

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté De Génie Électrique et d'Informatique



Mémoire de fin d'études
En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en
Génie Biomédical
Spécialité : Instrumentation Biomédicale

Présenté par :

- AOUACHE Lamia
- REZAOUI Thenhinane

Traitement des cellules cancéreuses à l'aide des rayonnements radioactifs. Application : Traitement du cancer de la thyroïde.

Devant le jury composé de :

Dr HOCINI Farid	MCB	UMMTO	President
Dr LEKADIR Fazia.....	MCB	UMMTO	Examineur
Dr DAOUI Hassiba.	MCB	UMMTO	Encadrante

Année Universitaire : 2024-2025.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à ma belle et fidèle famille :

A mes très chers parents pour tout leur amour qui ont sacrifié leur vie pour me voir un jour réussi,

Mon cher père pour son soutien moral et matériel et encouragement durant toute ma vie.

Ma chère mère qui a éclairé mon chemin et qui m'a encouragé et soutenue toute au long de mes études.

À mes chers frères : Amar, Ahmed, Nassim et Lotfi qui m'ont toujours soutenu, qui m'ont fait confiance dans le choix de mes études tout en m'encourageant à les poursuivre quelles que soient les difficultés. Je les remercie pour l'amour et la tendresse qu'ils m'ont témoigné pendant toute cette période.

A mes fidèles copines que je considère comme mes sœurs : Sarah, Tinhinane et Safia pour leur présence, soutien constant, encouragement, surtout pour tous les moments précieux que nous avons partagés, leur présence a rendu cette aventure plus douce et inoubliable.

A ma binôme Lamia qui a partagé avec moi ce travail.

A mes belles sœurs : Sara, Fella pour leur gentillesse, leur soutien et leur place chaleureuse dans ma vie.

Du fond de mon cœur, je dédie ce modeste travail à tous ceux qui me sont chers.

Dédicaces

Je dédie ce présent mémoire à toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ma réussite dans ce parcours universitaire.

À mes professeurs, à mon encadrante Mme DAOUI Hassiba, pour leur disponibilité, expertise et leur accompagnement tout au long de mon aventure académique, je les remercie pour leurs conseils, leur patience et la confiance qu'ils m'ont accordé.

À mes chers parents, à ma sœur Dyhia et à mon frère Samy ainsi qu'à toute la famille pour leur soutien inconditionnel, leur encouragement et leur bienveillance, ils ont été ma force et ma motivation même dans les moments les plus exigeants pour aller au bout de cette aventure.

À mes amis pour leur présence, leur écoute et leur bonne humeur qui m'ont permis de garder le sourire.

Enfin à tous ceux qui m'ont encouragée et soutenue.

Je vous remercie d'avoir cru en moi et en ma réussite.

Remerciements

Nous rendons grâce à Allah, le tout puissant pour nous avoir donné le courage, la patience et la persévérance tout au long de ce travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à notre encadrante Madame DAOUI Hassiba. Nous la remercions de nous avoir encadrées, orientées et aidées, ses conseils avisés, sa disponibilité, son soutien tout au long de ce travail et ses remarques pertinentes ont contribué à la qualité de ce mémoire.

Nous souhaitons également remercier l'ensemble des enseignants de l'établissement Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou (Tamda) pour la formation de qualité qu'ils nous ont dispensée durant ces années d'études. Leurs enseignements ont été une source précieuse de savoir et d'inspiration.

Nos remerciements s'adressent également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'évaluer ce mémoire.

Nous sommes reconnaissantes envers toute l'équipe de l'établissement privé les amandiers Mekla Tizi-Ouzou, pour nous avoir offert l'opportunité d'un stage au sein d'un milieu professionnel aussi enrichissant.

Nous tenons à exprimer notre reconnaissance a Docteur YAHYAOUI Mohammed pour nous avoir accueillies au sein du service de médecine nucléaire. Son encadrement et ses conseils ont permis d'enrichir nos connaissances pratiques et d'affiner notre compréhension du domaine.

Nous tenons également à exprimer notre gratitude envers nos familles, nos proches et nos amis pour leur soutien sans faille, leur compréhension et leur patience.

Leur soutien à nos côtés nous a aidés à franchir les périodes d'incertitude et d'épuisement.

Table des matières

Dédicaces	II
Remerciements	IV
Liste des figures	VIII
Liste des tableaux.....	IX
Liste des abréviations	XI
Introduction générale	3

Chapitre I : Généralités sur la radioactivité

1	Introduction	5
2	Historique de la radioactivité	7
3	Classification des rayonnements	8
	Selon leur effet sur la matière	8
	3.1.1 Les rayonnements ionisants.....	8
	3.1.2 Les rayonnements non ionisants	9
	3.2 Selon leur nature	9
	3.2.1 Les rayonnements particuliers	9
	3.2.2 Les rayonnements électromagnétiques	12
4	Types des radioactivités et sources d'exposition.....	12
	4.1 La radioactivité naturelle.....	12
	4.2 La radioactivité artificielle.....	13
5	Les lois de la radioactivité.....	14
	5.1 La décroissance radioactive : loi de désintégration.....	14
	5.2 L'activité A.....	15
	5.3 Période radioactive ou demi-vie	16
6	Applications médicales de la radioactivité	17
7	Comment peut-on être exposé à la radioactivité ?.....	20
8	Les risques d'une exposition à la radioactivité	20
	8.1 De la dose de radioactivité à laquelle l'organisme est exposé et de la durée d'exposition	21
	8.2 Du type d'exposition.....	21
	8.3 Le type de radionucléide.....	21

8.4	De la radiosensibilité de chacun	22
9	Conclusion.....	22
	Références bibliographiques du chapitre I	23

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

1	Introduction	26
2	Mécanismes fondamentaux d'interactions	26
2.1	Interaction des particules chargées (α , β).....	27
2.1.1	Cas des particules lourdes (particule alpha)	27
2.1.2	Cas des particules légères (particules bêta).....	28
2.2	Interaction des rayonnements électromagnétiques	30
2.2.1	Interaction des photons : gamma et X.....	30
2.2.1.1	L'effet photoélectrique.....	32
2.2.1.2	L'effet Compton.....	33
2.2.1.3	La diffusion Thomson-Rayleigh.....	34
2.2.1.4	La création de paires	34
2.3	Interaction des neutrons avec la matière.....	35
2.3.1	L'absorption.....	36
2.3.2	La diffusion	37
3	Transfert d'énergie a la matière biologique.....	39
3.1	Pouvoir d'arrêt linéique S du milieu	39
3.2	Le parcours	39
3.3	Notion de transfert d'énergie linéique <i>TEL</i>	40
3.4	Densité linéique d'ionisation <i>DLI</i>	42
4	Les effets physico-chimiques des radiations ionisantes.....	43
5	Les effets biologiques des radiations ionisantes.....	45
5.1	Domages au niveau des membranes cellulaires.....	45
5.2	Lésions de L'ADN	45
6	Grandeurs et unités dosimétriques	47
6.1	Les unités.....	47
6.2	Les doses.....	48
6.2.1	La dose absorbée <i>D</i>	48
6.2.2	La dose équivalente <i>HT</i>	48
6.2.3	La dose efficace <i>E</i>	49
6.3	Les normes de doses en radiothérapie.....	49
6.3.1	Normes de doses pour les patients	50

6.3.2 Limites de doses pour les tissus sains.....	50
6.2.3 Limites de dose pour la population et le personnel de santé.....	51
7 Conclusion.....	52
Références bibliographiques du chapitre II.....	53

Chapitre III : Le traitement du cancer de la thyroïde par des radiations radioactives

1 Introduction.....	56
2 La médecine nucléaire.....	56
3 La médecine nucléaire dans le traitement du cancer de la thyroïde.....	58
3.1 La thyroïde.....	58
3.2 Le cancer de la thyroïde.....	59
3.2.1 Définition.....	59
3.2.2 Types des cancers de la thyroïde.....	59
3.2.3 Facteurs de risque.....	61
3.2.4 Symptômes et diagnostics.....	62
3.3 L'irathérapie.....	63
3.3.1 L'iode radioactif.....	63
3.3.2 Le traitement par l'irathérapie.....	64
3.3.3 Effets secondaires de l'irathérapie.....	66
3.3.4 Les avantages de l'irathérapie.....	67
3.3.5 Indication et contre-indication de l'irathérapie.....	67
4 Radioprotection.....	68
4.1 Les règles de radioprotection.....	68
4.1.1 La distance.....	68
4.1.2 Le temps.....	68
4.1.3 L'activité.....	68
4.1.4 L'écran.....	68
4.2 Radioprotection du patient.....	69
4.3 Radioprotection du personnel.....	70
4.4 Radioprotection de l'environnement.....	73
5 Conclusion.....	74
Références bibliographiques du chapitre III :.....	76
Conclusion générale.....	80

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : le processus de désintégration radioactive d'un noyau lourd (le radium 226).....	6
Figure I.2 : Carte des noyaux connus.....	6
Figure I.3 : rayonnement alpha.	10
Figure I.4 : rayonnement beta moins.	11
Figure I.5 : rayonnement beta plus.	11
Figure I.6 : rayonnement gamma.	12
Figure I.7 : variation du nombre de noyaux $N(t)$	15
Figure I.8 : décroissance radioactive en fonction de temps.	17
Figure I.9 : Radiodiagnostic.....	18
Figure I.10 : la tomographie par émission de positon.....	19

Chapitre II

Figure II.1 : pouvoir de pénétration des rayonnements selon leur type.....	27
Figure II.2 : Phénomène d'ionisation.....	29
Figure II.3 : phénomène d'excitation.....	29
Figure II.4 : rayonnement de freinage.....	30
Figure II.5 : atténuation du nombre de photon N_0 lors de leur passage à travers un milieu d'épaisseur x caractérisé par un coefficient d'atténuation.	31
Figure II.6 : l'effet photoélectrique.....	32
Figure II.7 : l'effet Compton.....	33
Figure II.8 : La diffusion Thomson-Rayleigh.....	34
Figure II.9 : La création de paires.....	35
Figure II.10 : schéma d'interaction neutrons-matière.....	39
Figure II.11 : pic de Bragg.....	42
Figure II.12 : trajectoire des électrons dans un milieu traversé.....	42
Figure II.13 : Schéma boules de l'eau, d'ions d'hydrogène et d'ions d'hydroxyle.....	44
Figure II.14 : La radiolyse de l'eau.	44
Figure II.15 : Les effets des radiations ionisantes sur l'ADN.....	46
Figure II.16 : La survivance cellulaire en fonction de la dose totale d'irradiation.	50

Figure II.17 : sources d'expositions aux rayonnements pour le public	51
---	-----------

Chapitre III

Figure III.1 : la thyroïde	58
Figure III.2 : carcinome papillaire de la thyroïde	59
Figure III.3 : le carcinome folliculaire de la thyroïde	60
Figure III.4 : le carcinome médullaire de la thyroïde	60
Figure III.5 : le carcinome anaplasique de la thyroïde	61
Figure III.6 : Le nodule thyroïdien	62
Figure III.7 : (A) : la gélule d'iode 131 (B) : administration de la gélule d'iode 131.....	65
Figure III.8 : (A) : gélule de 100 mCi (B) : gélule de 50 mCi.....	65
Figure III.9 : les chambres plombées.	69
Figure III.10 : Les douches plombées.	70
Figure III.11 : tenue et lunette plombées.....	71
Figure III.12 : Cache thyroïdienne.	71
Figure III.13 : calot et gants plombées.	72
Figure III.14: dispositif de mesure de l'exposition aux radiations.	72

Listes des tableaux

Tableau II.1: Classification des neutrons en fonction de leur énergie.....	36
---	-----------

Les mots clés

Radioactivité.

Radiations ionisantes.

Désintégration radioactive.

Interaction rayonnement-matière.

Médecine nucléaire.

Iode radioactif.

Cancer de la thyroïde.

Irathérapie.

Radioprotection.

Listes des abréviations

ADN : Acide Désoxyribonucléique.

A : Activité absolue, c'est le nombre de désintégration par unité de temps.

Bq : Becquerels.

C : Carbone.

Cl : Clore.

Ci : Curie.

CDA : Couche demi atténuation.

CSB : Les cassures simple brin.

CDB: Les cassures double brin.

CPT : cancer papillaire de la thyroïde.

CFT : cancers folliculaires de la thyroïde.

CVT : cancers vésiculaires de la thyroïde.

CMT : cancer médullaire de la thyroïde.

Dps : Désintégrations par seconde.

Dpm : Désintégrations par minute.

D : Dose absorbée.

D⁰ : Débit de dose absorbée.

D_{d1}: La dose reçue par une source ponctuelle à la distance d1.

D_{d0} : La dose reçue à la distance d0.

DLI : densité linéique d'ionisation.

Ev : Electronvolts.

E : Energie.

Ec_{in} : Energie cinétique.

E₀ = énergie de l'électron incident.

e : électron.

G_{bq}: Giga-becquerel.

Gy: gray.

g: gramme.

H : Hydrogène.

H : tritium isotope radioactif de l'hydrogène.

H_T : la dose équivalente.

H₂ : dihydrogène.

H₂O₂ : peroxyde d'hydrogène.

h : constante de Planck.

I : l'intensité du faisceau.

IRM : imagerie par résonance magnétique.

Kev : kiloélectronvolts.

Kg : kilogramme.

Mev : mégaélectronvolts.

MN : médecine nucléaire.

m : masse.

mCi : millicurie.

mg : milligramme.

N = nombre d'atomes radioactifs au temps 't'.

N₀ : nombre d'atomes initial.

N_t : nombre d'atomes restant au temps 't'.

Na : le nombre d'Avogadro.

Np : neptunium.

n: Neutron.

OAR : organes à risque.

OH• : radical hydroxyle.

P : Proton.

Pu : plutonium.

R₀ : parcours moyen de l'électron.

ROS : radicaux libres oxygénés.

s: second.

S: pouvoir linéique d'arrêt.

Sv : Sievert.

T : la période.

TEP : tomographie par émission de positons.

Th: le thorium.

TEL : transfert d'énergie linéique.

TDM : tomodensitométrie.

T⁻ : énergie cinétique.

T⁺: énergie cinétique du positron.

T₂ :la déiodothyronine.

T₃ : la triiodothyronine.

T₄: thyroxine.

TSH: thyroid stimulating hormone.

UV : ultraviolet.

U : uranium.

v : la vitesse de la particule incidente.

W_R: Facteur de pondération.

W_T: Facteur de pondération tissulaire de l'organe.

W_i : est l'énergie moyenne transférée pour chaque ionisation.

Xe : atome stable de xénon.

Z : numéro atomique.

z : charge de la particule incidente.

λ : constante de radioactivité de l'élément étudié.

μ : le coefficient d'atténuation linéique.

α : alpha.

β : beta.

γ : gamma.

ν̄_e : antineutrino électronique.



Introduction générale

Introduction générale

Le cancer est l'une des principales causes de mortalité. Son apparition et son évolution sont influencées par plusieurs éléments : l'environnement, la génétique, les agents infectieux, le processus de vieillissement, les comportements individuels...

La radiothérapie se classe parmi les méthodes de traitement du cancer, aux côtés de la chirurgie, considérées comme étant les plus importantes. De nombreux patients atteints de tumeurs ont été traités via cette méthode, qui s'appuie sur l'emploi de radiations ionisantes. En 1895, Röntgen découvre les rayons X : il constate qu'une plaque de métal dans une ampoule en verre vide d'air émet des radiations lorsqu'elle est frappée par des électrons accélérés. Il nomme ces radiations rayons X. Par la suite, le français Henri Becquerel réalise des expériences sur ce phénomène et démontre que l'uranium produit naturellement un rayonnement sans influence extérieure.

En 1898, Pierre et Marie Curie parviennent à isoler deux nouveaux éléments, le polonium et le radium, à partir du minerai d'uranium. Ces éléments dégagent davantage des radiations que l'uranium lui-même. Ils démontrent que ces radiations sont associées aux caractéristiques de l'atome et désignent ce processus par le terme « radioactivité ». Dans les années suivantes, une multitude de radioéléments ont été découverts, et l'anglais Ernest Rutherford détermine les trois types de rayonnements associés à la radioactivité : alpha, bêta et gamma.

L'application médicale des radiations a commencé dès leur découverte : les rayons X pour la radiographie ont été utilisés dès 1896, tandis que les rayons gamma (γ) du radium ont été adoptés pour le traitement du cancer en 1903. Les études menées très rapidement montrent qu'il est envisageable de soigner un cancer grâce à des radiations ionisantes.

La radiothérapie est un soin localisé qui agit directement sur la zone où se trouve la tumeur cancéreuse. Cependant, les radiations ionisantes détruisent aussi les cellules saines qui se trouvent au voisinage de la tumeur. Par conséquent, l'efficacité de cette thérapie est limitée, car des doses trop fortes représentent un risque pour les tissus sains [1].

Le présent travail a pour but de répondre à la problématique suivante : Comment détruire les cellules cancéreuses à l'aide des radiations radioactives ? Pour y répondre, il est essentiel de comprendre les phénomènes physiques de la radioactivité, les mécanismes d'interactions des rayonnements avec la matière, ainsi que les effets biologiques causés à l'échelle cellulaire et comment ces radiations peuvent être exploitées pour des traitements médicaux, tout en tenant compte de leurs limites et de leurs impacts sur l'organisme.

Introduction générale

Ce mémoire se divise en trois chapitres, chacun aborde un thème spécifique :

Le premier chapitre présente les bases physiques de la radioactivité, Notamment, la description de la structure atomique et les différents types de noyaux (isotopes, isotones, isobares), les phénomènes de désintégration radioactive et les rayonnements associés : alpha, bêta (plus et moins) et gamma et les notions clés comme : la demi-vie, l'activité, et les lois de décroissance radioactive. Enfin, il expose les différents types de sources radioactives en occurrence les sources naturelle et artificielle, ainsi que leurs contributions respectives à l'exposition humaine.

Le deuxième chapitre se consacre aux mécanismes d'interaction des rayonnements, avec la matière, notamment la matière biologique. On y analyse les effets des particules chargées (alpha, beta) et non chargées (photons, neutrons) sur les atomes, les tissus, et les cellules en mettant en lumière les phénomènes comme l'ionisation, l'excitation, l'effet photoélectrique, Compton, et la création de paires. Ces processus sont analysés selon le type et l'énergie des rayonnements, mais aussi selon la nature du matériau traversé. Une attention particulière est portée aux effets biologiques induits, notamment à travers les notions de transfert d'énergie linéique (TEL), de dose absorbée, de dose équivalente et de dose efficace. Le comportement particulier des neutrons, qui interagissent principalement par diffusion et capture, est également détaillé. Ce chapitre traite, également, les effets physico-chimiques et biologiques causés par ces rayonnements, et la manière dont ils contribuent à la dégradation des structures cellulaires en particulier L'ADN, allant de simples lésions à la mort cellulaire. Cette analyse est essentielle pour comprendre les conséquences physiologiques d'une exposition et pour définir des stratégies de radioprotection, notamment en milieu médical.

Le dernier chapitre illustre l'application médicale de la radioactivité à travers la médecine nucléaire. Il présente le fonctionnement de la glande thyroïde, les différents types de cancers thyroïdiens ainsi que les principes de la radiothérapie métabolique, Avec un focus sur le traitement du cancer de la thyroïde par irathérapie, utilisant l'iode-131.

Ce chapitre s'appuie aussi sur une expérience pratique obtenue au sein du service de médecine nucléaire de l'établissement privé '**Les amandiers**', **Mekla Tizi-Ouzou**, où le traitement par iode radioactif a été observé dans un cadre réel. Cette expérience a fourni une compréhension pratique des procédures de gestion, de l'administration du radio-isotope, ainsi que de la précision nécessaire pour assurer l'efficacité du traitement et la protection des patients. Ce mémoire se termine par une conclusion générale qui met en lumière les avantages des radiations

Introduction générale

dans le traitement du cancer, en particulier le rôle essentiel de l'iode radioactif dans la prise en charge des cancers de la thyroïde et les limites que présente cette technique notamment les effets indésirables ressentis par le malade. Il est donc essentiel de considérer ces éléments pour envisager une utilisation de plus en plus sécurisée et maîtrisée de ces technologies thérapeutiques.



**Chapitre I : Généralités
sur la radioactivité.**

1 Introduction

Tous les corps présents dans la nature sont constitués d'atomes. L'atome représente l'unité de base de la matière. Il est formé de trois types de particules : les protons et les neutrons, regroupés dans le noyau, et les électrons qui gravitent autour de ce noyau. Ces électrons sont répartis en couches et sont maintenus autour du noyau par une énergie de liaison. Un noyau d'un élément X comportant Z protons et N neutrons est noté sous la forme : ${}^A_ZX^N$

A : Est le nombre de nucléons, c'est-à-dire le nombre de protons et de neutrons tel, que :

$$A = Z + N$$

Actuellement, 118 éléments chimiques sont officiellement reconnus dans le tableau périodique, allant de l'hydrogène ($Z = 1$) jusqu'à l'oganesson ($Z = 118$).

Les Isotopes : Chaque élément peut avoir plusieurs **isotopes**, qui sont des variantes avec un nombre différent de neutrons. Exemple : ${}^{35}_{17}\text{Cl}$ et ${}^{37}_{17}\text{Cl}$.

Les isotones : Ils ont le même nombre de neutrons : $N = A - Z$ sans que cela entraîne des propriétés spéciales. Exemple ${}^{13}_6\text{C}$ et ${}^{14}_7\text{N}$.

Isobares : Ces éléments possèdent le même nombre de masse A malgré des numéros atomiques Z distincts ils ne partagent aucune caractéristique commune. Exemple : ${}^{14}_6\text{C}$ et ${}^{14}_7\text{N}$.

Note : Les isotopes instables se désintègrent à des rythmes variés, produisant d'autres noyaux et libérant de l'énergie. On désigne ce phénomène par le terme de **radioactivité naturelle** ou **artificielle** [2].

La radioactivité est un phénomène physique naturel au cours duquel des noyaux atomiques instables, se transforment spontanément par désintégration. Ce processus libère de l'énergie sous forme de rayonnements, permettant au noyau de devenir plus stable, tout en perdant une partie de sa masse. En d'autres termes, il s'agit de l'émission de particules ou de rayonnements par un noyau atomique [2].

Dans l'exemple ci-dessus, l'atome instable de radium-226 se désintègre et se transforme en un autre atome, le radium 222, tout aussi instable, en émettant un rayonnement alpha, provenant d'un noyau d'hélium. Le gros noyau lourd de radium-226 contient 226 nucléons, dont 88 protons et 138 neutrons. Il émet une particule alpha (noyau d'hélium) composée de deux

protons et deux neutrons. Il se transforme alors en noyau de radon-222, lui-même radioactif, contenant deux protons et deux neutrons de moins. La désintégration libère une énergie de l'ordre de 4,6 millions d'électronvolts. Cette désintégration est représentée par l'équation suivante : La figure suivante illustre le processus de désintégration :

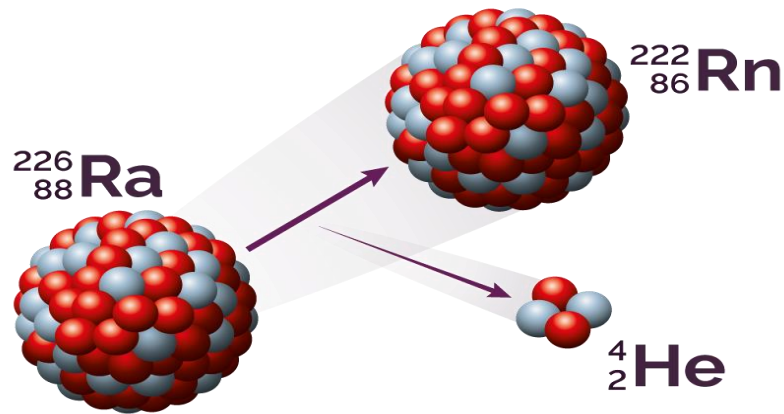


Figure I.1: le processus de désintégration radioactive d'un noyau lourd (le radium 226) [2].

L'illustration des noyaux identifiés sur un diagramme (N, Z) met en lumière la ligne de stabilité, peuplée par les noyaux stables (il serait plus approprié de parler de courbe de stabilité) [3].

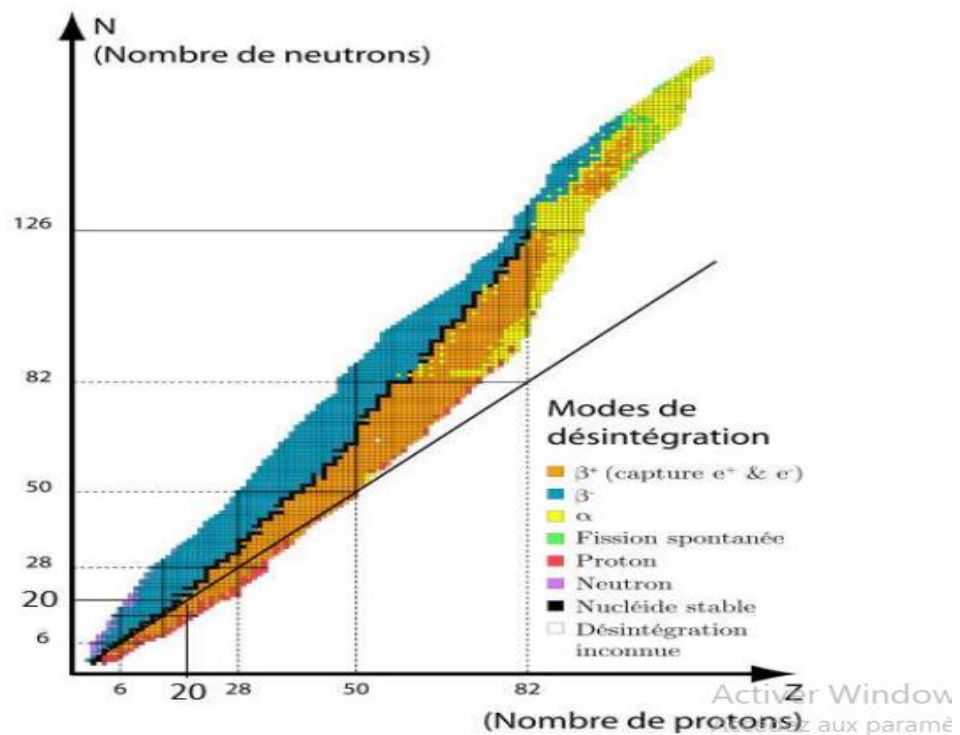


Figure I.2: Carte des noyaux connus [3].

Les noyaux instables vont par une suite de désintégrations radioactives, se transformer jusqu'à devenir stable :

- En dessous des noyaux stables, les noyaux excessivement chargés en neutrons sont représentés en bleu. Ces noyaux retournent vers la ligne de stabilité par **désintégration β^-** , qui transforme un neutron 1_0n en un proton 1_1p à l'intérieur du noyau en émettant ainsi un électron ${}^0_{-1}e$.
- Les noyaux qui sont trop riches en protons sont indiqués en rouge au-dessus des noyaux stables. Ces noyaux se dirigent vers la ligne de stabilité par **désintégration β^+** , un processus qui transforme un proton 1_1p en neutron 1_0n à l'intérieur du noyau en emmenant ainsi un positron ${}^0_{+1}e$.
- Les noyaux lourds riches en protons vont revenir vers la ligne de stabilité par **désintégration alpha 4_2He** , le nombre de nucléons est diminué de 4.
- Enfin les noyaux très lourds se fissionnent en donnant naissance z des produits de désintégrations légères.

2 Historique de la radioactivité

La radioactivité fut découverte en 1896 par Henry Becquerel (1852-1908) lors de ses travaux sur les phénomènes de fluorescence des sels d'uranium. Cependant, ce n'est qu'après les travaux de Marie Curie (1867-1934), Pierre Curie (1859-1906) et Ernst Rutherford (1871-1937) que les trois radioactivités α , β et γ furent découvertes.

La radioactivité fut ainsi mise en évidence par la fission qui est un phénomène physique naturel aboutissant à la libération d'énergie due à la désintégration d'un atome instable en deux atomes plus stables. Cependant, les dangers réels de la radioactivité ne furent découverts que plus tard, alors qu'en 1930, les médecins préconisaient l'utilisation du radium comme tonifiant, et que le commerce de crèmes de beauté, des poudres et des médicaments à base de radium florissait, Hermann Joseph Muller (1890-1967) mettait en évidence les effets mutagènes des radiations et le risque de cancers radio induits. Le potentiel militaire de la radioactivité marqua ensuite l'Histoire.

La réalisation du projet Manhattan en 1942 par les Etats-Unis assistés par le Royaume-Uni et le Canada sous la direction du général Leslie Groves et du physicien Robert Oppenheimer aboutit à la mise au point et à l'assemblage de la première bombe atomique.

L'utilisation de ces armes nucléaires en 1945 à Hiroshima et à Nagasaki aboutit à une réelle prise de conscience des dangers de la radioactivité [4].

3 Classification des rayonnements

Un rayonnement est défini comme un processus de transmission d'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques ou de particules. [5] Lorsqu'il possède une énergie suffisante pour arracher des électrons aux atomes et créer des ions, il est qualifié de rayonnement ionisant.

À l'inverse, un rayonnement non ionisant n'a pas cette capacité et se limite généralement à des effets d'excitation des atomes [6]. Les rayonnements ionisants se distinguent en plusieurs types selon leur nature et leur origine. Ils peuvent être d'origine particulaire, comme rayonnement α et β ou électromagnétiques, comme rayonnements X et γ .

Chacun de ces rayonnements possède des caractéristiques spécifiques en termes de composition. Voici une classification explicative :

- **Selon leur effet sur la matière** : ionisants, non ionisants.
- **Selon leur nature** : électromagnétique et particulaire.

Selon leur effet sur la matière

3.1.1 Les rayonnements ionisants

Il s'agit des rayonnements qui engendrent une libération de charges électriques dans le milieu matériel par la formation de couples ion-électron libre. Ce point est crucial en matière de radioprotection et de biologie. Cette occurrence est possible si l'énergie incidente est suffisante pour arracher un électron d'un atome du milieu traversé.

On peut distinguer deux classes de ce type des rayonnements :

- **Directement ionisant** : Elles incluent les particules chargées légères, comme les électrons, ainsi que les particules chargées lourdes, telles que les protons et les ions lourds. Ces particules libèrent leur énergie dans le milieu en une seule étape, principalement par des interactions coulombiennes avec les électrons orbitaux des atomes [7].
- **Indirectement ionisant** : C'est le cas des radiations non chargées, comme les rayonnements électromagnétiques (rayons X et gamma) et les neutrons. Ces types de rayonnements déposent leur énergie dans le milieu en deux étapes :

- ✓ **Premièrement**, ils provoquent la libération d'une particule chargée. Pour les photons (X ou gamma), cela peut se faire par des phénomènes comme l'effet photoélectrique, l'effet Compton ou la création de paires. Dans le cas des neutrons, ceux-ci interagissent avec les noyaux des atomes via la force nucléaire forte, ce qui entraîne des réactions nucléaires libérant à leur tour des particules chargées.
- ✓ **Deuxièmement**, ces particules chargées ainsi libérées vont à leur tour interagir avec les électrons des atomes du milieu, en transférant leur énergie par des interactions de type coulombien.
- ✓ Le processus peut être itéré plusieurs fois résultant en une cascade ionisante [8].

3.1.2 Les rayonnements non ionisants

Lorsque l'énergie des particules incidentes est trop faible pour libérer une charge électrique dans le milieu, seuls des processus physiques sans production de charges libres peuvent se produire. Par exemple, si l'énergie d'un photon incident est insuffisante pour déclencher un effet photoélectrique, Compton ou une création de paires, aucune ionisation ne se produit. C'est notamment le cas des rayonnements photoniques dont la fréquence est inférieure à celle des ultraviolets, comme les ondes radio, la lumière visible, les infrarouges, les micro-ondes ou encore les UV de basse énergie [7].

3.2 Selon leur nature

3.2.1 Les rayonnements particuliers

Composés de particules matérielles telles que les électrons, les particules alpha et beta [9].

Rayonnement α

Lorsque le noyau présente un trop grand nombre de nucléons, il tend vers son état de stabilité en émettant un noyau d'hélium ou particule α . Ce rayonnement interagit principalement avec les cortèges électroniques des atomes cibles et aboutit à l'excitation et à l'ionisation de la matière qu'il traverse. Il y a naissance de rayonnements secondaires [10].



Exemples :





Les particules alpha sont directement ionisantes mais peu pénétrantes. Elles ne sont pas dangereuses pour la peau.

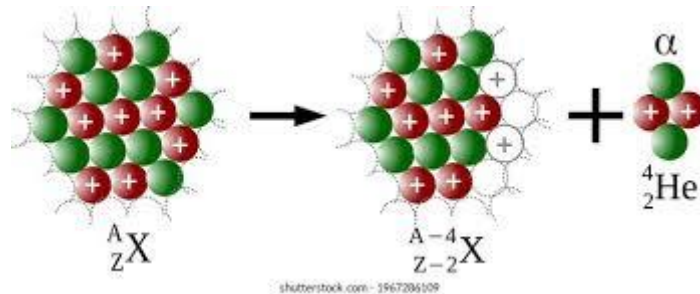


Figure I.3: rayonnement alpha [11].

Rayonnement β

Dans le second cas, c'est-à-dire, lors d'un déséquilibre entre les nombres de protons et de neutrons, l'atome tend vers la stabilité par la transmutation, c'est-à-dire la transformation isobarique avec conservation du nombre de masse A . Les rayons β sont produits par exemple lors de la désintégration du carbone 14, du phosphore 32, du potassium 40, des césiums 134 et 137 [4].

Rayonnement β^-

Lors d'un excès de neutrons, un neutron est transformé en proton avec émission d'un électron et d'un antineutrino électronique $\bar{\nu}$, c'est l'émission β^- . La particularité de ce rayonnement est qu'il provoque des ionisations et des excitations par diffusion. Celui-ci est plus pénétrant (quelques mètres dans l'air ou quelques millimètres dans le corps humain) et par conséquent moins ionisant que le rayonnement α [4].

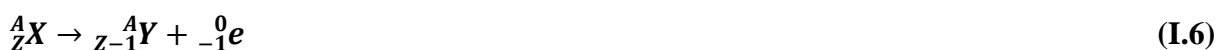
Neutron \rightarrow proton + électron



L'électron ne pouvant exister à l'intérieur d'un noyau est alors émis.

L'équation nucléaire est :

Elément X \rightarrow Elément Y + électron





Elles sont plus pénétrantes mais moins ionisantes que les particules alpha. Elles sont dangereuses pour la peau, elles pénètrent cette dernière sur une épaisseur de quelques millimètres [4].

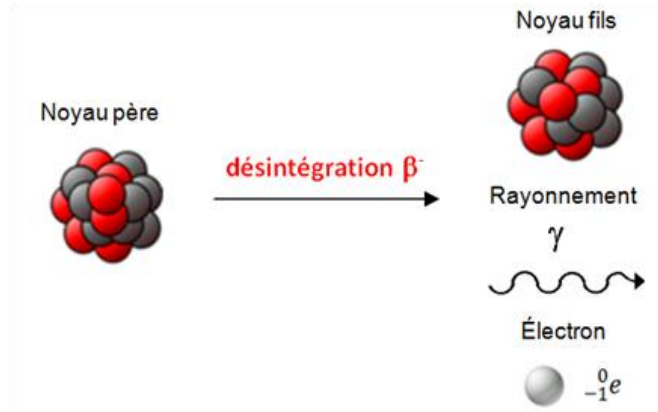


Figure I.4 : rayonnement beta moins [12].

Rayonnement β +

Dans le cas d'un excès de protons, un proton se transforme en neutron avec émission d'un positon et d'un neutrino ν , c'est l'émission $\beta +$. Le réel danger lié à ce rayonnement est indirect. En effet, le positon émis lors de ce rayonnement va être inhibé instantanément par un électron du milieu. Cependant, lors de cette inhibition, il y a formation de deux rayons γ très destructeurs de 511 keV chacun formant un angle solide de 180° [4].

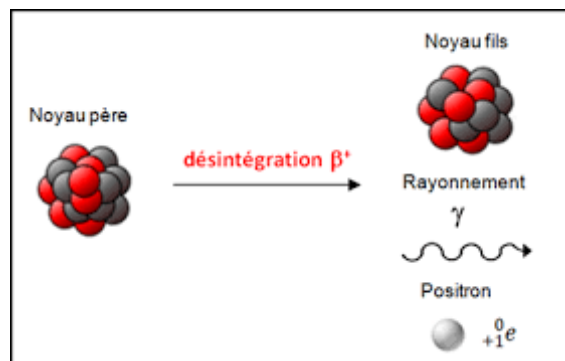


Figure I.5 : rayonnement beta plus [12].

3.2.2 Les rayonnements électromagnétiques

Rayonnement gamma γ

Le rayonnement gamma est une forme de rayonnements électromagnétiques très énergétiques, similaire aux rayons X mais avec une fréquence encore plus élevée. Lorsqu'un noyau subit une désintégration alpha (émission d'un noyau d'hélium) ou bêta (émission d'un électron ou d'un positon), il se retrouve souvent dans un état excité, car l'énergie interne du noyau n'est pas immédiatement équilibrée. Pour retrouver un état stable, le noyau évacue cet excès d'énergie sous forme d'un photon gamma, une particule de lumière extrêmement énergétique.

Un exemple classique est le cobalt-60, qui se transforme en nickel-60 par désintégration bêta. Le nickel-60 formé est initialement dans un état excité et libère alors un rayonnement gamma pour atteindre son état fondamental, plus stable [21].

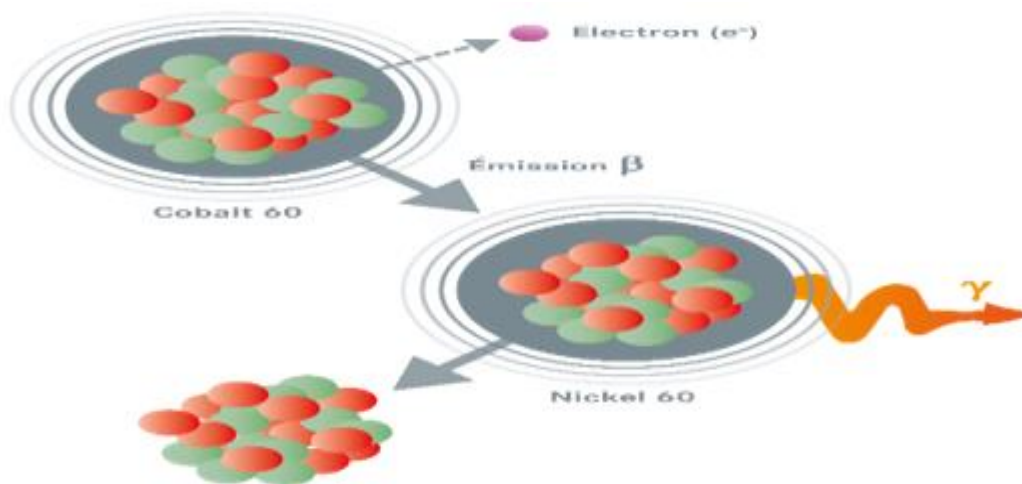


Figure I.6 : rayonnement gamma [4].

4 Types des radioactivités et sources d'exposition

4.1 La radioactivité naturelle

Une partie de la radioactivité naturelle est ainsi issue des radio-isotopes engendrés par les rayonnements cosmiques. L'intensité du rayonnement ionisant augmente avec l'altitude. Le rayonnement cosmique entraîne une exposition externe directe et interagit avec des éléments atmosphériques et terrestres pour former des radionucléides secondaires. La radioactivité naturelle correspond à environ 77% de l'exposition humaine aux radiations. Ainsi, le risque lié à l'activité tellurique issue de l'uranium contenu dans les roches granitiques est réel [4].

❖ Son exposition**Les rayonnements cosmiques :**

Ils proviennent des réactions nucléaires se produisant dans les étoiles très actives ou à la suite d'explosions de supernovas. En Europe, pour les personnes vivant près du niveau de la mer, l'exposition moyenne à ce type de rayonnement est d'environ 0,4 millisievert par an. Cette exposition augmente avec l'altitude. Le rayonnement cosmique entraîne une exposition externe directe et peut réagir avec les éléments de l'atmosphère ou du sol pour produire des radionucléides secondaires, comme le tritium (H) ou le carbone (C).

Les éléments radioactifs du sol :

Ils représentent la principale source d'exposition naturelle pour les êtres vivants. Cette exposition est aujourd'hui plus faible qu'à l'époque de l'apparition de la vie. En effet, les éléments radioactifs dont la période est inférieure à un milliard d'années ont disparu, ne laissant subsister que ceux à longue période, notamment l'uranium, le thorium et le potassium [12]. En France, ces éléments provoquent en moyenne une exposition de 0,35 millisievert par an par personne. Cependant, dans certaines régions, notamment celles où le sol est riche en roches radioactives comme le granit, cette irradiation peut être plus élevée.

Par ailleurs, nous absorbons également des éléments radioactifs naturels en respirant ou en nous alimentant. Par exemple, le radon, un gaz issu de la désintégration de l'uranium présent dans le sol, ainsi que le potassium contenu dans certains aliments, s'accumulent partiellement dans notre organisme. Cette exposition interne représente en moyenne 1,55 millisievert par an par individu [12].

4.2 La radioactivité artificielle

La radioactivité artificielle joue aussi un rôle non négligeable au sein des rayonnements ionisants. Elle peut être de différentes natures :

- Les activités de recherches en physique des particules engendrent la synthèse artificielle de composés hautement instables dans les accélérateurs de particules (CERN, GANIL).
- Les activités de radiodiagnostic (radiographies...), de médecine nucléaire, de radiothérapie et autres utilisations médicales (synthèse de radionucléides pour les scintigraphies) sont sources de rayonnements ionisants correspondant à environ 20% de l'exposition humaine à la radioactivité.

- Les centrales nucléaires et les usines de retraitement des déchets radioactifs produisent des déchets nucléaires.
- Les activités minières [4].

❖ Son exposition

Les irradiations d'origine médicale : Elles proviennent des examens de radiodiagnostic, des actes de médecine nucléaire et des traitements par radiothérapie. Dans les pays développés, elles augmentent l'exposition naturelle annuelle d'environ 30 %, soit environ 1,2 millisievert par an en France.

Les activités nucléaires industrielles : Elles incluent les centrales nucléaires, les usines de traitement des déchets radioactifs, ainsi que les retombées des anciens essais nucléaires atmosphériques ou de la catastrophe de Tchernobyl. Ces sources contribuent à une exposition moyenne de 0,02 millisievert par an par personne [13].

5 Les lois de la radioactivité

5.1 La décroissance radioactive : loi de désintégration

Cette loi s'applique aussi bien aux radionucléides d'origine naturelle qu'à ceux produits artificiellement. Dans un échantillon donné, le nombre d'atomes radioactifs évolue au fil du temps. La désintégration radioactive est un phénomène indépendant des conditions extérieures telles que la pression, la température ou les liaisons chimiques dans lesquelles les atomes sont engagés [14].

Lorsque le nucléide issu de la désintégration est stable (A radioactif, B stable), la relation suivante s'applique :

$$\text{Avec : } A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (\text{I.12})$$

Tel que :

A étant l'activité absolue, c'est le nombre de désintégration par unité de temps.

N est le nombre d'atomes radioactifs qui se trouve à l'instant t .

λ : constante de radioactivité de l'élément étudié.

Evolution au cours du temps

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \rightarrow \int_{N_0}^N -\frac{dN}{dt} = \lambda \int_0^t dt \quad (\text{I.13})$$

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda t \rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{I.14})$$

N_0 : nombre d'atomes initial.

$N(t)$: nombre d'atomes restant au temps 't'.

La variation du nombre de noyaux au cours du temps t peut être représentée par la figure suivante :

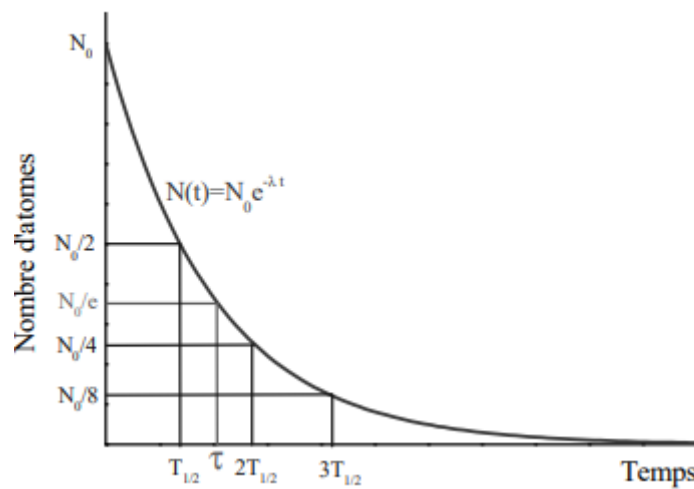


Figure I.7 : variation du nombre de noyaux $N(t)$ [9].

Le nombre de noyaux ou d'atomes radioactifs décroît exponentiellement avec le temps.

1 mole d'un élément radioactif a une masse M :

$$\begin{cases} M \rightarrow N_A \text{ atomes} \\ m(g) \rightarrow N \text{ atomes} \end{cases} \rightarrow N_0 = \frac{m_0}{M} N_A \text{ et } N(t) = \frac{m(t)}{M} N_A$$

$$\frac{m(t)}{M} N_A = \frac{m_0}{M} N_A \cdot e^{-\lambda t} \rightarrow m(t) = m_0 e^{-\lambda t} \quad (\text{I.15})$$

5.2 L'activité A

L'activité d'une source est définie comme le nombre de noyaux qui se désintègrent chaque seconde.

Comme nous l'avons cité dans l'équation (1.12)

D'où :

$$A(t) = \lambda N(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad (\text{I.16})$$

L'activité d'une source diminue proportionnellement au nombre de noyaux radioactifs qui subsistent.

Unités de A

A est exprimée en :

- Désintégrations par seconde (dps) ou Becquerels (Bq).
- Désintégrations par minute (dpm).
- Curies (Ci).

Une source de 1 Curie subit $3,7 \cdot 10^{10}$ dps (1 g de Rd a une activité $A = 1$ Ci).

5.3 Période radioactive ou demi-vie

Certains nucléides radioactifs conservent leur stabilité pendant des milliards d'années, tandis que d'autres se désintègrent en une fraction de seconde.

La désintégration radioactive est décrite par une grandeur appelée période T, ou temps de demi-vie, qui correspond à la durée nécessaire pour que la moitié de la quantité initiale de substance se désintègre [14].

Voici sa relation :

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T} \quad \left(N_{t_{1/2}} = \frac{N_0}{2} \right) \quad (\text{I.17})$$

$$\begin{cases} 1/2 = e^{-\lambda T} \rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T \rightarrow T = \frac{\ln 2}{\lambda} \text{ ou } T = \frac{0.693}{\lambda} \\ \ln 2 = \lambda T \end{cases}$$

- La période T ne dépend pas du nombre initial des noyaux.
- La température et la pression n'affectent pas la valeur de T.
- La période caractérise un nucléide donné.

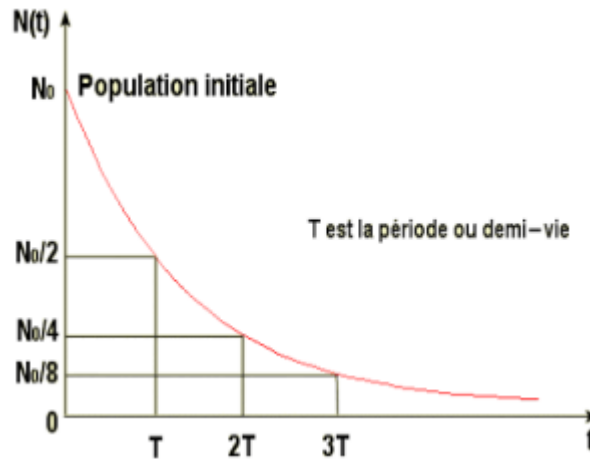


Figure I.8 : décroissance radioactive en fonction de temps [5].

6 Applications médicales de la radioactivité

Les rayonnements radioactifs ont plusieurs applications médicales essentielles, notamment en imagerie diagnostique, en thérapie et en stérilisation. Voici les principales utilisations :

1. Radiologie diagnostique

La radiologie diagnostique s'intéresse à l'utilisation des techniques d'imagerie qui utilisent les rayonnements ionisants et d'autres types d'ondes pour produire des images du corps humain, elle permet d'examiner les organes, les os et les tissus pour détecter des maladies, des fractures ou des anomalies [15].

- **La radiographie conventionnelle :** La radiographie conventionnelle (réalisation de clichés Radiographiques) représente, en nombre d'actes, la grande Majorité des examens radiologiques réalisés.

Il s'agit principalement des examens du squelette, du thorax et de l'abdomen. La radiologie conventionnelle peut être mise en œuvre dans des installations fixes réservées au Radiodiagnostic ou ponctuellement à l'aide d'appareils mobiles si la situation clinique du patient le justifie [16].

- **L'angiographie :** Cette technique utilisée pour l'exploration des vaisseaux sanguins, elle fait appel à l'injection d'un produit de contraste Radio-opaque dans les vaisseaux qui permet de visualiser l'arbre artériel (artériographie) ou veineux (phlébo-Graphie). Les techniques d'angiographie bénéficient d'un traitement informatique des images (type angiographie de soustraction digitale) [16].
- **La mammographie :** Compte tenu de la constitution de la glande mammaire et de la finesse des détails recherchés pour le diagnostic de la pathologie mammaire, des

appareils spécifiques (mammographes) sont utilisés. Ils fonctionnent sous une faible tension et offrent une haute définition et un contraste élevé. Ils sont notamment utilisés dans le cadre du programme national de dépistage du cancer du sein [16].

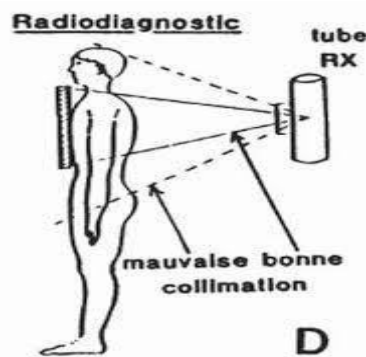


Figure I.9 : Radiodiagnostic [16].

2. Médecine nucléaire

La médecine nucléaire thérapeutique utilise des substances radioactives (radio-isotopes) pour traiter diverses pathologies, en particulier les cancers et certaines maladies endocriniennes. Pour le diagnostic, l'émission gamma qui est une émission de photons, pouvant être détectée à distance est utilisée. Le radioélément, émetteur gamma, est introduit par voie veineuse (le plus souvent) dans l'organisme d'un patient. Le produit seul ou associé à un vecteur à tropisme prédéterminé pour un organe ou une pathologie (il est appelé radio pharmaceutique ou radio-traceur) est suivi par détection externe et donne la possibilité d'enregistrer sa distribution, sa concentration et son élimination, par un système de détection approprié, la gamma-caméra [16].

3. Radiothérapie

Est une technique utilisant des rayonnements ionisants pour le traitement des cancers (80%). Les rayonnements détruisent certaines cellules cancéreuses. Elle consiste la destruction sélective de la tumeur. La radiothérapie peut aussi être un traitement palliatif notamment chez les patients en phase avancée de la maladie, afin de réduire la taille de la tumeur et ainsi soulager certains symptômes, comme la douleur. [15].

On distingue deux types :

- ☐ **La radiothérapie interne :** aussi appelée curiethérapie. La radiothérapie interne consiste, comme son nom l'indique, à injecter des sources radioactives dans le corps sous forme de médicaments radiopharmaceutiques spécifiques : on parle alors de radiothérapie métabolique. La recherche se poursuit en médecine nucléaire, de

nouveaux radionucléides sont ainsi élaborés pour diagnostiquer toujours plus précocement, suivre plus précisément les traitements et cibler plus efficacement les cellules cancéreuses [17].

- ▣ **La radiothérapie externe :** Pour la radiothérapie externe, l'irradiation est effectuée au moyen d'accélérateurs de particules produisant des faisceaux de photons ou d'électrons de grande énergie comprise entre 4 et 25 mégaélectronvolts (MeV) et délivrant des débits de doses supérieurs au gray (Gy) par minute. Des appareils de télé gammathérapie équipés d'une source de cobalt 60 existent encore mais sont peu à peu remplacés par des accélérateurs de particules [15].

4. Marqueur et traceur radioactif

En biologie et médecine nucléaire, les traceurs sont généralement des produits radiopharmaceutiques qui incorporent dans leur formule des radionucléides (un marqueur). Un traceur radioactif est un composé chimique contenant un élément radioactif (appelé marqueur). Une fois injecté dans l'organisme, il suit un chemin spécifique selon son affinité avec certains tissus ou organes. Une caméra spéciale capte ensuite les radiations émises, permettant ainsi d'analyser le métabolisme des organes ou de localiser des anomalies [18].



Figure I.10 : la tomographie par émission de positon [18].

5. La recherche biomédicale en médecine nucléaire

La recherche biomédicale en médecine nucléaire est particulièrement dynamique ces dernières années : de nouveaux radionucléides et vecteurs font régulièrement l'objet de protocoles. Ces innovations portent principalement sur :

- La tomographie par émission de positons (TEP) avec le fluor-18, le gallium-68 et le carbone-11.
- La radiothérapie interne vectorisée avec le radium-223, les microsphères marquées à l'yttrium-90, des vecteurs marqués à l'yttrium-90 ou au lutétium-177. L'utilisation de nouveaux médicaments radiopharmaceutiques nécessite d'intégrer le plus en amont possible les exigences de radioprotection associées à leur manipulation. En effet, compte tenu des activités mises en jeu, des caractéristiques de certains radionucléides et des réparations à réaliser, l'exposition des opérateurs et l'impact sur l'environnement nécessitent la mise en place des mesures adaptées [16].

6. Stérilisation et conservation

La radio-stérilisation est une technique qui utilise des rayonnements (comme les rayons gamma, les rayons X...) pour éliminer les micro-organismes (bactéries, moisissures, virus) présents sur des objets. La radio-stérilisation permet donc de garantir l'obtention d'un degré de stérilité prescrit avec une grande fiabilité, d'autant que la pénétration du rayonnement assure que toutes les zones de l'objet sont effectivement traitées. Elle est donc particulièrement adaptée au traitement des articles jetables incorporant des thermoplastiques, comme les seringues, les vaccinostyles, les cathéters...

La radio-stérilisation est un procédé de stérilisation très fiable et très intéressant à de nombreux titres : il n'utilise pas le gaz toxique, ni de vapeur, ni de chaleur, et il permet de traiter des quantités importantes d'objets à la fois [19].

7 Comment peut-on être exposé à la radioactivité ?

L'exposition à la radioactivité peut se produire de différentes façons :

- **Irradiation ou exposition externe** : Cela se produit lorsque l'on est en présence d'une source de radioactivité ou lorsque celle-ci est en contact direct avec la peau.
- **Contamination ou exposition interne** : Cela se produit lorsque des substances radioactives sont inhalées, avalées, ou pénètrent dans l'organisme par une plaie ou à travers la peau [20].

8 Les risques d'une exposition à la radioactivité

Pour évaluer les risques liés à une exposition excessive à la radioactivité, plusieurs facteurs doivent être pris en compte : la **quantité de rayonnement absorbée (dose)**, la **durée de**

l'exposition, la nature des radionucléides ou des types des rayonnements impliqués. Il est également essentiel de considérer la voie d'exposition (interne ou externe) ainsi que la **sensibilité individuelle** à la radioactivité, propre à chaque personne.

Lorsque l'exposition est trop importante ou prolongée, les effets sur l'organisme peuvent varier en fonction de ces paramètres, entraînant des conséquences plus ou moins graves :

8.1 De la dose de radioactivité à laquelle l'organisme est exposé et de la durée d'exposition

- Les doses élevées, même reçues en peu de temps, provoquent généralement des effets immédiats appelés "déterministes", car ils surviennent systématiquement dès qu'un certain seuil d'exposition est dépassé (par exemple, brûlures, nausées, etc.).
- Si l'exposition dépasse un seuil et dure longtemps, des effets à long terme, dits "aléatoires", peuvent se manifester. Ces effets, comme certains cancers, ne sont pas garantis et peuvent survenir de manière imprévisible chez les individus exposés, quel que soit le type de cancérigène impliqué [20].

8.2 Du type d'exposition

Le type d'exposition à la radioactivité joue un rôle crucial dans les effets observés, car une exposition excessive peut altérer ou détruire l'ADN des cellules :

Une irradiation externe localisée peut provoquer des brûlures cutanées et dans certains cas, affecter les organes situés sous la peau.

Une irradiation externe à très forte dose, même sur une courte période, peut être fatale car elle détruit un grand nombre de cellules de l'organisme.

Une contamination interne peut devenir mortelle si elle touche des organes vitaux tels que le cœur, le foie, les poumons ou le système nerveux central. Elle peut également entraîner des cancers dans les organes exposés à de fortes doses de radiation. En effet, les cellules dont l'ADN est muté et n'a pas été réparé par l'organisme se répliquent avec des erreurs dans leur séquence génétique. Ces mutations peuvent être à l'origine des pathologies graves, comme le cancer [20].

8.3 Le type de radionucléide

Auquel l'organisme est exposé influence la manière dont il se distribue et affecte le corps :

Seuls certains radionucléides, tels que le tritium, l'iode ou le carbone, passent dans le sang après avoir été ingérés ou inhalés. Ces radionucléides sont particulièrement solubles.

Tous les atomes radioactifs ne se répartissent pas de la même manière dans l'organisme. Selon leurs propriétés chimiques, certains se répartissent uniformément dans tout le corps (comme le tritium ou le césium), tandis que d'autres se concentrent préférentiellement dans des organes spécifiques dits "organes cibles". Par exemple, le radium se fixe principalement sur le squelette, tandis que l'iode se concentre sur la glande thyroïde [20].

8.4 De la radiosensibilité de chacun

Tout comme nous ne réagissons pas de manière identique face à la pollution de l'air, notre sensibilité à l'exposition à la radioactivité varie d'une personne à l'autre [20].

9 Conclusion

La radioactivité est un phénomène physique naturel ou artificiel lié à la transformation des noyaux instables, qui émettent différents types de rayonnements : alpha, bêta, et gamma.

La classification de ces rayonnements selon leur nature et leur pouvoir de pénétration est essentielle pour comprendre leurs interactions avec la matière vivante.

Dans le domaine médical, ces connaissances ont permis de développer des techniques de diagnostic et de traitement très performantes. Par exemple, la radiothérapie utilise les rayonnements gamma ou des particules chargées pour détruire les cellules cancéreuses, tandis que des isotopes radioactifs sont employés en médecine nucléaire pour l'imagerie fonctionnelle (scintigraphie, TEP scan). Ces applications ont révolutionné la médecine moderne en permettant des diagnostics plus précis et des traitements plus ciblés.

Cependant, l'utilisation de la radioactivité en médecine implique aussi des risques. Une exposition mal contrôlée peut entraîner des effets biologiques néfastes. C'est pourquoi des normes strictes de radioprotection sont mises en place pour garantir la sécurité des patients, du personnel médical et de l'environnement.

En somme, la radioactivité, bien que potentiellement dangereuse, est un outil puissant lorsqu'elle est maîtrisée. Sa compréhension et son utilisation raisonnée ouvrent la voie à des avancées considérables dans le domaine de la santé.

Références bibliographiques du chapitre I

[1] FISCHER B, thèse de doctorat, ‘étude de la signalisation cellulaire de l’apoptose induite par différents types de rayonnements ionisants dans des cellules lymphoblastoïdes humaines différents par leur statut’, ‘université louis pasteur’,2004.

[2] BATOUT.S, document ‘La Radioactivité, Bulletin de la Société Royale des Sciences de Liège [En ligne], Volume 87, Actes de colloques, La radioactivité’, Novembre 2018.

[3] PDF, support de cours ‘Radioactivité’, Université de Batna, faculté de médecine.

[4] DAMIEN.C, thèse de doctorat, ‘Synthèse et Évaluation de Nouveaux Dérivés Organiques et Organométalliques Contre les Effets des Rayonnements Ionisants’, ‘université de Toulouse’,2010.

[5] ‘Bataillon C, Wybier J, Chabardes A’, document ‘CNRS,2eme édition/guides Risque Nucléaire, édité par la coordination nationale de prévention et de sécurité du CNRS’, janvier 2018.

[6] TIINA SUOMIJÄRVI, Cours Physique Nucléaire et Applications ; IPN-Orsay, ‘université paris-Saclay’.

[7] ABAIDIA.B, mémoire de master ‘Etude induits par rayonnement de proton et d’hélium dans les cristaux SiC et NaI’, ‘Université de Guelma’, septembre 2020.

[8] SLIMANI.A, Mémoire de master en physique énergétique, ‘Interaction comparée des défauts des rayonnements avec la matière’, ‘Université d’ADRAR’, 2016.

[9] DENDEN O, Mémoire de magister, ‘LA RADIOACTIVITE DES EAUX THERMALES DE LA WILLAYA DE SETIF’, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF, 2009.

[10] J. R. N. Cherry, ed. Chap. 48: Les Rayonnements Ionisants, ed.è.é. Encyclopédie de Sécurité et de santé au travail. 2000.

[11] Raymond S, Livre ‘*Physique nucléaire*’, Paris, 2004

[12] Benichou S, mémoire de master en chimie physique et analytique, ‘ radiation naturelle des matériaux de construction en sable de cote W.Tlemcen’, ‘université Abou Bekr Belkaid Tlemcen’,2013.

- [13] PROUILLAC.C, thèse de doctorat, ‘Synthèse et évaluation de nouveaux composés organiques et phosphorés contre les effets des rayonnements ionisants. Étude de leur mécanisme d’action in vitro’, ‘Université Paul Sabatier- Toulouse III’, 2006.
- [14] BOUSSEBIA M, ‘Mémoire de Master, Évaluation de l'exposition de l'accompagnateur du patient après le traitement à l'iode 131’, 2019.
- [15] Grossi R, document, ‘Quelques applications de la radioactivité et des réactions nucléaires’, ‘agence internationale de l’énergie atomique’, 2021.
- [16] Rapport de l’ASN sur l’état de la sûreté nucléaire et de la radioprotection en France en 2015.
- [17] Journal de l’Andra • Édition Meuse/Haute-Marne • Printemps 2022.
- [18] Beniassa A H, mémoire de master en physique appliquée, ‘effet du temps de l’irradiation béta et la température sur les pics I-TL DU LiF (700)’, ‘université Saad Dahlab-blidal’, 2020.
- [19] Cour, R. Cherkaoui El Moursli-radioactivité : origines, définition et application.
- [20] Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), ‘Rayonnements ionisants’, Vandœuvre-lès-Nancy, France, 2024.
- [21] MERABTINE.W, mémoire de master en physique des matériaux, ‘Calcul semi-empirique du Rapport d'intensité d'émission de rayons X ($K\beta$ $K\alpha$) par des photons’, ‘ université Bordj Bou Arreridj’, 2020.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière.

1 Introduction

Dans une description partielle de la nature, on distingue deux sortes d'éléments : **la matière** et **le rayonnement**. Dans le domaine de la physique, la matière désigne tout élément ayant une existence concrète à l'échelle microscopique. La matière est formée d'un regroupement d'atomes. Rappelons brièvement que, comme mentionné dans le premier chapitre, chaque atome est constitué d'un noyau (contenant protons et neutrons) et d'un cortège d'électrons. La matière peut se présenter sous trois formes différentes : solide, liquide ou gazeuse.

Ainsi, le mot rayonnement se réfère à la manière dont l'énergie est émise et se propage dans l'espace. Les radiations peuvent être libérées par la matière, telles que les sources radioactives ou générées par des équipements électriques (tubes à rayons X, accélérateurs de particules, générateurs de neutrons, etc.). On ne peut détecter les rayonnements qu'en observant leur interaction avec la matière [1].

L'étude des interactions entre les rayonnements et la matière s'intéresse à la manière dont ces deux éléments réagissent lorsqu'ils sont en contact. Ce domaine est essentiel dans de nombreuses disciplines scientifiques, notamment en physique, en chimie, en médecine ou encore en astronomie. Comprendre ces interactions permet non seulement d'approfondir nos connaissances sur la nature des rayonnements, mais aussi d'identifier leurs effets sur différents types de matière. Cette compréhension est également cruciale pour le développement de nombreuses technologies modernes, telles que l'imagerie médicale, les traitements par radiothérapie ou les techniques d'analyse comme la spectroscopie [2].

2 Mécanismes fondamentaux d'interactions

Chaque type de rayonnement a une interaction particulière avec la matière. Ces interactions dépendent de la nature du rayonnement et de l'énergie qu'il porte, ainsi que du type de matériau qu'il traverse. Cette capacité à traverser la matière est appelée : **pouvoir de pénétration**, qui varie en fonction des particules alpha, beta, des rayons gamma et des neutrons.

- **Particules alpha** : Pénétration dans l'air très faible. Il suffit d'une simple feuille de papier pour stopper les noyaux d'hélium.

- **Particules bêta négatif : des électrons.** Pénétration faible. Ils parcourent quelques mètres dans l'air. Une simple feuille d'aluminium de quelques millimètres est capable d'arrêter les électrons.
- **Rayonnements X et gamma :** L'énergie du rayonnement détermine une pénétration considérable (pénétration très grande) : plusieurs centaines de mètres dans l'air. On peut se protéger en utilisant une épaisseur considérable de béton ou de plomb.
- **Neutrons :** Pénétration dépend de leur énergie. Une épaisseur importante de béton, d'eau ou de paraffine bloque les neutrons [3].

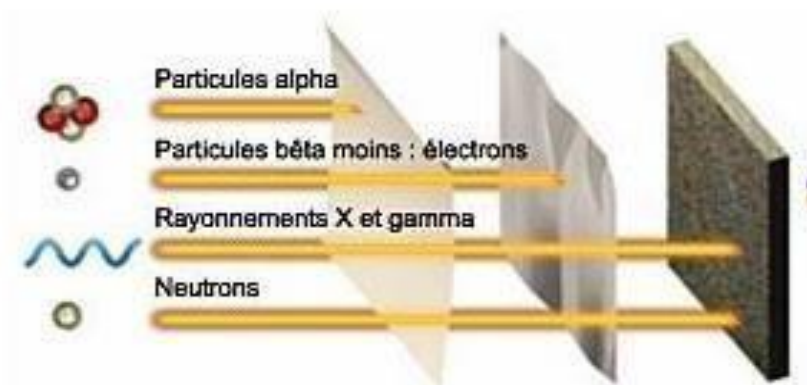


Figure II.1 : pouvoir de pénétration des rayonnements selon leur type [3].

2.1 Interaction des particules chargées (α , β)

2.1.1 Cas des particules lourdes (particule alpha)

Le rayonnement alpha est composé de noyaux d'hélium. Il interagit principalement avec les électrons des atomes du milieu, provoquant de l'ionisation ou de l'excitation. Les interactions avec les noyaux atomiques sont rares. Les particules alpha ont une masse environ 1800 fois plus grande que celle des électrons et suivent une trajectoire presque rectiligne. Lorsqu'elles entrent en collision avec des électrons, elles perdent peu d'énergie et ne subissent que de faibles déviations.

Dans l'air, leur portée est très limitée, ne dépassant pas quelques centimètres. Une simple feuille de papier ou la couche superficielle de la peau suffit à les arrêter. Ainsi, le rayonnement alpha ne représente pas un danger pour l'organisme que s'il pénètre à l'intérieur du corps, par inhalation, ingestion ou blessure cutanée.

En raison de leur forte capacité d'ionisation, les particules alpha peuvent causer des dommages biologiques importants, notamment à l'ADN. Les effets étant concentrés dans une zone très réduite, ils peuvent atteindre simultanément les deux brins de la molécule d'ADN, ce qui augmente le risque de mutations graves [4].

2.1.2 Cas des particules légères (particules bêta)

Les électrons interagissent de manière prépondérante avec les électrons des atomes constituant le milieu traversé [4].

Et le positon interagit avec la matière, il traverse d'abord une phase de ralentissement très rapide, durant environ 3 à 6 picosecondes. Pendant cette étape, il perd son énergie de manière similaire à un électron, en subissant les mêmes mécanismes d'interaction. Une fois qu'il atteint l'état thermal (avec une énergie cinétique de l'ordre de quelques dizaines de milliélectronvolts, soit environ 10^{-2} eV), le positon entre dans une phase de diffusion. Durant cette phase, il continue à se déplacer dans la matière, principalement dans les régions interatomiques, où il est repoussé par le potentiel électrostatique positif des noyaux atomiques [5].

Ces interactions peuvent entraîner différents effets selon la quantité d'énergie transférée :

2.1.2.1 Ionisation

Si l'énergie transférée par l'électron incident dépasse l'énergie de liaison d'un électron de l'atome cible (généralement supérieure à 30 eV), cet électron est arraché à l'atome : on parle alors de l'ionisation. L'électron éjecté, désormais libre, possède de l'énergie cinétique et peut à son tour interagir avec d'autres atomes, propageant le processus [4].

Notons ΔE l'énergie cinétique de l'électron incident et WL l'énergie de liaison de l'électron de l'atome cible. Selon que ΔE est suffisante ou non pour éjecter l'électron de son orbite, deux phénomènes peuvent se produire :

Si $\Delta E \geq WL$: l'électron de la cible est éjecté de son orbite avec une énergie cinétique ($\Delta E - WL$), il se produit une ionisation de l'atome cible. L'électron éjecté "électron secondaire", peut à son tour créer d'autres ionisations si son énergie cinétique est suffisante.

Après avoir causé une ionisation, l'électron incident perd une partie de son énergie (celle qu'il a transférée à l'électron arraché). Il n'est pas détruit, mais il continue sa trajectoire dans la matière, avec une énergie réduite [6].

Donc, l'électron incident devient simplement un électron à plus basse énergie, qui poursuit ces interactions jusqu'à être complètement ralenti et éventuellement capté.

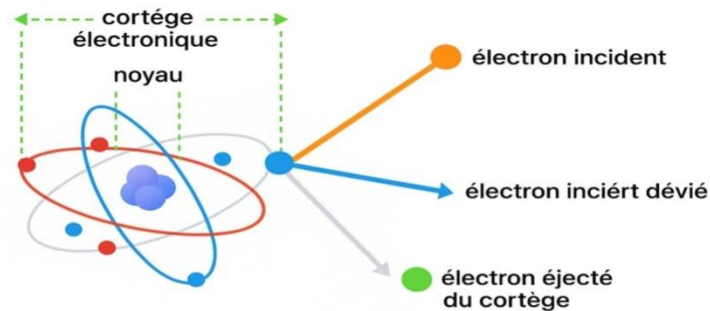


Figure II.2 : Phénomène d'ionisation [6].

2.1.2.2 Excitation

Si l'énergie transférée correspond exactement à la différence entre deux niveaux d'énergie (ou couches électroniques) de l'atome cible, un électron de l'atome est déplacé vers un niveau plus élevé (moins lié).

On parle alors **d'excitation**. Ce phénomène concerne surtout les électrons peu liés, situés dans les couches électroniques externes [4].

Si $\Delta E < WL$: le transfert d'énergie ΔE ne peut produire aucune ionisation, mais, peut porter l'électron cible à un niveau énergétique supérieur, avec excitation de l'atome cible.

Si $\Delta E \ll WL$: cette excitation aboutit à une dissipation thermique (par augmentation de l'énergie de translation, de rotation ou de vibration des molécules cibles) [6].

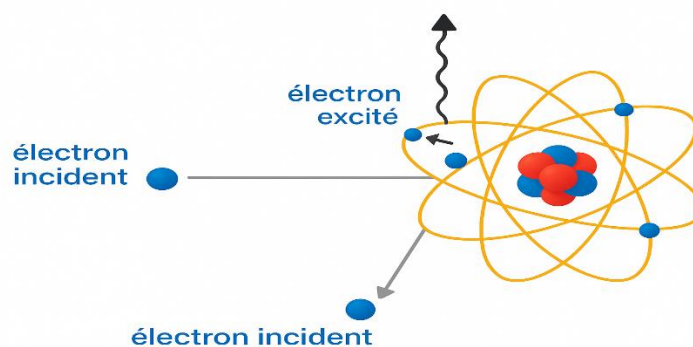


Figure II.3 : phénomène d'excitation [6].

2.1.2.3 Échauffement (transfert thermique)

Si l'énergie transférée est trop faible pour provoquer une ionisation ou une excitation, elle est absorbée sous forme d'**énergie thermique**. Elle augmente l'agitation moléculaire (translation,

rotation ou vibration des molécules), et se dissipe sous forme de **chaleur**. Seules les ionisations et les excitations sont à l'origine des lésions biologiques radio induites. Cela entraîne une augmentation de la température locale du matériau ou du tissu biologique. Elles sont moins ionisantes que les particules alpha [4].

2.1.2.4 Rayonnement de freinage

Il arrive, plus rarement, qu'un électron incident interagisse non pas avec les électrons d'un atome, mais directement avec son noyau. Sous l'effet du champ électrique intense (champ coulombien) du noyau, c'est le champ électrique produit par une charge, comme un noyau atomique. Il joue un rôle crucial dans les interactions entre particules chargées et matière [6].

L'électron est dévié de sa trajectoire et perd une partie de son énergie, transférée sous forme de rayonnement, comme elle l'illustre la figure ci-dessous :

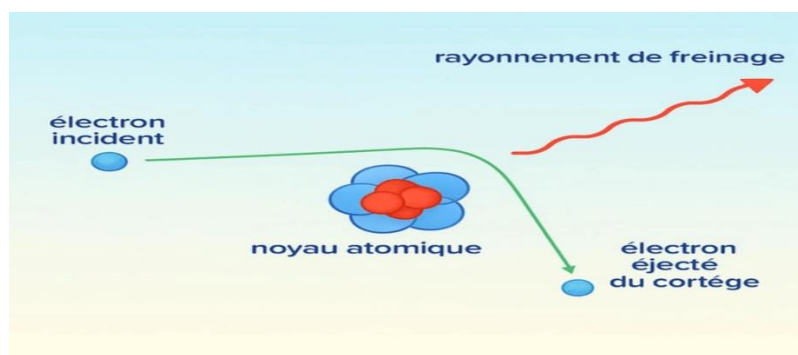


Figure II.4 : rayonnement de freinage [6].

Ce ralentissement de l'électron produit un rayonnement électromagnétique appelé **rayonnement de freinage**. En allemand, ce phénomène est désigné par le terme **Bremsstrahlung**.

Le Bremsstrahlung devient significatif lorsque des électrons de haute énergie (généralement supérieurs à 1 MeV) traversent un matériau composé d'atomes lourds, c'est-à-dire avec un numéro atomique Z élevé [6].

2.2 Interaction des rayonnements électromagnétiques

2.2.1 Interaction des photons : gamma et X

Lorsqu'un rayonnement électromagnétique monochromatique de fréquence ν traverse un milieu biologique, il interagit avec les atomes selon le principe de l'atténuation. Ce phénomène résulte

de différentes interactions physiques de base, au cours desquelles une partie ou la totalité de l'énergie du photon est transférée à la matière par absorption, qu'elle soit partielle ou complète [7]. Ce phénomène est représenté par la relation :

$$E = h \cdot \nu$$

E : l'énergie du photon (J)

h : la constante de Planck (J.s)

ν : la fréquence du photon (Hz).

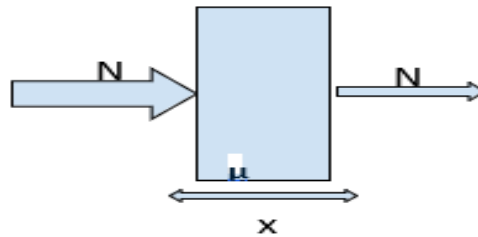


Figure II.5 : atténuation du nombre de photon N_0 lors de leur passage à travers un milieu d'épaisseur x caractérisé par un coefficient d'atténuation.

La loi d'atténuation des photons est exprimée par l'équation **(II.1)** [7].

$$N(x) = N_0 \exp(-\mu \cdot x) \quad \text{(II.1)}$$

μ étant le coefficient d'atténuation linéique. Les grandeurs N et N_0 , représentent respectivement le nombre de photons transmis et incidents, peuvent aisément être remplacées par l'intensité du faisceau (I) ou par son énergie (E), selon le paramètre que l'on souhaite étudier.

Couche demi-atténuation (CDA) : Correspond à l'épaisseur nécessaire d'un matériau absorbant pour réduire de moitié le nombre de photons d'un faisceau incident. En d'autres termes, c'est l'épaisseur à partir de laquelle seule la moitié des photons parvient à traverser l'écran, l'autre moitié étant absorbée ou déviée. La CDA varie en fonction du type de matériau utilisé comme écran et de l'énergie des photons du faisceau. Il est important de noter qu'un faisceau de photons ne peut jamais être totalement bloqué. Toutefois, en choisissant un écran adapté, il est possible de réduire suffisamment son intensité pour qu'il ne représente plus de danger pour la santé [6].

$$N(x + CDA) = \frac{N(x)}{2}$$

$$N_0 e^{-\mu(x+CDA)} = \frac{N_0 e^{-\mu x}}{2}$$

$$e^{-\mu CDA} = 1/2$$

$$-\mu CDA = \ln 2$$

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$

Lorsqu'un faisceau de photons traverse une substance, il peut interagir avec celle-ci selon plusieurs mécanismes physiques : **l'effet photoélectrique, l'effet Compton, la diffusion Thomson-Rayleigh et la création de paires.**

2.2.1.1 L'effet photoélectrique

Ce phénomène constitue le mode d'interaction prédominant pour les photons de faible énergie (compris entre 0,01 et 0,1 MeV). Lors de cette interaction, un photon incident transfère la totalité de son énergie à un électron situé dans une couche interne de l'atome (couche K ou L). L'électron ainsi excité est éjecté de l'atome, ce qui entraîne son ionisation. L'énergie de l'électron correspond à l'énergie du photon incident moins l'énergie de liaison de l'électron qui a été éjecté [8]. Cela s'exprime comme suit :

$$E(c) = h\nu - E_L \quad (\text{II.2})$$

L'atome réorganise ensuite son cortège électronique provoquant l'émission d'un rayonnement secondaire, comme le montre la figure ci-dessous [8].

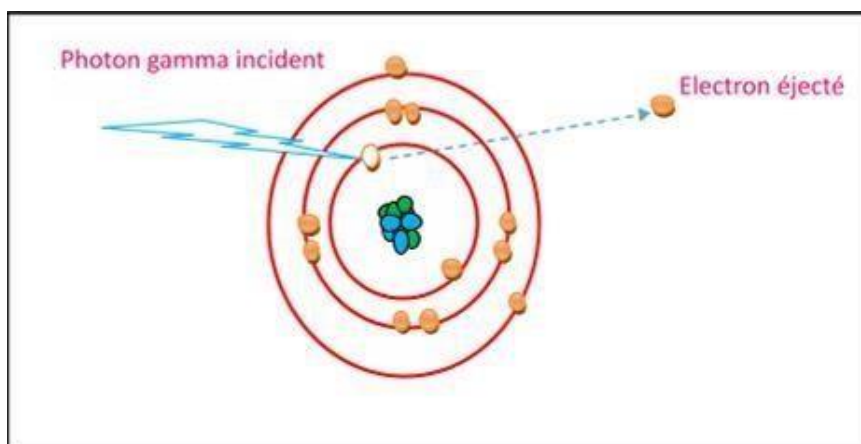


Figure II.6 : l'effet photoélectrique [8].

Grace à ses caractéristiques, cet effet joue un rôle crucial et est exploité en médecine, notamment dans la radiologie conventionnelle pour la formation des images. Cela permet alors de générer un contraste net entre les structures denses comme les os et les tissus mous. Il est aussi appliqué en mammographie, des rayons X de basse énergie sont utilisés pour exploiter l'effet photoélectrique ce qui permet de diagnostiquer des anomalies dans les tissus mammaires. Il est même utilisé pour améliorer la qualité d'image à l'aide des produits de contraste dans le but de visualiser les vaisseaux sanguins ou les organes du système digestif.

2.2.1.2 L'effet Compton

Ce phénomène se manifeste lorsque le photon incident de **fréquence ν** possède une énergie comprise entre 0,1 et 0,5 MeV. Dans ce cas, le photon cède une partie de son énergie à un électron des couches périphériques de l'atome, qui est éjecté. Il apparait un nouveau photon diffusé, d'énergie $h\nu' < h\nu$. Il y a donc diffusion du photon incident et ionisation de l'atome. L'énergie du photon incident est répartie sous la forme d'énergie cinétique apportée à l'électron et d'énergie du photon diffusé, cela conduit à l'équation suivante :

$$h\nu = E_C + h\nu' \quad (\text{II.3})$$

Tandis que le reste de l'énergie est transporté par le photon diffusé sous une nouvelle direction.

La figure suivante illustre ce phénomène [6].

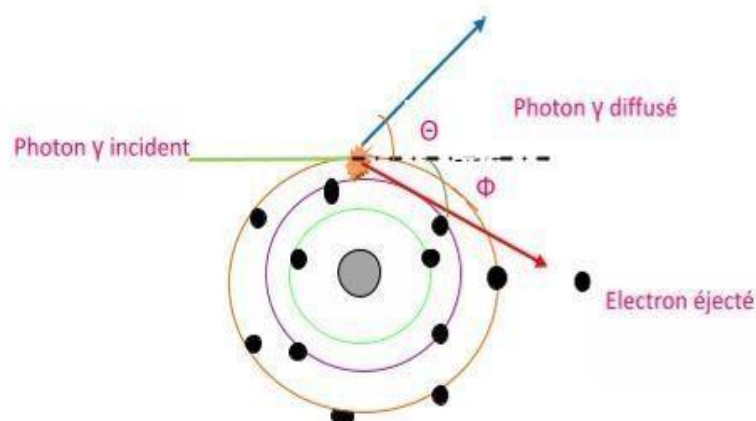


Figure II.7 : l'effet Compton [6].

Ces deux effets précédemment décrits provoquent l'ionisation des atomes au sein de la cellule, entraînant des dommages à l'ADN et contribuant ainsi aux effets biologiques des rayonnements ionisants.

Cette interaction entre un photon incident et un électron libre est exploitée en imagerie et en radiothérapie. Dans les examens d'imagerie où les rayons X sont utilisés (comme le scanner), cet effet entraîne la diffusion des photons dans les tissus mous, ce qui provoque la dégradation du contraste de l'image.

L'effet Compton est également employé en radiothérapie car il permet un dépôt d'énergie dans les cellules cancéreuses, ce qui contribue à leur destruction grâce à l'interaction entre les photons de haute énergie et les tissus biologiques [8].

2.2.1.3 La diffusion Thomson-Rayleigh

Aussi appelé diffusion cohérente ou diffusion simple, cet effet correspond à une interaction entre un rayonnement électromagnétique de faible énergie ($< 30 \text{ keV}$) et un atome du milieu traversé. Le photon incident excite l'atome, qui restitue immédiatement ce surplus d'énergie sous forme d'un rayonnement secondaire.

Ce rayonnement secondaire, ayant une énergie identique à celle du rayonnement initial, est réémis dans la même direction avec une très faible déviation. La diffusion engendrée reste donc minimale par rapport au photon incident comme indiqué sur figure (8) [8].

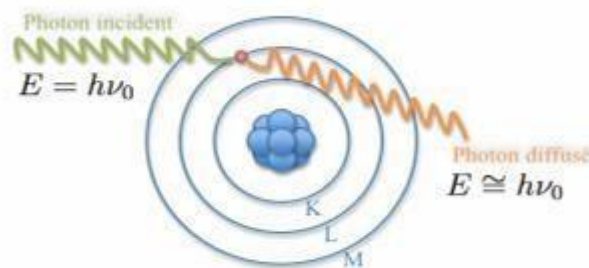


Figure II.8 : La diffusion Thomson-Rayleigh [8].

2.2.1.4 La création de paires

Lorsqu'un photon possède une énergie suffisante **E supérieur à $1,02 \text{ MeV}$** soit l'équivalent de deux fois **511 keV** , et passe à proximité d'un noyau, il interagit avec le champ électrique généré par ce dernier et disparaît en donnant naissance à une paire électron-positon. Les deux particules ainsi créées se partagent l'énergie du photon incident [6].

D'après le principe de conservation de l'énergie, cette interaction est décrite par l'équation :

$$E = 2m_0c^2 + \{(T-) + (T+)\} \quad (\text{II. 4})$$

Où :

- E : est l'énergie du photon incident.
- $2m_0C^2$: correspond à l'énergie de masse de l'électron et du positron.
- $T -$: Énergie cinétique de l'électron
- $T +$: Énergie cinétique du positron.

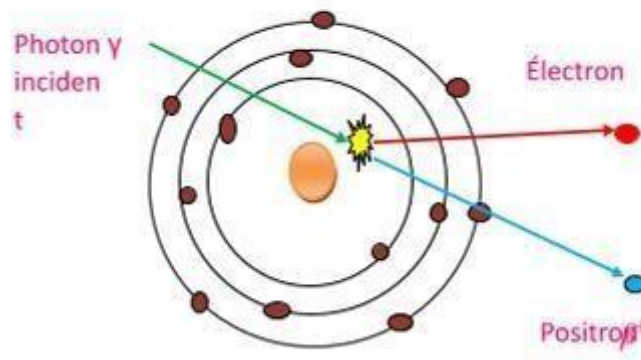


Figure II.9 : La création de paires [8].

Après plusieurs collisions, le positon, lorsqu'il est pratiquement au repos, finit par rencontrer un électron, entraînant un phénomène d'annihilation. Ce processus donne lieu à l'émission de deux photons gamma [6].

Cet effet entraîne la production d'électrons secondaires, responsables des ionisations dans la cellule et contribuant ainsi aux dommages biologiques induits par les rayonnements ionisants.

2.3 Interaction des neutrons avec la matière

Les neutrons

Le neutron est une particule électriquement neutre, possédant une énergie au repos de **941 MeV**. Lorsqu'il n'est pas lié à un noyau, il devient instable et présente une demi-vie d'environ 12 minutes. Les neutrons font partie des rayonnements dits indirectement ionisants. Ne portant pas de charge électrique, ils ne sont pas affectés par le champ coulombien et interagissent directement avec les noyaux atomiques. On les classe généralement en fonction de leur énergie, qui peut varier sur plusieurs ordres de grandeur, allant des neutrons thermiques jusqu'à ceux atteignant plusieurs centaines de *MeV* [2].

Voici le tableau suivant qui représente la classification des neutrons :

Tableau II.1: Classification des neutrons en fonction de leur énergie [9].

Neutrons	Energie
Thermiques	$En \leq 0,4 \text{ eV}$
Intermédiaires	$0,4 \text{ eV} < En \leq 200 \text{ keV}$
Rapides	$200 \text{ keV} < En \leq 10 \text{ MeV}$
Relativistes	$En \geq 10 \text{ MeV}$

Remarque :

Du fait de leur charge nulle, les neutrons ont une interaction négligeable avec les électrons. Leur énergie cinétique est absorbée par les interactions avec les noyaux, se divisant en deux catégories : les absorptions, entraînant la disparition du neutron, et les diffusions, ne faisant que diminuer l'énergie du neutron [9].

2.3.1 L'absorption

Au cours de ce processus, le neutron est absorbé et disparaît, un phénomène particulièrement fréquent dans le cas des neutrons lents ou thermiques (énergie inférieure à 0,5 eV). Cette absorption neutronique peut se produire selon différents mécanismes : par **transmutation**, par **capture radiative** ou encore par **fission** [10].

2.3.1.1 Transmutation

Lorsqu'un noyau absorbe un neutron, il forme un noyau composé qui peut se désexciter en émettant une particule chargée, comme un proton ou une particule alpha. Ce type de réaction, connu sous le nom de transmutation, conduit à la formation d'un noyau différent. La transmutation désigne ainsi le processus par lequel un élément se transforme en un autre à la suite d'une réaction nucléaire [10].

2.3.1.2 Capture radiative

Il s'agit du type de réaction nucléaire le plus courant. Le noyau composé formé suite à l'absorption d'un neutron émet généralement un rayonnement gamma après une très courte période de temps. En d'autres termes, le noyau résultant est un isotope du noyau initial.

Un exemple simple de capture radiative est l'absorption d'un neutron par un noyau d'hydrogène, qui donne naissance à du deutérium (également appelé hydrogène lourd), un noyau stable. Cependant, dans de nombreux cas, les noyaux formés par capture radiative sont instables et radioactifs : ils se désintègrent en émettant des particules bêta ainsi que des rayonnements gamma [10].

2.3.1.3 La fission

Ici également, le neutron est absorbé et forme un noyau composé dans un état excité et celui-ci se désexcite par fission en deux fragments (parfois mais très rarement en 3 fragments). En général, il y a un seuil en dessous duquel la réaction ne s'observe pas (elle est énergétiquement possible mais très peu probable). Pour ^{238}U par exemple, ce seuil vaut 0.8 MeV. S'il n'y a pas de seuil, le noyau est dit fissile [2].

Lorsqu'un neutron entre en collision avec un noyau atomique lourd (comme l'uranium ou le plutonium), il peut être capté par ce noyau. Le noyau résultant est alors appelé **noyau composé**. Il est dans un état excité car il possède une énergie interne élevée due à l'ajout du neutron.

Ce noyau composé peut alors se désintégrer de différentes façons. L'une des plus importantes est la fission nucléaire, qui consiste à ce que le noyau éclate en deux (parfois trois, très rarement) fragments plus légers, tout en libérant :

- Une grande quantité d'énergie (sous forme cinétique).
- Des neutrons secondaires (généralement 2 à 3).
- Parfois des rayons gamma [4].

2.3.2 La diffusion

Pendant lequel le neutron perd de son énergie cinétique et subit un changement de direction, constitue le principal processus pour les neutrons rapides (MeV) [2].

2.3.2.1 La diffusion élastique

La diffusion élastique potentielle est l'une des formes d'interaction les plus simples et les plus courantes entre un neutron et un noyau. Elle peut se produire avec n'importe quel noyau, et à toutes les énergies. Dans ce cas, l'onde associée au neutron est simplement **déviée** par la barrière de potentiel du noyau, sans que le neutron ne pénètre réellement à l'intérieur. Le noyau se comporte alors comme une sphère impénétrable, et le phénomène peut être modélisé de façon classique, d'un point de vue phénoménologique.

À grande distance du noyau cible, le neutron suit une trajectoire rectiligne. Lorsqu'il entre dans la zone d'influence du noyau, il peut être réémis dans une direction différente, sans perte d'énergie globale du système. On parle alors de diffusion élastique, car les grandeurs fondamentales, énergie cinétique, quantité de mouvement et masse au repos sont conservées pendant l'interaction.

Ce type d'interaction est comparable à une collision entre deux boules de billard. Le neutron heurte le noyau, lui transmet une partie de son énergie, puis rebondit dans une nouvelle direction. La quantité d'énergie transmise au noyau dépend notamment de l'angle d'impact : un choc frontal transfère d'avantage d'énergie qu'un choc oblique. Le noyau, ayant absorbé une partie de l'énergie du neutron, repart alors avec une vitesse accrue [10].

2.3.2.2 La diffusion élastique de résonance

Dans ce type d'interaction, le neutron incident est absorbé par le noyau cible, formant ainsi un noyau composé temporairement excité. Ce noyau se désexcite ensuite en réémettant un neutron, ce qui ramène le noyau cible à son état fondamental, identique à son état initial.

La section efficace correspondante est donnée par une formule analogue à celle de la capture γ [10].

2.3.2.3 Diffusion inélastique

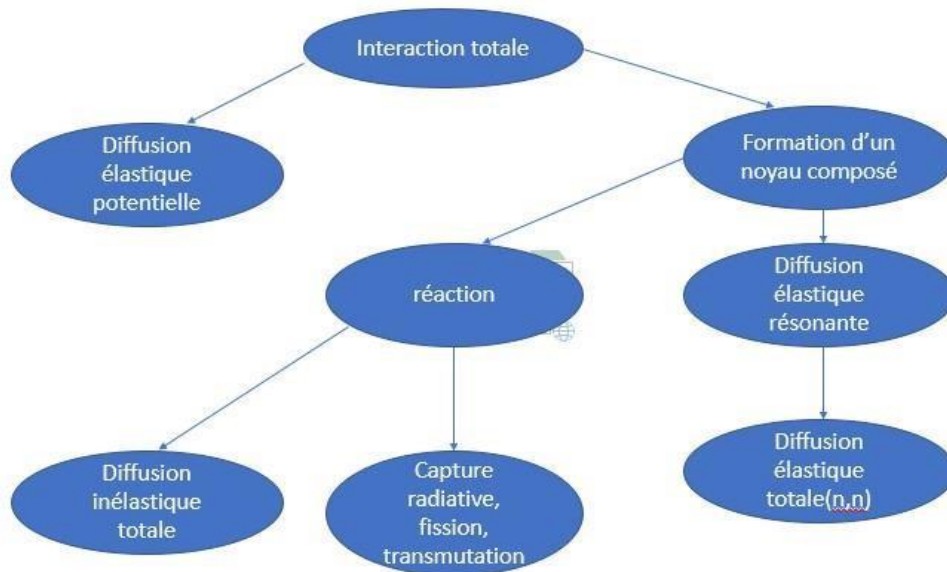
Dans ce cas, le neutron incident est absorbé par le noyau cible, formant un noyau composé dans un état excité. Ce noyau se désexcite ensuite en émettant un neutron secondaire, moins énergétique, ainsi qu'un photon gamma qui emporte la différence d'énergie.

Ce type de diffusion, appelé diffusion inélastique accompagnée d'émission gamma, ne peut se produire que si le neutron possède une énergie suffisante pour exciter le premier niveau d'énergie du noyau cible.

Pour les noyaux lourds, ce seuil est généralement de l'ordre de 10 keV. En dessous de cette énergie seuil (E_t), la section efficace de l'interaction est nulle, car l'excitation n'est pas possible.

En pratique, cette interaction n'a lieu que lors de collisions entre des neutrons très rapides et des noyaux lourds. Elle reste relativement rare et n'a qu'un impact limité sur le fonctionnement des réacteurs nucléaires [10].

Voici un schéma qui représente toute les interactions neutron-matière.



FigureII.10 : schéma d'interaction neutrons-matière.

3 Transfert d'énergie a la matière biologique

3.1 Pouvoir d'arrêt linéique S du milieu

En traversant la matière, les particules chargées transfèrent leur énergie aux atomes sur leur parcours ; le **pouvoir d'arrêt linéique** est la perte moyenne d'énergie (dE) de la particule par distance parcourue (dx), mesurée souvent en MeV/cm [11].

$$S = \frac{dE}{dx} \quad z^2 = \frac{m}{E \cdot N}$$

L'équation S est proportionnelle à z^2

z : valence de la particule.

m : masse de la particule.

E : énergie de la particule.

N : nombre d'électrons du milieu par unité de volume.

3.2 Le parcours

Les particules chargées perdent progressivement leur énergie en pénétrant dans la matière et finissent par être arrêtées. La notion de parcours définit la distance nécessaire à une particule traversant la matière pour que son énergie devienne approximativement nulle par ionisation. [11]

On définit le parcours moyen par :

$$R_0 = \frac{E_0}{S} \quad (\text{II.5})$$

E_0 = énergie de l'électron incident (en MeV).

R_0 = parcours moyen de l'électron (en cm).

S : pouvoir linéique d'arrêt (en MeV/cm).

3.3 Notion de transfert d'énergie linéique *TEL*

Lorsqu'on s'intéresse au milieu et non plus à la particule, on utilise le *TEL* qui est la quantité d'énergie transférée au milieu cible par la particule incidente, par unité de longueur de trajectoire. Il s'exprime en $keV\mu m^{-1}$ ou $keV.cm^{-1}$.

Le *TEL* s'exprime comme le taux de dépôt d'énergie par rapport à la profondeur de pénétration dans la matière traversée. Plus le *TEL* est élevé, plus la distance entre deux interactions successives de la particule incidente est courte. En outre, lorsque le milieu est riche en électrons, les particules ionisantes tendent à céder plus d'énergie au cours de leur parcours [11]. Le transfert d'énergie linéique est donné par l'équation suivante :

$$TEL = dE_{transférée} / dx \quad (\text{II.6})$$

Le *TEL* reflète donc directement la nuisance biologique d'un rayonnement (plus l'énergie cédée localement est grande, plus importants sont les dégâts). Il est aussi proportionnel à la masse volumique du milieu cible : plus il est dense, plus il y aura d'ionisations [11].

Le TEL peut également être donnée par la formule suivante :

$$TEL = k z^2 \cdot n \cdot \frac{Z}{v^2} \quad (\text{II.7})$$

k : constante

z : charge de la particule incidente

n : nombre d'atomes de la cible par unité de volume

Z : numéro atomique de la cible

v : la vitesse de la particule incidente

Des particules très énergétiques pourront traverser la matière sans entrer en interaction avec elle, en effet, plus la vitesse v augmente, moins le TEL est élevé (variation en $1/v^2$).

En particulier, on peut noter que plus la particule ralentit, plus les **interactions seront nombreuses en fin de trajectoire (pic de Bragg)** comme elle l'illustre la figure 11.

Un électron et une particule lourde telle qu'une particule alpha ne transmettent pas leur énergie de la même manière, ni en quantité ni en trajectoire. En effet, bien qu'ils possèdent la même énergie, la différence de masse entre les deux entraîne une variation de vitesse, selon la relation :

$$E = \frac{1}{2} m v^2.$$

La particule plus massive : ici la particule alpha, se déplace donc plus lentement et interagit davantage avec la matière. Par ailleurs, leur charge n'est pas identique : la particule alpha porte une charge double par rapport à celle de l'électron. Une autre distinction importante réside dans le rôle de la masse lors des interactions avec les électrons des atomes environnants. Ainsi, la particule alpha, perd de l'énergie par choc coulombien. Les pertes d'énergie étant faibles à chaque choc, les particules ne subissent quasiment aucune déviation : son parcours $R_0 = \frac{E_0}{S}$ sera alors atteint [11].

- **Pic de Bragg** : Comme les trajectoires de ces particules lourdes sont rectiligne, leurs vitesses décroissent avec la profondeur dans les tissus, ce qui entraîne une diminution

de l'énergie cinétique et une conséquente augmentation du pouvoir de ralentissement du milieu en profondeur. Ainsi la densité linéique d'ionisation DLI, qui augmente progressivement avec la profondeur, devient brusquement très élevée en fin de parcours lorsque l'énergie cinétique des particules devient inférieure à une dizaine de MeV .

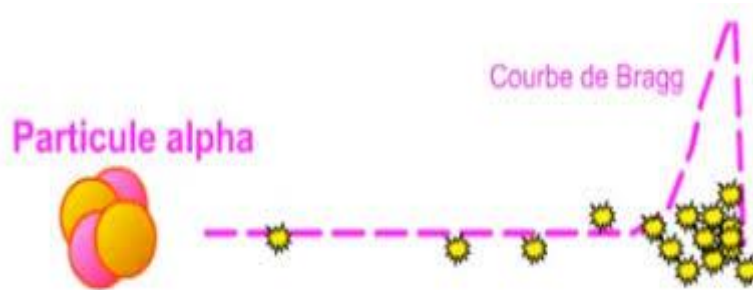


Figure II.11 : pic de Bragg [11].

Tandis que l'électron, plus léger, et dû aux chocs énergétiques plus élevés, de brusques changements dans leurs directions ont lieu, donnant à leur trajectoire un aspect de **ligne brisée**, son parcours alors est inférieur à $R_0 = \frac{E_0}{S}$ [11].

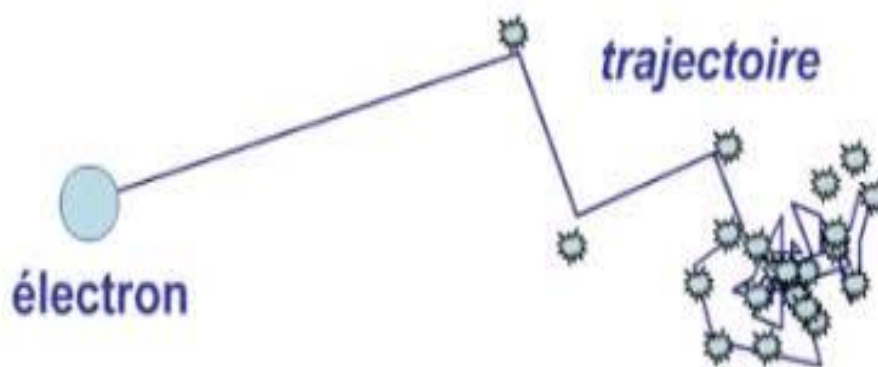


Figure II.12: trajectoire des électrons dans un milieu traversé [11].

La trajectoire de l'électron se termine alors lorsque son énergie est quasiment nulle ($< 25MeV$).

3.4 Densité linéique d'ionisation DLI

On définit la densité linéique d'ionisation comme le nombre d'ionisations produit par une particule incidente, par unité de longueur de trajectoire [12].

La DLI s'exprime en (paires d'ion) $\mu m.^{-1}$

$$DLI = \frac{TEL}{W_i}$$

Avec :

TEL : est la quantité d'énergie linéique.

W_i : est l'énergie moyenne transférée pour chaque ionisation.

4 Les effets physico-chimiques des radiations ionisantes

Les radiations entraînent des effets physico-chimiques qui se manifestent quelques microsecondes après l'exposition. Les molécules qui ont subi une ionisation ou une excitation interagissent les unes avec les autres, ainsi qu'avec d'autres molécules voisines [13].

Quand les radiations sont absorbées par des tissus biologiques, elles ont la possibilité d'agir soit de manière directe, soit de manière indirecte sur les cibles essentielles de la cellule.

- **Action directe** : Les radiations ont un effet direct sur les cibles cellulaires, telles que l'**ADN**. Ces cibles sont directement ionisées ou excitées par le rayonnement, ce qui déclenche une série d'événements menant aux effets biologiques. Cette mesure directe est dominante pour les rayonnements à **haute TEL** [13].

- **Action indirecte** : Les radiations peuvent provoquer des interactions avec d'autres atomes ou molécules dans la cellule, générant ainsi des radicaux libres. Ces derniers ont la capacité de se propager suffisamment pour endommager les cibles cellulaires majeures. Un radical libre est un atome ou une molécule qui possède un électron unique, non apparié et extrêmement instable, cherchant à s'associer à d'autres atomes. Voilà pourquoi ces radicaux sont hautement réactifs [13].

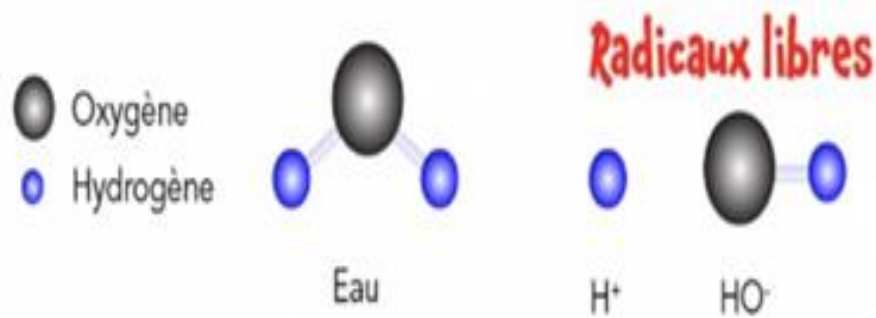


Figure II.13 : Schéma boules de l'eau, d'ions d'hydrogène et d'ions d'hydroxyle [6].

Puisque **75%** de la cellule est de l'eau, les radicaux libres générés par les radiations ionisantes sont principalement issus de la décomposition de la molécule d'eau. Ce phénomène, dénommé **radiolyse de l'eau**, produit des radicaux libres oxygénés (ROS). L'ionisation de la molécule d'eau libère un électron, créant l'espèce $\text{H}_2\text{O}^{\bullet+}$. Son instabilité conduit à la formation de H^+ et du radical hydroxyle OH^{\bullet} [13].

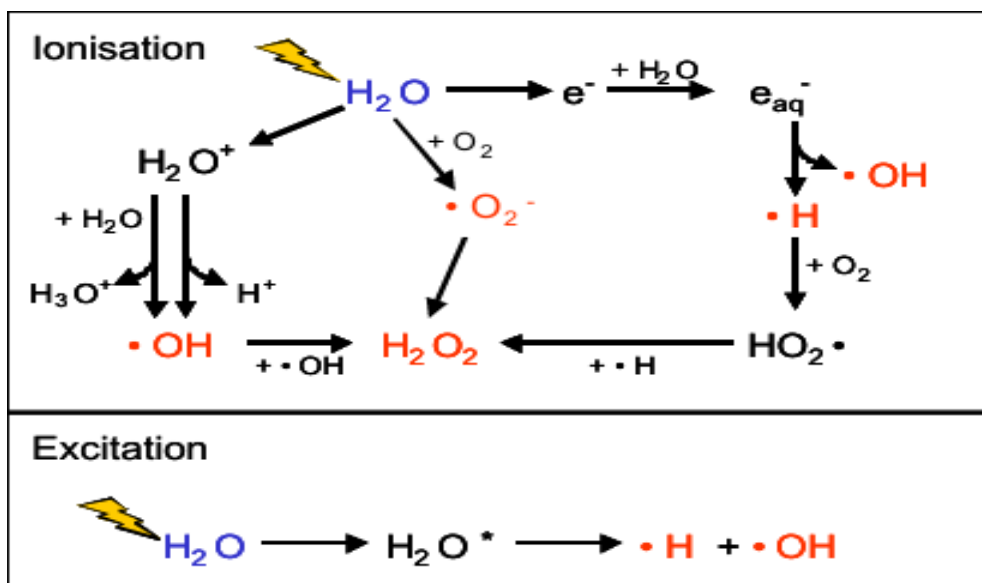


Figure II.14 : La radiolyse de l'eau.

L'électron libéré s'entoure de plusieurs molécules d'eau et interagit avec d'autres molécules pour donner naissance au radical hydroxyle et à divers autres radicaux. Il existe plusieurs façons pour ces radicaux de se recombiner et de produire, entre autres, le **dihydrogène H_2** ou le **peroxyde d'hydrogène H_2O_2** . Ce dernier est un radical libre qui a la capacité de se propager sur de grandes distances à l'intérieur de la cellule. Ces radicaux libres oxygénés agissent comme des

oxydants puissants, ils s'attaquent aux macromolécules de la cellule telles que l'ADN et sont donc à l'origine de l'effet indirect des radiations ionisantes [13].

5 Les effets biologiques des radiations ionisantes

Directement ou indirectement, les radiations ionisantes agissent sur les macromolécules biologiques, entraînant des dommages à différents composants cellulaires. Ces dommages provoquent des troubles au niveau des cellules, qui peuvent entraîner la mort de celles-ci. Ces effets biologiques peuvent se manifester quelques secondes suite à l'exposition aux radiations.

5.1 Dommages au niveau des membranes cellulaires

À l'échelle des membranes cellulaires ou appelées aussi membranes plasmiques, les radiations ont un effet soit sur les protéines, soit sur les phospholipides qui composent ces membranes. Les rayonnements ionisants peuvent entraîner des dommages qui peuvent causer la dégradation de la membrane [13].

5.2 Lésions de L'ADN

Les effets des radiations ne se limitent pas seulement aux dommages causés à la membrane plasmique. Elles provoquent aussi des modifications au niveau de la molécule d'ADN.

Les lésions de l'ADN sont généralement plus graves pour la cellule que les dommages causés aux protéines ou à la membrane. Effectivement, si l'ADN est endommagé, l'information génétique qu'il porte peut-être affectée et ces altérations sont susceptibles d'être héritées par la descendance. Par ailleurs, les protéines qui ont subi des radiations peuvent être renouvelées, contrairement aux lésions de l'ADN qui nécessitent des mécanismes de réparation d'une complexité remarquable [13].

On distingue diverses sortes de dommages à l'ADN causés par les radiations ionisantes :

➤ **Ruptures de brins d'ADN :**

Les ruptures de brins sont de deux types :

- **Les cassures simple brin (CSB) :** qui affectent uniquement un brin de l'ADN, sont générées par la rupture des liaisons phosphodiester.
- **Les cassures double brin (CDB) :** sont composées de deux ruptures, chacune d'elles se trouvant en face sur un brin distinct de l'ADN. Ces ruptures sont éloignées

l'une de l'autre d'une distance qui ne dépasse pas une dizaine de paires de bases. Ces dernières peuvent être les conséquences d'un événement ionisant affectant simultanément les deux brins, ou de deux ruptures de brin unique indépendantes. Les CDB représentent les lésions les plus nuisibles et une part de ces atteintes reste irréparable par la cellule après exposition à l'irradiation. Si elles ne peuvent être réparées, elles sont généralement mortelles pour la cellule. On peut établir un lien entre le nombre de CDB irréparables et la sensibilité des cellules aux radiations [13]. Les particules alpha α , bêta β et les rayons X ont la capacité de modifier une molécule d'ADN de plusieurs manières, en provoquant :

1. Une rupture du squelette sucre-phosphate.
2. Une modification de la structure chimique des bases.
3. Une séparation des liaisons hydrogène qui unissent les paires de bases [6].

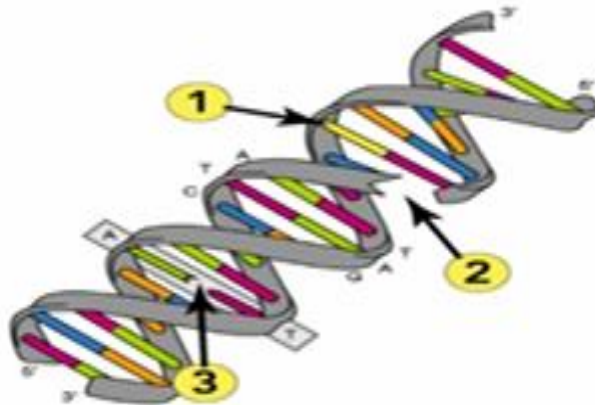


Figure II.15 : Les effets des radiations ionisantes sur l'ADN [6].

Dans l'ensemble du corps, les radiations ionisantes peuvent provoquer deux sortes d'effets : **les effets obligatoires**, déclenchés par la mort des cellules ; et **les effets aléatoires**, associés à des mutations susceptibles de conduire plus tard à la formation d'un cancer.

Les effets obligatoires se manifestent nécessairement lorsque l'organisme est exposé à une dose qui dépasse le seuil donné. Chaque type de tissu biologique ou organe a un seuil qui lui est propre. Les conséquences peuvent apparaître en fonction du tissu touché, dans un délai de temps allant de quelques heures à quelques semaines (comme des brûlures cutanées, une altération du nombre de spermatozoïdes, etc.), voire même plusieurs années (par exemple, une cataracte ou une hypothyroïdie) après l'exposition aux radiations. La gravité varie en fonction de **la dose reçue, le type des organes touchés et l'étendue de la zone du corps exposée** aux radiations. La survie est en jeu en cas de forte irradiation et en l'absence de traitement [6].

6 Grandeurs et unités dosimétriques

6.1 Les unités

Plusieurs unités sont utilisées dans le domaine de la radioactivité :

1. **Le becquerel (Bq)** : Un échantillon radioactif se caractérise par son activité, qui est le nombre de désintégrations de noyaux radioactifs qui se produisent en son sein par seconde.

L'unité d'activité est le becquerel, de symbole Bq . Cette unité est très petite :

$1 Bq = 1$ désintégration par seconde.

2. **Le Curie (Ci)** : C'est l'ancienne unité d'activité qui correspondait à celle d'un gramme de radium 226, radionucléide naturel présent dans les sols.

Cette unité est beaucoup plus grande que le becquerel. 1 curie est égal à 37 milliards de becquerels.

3. **Le gray (Gy)** : Cette unité chiffre la densité d'énergie déposée par les rayonnements dans un organisme ou un objet exposé à un échantillon radioactif. On parle de dose absorbée.

$1 gray = 1$ joule par kilogramme de matière irradiée.

4. **Le Sievert (Sv)** : Les effets biologiques, résultant de la dose absorbée par un organisme vivant, varient selon la nature et l'énergie des rayonnements ainsi que sa

radiosensibilité. Ces effets se mesurent en sievert, unité qui traduit un équivalent de dose [14].

6.2 Les doses

6.2.1 La dose absorbée D

La dose absorbée est la quantité d'énergie moyenne communiquée par le rayonnement ionisant, à un volume de matière de masse, son unité est le gray (Gy) [15].

$$\text{Sa formule : } D = \frac{E}{m} \quad (\text{II.8})$$

Où :

- D : la dose absorbée (en gray).
- E : l'énergie absorbée (en joule).
- m : est la masse du matériau ou du tissu irradié (en *kilogrammes*).

Il est important de noter que cette mesure ne dépend que de l'énergie déposée par le rayonnement. Elle ne tient pas compte de la nature du rayonnement (alpha, bêta, gamma...) ni de la stabilité des organes ou tissus exposés.

Le débit de dose absorbée note D^0 , est la dose absorbée par unité de temps [15].

$$D^0 = \frac{dD}{dt} \quad (\text{II.9})$$

Dans le système international, le débit de dose absorbée doit se mesurer en Gray par seconde ($Gy \cdot s^{-1}$).

6.2.2 La dose équivalente H_T

La **dose équivalente** est une mesure utilisée en radioprotection pour évaluer les effets biologiques d'une exposition à un rayonnement ionisant sur les tissus humains. Elle prend en compte le **type de rayonnement** reçu, car certains types sont plus nocifs que d'autres pour les cellules du corps [15]. Pour refléter cette variation, un facteur de pondération spécifique est attribué à chaque type de rayonnement en fonction de son potentiel à causer des dommages biologiques [6]. En multipliant la dose absorbée par un facteur de pondération, on obtient la dose équivalente :

$$H_T = D \cdot W_R \quad (\text{II.10})$$

Tel que :

- H_T Est la dose équivalente.
- D est la dose absorbée.
- W_R Est le facteur de pondération, parfois appelé facteur de qualité.

La dose équivalente exprimée en milli sievert (**MsV**).

6.2.3 La dose efficace E

La **dose efficace** constitue une généralisation, à l'échelle de l'organisme entier, de la notion de **dose équivalente**, est en fait une dose qui administrée de façon homogène au corps entier entraînerait les mêmes effets biologiques tardifs que l'ensemble des doses effectivement reçues, réparties entre différents organes et à différents moments.

Elle vise spécifiquement à évaluer le **risque d'effets stochastiques**, tels que les cancers ou les mutations héréditaires [6].

La dose efficace E est égale à la somme des doses équivalentes pondérées par un facteur lié à la sensibilité aux rayonnements des organes ou tissus concernés [15].

$$E = \sum W_T \cdot H_T \quad (\text{II.10})$$

Où :

- E : dose efficace
- H_T : dose équivalente relative à l'organe T
- W_T : Facteur de pondération tissulaire de l'organe.

Note : 1Sv=1Gy =1 J /Kg

6.3 Les normes de doses en radiothérapie

La dose administrée est la quantité d'énergie distribuée dans les tissus par rayonnement. Cette énergie va provoquer des processus qui conduisent à la mort des cellules.

Une des avancées majeures de la radiothérapie moderne a été d'obtenir une mesure précise de l'énergie absorbée par les tissus, soit une connaissance exacte de la dose. La dose se mesure et se calcule à l'aide de détecteurs ou dosimètres.

Il est donc crucial d'analyser plus en profondeur l'application de ces normes selon les groupes

exposés, qu'il s'agisse des patients en soin, des tissus non ciblés, ou des individus exposés dans un cadre professionnel ou environnemental.

6.3.1 Normes de doses pour les patients

En radiothérapie, la dose totale administrée pour éradiquer une tumeur est déterminée en fonction **du type de cancer**, de **sa position** et de **sa sensibilité aux rayonnements**. Par exemple :

Cancer de la thyroïde (traité avec de l'iode 131) :

- Dose thérapeutique : varie de 30mCi à 200mCi ce qui correspond à 1,1 à 7,4 GBq)
- Pour les cancers bien différenciés, 100 à 150 mCi est courant.
- Pour les métastases, on peut aller jusqu'à 200 mCi

Une dose administrée sur une courte durée est plus dommageable que la même dose répartie sur une période prolongée.

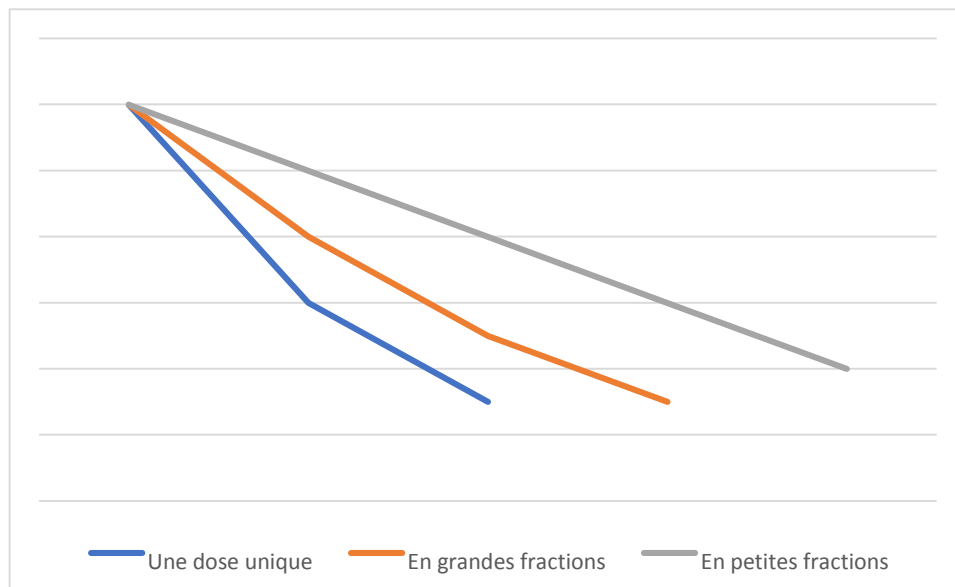


Figure II.16 : La survivance cellulaire en fonction de la dose totale d'irradiation.

Cette procédure est choisie pour éliminer les cellules cancéreuses, tout en minimisant la toxicité aux tissus sains [11].

6.3.2 Limites de doses pour les tissus sains

En radiothérapie, il est crucial de préserver les organes adjacents, également dénommés organes

à risque (OAR), tels que :

- **Moelle épinière** : <45 Gy.
- **Reins** : < 18-23 Gy.
- **Foie** : < 30-35 Gy.
- **Poumons** :< 20-25 Gy.
- **Thyroïde** (en tant qu'organe sain) : très sensible aux radiations.

En moyenne, selon l'organe, la dose maximale que les tissus sains peuvent tolérer avoisine les 20 à 45 Gy. C'est pour cette raison que nous modifions la dose totale, le fractionnement et l'orientation des faisceaux afin de réduire l'exposition des tissus sains adjacents et de focaliser la dose uniquement sur la tumeur [16].

6.2.3 Limites de dose pour la population et le personnel de santé

Bien que cela ne concerne pas directement les patients, c'est utile de mentionner brièvement :

- **Travailleurs exposés** : 20 mSv/an
- **La population générale** : 1 mSv/an (hors exposition médicale volontaire)

Le schéma suivant montre les principales sources d'expositions aux rayonnements pour le public [14].

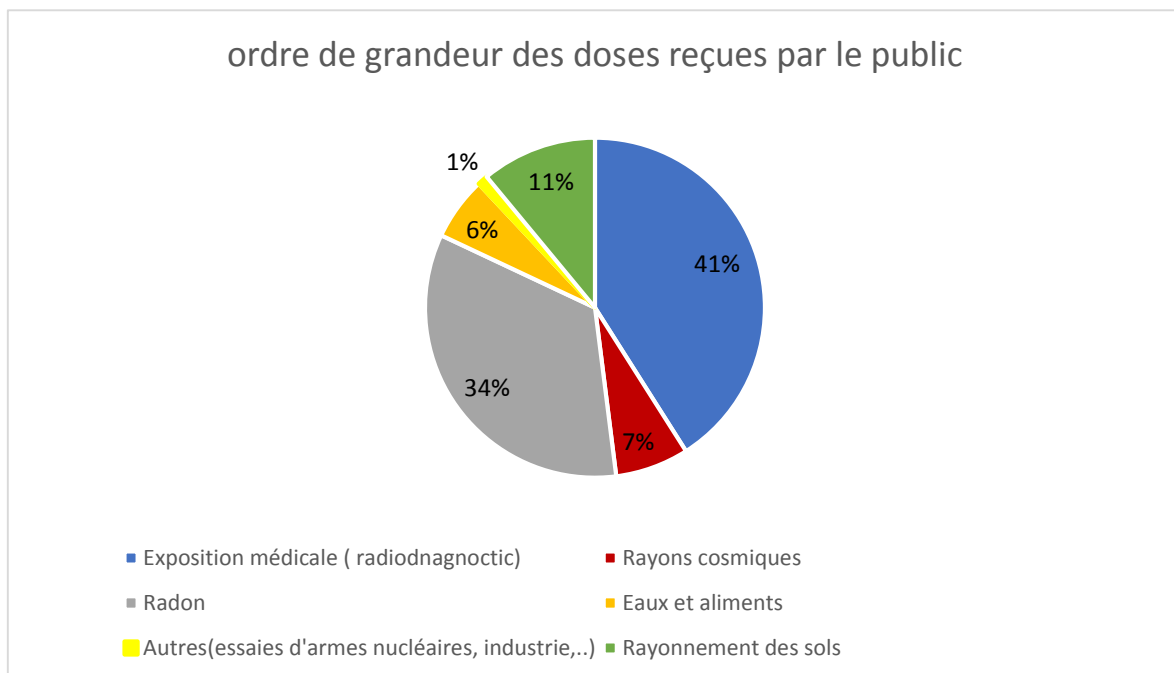


Figure II.17 : sources d'expositions aux rayonnements pour le public [11].

Il est visible que près de la moitié de la dose moyenne annuelle (approximativement 4 mSv) est attribuée aux examens médicaux, ce qui met en évidence la nécessité de gérer et surveiller ces expositions, même si elles ne sont pas incluses dans les seuils réglementaires établis pour la population.

7 Conclusion

L'étude des interactions des rayonnements avec la matière constitue un fondement essentiel pour comprendre les mécanismes physiques impliqués dans de nombreux domaines tels que la radioprotection, la physique médicale, ou encore les technologies nucléaires.

Ce chapitre a permis de distinguer les différents comportements des rayonnements en fonction de leur nature. Les particules chargées, qu'elles soient légères (électrons, positrons) ou lourdes (protons, particules alpha), interagissent principalement par ionisation et excitation, avec des trajectoires relativement prévisibles dans la matière.

En revanche, les photons, dépourvus de charge, interagissent par des processus discontinus tels que l'effet photoélectrique, la diffusion Compton, La diffusion Thomson-Rayleigh et la création de paires, dont la probabilité dépend fortement de leur énergie et de la nature du matériau traversé.

Les neutrons, quant à eux, présentent un comportement différent, interagissant principalement par diffusion et capture radiative, et induisant souvent des réactions secondaires complexes.

En résumé, chaque type de rayonnement présente des modes d'interaction spécifiques qui dépendent à la fois de ses propriétés intrinsèques (masse, charge, énergie) et de la nature du milieu traversé. La compréhension fine de ces mécanismes permet non seulement de mieux appréhender les effets des rayonnements sur les systèmes biologiques et les matériaux, mais aussi d'optimiser leur utilisation dans des contextes variés allant de la médecine nucléaire à l'industrie, en passant par la recherche fondamentale et la sûreté radiologique.

Références bibliographiques du chapitre II

- [1] Dr. BENABDELLAH Ghlamallah, cours 1^{er} année master en physique des matériaux et nano physique, ‘Interaction rayonnement matière’, ‘Université IBN KHALDOUN-TIARET’, 2020.
- [2] HAMMOUDA Khedidja, mémoire de master en physique médicale, ‘Validation de l’algorithme Collapsed Cone par le protocole TRS 430’, ‘UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA’, 2024.
- [3] Assistance scolaire personnalisée, ‘pouvoir de pénétration des rayonnements ionisants’, 2025.
- [4] Dahi E, Meherchi L , mémoire de master en physique médicale ‘système de double calcul dosimétrique’, ‘université Tlemcen’, 2011.
- [5] SLIMANI A, mémoire de master en physique énergétique, ‘Interaction des rayonnements avec la matière’, ‘Université ADRAR’, 2016.
- [6] ZAATOUT CH, BEN-ATAILAH H, mémoire de master en physique médicale, ‘ Étude de la radioprotection dans le service de Médecine Nucléaire de l’hôpital Mohamed Boudiaf Ouargla’, ‘université KASDI MERBAH OUARGLA’, 2023.
- [7] Merabtine w, mémoire de master en physique des matériaux, ‘Calcul semi-empirique du Rapport d’intensité d’émission de rayons X ($K\beta$ $K\alpha$) par des photons’, ‘Université Mohamed El Bachir Elibrahimi –Bordj Bou Arreridj’, 2020.
- [8] GRANGER J E, mémoire de master en sciences radiopharmaceutique, ‘étude de la radioprotection dans le service de médecine nucléaire de l’hôpital Mohamed Boudiaf Ouargla’, ‘université KASDI MERBAH OUARGLA’, 2023.
- [9] Benmosbah M, thèse de doctorat en chimie, ‘spectrométrie des neutrons : étude de la réponse d’un ensemble de compteurs proportionnels’, ‘université de franche comté’, 2009.
- [10] Mouhssine, D, thèse de doctorat en physique, ‘Etude d'une nouvelle génération de dosimètre basée sur les détecteurs photostimulables type BaFBr (Eu) : caractérisation et application à la dosimétrie environnementale et personnelle’, ‘ université louis pasteur-strasbourg’, 2004.
- [11] INGO schienbiein, ‘Cours de la radioactivité’, 2009-2010.

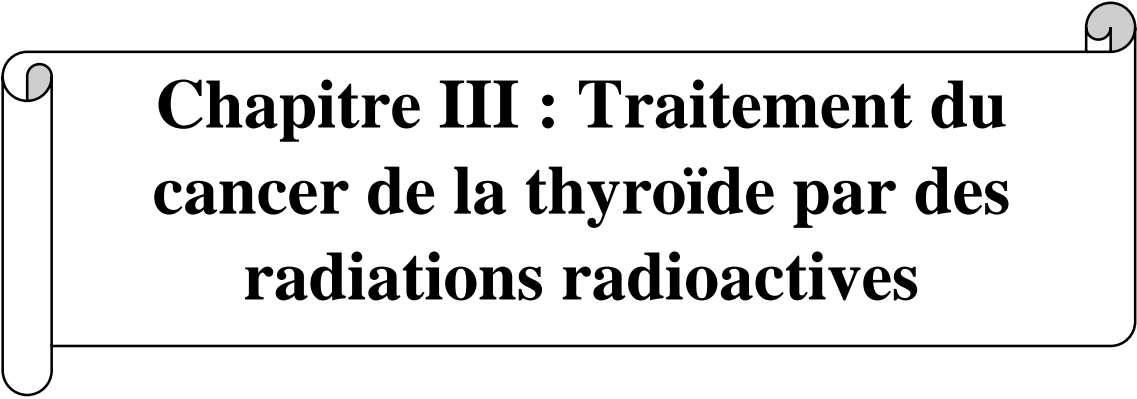
[12] SLIMANI A, mémoire de master en physique énergétique, 'Interaction des rayonnements avec la matière', 'Université d'ADRAR', 2016.

[13] FISCHER B, thèse de doctorat, 'étude de la signalisation cellulaire de l'apoptose induite par différents types de rayonnements ionisants dans des cellules lymphoblastoïdes humaines différents par leur statut', 'université louis pasteur', 2004.

[14] Commission canadienne de sûreté nucléaire, document, 'Introduction au rayonnement, l'organisme de réglementation nucléaire de Canada', Décembre 2012.

[15] Benaïssa A H, mémoire de master en physique appliquée, 'effet de temps d'irradiation bêta et la température sur les pics I-TL du LIF (700)', 'université de blida', 2020.

[16] Rapport d'activité, 'La lutte contre le cancer', institut de cancérologie de l'Ouest, 2023.

A decorative border resembling a scroll, with a vertical strip on the left and a horizontal strip at the top, both with rounded ends and a slight shadow effect.

**Chapitre III : Traitement du
cancer de la thyroïde par des
radiations radioactives**

1 Introduction

La médecine nucléaire est une spécialité médicale innovante qui utilise des substances radioactives à des fins diagnostiques et thérapeutiques. La médecine nucléaire implique l'administration de radio traceurs qui sont composés de deux éléments :

- Un radionucléide (élément radioactif) qui émet un rayonnement détectable (gamma, positron...).
- Une molécule vectrice qui cible un organe, un tissu ou une cellule spécifique.

Les radiations utilisées en médecine nucléaire proviennent généralement d'isotopes émetteurs gamma (comme le technétium-99m ou l'iode-131) ou de positons (comme le fluor-18 utilisé en TEP, tomographie par émission de positons). Ces rayonnements, détectés par des caméras spécialisées, permettent de visualiser le fonctionnement des organes en temps réel, facilitant ainsi le diagnostic précoce de nombreuses maladies, notamment les cancers, les troubles cardiaques et neurologiques.

L'utilisation de la médecine nucléaire est aujourd'hui incontournable dans plusieurs domaines cliniques, notamment l'oncologie, la cardiologie. Elle permet de diagnostic précoce, une évolution précise de l'étendue des maladies, ainsi qu'un suivi ciblé de l'évolution des traitements.

Dans le cadre de notre stage effectué au sein du service de médecine nucléaire de la clinique « les amandiers » située à MEKLA Tizi Ouzou, nous avons eu l'opportunité de découvrir de manière concrète les différentes facettes de cette spécialité.

L'irathérapie consiste à administrer un **radio-isotope** directement dans l'organisme, par voie orale, intraveineuse ou locale, afin qu'il cible de manière spécifique les cellules malades.

Notre objectif à travers ce chapitre est de comprendre le rôle, les applications et le principe de l'irathérapie dans la médecine nucléaire.

2 La médecine nucléaire

En médecine nucléaire, le patient reçoit un **radio pharmaceutique** par voie **intraveineuse**, **orale** ou par **inhalation**, selon l'indication. Cette administration peut avoir un **but**

diagnostique, comme lors d'un examen de scintigraphie, ou un objectif **thérapeutique**, dans le cadre d'une **radiothérapie métabolique**.

Pour le diagnostic : ces procédures comprennent la scintigraphie et la tomoscintigraphie. Ces tests permettent de réaliser des analyses cinétiques, fonctionnelles ou métaboliques et de produire des images par comptage externe de la fraction de radioactivité injectée et captée par un organe.

Ils nécessitent l'utilisation d'émetteurs de rayonnement dont le pouvoir de pénétration élevée permet une exploration approfondie du corps (émetteurs γ purs ou $\gamma + \beta$). La scintigraphie peut être employée pour examiner divers organes (cœur, poumons, cerveau, thyroïde, reins...) et certaines maladies (tumeurs, ...). Pour ces examens, les radios pharmaceutiques doivent être administrés à une dose sans toxicité chimique et à une activité minimale possible, afin de réduire l'exposition du patient aux radiations. Les isotopes utilisés se distinguent par leur émission extrêmement faible dose d'irradiation pour les organes cibles et le corps entier [1].

Pour le traitement : Les procédures thérapeutiques exploitent des radios pharmaceutiques qui contiennent des radioéléments de haute énergie (émetteurs β), conçus pour cibler une irradiation sélective. Certaines matières provoquent l'interruption des processus de division cellulaire, suivie de la mort cellulaire.

Les émetteurs employés doivent présenter une affinité sélective élevée pour le tissu cible et posséder une pureté nucléidique élevée. Les maladies principales prises en charge incluent les troubles de la thyroïde, les affections ostéo-articulaires et les douleurs osseuses dues aux métastases [1].

Le principe de radio pharmaceutique est le même que pour les applications diagnostiques, la différence est dans le choix du marqueur. Quelques marqueurs, tel que l'iode 131 employé dans le traitement des cancers de la thyroïde, émettent à la fois des rayons β et γ . Cela permet non seulement d'obtenir des images diagnostiques (pour détecter des métastases), mais aussi de bénéficier de leur effet thérapeutique [2].

3 La médecine nucléaire dans le traitement du cancer de la thyroïde

3.1 La thyroïde

La thyroïde est une glande située à l'avant du cou, au centre, juste devant la trachée. Elle se trouve également à proximité des nerfs récurrents, qui contrôlent les cordes vocales et le larynx. De forme allongée, la thyroïde est constituée de deux lobes, un droit et un gauche, reliés entre eux par une fine bande de tissu appelée isthme. En raison de cette configuration, elle est souvent représentée sous la forme d'un papillon [3].

Voici une illustration qui la représente :

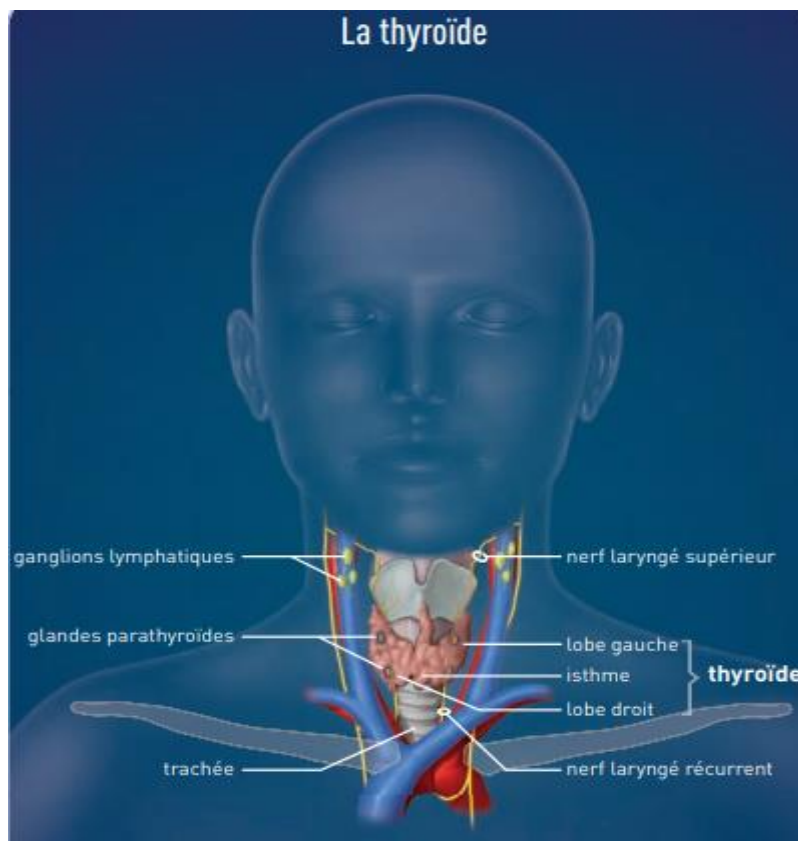


Figure III.1 : la thyroïde [3].

Les hormones que fabriquent la thyroïde telles que **la thyroxine (T4)**, **la triiodothyronine(T3)**, **la déiodothyronine(T2)** et **la calcitonine**, jouent un rôle crucial dans la croissance des cellules et le développement, la multiplication et la différenciation de toutes les cellules de l'organisme notamment dans le système nerveux, ... Elles régulent le métabolisme basal des protéines, lipides, glucides, elles sont donc indispensables au bon fonctionnement de l'organisme.

Bien que la thyroïde joue un rôle crucial dans le fonctionnement hormonal, elle peut être le siège de pathologies graves, dont le cancer.

3.2 Le cancer de la thyroïde

3.2.1 Définition

Le cancer de la thyroïde est une multiplication anormale des cellules de la glande thyroïde. Cela peut se manifester de différentes manières. Bien que ses origines restent souvent indéfinies, l'apparition de cette maladie peut être favorisée par des éléments héréditaires ou une exposition aux rayonnements, notamment durant l'enfance.

Plusieurs éléments influent sur la vitesse de propagation du cancer de la thyroïde, y compris le type spécifique de cancer, son stade lors du diagnostic et les traits personnels du patient [4].

3.2.2 Types des cancers de la thyroïde

On distingue plusieurs types des cancers de la thyroïde : **le carcinome papillaire, le carcinome folliculaire, le carcinome médullaire et anaplasique.**

- ▣ **Le carcinome papillaire** : Le cancer papillaire de la thyroïde (CPT) est le type le plus fréquent (70 % des cas). Il se caractérise par des structures papillaires et des cellules à noyaux en "verre dépoli". La forme classique, non encapsulée, est souvent multifocale et bilatérale. Des métastases ganglionnaires sont présentes dans 50 % des cas, tandis que les métastases à distance, rares, touchent surtout les poumons. Environ 20 % des cas sont des variantes histologiques, certaines ayant un pronostic similaire à la forme classique, d'autres (comme les formes sclérosantes diffuse, insulaire ou à cellules hautes) étant plus agressives [5]. La figure ci-dessous illustre une représentation microscopique d'un carcinome papillaire :

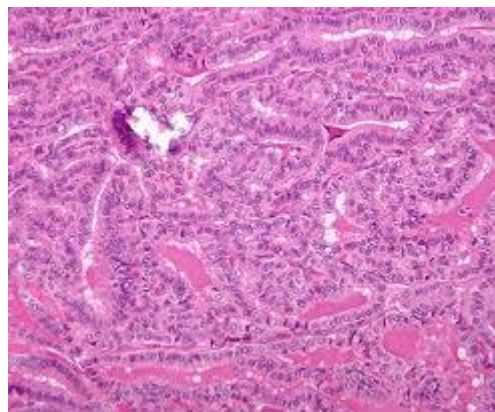


Figure III.2 : carcinome papillaire de la thyroïde [5].

- ▣ **Le carcinome folliculaire** : Les cancers folliculaires de la thyroïde (CFT), également appelés cancers vésiculaires (CVT), représentent environ 20% des cancers thyroïdiens. Ils dérivent des cellules folliculaires, sans présenter les caractéristiques du cancer papillaire, et peuvent parfois ressembler à du tissu thyroïdien normal. Le cancer folliculaire est généralement unifocal, avec une faible fréquence de métastases ganglionnaires. En revanche, les métastases à distance, notamment pulmonaires et osseuses, sont plus fréquentes [5] comme elle le montre la figure (3).

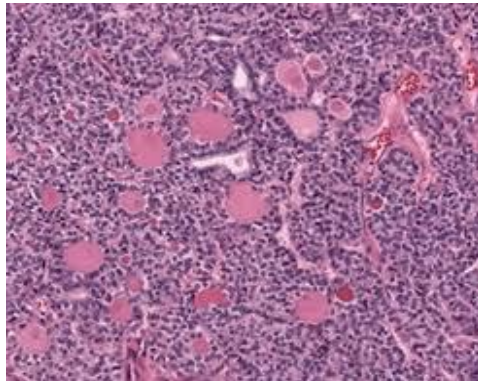


Figure III.3 : le carcinome folliculaire de la thyroïde [5].

- ▣ **Le carcinome médullaire** : Le carcinome médullaire est actuellement bien individualisé et séparé des cancers anaplasiques de la thyroïde. Le cancer médullaire de la thyroïde (CMT), qui représente environ 6 % des cas, est une tumeur dérivée des cellules C périfolliculaires de la thyroïde, d'origine neuroectodermique. Sur le plan embryologique, il est apparenté à d'autres tumeurs neuroendocrines telles que le mélanome, le phéochromocytome et le neuroblastome. Les CMT sont proportionnellement plus fréquents chez les jeunes [5]. L'image suivante montre un exemple de carcinome médullaire observé au microscope.

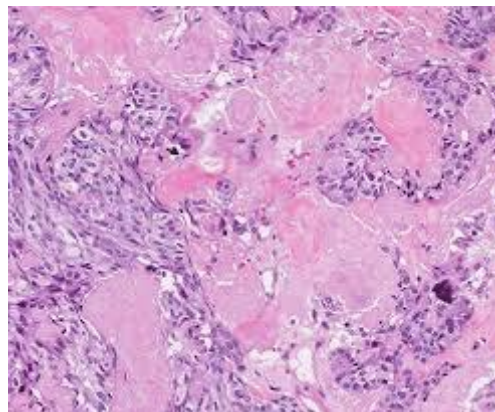


Figure III.4 : le carcinome médullaire de la thyroïde [5].

- ☐ **Le carcinome anaplasique** : Un cancer thyroïdien peu différencié conserve peu de caractéristiques fonctionnelles normales. Il ne fixe plus l'iode radioactif et produit peu de thyroglobuline. Lorsque ces fonctions sont totalement perdues, on parle alors de cancer indifférencié ou anaplasique [5] comme c'est illustré ci-dessous :

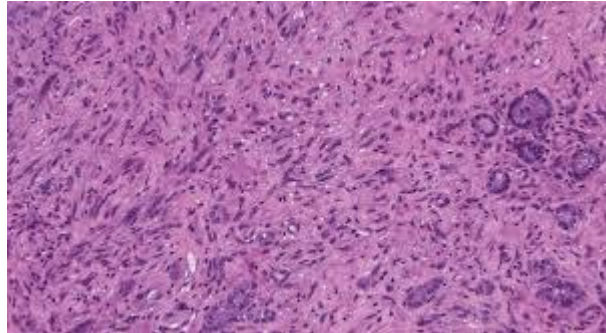


Figure III.5 : le carcinome anaplasique de la thyroïde [5].

3.2.3 Facteurs de risque

Les principaux facteurs de risque du cancer thyroïdien sont l'exposition aux rayonnements ionisants, la carence en iode, certains antécédents médicaux et familiaux, ainsi que, dans certains cas, une prédisposition génétique.

- **Exposition aux rayonnements ionisants** : L'exposition aux radiations ionisantes, notamment lors de traitements médicaux ou d'accidents nucléaires, représente un risque majeur, surtout chez les enfants. Plus l'exposition aux radiations est grande et plus l'âge de cette exposition est jeune, plus le danger de contracter un cancer de la thyroïde augmente [4].
- **Carence en iode** : Un manque d'iode, surtout chez les enfants, peut accroître la probabilité de développer un cancer de la thyroïde. En cas de carence, la thyroïde devient plus réceptive aux radiations ionisantes et l'absorption de l'iode radioactif est intensifiée, ce qui amplifie le danger du cancer provoqué par ces radiations [4].
- **Antécédents médicaux et familiaux** : des antécédents de certaines affections thyroïdiennes, telles que la maladie de Basedow, peut accroître le risque d'apparition d'un cancer de la thyroïde. Un risque accru peut également être lié à des antécédents de certaines pathologies chroniques, telles que l'anémie pernicieuse et l'insuffisance surrénalienne primaire. Il y a une susceptibilité héritée à certains types de cancers de la thyroïde, en particulier le cancer médullaire de la thyroïde, où des mutations génétiques peuvent se transmettre au fil des générations [4].

3.2.4 Symptômes et diagnostics

Le cancer de la thyroïde se caractérise fréquemment par une gamme de symptômes qui peuvent être indétectables lors des premières phases de la maladie. L'un des indices les plus fréquents est la présence d'un nodule ou d'une masse palpable au niveau du cou, dans la zone de la thyroïde, qui peut parfois être assimilée à un goitre. Les patients peuvent aussi éprouver un gonflement au niveau du cou ou une douleur constante dans cette région, y compris dans la gorge. Les modifications de la voix, comme un enrouement persistant qui ne s'améliore pas, sont courantes, tout comme les problèmes pour avaler (dysphagie) et respirer (dyspnée), particulièrement si la tumeur met une pression sur la trachée.



Figure III.6 : Le nodule thyroïdien [6].

La majorité des nodules thyroïdiens sont **bénins** et ne causent pas de problèmes de santé, d'autres sont **malins**, c'est pour cela quand un nodule est identifié, une analyse détaillée s'impose pour établir s'il est bénin ou cancéreux. Cela peut englober :

- **Échographie de la thyroïde et du cou :** permet d'identifier la présence des nodules ou un goitre, et d'évaluer la taille et le type des nodules.
- **Bilan thyroïdien :** Lorsqu'on détecte des cellules cancéreuses, un bilan sanguin thyroïdien est effectué pour contrôler la fonction thyroïdienne. On détermine donc le taux de **TSH** (Thyroid Stimulating Hormone) par une analyse sanguine. La TSH est une hormone produite par **l'hypophyse** qui a pour rôle de stimuler la sécrétion des hormones thyroïdiennes T3 et T4.

- **Biopsie par aspiration à l'aiguille fine** : Quand un nodule thyroïdien est détecté par échographie, une cytoponction (prélèvement d'un échantillon cellulaire du nodule) est effectuée avec une aiguille afin de vérifier si le nodule est bénin ou cancéreux.
- **Examens complémentaires** : En fonction des résultats et du type de cancer suspecté, d'autres examens peuvent être nécessaires comme la scintigraphie (pour évaluer l'activité métabolique des cellules thyroïdiennes), l'IRM et TDM (pour une meilleure évaluation des ganglions et des métastases), PET-SCAN (pour rechercher des métastases) [4].

3.3 L'irathérapie

L'irathérapie se base sur l'utilisation de l'iode radioactif (iode 131) afin de cibler précisément les cellules thyroïdiennes malades. Ce traitement est couramment pratiqué suite à une thyroïdectomie complète (retrait de la thyroïde) afin d'éradiquer les restes de cellules thyroïdiennes et minimiser le danger de réapparition de la maladie.

Le processus débute par une activation des cellules de la thyroïde. On peut réaliser cette stimulation soit en interrompant la prise d'hormones thyroïdiennes, soit par une injection de Thyrogen (qui stimule le niveau de TSH). Une fois que les cellules thyroïdiennes ont absorbé l'iode, on administre l'iode radioactif, habituellement sous forme de gélule.

L'iode 131 émet des radiations bêta et gamma. Le rayonnement bêta cause des dommages aux cellules ciblées et le rayonnement gamma facilite l'observation des zones touchées lors d'une scintigraphie [7].

3.3.1 L'iode radioactif

Comme tous les isotopes de l'iode, qui sont au nombre de 37 radio-isotopes, le noyau de l'iode 131 se compose de 53 protons. Cependant, il se caractérise par son nombre de neutrons qui s'élève à 78. Il a un spin de 7/2 et une masse atomique approximative de **130,906**.

L'iode 131 se désintègre en xénon 131 (nucléide stable) par la désintégration β^- (qui consiste à transformer un neutron en proton) tout en émettant des rayons bêta (électrons) et des rayons gamma, et un antineutrino électronique à haute énergie (énergie de désintégration égale à **0,971 MeV**) [8].



I : atome stable diode 131

Xe : atome stable de xénon 131

β^- : particule beta

$\bar{\nu}_e$: antineutrino électronique

C'est un radio-isotope qui émet principalement des particules bêta d'une énergie moyenne de 0,606 MeV (dans 89,6 % des cas), avec un parcours moyen de 0,9 mm dans les tissus. Il émet également des rayons gamma d'une énergie de 364 keV dans 81,5 % des cas. Sa demi-vie physique est de 8,02 jours [9].

L'iode radioactif est utilisé dans les cas suivants :

- Le traitement de l'hyperthyroïdie provoquée par la maladie de Basedow (ou de Graves).
- La prise en charge de l'hyperthyroïdie due à un nodule thyroïdien hyperactif.
- La réduction du volume d'un goitre (thyroïde hypertrophiée) exerçant une pression sur les voies respiratoires ou l'œsophage, sans intervention chirurgicale [7].

3.3.2 Le traitement par l'irathérapie

La première étape consiste en une intervention chirurgicale visant à retirer un ou les deux lobes de la thyroïde (thyroïdectomie partielle ou totale), parfois associée à un curage ganglionnaire. Cette intervention permet ensuite de déterminer le stade du cancer thyroïdien.

Après la chirurgie

Après chirurgie, en cas de cancer différencié (cas le plus fréquent), on aura souvent recours à l'irathérapie. Les cancers infra centimétriques (micro-cancers) sont en général guéris par la chirurgie seule.

L'irathérapie commence généralement par la prise orale d'un liquide qui contient de l'iode radioactif, souvent délivré dans une boîte en plomb pour protéger ceux qui le manipulent. Une fois que la thyroïde l'absorbe, l'iode diffuse des radiations qui détruisent les cellules anormales. Avant l'intervention, le personnel soignant va réaliser des examens à l'aide d'appareils spécialisés pour évaluer le fonctionnement de la thyroïde et s'assurer qu'aucun anticorps n'empêche le traitement. Pour faciliter l'absorption de l'iode radioactif et réduire son impact sur d'autres zones du corps, il est recommandé de boire un large verre d'eau suite à la thérapie. Ce

protocole vise à optimiser l'efficacité du soin et minimiser les effets secondaires. Voici une figure qui illustre la boîte d'iode et la manière d'administration :

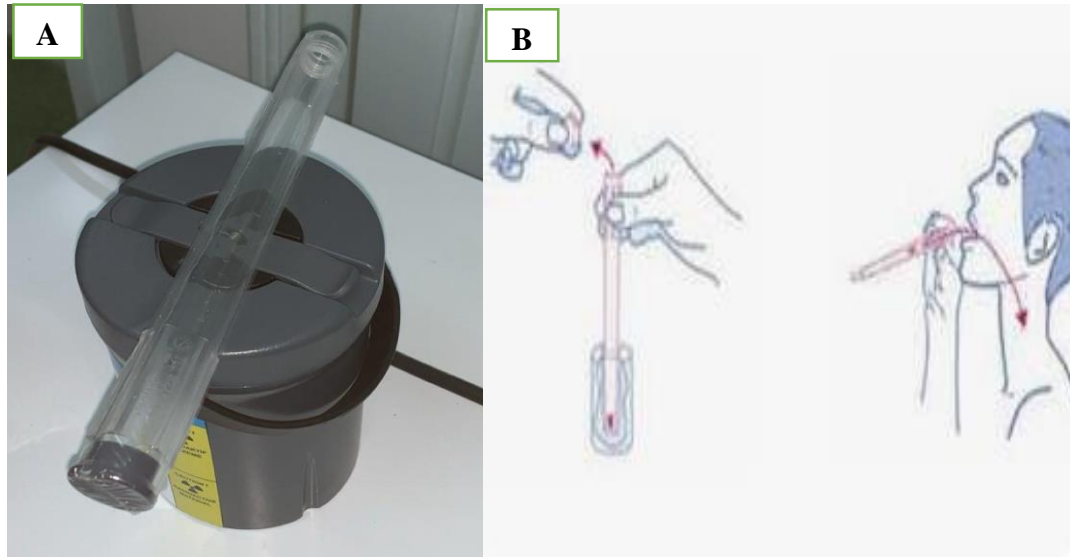


Figure III.7 : (A) : la gélule d'iode 131 (B) : administration de la gélule d'iode 131.

En fonction du type de cancer, du stade de la maladie et des recommandations cliniques, différentes doses d'iode 131 peuvent être administrés au patient, telles que 50,100,150 mCi comme elle sont représentées ci-dessous :

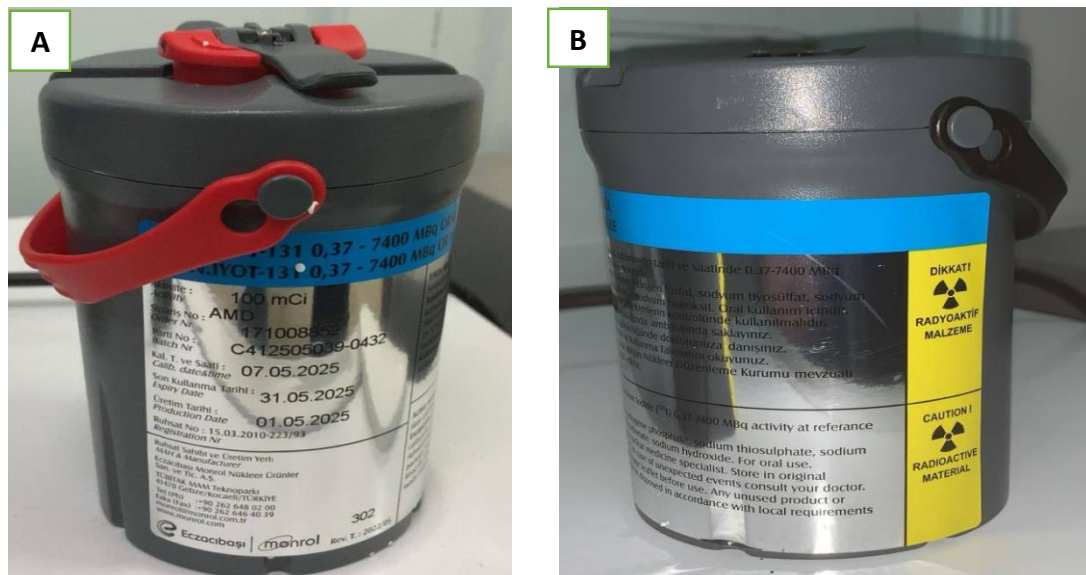


Figure III.8 : (A) : gélule de 100 mCi (B) : gélule de 50 mCi.

L'iode-131 est idéalement ciblé par la thyroïde, car celle-ci a la capacité d'absorber l'iode naturel. Cela permet à l'iode radioactif d'être directement capté et de détruire les cellules

anormales. L'iode-131 produit des radiations qui détruisent les cellules thyroïdiennes, diminuant de ce fait leur production d'hormones ou leur reproduction dans le cas de cellules cancéreuses. Cette thérapie ciblée réduit les impacts sur les autres zones du corps. Cette procédure nécessite une hospitalisation selon la quantité d'iode administrée au patient.

Pour adapter mieux au traitement et préparer la glande thyroïde, une consultation chez l'endocrinologue traitant quelques semaines avant l'hospitalisation est obligatoire. Des indications simples qui peuvent différer d'un patient à un autre permettra d'augmenter l'efficacité du traitement. L'hospitalisation dure généralement 3 à 4 jours pour les traitements des cancers et parfois plus de 7 jours pour les hyperthyroïdies. Une fois arrivé à l'hôpital, une prise de sang sera effectuée pour contrôler notamment le taux hormonal.

Pendant l'hospitalisation, des mesures de radioactivité seront prise grâce à un détecteur positionné au-dessus du lit du patient. La première mesure est effectuée immédiatement après la prise de la gélule, et les mesures suivantes sont planifiées à des heures précises : 8h, 14h, 20h. Le patient sera informé de début de la mesure par un indicateur lumineux et sonore.

Des examens d'imagerie sont ensuite réalisés au service de la médecine nucléaire pour observer la distribution de l'iode dans le corps. Avant de recevoir l'autorisation de sortir, on doit faire des examens de scintigraphie et observer comment l'iode radioactif qu'on a donné au patient s'est reparti dans l'organisme, notamment pour voir si elle s'est bien fixée sur la thyroïde ou éventuellement ailleurs, afin de détecter la présence éventuelle de métastases visibles.

3.3.3 Effets secondaires de l'irathérapie

L'irathérapie (traitement à l'iode radioactif) est généralement bien tolérée. La plupart des effets ressentis par les patients sont en réalité dus à une hypothyroïdie. Toutefois, certains effets secondaires peuvent survenir :

- Maux de tête, douleurs ou gonflements des glandes salivaires, surtout si des résidus de tissu thyroïdien fixent plus de 3% de l'iode. On peut les prévenir en buvant des boissons citronnées. Si nécessaire, un traitement à base de prednisone (0,5 mg par kg et par jour) peut être prescrit.
- Nausées ou vomissements (s'ils apparaissent dans les deux heures suivant la prise, ils peuvent diminuer l'efficacité du traitement).
- Sécheresse durable de la bouche, liée à l'irradiation des glandes salivaires.

- Diminution transitoire des globules blancs et des plaquettes entre le 10^e et le 20^e jour après traitement, car la moelle osseuse reçoit une faible dose de radiation.
- Modification passagère du goût (dysgueusie) [15].

3.3.4 Les avantages de l'irathérapie

L'irathérapie est fréquemment considérée comme une alternative efficace à la thyroïdectomie, car elle permet d'éviter les risques associés à une intervention chirurgicale. Ce traitement utilise de l'iode radioactif pour cibler de manière précise les cellules thyroïdiennes malades.

Parmi ses avantages figurent :

- L'irathérapie comporte moins de risque médical que la chirurgie de la thyroïde.
- La possibilité d'être réalisé en ambulatoire, Ça veut dire sans hospitalisation prolongée.
- Une efficacité démontrée dans le traitement des cancers différenciés de la thyroïde et de certaines formes d'hyperthyroïdie. Chez certains patients, l'irathérapie constitue également un complément thérapeutique essentiel après une chirurgie, notamment pour éliminer les tissus thyroïdiens résiduels [7].

3.3.5 Indication et contre-indication de l'irathérapie

L'irathérapie constitue une option thérapeutique principalement indiquée dans le traitement des cancers différenciés de la thyroïde, en particulier après une thyroïdectomie totale. Elle peut également être prescrite pour certaines formes d'hyperthyroïdie, notamment la maladie de Basedow.

Chez les patients atteints de cancer thyroïdien, ce traitement est recommandé en présence d'un risque élevé de récurrence ou de métastases ganglionnaires. En cas d'hyperthyroïdie, l'irathérapie est envisagée lorsque les traitements antithyroïdiens de synthèse sont inefficaces ou contre-indiqués.

Cependant, certaines situations constituent des contre-indications à ce traitement :

- La grossesse, en raison du risque d'hypothyroïdie chez le fœtus.
- L'allaitement, car l'iode 131 est excrété dans le lait maternel.
- L'incapacité du patient à comprendre ou à respecter les consignes de radioprotection [7].

4 Radioprotection

L'application de l'iode 131, en tant que traitement radioactif, nécessite la mise en place de dispositifs de radioprotection pour réduire l'exposition aux radiations. Ces actions se focalisent essentiellement sur le patient, le personnel soignant et l'environnement.

4.1 Les règles de radioprotection

Il existe quatre règles fondamentales de protection contre les sources de rayonnements externes.

4.1.1 La distance

Plus la distance entre une personne et la source de rayonnement est grande, plus la dose reçue est faible. En effet, la dose diminue en proportion inverse du carré de la distance qui sépare la personne de la source radioactive. Dans le cas d'un rayonnement peu atténué par l'air, la dose reçue à une distance d_1 d'une source ponctuelle sera inférieure à celle reçue à une distance d_0 , et peut être calculée à l'aide de la relation suivante [10].

$$D_{d_1} = \frac{D_{d_0}}{\left(\frac{d_1}{d_0}\right)^2} \quad (\text{III.2})$$

D_{d_1} : La dose reçue par une source ponctuelle à la distance d_1 .

D_{d_0} : La dose reçue à la distance d_0 .

4.1.2 Le temps

La diminution du temps d'exposition aux rayonnements entraîne une réduction proportionnelle de la dose reçue. En effet, plus le temps d'exposition est court, plus la dose absorbée est faible, selon une relation de proportionnalité directe [10].

4.1.3 L'activité

Réduire l'activité de la source, par exemple en diminuant les quantités de matière radioactive utilisées [11].

4.1.4 L'écran

En cas d'exposition externe, il est possible d'interposer des écrans de protection entre la source de rayonnement et les personnes exposées [10].

4.2 Radioprotection du patient

Le patient devient lui-même temporairement une source de rayonnements. Il sera donc invité à rester seul dans la chambre, puisque les visites ne sont pas autorisées, il doit être hospitalisé et isolé. Les chambres réservées pour les traitements à l'iode radioactif, sont menées des parois plombées pour limiter la diffusion des rayonnements vers l'extérieur. Elles sont situées dans des zones spécifiques du service de médecine nucléaire.



Figure III.9 : les chambres plombées.

Chaque chambre est équipée de sanitaires (toilettes, douche, lavabo) permettant au patient de gérer ses besoins sans sortir de la chambre. Ces toilettes sont connectées à un système séparé d'évacuation des eaux usées, parfois équipées de réservoirs de stockage conçus pour recueillir les déchets contaminés jusqu'à la décroissance naturelle de la radioactivité.

Dans le cas d'un vomissement d'un patient, la salle doit être immédiatement décontaminée et contrôlée.

Le lit doit être gardé dans un placard plombé jusqu'à la décroissance complète et de la radioactivité



Figure III.10 : Les douches plombées.

Le corps a besoin de quelques jours pour éliminer l'excès de radioactivité. L'iode est éliminé par les urines, les sels, la transpiration et la salive, il est donc recommandé de boire beaucoup d'eau durant l'hospitalisation, il est également conseillé de mâcher des bonbons acidulés car ils activent la salivation.

Des conseils stricts lui sont données pendant plusieurs jours après sa sortie, notamment :

- Limiter les contacts physiques.
- Une bonne hygiène
- Éviter tout contact avec des femmes enceintes et des enfants.

4.3 Radioprotection du personnel

Afin de minimiser l'exposition aux rayonnements en intervenant auprès des patients traités par l'iode 131, les principes fondamentaux de radioprotection sont appliqués :

- Minimiser le temps d'exposition.
- Rester à une distance maximale par rapport à la source.
- Utiliser des protections (pinces, gants, tenues plombées, lunettes plombées, etc).



Figure III.11 : tenue et lunette plombées.

Protection de la thyroïde : La thyroïde est un organe particulièrement sensible aux radiations, et une exposition importante aux rayonnements peut augmenter significativement le risque de développer un cancer.



Figure III.12 : Cache thyroïdienne.

Protection des mains et de la tête

Figure III.13 : calot et gants plombés.

Avant d'entrer dans une chambre blindée ou d'entrer en contact avec un patient sous traitement à l'iode 131, le personnel médical doit porter un dosimètre. Ce dispositif permet d'évaluer la quantité de rayonnement ionisant à laquelle il est soumis dans le cadre de son travail. C'est une démarche cruciale pour surveiller l'exposition individuelle et s'assurer qu'elle demeure conforme aux normes réglementaires. Ce dernier est habituellement positionné sous la tenue plombée au niveau du thorax, permettant ainsi de refléter l'exposition totale du corps.



Figure III.14 : dispositif de mesure de l'exposition aux radiations.

4.4 Radioprotection de l'environnement

La radioprotection de l'environnement en médecine nucléaire vise à limiter l'impact des rayonnements ionisants sur les milieux naturels. Elle repose sur la mise en œuvre de mesures strictes de prévention, notamment le confinement des substances radioactives, la gestion rigoureuse des déchets, le contrôle des rejets, ainsi que le respect des normes réglementaires en vigueur. Ces actions permettent de garantir la sécurité environnementale tout en assurant le bon déroulement des actes médicaux.

Tous les déchets générés par le service de Médecine Nucléaire (MN) sont collectés, triés, contrôlés et gérés directement par ce service. Les déchets issus des activités thérapeutiques ou d'autres services d'hospitalisation sont d'abord pris en charge dans leur service d'origine, où ils sont collectés, triés et gérés. Si nécessaire, ils sont ensuite transférés au service de MN pour y être placés en décroissance.

Les déchets ne sont éliminés qu'après une période de stockage correspondant à au moins dix périodes physiques du radionucléide ayant la période la plus longue présente dans le déchet concerné.

Tri et conditionnement des déchets

- **Déchets solides :** Les éléments tels que les gants, blouses, seringues..., sont triés en fonction de leur niveau de radioactivité. Ils sont ensuite placés dans des conteneurs plombés ou des sacs spécifiques adaptés à leur nature.
- **Déchets liquides :** Les substances comme les aérosols, les urines et autres liquides contaminés sont recueillies dans des cuves de décroissance, permettant ainsi la diminution de leur radioactivité avant d'être éliminées de manière sécurisée.

Contrôles préalables à l'élimination des déchets

Tous les déchets produits au sein du service de médecine nucléaire font systématiquement l'objet d'un contrôle avant leur évacuation via le circuit classique des déchets.

Une mesure du bruit de fond ainsi qu'une mesure au contact des poches ou des collecteurs d'aiguilles sont effectuées à l'aide d'un **contaminamètre**. Les déchets dont l'activité est inférieure à deux fois le niveau du bruit de fond peuvent être éliminés. Ceux présentant une activité supérieure sont placés en décroissance.

L'ensemble des opérations est enregistré dans le logiciel de gestion VENUS, qui conserve les résultats des mesures ainsi que la date d'élimination [12].

Stockage et transport

- **Stockage temporaire** : Les déchets sont entreposés provisoirement dans des zones dédiées, distinctes des espaces de travail, en attendant leur élimination.
- **Transport sécurisé** : Ils sont ensuite acheminés dans des conteneurs appropriés, conçus pour prévenir tout risque de contamination [13].

Élimination

- **Élimination après décroissance** : Les déchets sont éliminés après avoir subi une période de décroissance radioactive, réduisant ainsi leur nocivité.
- **Traitement des déchets de haute activité** : Les déchets hautement radioactifs sont traités en privilégiant des solutions de stockage en formations géologiques profondes, assurant leur isolement à long terme [14].

5 Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'explorer en profondeur le domaine de la médecine nucléaire et ses différentes branches, en mettant en lumière son rôle fondamental dans le diagnostic et le traitement de nombreuses pathologies. Nous nous sommes particulièrement intéressés au cancer de la thyroïde, en abordant ses différents types, ses mécanismes et ses modalités de prise en charge. L'irathérapie, ou traitement par l'iode radioactif, a été présentée comme une stratégie thérapeutique ciblée, efficace et largement utilisée dans le traitement des cancers thyroïdiens différenciés.

Enfin, nous avons souligné l'importance cruciale de la radioprotection, tant pour les patients que pour le personnel médical et l'environnement. La maîtrise des risques liés aux rayonnements ionisants constitue une exigence incontournable dans toute démarche de médecine nucléaire, afin d'assurer la sécurité de tous les acteurs impliqués.

On a mis en évidence l'équilibre délicat entre l'efficacité thérapeutique des techniques nucléaires et la nécessité de limiter au maximum l'exposition aux rayonnements. Il confirme

aussi l'importance d'une formation continue et d'un encadrement strict pour garantir une pratique sûre et responsable de la médecine nucléaire.

Références bibliographiques du chapitre III :

- [1] BARBIER Y, GALY G. – Les radio pharmaceutiques : Guide pratique du contrôle de Qualité en médecine nucléaire – 1994, éditions de l'ACOMEN (Groupe d'Action Concertée En Médecine Nucléaire du sud de la France), 8 av. Rockefeller, 69008 Lyon.
- [2] Gonzalez S, thèse de doctorat, ' la dimension éthique dans l'information du patient en médecine nucléaire', ' université Marseille', 2020.
- [3] Bensaber S, Benbelaid H, BERRABAH W, Berrabah N, mémoire de fin d'étude pour l'obtention du diplôme de docteur en médecine, ' L'irathérapie dans les carcinomes papillaires de la thyroïde avec métastases pulmonaires', 'université de Tlemcen', 2022.
- [4] Adimi B, Belkhouni Y, mémoire de master en biochimie, ' cancer de la thyroïde ', 'université de Constantine', 2023.
- [5] ALLG Kh, BENSALEM B, mémoire de master en biochimie, 'Cancer de la thyroïde', 'Université de Constantine', 2016.
- [6] PDF, support de cours ' Item 241- Nodule thyroïdien', Collège des Enseignants d'Endocrinologie, Diabète et Maladies Métaboliques (CEEDMM), 2011.
- [7] Olivier C, guide, ' les traitements des cancers de la thyroïde', 'institut nationale du cancer en France', 2013
- [8] Mathilde R, thèse de doctorat, ' le traitement de l'iode radioactif : perception du risque, qualité de vie et stratégies d'adaptation des patients ayant un cancer de la thyroïde', 'université bretagne', 2018.
- [9] Anne-Laure G, thèse de doctorat en médecine nucléaire, 'Radiothérapie interne vectorisée appliquée aux synovial sarcomes : mise en place d'une étude de phase 1', 'Université de Lyon', 2018.
- [10] ZAATOUT CH, BEN-ATAILAH H, mémoire de master en physique médicale, ' Étude de la radioprotection dans le service de Médecine Nucléaire de l'hôpital Mohamed Boudiaf Ouargla', 'université KASDI MERBAH OUARGLA', 2023.
- [11] Procédure 'PLAN DE GESTION DES DECHETS ET DES EFFLUENTS RADIOACTIFS', 'Hôpital d'ALBI', 2022.

[12] Document 'plan de gestion des déchets et des effluents radioactifs', 'centre hospitalier universitaire de Caen', 2024.

[13] Fabienne S, Christian W, Christian H, Document , 'gestion des déchets médicaux radioactifs au sein des institution hospitalières', 2001.

[14] Ladour N, mémoire de master en physique des matériaux et modélisation numérique, 'Détermination de l'efficacité d'un gamma caméra', 'université Bordj Bou Arreridj', 2018.



Conclusion générale

Conclusion générale

Ce mémoire a permis d'explorer comment les radiations radioactives peuvent être utilisées pour détruire les cellules cancéreuses, en s'appuyant sur des bases à la fois physiques, biologiques et médicales. À partir des phénomènes de désintégration et des types de rayonnements émis (alpha, bêta, gamma), nous avons analysé leur interaction avec la matière, en particulier avec la matière vivante.

Ces rayonnements, lorsqu'ils traversent le corps humain, peuvent transférer leur énergie aux cellules. Cela provoque des effets physico-chimiques, comme la radiolyse de l'eau et la formation de radicaux libres, capables d'endommager les cibles cellulaires comme l'ADN. Si ces dommages ne sont pas réparés, ils peuvent entraîner la mort de la cellule cancéreuse. C'est sur ce principe que reposent les traitements comme la radiothérapie externe ou la médecine nucléaire, où des substances radioactives comme l'iode-131 sont utilisées pour traiter certaines tumeurs, notamment celles de la thyroïde.

Le stage effectué au sein du service de la médecine nucléaire à l'établissement privé 'les Amandiers', Mekla Tizi-Ouzou a apporté une compréhension pratique à cette étude. Cette expérience nous a permis de mieux comprendre l'utilisation réelle de la radioactivité dans un contexte clinique, en observant l'administration du traitement par iode 131, le suivi des patients et les règles de sécurité appliquées pour éviter toute exposition inutile. Lors du stage effectué, il nous a été communiqué par le personnel soignant que le taux de réussite des traitements le radio isotope iode 131 avoisine les 90 %, ce qui confirme l'efficacité de cette méthode.

Bien que les résultats soient encourageants, l'utilisation des radiations radioactives à des fins thérapeutiques, présente encore certaines limites. Il peut y avoir des effets secondaires, notamment sur les tissus sains qui avoisinent la tumeur, et il est parfois difficile de cibler uniquement les cellules malades. C'est pourquoi les chercheurs continuent de développer des technologies plus précises, comme la radiothérapie conformationnelle, la protonthérapie ou encore l'utilisation de l'intelligence artificielle pour mieux adapter les doses aux besoins de chaque patient.

En résumé, les radiations radioactives représentent un outil puissant dans la lutte contre le cancer. Leur efficacité dépend d'une bonne maîtrise des phénomènes physiques, mais aussi d'une compréhension fine des réactions biologiques. Ce mémoire a tenté d'apporter une vision globale et équilibrée de cette intervention thérapeutique, qui continue d'évoluer pour offrir aux patients des traitements à la fois plus efficaces et plus sécurisés.

Résumé

La lutte contre le cancer représente l'un des plus grands défis de la médecine moderne. Parmi les méthodes diverses thérapeutiques développées, l'utilisation des radiations radioactives reste une tactique efficace grâce à leur capacité à cibler et à détruire les cellules cancéreuses de manière précise sans endommager les tissus sains.

Ce mémoire s'intéresse au principe même de la radioactivité et à son application dans un domaine médical, en mettant l'accent sur ses effets au niveau cellulaire. L'étude se base sur des notions fondamentales de la physique nucléaire pour expliquer les mécanismes d'interactions des rayonnements avec la matière vivante. En prenant pour exemple le cancer de la thyroïde, cette exploration s'appuie sur l'efficacité des traitements par Iode radioactif, qui permettent l'accompagnement et le traitement efficace de certaines tumeurs. Ce travail met en évidence le potentiel thérapeutique des isotopes radioactifs et l'importance d'une application maîtrisée et surveillée de ces techniques.

Radioactivité, radiations ionisantes, désintégration radioactive, interaction rayonnement-matière, médecine nucléaire, iode radioactif, cancer de la thyroïde, irathérapie, radioprotection.

Abstract

The fight against cancer is one of the greatest challenges facing modern medicine. Among the various therapeutic methods developed, the use of radioactive radiation remains an effective tactic thanks to its ability to precisely target and destroy cancer cells without damaging healthy tissue.

This thesis examines the principle of radioactivity and its application in the medical field, focusing on its effects at the cellular level. The study draws on fundamental notions of nuclear physics to explain the mechanisms by which radiation interacts with living matter. Taking thyroid cancer as an example, this exploration is based on the effectiveness of radioactive iodine treatments, which enable certain tumors to be accompanied and effectively treated. This work highlights the therapeutic potential of radioactive isotopes, and the importance of controlled, monitored application of these techniques.

