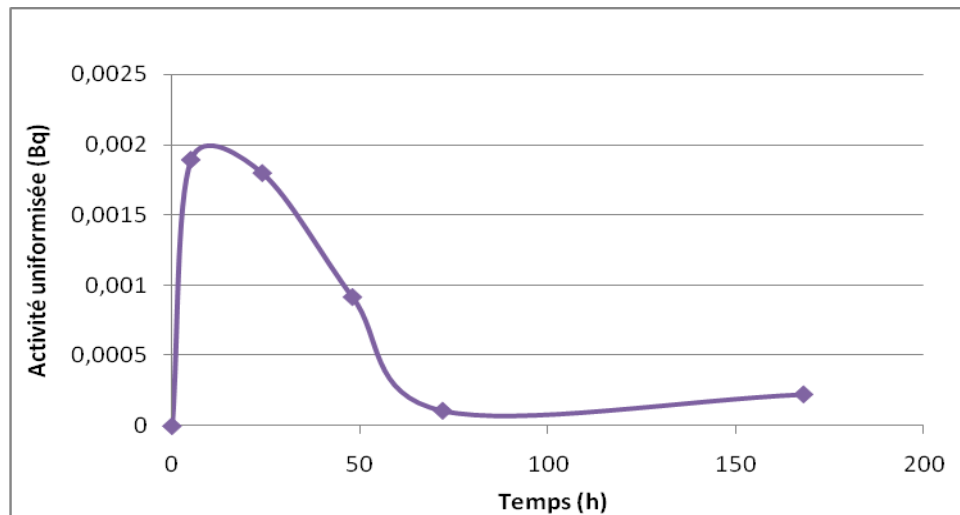


Fig.49. Cinétique de fixation thyroïdienne de l'iode-131.

Interprétation globale des résultats

Une fois dans l'estomac l'iode est rapidement absorbé dans la circulation sanguine, cette absorption est quasiment totale vue facteur d'absorption qui se rapproche de 1, c'est-à-dire qu'environ 100% de l'iode dans le tube digestif est absorbé, et à cet effet la quasi-totalité de l'iode-131 se trouve dans le sang.

Une fois dans la circulation sanguine environ 30 % de l'activité ingérée sont transportés jusqu'à la glande thyroïde et les 70 % restants sont excrétés directement dans l'urine via la vessie.

Le temps de séjour de l'iode-131 dans l'organisme dépend de deux mécanismes indépendants:

- La décroissance radioactive, constante physique, caractéristique du radionucléide (période physique), pour l'iode-131 elle est de 8.02 jours;

- L'élimination biologique, liée au métabolisme de l'iode dans l'organisme (période biologique). La période biologique pour le modèle étudié est égale à 160h (6.66 jours).

La disparition effective de l'iode-131 d'un organe ou du corps entier résulte d'une combinaison de ces deux mécanismes. Dans cette étude, la période effective déterminée expérimentalement est de 87.4h (3.64 jours) c'est-à-dire qu'au bout d'une durée égale à cette période le corps élimine la moitié de la radioactivité présente dans ce corps. L'élimination d'un radionucléide dans un corps donné se fait progressivement.

D'un autre côté, il a été observé que qu'aux premières 24h du séjour de l'iode-131 dans le corps de l'animal, l'élimination par les urines est maximale alors qu'une faible quantité d'iode est éliminée par la matière fécale. Dans la présente étude, cette fraction n'a pas été prise en considération.

De même, il a été noté que la thyroïde capte le maximum de l'iode entre 5h et 24 h, cet iode va lui être utilisé pour synthétiser les hormones thyroïdiennes qui seront par la suite présentes dans la circulation sanguine. De ce fait ces hormones radioactives sont transportées vers différents organes pour accomplir leurs fonctions et mais aussi irradier ces organes.

Ce travail a été réalisé au sein du Département des Rayonnements Ionisants du Centre de Recherche Nucléaire d'Alger. Il consiste à la détermination de l'activité de l'iode-131 par méthode directe (*in vivo*) pour la mesure du corps entier et par la méthode indirecte (*in vitro*) dans les échantillons biologiques en utilisant la spectrométrie gamma.

Ce travail nous a permis d'acquérir de nouvelles connaissances dans les domaines de la radioprotection et de la radiotoxicologie. Il nous a permis également de se familiariser avec la manipulation des animaux de laboratoire et plus précisément les rats de laboratoire (élevage, gavage, sacrifice, et même thyroïdectomie).

L'étude radiotoxicologique de l'iode-131 chez un modèle murin (rat Wistar) nous a permis d'une part d'évaluer les périodes effective et biologique à travers les résultats des mesures corps entier et d'autre part, de déterminer le profil d'excrétion urinaire de ce modèle à travers l'analyse de la cinétique d'excrétion urinaire.

L'étude de l'évolution de l'activité de l'iode-131 dans la thyroïde à différent temps après l'introduction de l'iode dans l'organisme du rat a permis d'estimer le temps de fixation maximale dans cet organe.

L'analyse directe par spectrométrie gamma nous a offert l'opportunité d'obtenir plusieurs résultats qualitatif et quantitatif même pour les échantillons de faible activité. Cependant, la fiabilité de cette technique d'analyse dépend de la réalisation de standard de matrice identique (en nature et géométrie) que l'organe à mesurer afin de calibrer en efficacité la chaîne de mesure.

En nous basant sur les résultats obtenus dans le cadre de cette étude, nous pouvons dire que les objectifs fixés pour ce travail sont atteints.

Références bibliographiques

- [1] C. Jimonet & H. Métivier, *Personne compétente en radioprotection, principes de radioprotection réglementation*. Edition EDP Sciences (2007).
- [2] M. T. Ménager, J. Garnier-Laplace, M. Goyffon, *Toxicologie nucléaire environnementale et humaine*. Edition Lavoisier (2009).
- [3] *Collection normes de sureté de l'AIEA, Evaluation de l'exposition professionnelle due à l'incorporation de radionucléides*. N°RS-G-1.2 (2004).
- [4] E. Dahi, L. Meherchi ; *Système de double calcul dosimétrique, mémoire de master en physique médicales* (2010).
- [5] Y. Buisson, J. D. Cavello, J. J. Kawalski, C. R. Enaudeau, J. Y. Tréguieret, Al. Yves Buisson. *Les risques NBRC, savoir pour agir*. Edition Xavier montanbou (2004) ; P17.
- [6] TK. Hei, CQ. Piao, J. C. Willy, S. Thomas, E. J. Hall. *Malignant transformation of human bronchial epithelial cells by radon simulated alpha-particles*. *Carcino genesis* (1994); 15, 3:431_437.
- [7] S. C. Yves, H. Fohrenbah. *Radio protection en milieu médical : Principe et mise en pratique*.
- [8] R. Buinbat, A. Bonnin, R. Deloche et C. Lapeyre. *Cent ans après la radioactivité, le rayonnement d'une découverte* (1999). Edition EDP Sciences.
- [9] K. Agouar, T. Ait Abdelkader, *Evaluation de la Radioactivité naturelle et artificielle dans le sédiment superficiel de la baie d'Alger*. *Ingénieur d'état. Aménagement du littoral*. Alger (1994), P94.
- [10] A. Nouredine, *Measurement of the UPTAKE of alpha and gamma, emitting radionuclide by biological material for marine environment application to the west Scotland 'these magister'*. CRNA (1987).
- [11] H. Dechoudens et G. Troesch, *Introduction à la radioprotection*. Edition Gedim, 1985.
- [12] D. Blanc, *Physique nucléaire*. Masson 2eme Edition (1980).
- [13] J. Dutreix, A. Desgree, et J.H. Vinot, *Biophysique des radiations*. Edition Masson 1980.
- [14] M.S. Kecir et A. Khaber, *Etude de la répartition transversale et verticale de la radioactivité dans les sédiments de la baie Bousmail et istimatic de la vitesse de sédimentation, mémoire d'ingénieur d'état*. Essmal (1998).
- [15] M. Maache, *Application d'une méthode d'Analyse d'échantillons solides par spectrométrie Gamma*, 1993, *Ingénieur en radioprotection* (1993), P 10,11.

Références bibliographiques

- [16] Les principes de la radioprotection (fiche ASN), IRSN (2009).
- [17] CSPI, l'iode, son origine, son rejet, son contrôle et son impact dans l'environnement, Mai (1996).
- [18] M.T. Ménager, J.G. Laplace, M. Goyffon, Toxicologie nucléaire environnementale et humaine. Edition Lavoisier, P395.
- [19] ML. Perrin, A. Thomassin, E. Gaillard-Lecanu, V. Chambrette, J. Brenot (DPHD), 1^{ère} édition: 01/08/2001.
- [20] BNFL, Annual report on radioactive discharges and monitoring of the environment, (1997).
- [21] K. Shozugawa, Health physics society-Nuclide safety data sheet 'Iodine-131'.
- [22] J.M. Deligne, A. Rannou, G. Sert, JP. Vidal, Institut national de recherche et de sécurité, (Octobre 2009).
- [23] Dictionnaire, <http://www.larousse.fr/encyclopedie/Radioactivite/Iode131>.
- [24] Matpack-periodic table of the elements 'properties of nuclide 53-I¹³¹'.
- [25] F. Salem, A. Sifi, Détermination du Polonium-210 dans les moules *Mytilus galloprovincialis* de la zone côtière Algéroise, ingénieur d'état en génie de l'environnement (2009).
- [26] A.cheetah, Y. Hamoum, Concentration du Radium-226 contenu dans des résidus de l'industrie pétrolière. Ingénieur d'état, Génie de l'environnement, Alger (2012).
- [27] G. Le Petit, G. Granier, spectrométrie gamma appliqué aux échantillons de l'environnement. Edition TEC et DOC (Lavoisier, 2002).
- [28] T. Mekil, Institut de chimie de Nice (ICN), Paris Tanguy.
- [29] F. Courtine, Etalonnage d'un spectromètre gamma en vue de la mesure de la radioactivité naturelle. Mesures expérimentales et modélisation par techniques de Monte-Carlo. Physics. Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II (2007).

Gestion des déchets contaminés par l'iode-131

Les déchets radioactifs issus de cette manipulation (déchets contaminé par l'iode), sont passés par deux étapes de gestion principale, le tri et l'entreposage. L'étape de traitement ce n'est pas une exigence pour ces déchets, car l'iode-131 à une demi-vie de 8 jours. Il suffit de se basé sur le principe de la décroissance de l'activité de l'iode-131, de ce fait ces déchet seront entreposés pendant 3 mois jusqu'à la diminution et la disparition définitive de la radioactivité. Ces déchets seront par la suite éliminés de façon semblable aux déchets classiques, car ils sont dépourvus de toute source radioactive.

Le tri et l'entreposage

L'étape de tri se fait dans le local où se déroule la manipulation (zone surveillée), par le manipulateur.

Chaque déchet doit porter sur son emballage la date du tri, la nature de déchet et marqué de symbole radioactif pour une meilleure gestion (Figure 50).

- **Les déchets putrescibles :** (Carcasses d'animaux, organe et matière fécale) sont entreposés dans des fûts métalliques remplis de terre, fermés hermétiquement.
- **Les déchets liquides :** (urines des rats contaminés) sont entreposées dans des bouteilles en plastique.
- **Les déchets combustible :** (papiers absorbant, gants) et non combustible (seringue) sont entreposer dans des sachets fermés hermétiquement et mis dans un endroit isolé par des châteaux de plomb afin d'assurer une protection optimale jusqu'à décroissance totale de la radioactivité.



Fig.50. a-Poubelle plombée, b- Fut de stockage, et c- Jerrican pour l'entreposage des déchets.

- ❖ **Contamination** : est le phénomène se produisant quand un produit radioactif se dépose sur un objet ou un être, ou bien est ingéré ou inhalé par un être. La contamination se distingue de l'irradiation, événement au cours duquel l'objet ou l'être est soumis à un rayonnement ionisant.
- ❖ **Cancer de la thyroïde** : est un cancer qui touche l'un des différents types cellulaires composant la thyroïde.
- ❖ **Contamination externe** : la substance radioactive est en contact direct avec la personne par dépôt sur la peau, sur les cheveux, sur les vêtements.
- ❖ **Contamination interne** : résulte d'une incorporation des substances. Le radionucléide pénètre à l'intérieure de l'organisme le plus souvent par ingestion, inhalation, mais également par une blessure cutanée.
- ❖ **Diagnostique** : partie de la médecine qui a pour objet la distinction des maladies.
- ❖ **Effet de freinage ou bremsstrahlung** : « radiation de freinage » ou « radiation de décélération » est un rayonnement électromagnétique à spectre large créé par le ralentissement de charges électriques.
- ❖ **Élément radioactif** : Un élément est dit radioactif lorsque son noyau est instable et qu'il relâche spontanément de l'énergie sous la forme de rayons alpha, bêta et gamma afin de tendre vers la stabilisation. Ce phénomène est appelé la désintégration.
- ❖ **Excitation** : on appelle excitation tout phénomène qui sort un système de son état de repos pour l'amener à un état d'énergie supérieure.
- ❖ **Explosion nucléaire** : est le résultat de l'explosion d'une bombe atomique.
- ❖ **Exposition externe** : c'est l'exposition qui résultant de sources situées en dehors de l'organisme.
- ❖ **Exposition interne** : c'est l'exposition qui résultant de sources situées dans l'organisme.
- ❖ **Facteur de dose par ingestion** : coefficient permettant de calculer une dose délivrée à l'homme (en Sv) correspondant à l'ingestion d'une activité de 1 Becquerel d'un radionucléide donné.
- ❖ **Fission nucléaire** : est le phénomène par lequel le noyau d'un atome lourd (noyau qui contient beaucoup de nucléons, tels les noyaux d'uranium et de plutonium) est divisé en plusieurs nucléides plus légers, généralement deux nucléides.
- ❖ **Halogène** : le terme halogène désigne les éléments de la 17^{ème} colonne du tableau périodique, anciennement appelé groupe VII ou VII_A.

- ❖ **Hyperthyroïdie** : appelé aussi dans les cas très prononcés - graves et rares - thyrotoxicose ou thyrotoxicose, est le syndrome clinique causé par un excès de thyroxine libre circulante ou de triiodothyronine libre ou les deux.
- ❖ **Industrie nucléaire** : comprend l'ensemble des procédés de transformation qui utilisent les propriétés du noyau atomique.
- ❖ **Inhalation** : en médecine, une inhalation désigne l'absorption par les voies respiratoires.
- ❖ **Installations nucléaires** : sont des réacteurs à l'exception de ceux qui font partie d'un moyen de transport ; les usines de préparation ou de fabrication de substances nucléaires ; les usines de séparation des isotopes de combustibles nucléaires ; les usines de traitement de combustibles nucléaires irradiés ; les installations de stockage de substances nucléaires à l'exclusion du stockage de ces substances en cours de transport, ainsi que toute autre installation dans laquelle des combustibles nucléaires ou des produits ou des déchets radioactifs.
- ❖ **Ionisation** : est l'action qui consiste à enlever ou ajouter des charges à un atome ou une molécule.
- ❖ **Irradiation** : désigne l'exposition, volontaire ou accidentelle, d'un organisme, d'une substance, d'un corps, à des rayonnements. Ce terme est en particulier utilisé lorsque l'on considère l'exposition à des rayonnements ionisants.
- ❖ **Isotope stable** : est un isotope qui n'a pas de radioactivité décelable.
- ❖ **Isotopes radioactifs** : sont des atomes dont le noyau est instable.
- ❖ **Nodules** : est une concrétion minérale arrondie dont la composition diffère de celle de la roche encaissante.
- ❖ **Onde électromagnétique** : est un modèle utilisé pour représenter les électromagnétiques. Il convient de bien distinguer, le rayonnement électromagnétique, qui est le phénomène étudié, et l'onde électromagnétique, qui est une des représentations du phénomène.
- ❖ **Oxydoréduction** : c'est la réaction au cours de laquelle une molécule est oxydée (c'est un agent réducteur) et un autre est réduite (agent oxydant).
- ❖ **Période biologique** : temps à l'issue duquel la moitié de la masse d'une substance a été éliminée de l'organisme par des processus uniquement physiologique.
- ❖ **Période effective** : c'est le temps nécessaire pour que la radioactivité spécifique des molécules d'une population donnée diminue de moitié après correction de la décroissance radioactive du radionucléide.

- ❖ **Période radioactive** : correspond au temps nécessaire pour que l'activité diminue jusqu'à la moitié de sa valeur initiale ou encore pour que la moitié des noyaux radioactifs initialement présents dans la source radioactive se soient désintégrés. Elle est également par fois appelée période physique ou demi-vie.
- ❖ **Radiotoxicologie** : est une discipline scientifique récente qui étudie les effets directs ou indirects des corps chimiques radioactifs sur les organismes vivants et les écosystèmes.
- ❖ **Rayonnements non ionisants**: Le rayonnement non ionisant se réfère à tout type de rayonnement électromagnétique qui ne porte pas suffisamment d'énergie pour ioniser la matière, c.-à-d. enlever un électron d'un atome ou d'une molécule.
- ❖ **Réacteur nucléaire** : est un ensemble de dispositifs comprenant une enceinte enfermant un « cœur » dans lequel une réaction en chaîne peut être initiée, modérée et contrôlée par l'humain via divers dispositifs de modulation de la réaction de fission et d'évacuation d'énergie (chaleur).
- ❖ **Scintigraphie** : est une méthode d'imagerie médicale de médecine nucléaire qui produit une image fonctionnelle par l'administration d'un médicament radio-pharmaceutique dont on détecte les rayonnements qu'il émet une fois qu'il a été capté par l'organe ou la cible à examiner.
- ❖ **Stochastique** : Définit dans un domaine fini uniquement, ses valeurs varient de manière discontinue dans l'espace et dans le temps, sa valeur ne peut être prédite ; cependant, la probabilité d'avoir une valeur particulière est déterminée par une distribution.
- ❖ **Thérapie** : est un ensemble de mesures appliquées par un professionnel de la santé à une personne vis-à-vis d'une maladie, afin de l'aider à en guérir, de soulager ses symptômes, ou encore d'en prévenir l'apparition.
- ❖ **Thyroïde** : est une glande endocrine cervicale régulant de nombreux systèmes hormonaux. Située à la face antérieure du cou, elle est superficielle.
- ❖ **Transcutanée** : se dit d'une substance qui peut franchir la barrière de la peau.

Annexes

Chapitre I :
Généralités sur les rayonnements
ionisants

Chapitre II :
Généralités sur l'iode -131

Chapitre III :
Spectrométrie gamma

Chapitre IV :
Matériels et méthodes

Chapitre V :
Résultats et discussions

Conclusion générale

Glossaire

Introduction générale

Liste d'abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Références bibliographiques