

Chapitre 1

Physique fondamentale des rayonnements ionisants — radiobiologie — radioprotection

Claudine Zorn, Jean-Philippe Dillenseger, Élisabeth Moerschel

PLAN DU CHAPITRE

1. Physique fondamentale des rayonnements ionisants	1	2. Radiobiologie	12	2.7. Cas des irradiations globales répétées à faibles doses	21
1.1. Rappels élémentaires	1	2.1. Historique et définitions	12	3. Radioprotection	22
1.2. Que sont les rayons X et γ ?	3	2.2. Interactions des rayonnements ionisants avec la matière	12	3.1. Définition de la radioprotection	22
1.3. Production physique des rayons X	5	2.3. Effets cellulaires suite à une irradiation	15	3.2. Principes de radioprotection	22
1.4. Caractéristiques d'un faisceau X	6	2.4. Effets tissulaires suite à une irradiation	18	3.3. Historique	22
1.5. Radioactivité	7	2.5. Cas de l'irradiation de tissus cancéreux	20	3.4. Cadre institutionnel	23
1.6. Caractéristiques radioactives	7	2.6. Cas de l'irradiation <i>in utero</i>	20	3.5. Les différentes doses	23
1.7. Interaction des rayons X et des rayons γ avec la matière	8			3.6. Réglementation et normes	26
				3.7. En pratique	29

1. Physique fondamentale des rayonnements ionisants

Cette partie débute avec des rappels concernant les supports physiques de base : physique des particules, avec les particules de matière (particules avec masse), les ondes électromagnétiques (particules sans masse) telles que les rayonnements X et les rayonnements γ (gamma). Après les avoir définis, nous nous intéresserons aux différentes interactions existantes de ces particules avec la matière.

La physique relative à la résonance magnétique nucléaire et aux ultrasons est quant à elle présentée dans les chapitres respectifs de l'imagerie par résonance magnétique (IRM) et de l'échographie (chapitres 5 et 6).

1.1. Rappels élémentaires

Un **atome** peut se définir comme la plus petite partie d'un corps simple que l'on peut obtenir par des actions physiques ou chimiques ; c'est le constituant élémentaire de la matière. Un atome ne peut pas se couper. Il se compose d'un **noyau** entouré d'un **cortège électronique**. Le noyau est responsable des **propriétés physiques** et le cortège électronique est responsable des **propriétés chimiques**. L'atome peut

être **neutre ou chargé** définissant un ion soit positif, soit négatif suivant son nombre d'électrons. Pour chaque élément, on peut ainsi définir un couple (A, Z). On écrit symboliquement ${}^A_Z X$, où X correspond au symbole de l'élément chimique. Un élément chimique est défini par son numéro atomique Z ou son symbole.

Noyau atomique

Le noyau est constitué de **nucléons**, à savoir des **protons** de charge positive et des **neutrons** de charge nulle. Ces nucléons sont des particules de matière et possèdent donc une masse. Le nombre de **protons** est noté **Z** : il correspond au **numéro atomique** ou nombre de charges. Le nombre de **nucléons** est noté **A** : il correspond au **nombre de masse**. Le nombre de **neutrons** est noté **N** et on obtient donc l'égalité suivante :

$$N = A - Z$$

Les masses du proton (m_p) et du neutron (m_n) sont très proches ($m_p = 1,6726 \cdot 10^{-27}$ kg et $m_n = 1,6750 \cdot 10^{-27}$ kg). La masse de l'électron ($m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg), particule de matière chargée négativement, est bien plus faible que celle du proton ou du neutron. Les nucléons contribuent principalement à la masse de l'atome. On constate que la somme des masses des

constituants individuels du noyau est supérieure à la masse totale du noyau. Cette différence appelée **défaut de masse** correspond à l'**énergie de liaison** nécessaire pour assurer la cohésion du noyau. L'équivalence entre la masse et l'énergie a été établie par **Albert Einstein** en 1905 et se traduit par l'équation $E = mc^2$ en Joules (J). Avec : E = énergie en J ; m = masse de la particule au repos en kg ; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: célérité de la lumière dans le vide.

Deux noyaux possédant le même nombre de protons (même Z), mais un nombre de masse différent ($A \neq$) sont appelés **isotopes**. Deux isotopes possèdent les mêmes propriétés chimiques du fait de leur nombre égal d'électrons mais leurs propriétés physiques diffèrent car leur nombre de neutrons n'est pas identique.

Exemple : le carbone $^{12}_6\text{C}$ et $^{14}_6\text{C}$.

Deux noyaux possédant le même nombre de neutrons (même N), mais un nombre de masse différent ($A \neq$) sont appelés **isotones**. Deux noyaux possédant un même nombre de masse (A identique) sont appelés **isobares** (figure 1.1).

Cortège électronique

Un atome est électriquement neutre s'il comporte autant de protons que d'électrons. Les électrons gravitent autour du noyau en formant ce que l'on appelle le **nuage électronique**, structuré en orbites précises. Chaque couche électronique peut accueillir un nombre déterminé d'électrons. Les couches électroniques proches du noyau sont successivement appelées couches K, L et M et peuvent contenir au maximum respectivement 2, 8 puis 18 électrons (figure 1.2). Le nombre d'électrons maximum par couche est donné par $2n^2$, avec n = numéro de la couche concernée.

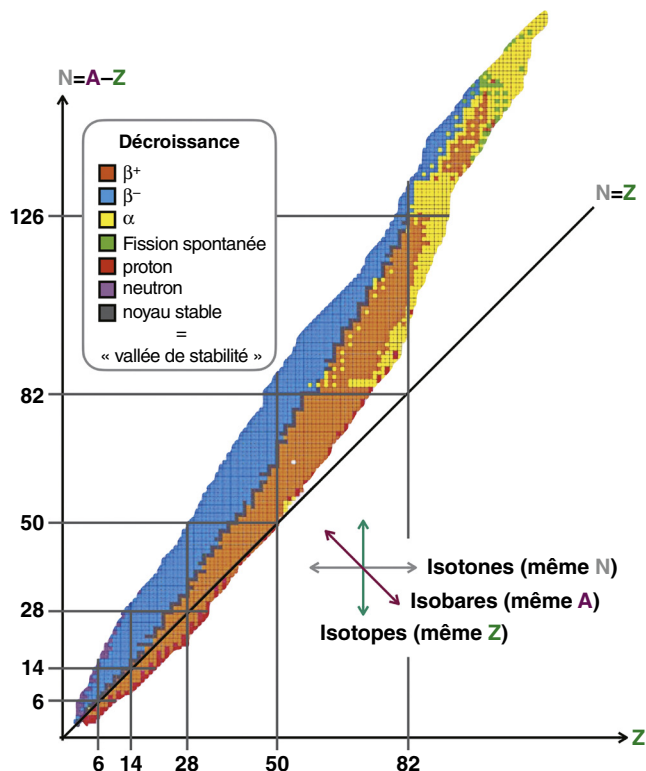


Figure 1.1. Graphique représentant les variations de Z en abscisse et de N en ordonnée afin de présenter un exemple d'isotopes, d'isotones et d'isobares.

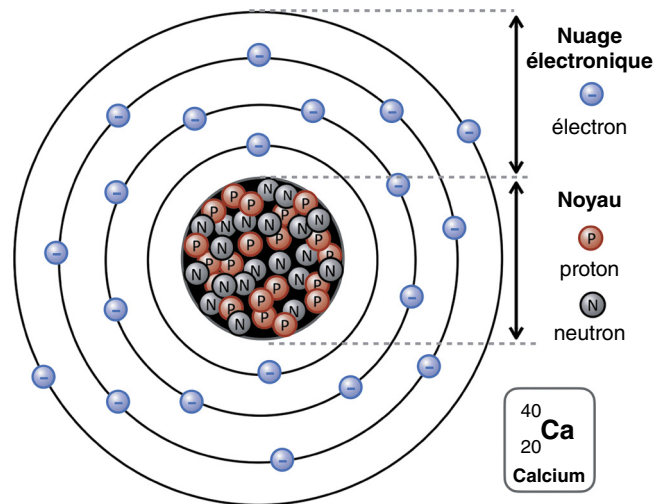


Figure 1.2. Schéma simplifié d'un atome.

Énergie

L'énergie est quantifiée pour chaque couche électronique puisque les électrons ne peuvent se trouver que sur certaines couches. Leur énergie correspondante ne peut prendre que certaines valeurs. On peut représenter les énergies d'un atome sous forme d'un diagramme énergétique :

- la couche électronique la plus proche du noyau se nomme la **couche fondamentale**, son énergie est caractéristique de chaque atome. Son énergie, comme pour le noyau, correspond à l'énergie de liaison ;
- la couche électronique la plus externe se nomme la **couche de valence**, son énergie est également caractéristique de chaque atome. Les électrons situés sur les couches les plus éloignées du noyau sont les moins liés, il faut peu d'énergie pour les arracher du noyau.

L'état stable de l'atome est l'**état fondamental**. La configuration électronique est telle que les électrons occupent toutes les positions des couches électroniques les plus proches du noyau. Dans certaines conditions, l'atome reçoit un apport extérieur d'énergie. Suite à cette absorption d'énergie, deux cas de figure se présentent :

- s'il a eu un apport suffisant d'énergie, alors l'électron n'est plus lié à l'atome, on dit que l'atome est **ionisé** ;
- si l'électron reste lié à l'atome mais est projeté sur une couche plus externe, on dit que l'atome est **excité** (figure 1.3).

Les travaux de Planck, à la fin du XIX^e siècle, ont démontré que l'énergie était quantifiée par des photons. L'énergie est un multiple d'une quantité précise : un **quantum d'énergie**. Ce quantum est transporté par une particule sans masse ni charge : le **photon**. Lorsqu'un électron passe d'un niveau d'énergie E2 (couche électronique L) à un niveau d'énergie inférieur E1 (couche électronique K), on aura la restitution de l'énergie sous forme d'émission d'un **photon** d'énergie :

$$E = |E2| - |E1| = h\nu = hc/\lambda$$

Avec : $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$: constante de Planck ; ν = fréquence de l'onde (en s^{-1} ou Hz) ; $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$: célérité de la lumière dans le vide ; λ : longueur d'onde dans le vide (en m).

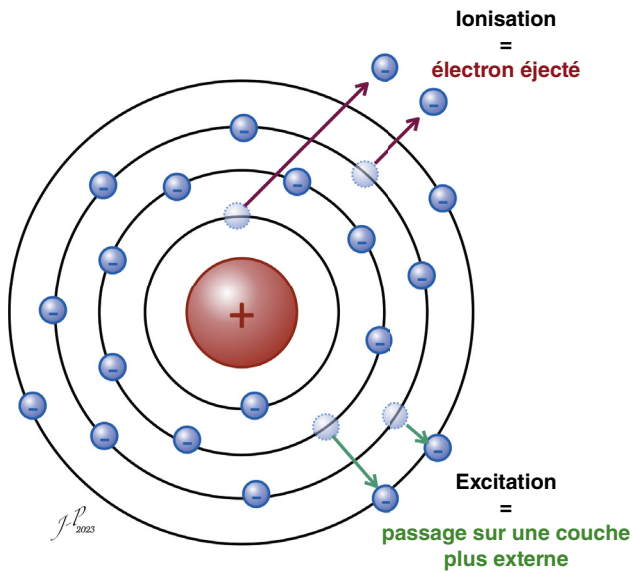


Figure 1.3. Un électron est, selon l'importance de l'énergie absorbée, éjecté du cortège électronique ou projeté sur une couche plus périphérique où il y a une vacance disponible et si l'énergie fournie correspond à la différence d'énergie entre les deux niveaux.

L'atome revient dans son état fondamental en émettant de l'énergie sous forme d'un ou de plusieurs photons si ce retour s'effectue par étapes. C'est le phénomène de **fluorescence**, qui peut concerner toute la gamme du spectre électromagnétique.

Par ailleurs, pour qu'un électron passe d'un niveau d'énergie E_1 à un niveau d'énergie E_2 , cela nécessite un apport d'énergie : on parle alors d'absorption. Cependant, ce photon ne pourra être absorbé et le transfert électronique ne se fera que si le photon a une énergie égale à la différence d'énergie des deux niveaux considérés (figure 1.4).

Suivant les transitions électroniques, on observe l'émission de photons d'énergies différentes. Cette énergie est liée à la distance entre la couche électronique d'origine et la couche électronique d'arrivée. Lors de transitions électroniques au sein des couches profondes de l'atome, ce sont la plupart du temps des **photons X ou rayons X** qui sont émis.

Pour aller plus loin

Le terme de radiation (du mot latin *radius* : trait, ligne) se rapporte à la propagation d'énergie ; on parle également d'énergie rayonnante ou de rayonnement. Une radiation est dite ionisante si elle transporte une énergie suffisante, capable de générer une ionisation.

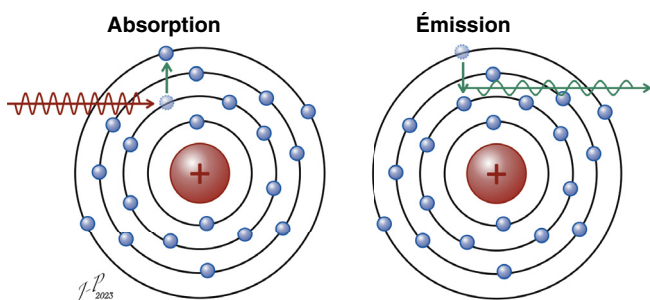


Figure 1.4. Transitions électroniques avec émission ou absorption d'un photon.

Les radiations ionisantes comportent les ondes électromagnétiques et/ou les rayonnements de particules de matière dont l'énergie est suffisante pour provoquer des ionisations au niveau des atomes du milieu. Un rayonnement est ionisant s'il transporte une énergie supérieure ou égale à 13,6 électronvolts (eV), ce qui correspond à l'énergie de liaison de l'électron de la couche K de l'atome d'hydrogène noté 1_1H . En dessous de cette énergie, le rayonnement est classé « non ionisant ». L'énergie d'ionisation est néanmoins variable en fonction de l'atome ou de la molécule considérée.

L'énergie qualifie le rayonnement ionisant ; elle est liée à la fréquence de l'onde ou des particules de matière qui le constituent.

Dans le système international d'unités, une énergie s'exprime en joules (J) mais pour les phénomènes qui se déroulent à l'échelle atomique, on emploie couramment l'électronvolt (eV) et ses multiples avec $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$. 1 eV est l'énergie cinétique qu'acquiert un électron accéléré par une différence de potentiel (ddp) de 1 volt.

1.2. Que sont les rayons X et γ ?

Présentation générale

Les rayons X et γ sont de même nature : des **ondes électromagnétiques** (o.e.m. ou OEM). L'énergie de ces photons varie de quelques électronvolts (eV) à plusieurs dizaines de mégaelectronvolts (MeV), ce qui les classe dans la famille des **rayonnements ionisants**. Du fait de leur énergie, ces rayons sont capables de traverser facilement et en grand nombre le corps humain (figure 1.5).

La dualité onde/corpuscule associée à une OEM une particule : le photon. Les photons X et γ se placent dans le domaine des énergies les plus élevées. Ils ne possèdent **ni charge, ni masse** et se propagent dans le vide à la **vitesse de $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$** .

Leur seule différence vient de leur origine (figure 1.6) :

- les **photons X** prennent naissance dans le **nuage électronique** de l'atome qui inclut le rayonnement de freinage et les transitions entre les couches électroniques (voir « **Production physique des rayons X** » de ce même chapitre) ;
- les **photons γ** ont pour origine la **structure nucléaire** de l'atome, on parle de rayonnement nucléaire. Les photons γ sont soit issus des transitions nucléaires (radioactivité) soit du phénomène d'annihilation (combinaison d'un positon avec un électron) (voir « **Radioactivité** » et « **Effet de matérialisation ou de création de paire** » de ce même chapitre).

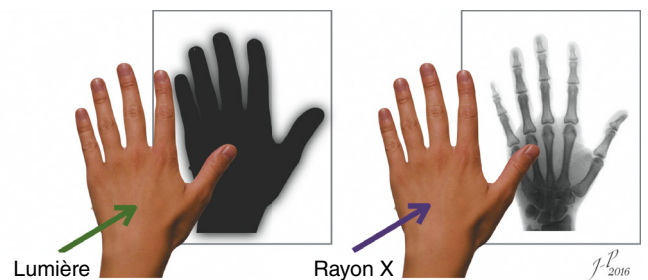


Figure 1.5. Comparaison rayons lumineux et rayons X.

Ces deux rayonnements sont des ondes électromagnétiques qui diffèrent par leur énergie. Les rayons X, du fait de leurs énergies élevées, sont capables de traverser une main humaine, contrairement aux rayons lumineux qui sont en grande partie absorbés par le corps humain.

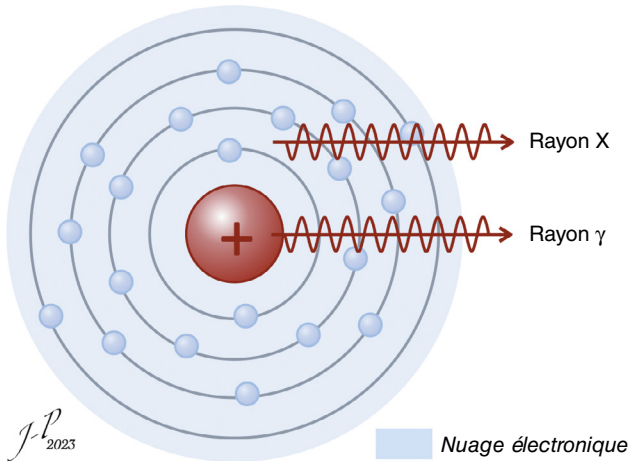


Figure 1.6. Origines atomiques du rayonnement γ et du rayonnement X.

Comme toute onde électromagnétique, l'énergie transportée par un photon est liée à sa fréquence et donc également à sa longueur d'onde dans le vide selon la relation déjà présentée : $E_{\text{photon}}(J) = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$.

En médecine, les rayons X sont utilisés en radiologie et en scanographie à des fins essentiellement diagnostiques (10 à 140 kiloélectronvolt [keV]) et en radiothérapie pour leur caractère destructif (6 à 25 MeV) et donc à visée thérapeutique. Les rayons γ sont exploités essentiellement en médecine nucléaire.

Caractéristiques d'une onde électromagnétique

Les travaux de Maxwell et Hertz ont démontré que pour les ondes électromagnétiques, il y a **coexistence d'un champ électrique noté \vec{E} et d'un champ magnétique noté \vec{B}** oscillant en phase avec la même période (figure 1.7). L'amplitude de ces ondes varie de manière sinusoïdale au cours du temps.

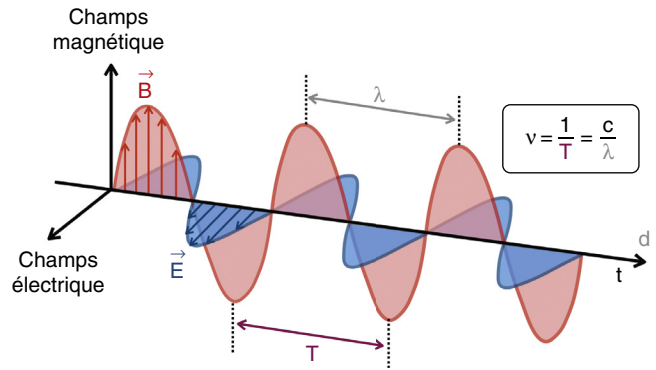


Figure 1.7. Représentation d'une onde électromagnétique.

Le champ électrique et le champ magnétique qui composent l'onde :

- sont perpendiculaires entre eux et à la direction de propagation de l'onde ;
- leurs valeurs suivent une fonction sinusoïdale ;
- vibrent en phase ;
- transportent de l'énergie.

La **fréquence**, notée f ou ν , correspond au **nombre de périodes ou d'oscillations en une seconde**. L'unité qui s'y rapporte est en s^{-1} ou en Hertz (Hz). Les rayons X et γ possèdent une **haute fréquence** (figure 1.8).

La **période de la fonction**, notée T , correspond à la **durée d'un cycle, soit d'une oscillation**. La période s'exprime en seconde (s).

La fréquence et la période sont liées par la formule : $f = 1/T$ ou $T = 1/f$.

La **longueur d'onde**, notée λ , correspond à la **distance parcourue par l'onde pendant une période**, soit la distance qui sépare deux états successifs de même amplitude. L'unité

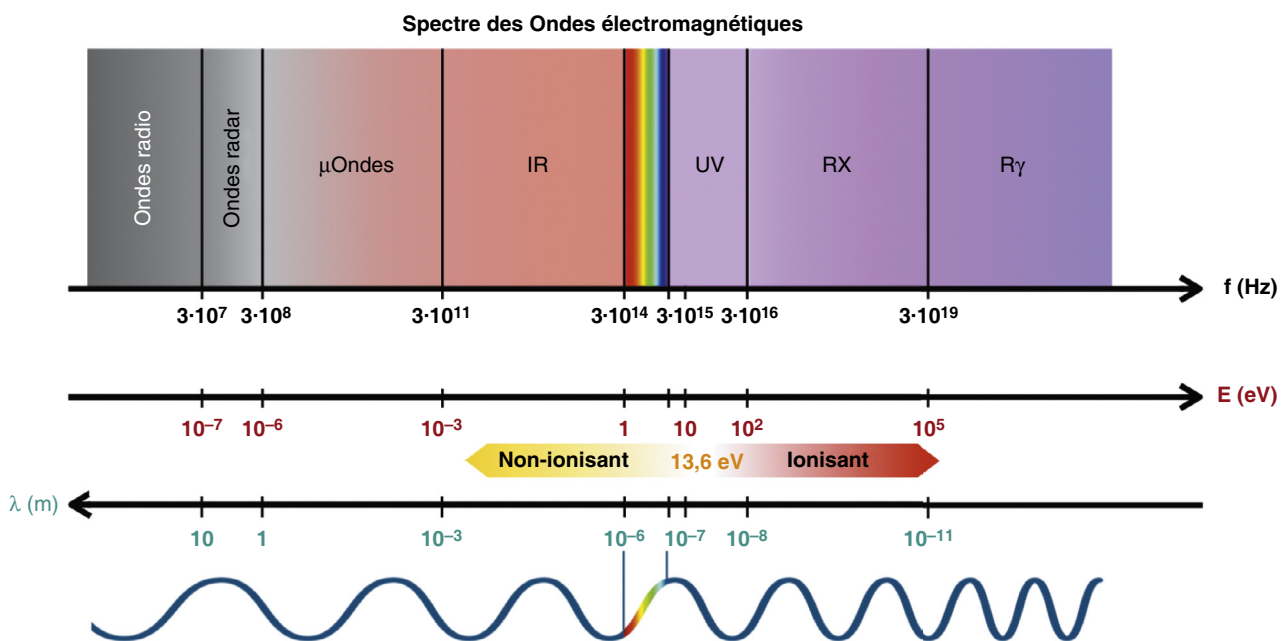


Figure 1.8. Spectre électromagnétique.

Les chevauchements des différentes catégories d'ondes électromagnétiques (qui sont arbitraires) ne sont pas représentés. Notons qu'il s'agit ici d'une manière de représenter le spectre parmi d'autres (les variations des valeurs pouvant être représentées par des droites verticales ou horizontales, croissantes vers la droite ou vers la gauche).

est le mètre (m). La fréquence et la longueur d'onde varient en sens inverse selon la formule : $f = c/\lambda$.

Par coutume, les rayons X et γ sont exprimés par leur énergie, à laquelle correspond une longueur d'onde comprise environ entre 10 picomètres (10^{-12} m) et 10 nanomètres (10^{-9} m). La lumière visible avec toutes les couleurs de l'arc-en-ciel possède des longueurs d'onde comprises entre 400 et 800 nanomètres.

1.3. Production physique des rayons X

Généralités

La production de rayons X fait suite à une **interaction énergétique** violente entre un **électron**, possédant une vitesse (énergie cinétique) très élevée, et une **cible** métallique très dense. Lors de cette interaction, l'électron ne pénètre que de quelques microns dans le métal de la cible où il subit une décélération brutale. Cette **perte d'énergie** cinétique se convertit à 99 % en **chaleur** (énergie thermique) et à 1 % en **rayonnement X**. Le rendement de production des rayons X est ainsi très faible.

Lorsqu'on s'intéresse au phénomène physique strict, on décrit deux phénomènes différents susceptibles de donner naissance à des rayons X :

- soit l'électron est dévié brutalement de sa trajectoire lorsqu'il « passe » à proximité d'un noyau de la cible, on parle alors d'**interaction électron-noyau** ;
- soit l'électron entre en collision avec un électron d'un atome constituant la cible, on parle alors d'**interaction électron-électron**.

Interaction électron-noyau

Lorsqu'un électron (de charge négative) passe au voisinage d'un noyau (de charge positive), il subit une force d'attraction électromagnétique par ce dernier. Il est dévié, donc ralenti, et ainsi perd de l'énergie émise sous forme de rayonnement électromagnétique dit « **rayonnement de freinage** » ou « **Bremsstrahlung** » (figure 1.9). Plus l'électron passe près du noyau, plus il sera dévié et perdra de l'énergie sous forme de rayonnement. La gamme d'énergie créée est large du fait de l'étendue des déviations potentielles. Les énergies les plus faibles (déviations faibles) génèrent des radiations électromagnétiques de basse fréquence, essentiellement des infrarouges

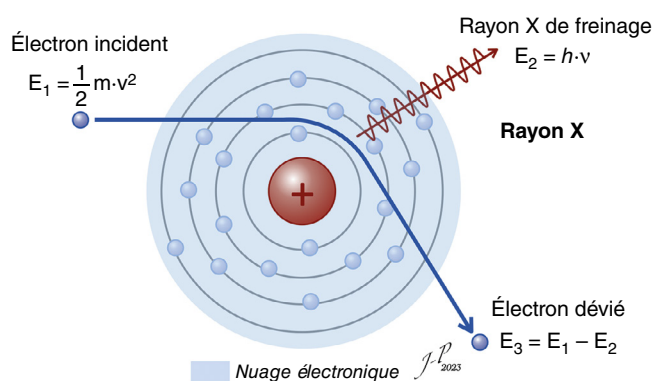


Figure 1.9. Interaction électron-noyau générant un rayonnement X de freinage ou « Bremsstrahlung ».

(= chaleur) à 99 %. Les déviations importantes généreront des rayons X (1 %) d'énergies différentes ; le faisceau X qui sortira de la cible sera donc **polychromatique**.

Lorsque la cible est très dense (en tungstène, en molybdène), l'énergie transportée par ce rayonnement de freinage se situe dans la gamme des rayons X. En effet, cette énergie augmente avec :

- le **numéro atomique** de la cible ;
- l'**énergie cinétique des électrons** incidents.

Cette énergie est définie et caractérisée par un **spectre continu** où l'on présente :

- en abscisse : l'énergie des photons X créés ;
- en ordonnée : la quantité de photons X créés pour une énergie donnée.

Ce spectre continu est étalé à partir d'une énergie maximale qui correspond au très faible nombre d'électrons ayant à la fois subi la tension pic (kVp [pic du kilovoltage]) et ayant été totalement freinés lors d'une interaction (perte totale d'énergie cinétique).

Interaction électron-électron

Dans le nuage électronique, les électrons sont groupés en niveaux d'énergie K, L, M... Ces derniers sont caractérisés par leur **énergie de liaison** avec le noyau. Plus un électron est proche du noyau, plus son énergie de liaison est élevée.

Lorsque l'énergie des électrons incidents est supérieure à l'énergie de liaison d'un électron lié, ce dernier est **arraché du cortège électronique** ($E_K > E_L > E_M > \dots$).

Si l'électron arraché provient d'une couche interne de l'atome, les électrons des couches externes vont combler la place laissée vacante. Ce faisant, l'électron qui change d'orbite perd de l'énergie qui est éjectée sous forme d'un rayon X (figure 1.10).

À titre d'exemple, pour le tungstène ($Z = 74$) l'énergie de liaison de la couche K est d'environ 70 keV, celle de la couche L de 11 keV et celle de la couche M de 2 keV. Un réarrangement par transition électronique de L vers K génère un rayon X de 59 keV : $|E_f| - |E_i| = 70 - 11 = 59$ keV.

Ce rayonnement, caractérisé par un **spectre de raies** propre aux métaux de l'anode (puisque il est fonction de l'énergie de liaison des électrons dans l'atome considéré), ne constitue qu'une faible proportion du rayonnement global sortant du tube radiogène. Cela s'explique par la faible probabilité qu'ont les électrons incidents à entrer en collision avec ceux de l'atome cible, au vu des distances qui séparent les différentes orbites électroniques. À cette échelle, le vide qui entoure les particules de matière est particulièrement tangible.

Spectre total

Le spectre total correspond à la **combinaison du spectre continu** (caractéristique de l'effet de freinage) et du **spectre de raies** (caractéristique du métal de la cible = anode du tube radiogène). La comparaison des aires liées à chaque interaction illustre bel et bien que, lors d'une interaction des électrons avec la cible, la quantité de rayons X produite par effet de freinage est supérieure à celle produite par la collision électron-électron (figure 1.11).

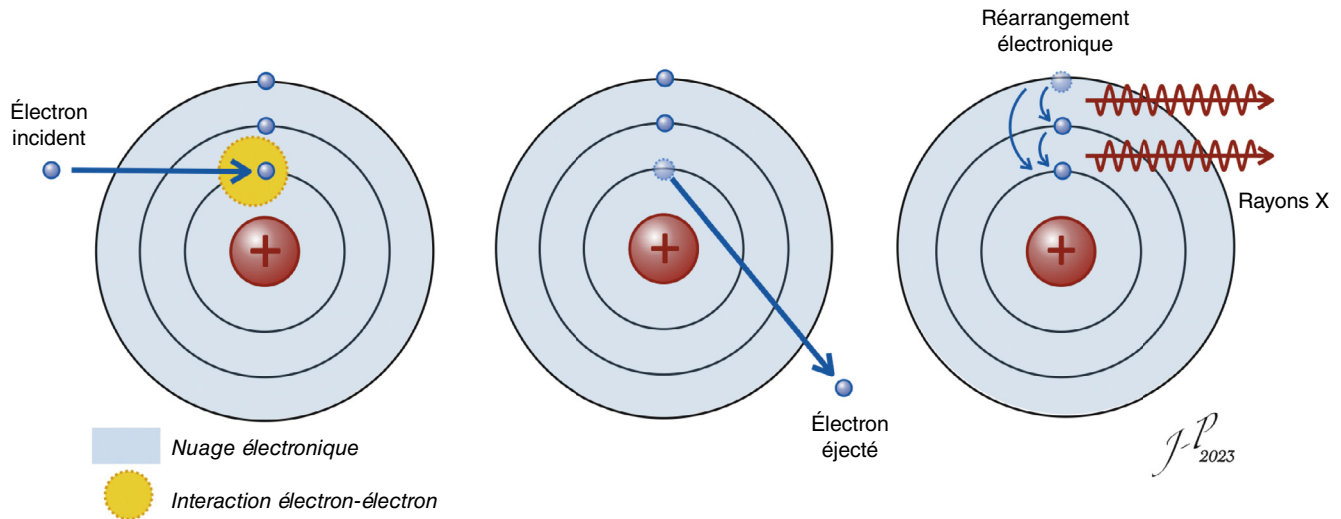


Figure 1.10. Interaction électron-électron à l'origine d'un spectre X discret (spectre de raies).

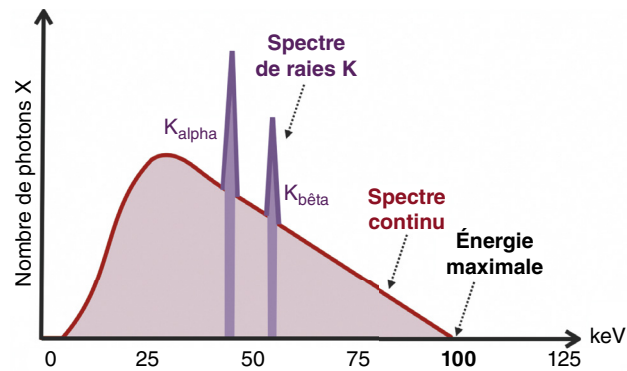


Figure 1.11. Spectre X total = spectre continu + spectre de raies.

1.4. Caractéristiques d'un faisceau X

Le terme « faisceau X » regroupe l'ensemble des rayons X produits faisant suite à l'interaction des électrons avec une cible métallique. Le faisceau X est de **nature polychromatique** (ou polyénergétique) : il contient des rayons X d'énergie différente.

L'énergie totale rayonnée (ϵ) est directement proportionnelle :

- au carré de la **tension accélératrice** (U) des électrons ;
 - au nombre d'électrons (n) incidents ;
 - au **numéro atomique** (Z) du métal de l'anode.
- $$\epsilon = \frac{1}{2} k \cdot n \cdot Z \cdot U^2$$
- (k étant une constante).

De manière générale, on parle davantage de l'« **intensité** » du faisceau X qui correspond au nombre de photons X dans le faisceau multiplié par l'énergie de chaque photon X. Elle est exprimée en $C \cdot kg^{-1}$ (SI).

En pratique courante, on évoque aussi la notion de **pénétration**, qui décrit la probabilité qu'a le faisceau X, dans sa globalité, de pénétrer la matière.

Pour rendre le faisceau globalement plus pénétrant, on peut :

- augmenter la **tension accélératrice** (kVp) des électrons venant frapper le métal de l'anode, ce qui augmente le seuil énergétique maximal du spectre (figure 1.12a) ;
- mettre en place une **filtration supplémentaire** à la sortie du tube afin d'éliminer les photons de faible énergie = « rayons

mous ». La réduction du nombre de photons est alors compensée par un gain en pénétration du faisceau, on parle aussi de « durcissement » du faisceau (figure 1.12b).

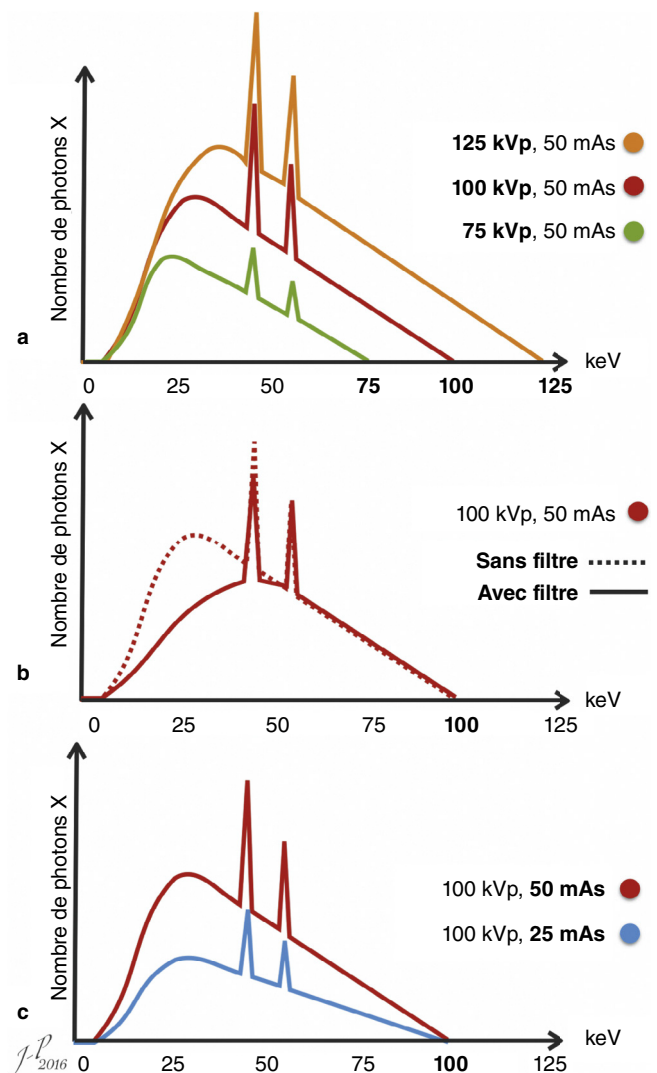


Figure 1.12. Influence de la tension (a), de la filtration (b) et de la charge (c) sur le spectre X total.

L'augmentation du nombre (n) d'électrons incidents, liée à l'intensité du courant de chauffage du filament et à la durée de l'exposition (on peut alors parler de charge = $\text{mA} \cdot \text{s}$: voir chapitre 3), n'augmente pas l'énergie du faisceau X mais uniquement la quantité de photons X produits (figure 1.12c).

1.5. Radioactivité

Définition

Un noyau est dit **stable** lorsqu'il ne subit aucune modification spontanée. Les noyaux stables ont pratiquement autant de protons que de neutrons pour un nombre de masse (A) inférieur à 20 et un léger excès de neutrons pour un nombre de masse supérieur à 20.

Certains noyaux peuvent cependant se décomposer spontanément : on dit qu'ils sont **instables** ou **radioactifs**. En principe, ces noyaux présentent une des caractéristiques suivantes :

- excès de neutrons par rapport au nombre de protons ;
- excès de protons par rapport au nombre de neutrons ;
- nombre de masse trop élevé ;
- excès d'énergie interne.

La **radioactivité naturelle** a été découverte en 1896 par **Henri Becquerel** et la **radioactivité artificielle** en 1934 par **Irène Joliot-Curie** et **Frédéric Joliot**. La radioactivité peut être définie comme la propriété qu'ont certains éléments (éléments pères) de se transformer **spontanément** en un autre élément (élément fils) par **désintégration** du noyau atomique. Cette transformation s'accompagne de **l'émission d'une particule de matière** (α ou β ou neutron), de l'énergie cinétique ainsi que la plupart du temps d'une onde électromagnétique : le **rayonnement γ** .

Radioactivité γ

Ce rayonnement γ provient du fait que le noyau fils produit se trouve dans un état excité et non dans son état fondamental. En se désexcitant, ce dernier cède au milieu extérieur son excès d'énergie sous forme d'un rayonnement γ afin d'aboutir au noyau fils désexcité. Dans certains cas, la durée de vie de ces états excités est longue ; les noyaux obtenus sont dits **métastables** (m). Par exemple, le technétium 99 métastable (^{99m}Tc) est un isotope émetteur gamma pur largement utilisé dans les services de médecine nucléaire, afin de réaliser des explorations scintigraphiques à visée diagnostique.

L'énergie du noyau est **quantifiée**, tout comme les niveaux d'énergie au cortège électronique. Chaque isotope ne pourra émettre qu'un certain nombre de photons gamma d'**énergie déterminée** correspondant aux transitions énergétiques nucléaires. L'énergie de ce rayonnement caractérise l'isotope et inversement. Cette propriété permet donc, à partir de l'énergie du rayonnement γ émis, de retrouver l'isotope en question et inversement.

L'élément fils obtenu peut également, lors de certaines désintégrations, être radioactif à son tour et plus ou moins vite aboutir à un noyau stable.

Lors de toute transformation, on a conservation du nombre de charge, du nombre de nucléons et de l'énergie totale du système entre autres lois de conservation.

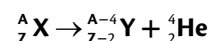


En fonction des particules émises, on distingue différents types d'émissions radioactives (figure 1.1).

Radioactivité α

La radioactivité α s'applique principalement pour les **noyaux lourds** qui contiennent un grand nombre de protons et de neutrons. On aura désintégration du noyau père, avec une perte simultanée d'un noyau d'hélium. Le nombre de masse diminue de 4 et le numéro atomique de 2. Il apparaît alors une particule constituée de 2 protons et 2 neutrons : le noyau d'hélium ${}^4_2\text{He}$.

Équation de la réaction :



La particule α peut être utilisée en médecine nucléaire dans une optique thérapeutique.

Radioactivité β^-

Ce type de radioactivité est propre aux noyaux instables ayant un **excès de neutrons**. Un neutron du noyau père va se transformer en un proton avec émission d'un électron ou particule β^- . Dans ce cas, le nombre de masse ne varie pas et le numéro atomique augmente de 1.

Équation de la réaction :



Avec $\bar{\nu}$ = antineutrino qui ne possède ni masse ni charge.

La particule β^- est utilisée en médecine nucléaire dans une optique thérapeutique.

Radioactivité β^+

On observe ce phénomène pour les noyaux ayant un **excès de protons**. Un proton du noyau se transforme en un neutron en éjectant un positon ou une particule β^+ , antiparticule de l'électron ; c'est-à-dire une particule de même masse que l'électron mais de charge opposée. Lors de cette désintégration, le nombre de masse ne varie pas et le numéro atomique est diminué de 1.

Équation de la réaction :



Avec ν = neutrino qui ne possède ni masse ni charge.

En médecine nucléaire, les isotopes émetteurs de positons sont utilisés en tomographie par émission de positon (TEP) à visée diagnostique.

1.6. Caractéristiques radioactives

Activité

L'activité notée **A** d'un échantillon d'éléments radioactifs correspond au nombre moyen de désintégrations par unité de temps. L'unité de l'activité est le **becquerel** (Bq) et 1 Bq

correspond à une désintégration par seconde (l'ancienne unité de la radioactivité était le curie (Ci) avec $1 \text{ mCi} = 37 \text{ MBq}$). L'activité de N atomes radioactifs est :

$$A_t = -dN/dt = \lambda N(t) = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-t/\tau}$$

Avec : A_t : l'activité au temps t (Bq) ; dN : le nombre d'atomes qui se sont désintégrés dans l'intervalle de temps dt ; $N(t)$: le nombre de noyaux radioactifs au temps t ; λ : la constante radioactive (s^{-1}) ; A_0 : l'activité au temps t_0 (Bq) ; $\tau = 1/\lambda$: constante de temps (s).

Période radioactive

La **demi-vie** ou **période radioactive**, notée T , d'un noyau radioactif est le temps au bout duquel la moitié des noyaux se seront désintégrés, c'est-à-dire la durée au bout de laquelle son activité sera divisée par deux.

$$T = \ln 2 / \lambda = \tau \ln 2$$

Avec : T = demi-vie (s) ; λ = constante radioactive (s^{-1}) ; $\tau = 1/\lambda$: constante de temps (s).

Dans un strict souci de radioprotection pour le patient, il est intéressant en médecine nucléaire d'utiliser des radioéléments dont la période est courte (de quelques secondes à quelques jours).

Constante radioactive

La désintégration d'un noyau radioactif est un phénomène spontané et imprévisible. Cependant, pour chaque type de noyau instable, on peut définir une probabilité de désintégration par unité de temps. Cette probabilité correspond à la constante radioactive notée λ (s^{-1}), propre à chaque atome. Lorsque la constante radioactive est élevée, la période radioactive est courte et inversement.

$$\lambda = \ln 2 / T$$

Pour aller plus loin

Il est intéressant de remarquer que le même symbole λ , qui est la onzième lettre de l'alphabet grec, est utilisé pour représenter (entre autres) deux éléments complètement distincts :

- lorsque l'on souhaite caractériser une onde électromagnétique, λ correspond à une longueur d'onde en mètre (distance) ;
- lorsque l'on se situe dans le domaine de la radioactivité, λ correspond à la constante radioactive en s^{-1} .

Par ailleurs, la même lettre T représente également deux éléments distincts :

- lorsque l'on souhaite caractériser une onde électromagnétique, T correspond à la période de la fonction en s (durée d'un cycle) ;
- lorsque l'on se situe dans le domaine de la radioactivité, T correspond à la période radioactive en s (durée pour que l'activité soit diminuée de moitié).

1.7. Interaction des rayons X et des rayons γ avec la matière

Atténuation globale des photons dans la matière

Au cours de leur traversée du milieu, qu'il s'agisse des rayons X ou des rayons γ , ces **photons sont atténués** en

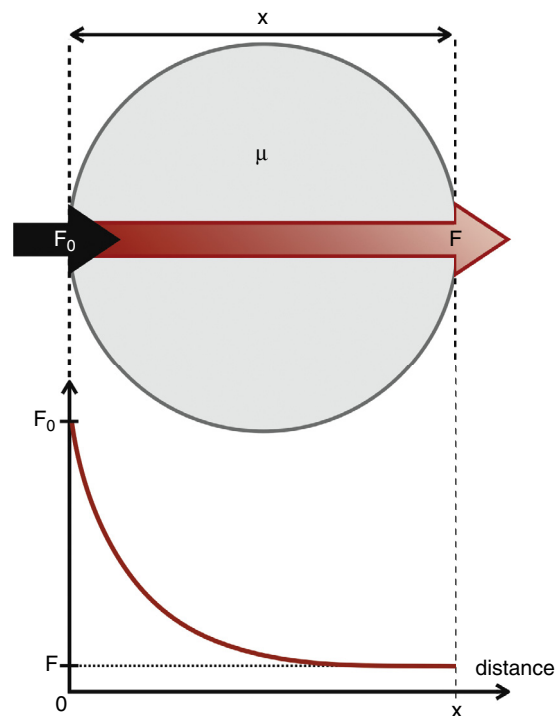


Figure 1.13. Atténuation de la fluence d'un faisceau X monoénergétique dans un milieu homogène (μ) d'épaisseur x .

suivant une variation exponentielle décroissante. La « **fluence photonique** » (en photons \cdot mm $^{-2}$) permet d'estimer cette atténuation qui dépend de (figure 1.13) :

- la **fluence photonique incidente** (F_0), c'est-à-dire le nombre de photons présents par unité de surface (mm 2) à l'entrée du milieu ;
- la **densité** du milieu traversé, c'est-à-dire de son **coefficient d'atténuation** (μ) ou d'absorption : plus le coefficient du milieu est élevé, plus le faisceau est absorbé ;
- l'**épaisseur** (x) du milieu traversé : plus cette épaisseur augmente, plus l'atténuation est importante.

Ces différents paramètres sont liés par la **loi de Beer-Lambert** selon la formule :

$$F = F_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

Avec : F = fluence photonique à la sortie du corps étudié ; F_0 = fluence photonique incidente (entrée du corps) ; x = épaisseur traversée ; μ = coefficient d'absorption du milieu traversé.

Remarque : ce calcul n'est rigoureux que pour un milieu traversé homogène (même coefficient d'atténuation) et que si l'on considère le faisceau incident comme étant monoénergétique.

Cette atténuation globale des rayons s'explique par plusieurs **interactions physiques** élémentaires classées ci-dessous par leur ordre d'apparition en fonction de l'énergie incidente (selon un ordre croissant) :

- l'effet de diffusion de Thomson-Rayleigh ;
- l'effet **photoélectrique** ;
- l'effet **Compton** ;
- l'effet de matérialisation ou de création de paire à partir d'un photon ;