

---

*Généralités sur les  
rayonnements*

## Introduction

L'étude de l'interaction des rayonnements avec la matière a été en grande partie réalisée au vingtième siècle et trouve son origine dans la découverte de la radioactivité par Henri Becquerel. La matière et les radiations ionisants quel que soit leurs aspects sont deux concepts liés entres eux, car lorsqu'un rayonnement ionisant électromagnétique ou corpusculaire, directement ou indirectement ionisant pénètre dans la matière, inerte ou vivante, il peut interagir avec les électrons des atomes de cette matière selon son énergie qui elle peut être suffisante pour l'ionisation (arrachement des électrons) des atomes de la matière. En effet le dépôt d'énergie dans cette dernière, qui conduit à des effets biologiques différés sur la matière vivante.

Nous allons aborder dans ce chapitre, une revue sommaire sur les radiations et un peu plus en détails sur les rayons X et leurs interactions avec la matière. Ensuite, dans la seconde partie on s'intéresse à la dosimétrie ainsi qu'aux effets biologiques des rayonnements.

### I.1. Les radiations

#### I.1.1. Généralités sur les radiations

##### I.1.1.1. Définition du rayonnement (radiation)

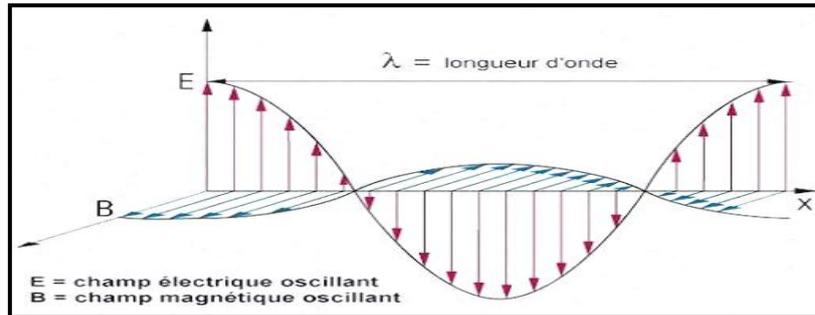
Un rayonnement dans la physique est la propagation de l'énergie dans l'espace, vide ou matériel. Cette énergie, qui est dite « énergie rayonnée » ou « énergie radiante », trouver sous forme soit d'ondes électromagnétiques (photon), soit de particules massives (rayonnement corpusculaire) (Farah 2010).

##### I.1.1.2. Les type des rayonnements

###### A. Rayonnement électromagnétique

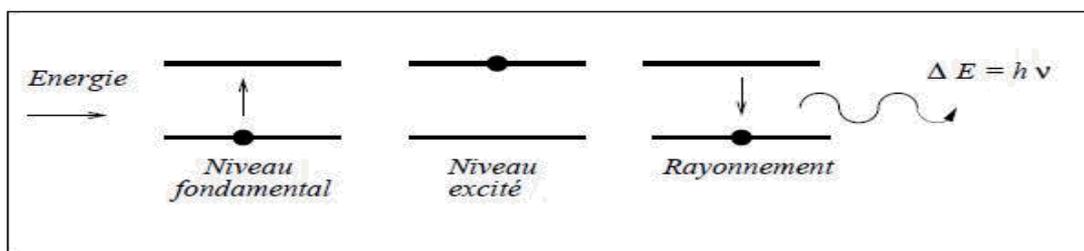
Un rayonnement électromagnétique est un phénomène caractérise par un flux de particules dépourvues de masse, les photons, associés à une onde, l'onde électromagnétique. On peut également définit le rayonnement électromagnétique comme suit : la propagation d'un champ magnétique ( $\vec{B}$ ) et d'un champ électrique ( $\vec{E}$ ) ( $\vec{B}$  et  $\vec{E}$  sont perpendiculaires) en ligne droite à partir d'une même source constituée par une ou plusieurs charges en mouvement alternatif, comme représente le figure (I.1) (Boukabcha 2010).Le rayonnement électromagnétique trouve son origine (Ounoughi 2015) :

- Lors d'une transition électronique entre deux états d'énergie d'un atome.
- Lors du freinage d'une particule chargée au voisinage du noyau de l'atome dans la matière.
- Lors de la transition d'un nucléon entre les états d'énergie du noyau(Y).



**Figure(I.1) : Rayonnement électromagnétique**

(<https://geobiologievivianeaubrycorvisier.wordpress.com>).



**Figure (I.2) : Principe de l'émission d'un photon lors d'une transition entre deux niveaux énergétiques (Ounoughi 2015).**

## B. Rayonnement corpusculaire

Ce type de rayonnement est formé par des particules massives. Des faisceaux de ces rayonnements peuvent être produits par :

- Substances radioactives.
- Accélérateur de particules.
- Réacteurs nucléaires (Ounoughi 2015).

### I.1.1.3. Classification des rayonnements

#### A. Les rayonnements ionisants

On dit qu'un rayonnement est ionisant lorsque l'énergie est suffisante pour arracher un électron aux atomes du milieu absorbant et les transformer en ions positifs. L'atome le plus facile à ioniser est le potassium, avec une énergie d'ionisation de 4,3. L'énergie de liaison des électrons les moins liés des atomes de la matière vivante (H, C, N, O) est 12,4 eV. Les rayonnements peuvent être classés selon leur façon de produire des ionisations dans la matière, en utilisant leur propre pouvoir (radiations directement ionisantes) ou par l'intermédiaire de particules chargées (radiation indirectement ionisantes) (Kuban 2013):

➤ **Les rayonnements directement ionisants**

Ces rayonnements sont des particules chargées qui délivrent leur énergie d'une façon directe à la matière, grâce aux forces coulombiennes. Les transferts d'énergie dépendent des particules et de leur énergie, qui trouve sous forme de deux types : les particules chargées lourdes (proton, deuton, alpha, ions lourds) et les Particules chargées légères (électrons)(Ounoughi 2015).

➤ **Les rayonnements indirectement ionisants**

Ces rayonnements sont électriquement neutres (non chargés), susceptibles de transférer une fraction ou la totalité de leur énergie en une seule interaction à des particules Chargées. Ensuite ces particules secondaires ou annexes ionisent le milieu. Les rayonnements qui sont participes dans ce cas sont Les rayonnements électromagnétiques (X et  $\gamma$ ) et les neutrons (Ounoughi 2015).

**B. Les rayonnements non ionisants**

Ce sont des rayonnements dont l'énergie est insuffisante pour ioniser les atomes, ce sont les électromagnétiques qui sont leurs énergie inferieur de 12.4 eV (Onde radio, Ultra-violet, Visible, infra rouge, Micro-onde) (Kuban 2013).

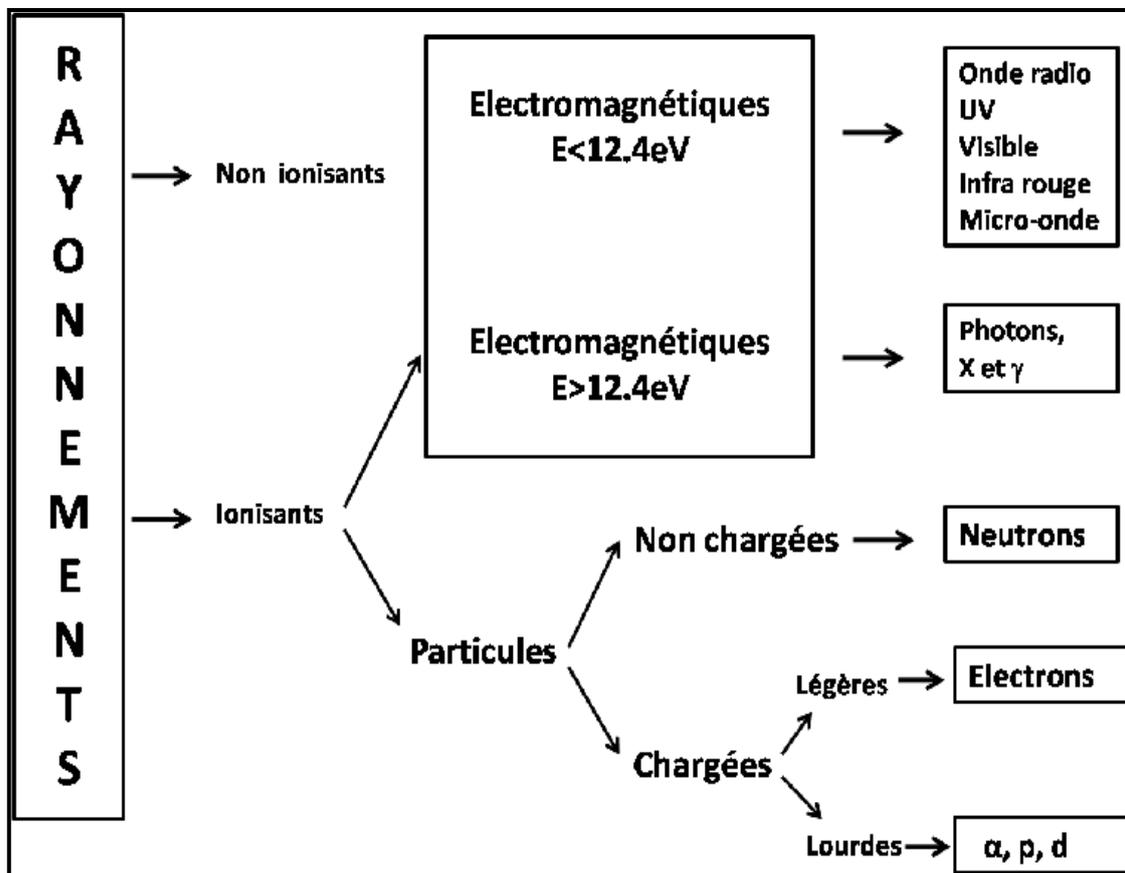


Figure (I.3) : Classification des rayonnements (Ounoughi 2015).

#### **I.1.1.4. Sources des rayonnements et expositions**

Tous les êtres vivants sont exposés quotidiennement à des rayonnements ionisants d'origine naturelle ou humaine (artificielles).

##### **I.1.1.4.1. Source naturelle de rayonnements**

Les êtres humains vivent d'une façon continue dans l'ambiance de la radioactivité naturelle. Les sources naturelles de rayonnements ionisants sont (Huber Gresser 2004):

###### **A. Le rayonnement cosmique**

Il provient de l'espace et augmente rapidement avec l'altitude, représente environ 8.5% de l'irradiation naturelle. Les rayonnements cosmiques sont constitués par des photons et diverses particules d'une très grande énergie (exemple : photon) avec une proportion d'environ 90%, de noyaux d'hélium avec une proportion d'environ 9% et le reste comprend des noyaux de divers éléments plus lourds (Huber Gresser 2004).

###### **B. Le rayonnement tellurique**

Ce rayonnement provenant de la fonction de la terre dont L'écorce terrestre contient des atomes radioactifs qui sont la source d'une radioactivité naturelle (thorium-232, uranium-235, uranium-238 et leurs descendants). Selon la nature des roches composant le sous-sol, nous sommes donc plus ou moins exposés aux rayonnements telluriques.

Ce rayonnement est plus important dans les régions granitiques. Les rayonnements telluriques sont essentiellement dus aux substances radioactive contenues dans la terre (lithosphère), l'eau (hydrosphère) et dans l'air (atmosphère) (Huber Gresser 2004).

##### **I.1.1.4.2. Sources artificielles de rayonnements**

###### **A. L'exposition médicale**

L'utilisation des rayonnements dans la sphère médicale représente la plus grande part de l'exposition artificielle de la population. Les différentes utilisations médicales des rayonnements sont représentées par les procédures diagnostiques et thérapeutiques, en médecine nucléaire, en radiodiagnostic et en radiothérapie.

Parmi les rayonnements utilisés en médecine dans un diagnostic et /ou thérapie sont (Boukabcha 2010) :

- Les rayons X en radiologie et en radiothérapie.
- Les rayonnements particuliers : les neutrons, protons et particules lourdes en radiothérapie externe,  $\alpha$  et  $\beta$  en radiothérapie interne.
- Les faisceaux d'électrons produits par les accélérateurs linéaires de particules en radiothérapie.

- Les rayonnements  $\gamma$  émis par certains radionucléides en radiothérapie interne ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{32}\text{P}$ ,  $^{153\text{m}}\text{Sm}$ ,  $^{89}\text{Sr}$ ) et radiothérapie externe ( $^{60}\text{Co}$ ) et en médecine nucléaire ( $^{131}\text{I}$ ,  $^{99\text{m}}\text{Tc}$ ).

## B. Les essais nucléaires et l'industrie

Le rayonnement a plusieurs applications industrielles, allant des centrales nucléaires qui utilisent de l'uranium pour déclencher la réaction en chaîne qui produira la vapeur nécessaire afin d'actionner les turbines pour la production d'électricité à la production des radio-isotopes (par réacteur nucléaire ou par cyclotron) jusqu'à la radiographie industrielle (utilisant des sources d'iridium-192 ou de Cobalt-60). Les accidents au niveau des centrales nucléaires constituent une autre source artificielle d'exposition de la population. Un des plus célèbres accidents est le récent accident de Tchernobyl. Survenu le 26 avril 1986 (Boukabcha 2010).

### I.1.1.5. Le spectre et classification des rayonnements électromagnétiques

Le spectre électromagnétique (Figure I.4) représente la répartition des ondes électromagnétiques en fonction de leur longueur d'onde, de leur fréquence ou bien encore de leur énergie (Kuban 2013).

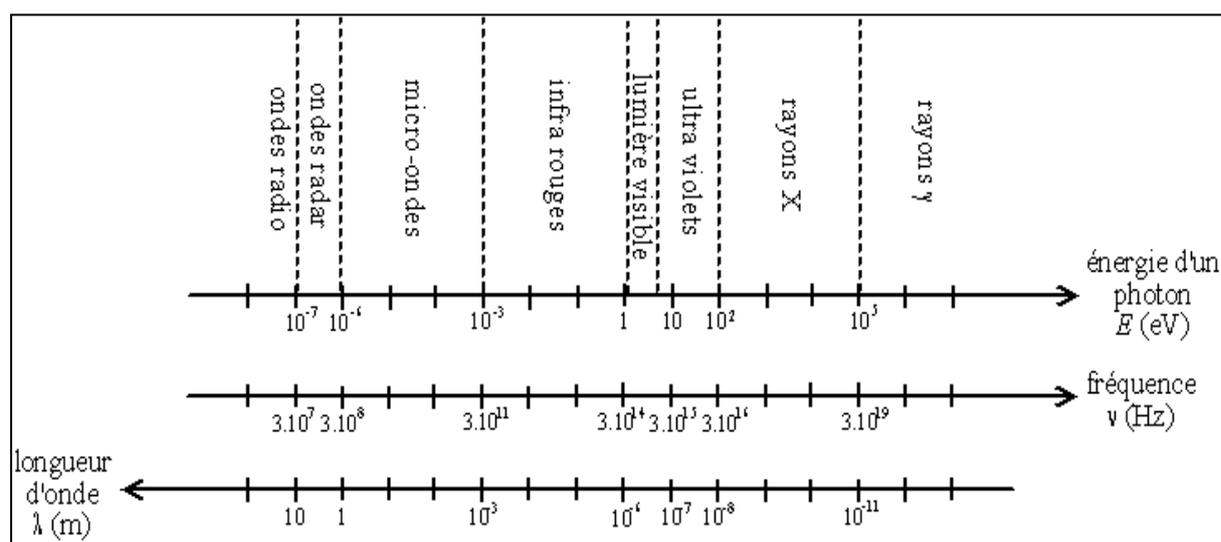


Figure (I.4) : Classement des ondes électromagnétiques par longueur d'onde, fréquence et énergie du photon (Ounoughi 2015).

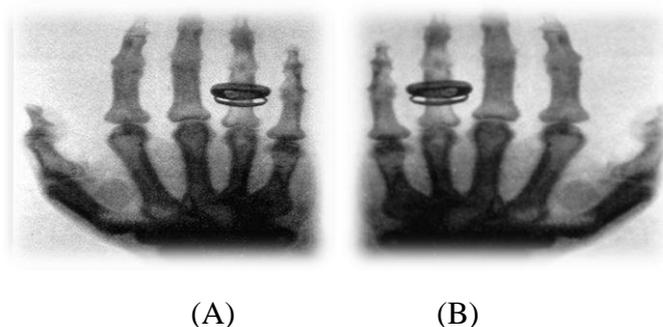
## I.2. Rayon X

### I.2.1. Historique RX

Ce rayonnement a été découvert le 8 novembre 1895 par le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen, il remarque pour la première fois l'apparition d'un autre rayonnement, inconnu, capable d'imprimer une plaque photographique lors de la mise sous tension d'un tube de Crookes. Il lui donne le nom habituel de l'inconnue en mathématiques, X et soupçonne qu'il est

issu de l'interaction du faisceau cathodique avec une cible métallique (anode). Plus tard, Roentgen s'aperçoit que ces rayons inconnus sont capables de traverser le corps humain et il réalise les premiers clichés radiographiques de l'histoire :

- La radio de sa propre main le 22 novembre 1895(figure I.5.A).
- La radio la plus connue, la main de sa femme Anna-bertha le 22 décembre 1895(figure I.5.B).



**Figure (I.5) :** La Radio de la main de röntgen (A) et la radio de la main du sa femme Anna-bertha (B) (<https://fr.wikipedia.org>).

Après, W.C. Roentgen décrit quatre propriétés caractérisent les rayons X :

- Ces rayons sont absorbés par la matière.
- Ces rayons sont diffusés dans la matière.
- Ces rayons impressionnent une plaque photographique.
- Ces rayons déchargent « des corps chargés électriquement ».

Ces découvertes sont publiées à la communauté scientifique le 28 décembre 1895 et en 1901, Roentgen est félicité en lui attribuant le premier prix Nobel (de physique) de l'histoire (Dillenseger 2009).

### I.2.2. Définition des rayons X

Les rayons X sont des radiations électromagnétiques. Dont la longueur d'onde est comprise entre  $10^{-8}\text{m}$  et  $10^{-11}\text{m}$ . Les rayons de longueur d'onde proches de la plage des rayonnements ultraviolets dans le spectre électromagnétique, sont connus sous le nom de rayons X mous. Les rayons de longueur d'onde plus courte, proches de la plage des rayons gamma, sont appelés rayons X durs (Radioactivité) .L'énergie  $E$  et la longueur d'onde  $\lambda$  du rayonnement sont liés par :

$E = h \cdot (C / \lambda)$  ;  $h$  étant la constante de Planck et  $C$  la vitesse de la lumière dans le vide. Lorsque la longueur d'onde du rayon X est minimale, son énergie est maximale. Les rayons de longueur d'onde plus courte, proches de la plage des rayons gamma dans le spectre électromagnétique,

sont appelés rayons X durs (Radioactivité) et Les rayons X de longueur d'onde proches de la plage des rayonnements ultraviolets, sont nommés des rayons X mous (Baakek 2008).

### I.2.3. Mode de production

Les rayons X peuvent être obtenus à partir de processus physique ou par tube à RX.

#### I.2.3.1. Processus physique

##### I.2.3.1.1. Transition électronique dans les couches atomiques internes

###### A. Excitation des couches internes des atomes

Les rayons X et les électrons interagissent de manière prépondérante avec les électrons des atomes constituant le milieu traversé. Les électrons atomiques concernés sont les électrons des couches internes de l'atome. Si l'énergie transférée par l'électron ou le photon incident est exactement égale à la différence entre les énergies de liaison de 2 couches électroniques de l'atome cible, un électron de cet atome saute sur une couche moins liée et il y a une excitation, c'est-à-dire l'énergie incidente servir à augmenter l'énergie potentielle des atomes de la matière en les faisant passer de l'état fondamental à un état excité. Pour ioniser l'atome au niveau X (avec  $X = K, L1, L2, \dots$ ) autrement dit pour éjecter un électron du niveau X d'un atome vers l'extérieur, il est nécessaire de fournir une énergie  $W_X$  caractéristique de ce niveau dans l'atome en question. La seule condition est que l'énergie incidente  $E_0$  soit supérieure à  $W_X$ . Pour chaque atome ionisé, un électron orbital correspondant est éjecté avec une énergie cinétique  $E_c$ , différence entre l'énergie perdue par le rayonnement incident et l'énergie potentielle  $W_X$ . La probabilité d'ionisation est maximale lorsque la fréquence incidente  $\nu_0$  est juste supérieure à la fréquence d'ionisation  $\nu_x = W_X/h$  (Ou  $\lambda_0$  juste inférieure à la longueur d'onde d'ionisation  $\lambda_x = hc/W_X$ ). Si le rayonnement incident est électromagnétique (rayons X) (Figure I.6.a), l'électron éjecté est appelé photoélectron et si le rayonnement incident est électronique (Figure I.6.b) l'électron éjecté est appelé électron secondaire (Gravereau 2012).

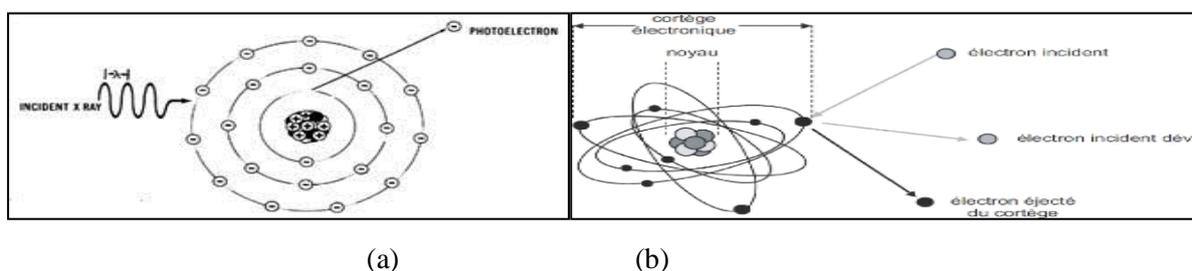
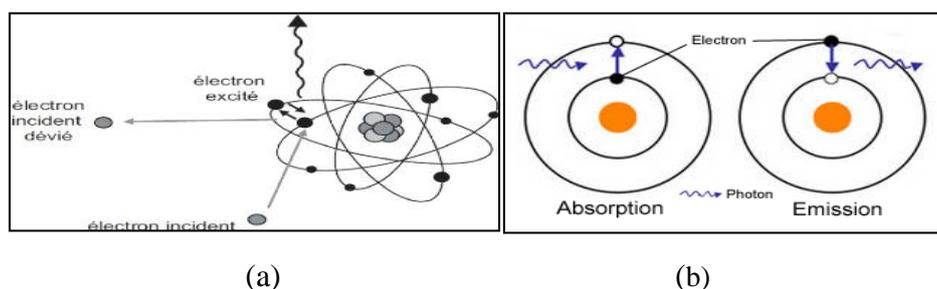


Figure (I.6) : Phénomène d'ionisation (<https://www.memoireonline.com>).

## B. Désexcitation

La désexcitation atomique est le passage d'un atome d'un niveau d'énergie supérieur X (l'état instable) à un niveau d'énergie inférieur Y pour revenir à son état fondamental. L'état excité est instable, sa durée de vie est très faible (de l'ordre de  $10^{-16}$  s). Cette désexcitation se fait de manière spontanée et est accompagnée d'une énergie  $\Delta W = W_X - W_Y$  est ainsi libérée, en particulier sous forme de rayonnement X caractéristique :

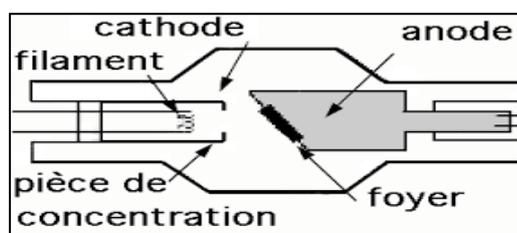
Ce rayonnement est appelé "rayonnement X primaire" si le rayonnement incident est corpusculaire (Figure I.7.a). C'est le cas des électrons dans les tubes utilisés comme sources de RX et si le rayonnement incident est lui-même un rayonnement électromagnétique (Figure I.7.b) On parle de " rayonnement X secondaire" ou de " fluorescence" (Gravereau 2012).



**Figure (I.7) :** phénomène désexcitation (<https://www.memoireonline.com>)

### I.2.3.2. Tube à RX :

Les tubes à rayons X sont des dispositifs permettant de produire des rayons X. Historiquement, le premier tube à rayons X fut inventé par William Crookes, il est encore appelé tube à décharge, tube à gaz ou tube à cathode froide, fut amélioré par William Coolidge en 1913, Le tube de Coolidge, encore appelé tube à cathode chaude, est le tube le plus largement utilisé. Les tubes à anode tournante sont une amélioration des tubes de Coolidge permettant d'avoir des intensités de rayons X importantes. Dont le principe général est le même que pour les tubes toujours employés de nos jours (figure I.8) (Bonin et Atlani 2007).



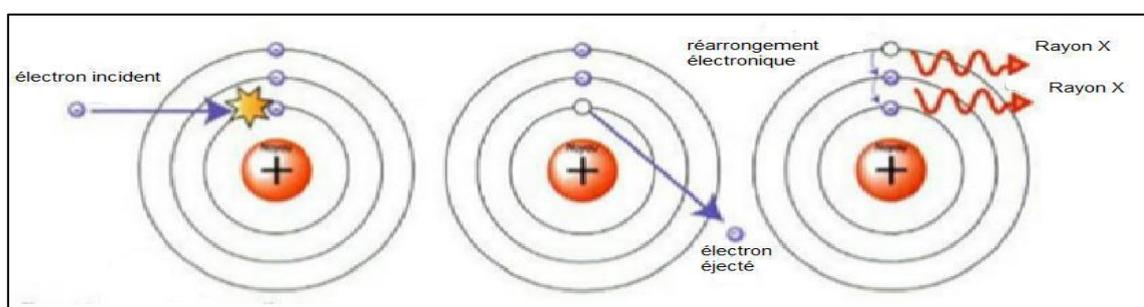
**Figure (I.8) :** Tube A Rayon X (Bonin et Atlani 2007).

## A. Principe de fonctionnement

Le tube de rayon X se compose d'un canon à électron et d'un bloc du métal, placés dans une chambre sous vide poussé. Le canon est un filament chauffé par un courant électrique qui libère des électrons par effet thermique. Une haute tension appliquée entre le canon qui sert de cathode et l'anode (bloc du métal), accélère les électrons. Ces derniers entrent en collision avec la cible que constitue le métal de l'anode. Alors les rayons X émis par le bombardement de l'anode s'échappent du tube par une fenêtre grâce aux deux mécanismes distincts (Benlakhdar 2018) :

### A.1. La fluorescence (X caractéristique)

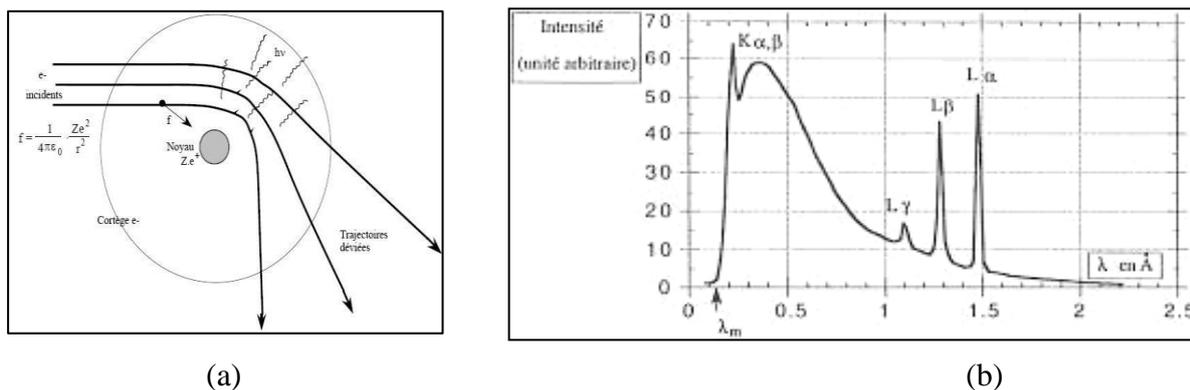
Ce mécanisme met en jeu le nuage électronique d'atome : lorsque un électron incident entre en collision avec un électron atomique des couches inférieures, ce dernier est expulsé et laisse une lacune, il est suivi par un phénomène de réarrangement électronique, un électron d'une couche supérieure prend sa place, durant ce changement un photon X d'énergie caractéristique de transition est émis (Figure I.9). Le réarrangement se fait avec plusieurs électrons donc plusieurs photons de fluorescence seront émis avec des énergies bien définies et caractéristiques des couches électroniques de l'atome, créant ainsi un spectre de raies. Ce dernier est caractéristique du métal qui constitue la cible (anticathode) (Benlakhdar 2018).



*Figure (I.9) : Phénomène de fluorescence (Dillenseger 2009).*

### A.2. Le rayonnement de freinage (Bremsstrahlung)

Ce phénomène met en jeu le voisinage du noyau atomique : lorsque un électron passe à proximité d'un noyau de l'atome de la cible il est attiré par le champ électromagnétique du noyau (interactions coulombienne), qu'il incurve son trajectoire initiale et il y a un ralentissement de cet électron jusqu'à où son énergie diminue qu'est émise sous la forme d'un rayonnement dit rayonnement de freinage (Benlakhdar 2018).



**Figure(I.10) : Rayonnement de freinage et Spectre d'émission d'un tube à rayon X.**  
(<http://hebergement.u-psud.fr>)

### I.3. Les interactions photon-matière

#### I.3.1. Section efficace d'interaction

La section efficace d'interaction est la probabilité qu'une interaction d'un type déterminé entre une particule incidente et une particule cible aura lieu. Elle prend le symbole  $\sigma$ , son unité est le barn ( $10^{-24} \text{ cm}^{-1}$ ). La section efficace est proportionnelle au taux d'interaction. Elle dépend de la nature de la particule cible et de l'énergie de la particule incidente.

S'il y a plusieurs types d'interaction élémentaire alors la section efficace totale (microscopique) s'écrit  $\sigma_{tot}$  (Ounoughi 2015):

$$\sigma_{tot} = \sum_i \sigma_i \quad (I.1)$$

Où :  $\sigma_i$  est la section efficace de l'interaction de type  $i$ .

La section efficace macroscopique  $\sigma_{ma}$  (unité  $\text{cm}^{-1}$ ) caractérise l'interaction d'un nombre de particules et un système de particule cible.

$$\sigma_{ma} = N_a \sigma \quad (I.2)$$

$N_a$  est le nombre de particule du système par  $\text{cm}^3$ .

$$\sigma_{ma}(tot) = \sum_i \sigma_{ma}(i) \quad (I.3)$$

Où :  $\sigma_{ma}(i)$  est la section efficace macroscopique de l'interaction type  $i$ .

Si le système de particule cible est un mélange de particules différentes, alors la section efficace d'une interaction est :

$$\sigma_{ma} = \sum_i f_i \sigma_{ma}(i) \quad (I.4)$$

Où :  $f_i$  est la fraction massique de l'état  $i$  ;  $f_i = \frac{m_i}{m_T}$

### I.3.2. Processus d'interaction

Lorsqu'on étudie comment un photon incident interagit avec la matière, on distingue deux cas principaux (Ounoughi 2015).

Interaction photon-électron (le plus souvent) :

- Le photon transmet toute son énergie à un électron et disparaît : effet photo-électrique.
- Le photon transmet une partie de son énergie et diffuse : effet-Compton.
- Le photon est dévié, sans perte d'énergie, par un électron : diffusion Thomson Rayleigh.

Interactions photon-noyau (rarement) :

- Matérialisation.

#### I.3.2.1. L'effet photoélectrique

L'effet photoélectrique est le mécanisme d'absorption totale de l'énergie de photon incident par les électrons des couches internes d'un atome ayant une énergie suffisante pour ioniser la matière, cette énergie qui est supérieure ou égale à l'énergie de liaison transférée à un électron qui est expulsé de sa couche électronique et emporte l'excédent d'énergie sous forme d'énergie cinétique, finalement cette dernière absorbée par le milieu.

$$E_{Cin} = h\nu - E_l \quad (I.5)$$

L'atome se retrouve sous forme ionisée, et cette ionisation (primaire) est suivie d'un réarrangement électronique de l'atome : en résulte l'émission d'un autre photon (rayon de fluorescence) ou l'expulsion d'un électron d'une couche encore plus périphérique : l'électron-Auger (Ghamraoui 2012).

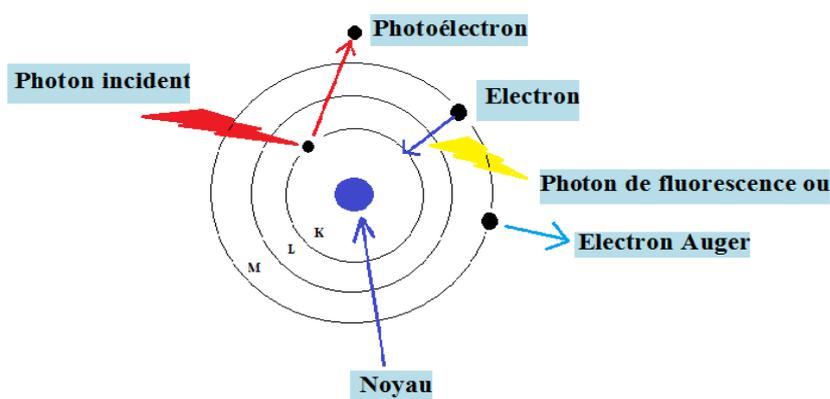


Figure (I.11) : Principe de l'absorption photoélectrique (Benlakhdar 2018).

### I.3.2.2. La diffusion Compton :

Le photon interagit avec un électron d'une couche externe de l'atome et ne disparaît pas, il est diffusé avec un changement de son énergie (diffusion inélastique) et transfère une partie de celle-ci sous forme d'énergie cinétique à l'électron (Ghammraoui 2012).

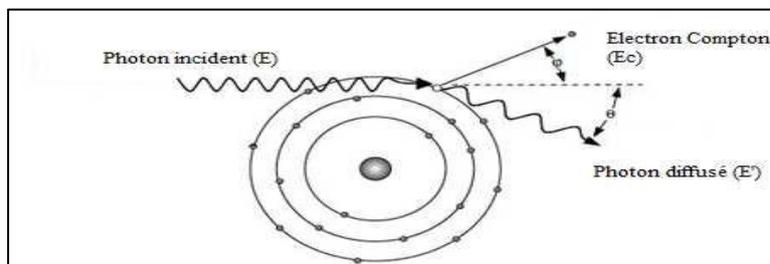


Figure (I.12) : Principe de diffusion Compton (Ounoughi 2015).

L'énergie du photon diffusé est donnée par :

$$E' = \frac{E}{1 + \varepsilon(1 - \cos \theta)} ; \varepsilon = \frac{E}{E_0}, E_0 = 511 \text{ KeV} \quad (I.6)$$

L'énergie de l'électron Compton est donnée par :

$$E_c = E \frac{2\varepsilon}{1 - 2\varepsilon + (1 + \varepsilon)^2 \tan^2 \varphi} \quad (I.7)$$

La relation entre les angles de diffusion est donnée par :

$$\cot \varphi = (1 + \varepsilon) \tan \frac{\theta}{2} \quad (I.8)$$

### I.3.2.3. La production de paires

Lorsqu'un photon passe au voisinage du noyau, où règne un champ électrique intense, ce photon matérialisé sous forme d'un électron et d'un positron. La création d'un pair ( $e^-/e^+$ ) présente un seuil en énergie égale à  $2 \times 0,511 \text{ MeV}$ , correspondant à leurs masses. Le positron créé dans la matière va ralentir par suite de collisions. Lorsqu'il est suffisamment lent, le positron rencontre un électron du milieu et les deux particules s'annihilent en émettant deux photons d'énergie  $0,511 \text{ MeV}$  de chacun et de direction opposée (Ghammraoui 2012).

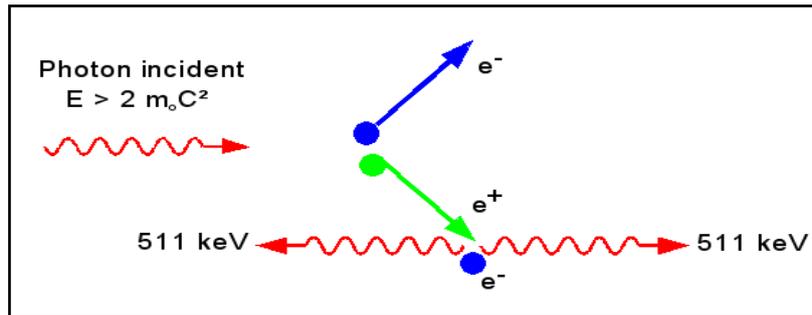


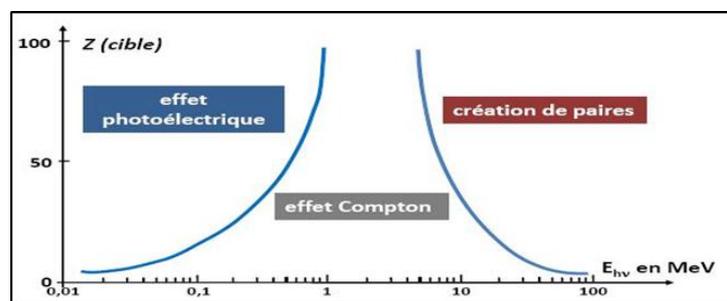
Figure (I.13) : Principe de matérialisation (<http://www.nucleide.org>).

### I.3.2.4. La diffusion Rayleigh

C'est la diffusion du photon incident par l'atome sans perte d'énergie au milieu traversé (diffusion élastique) autrement dit l'onde conserve la même longueur d'onde. (Ghamraoui 2012).

### I.3.3. Importance relative des différentes interactions

Lorsque les photons traversant le milieu d'interaction, tous les effets sont possibles avec une probabilité différente. L'importance relative de l'effet photon électrique, la diffusion Compton et la création de paires dépend de l'énergie du photon incident  $h\nu$  et du nombre atomique  $Z$  du milieu traverser. La figure(I.14) présente les régions de  $E$  et  $Z$  dans la quelle chaque interaction prédomine. les courbes qui séparent ces région déterminent le lieu où deux processus ont la même probabilité ou section efficace, la position de ces courbes entre les domaines énergétiques dépendent de la matière traversée .On remarquent que l'effet photoélectrique est prédominant aux basses énergies, la création de pair prédominante aux hautes énergies tandis que la diffusion Compton prédominante aux énergies moyennes .pour les matériaux de petit  $Z$  la région de la prédominance la plus large est l'effet Compton ,cette région diminue graduellement avec l'augmentation de  $Z$ (Ounoughi 2015).



Figure(I.14): Domaine de prédominance en fonction du numéro atomique  $Z$  de la cible et de du photon incident  $E (h\nu)$  (Ounoughi 2015).

La section efficace d'interaction sera écrits :

$$\sigma_{tot} = \sigma_{ph} + \sigma_C + \sigma_R + \sigma_M \quad (I.9)$$

$\sigma_{ph}$ ,  $\sigma_C$  et  $\sigma_R$ ,  $\sigma_M$  Sont respectivement les sections efficaces d'interaction photoélectrique, Compton, Rayleigh et de matérialisation (Ounoughi 2015).

### I.3.4. Atténuation des photons

#### I.3.4.1. Atténuation dans le vide

Dans le vide, les photons se propagent sans interaction, donc en ligne droite à partir de la source. La loi géométrique d'atténuation des photons dans le vide provient de la divergence du faisceau de photons dans l'espace qui émet à partir d'une source ponctuelle, elle porte le nom de «la loi de l'inverse du carré de la distance ». Ce dernier est donné par :

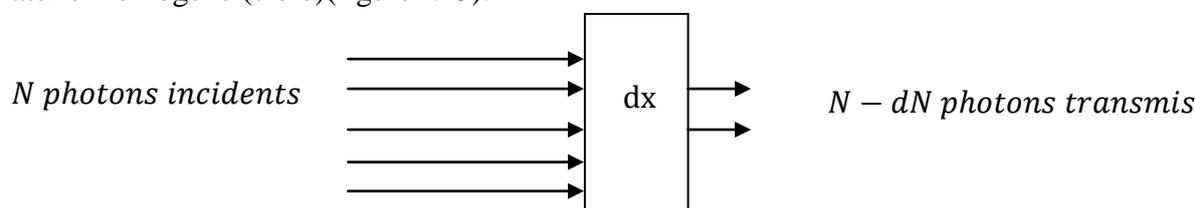
$$I = \frac{I_0}{d^2} \quad (I.10)$$

Où  $I_0$  est l'intensité du faisceau à une distance unité prise comme référence et  $I$  l'intensité du faisceau à la distance  $d$  de la source (Boukabcha 2010).

#### I.3.4.2. Atténuation par interaction

Dans l'étude de l'atténuation des rayonnements électromagnétiques par la matière, on suppose que le faisceau est monoénergétique et mono directionnel.

Soit un faisceau étroit des photons  $N$  monoénergétique incident normalement sur un bloc matériel homogène (cible)(figure I.15).



**Figure (I.15) :** Illustration des interactions d'un faisceau de photons dans un matériau.

Le nombre de photons  $dN$  atténués par unité de longueur  $dx$  est proportionnel à la fois au nombre de photons incidents  $N$  et à  $dx$  et on peut écrire :

$$dN = -\mu N dx \quad (I.11)$$

La loi d'atténuation globale s'obtient en résolvant cette équation différentielle simple, soit :

$$N(x) = N_0 \exp(-\mu x) \quad (I.12)$$

Où  $N(0)$ : représente le nombre de photon incidents frappant l'écran d'épaisseur  $x$ .

$N(x)$  : est le nombre de photons présents après la traversée de l'épaisseur  $x$  (photon transmis).

$\mu$  : est appelé coefficient linéique d'atténuation, dépend de l'énergie du rayonnement incident et de la nature chimique du milieu traversé (le numéro atomique  $Z$ ), de la densité (ou masse

volumique  $\rho$ , mesurée en g/cm<sup>3</sup>).son unité est le cm<sup>-1</sup> si x est exprimé en cm (Bonin Et Atlani 2007).

Avec  $\mu$  coefficient d'atténuation total défini par :

$$\mu = n \sigma_{\text{tot}} \quad (\text{I. 13})$$

Où  $n = N_A \rho / M$ ,  $N_A$  nombre d'Avogadro,  $\rho$  la densité et  $M$  la masse molaire (Nachab2003).

D'autre part, si on caractérise le milieu par son coefficient d'atténuation massique  $\frac{\mu}{\rho}$ , on a :

$$N = N_0 e^{-\frac{\mu}{\rho} \times x} \quad (\text{I. 14})$$

Où  $\frac{\mu}{\rho}$  est- en cm<sup>2</sup>.g<sup>-1</sup> et dans ces conditions  $X = \rho x$  s'exprime en g.cm<sup>-2</sup>.On dit que l'on exprime l'épaisseur en masse surfacique. Ce choix permet de déterminer l'atténuation sans avoir l'obligation de connaître la nature et l'état physique du matériau traversé.

Par ailleurs, il est possible de décomposer le coefficient d'atténuation massique totale en trois termes :

$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{\tau}{\rho} + \frac{\sigma}{\rho} + \frac{\pi}{\rho} \quad (\text{I. 15})$$

Où  $\frac{\tau}{\rho}$  est le coefficient massique d'atténuation par effet photoélectrique,  $\frac{\sigma}{\rho}$  est le coefficient massique d'atténuation par l'effet Compton et  $\frac{\pi}{\rho}$  est le coefficient massique d'atténuation par effet de matérialisation (Boukabcha 2010).

Si le matériau traversé est composé de plusieurs éléments, la loi des mélanges permet d'écrire l'atténuation massique du matériau,  $\frac{\mu(E)}{\rho}$  exprimée en cm<sup>2</sup>/g, comme :

$$\left(\frac{\mu(E)}{\rho}\right)^{\text{Composé}} = \sum_{i=1}^{N_{\text{élément}}} \omega_i \cdot \frac{\mu(E, \rho_i, Z_i)}{\rho_i} \text{ avec } \omega_i = \frac{m_i}{M} \quad (\text{I. 16})$$

Où  $\omega_i$  sont les fractions massiques de chaque élément dans le matériau composé et  $N_{\text{éléments}}$  le nombre d'éléments contenus dans le matériau composé (Iulia Potop 2014).

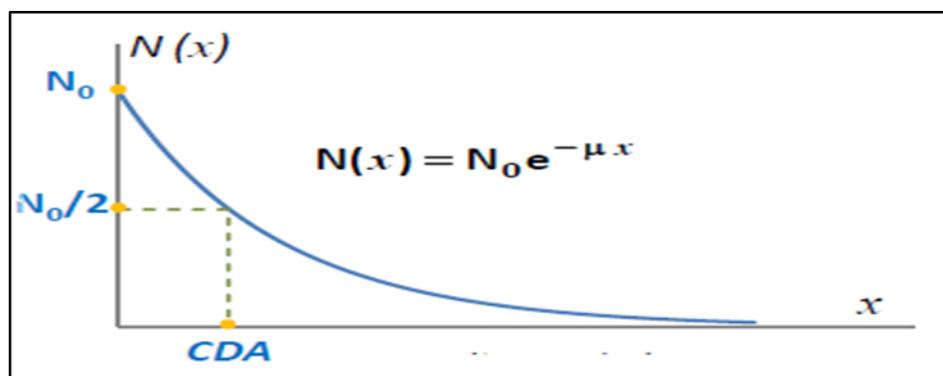
### A. La couche de demi-atténuation

Il existe une notion très utile en radioprotection, nommée la (CDA). Celle-ci représente l'épaisseur de matériau nécessaire à l'atténuation de 50% du rayonnement initial, soit (Bonin et Atlani 2007) :

$$\begin{aligned} N(\text{CDA}) &= N_0/2 = N_0 \exp(-\mu \times \text{CDA}) \quad (\text{I. 17}) \\ &\Rightarrow \text{CDA} = \ln 2 / \mu \end{aligned}$$

On peut donc également écrire la loi d'atténuation en fonction du nombre n CDA traversées :

$$N(n \text{ CDA}) = \frac{N_0}{2^n} \quad (\text{I. 18})$$



**Figure (I.16) :** Courbe d'atténuation des rayonnements électromagnétique dans la matière (Arbi 2007).

### B. Libre parcours moyen R

Le libre parcours moyen R des photons correspond à une épaisseur atténuant 37% des photons incidents. Il est égal à l'inverse du coefficient linéique d'atténuation (Bonin et Atlani 2007) :

$$R = \frac{1}{\mu} = \frac{\text{CDA}}{\ln 2} = 1.44 \text{ CDA} \quad (\text{I. 19})$$

## I.4. Grandeurs et unités en dosimétrie et radioprotection

La dosimétrie est définie comme l'énergie reçue par unité de masse, grâce à l'exposition aux rayonnements ionisants. Elle peut être réalisée par plusieurs méthodes et techniques.

### I.4.1. Grandeurs physiques

Une grandeur physique est une caractéristique d'un objet que l'on peut mesurer, ou même calculer. On cite parmi ces grandeurs ([www.rpcirkus.org](http://www.rpcirkus.org)):

- L'énergie.
- L'intensité d'émission.
- L'activité.
- Le taux d'émission.
- Les grandeurs radiométriques servant à caractériser le champ de rayonnement.
- Les grandeurs dosimétriques servant à caractériser l'effet « physique » des rayonnements sur la matière en termes d'énergie transférée ou de dépôt d'énergie.

### I.4.1.1. Les grandeurs radiométriques

#### I.4.1.1.1. Le champ de rayonnement

Pour déterminer, Le champ de rayonnement en un point P de l'espace, il faut connaître les caractéristiques physiques, géométriques et temporelles de ce rayonnement.

Le champ de rayonnement est caractérisé par une fonction mathématique à 4 variables :

$$\phi_u(r, u, E, t)$$

r : vecteur de position

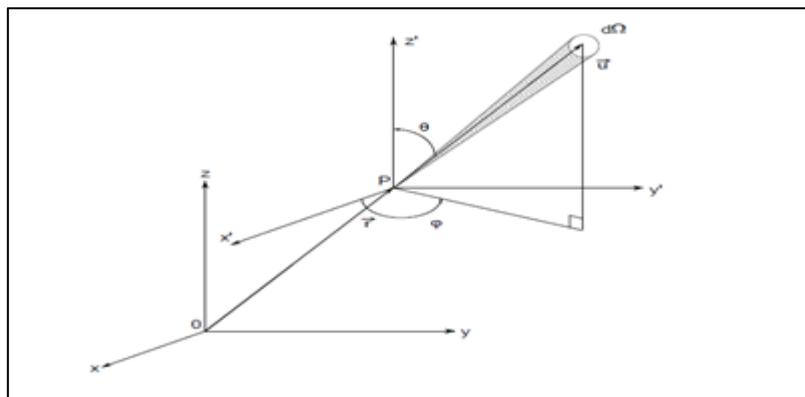
u : vecteur de propagation

E : énergie du rayonnement

t : temps

La fonction  $\phi_u$  représente le nombre de particules se propageant en un point P de l'espace de coordonnées r, dans la direction u, dans un angle solide  $d\Omega$  autour de u avec une énergie E à l'instant t.

Cette fonction s'appelle la distribution angulaire de la fluence.



**Figure (I.17) :** Système de coordonnées pour l'émission d'une source étendue ponctuelle  
([www.rpcirkus.org](http://www.rpcirkus.org)).

#### I.4.1.1.2. Flux de particules

Le flux de particules  $\dot{N}$  est défini comme le nombre de particules  $dN$  émises, transférées ou reçues par unité de temps  $dt$ , il exprimé en  $s^{-1}$  (Youbba 2014):

$$\dot{N} = \frac{dN}{dt} \quad (I.20)$$

#### I.4.1.1.3. Flux en énergie

Le flux d'énergie rayonnante  $\dot{E}$  est l'énergie  $dE$  rayonnante ou radiante émise, transférée ou reçue pendant un intervalle de temps  $dt$ , il exprimé en Watt (W) (Youbba 2014):

$$\dot{E} = \frac{dE}{dt} \quad (I.21)$$

#### I.4.1.1.4. Fluence particulaire

La fluence  $\Phi$  d'un faisceau de particule en un point P est le nombre de particules  $dN$  traversant une unité de surface. Elle exprime en nombre de particules. $m^{-2}$ . L'utilisation ici d'une sphère dans la définition permet de ne pas tenir compte de l'angle d'incidence des particules au point P (Moignier 2014).

$$\Phi(\text{part} \cdot m^{-2}) = \frac{dN}{da} \quad (I.22)$$

#### I.4.1.1.5. Débit de fluence particulaire

Le débit de fluence ou le flux ( $\dot{\Phi}$ ), est la fluence par unité de temps, il exprime par particule / $m^2$  .s.

$$\dot{\Phi} = \frac{d\Phi}{dt} \quad (I.23)$$

Le débit de fluence de particules dépend de la durée totale de l'irradiation (Souici 2016).

#### I.4.1.1.6. Fluence énergétique

On définit la fluence énergétique (F) comme le rapport de la somme des énergies transportés par les particules  $dN$  à la surface  $dS$ . elle est exprimé en  $J/m^2$  (Souici 2016).

$$F = \frac{dE}{dS} \quad (I.24)$$

#### I.4.1.1.7. Débit de fluence énergétique

Est la fluence énergétique par unité de temps, il exprime en  $J/m^2$ .s.

$$\dot{F} = \frac{dF}{dt} \quad (I.25)$$

#### I.4.1.2. Les grandeurs dosimétriques

Ce sont des grandeurs macroscopiques, elles sont indispensables pour la corrélation entre les mesures physiques et les effets des irradiations dans un milieu (Farah 2010).

##### I.4.1.2.1. Énergie déposée

L'énergie déposée est défini comme la somme de tous les dépôts d'énergie dans un volume :

$$\varepsilon = \sum_i^n \varepsilon_i \quad (I.26)$$

Où  $\varepsilon_i$  , est le dépôt d'énergie consécutif à une interaction.

$$\varepsilon = \varepsilon_{in} + \varepsilon_{out} + \Sigma Q \quad (I.27)$$

Où  $\epsilon_{in}$  est l'énergie incidente de la particule ionisante,  $\epsilon_{out}$  est la somme de toutes les énergies sortant de l'interaction sous forme de particules ionisantes, et Q est la modification de l'énergie de masse du noyau et de toutes les particules impliquées dans l'interaction.

Son unité est le joule (J) (Youbba 2014).

#### I.4.1.2.2. Dose absorbée

La dose absorbée est définie comme la moyenne de la distribution d'énergie déposée par le rayonnement ionisant dans un volume de matière de masse dm, Elle est applicable avec les rayonnements directement et indirectement ionisants. Cette grandeur physique est la grandeur de base de la protection radiologique.

$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} \quad (I.28)$$

Son unité est le joule par kilogramme (J. kg<sup>-1</sup>) ou le gray (Gy) ou 1 Gy = 1 J. kg<sup>-1</sup> (Youbba 2014).

#### I.4.1.2.3. Débit de dose absorbée

Le débit de dose absorbée,  $\dot{D}$  Est la dose absorbée par unité de temps, il exprime en J. kg<sup>-1</sup>.s<sup>-1</sup> (Farah 2010).

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad (I.29)$$

#### I.4.1.2.4. L'exposition

L'exposition est la somme des charges électrique de tous les ions du même signe produit par une irradiation dans un certain volume de masse .Il est définie seulement pour les photons X et gamma dans l'air :

$$X = \frac{dQ}{dm} \quad (C.kg^{-1}) \quad (I.30)$$

Enceins unité utilisée est le Roentgen : 1Roentgen = 2.58 10<sup>-4</sup> C/kg (Ounoughi 2015).

#### I.4.1.2.5. Débit d'exposition

Le débit d'exposition  $\dot{X}$  est l'exposition par unité de temps, il exprime en(R / h) ou (C .Kg<sup>-1</sup> . s<sup>-1</sup>).

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad (I.31)$$

### I.4.2. Grandeurs de protection

Les grandeurs de protection, elles sont définies à partir des doses absorbées moyennées aux organes et à l'aide de facteurs de pondération. Ces grandeurs sont la dose équivalente dans un organe ou tissu et la dose efficace.

### I.4.2.1. La dose absorbée à l'organe

La dose absorbée moyenne dans un tissu spécifique ou un organe  $D_T$  est donné par :

$$D_T = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} D dm = \frac{1}{m_T} \int_{m_T} \frac{d\bar{\epsilon}}{dm} dm \quad (I.32)$$

Où  $m_T$  est la masse de tissu ou organe et  $D = d\bar{\epsilon}/dm$  est la dose absorbée dans l'élément de masse  $dm$  (Christophe 2006).

### I.4.2.2. Dose équivalente

C'est la grandeur de protection dans un organe ou un tissu, elle est symboliser par  $H_T$  et définit comme la dose reçue par le tissu T à cause de l'exposition à un rayonnement R ayant délivré à ce tissu une dose  $D_{T,R}$ . Elle donner par :

$$H_T = \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (I.33)$$

Où  $D_{T,R}$  est la dose moyenne absorbée dans un organe ou un tissu T, du fait d'un rayonnement de type R et  $W_R$  le facteur de pondération radiologique qui dépend du type et de l'énergie du rayonnement R (Youbba 2014).

<i>Nature</i>	<i>Types d'énergie</i>	<i>Facteur de pondération <math>W_r</math></i>
<i>Photons</i>	$\forall E$	1
<i>Electrons et muons</i>	$\forall E$	1
<i>Neutrons</i>	$< 15KeV$	5
	$10 KeV - 100 KeV$	10
	$100 KeV - 2 MeV$	20
	$2MeV - 20 MeV$	10
	$> 20 MeV$	5
<i>Protons</i>	$> 20 MeV$	5
<i>Alpha, Fragments de fission, Noyaux lourds</i>	$\forall E$	20

**Tableau(I.1):** Différentes valeurs de facteurs de pondérations pour différents types de Rayonnements (Benlakhdar 2018).

### I.4.2.3. Dose efficace

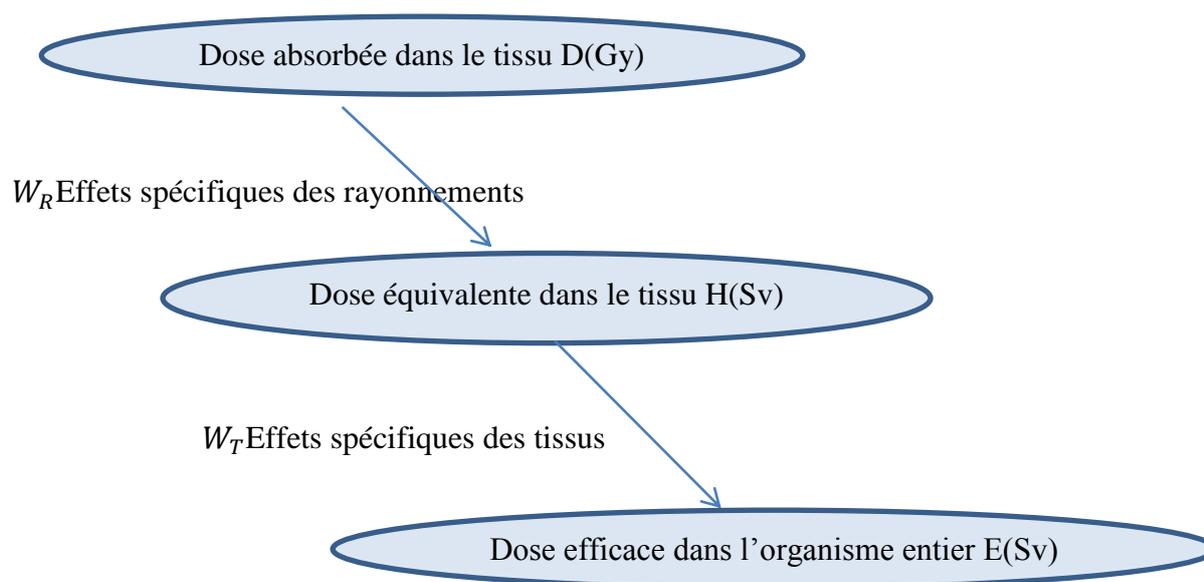
La dose efficace E est la somme des doses équivalentes reçues au niveau de tous les organes ou tissus exposés, Son unité en Sv. Elle caractérisé par le facteur de pondération  $W_T$ , tenant compte de la radiosensibilité propre du tissu ou de l'organe considéré :

$$E = \sum_T W_T \cdot H_T = \sum_T W_T \cdot \sum_R W_R \cdot D_{T,R} \quad (I.34)$$

Où  $W_T$  est facteur de pondération tissulaire de l'organe (Youbba 2014).

Tissu ou organe	$W_T$ CIPR 103
Gonades	0,08
Moelle osseuse	0,12
Colon	0,12
Poumon	0,12
Estomac	0,12
Vessie	0,04
Sein	0,12
Foie	0,04
Œsophage	0,04
Thyroïde	0,04
Peau	0,01
Surface des os	0,01
Autres tissus ou organes	0,12
<b>TOTAL</b>	<b>1</b>

**Tableau (I.2) :** Facteurs de pondération tissulaires (Subreville 2019).



**Figure (I.18) :** Relation entre les doses absorbées, équivalentes et efficaces (Dziri 2014).

Les limites de doses recommandées par l'ICRP sont les suivantes :

Grandeur de protection (domaine d'application)	Limites de dose	
	Activités professionnelles	Public
Dose efficace	100 mSv sur une période de 5 ans	1 mSv par an
Dose équivalente annuelle		
- au cristallin	150 mSv	15 mSv
- à la peau	500 mSv	50 mSv
- aux mains et aux pieds	500 mSv	

*Tableau (I.3) : les limites de doses recommandées par l'ICRP (www.rpcirkus.org).*

## I.5. Qualité des rayonnements en radiobiologie

### I.5.1. Transfert linéique d'énergie

Le Transfert linéique d'énergie (TLE) représente l'énergie transférée dans le milieu par unité de longueur du parcours des particules, son unité le (KeV/ $\mu$ m), il donner par la relation:

$$\text{TLE} = dE/dl \quad (\text{I.35})$$

dE est l'énergie moyenne perdue par la particule.

DI est la distance parcourue par la particule.

Selon le type de rayonnement, il y a deux grandes familles de TLE : faible et fort TLE. Plus le TLE est grand, plus le pouvoir et la densité d'ionisation sont élevés et le parcours réduit. Les rayonnements  $\alpha$  (TLE = 20-300 KeV/ $\mu$ m) et les neutrons ont un TLE élevé. A l'inverse, les rayonnements à TLE faible sont peu ionisants avec une faible densité d'ionisation, puisqu'ils produisent peu d'événements sur un parcours long (TLE= 0,2 KeV/ $\mu$ m). Les rayonnements à particules  $\beta$ , ainsi que les rayonnements  $\gamma$  et X, ont un TLE plus faible (Figure 1.19) (Noblet 2014).

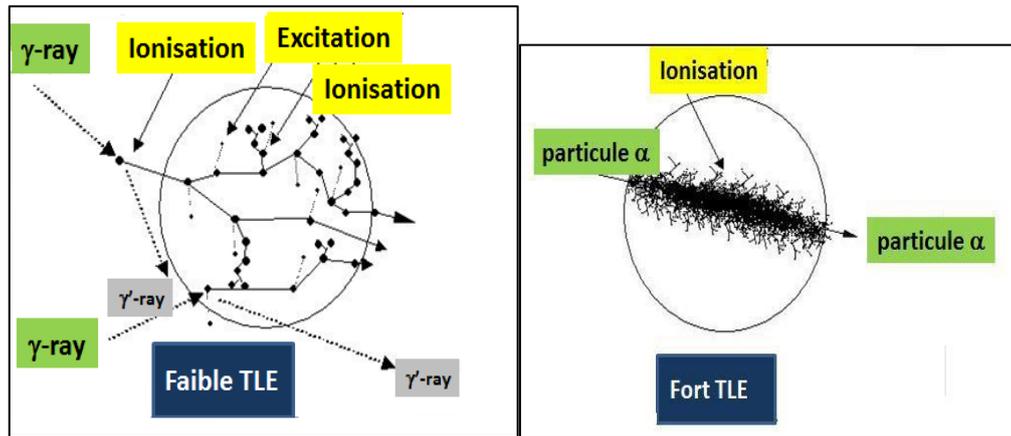


Figure (I.19) : Représentation spatiale du faible TLE versus le fort TLE (Subreville 2019).

### I.5.2.L'Efficacité Biologique Relative

L'efficacité biologique relative (EBR) est une mesure qui sert à comparer l'effet biologique de deux rayonnements. Elle est définie comme le rapport de la dose du rayonnement de référence ( $D_{ref}$ ) et de la dose ( $D_{test}$ ) du rayonnement étudié. L'EBR d'un rayonnement est définie par le rapport :

$$EBR = \frac{D_{ref}}{D_{test}} \quad (I.36)$$

Où:  $D_{ref}$  est la dose d'un rayonnement référence pour un effet biologique donné et  $D_{test}$  est la dose du rayonnement étudié pour atteindre le même effet biologique. L'EBR dépend de multiples facteurs, par exemple : la nature et l'énergie du rayonnement, la dose absorbée, le système biologique étudié, les conditions d'irradiation (débit de dose), l'environnement (oxygénation) et la valeur de transfert d'énergie linéaire (TEL) (Pham 2014).

## I.6.Les effets biologiques des rayonnements ionisants

Un rayonnement ionisant peut ioniser la manière par l'interaction avec les électrons des atomes qui constituent les molécules du milieu traverse. Ces altérations des molécules vont avoir des conséquences au niveau cellulaire puis tissulaire et par conséquence des effets sur la santé.

### I.6.1.Les effets moléculaires

Dans l'organisme vivant il existe deux molécules plus affecter par les rayonnements ionisant : la molécule d'eau ( $H_2O$ ), parce qu'elle est représentée la portion majeure (70% du poids du corps) et la molécule d'ADN, parce qu'elle est la cible privilège des rayonnements dans notre cellules. La décomposition de la molécule d'eau sous l'effet des rayonnements ionisants est elle-même de nature à provoquer des altérations de l'ADN par l'intermédiaire de molécules très réactives (radicaux libres).Les dommages au niveau de l'ADN peuvent être produits suivants

deux voies: les dommages directs et les dommages indirects (<http://ao.um5.ac.ma>, Servagi-Vernat 2014).

### I.6.1.1. Les effets directs

Dans ce type, le rayonnement interagit de façon directe avec l'AND. Les atomes de cette structure critique peuvent s'ioniser ou être excités à partir d'une interaction de photons avec leurs électrons en conduisant à une chaîne d'évènements physiques et chimiques qui conduisent à un dommage sur le tissu biologique irradié (Bencheikh 2017).

### I.6.1.2. Les effets indirects

Dans ce cas, le rayonnement interagit avec les molécules d'eau de la cellule pour produire des radicaux libres. Ces derniers issus de la radiolyse de l'eau, peuvent s'attaquer l'AND de la cellule et entraînent des perturbations fonctionnelles qui peuvent aboutir soit à la mort cellulaire, soit à des mutations en fonction de la réponse adoptée par la cellule (Spasic 2012, Bencheikh 2017).

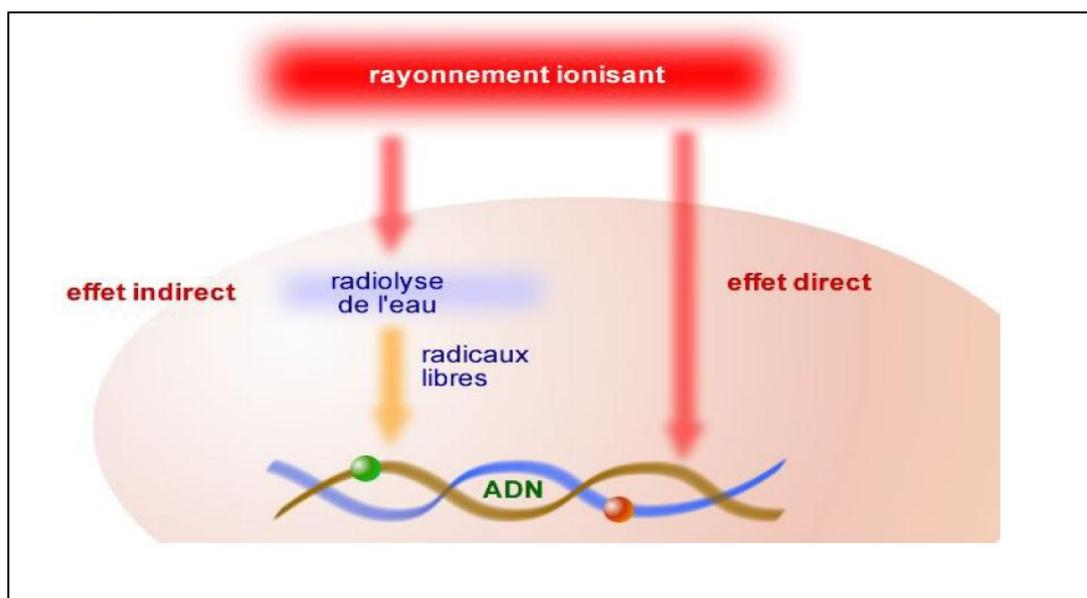


Figure (I.20) : Dommage direct et indirect d'ADN (<http://ao.um5.ac.ma>).

### I.6.1.3. Mécanisme de la radiolyse de l'eau

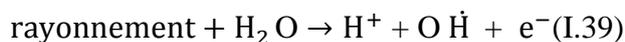
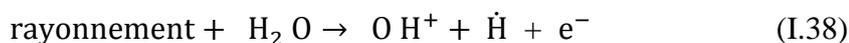
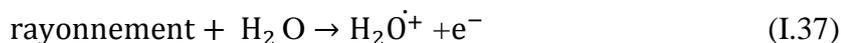
Pendant l'irradiation de l'AND avec son environnement (l'eau), il se produit une séquence d'évènements dans un intervalle de temps très court, cette séquence se produit en trois phases, la phase physique, physico-chimique et la phase chimique, illustrés dans la figure (I.21).

- Étape physique ( $t=0$  à  $10^{-15}$  s) :

Lorsque de l'eau est irradiée par des rayonnements ionisants, la première étape, quelle que soit la nature du rayonnement, est l'ionisation. L'excitation directe des molécules d'eau,

composées chacune de deux atomes d'hydrogène H et d'un atome d'oxygène O, est un processus mineur comparé à l'ionisation. On obtient les réactions suivantes (Pham 2014) :

Ionisation :



Excitation :

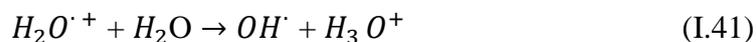


Tous les électrons (initiaux ou créés par ionisation) sont ralentis par ionisations et excitations successives jusqu'à ce qu'ils possèdent une énergie inférieure au seuil d'excitation électronique de l'eau liquide (autour de 8,2 eV). Ce sont alors des électrons de sous-excitation  $e^-_{se}$ .

➤ Étape physico-chimique (entre  $10^{-15} \text{ s} < t < 10^{-12} \text{ s}$ ) :

Après l'étape physique, les produits radiolytiques créés ( $\text{H}_2\text{O}^*, \text{H}_2\text{O}^\cdot, e^-_{se}$ ) vont se transformer en espèces plus stables. C'est la phase de décomposition radicalaire de l'eau avec la formation de radicaux hautement réactifs ( $\text{OH}^\cdot, \text{H}^\cdot, e^-_{aq}$ ) aux temps inférieurs à  $10^{-12} \text{ s}$ .

Molécules ionisées :



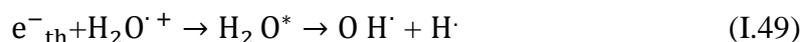
Molécules excitées :



L'électron de sous-excitation ( $e^-_{se}$ ) perd son énergie progressivement par désexcitations vibrationnelles et rotationnelles jusqu'à l'énergie de thermalisation (électron thermique  $e^-_{th}$  de 0,025 eV à  $20^\circ\text{C}$ ) en des temps de l'ordre de  $10^{-13} \text{ s}$ . Il peut également subir un attachement dissociatif. L'électron thermalisé ( $e^-_{th}$ ) se stabilise ensuite dans un entourage de molécules d'eau en électron hydraté ou aqueux ( $e^-_{aq}$ ).



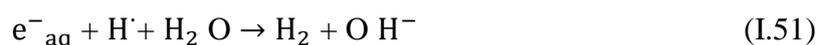
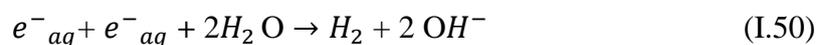
Quelques électrons thermiques ne s'échappent pas de l'attraction électrostatique de l'ion parent positif. L'électron thermique neutralise l'ion parent en donnant une molécule d'eau excitée qui se dissocie en radicaux  $H\cdot$ ,  $OH\cdot$  (Pham 2014) :



➤ Étape chimique (entre  $10^{-12}$ s à  $10^{-6}$  s) :

Les espèces radiolytiques diffusent dans la solution à partir de leur lieu de formation. Elles réagissent entre elles ou avec des solutés présents dans le milieu. Les réactions sont les suivantes :

- Réaction de recombinaison (phase chimique homogène) : les radicaux locaux conduisent à la formation d'eau, d'ions  $OH^-$  et à l'apparition de produits moléculaires tels que  $H_2$  et  $H_2O_2$  :



- Réactions radicaux-produits moléculaires (phase chimique hétérogène): ces réactions concurrencent les réactions de recombinaison dès que la concentration des produits moléculaires n'est plus négligeable devant celle des radicaux formés par le rayonnement :



Au bilan, la radiolyse de l'eau peut s'écrire :



Ce sont les produits primaires de la radiolyse.  $\text{HO}_2^\cdot$  est un radical formé dans la phase chimique hétérogène mais son mécanisme de formation est toujours mal établi (Pham 2014).

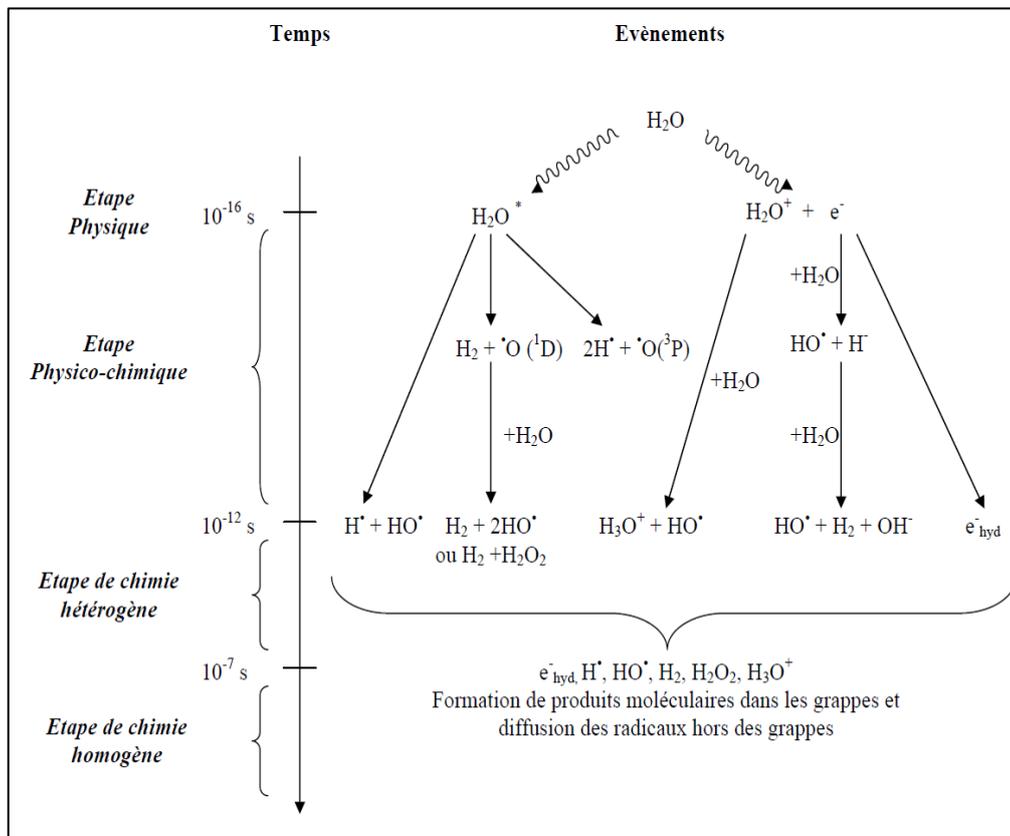


Figure (I.21) : Schéma réactionnel de la radiolyse de l'eau (Francis Crumiere 2012).