

INTERACTION RAYONNEMENT – MATIERE

Abdelhai Ben Ali*, Université d'El Oued Année universitaire 2016/2017

* Abdelhai Ben Ali est chercheur postdoctoral à l'Ohio State University et ancien professeur à l'université El Oued où il enseigne ce cours aux étudiants dans le cadre de l'unité "Biophysique".

1. Introduction

On appelle rayonnement ou radiation le processus d'émission ou de transmission d'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques ou de particules.

1.1. Objectifs

Le but du cours d'interaction rayonnement matière est :

- 1/ Comprendre que la physique des rayonnements ionisants est fondamentale en raison du nombre de secteurs médicaux utilisateurs des rayonnements ionisants.
- 2/ Acquérir les notions de base dans la physique de l'atome, la radioactivité en générale, le comportement de rayonnement ionisant vis-à-vis la matière.
- 3/ Acquérir de notion sur la radioprotection pour sensibiliser sur les précautions à suivre et sur le respect des normes internationaux.

1.2. Exemples d'application médicale

Toutes les filières radiologiques reposent sur une interaction entre matière et rayonnement.

Radiographie RX : l'image sur le film met en évidence les os, zones pour lesquelles l'absorption des RX est forte.

IRM : imagerie basée sur le principe de résonance magnétique nucléaire, en présence d'un champ magnétique les noyaux absorbent de l'énergie venant d'une onde radiofréquence ce qui modifie leur aimantation. Tous les noyaux ne réagissent pas de la même façon.

Scintigraphie : émission de rayonnement gamma (γ) émis par un radiotraceur, le détecteur doit pouvoir détecter les photons γ de façon quantitative.

Radiothérapie : la radiothérapie est une méthode de traitement des cancers qui utilise les rayonnements ionisants, afin de détruire les cellules tumorales.

2. Rappels sur les atomes et les rayonnements

2.1. Structure de l'atome

Les atomes sont constitués d'un noyau composé de nucléons (protons et neutrons) et d'un cortège d'électrons. Chaque atome est caractérisé par son numéro atomique Z (nombre de protons qui est égal au nombre d'électrons à l'état non ionisé) et son nombre de masse A (nombre de nucléons égal à la somme des nombres de protons et de neutrons du noyau atomique). Deux atomes sont dits « isotopes » s'ils possèdent le même nombre de protons, mais ont un nombre de neutrons différents, exemples (6 protons et 8 neutrons) et (6 protons et 6 neutrons) sont deux isotopes de l'atome carbone.

Symbole d'un atome X : A_ZX

A : nombre de nucléons (neutrons + protons).

Z : nombre de protons.

Nucléide : espèce atomique définie par ses nombres A et Z.

Radionucléide : nucléide radioactif.

Interaction Rayonnement – Matière

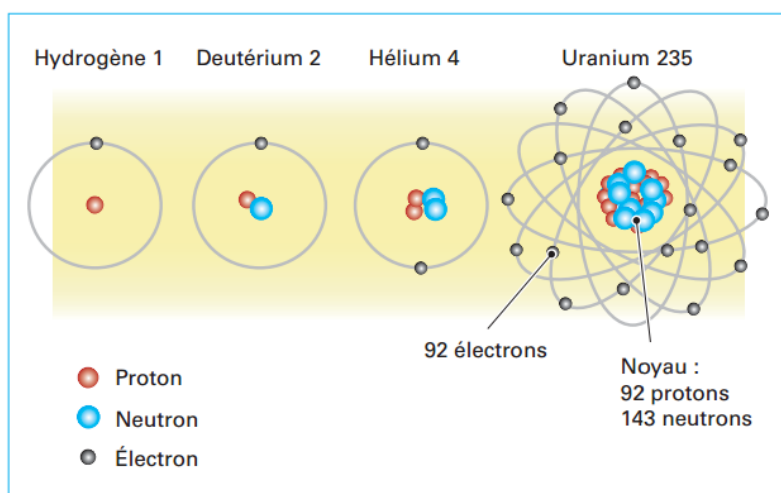


Figure 1. Constitution des atomes

La figure 1 présente les configurations des atomes de deux isotopes de l'hydrogène ^1H , ^2H (deutérium), de l'hélium ^4He et de l'uranium $^{235}_{92}\text{U}$.

2.2. Classification des rayonnements

Les rayonnements peuvent être classés en deux grandes catégories suivant leur nature, et aussi selon leurs inductions sur la matière. En rayonnements non-ionisants et rayonnements ionisants.

- ✓ Rayonnement non-ionisant ne peut pas ioniser la matière.
- ✓ Rayonnement ionisant peut ioniser la matière.

Ces rayonnements ionisants sont soit :

- a. des particules chargées, dites « **directement ionisantes** » (RII), comme des alphas (α : noyaux d'hélium He^{++}), des bêtas (β : électrons + ou -), des protons (p^+) ou des ions lourds;
- b. des particules non chargées, dites « **indirectement ionisantes** » (RDI), des neutrons (n) ou des photons (γ : gamma s'ils sont issus d'un noyau radioactif ou X s'ils sont issus de transitions dans le cortège électronique d'un atome).

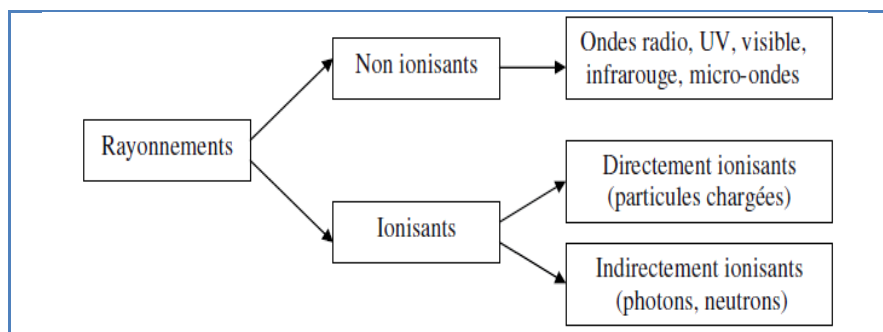


Figure 2. Classifications des rayonnements.

Les rayonnements ionisants peuvent être émis à partir de **sources radioactives** ou produits par **appareils électriques** (tubes à RX, accélérateurs de particules, générateurs de neutrons...).

2.3. Interaction des photons (rayons X et γ) avec la matière

Les photons sont des **rayonnements électromagnétiques sans masse en repos**, et très pénétrants dans la matière. Dans le domaine d'énergie qui nous intéresse (milieu médicale), le photon interagit dans la matière suivant **trois processus principaux** :

a. L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est l'interaction du photon avec **un électron fortement lié de l'atome** constituant la matière voire figure (3), l'électron éjecté emporte une énergie cinétique E_c égale à la différence entre l'énergie E_{hv} du photon incident et son énergie de liaison W .

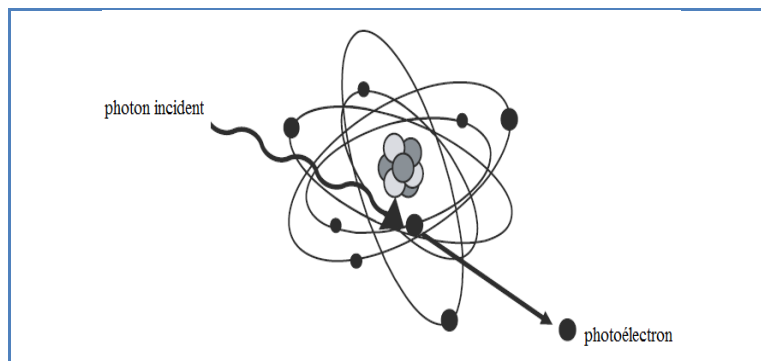


Figure 3. Effet photoélectrique.

b. Effet Compton

Ce phénomène, appelé **diffusion Compton**, elle représente l'interaction du photon avec **les électrons des couches périphériques** (électron quasi libres). Le photon est alors diffusé avec une énergie inférieure à son énergie incidente $h\nu_0$, et l'électron reculant selon l'angle θ_e (voir figure 4).

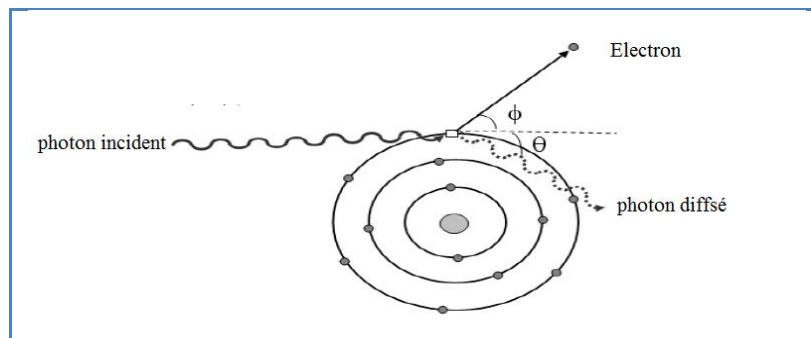


Figure 4. Effet Compton.

c. Effet de production de paire

L'effet de production de paire ou matérialisation consiste en **la création d'une paire électron-positon** lorsqu'un photon pénètre dans le champ coulombien d'un noyau. Le photon disparaît et donne naissance à un positon et un électron (négaton). **L'énergie nécessaire** pour obtenir la matérialisation de cette paire est égale à **1,022 MeV**. Au-dessous de cette valeur, la réalisation de cet effet est énergétiquement impossible.

Interaction Rayonnement – Matière

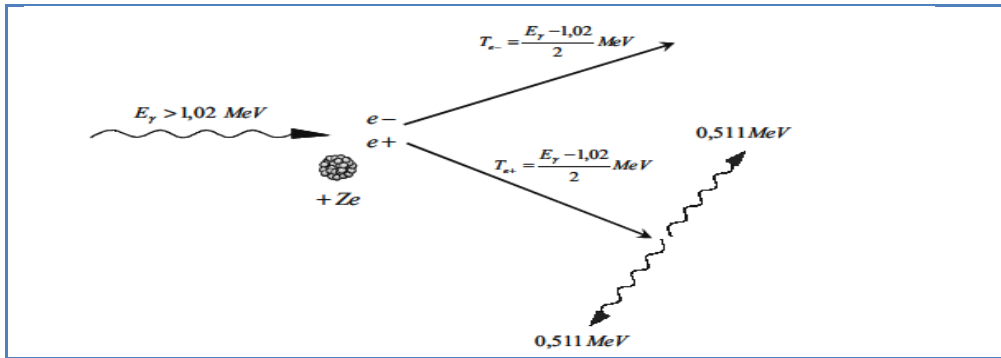


Figure 5. Effet production de pair.

d. Loi d'atténuation

L'interaction des rayonnements électromagnétiques avec la matière se traduit par **l'atténuation du faisceau incident**. Ainsi, dans le cas d'un faisceau mono-énergétique parallèle, l'intensité du faisceau I n'ayant pas été atténuée par milieu traversé d'épaisseur x est liée au faisceau incident I_0 par une loi exponentielle du type:

$$I(x) = I_0 \times e^{-\mu x} \quad (1)$$

I_0 : le flux de photons du faisceau incident;

$I(x)$: le flux de photons sortant d'un milieu absorbant d'épaisseur x ;

$e^{-\mu x}$: représente la fraction de photons qui n'ont pas interagi, on appelle aussi ce membre d'équation le facteur de transmission.

où μ est le coefficient d'atténuation linéique dont la valeur dépend de l'énergie du rayonnement et de la nature du milieu traversé.

Dans le cas où l'objet imagé **n'est pas homogène**, le faisceau transmis est lié à l'intégrale le long de la trajectoire rectiligne du faisceau D (figure 5). L'équation (1) devient :

$$I = I_0 \times e^{-\int_D \mu(x) dx} \quad (2)$$

Le faisceau parcourt successivement les distances d_i dans les matériaux de coefficients d'atténuation μ_i .

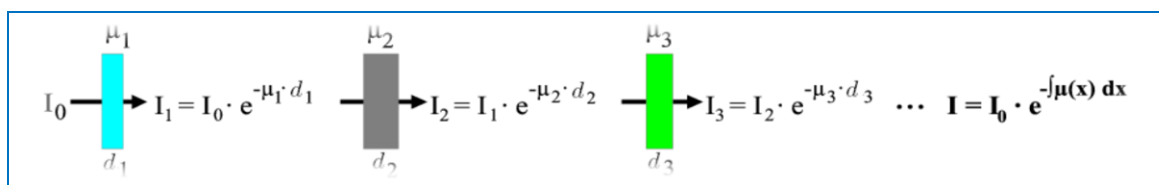


Figure 6. Calcul de l'atténuation du faisceau dans l'objet

I_0 est l'intensité du faisceau incident et d_i correspond à la distance parcourue par le faisceau dans le matériau de coefficient d'atténuation linéique μ_i .

3. La radioactivité

3.1. Définition

Interaction Rayonnement – Matière

Parmi tous les atomes, sont radioactifs ceux dont les noyaux sont instables et se transforment alors spontanément, directement ou indirectement, en noyaux stables. Lors de ces transformations sont émis des rayonnements α , β ou γ (cf. figure 7).

La radioactivité peut être d'origine naturelle (due aux rayonnements cosmiques et telluriques) ou artificielle obtenue par des réactions nucléaires. Bien entendu un isotope donné, qu'il soit d'origine naturelle ou artificielle, a exactement les mêmes propriétés radioactives.

Parmi les radionucléides d'origine naturelle les plus connus, il faut citer le tritium (^3H) et le carbone 14 (^{14}C) qui sont d'origine cosmique et les familles radioactives du thorium et de l'uranium qui sont présents dans la couche terrestre (rayonnement tellurique).



Figure 7. Grands personnages ayant marqué l'histoire de la radioactivité et des rayonnements ionisants.

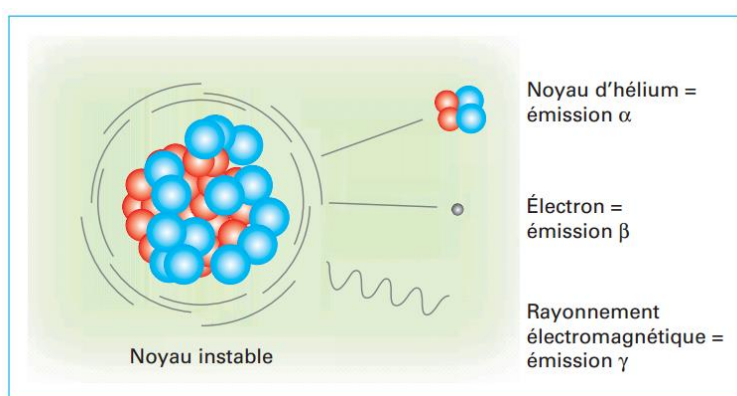


Figure 8. Désintégration d'un noyau instable

3.2. L'activité et le becquerel

Une substance radioactive est caractérisée par son « activité ». Cette grandeur traduit le nombre de désintégrations qui se produit par unité de temps.

Interaction Rayonnement – Matière

Avant l'introduction du Système International pour les unités de mesure (S.I.), l'activité était exprimée en **curie (Ci)**. Le curie correspond au nombre de désintégrations par seconde produites par 1 gramme de radium à l'équilibre, soit 37 milliards de désintégrations par seconde.

Cette unité est remplacée depuis plusieurs années par le becquerel (Bq) qui est égal à 1 désintégration par seconde. Ainsi, 1 Ci équivaut à 37 milliards de Bq.

On utilise communément les multiples méga (MBq), giga (GBq) et téraBecquerel (TBq) (respectivement, 1 million, 1 milliard et mille milliards de becquerels) ou plus rarement le sous-multiple millibecquerel (mBq) pour les mesures liées à l'environnement.

3.3. La période radioactive

La période (notée $T_{1/2}$) est le temps au bout duquel l'activité initiale est divisée de moitié. Ainsi, celle-ci sera divisée par 2 au bout d'une période, par 4 au bout de deux périodes etc. Les périodes peuvent être très différentes.

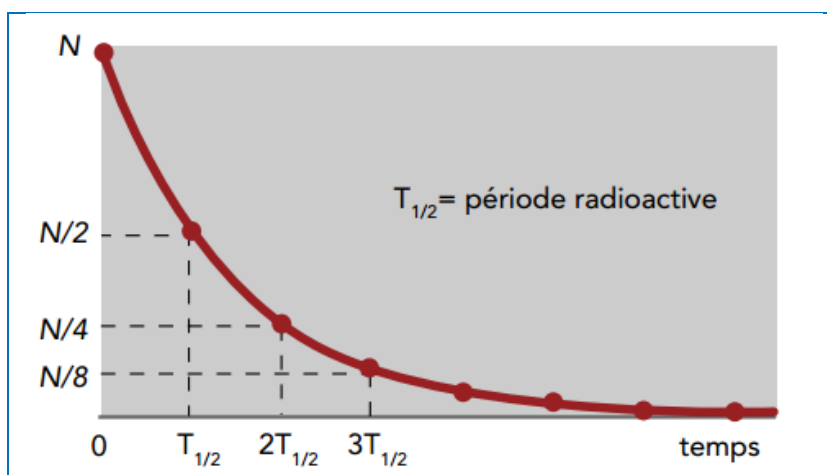


Figure 9. La période radioactive

Exemples :

20 minutes pour le carbone 11,

8 jours pour l'iode 131,

5,3 ans pour le cobalt 60,

5730 ans pour le carbone 14,

4,5 milliards d'années pour l'uranium 238.

4. Rayon X

Interaction Rayonnement – Matière

Les **rayons X** sont une forme de rayonnement électromagnétique à haute fréquence constitué de photons de faible longueur d'onde. L'énergie de ces photons va d'une centaine d'eV (électron-volt), à environ un MeV.

Les rayons X et les **rayons gamma** (γ) sont de même nature, mais sont produits différemment : les rayons X sont produits par des transitions électroniques alors que les rayons gamma sont produits lors de la désintégration radioactive des noyaux des atomes ou d'autres processus nucléaires ou subatomiques.

4.1. Générateurs de rayons X

Les appareils les plus répandus sont les **générateurs de rayons X** (figure 4) utilisés dans l'industrie dans des installations fixes pour contrôler des éléments de l'industrie automobile ou aéronautique par exemple, mais surtout en médecine pour le radiodiagnostic classique.

Le principe est toujours le même, il s'agit de projeter des électrons accélérés sous une forte tension (de plusieurs kilovolts) sur une cible métallique, en général du tungstène, dans laquelle l'absorption de ces électrons provoque un rayonnement de freinage qui est constitué de photons (rayons X) (figure 4).

En milieu **médical** sont utilisés des RX émis sous 30 kV en mammographie, sous 50 à 60 kV en radiologie dentaire et entre 100 et 200 kV en radiologie classique ou scanner. De même dans le domaine **industriel**, on peut trouver des RX émis sous des tensions comprises entre 50 et 250 kV selon la nature des éléments à radiographier.

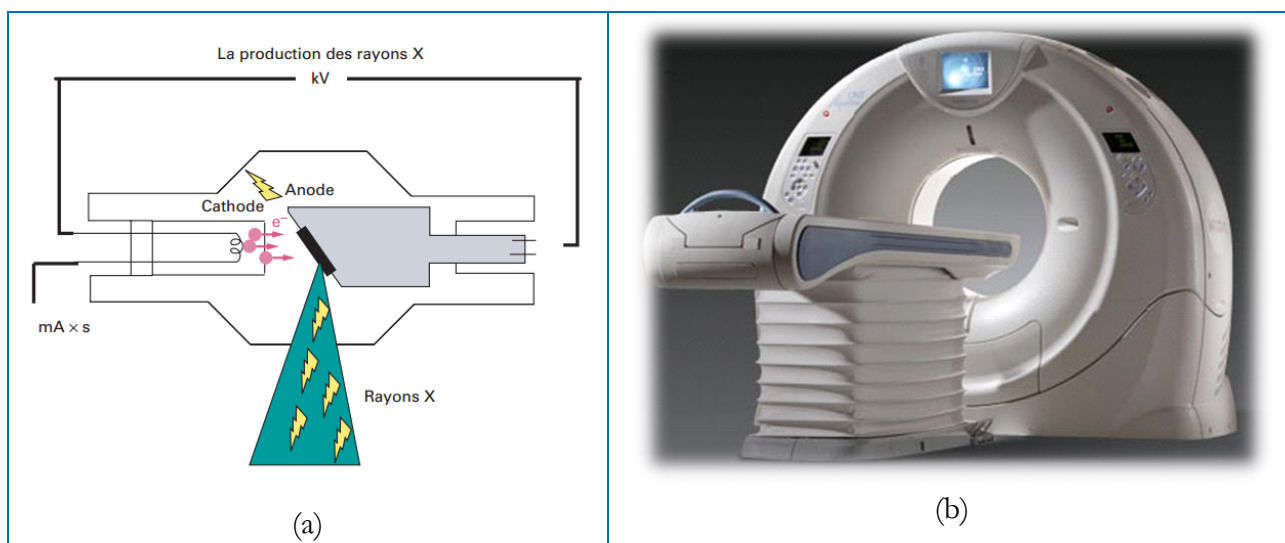


Figure 10. (a) Schéma de principe d'un tube à rayons X, (b) Scanner de 320 barrettes ("Toshiba Aquilion One", le plus développée au monde)

4.2. Accélérateurs de particules

Au-delà d'une certaine énergie du rayonnement, les tubes à rayons X ne sont plus adaptés et il est nécessaire d'avoir recours à d'autres types d'appareils : les **accélérateurs de particules** et en particulier, les accélérateurs d'électrons.

Interaction Rayonnement – Matière

Ces électrons sont accélérés sous des tensions de plusieurs mégavolts (MV) et sont utilisés soit directement pour des irradiations sur des faibles épaisseurs de matériaux ; soit projetés sur une cible métallique pour produire des **RX de très haute énergie** dont le parcours dans la matière est beaucoup plus élevé.

En médecine, on utilise les faisceaux d'électrons pour soigner des tumeurs cancéreuses superficielles et des faisceaux de RX pour les tumeurs plus profondes, la tension d'accélération étant choisie en fonction de la profondeur de la tumeur à traiter.

Dans l'industrie également, on peut utiliser ces appareils soit en émission d'électrons pour irradier à fortes doses des éléments de faible épaisseur (traitement de certains plastiques), soit en RX pour des irradiations en profondeur...

5. Effet biologique des radiations

Les rayonnements ionisants lors de leur interaction avec la matière provoquent des ionisations et des excitations qui peuvent entraîner des **modifications de structure** de cette matière. Lorsqu'il s'agit de matière vivante les effets induits sont variables en fonction des doses, des débits de dose, des types de rayonnements et de la radiosensibilité des tissus irradiés.

Les mécanismes d'action et de réaction sont complexes au niveau cellulaire, mais d'une manière générale les rayonnements ionisants induisent la **création de radicaux libres toxiques** (car très oxydants, donc très réactifs) pour les cellules et leurs éléments constitutifs en particulier la molécule d'ADN. Les atteintes peuvent être réparables, définitives, ou entraîner des mutations.

5.1. Altérations de l'ADN

Les radiations ionisantes produisent des **modifications** au niveau des atomes et des molécules. Dans la cellule vivante, certaines de ces altérations peuvent avoir des conséquences à court ou à long terme. Les effets les plus graves se produisent au niveau de la molécule d'ADN, qui peut être cassée soit sur un seul de ses deux brins (CSB), soit sur les deux brins (CDB).

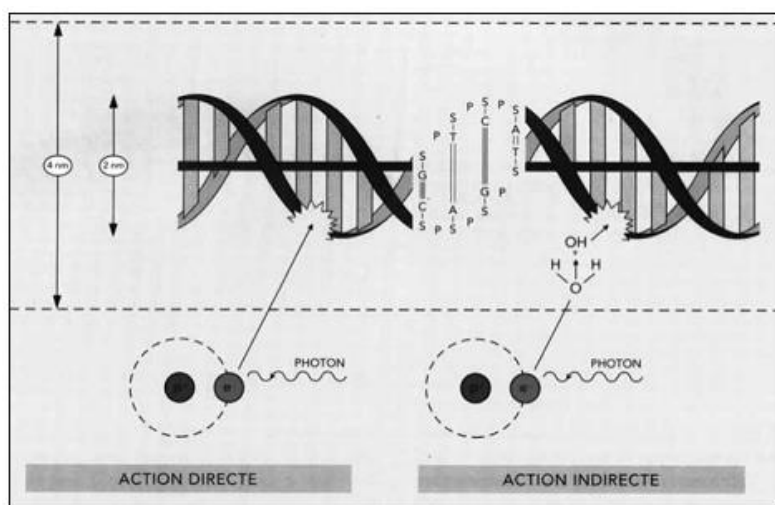


Figure 11. Effets directs et indirects des rayonnements sur l'ADN.

Interaction Rayonnement – Matière

Ces cassures peuvent résulter d'un **effet direct** du rayonnement sur la molécule d'ADN, ou d'une **attaque secondaire** d'un radical libre OH° , très réactif, formé lors de la radiolyse de l'eau induite par l'irradiation du milieu avoisinant l'ADN (Figure 11).

Ces cassures peuvent également survenir pour des raisons endogènes liées au métabolisme cellulaire. On estime aujourd'hui qu'il existe 3000 cassures simple-brin par jour et par cellule et que 1 % se transforme en cassures double-brins.

Si ces dommages sont réparés parfaitement par les mécanismes enzymatiques en place dans la cellule, c'est pratiquement le cas pour les cassures simple-brin, la survie cellulaire sera alors normale.

À l'inverse, si l'énergie cédée conduit à des dommages irréparables, la cellule mourra. Cette mort peut survenir par deux mécanismes. L'un des deux, **la nécrose**, conduit à un éclatement des structures cellulaires et au relargage de son contenu plus ou moins agressif, dans le milieu avoisinant. Il en résultera une réaction inflammatoire. Le second, **l'apoptose** intervient lorsque la cellule garde encore un mécanisme de contrôle, qui conduira à une mort programmée. Cette mort programmée évite de transmettre une information préjudiciable au système cellulaire. La cellule est transformée en fragments non agressifs pour le milieu ambiant. Cette mort par apoptose est un mécanisme régulateur qui combat les mécanismes d'apparition d'effets tardifs graves comme le cancer.

5.2. Effets déterministes et stochastiques :

On distingue les **effets déterministes (ou non stochastiques)** qui sont observés de façon obligatoire en fonction des doses reçues à partir de valeurs seuils (de l'ordre du gray) et les **effets stochastiques (aléatoires ou probabilistes)** dont la probabilité d'apparition augmente avec la dose (de l'ordre du mGy).

Les **effets déterministes** sont aujourd'hui bien connus. La gravité de ces effets est fonction de l'importance de la dose reçue par l'organisme et de la localisation de l'exposition (partielle ou globale).

Encadré 1 : Quelques ordres de grandeur de doses (effets déterministes)

- Stérilisation de denrées alimentaires, d'outils chirurgicaux ou autres : 10 à 50 kilograys.
- Traitement de tumeurs cancéreuses : 50 à 100 grays.
- Accidents radiologiques :
 - exposition globale :
 - < 0,30 gray : aucun effet déterministe.
 - 0,30 à 1 gray : chute des lymphocytes réversibles.
 - 1 à 2 grays : chute précoce des lymphocytes, hospitalisation en milieu spécialisé.
 - 2 à 5 grays : nausées, vomissements dès les deux premières heures, hospitalisation en milieu spécialisé, réanimation hématologique.
 - > 5 grays : hospitalisation lourde, pronostic réservé et décès probable.
 - exposition localisée :
 - 4 à 5 grays : érythème.
 - 5 à 12 grays : épidermite sèche.
 - 12 à 20 grays : épidermite exsudative.
 - > 20 grays : nécrose.

Par contre, les **effets stochastiques** à faibles doses sont plus difficiles à évaluer car les questions posées relatives aux conséquences de ces effets, n'ont pas toutes aujourd'hui de réponse définitive, ce qui est à l'origine de controverses scientifiques et sociétales. Les réponses attendues viendront probablement des progrès de la **biologie moléculaire** et du développement des travaux en matière **d'épidémiologie**.

6. Radioprotection

Le but de la radioprotection est d'empêcher ou de réduire les risques liés aux rayonnements ionisants. Afin d'éviter ou réduire ces risques, la radioprotection s'appuie sur trois grands principes : **justification**, **optimisation** et **limitation** des doses de rayonnements. Pour appliquer ces principes, la radioprotection met en œuvre des moyens réglementaires et techniques spécifiquement adaptés à trois catégories de population : le public, les patients et les travailleurs.

L'irradiation d'un organisme engendre des lésions plus ou moins importantes. La grandeur utilisée pour quantifier la quantité de rayonnement reçu est la **dose**. C'est donc l'estimation de la dose, la dosimétrie, qui permet de quantifier l'atteinte de l'homme résultant des différents types d'expositions.

6.1. Dose absorbée

La dose absorbée est définie comme la quantité d'énergie du rayonnement absorbée par unité de masse de matière irradiée :

$$D = dE/dm \quad (3)$$

La dose absorbée s'exprime en **gray (Gy)** et correspond à une énergie dissipée de 1 joule par kg. C'est une grandeur physique qui est mesurable et met en jeu des phénomènes à l'échelle macroscopique.

6.2. Dose équivalente

La dose équivalente est une grandeur de radioprotection définie comme la dose absorbée, pondérée par un facteur (w_R) qui tient compte de la distribution de l'énergie dans la matière vivante et diffère selon la nature des rayonnements ionisants :

$$D_e = D \times w_R \quad (4)$$

La dose équivalente s'exprime en **sievert (Sv)**.

Pour les photons et les électrons $w_R = 1$; pour les alphas $w_R = 20$; pour les neutrons w_R varie en fonction de l'énergie comme indiqué dans le tableau 1.

Note : dans le cas de plusieurs types de rayonnement, la dose équivalente est alors la somme des doses équivalentes correspondant à chaque type de rayonnement :

$$D_e = \sum_i D_{e,i} \quad (5)$$

6.3. Dose efficace

La dose efficace est une grandeur de radioprotection qui tient compte des radiosensibilités des différents organes lorsque ceux-ci sont exposés. Elle permet ainsi d'apprécier l'impact à l'échelle de l'organisme entier d'une exposition aux rayonnements ionisants d'un ou plusieurs organes. En outre, cette dose efficace permet d'évaluer les conséquences des expositions pouvant être à l'origine des effets stochastiques (aléatoires) des rayonnements ionisants.

La relation entre la dose efficace et les doses équivalentes aux différents tissus et organes est la suivante :

$$D_{eff} = \sum D_{e,T} \times w_T \quad (6)$$

Avec : $D_{e,T}$ dose équivalente au tissu T,

w_R facteur de pondération tissulaire (voir tableau 2).

Par définition, la somme de ces facteurs de pondération est égale à 1.

La dose efficace s'exprime en **sievert (Sv)** et c'est une grandeur, comme la dose équivalente, qui est uniquement calculée et qui ne se mesure pas.

Tableau 1 : Facteurs de pondération du rayonnement w_R

Nature – Énergie		w_R
Photons (toutes les énergies)		1
Électrons, muons (toutes les énergies)		1
Neutrons	< 10 keV	5
	> 10 keV-100 keV	10
	> 100 keV-2 MeV	20
	> 2 MeV-20 MeV	10
	> 20 MeV	5
Protons	> 2 MeV	5
Particules α , fragments de fissions, noyaux lourds		20

Tableau 2 : Facteurs de pondération tissulaire w_T

Tissu ou organe	w_T
Gonades	0,20
Moëlle osseuse (rouge)	0,12
Côlon	0,12
Poumon	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,05
Seins	0,05
Foie	0,05
Œsophage	0,05
Thyroïde	0,05
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres tissus ou organes	0,05

7. Références

Alain Biau et Jean-Pierre Vidal, Protection contre les dangers des rayonnements ionisants. Techniques de l'Ingénieur, date de publication : 10/06/2009.

D. Delacroix, J.-P. Guerre et P. Leblanc. Radionucléides & Radioprotection. RADIOPROTECTION, Vol. 39, numéro spécial, Revue de la Société Française de Radioprotection. 2006.

Christine Jimonet et Henri Métivier, coordonnateurs. Personne compétente en radioprotection : Principes de radioprotection – réglementation. EDP Sciences 2007. ISBN : 978-2-86883-948-0.