

1 Introduction générale

La biophysique est un domaine passionnant qui combine la physique et la biologie pour comprendre le fonctionnement des systèmes biologiques, depuis les molécules individuelles jusqu'aux organismes entiers. Ce cours vous fournira une introduction complète aux principes fondamentaux de la biophysique, en explorant les méthodes et les techniques utilisées pour étudier les systèmes biologiques.

À la fin de ce cours, vous acquerrez une compréhension de la manière dont la biophysique peut être appliquée pour expliquer les rayonnements électromagnétiques et particulaires, ainsi que les interactions entre ces rayonnements et la matière. Vous serez également initié à la dosimétrie, aux diverses techniques de radiologie, aux principes du son et de l'ultrason, ainsi qu'à l'échographie. Enfin, vous aurez également une introduction à la mécanique des fluides et à l'optique géométrique. Vous découvrirez également comment les outils de la biophysique peuvent être appliqués dans des domaines tels que la médecine humaine, et animale, la biotechnologie, la pharmacologie etc.

Ce cours vous aidera à développer une compréhension profonde de la biophysique et de son rôle essentiel dans la compréhension des systèmes biologiques. Vous aurez la possibilité d'explorer des questions de recherche actuelles et de découvrir comment la biophysique peut être utilisée pour aborder les problèmes de santé en générale et les défis environnementaux. J'espère que vous trouverez ce cours passionnant et enrichissant !

1.1 Définitions de la Biophysique

La biophysique est une discipline scientifique qui étudie les phénomènes biologiques à travers les principes et les méthodes de la physique.

Cette étude comprend l'analyse de l'effet des vibrations, rayonnements, électricité, sons, etc. sur les êtres vivants. Elle englobe également l'examen des techniques de diagnostic et de traitement basées sur des méthodes physiques, ainsi que l'étude des phénomènes physiques à l'intérieur de l'organisme, tels que les échanges et les écoulements de fluides, les transferts à travers les membranes, la circulation sanguine et la respiration...

1.2 Rappels des constantes fondamentales des lois physiques appliquées en biologie.

Les tableaux présentés ci-dessous exposent les systèmes de mesure et de calcul des constantes fondamentales couramment utilisés en biologie, et qui seront largement employés dans ce cours.

Tableau: 1. Illustration des unités des grandeurs et leurs définitions

Mètre	m	Longueur du trajet parcouru dans le vide par la lumière pendant la durée de 1/299 792 458 de seconde
Masse (Kilogramme)	Kg	Masse du prototype en platine iridié qui a été sanctionné par la Conférence Générale de Poids et Mesure
Temps (seconde)	s	Durée de 9 192 631 770 période de la radiation correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins de l'état fondamentale de l'atome de césium 133.
Intensité (Ampère)	A	Intensité d'un courant électrique constant qui, maintenu dans deux conducteurs parallèles, rectilignes, de longueur infinie, de section circulaire négligeable et placés à une distance de 1 mètre l'un de l'autre dans le vide, produirait entre ces conducteurs une force de $2 \cdot 10^{-7}$ newton par mètre de longueur
Température (Kelvin)	K	Le Kelvin, unité de température thermodynamique, est la fraction 1/273,16 de la température thermodynamique du point triple de l'eau.
Concentration (Mol)	Mol	Quantité de matière d'un système contenant autant d'entités élémentaire qu'il y a d'atome dans 0.012 kilogramme de Carbone 12.
Intensité I Candela	cd	La candéla est l'intensité lumineuse, dans une direction donnée, d'une source qui émet un rayonnement monochromatique de fréquence $540 \cdot 10^{12}$ hertz et dont d'intensité énergétique dans cette direction est 1/683 Watt par stéradian.

Période	$T = 0,693 / \lambda$		
Célérité (onde électromagnétique)	$C = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$		
Fréquence (n) : Hertz (Hz)	1 Hertz (Hz) = 1 vibration par seconde		
Constante de Plank	$h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$		
Nombre d'Avogadro	$N = 6,023 \cdot 10^{23}$		
Masse au repos de l'électron	$m_e = 0,000550 \text{ u.m.a.}$		
Masse au repos du proton	$m_p = 1,007596 \text{ u.m.a.}$		
Grandeur	Unité	Symbole	Définition
Energie	Joule	J	$\text{Kg m}^2 \text{ s}^{-2}$
Force	Newton	N	Kg m s^{-2}
Pression	Pascal	Pa	N m^{-2}
Charge	Coulomb	C	A s
Potentiel	Volt	V	J C^{-1}

2 Rayonnements Electromagnétiques et particulaires

2.1 Définition de rayonnement

Le rayonnement peut être défini comme le transfert d'énergie sous forme d'ondes ou de particules, qui peut se produire à travers le rayonnement électromagnétique tel que l'infrarouge, ou par la désintégration radioactive telle que la radioactivité α ou bêta. Ce transfert peut se produire même dans le vide. L'exemple le plus courant de rayonnement est celui du soleil dans l'espace.

En physique, le terme radiation ou rayonnement fait référence à l'émission ou à la transmission d'énergie sous forme de particules ou d'ondes électromagnétiques ou acoustiques. Cela comprend les rayonnements électromagnétiques tels que les ondes radio, l'infrarouge, la lumière, les rayons X et les rayons gamma, ainsi que les rayonnements particulaires tels que les particules alpha, bêta et neutrons.

2.2 Classification des rayonnements

On classe les rayonnements selon leurs natures ou selon leurs interactions avec la matière. Elles peuvent être classés selon leurs natures soit en:

Rayonnements Electromagnétiques (REM) :

Exemple : Les ondes Radio, Lumière visible, Infra rouge, Ultra violet, Rayons X et γ

Rayonnement particulaires (corpusculaires), (RP) :

Exemple : particule de masse non-nulle, **chargés** (électrons et positons), qui agissent avec les électrons de la matière cible, **neutres** (neutrons), qui agissent sur les noyaux de la matière cible et rayonnement alpha (α) et (β).

Ou elles sont classés selon leurs interactions avec la matière en :

Rayonnements ionisants :

Exemple : Rayons X et γ

Rayonnements non ionisants :

Exemple : Les ondes Radio, Lumière visible, Infra rouge.

2.3 Rayonnements électromagnétiques

Le rayonnement électromagnétique est une forme de rayonnement qui se propage à travers l'espace sous forme de champs électriques (**E**) et magnétiques (**B**) oscillants perpendiculaires entre eux (Figure 1). Il peut avoir des longueurs d'onde différentes, allant des ondes radio aux rayons gamma. Les ondes électromagnétiques transportent de l'énergie et de l'information, et sont utilisées dans de nombreuses

applications, telles que la médecine, la communication, la radiodiffusion, et la télédétection. Les rayonnements électromagnétiques sont également produits naturellement par les corps célestes, comme le soleil et les étoiles.

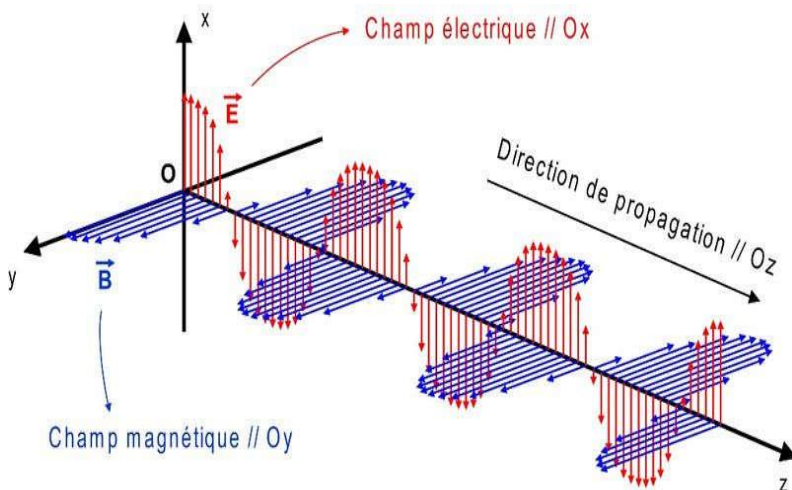


Figure 1. Propagation d'une onde électromagnétique

2.3.1 Spectre d'un rayonnement électromagnétique

Le spectre de rayonnement électromagnétique est une représentation de toutes les longueurs d'ondes possibles des ondes électromagnétiques, classées par ordre croissant ou décroissantes de leur fréquence ou de leur énergie. Ce spectre comprend une gamme continue de rayonnements, allant des ondes radio à basses fréquences, en passant par la lumière visible, jusqu'aux rayons X et gamma à haute fréquence.

Chaque type de rayonnement électromagnétique a des propriétés différentes, telles que la capacité à pénétrer dans la matière ou à être réfléchi ou absorbé par certains matériaux. Les différentes parties du spectre de rayonnement électromagnétique ont des utilisations différentes en science, en médecine et dans d'autres domaines de la technologie.

L'intensité d'un REM peut également être représentée graphiquement et les spectres obtenus sont appelés respectivement, spectre en longueur d'onde, spectre en fréquence et spectre en énergie (Figure 2).

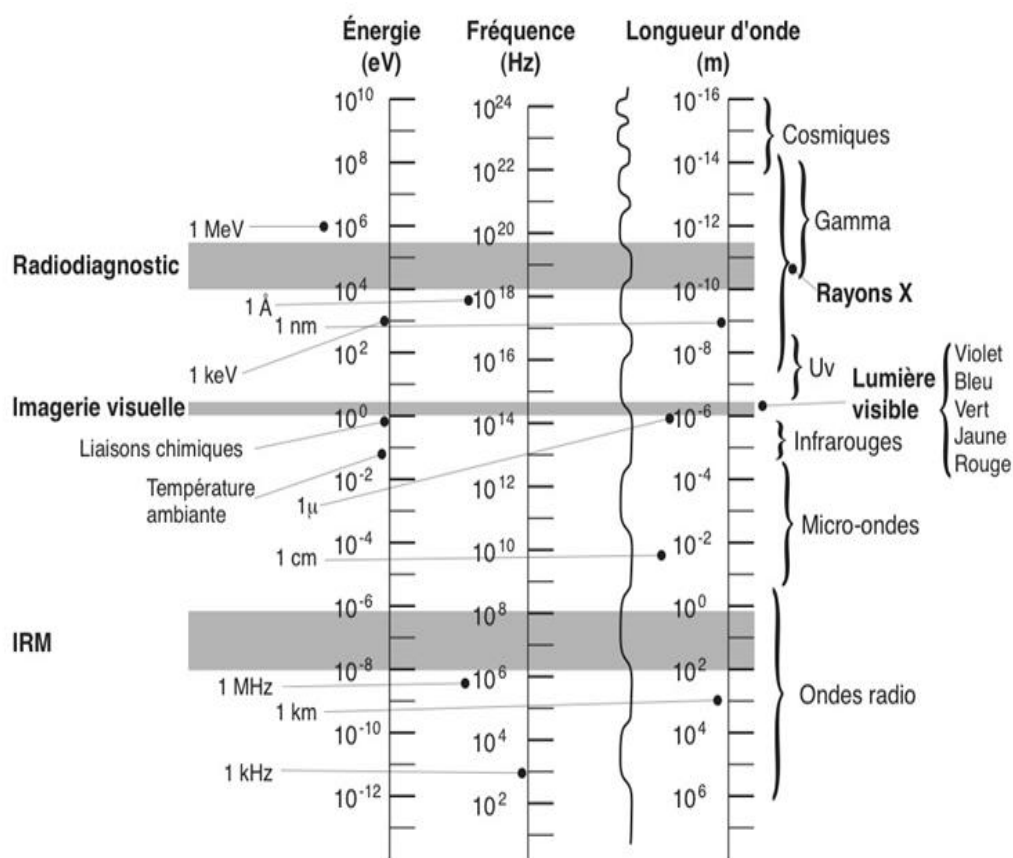


Figure 2. Le spectre électromagnétique en fonction de l'énergie, de la fréquence et de la longueur d'onde.

Remarque :

- ✓ Une onde électromagnétique monochromatique, c'est-à-dire présentant une seule fréquence est aussi appelée onde sinusoïdale. Elle se propage en créant une perturbation (ou déformation) dans l'espace. Le passage de cette perturbation peut être entièrement décrit par une fonction appelée « fonction d'onde » qui dépend de la position du point de l'espace considéré et du temps.
- ✓ Une onde électromagnétique permet le transport de l'énergie sans aucun support matériel (propagation dans le vide).
- ✓ L'onde électromagnétique est une onde plane (c'est-à-dire que sa propagation dans le vide se fait dans une direction perpendiculaire au plan défini par E et B).
- ✓ Dans le vide, la propagation de l'onde électromagnétique se fait à vitesse constante : c (Vitesse de la lumière).

2.3.2 Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide.

La vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide est une constante notée « c » et appelée « célérité de la lumière ». Elle est donnée par la relation :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = c$$

ϵ_0 et μ_0 : sont des constantes représentant respectivement la permittivité et la perméabilité dans le vide.

$$\epsilon_0 = 8,84 \times 10^{-12} \text{ SI}$$

$$\mu_0 = 1,26 \times 10^{-6} \text{ SI}$$

La célérité de la lumière est donc égale à :

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

2.3.3 Propagation d'une onde électromagnétique dans la matière

Les ondes électromagnétiques peuvent se propager dans certains milieux matériels et pas d'autre, suivant leurs fréquences une matière peut se montrer:

- ✓ transparente (propagation possible)
- ✓ opaque (pas de propagation, les ondes sont totalement absorbées, diffusées ou réfléchies)

Dans un milieu transparent la célérité est variable, elle dépend de la nature chimique du milieu mais aussi de paramètres physiques tels que la température, la pression, la densité....

Chaque milieu transparent est caractérisé par son indice de réfraction « **n** » qui dépend parfois de la fréquence, et qui permet d'exprimer la célérité dans le milieu: $\mathbf{n} = c_{\text{vide}} / v_{\text{milieu}}$.

2.3.4 Caractéristiques d'un rayonnement électromagnétique

Comme toutes les ondes périodiques elle est caractérisée par:

- sa période **T** (exprimée en seconde (s)) (peu utilisée)
- sa fréquence **v** (exprimée en hertz (Hz))
- sa longueur d'onde **λ** (exprimée en mètre (m))
- son amplitude (préfère utiliser la notion d'intensité lumineuse **I**)
- sa célérité **c** (exprimée en (m.s⁻¹))
- son énergie notée **E** (exprimée en Joules (J)).

Ces grandeurs sont liées entre elles par les relations usuelles:

- La fréquence est l'inverse de la période: $\mathbf{v} = 1 / \mathbf{T}$

- La période est par conséquent l'inverse de la fréquence: $T = 1/\nu$
- La longueur d'onde est la distance sur laquelle se propage l'onde pendant la durée d'une période d'ou la relation $\lambda = c \cdot T$ mais on peut également l'exprimer en fonction de la fréquence $\lambda = c/\nu$.

2.3.5 Période et fréquence d'une onde électromagnétique

On appelle période T la durée d'une vibration entière. La fréquence ν mesure le nombre de vibration par seconde.

$$T = \frac{1}{\nu}$$

Avec T en seconde et ν en s^{-1} ou Hz

2.3.6 Longueur d'onde

La longueur d'onde représente la distance parcourue par l'onde électromagnétique pendant une période d'oscillation (figure 3).

Dans le vide, la période est donnée par la relation : $\lambda = c \cdot T = \frac{c}{\nu}$ ou λ en mètre et c en $m \cdot s^{-1}$

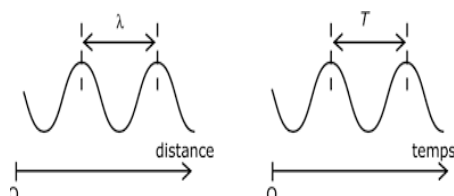


Figure 3. La longueur d'onde λ et la période T

2.3.7 Energie d'une onde électromagnétique

Comme toutes les ondes, les ondes électromagnétiques propagent de l'énergie, celle-ci dépend de la fréquence: plus la fréquence est élevée et plus l'énergie propagée est grande.

Etant donné que $\lambda = c/\nu$, plus la longueur d'onde est faible et plus l'énergie est élevée. Par conséquent les rayonnements les plus énergétiques du spectre électromagnétique sont les rayons gamma tandis que les moins énergétiques sont les ondes radio.

Au niveau du spectre visible on peut dire que les lumières violettes sont plus énergétiques que les lumières rouges.

L'onde électromagnétique permet le transport de l'énergie sous forme de paquets discrets (discontinus) appelés quanta.

Chaque quantum transporte une énergie **E** tel que : **E = h.v**

h est la constante de Planck : **h = 6,62 . 10⁻³⁴J.s**

E en Joules (J).

A l'échelle atomique, il est d'usage d'exprimer, l'énergie en électronvolt (eV).

2.3.8 Emission et absorption d'une onde électromagnétique

L'émission ou l'absorption d'ondes électromagnétiques par la matière est possible lors de transition entre « niveaux d'énergie » différents:

Le passage vers un niveau d'énergie plus bas permet de libérer de l'énergie et donc d'émettre une onde électromagnétique.

Le passage vers un niveau d'énergie plus élevée nécessite un gain d'énergie et donc l'absorption d'une onde électromagnétique.

2.3.9 Aspect corpusculaire d'un rayonnement électromagnétique

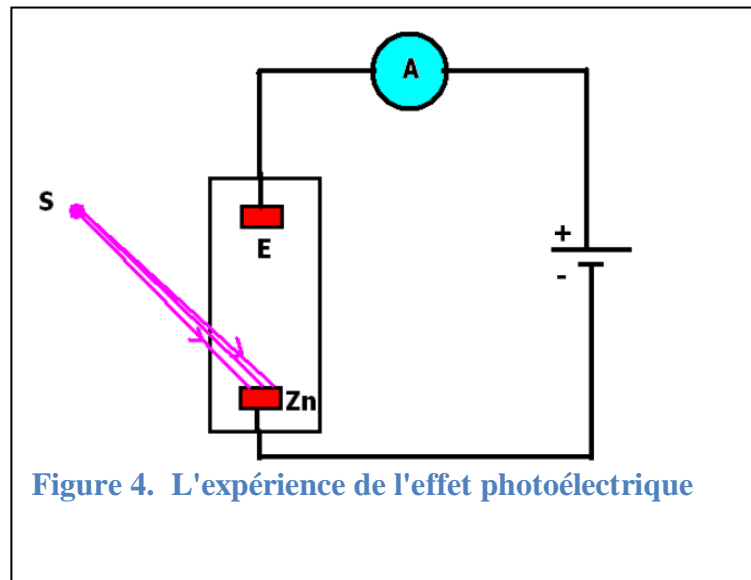
Dans certaines conditions, les ondes électromagnétiques peuvent être interprétées comme un flux de particules appelées photons. Cette notion de "photon" est utile pour comprendre les propriétés de la lumière, notamment la façon dont elle interagit avec la matière et peut échanger de l'énergie avec elle. En d'autres termes, la notion de photon permet d'expliquer les caractéristiques particulières de la lumière en termes de particules plutôt que d'ondes.

2.3.9.1 Une brèche dans la théorie ondulatoire : l'effet photoélectrique

Vers la fin du XIX^{ème} siècle, la communauté scientifique était convaincue que le modèle ondulatoire était suffisant pour expliquer toutes les propriétés de la lumière dans n'importe quelle expérience. Cependant, des difficultés ont été rencontrées, notamment en 1887, lors de la découverte de l'effet photoélectrique par Heinrich Hertz (1857-1894) (Figure 4).

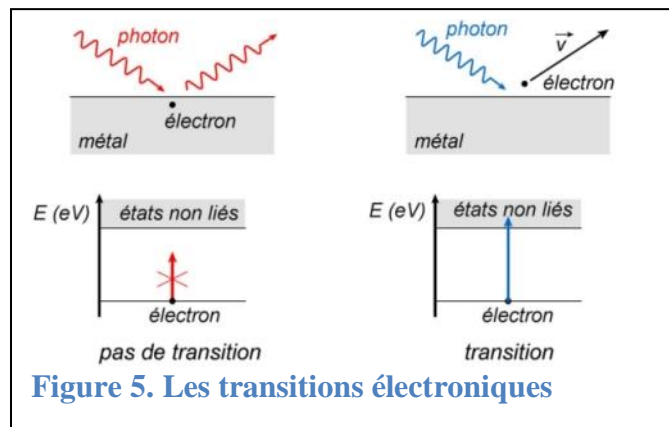
L'effet photoélectrique a été observé dans une expérience célèbre impliquant l'illumination d'une plaque de zinc (considérée comme une cathode) soumise à un potentiel négatif avec une source lumineuse (UV, RX, etc.). On observe un courant électrique (détecté par la déviation de l'aiguille de l'ampèremètre) lorsque les électrons sont arrachés de la plaque et recueillis par l'anode E. Cependant, la production de ce courant ne pouvait pas être expliquée par l'interaction entre l'onde électromagnétique et la plaque de zinc.

En 1905, Albert Einstein (1879-1955) a expliqué l'effet photoélectrique en revenant à un modèle corpusculaire, en indiquant que la lumière devait apporter des quantités d'énergie suffisantes sous forme de photons pour arracher un électron au métal et permettre ainsi à l'électroscope de se décharger. Le concept de photon avait été introduit en 1900 par Max Planck (1858-1947) dans son modèle du rayonnement du corps noir.



De part la quantification des niveaux d'énergies des électrons dans un atome, la libération de l'électron ne peut se faire qu'en « un coup », c'est-à-dire qu'avec **un seul photon apportant assez d'énergie**.

Selon la relation $E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, cela concerne des photons de hautes fréquences ν / basses longueurs d'onde λ : des **photons UV** dans l'expérience. En conséquence, **un rayonnement privé de photons UV** (effet de la lame de verre) **n'est pas capable pas de créer un courant électrique**.



Entre l'énergie et la longueur d'onde il y a la relation suivante (de Duane et Hunt) :

$$E(\text{eV}) = \frac{12400}{\lambda (\text{Å})}$$

Où $1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ joules

et $1 \text{ Å} = 10^{-10}\text{m}$.

Ces photons entrent en collision avec les électrons du métal et lorsque leur énergie devient supérieure à l'énergie de liaison de l'électron W_0 , les électrons sont alors arrachés avec une énergie cinétique (Figure 5). Cette condition donne l'équation de l'effet photoélectrique.

$$h\nu = W_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

Cet aspect **qualitatif** du rayonnement électromagnétique (énergies des photons) **ne peut pas être décrit par le modèle ondulatoire**.

2.3.9.2 La solution de Louis de Broglie : dualité onde-particule

Le modèle ondulatoire est adapté pour décrire la lumière dans les expériences de diffraction et d'interférences, tandis que le modèle corpusculaire convient mieux pour expliquer l'effet photoélectrique. Cependant, Louis de Broglie a trouvé une solution à ce dilemme en 1923. Il a expliqué que les deux modèles ne s'opposent pas nécessairement, mais plutôt qu'ils coexistent. La lumière et les ondes électromagnétiques ont un comportement double d'onde et de particule, appelé la dualité onde-particule ou onde-corpuscule. Pour illustrer cette idée, la littérature utilise souvent la métaphore d'un cylindre qui peut sembler être soit un cercle soit un rectangle selon l'angle d'observation, sans être réellement l'un ou l'autre (figure 6).

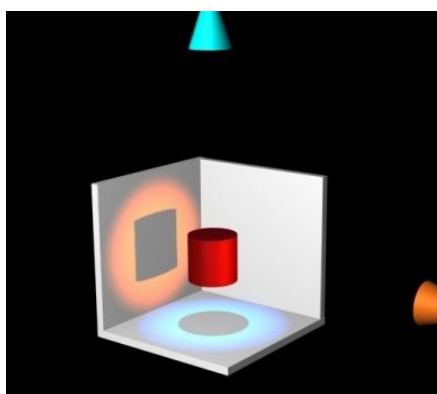


Figure 6. La métaphore du cylindre

2.3.9.3 Longueur d'onde de Louis De Broglie d'un objet quantique

Pourquoi la lumière reçoit-elle un traitement si spécial ? Selon Louis De Broglie, la réponse est que ce double comportement n'est pas unique à la lumière. En effet, tout objet peut être considéré comme à la fois une onde et une particule. Pour les objets macroscopiques, ce comportement ondulatoire n'est pas perceptible, mais pour des objets tels que les électrons, les phénomènes de diffraction et d'interférence peuvent être observés, leur permettant ainsi de se comporter comme des ondes. En général, les objets dont la taille est inférieure ou égale à celle d'un atome seront décrits par la mécanique quantique et présenteront cette dualité onde/particule.

Le caractère ondulatoire d'un objet quantique de masse non nulle est traduit par sa longueur d'onde λ de De Broglie. Celle-ci est donnée par la relation : $\lambda = \frac{h}{p}$ ou λ est en mètre, $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{J.s}$ et h est la constante de Planck; p (en kg.m.s^{-1}) est la quantité de mouvement de la particule de masse m (en kg).

→ En régime non relativiste ($v \ll c$), $p = m.v$.

→ En régime relativiste (non exigible), $p = \frac{m.v}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$, c étant la célérité de la lumière.

Remarque : pour une particule de masse nulle, la relation s'écrit toujours $\lambda = \frac{h}{p}$, mais avec $p = \frac{E}{c}$ (non exigible), où E est son énergie (en J).

2.4 Le rayonnement ionisant et non ionisant

Étant donné que les atomes d'hydrogène, présents en abondance dans la matière vivante, ont une énergie d'ionisation de 13,6 eV, les rayonnements sont classés en fonction de leur effet sur la matière.

1. **Le rayonnement non ionisant** n'a pas assez d'énergie pour ioniser les atomes ou les molécules (et ainsi leur faire acquérir ou perdre des électrons).

Il existe différents types de rayonnements non ionisants, tels que les rayons ultraviolets proches, la lumière visible, le rayonnement infrarouge, les micro-ondes et les ondes radio. Bien que ces rayonnements ne puissent pas ioniser les atomes, ils ne sont pas entièrement inoffensifs. Par exemple, les micro-ondes sont suffisamment énergétiques pour cuire les aliments, et les rayons ultraviolets peuvent causer des coups de soleil sur la peau.

2. **Le rayonnement ionisant** a assez d'énergie pour éjecter des électrons de leur atome d'origine et libérer ainsi des ions.

Le rayonnement ultraviolet lointain, les rayons X et les rayons gamma sont des formes de rayonnement ionisant qui sont très énergétiques. Ils peuvent rapidement causer des dommages aux cellules, voire causer des cancers. C'est la raison pour laquelle on porte un tablier de plomb lors d'une radiographie et pourquoi les techniciens se tiennent dans une pièce différente lors de l'utilisation d'appareils de radiologie. Bien que la quantité de rayonnement dans une seule radiographie ne soit pas nocive, une exposition à de nombreux rayons X peut être dangereuse.

3 Rayonnements particuliers

Le rayonnement particulaire est constitué de particules atomiques ou subatomiques, telles que des protons, des neutrons et des électrons, qui ont une énergie cinétique (l'énergie associée au mouvement d'une masse). Contrairement aux particules élémentaires, ces particules ont une masse au repos non nulle et ils ont:

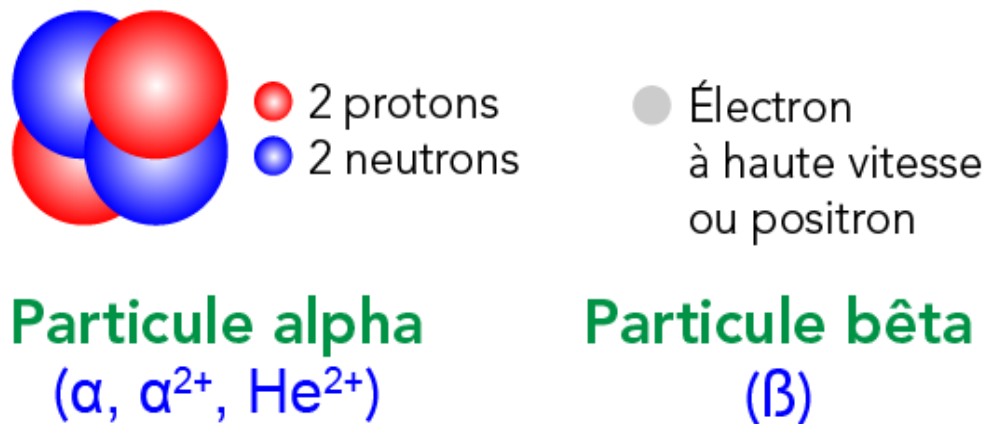
- Une charge
- Une masse au repos m_0
- Une vitesse v
- Une masse cinétique $m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}$
- Une impulsion (ou quantité de mouvement) $p = m.v$
- Une énergie totale $E = m. c^2$
- Energie cinétique $E_{\text{cin}} = m_0.c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$

Il existe trois particules élémentaires, deux lourdes (neutron et proton) et une légère (électron), auquel on peut ajouter le positon (β^+) et le négatron (β^-).

Les particules alpha et les particules bêta émettent un rayonnement directement ionisant parce qu'elles sont chargées et peuvent entrer directement en interaction avec les électrons atomiques grâce aux forces coulombiennes (c.-à-d. que les charges de même nature se repoussent, tandis que celles de nature opposée s'attirent).

Les particules alpha se composent de deux protons et de deux neutrons. Ces particules sont grosses, lentes et chargées positivement. Une particule alpha est identique au noyau d'un atome d'hélium.

Les **particules bêta** sont petites et se déplacent rapidement. Ils peuvent avoir une charge positive (positons) ou une charge négative (électrons).



©2019 Parlons sciences

Figure 7. Les particules alpha et bêta

Chaque particule alpha a deux protons et deux neutrons. Une particule bêta peut être un électron à haute vitesse ou un positon.

Les neutrons se trouvent dans le noyau des atomes et, contrairement aux protons et aux électrons, il s'agit de particules non chargées.

La radiation neutronique est un rayonnement indirectement ionisant. Il est composé de neutrons libres qui ont été libérés des atomes.

Ces neutrons libres peuvent réagir avec le noyau d'autres atomes pour former de nouveaux isotopes, qui peuvent à leur tour émettre un rayonnement, par exemple des rayons gamma. On dit que le rayonnement neutronique est « indirectement ionisant » parce qu'il n'ionise pas les atomes de la même manière que les particules chargées.

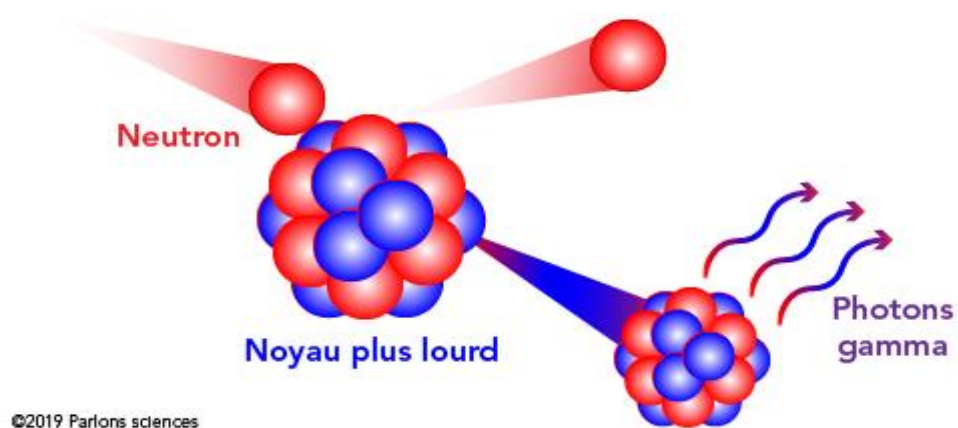


Figure 8. Les neutrons et les rayons gamma.

Lorsqu'un neutron percute un noyau plus lourd lors d'une collision inélastique, l'énergie acquise par le noyau est libérée sous forme de photons gamma. Le neutron conserve cependant une importante quantité d'énergie.

4 Rayonnement X

4.1 Introduction

On aura tous à un moment opportun dans notre vie à prendre une ou plusieurs radiographies, que ce soit chez le dentiste ou chez le médecin. Avant tout, il serait très intéressant de comprendre le fonctionnement des rayons X qui sont à l'origine de la radiographie.

4.2 Découverte

En 1895, le physicien allemand Wilhelm Conrad Röntgen a fait une découverte presque fortuite en mettant au jour les rayons X, une avancée qui a changé radicalement notre compréhension du monde. Cette découverte a rapidement été utilisée en médecine pour créer la radiologie, et a finalement valu à Röntgen le premier prix Nobel de physique en 1901.

4.3 Nature

Les rayons X sont des ondes électromagnétiques couramment utilisées dans diverses applications, notamment l'imagerie médicale sous forme de radiographie conventionnelle. Ils font partie du spectre électromagnétique, comme la lumière visible, mais ont une longueur d'onde beaucoup plus courte, se situant entre 10^{-12} m et 10^{-8} m. Les rayons X ne sont pas visibles à l'œil nu car ils ne font pas partie de la lumière visible. Avec une fréquence élevée allant de 3×10^{16} Hz à 3×10^{19} Hz, les rayons X sont très énergétiques et peuvent pénétrer plus ou moins facilement à travers les objets matériels. Bien qu'ils soient un peu moins nocifs que les rayons gamma, les rayons X sont toujours dangereux en raison de leur haute énergie.

4.4 Production des rayons X

Comment sont-ils produits ?

Les Rayons X sont générés à partir d'un tube à rayons X (tels que les tubes Coolidge ou Crookes), qui est constitué de deux électrodes : l'anode (ou anticathode) et la cathode. La cathode, connectée au pôle négatif à basse tension, est fabriquée à partir d'un filament de tungstène qui émet des électrons par effet thermoélectronique. Ces électrons sont ensuite transférés à l'anode, qui est reliée au pôle positif à haute tension, pour générer des rayons X.

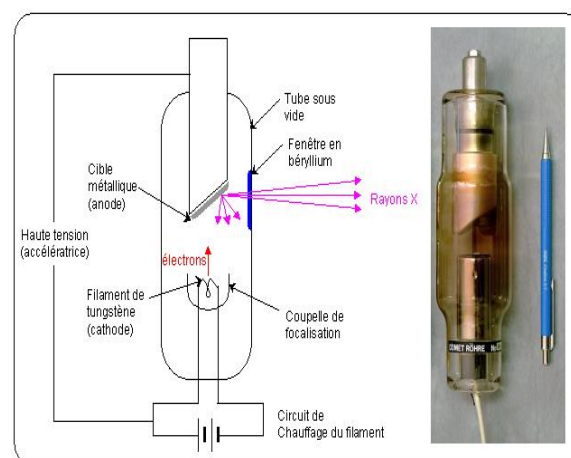


Figure 9. Tube à rayons X (tubes Coolidge)

4.4.1 Principe de production des rayons X

- **Effet thermoélectronique** : un filament de tungstène (cathode (-)) est chauffé à très haute Température à l'aide d'un courant électrique de faible intensité et de faible tension.
- **Accélération des électrons** : le filament de tungstène émet alors des électrons qui sont accélérés par une tension U (qq dizaines de KeV), et qui se précipitent vers une cible métallique (anode (+)). Sous l'action du champ électrique U , ils acquièrent une énergie cinétique : $E = \frac{1}{2} mv^2 = e \cdot U$
- **Concentration du faisceau d'électrons** : afin d'éviter une divergence trop importante due à la répulsion des électrons entre eux, le filament est entouré d'un cylindre porté à un potentiel négatif ; c'est une pièce de concentration qui permet la **focalisation** du faisceau d'électrons vers la cible.
- **émission du rayonnement** : le rayonnement est émis perpendiculairement au faisceau d'électrons incidents, et traverse le bord du tube par une « fenêtre »

La puissance du générateur exprimée en watts a pour expression :

$$P(\text{watts}) = U(\text{KV}) \cdot i(\text{mA})$$

U : est la valeur de la tension accélératrice.
 i : est l'intensité du courant électronique.

Seule une fraction (1%) de cette puissance consommée au niveau de l'anode est utile à la production des rayons X. Si \emptyset représente le flux rayonné par le tube (énergie transportée par seconde), le **rendement énergétique** du tube est égale à :

$$R = \emptyset/P = (k \cdot i \cdot U^2 \cdot Z) / (U \cdot i) = k \cdot U \cdot Z$$

K : est le coefficient de proportionnalité égale à 10^{-10}
 U : est la tension accélératrice exprimée en volts.
 Z : est le numéro atomique de la cible.

- ✓ si i augmente, le nombre d'électrons émis augmente, et donc le nombre de photons X émis augmente
- ✓ si U augmente, l'énergie des électrons émis augmente, et donc l'énergie maximale des photons X émis augmente.

La plupart de la puissance électrique $P = U \cdot i$ est **consommée sous forme de chaleur**, si bien que la **puissance rayonnée** \emptyset effectivement sous forme de rayons X, $\emptyset = P_R = k \cdot i \cdot U^2 \cdot Z$ est faible.

N.B : La tension accélératrice variée selon les besoins de l'utilisation des rayons X :

- ✓ 50 kV en radioscopie.

- ✓ 100 kV en radiographie.
- ✓ 200 kV en radiothérapie.

4.5 Le spectre des rayonnements X

Le **spectre continu**, également appelé spectre de Bremstrahlung, est généré lorsque des électrons passent à proximité d'un noyau atomique sans causer son ionisation, entraînant un freinage brusque. La plupart de l'énergie est convertie en chaleur lors des collisions avec les atomes de l'anticathode, mais selon la théorie électromagnétique, ce freinage des électrons s'accompagne de l'émission d'un rayonnement électromagnétique. L'énergie perdue par l'électron lors de ce freinage, notée ΔW , est transférée à un photon émis avec une énergie $h\nu$. ΔW peut prendre n'importe quelle valeur inférieure à l'énergie cinétique initiale de l'électron ($e.U$) lorsqu'il atteint l'anticathode. Par conséquent, la longueur d'onde du photon peut avoir n'importe quelle valeur qui satisfait la condition $e.U \geq h\nu$.

Le spectre continu est généré par la décélération des électrons lorsqu'ils interagissent avec l'anticathode. Certains électrons s'arrêtent brusquement après une seule collision, transférant ainsi toute leur énergie à un photon X. L'énergie de ce photon, notée $h\nu$, est inférieure ou égale à l'énergie $e.U$ des électrons incidents.

La valeur limite de la longueur d'onde des photons X émis est :

$$\lambda_{\min} = hc/e.U \rightarrow \lambda_{\min} (\text{\AA}) = 12400/ U \text{ (volts)}$$

La longueur d'onde minimale des photons émis ne peut être inférieure à λ_{\min} , qui diminue lorsque la tension d'accélération augmente. Il est intéressant de noter que cette longueur d'onde ne dépend pas de la cible utilisée, mais uniquement de la tension d'accélération des électrons.

Prenons l'exemple d'une cible en molybdène qui est bombardée par des électrons sous des tensions de plus en plus élevées. Pour chaque tension d'accélération, nous pouvons examiner la distribution du spectre obtenu, c'est-à-dire comment l'intensité des rayons X émis varie en fonction de leur longueur d'onde. Jusqu'à une tension de 20 kV, un spectre continu est obtenu, qui se termine aux courtes longueurs d'onde. À partir de 25 kV, des raies d'émission très intenses apparaissent, qui se détachent du spectre continu. **Ces raies sont appelées raies caractéristiques.**

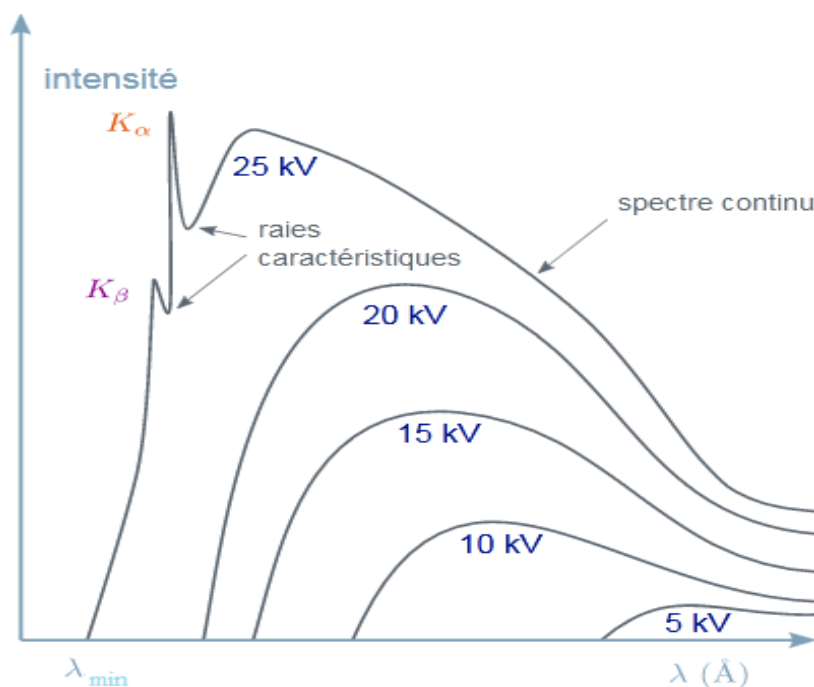


Figure 10. Schéma du spectre d'émission X du molybdène en fonction de la tension appliquée U.

Le spectre des raies caractéristiques : Lorsqu'un électron avec une grande énergie entre dans un atome, il peut arracher un électron de l'une des couches intérieures de l'atome (K, L, etc.). Dans un temps très court, un électron d'une couche supérieure se déplace pour prendre la place laissée vacante. Ce processus s'accompagne d'une émission de rayonnement électromagnétique dont la fréquence est directement proportionnelle à la différence d'énergie de l'électron avant et après la transition entre les orbites.

Exemple : Si un électron est éjecté d'un niveau d'énergie W_1 et est remplacé par un électron d'un niveau d'énergie $W_2 < W_1$, le photon X émis aura une énergie E telle que :

$$E = W_1 - W_2 = \frac{hc}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{(W_1 - W_2)}$$

N.B : La différence entre les énergies de deux électrons appartenant à deux couches voisines est la plus grande pour les couches les plus intérieures.

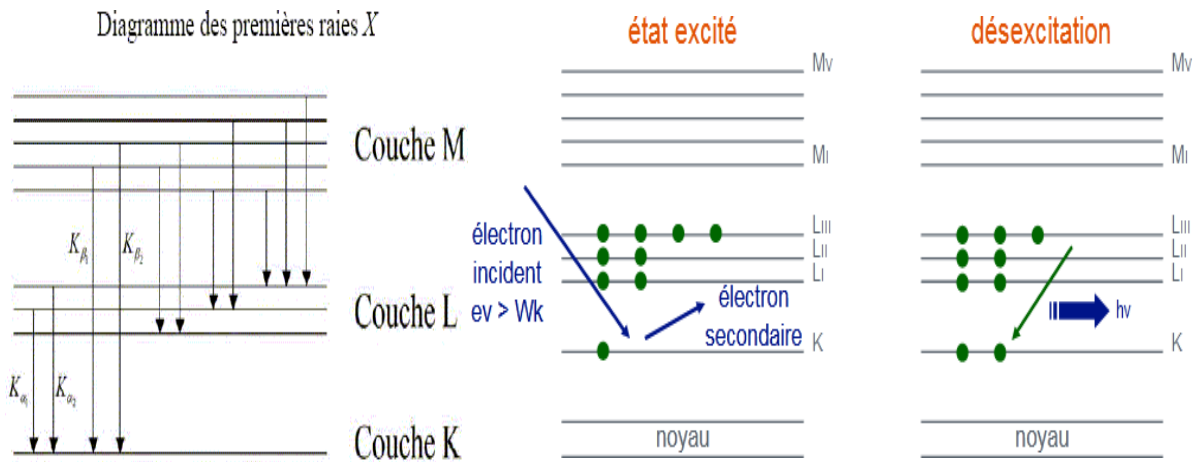


Figure 11. Diagramme des premières raies X

La couche K est définie par $n = 1$ pour des raisons historiques. Si l'électron qui comble la vacance dans la couche K provient de la couche L ($n = 2$), la raie émise est appelée K_{α} . Si l'électron provient de la couche M ($n = 3$), la raie émise est appelée K_{β} , et ainsi de suite. L'électron qui remplit le trou laissé dans la couche L ou M provient d'une couche supérieure de l'atome.

N.B : les rayons X émis par ionisation présentent donc un spectre de raies.

Remarque : C'est l'utilisation de ce spectre qui est utilisée dans le domaine de la cristallographie et de l'analyse chimique par fluorescence ". Il présente peu d'intérêt en médecine

Le spectre global résulte de la superposition du spectre continu du rayonnement de freinage (qui est prédominant) et du spectre de raies.

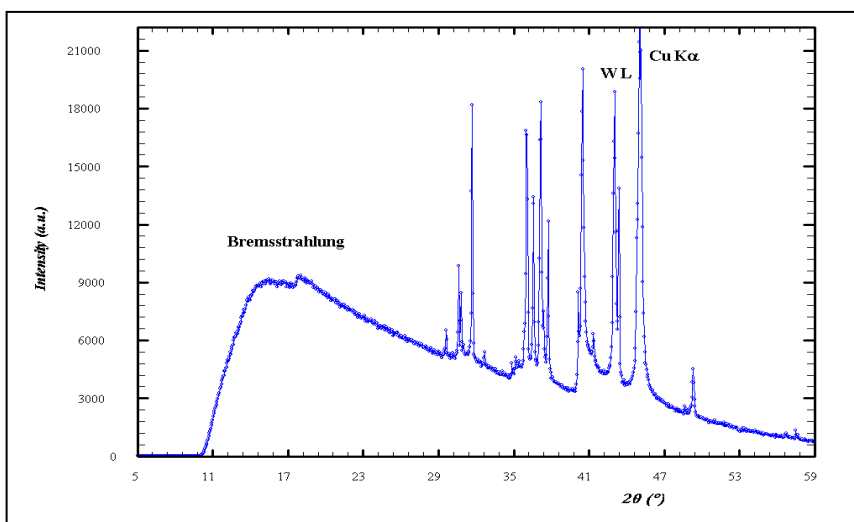


Figure 12. Spectre global résulte de la superposition du spectre continu du rayonnement de freinage et du spectre de raies.

5 La Radioactivité

5.1 Introduction

La radioactivité n'a pas été créée par les humains, elle est un phénomène naturel qui a été identifié à la fin du XIXe siècle. En 1896, le physicien français Henri Becquerel cherchait à déterminer si les rayons émis par les sels fluorescents d'uranium étaient identiques aux rayons X, qui avaient été découverts en 1895 par le physicien allemand Wilhelm Roentgen. Becquerel pensait que les sels d'uranium émettaient ces rayons X après avoir été stimulés par la lumière. Toutefois, il a été surpris de découvrir à Paris, en mars 1896, que le film photographique avait été exposé sans avoir été soumis à la lumière solaire. Il a conclu que l'uranium émettait spontanément des rayonnements invisibles, différents des rayons X, sans se décharger. Ce phénomène a été appelé la radioactivité (du mot latin "radius" qui signifie rayon). En 1898, Pierre et Marie Curie ont isolé le polonium et le radium, des éléments radioactifs inconnus présents dans le minerai d'uranium, à la suite des travaux de Becquerel. Dans la nature, il y a des noyaux stables et des noyaux instables ou radioactifs.

5.2 Stabilité du noyau

Un noyau est instable (radioactif), quand les forces de répulsion entre les nucléons sont supérieures aux forces de cohésion.

5.2.1 Stabilité et énergie de liaison

La masse du noyau est inférieure à la somme des masses de ses constituants (protons et neutrons).



$$Z m_p + N m_n > m_{\text{noyau}}$$

$$\Delta m = (Z m_p + N m_n) - m_{\text{noyau}} \implies \Delta E = \Delta m \cdot c^2$$

ΔE : l'énergie qui serait libérée au cours de la réaction de la formation du noyau.

$\Delta E / A$: l'énergie moyenne de liaison par nucléon

A : nombre de nucléons

La stabilité est d'autant plus grande que l'énergie de liaison par nucléon est plus élevée

5.2.2 Stabilité et nombre de nucléons

Les protons chargés positivement se repoussent, l'ajout de neutrons stabilise les nucléides par un effet de "dilution" des charges positives qui en étant plus éloignées les unes des autres auront tendance à moins se repousser.

5.2.3 La carte N-Z :

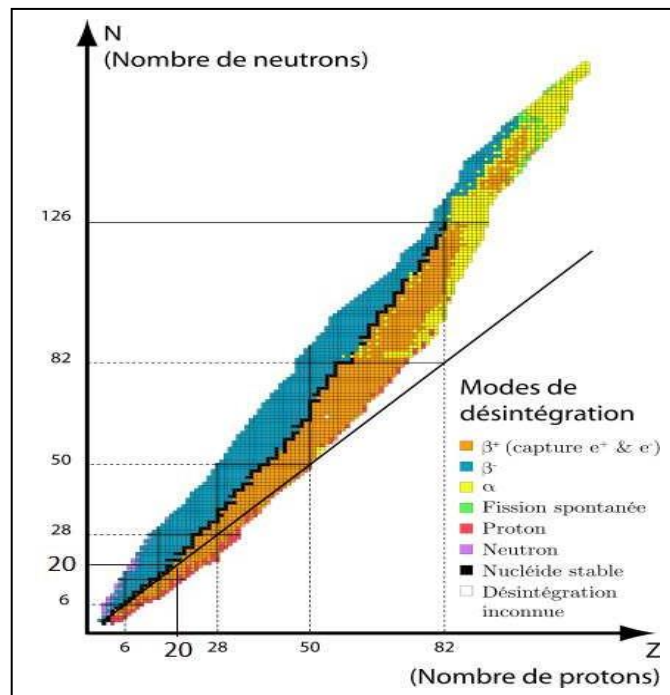


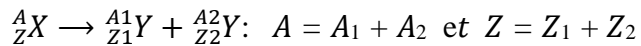
Figure 13. La carte N-Z

Le graphique représentant le nombre de neutrons en fonction du nombre de protons est appelé carte N-Z, on y distingue plusieurs zones différentes:

- ✓ Les noyaux stables ("vallée de la stabilité"), (noyaux représentés en noir dans le graphique):
 - Pour $Z < 20$, les noyaux stables se situent au voisinage de la droite $Z=N$
 - Pour $Z > 20$, le nombre de neutrons augmente plus vite que le nombre de protons, les noyaux stables se situent au-dessus de cette droite.
- ✓ Les noyaux instables sont séparés en 3 cas:
 1. Excès de neutrons (au-dessus de la vallée de la stabilité), (zone bleue), les radionucléides appartenant à cette zone se désintègrent par émission d'un électron: particules β^-
 2. Défaut de neutrons (en dessous de la vallée de la stabilité), (zone orange), les radionucléides appartenant à cette zone se désintègrent par émission d'un positon, ils sont radioactifs β^+ .
 3. Noyaux ayant un défaut de neutrons et dont $A > 170$ se désintègrent par émission α .

5.3 Propriétés de la désintégration radioactive

- 1- Respecte la conservation de la charge électrique Z et du nombre de masse A . Z et A doivent être conservés après la désintégration.



- 2- Spontanéité : la désintégration se produit sans aucune intervention extérieure. Elle n'a besoin d'aucune condition particulière (température, pression,....etc.)
- 3- Aléatoire : lorsque l'on considère un noyau en particulier, on ne peut pas savoir quand il va se désintégrer. Dans un échantillon, on ne peut pas savoir quel noyau va se désintégrer.
- 4- Inéluctable : rien ne peut arrêter, ralentir ou accélérer la cadence de désintégration d'un échantillon radioactif.

5.4 Radioactivité naturelle

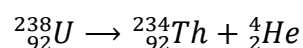
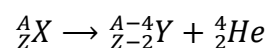
- **En 1896** Henri Becquerel a découvert que les composés de l'uranium émettent une radiation impressionnant les plaques photographiques et ionisant l'air.
- **1898-1899** Pierre et Marie Curie isolèrent 2 éléments plus radioactifs que l'uranium : le polonium et le radium.
- **En 1900** Marie Curie suggère une hypothèse sur la radioactivité : " *Les atomes se métamorphosent subissent une transmutation avec émission d'une énergie considérable*".

On distingue dans la radioactivité naturelle trois types de rayonnements : α , β , γ .

5.4.1 Désintégration α (hélium) ou émission α

Entraîne l'émission d'un rayonnement α (noyau d'hélium(${}^4\text{He}$)).

Exemple :



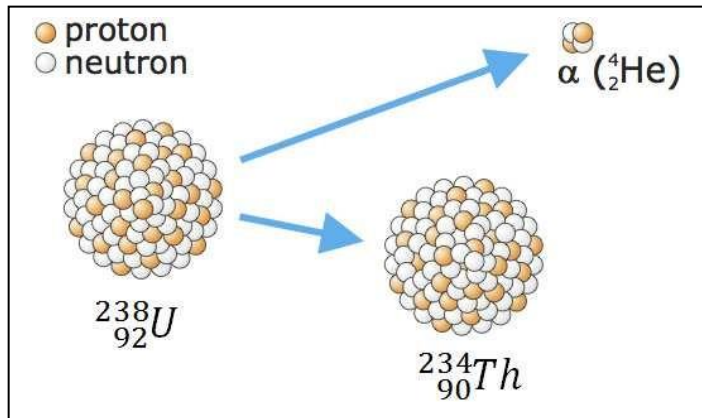


Figure 14. Désintégration α

Ce type de désintégration se produit pour les noyaux lourds $Z > 82$

5.4.2 Désintégration β

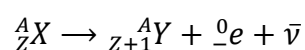
Entraîne l'émission d'un rayonnement β .

Un rayonnement β est soit un électron (e^-) soit un positon (e^+). De ce fait il y a deux types de désintégrations β : la désintégration β^- et la désintégration β^+ .

Les périodes radioactives des désintégrations β sont plus courtes, parfois même très courtes.

5.4.2.1 Désintégration β^- (négaton)

Lorsque le rapport N/Z est trop élevé, un neutron a tendance à se transformer en proton, il donne naissance à une particule qui a les mêmes caractéristiques que l'électron appelée β^- : négaton.



Exemple :

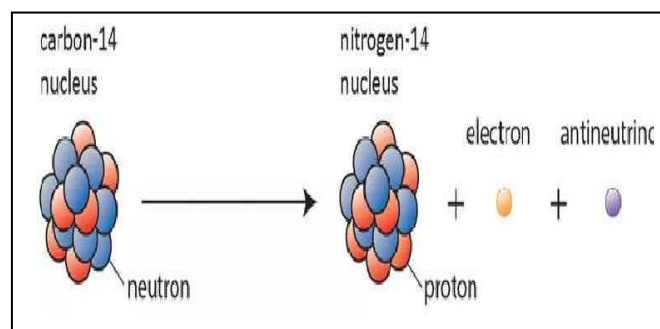
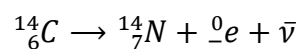


Figure 15. Désintégration β^-

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

5.4.2.2 La désintégration bêta (β^+)(positon)

Lorsque dans le noyau il y a un excès de protons, l'un d'eux se transforme en neutron. Il y a émission d'un positon et d'un neutrino .

Exemple :

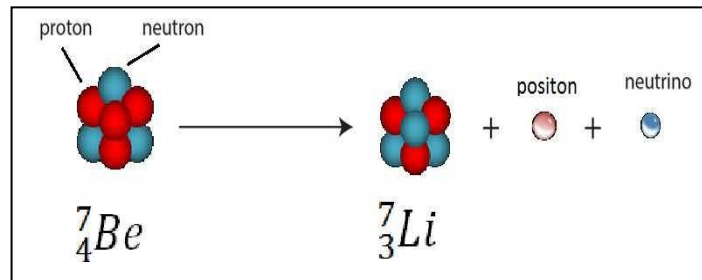
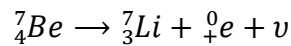
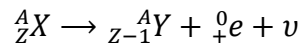


Figure 16. Désintégration β^+

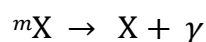
Elles sont plus pénétrantes mais moins ionisantes que les particules α .

Elles pénètrent la peau sur une épaisseur de quelques millimètres. Elles sont dangereuses pour la peau.

5.4.3 Rayonnement γ

L'éjection des particules α et β souvent s'accompagnent d'un rayonnement électromagnétique de très courte longueur d'onde ($\lambda < 1\text{Å}$) de même nature que les rayons X ou la lumière, se sont les rayons γ .

Les rayons γ sont dus au fait que les rayons formés par désintégration radioactive sont souvent à l'état excité et ils tendent à perdre cette énergie pour passer à l'état stable du point de vue énergétique.



Exemple :

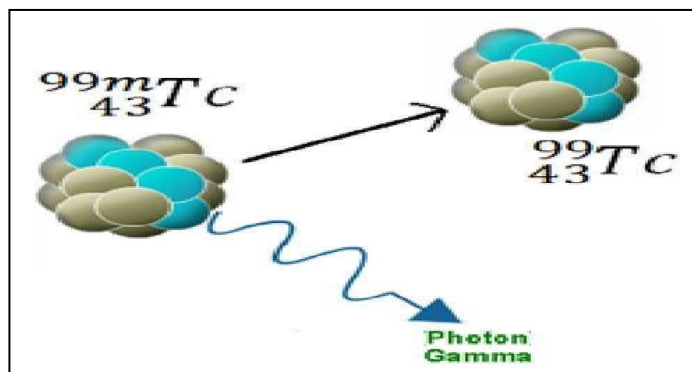
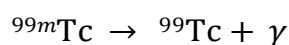


Figure 17. Désintégration γ

L'émission d'un rayonnement γ ne produit ni variation de masse ni de charge.

Ils ne sont pas directement ionisants, mais ils sont très pénétrants.

La radioactivité naturelle est spontanée et elle est dite naturelle parce que les noyaux radioactifs se trouvent à l'état naturel.

Important : Les désintégrations α et β sont souvent accompagnées de l'émission d'un ou plusieurs rayons γ .

5.5 Loi de désintégration radioactive

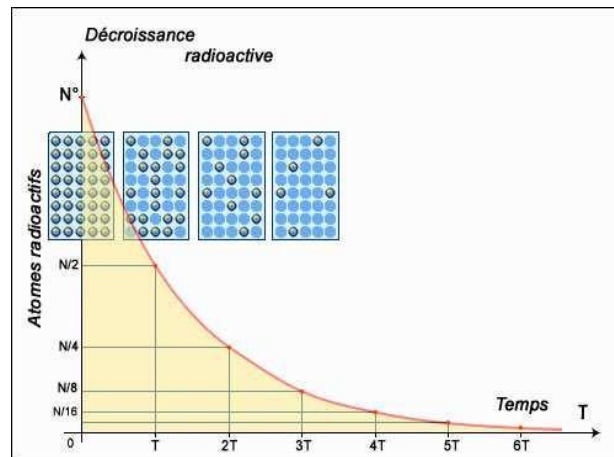


Figure 18. La décroissance radioactive

La loi de désintégration radioactive s'applique à tous les types d'isotopes radioactifs, qu'ils soient naturels ou artificiels. Elle énonce que le nombre d'atomes radioactifs dans un échantillon diminue exponentiellement avec le temps, et que cette décroissance ne dépend ni de la pression ni de la température ni des réactions chimiques impliquant les atomes radioactifs. Cette propriété fondamentale de la désintégration radioactive permet d'utiliser cette loi pour mesurer l'âge de différents échantillons contenant des isotopes radioactifs, ainsi que pour d'autres applications scientifiques et médicales.

Quand le nucléide formé n'est pas radioactif $X \longrightarrow Y$; (X radioactif, Y stable), On a :

$$A = -\frac{dN}{dt} = \lambda N$$

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

N : nombre d'atomes radioactifs au temps "t"

λ : constante de radioactivité de l'élément étudié

Evolution au cours du temps

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Rightarrow \int_{N_0}^{N_t} -\frac{dN}{N} = \lambda \int_0^t dt$$

$$\ln \frac{N_t}{N_0} = -\lambda t \quad \Rightarrow \quad \underline{N_t = N_0 e^{-\lambda t}}$$

N_0 : nombre d'atomes initial

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

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

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

$$\begin{aligned}
 M &\longrightarrow N_A \text{ atomes} \\
 m(g) &\longrightarrow N \text{ atomes} \\
 \frac{m_t}{M} N_A = \frac{m_0}{M} N_A e^{-\lambda t} &\Rightarrow \underline{m_t = m_0 e^{-\lambda t}}
 \end{aligned}
 \Rightarrow N_0 = \frac{m_0}{M} N_A \quad \text{et} \quad N_t = \frac{m_t}{M} N_A$$

5.6 L'activité

L'**activité** d'un échantillon de matière radioactive est définie par le nombre des désintégrations par unité de temps qui se produisent en son sein à chaque instant. Cette activité est une caractéristique primordiale de cet échantillon avec la nature des rayons émis. Elle représente sa « radioactivité de base ». Quand l'échantillon contient plusieurs éléments, l'activité totale est la somme des activités de chaque élément.

On définit officiellement l'activité d'un échantillon de matière radioactive comme le nombre de désintégrations qui s'y produisent par seconde

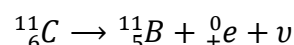
Unités de A :

A est exprimée en :

- ✓ désintégrations par seconde (dps) ou Becquerels (Bq)
- ✓ désintégrations par minute (dpm)
- ✓ Curies (Ci)

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

Exemple :



Si à l'instant $t = 0$ on a un échantillon ne contenant que des noyaux de ${}^{11}\text{C}$, alors : N représente ici le nombre de noyaux de carbone restants (qui ne se sont pas désintégrés). Le nombre de noyaux de ${}^{11}\text{C}$ qui se sont désintégrés est égal au nombre de noyaux de bore (${}^{11}\text{B}$) qui se sont formés et il est égal à $N_0 - N$.

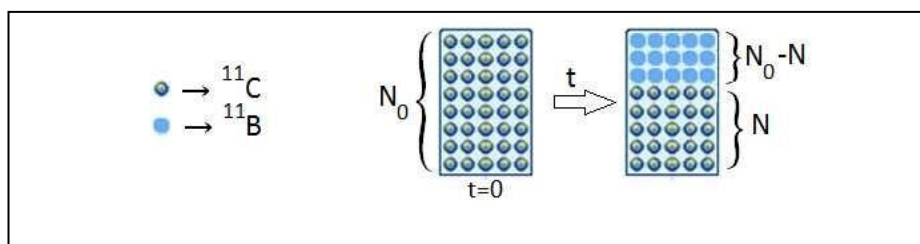


Figure 19. La désintégration du ${}^{11}\text{C}$ en ${}^{11}\text{B}$

5.7 Période radioactive :

Certains nucléides radioactifs restent stables pendant des milliards d'années, d'autres se décomposent en une fraction de seconde.

Un processus de désintégration est caractérisé par la période T.

La période T ou temps de demi-vie $t_{1/2}$ est le temps nécessaire pour que la moitié de la substance se désintègre :

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

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T} \Rightarrow \ln \frac{1}{2} = -\lambda T \quad \Rightarrow \quad T = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad \text{ou} \quad T = \frac{0,693}{\lambda}$$

$$\ln 2 = \lambda T$$

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

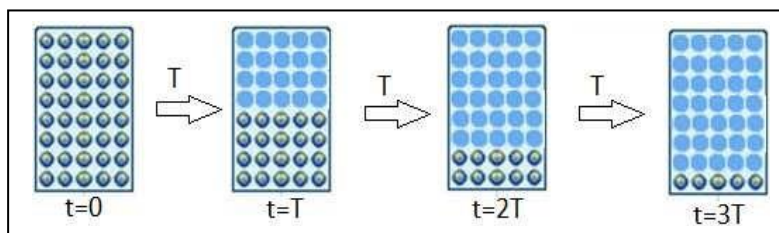


Figure 20. Représentation de la période radioactive

Si l'on pose $n = t/T$ alors on obtient :

$$N_t = N_0 e^{-\ln 2 / T} = \frac{N_0}{2^n}$$

Et de même pour l'activité, on peut l'écrire :

$$A_t = A_0 e^{-\ln 2 / T} = \frac{A_0}{2^n}$$

n représente le nombre de périodes.

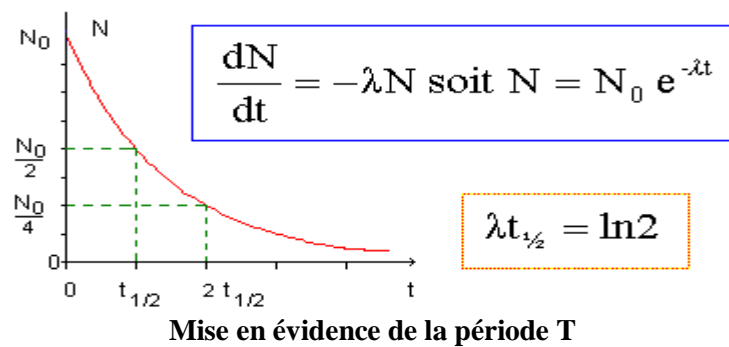
Exemples

$$^{14}\text{C} (\beta) \quad T = 5700 \text{ ans}$$

$$^{226}_{88}\text{Ra} \quad T = 1620 \text{ ans}$$

$$^{40}\text{K} (\beta) \quad T = 1,3 \cdot 10^9 \text{ ans}$$

$$^{15}_8\text{O} \quad T = 125 \text{ s}$$



5.8 Relation entre la masse d'un radionucléide et son activité

On a :

$$m(g) = \frac{N \cdot M(\text{masse molaire})}{N_A(\text{nombre d'Avogadro})}$$

Et comme $N = A/\lambda$ alors :

$$m(g) = \frac{A \cdot M \cdot T}{N_A \ln 2}$$

L'unité du temps dans l'activité et la période doit être la même.

5.9 Période physique, biologique et effective:

La **période physique** est la période radioactive.

La **période biologique** d'un élément chimique est le temps au bout duquel la moitié d'une quantité *ingérée* ou *inhalée* (telle une drogue ou un radio-isotope) est éliminée de l'organisme uniquement par des voies naturelles (sueurs, urines...).

Pour un radionucléide donné, l'élimination se fait à la fois par voies naturelles (suivant sa période biologique) et par décroissance radioactive du nombre de ses atomes du fait de sa radioactivité (suivant sa période radioactive propre, ou période physique). Pour les radionucléides, on définit la **période effective**, qui correspond au temps au bout duquel l'activité dans l'organisme aura été divisée par deux, du fait de ces deux décroissances.

La variation de l'activité du radioélément résultant de ces deux phénomènes est exprimé en fonction du temps selon:

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda_p t} \cdot e^{-\lambda_b t}$$

$$A(t) = A_0 e^{-(\lambda_p + \lambda_b)t}$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda_{eff} t}$$

$$\lambda_{eff} = \lambda_{physique} + \lambda_{biologique}$$

$$\ln 2 / T_{eff} = \ln 2 / T_{physique} + \ln 2 / T_{biologique}$$

$$\frac{1}{T_{eff}} = \frac{1}{T_{phys}} + \frac{1}{T_{biol}}$$

Exemples :

Elément	Période physique T_p	Période biologique T_b	T_e
Iode-131	8,0 j	30 j (thyroïde)	6,3 j
Téchnetium-99m	6 h	1 j	4,8 h
Césium-137	10950 j	150 j	148 j

5.10 Taux de désintégrations et taux de rayonnements émis :

L'activité radioactive est mesurée en fonction du nombre de rayonnements émis par unité de temps, ce qui signifie que plus une substance est radioactive, plus elle émet de rayons. L'activité radioactive peut être décomposée en activité alpha ou bêta, qui correspond au nombre de rayons alpha ou bêta émis par unité de temps. L'activité gamma, quant à elle, dépend du nombre moyen de rayons gamma émis lors de chaque désintégration.

Dans la plupart des cas où toutes les désintégrations produisent des rayons alpha ou bêta, les nombres de désintégrations et les activités alpha ou bêta sont équivalents.

5.11 Filiation radioactive :

Jusqu'à présent, nous avons uniquement envisagé le cas où un radionucléide se désintègre pour produire un élément stable. Toutefois, dans la plupart des cas, le nucléide produit lors de la première désintégration n'est pas stable, et devient donc lui-même un radionucléide instable qui se désintègre à son tour. Cette séquence de désintégrations s'appelle une "filiation radioactive".

Dans le cas de la radioactivité naturelle, une filiation radioactive peut compter jusqu'à 15 désintégrations successives.

Exemple :

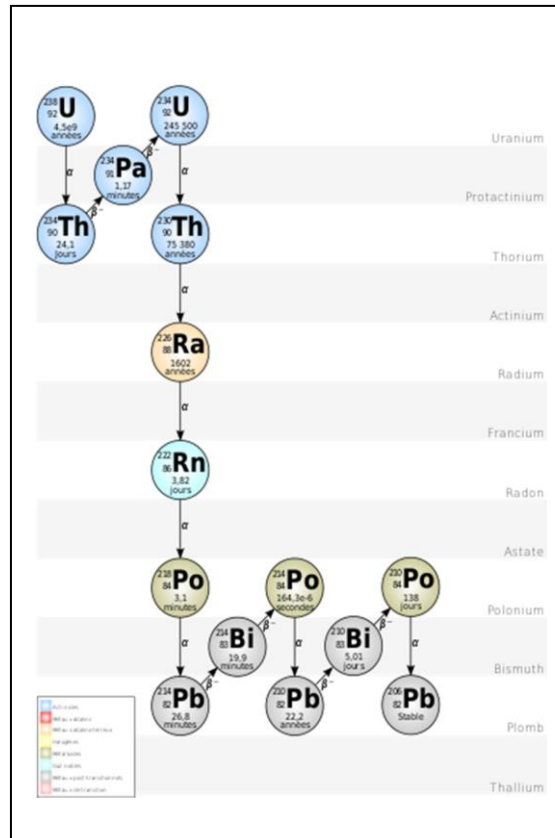


Figure 21. Chaîne de désintégration de ^{238}U qui comporte 14 désintégrations.

Dans ce qui suit on va se limiter au cas où l'on a uniquement deux désintégrations successives qui conduiront à un élément stable.

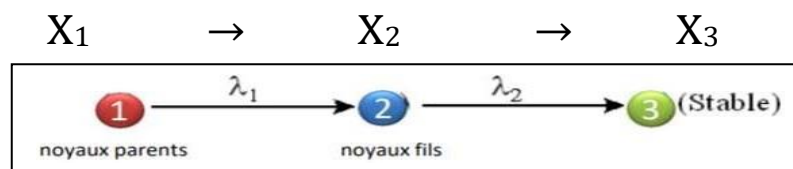


Figure 22. La désintégration radionucléide père en radionucléide fils

X_1 est appelé radionucléide père (parent).

X_2 est appelé radionucléide fils (descendant)

X_3 est le nucléide stable.

Supposons que dans un échantillon, à l'instant $t = 0$ il n'y a que des noyaux du nucléide père X_1 .

$$N_{10} \neq 0, N_{20} = 0, N_{30} = 0$$

A l'instant $t = 0$ on a :

$$N_1(t = 0) = N_{10}$$

$$N_2(t = 0) = 0$$

$$N_3(t = 0) = 0$$

Entre t et $t+dt$, N_1 , N_2 et N_3 subissent des variations dN_1 , dN_2 et dN_3 .

Il disparaît (se désintègre) $\lambda_1 N_1 dt$ noyaux du nucléide père, il apparaît (se forme) $\lambda_1 N_1 dt$ noyaux du nucléide fils et il en disparaît $\lambda_2 N_2 dt$ noyaux. Enfin il apparaît $\lambda_2 N_2 dt$ noyaux d'un nucléide stable.

$$\begin{aligned} dN_1 &= -\lambda_1 N_1 dt \\ dN_2 &= +\lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt = (\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2) dt \\ dN_3 &= +\lambda_2 N_2 dt \end{aligned}$$

L'intégration de ces équations différentielles donne :

$$\begin{aligned} N_1 &= N_{10} \exp(-\lambda_1 \cdot t) \\ N_2 &= \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \\ N_3 &= N_{10} - (N_1 + N_2) \end{aligned}$$

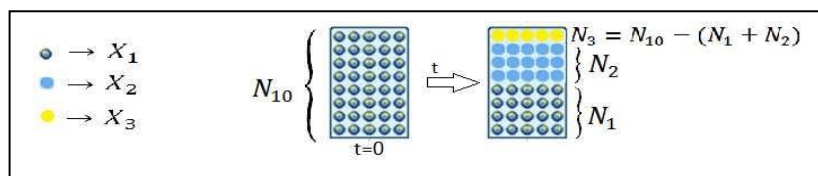


Figure 23. Exemple de la désintégration radionucléide père en radionucléide fils

Les activités radioactives correspondantes sont :

$$\begin{aligned} A_1 &= \lambda_1 N_1 = A_{10} \cdot e^{-\lambda_1 \cdot t} \\ A_2 &= \lambda N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} A_{10} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \end{aligned}$$

$A_3 = 0$ puisque X_3 est stable.

5.11.1 Maximum de N_2 et A_2 :

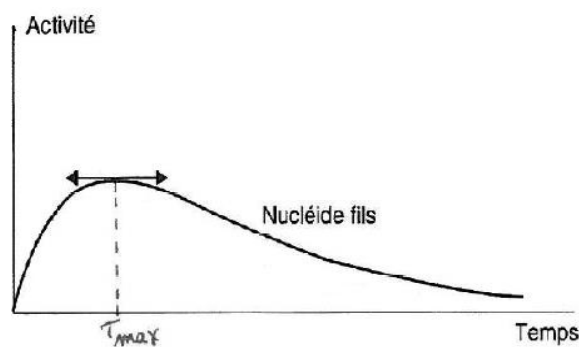


Figure 24. Evolution de l'activité nucléide fils et calcul de t_{max}

On sait qu'aux instants $t = 0$ et $t = \infty$, N_2 et A_2 sont nuls, donc obligatoirement ils passent par un maximum. Ce maximum est atteint pour un temps $t = t_m$ que l'on peut calculer en mettant :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right) t = t_m = 0 \text{ ou bien } \left(\frac{dA_2}{dt}\right) t = t_m = 0$$

On obtient : $t_m = \frac{\ln(\frac{\lambda_2}{\lambda_1})}{\lambda_2 - \lambda_1}$

5.11.2 Equilibres entre activités du père et du fils:

On est en présence de deux types de noyaux radioactifs de périodes T_1 et T_2 . Selon la grandeur de T_1 devant T_2 , on distingue généralement trois cas:

- ✓ $T_1 > T_2$ dans ce cas on atteint un équilibre.
- ✓ $T_1 < T_2$ dans ce cas il n'y a pas d'équilibre.
- ✓ $T_1 \approx T_2$ cas des périodes voisines.

Lorsque le rapport $A_2(\lambda) / A_1(\lambda)$ est constant, on dit qu'il y a équilibre sinon pas d'équilibre.

5.11.3 Quand $T_1 > T_2$ ($\lambda_1 < \lambda_2$), Equilibre transitoire (de régime) :

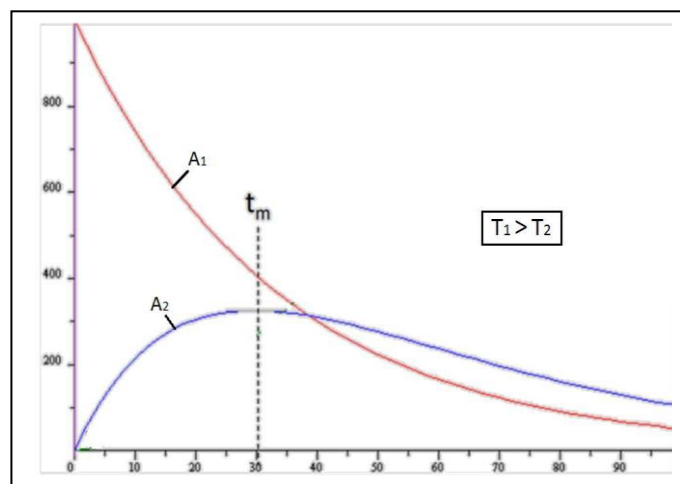


Figure 25. Equilibre transitoire de régime.

Après un temps de décroissance assez grand, ($t \gg t_m$), on peut écrire, du fait que $\lambda_1 < \lambda_2$, que l'activité du fils (descendant) est:

$$A_2(\lambda) / A_1(\lambda) = \lambda_2 / \lambda_2 - \lambda_1 = Cst > 1$$

Les noyaux fils décroissent avec la période du père. Dans ce cas on atteint un équilibre appelé équilibre transitoire.

5.11.4 Quand $T_1 \gg T_2$ ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) Equilibre séculaire :

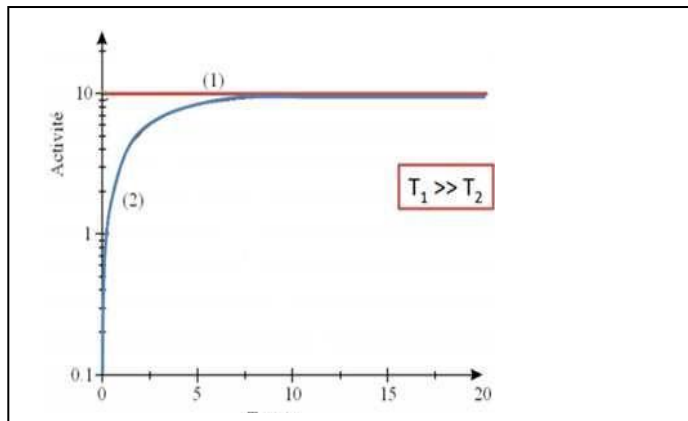


Figure 26. Equilibre séculaire de régime.

Pour les faibles valeurs de t, les activités du père et du fils deviennent :

$$\frac{A_2(t)}{A_1(t)} \approx 1$$

Dans ce cas les deux activités sont égales, on dit qu'il y a équilibre séculaire.

5.11.5 Quand $T_1 \approx T_2, \lambda_1 \approx \lambda_2$:

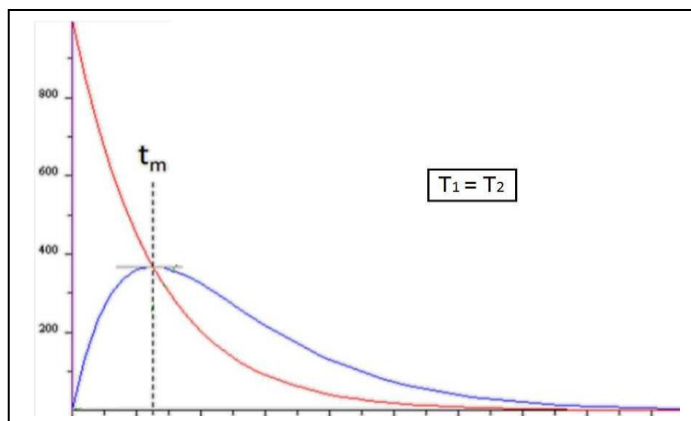


Figure 27. Absence d'équilibre

$$\frac{A_2(t)}{A_1(t)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]$$

Le rapport $A_2(t)/A_1(t)$ est fonction du temps, donc il n'y a pas d'équilibre.

Remarque : Dans ce cas précis lorsque A_2 atteint son maximum, il y a égalité avec A_1 :

$$t = t_m \rightarrow A_2 = A_1$$

Ou bien : $A_2(t_m) = A_1(t_m)$.

5.11.6 Quand $T_1 < T_2$ ($\lambda_1 > \lambda_2$) Non-Equilibre :

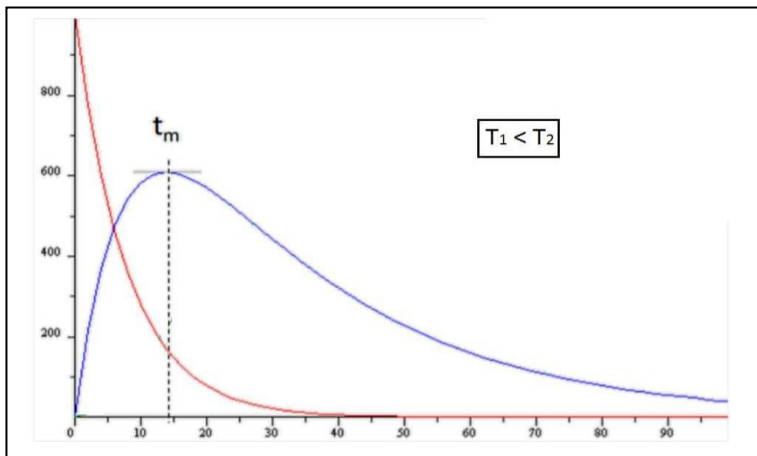


Figure 28. Non Equilibre

L'équilibre radioactif n'est jamais atteint car, pour t assez grand, il ne subsiste que les noyaux descendants.

5.12 Réactions nucléaires artificielles

Ces réactions se produisent lorsqu'on bombarde des noyaux par des particules subatomiques telles que : proton, neutron, électron, hélium ...

5.12.1 Courbe d'Aston

Un noyau sera d'autant plus stable que son énergie de cohésion sera grande. On porte l'énergie moyenne de cohésion par nucléon E/A en fonction de A

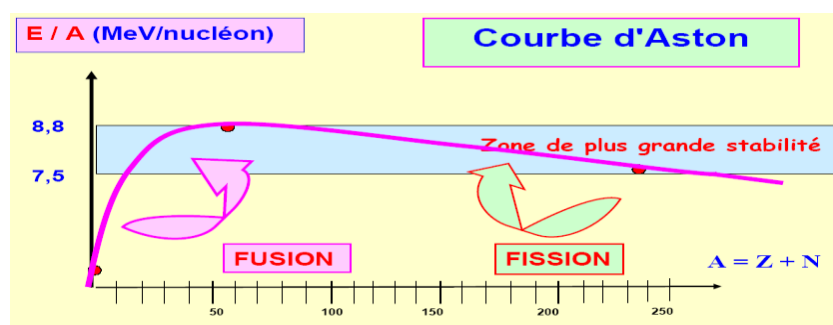


Figure 29. La courbe d'Aston

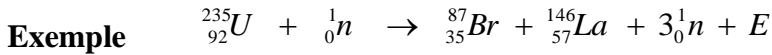
La courbe obtenue présente un maximum vers $A = 60$, les atomes correspondant étant les atomes les plus stables qui existent.

Les atomes dont l'énergie moyenne de liaison par nucléon est faible (de $E/A < 7,5$ MeV / nucléon) vont chercher à se stabiliser et à se rapprocher de la zone de stabilité maximale vers $A = 60$. Deux processus différents sont possibles :

- ✓ Stabilisation des « atomes légers » = FUSION
- ✓ Stabilisation des « atomes lourds » = FISSION

5.12.2 Réaction de fission

La réaction de fission est la rupture de certains noyaux lourds en 2 fragments de masses comparables, sous l'impact d'un projectile (neutron en général) et libération d'une grande énergie.

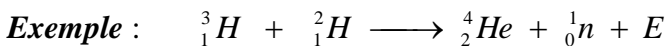


$$A > 200 \qquad 72 < A < 162$$

Une fois amorcée, la réaction se poursuit d'elle-même et l'énergie libérée soudainement est explosive (bombe atomique).

5.12.3 Réaction de fusion

C'est la réunion de 2 noyaux très légers en un noyau plus lourd avec expulsion d'un neutron ou d'un proton et libération d'une très grande énergie.

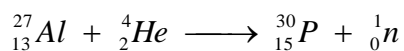
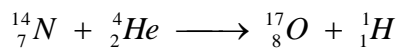


L'énergie libérée est considérable, mais la réaction demande une température très élevée ≈ 1 million °C. La bombe d'hydrogène est une application directe de ces réactions thermonucléaires). Le contrôle de l'énergie libérée n'est pas encore résolu ou presque.

5.12.4 Transmutations nucléaires

Ces réactions produisent des nucléides de nombre de masse très voisin de celui du nucléide qui a servi de cible.

Exemples :



5.13 Energie et défaut de masse

L'énergie libérée lors des réactions nucléaires est calculée par le principe d'Einstein :

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2.$$

5.14 Applications de la radioactivité

5.14.1 En chimie :

- Détermination des structures moléculaires ;
- Mécanismes des réactions
- Etude des phénomènes d'absorption et de diffusion ;
- Contrôle de l'efficacité des méthodes de séparation et de purification ;
- Mesures de la solubilité de corps réputés insolubles ; Etude des métabolismes parmi lesquelles : l'établissement du cycle du carbone dans la photosynthèse chlorophyllienne et la biosynthèse de l'hémoglobine

En introduisant dans une molécule à la place d'un atome déterminé (^{12}C , ^1H ,..) l'isotope (^{13}C , ^2H ,), ces isotopes peuvent être suivis grâce à leur rayonnement.

5.14.2 En médecine et biologie :

Les applications médicales de la radioactivité ont été envisagées sur le plan théorique peu de temps après sa découverte, mais c'est au cours du demi-siècle écoulé qu'elle est véritablement entrée de plain-pied dans la panoplie des moyens **diagnostiques** (imagerie médicale) et **thérapeutiques** (radiothérapie) de la médecine.

Utilisation des radio-isotopes pour le diagnostic et le traitement des maladies et pour fournir de précieux renseignements sur le mécanisme des réactions biologiques.

L'iode 131 diminue l'hyperactivité de la thyroïde et permet le traitement des goîtres.

La « médecine nucléaire » est le domaine médical qui utilise la radioactivité tant pour explorer le corps humain que pour le soigner.

Parmi les méthodes d'imagerie médicale en médecine nucléaire, on a la scintigraphie et la tomographie par émission de positons (TEP).

5.14.3 Datation des roches :

Détermination du rapport ^{206}Pb et ^{207}Pb dans un minéral d'uranium

5.14.4 Datation des pièces archéologiques :

Pendant la vie : il y a équilibre absorption et désintégration du carbone ^{14}C .

Quand la vie cesse : A diminue.

5.15 Dangers de la radioactivité

- Effets pathologiques : cancers, leucémie, lésions des muqueuses...
- Effets génétiques : les effets se rapportent sur les générations futures.

Sommaire

1	Introduction générale.....	1
1.1	Définitions de la Biophysique	1
1.2	Rappels des constantes fondamentales des lois physiques appliquées en biologie.....	1
2	Rayonnements Electromagnétiques et particulaires	3
2.1	Définition de rayonnement	3
2.2	Classification des rayonnements.....	3
2.3	Rayonnements électromagnétiques.....	3
2.3.1	Spectre d'un rayonnement électromagnétique	4
2.3.2	Vitesse de propagation des ondes électromagnétiques dans le vide.....	6
2.3.3	Propagation d'une onde électromagnétique dans la matière.....	6
2.3.4	Caractéristiques d'un rayonnement électromagnétique.....	6
2.3.5	Période et fréquence d'une onde électromagnétique.....	7
2.3.6	Longueur d'onde.....	7
2.3.7	Energie d'une onde électromagnétique	7
2.3.8	Emission et absorption d'une onde électromagnétique	8
2.3.9	Aspect corpusculaire d'un rayonnement électromagnétique	8
2.4	Le rayonnement ionisant et non ionisant.....	11
3	Rayonnements particulaires	12
4	Rayonnement X.....	15
4.1	Introduction	15
4.2	Découverte	15
4.3	Nature.....	15
4.4	Production des rayons X	15
4.4.1	Principe de production des rayons X.....	16
4.5	Le spectre des rayonnements X.....	17
5	La Radioactivité	20
5.1	Introduction	20
5.2	Stabilité du noyau	20
5.2.1	Stabilité et énergie de liaison	20
5.2.2	Stabilité et nombre de nucléons	20
5.2.3	La carte N-Z :.....	21
5.3	Propriétés de la désintégration radioactive	22
5.4	Radioactivité naturelle	22
5.4.1	Désintégration α (hélium) ou émission α	22
5.4.2	Désintégration β	23
5.4.3	Rayonnement γ	24
5.5	Loi de désintégration radioactive.....	25
5.6	L'activité	26
5.7	Période radioactive :	27

5.8	Relation entre la masse d'un radionucléide et son activité.....	28
5.9	Période physique, biologique et effective:	28
5.10	Taux de désintégrations et taux de rayonnements émis :.....	29
5.11	Filiation radioactive :	29
5.11.1	Maximum de N_2 et A_2 :.....	31
5.11.2	Equilibres entre activités du père et du fils:.....	32
5.11.3	Quand $T_1 > T_2$ ($\lambda_1 < \lambda_2$), Equilibre transitoire (de régime) :	32
5.11.4	Quand $T_1 \gg T_2$ ($\lambda_1 \ll \lambda_2$) Equilibre séculaire :.....	33
5.11.5	Quand $T_1 \approx T_2$, $\lambda_1 \approx \lambda_2$:.....	33
5.11.6	Quand $T_1 < T_2$ ($\lambda_1 > \lambda_2$) Non-Equilibre :	34
5.12	Réactions nucléaires artificielles	34
5.12.1	Courbe d'Aston.....	34
5.12.2	Réaction de fission	35
5.12.3	Réaction de fusion.....	35
5.12.4	Transmutations nucléaires	35
5.13	Energie et défaut de masse	35
5.14	Applications de la radioactivité	36
5.14.1	En chimie :.....	36
5.14.2	En médecine et biologie :	36
5.14.3	Datation des roches :	36
5.14.4	Datation des pièces archéologiques :.....	36
5.15	Dangers de la radioactivité.....	36

- Brennan, J. (2018, mars 13). What are alpha, beta & gamma particles? Sciencing.
- Mirion Technologies. (2015, mars 31). What is radiation?
- National Cancer Institute. (n.d.). NCI dictionary of cancer terms: Non-ionizing radiation.
- Ontario Ministry of Labour. (2013, novembre). Personal Protective Equipment in Radiology.
- United States Nuclear Regulatory Commission. (2017, octobre 2). Radiation Basics.
- BELAZREG, Salah et PERDRISO, Rémy. Pass Biophysique. 1^{er} édition. Malakoff : Ediscience, 2020, 449 p.
- RENE MAGNE, Jacques et MAGNE-MARETY, Rose-Marie. Biophysique. 1^{er} édition. Paris : Ellipse. 1991, 432 p.
- BELAZREG, Salah. Physique. 2^m édition. Paris : Ediscience, 2006, 472 p.
- BELAZREG, Salah, PERDRISO, Rémy et BOUNAUD, Jean-Yves. Biophysique. 1^{er} édition. Paris : Ediscience, 2006, 375 p.
- GRECIAS, Pierre et MIGEON, Jean-Pierre. 1^{er} année Physique. 1^{er} édition. Paris : Tec&Doc, 2006, 445 p.
- BENSON, Harris. Physique 3. 3^e édition. Québec : Renouveau pédagogique, 2005, 454 p.
- SEGUIN, Marc, DESCHENEAU, Julie et TARDIF, Benjamin. Physique XXI. Tome C. 1^e édition. Québec : Renouveau pédagogique, 2010, 572 p.
- DURAN, Alain et ESCANYE, Jean-Marie. Physique et biophysique. Tome 1. 1^{er} édition. Malakoff : Dunod. 2019, 443 p.
- BELAZREG, Salah. Physique. 5^e édition. Paris : Ediscience, 2017, 469 p.
- BELAZREG, Salah et BEAUMONT, Silmon. PACES Mémo, Concours PACES. 2^e édition. Malakoff : Ediscience, 2019, 368 p.
- <https://www.techno-science.net/definition/8090.html>
- <http://vitroplantmaroc.com/wp-content/uploads/2018/12/Cours-biophysique.pdf>
- <https://e-cours.univ-paris1.fr/modules/ued/envcal/html/rayonnement/1-rayonnement-electromagnetique/1-2-les-ondes-electromagnetiques.html>
- [https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/quels-sont-les-differents-types-derayonnement#:~:text=Le%20rayonnement%20particulaire%20se%20compose,%20une%20masse%20en%20mouvement\).](https://parlonssciences.ca/ressources-pedagogiques/documents-dinformation/quels-sont-les-differents-types-derayonnement#:~:text=Le%20rayonnement%20particulaire%20se%20compose,%20une%20masse%20en%20mouvement).)
- Cours de biophysique, Dr. Ayadi A. ISVK, Constantine, 2018.
- https://fac.umc.edu.dz/vet/Cours_Ligne/cours_21_22/Biophysique/RAYONNEMENTS_Part2.pdf
- Cours de M^{me} Selaimia Ferdjani
- <https://cour-st.webs.com/Chapitre%20II%20LA%20RADIOACTIVITE..>
- http://med-fac.univ-batna2.dz/sites/default/files/medecine-fac/files/radioactivite_-cours.pdf
- <https://fichesmanip.wordpress.com/2017/02/08/ue-3-8-tube-a-rayons-x/>