

BIOPHYSIQUE DES RADIATIONS

Les rayonnements / radiations ont de nombreuses implications médicales soit pathologiques soit dans le soin du patient (médecine Nucléaire), c'est pourquoi leur étude est primordiale (et en plus c'est passionnant !)

Pré-requis : unités / particules

Avant d'aborder les REM en eux même, il faut d'abord revoir quelques unités et formules qui intéresseront les différentes particules

1) Masse, énergie, particules

1.1 : Unités de masse :

L'étude des rayonnements et de la radioactivité va mettre en jeu l'action d'électrons, le kg (MKSA) n'est pas adapté !

masse atomique = masse d'une mole d'atome (une mole = $N = 6,02 \cdot 10^{23}$)

unité de masse atomique = masse d'1/12ème de la masse d'un atome de $^{12}\text{C} = 0,166 \cdot 10^{-23}$ g

Rq : masse atomique en g = masse de l'atome en u = A (nombre de nucléons)

Exemple : masse en g de l'atome d'oxygène $2,65 \times 10^{-23}$

$$\text{Masse atomique} = N \times 2,65 \times 10^{-23} = 16$$

$$\text{Masse en u} ? : 2,65 / 0,166 = 16$$

Et rappel : pour l'oxygène 16, A = 16 !

1.2 : énergie :

$$E = m \cdot c^2 \text{ (particule au repos)} \quad E_c = \text{énergie cinétique} = 0,5 \times m v^2$$

Unité particulière d'énergie : le Joule est peu adapté à rendre compte des énergies mises en jeu dans l'atome, on utilise donc l'électronvolt

Définition : C'est l'énergie cinétique acquise par un électron sans vitesse initiale, sous l'effet d'une différence de potentiel de 1 volt.

$$\boxed{1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}}$$

$E = m \cdot c^2$ devient alors $E = m \times 931,5$ (avec E en MeV et m en u)

1.3 : Particules

les différentes valeurs seront rappelées en début de sujet du concours mais pour gagner du temps il est préférable de les savoir par cœur !



$Z = p^+$ = proton, situés dans le noyau de l'atome, seront responsables avec les neutrons de la radioactivité. Particule chargée + (+e) masse = $1,007u$

$A - Z = N$: neutrons, situés dans le noyau, particule neutre mais instable hors du noyau $n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \nu + \text{Energie}$

Rappel : $n p^+ = n e^-$, car un atome est électriquement neutre dans la matière !

e^- : Electron, forment le nuage électronique d'où proviendront les rayons x, particule chargée - (-e).

$$\text{Masse} : 1/2000u = 0,548 \cdot 10^{-3}u = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Attention ! L'électron est rarement au repos, on lui définit donc sa masse relativiste

$$\text{Charge unité } (\pm e) = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

masse relativiste : une particule verra sa masse modifiée si sa vitesse est du même ordre de grandeur que celle de la lumière ($= 3.10^8$ m/s)

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Ainsi, comme l'électron est toujours ou presque en mouvement, on lui préférera sa masse relativiste.
Rq : La masse relativiste est supérieure à la masse au repos !

2) Les rayonnements électromagnétiques

C'est la propagation d'un champ électrique et d'un champ magnétique qui vibrent en phase, perpendiculaires l'un par rapport à l'autre et par rapport à la direction de propagation, et qui se déplace à la vitesse de la lumière ($c=3.10^8$ m/s)

On va les caractériser par deux paramètres :

λ : longueur d'onde, en m (MKSA), qui caractérise la plus petite distance entre deux points dans le même état vibratoire

ν : la fréquence, en Hz (Hertz, ou s^{-1})

$$\nu = c / \lambda$$

Pour faciliter leur étude, Einstein a fait le postulat qu'un REM pouvait être assimilé à un corpuscule, autrement appelé photon. Ce photon correspond à une quantité d'énergie bien définie, appelée quantum (De Planck). Cette énergie peut être calculée par différentes méthodes :

$$E = h \nu$$

h correspond à la **constante de Planck**, $= 6,62. 10^{-34}$ J.s et ν fréquence en Hz

Rq : on a vu que $\nu = c / \lambda$, en remplaçant dans la formule :

$$E = \frac{h c}{\lambda}$$

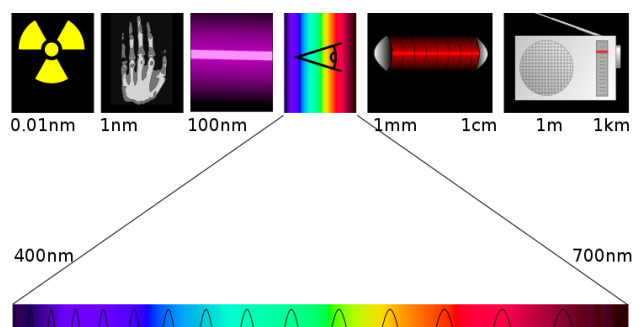
Attention aux unités, ici E en joules, λ en m et C en m/s

$$\text{Duane et Hunt : } E = \frac{1240}{\lambda}$$

Dans la relation de Duane et Hunt, E est en eV et λ en nm !

Pour résumer : un REM est assimilé à un photon, et se caractérise par une longueur d'onde, une fréquence, et une énergie

Longueur d'Onde et énergie sont inversement proportionnelles, un rayon X aura donc une énergie élevée mais une faible longueur d'onde !
(c'est la même chose pour la fréquence et la longueur d'onde)





La masse des photons est exclusivement dynamique !

$E=mc^2$ et $E=\frac{hc}{\lambda}$ d'où $\frac{hc}{\lambda} = mc^2$ et donc

$$m = \frac{h}{\lambda c} \quad \text{et} \quad \lambda = \frac{h}{m c}$$

Dualité onde particule

De Broglie fit à son tour un postulat qui explique que l'électron peut également être considéré comme une onde, ainsi que toute particule animée d'une masse et d'une vitesse, ce qui permet de lui définir une masse dynamique et une longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{m v} \quad m = \frac{h}{\lambda v}$$

Attention aux unités ! λ en m , m en en kg et V en m/s

Exemples :

Un photon a une longueur d'onde de 413nm,

Quelle est son energie en eV ?

$$1240/413 = 3\text{eV}$$

Quelle est sa fréquence ?

$$3\text{eV} = 3 \times 1,602 \times 10^{-19} = 4,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

(conversion eV en J)

$$E = h\nu \quad \text{d'où} \quad \nu = 4,8 \cdot 10^{-19} / 6,62 \cdot 10^{-34} \\ = 7,3 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

(avec le postulat de De Broglie, ces calculs sont possibles pour un électron)

3) Structure de l'atome

Plusieurs modèles se sont succédés pour imaginer l'organisation d'un atome (auparavant : une sphere positive = noyau, avec autour des charges negatives, les électrons)

Rutherford : C'est le premier à comprendre que la matière est faite de vide, les électrons gravitent sur un rayon de 10^{-10} m, autour d'un noyau dont la taille est de l'ordre de 10^{-15} m

Bohr : les électrons ne gravitent pas sur des rayons au hasard du fait de leur comportement ondulatoire, et seules certaines orbites de rotation sont permises, orbites qui correspondent à des puits d'énergie particuliers.

Rappel : les electrons s'arrangent autour du noyau en différentes "couches" : K/L/M/...

Chacune de ces couches représente une orbite, avec un nombre maximum d'électrons pour chacune, et pour laquelle correspond un puit d'énergie défini.

Nombre max d'électrons par couche :

$$2n^2$$

Les électrons s'arrangent donc autour du noyau selon des puits d'énergie quantifiés, c'est à dire qu'ils prennent des valeurs particulières en fonction de l'atome et de la couche étudiée)

Calcul des puits d'énergie :

$$W_n = -13,6 \times \frac{(Z-\sigma)^2}{n^2}$$

Pour l'atome d'hydrogène :

$$W_n = -13,6 \times \frac{1}{n^2}$$

W_n est toujours négatif, c'est un puit d'énergie, où se situe l'électron, il s'exprime en eV

Z est égal au nombre de protons = nombre d'électrons

n correspond à la couche étudiée (si c'est la couche K, $n=1$; L, $n=2$; etc)

σ correspond à la constante d'écran (elle reflète l'effet écran induit par le cortège électronique, dans le cas de H il n'y a qu'un seul electron et donc la constante d'écran n'entre pas en jeu...)

L'énergie de liaison de l'électron se caractérise par la valeur absolue du puit d'énergie $||W_n||$, elle correspond à l'énergie nécessaire à un photon pour arracher l'électron, et donc ioniser l'atome. Plus un électron est sur une orbite proche du noyau et plus il est dit lié (car n diminue et donc $||W_n||$ augmente)

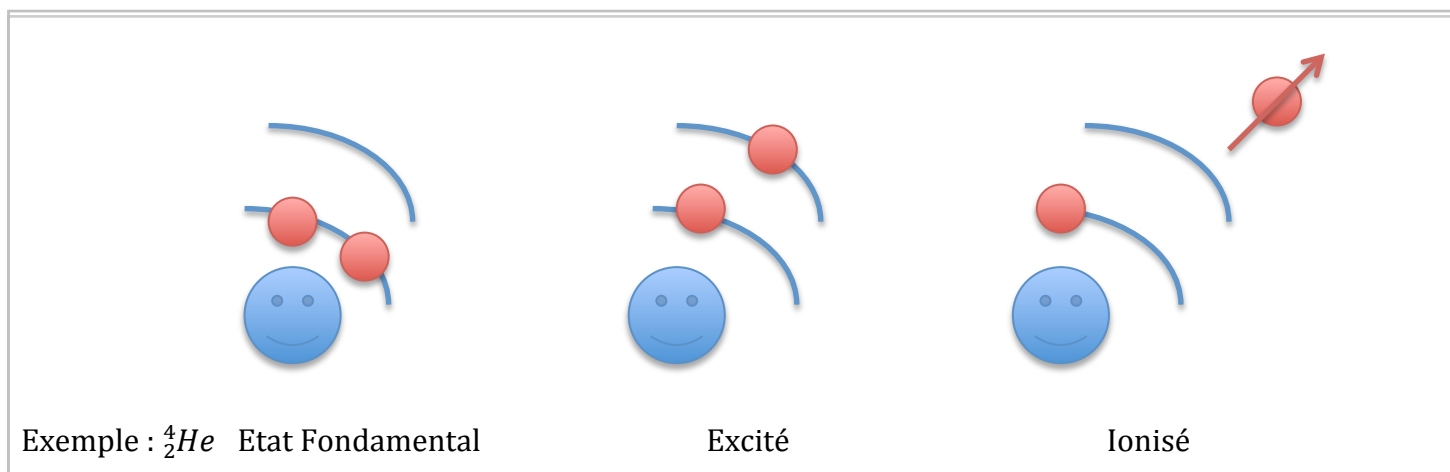
4) Interactions des rayonnements avec la matière

4.1 Etat fondamental, excité, ionisé

Ce système d'orbites et de remplissage permet de définir un état fondamental à l'atome, dans lequel les électrons occupent les couches les plus basses et les remplissent.

L'état excité correspond à l'état où l'atome a un électron sur une couche supérieure alors que les couches inférieures ne sont pas complètes

L'état ionisé correspond à l'éjection d'un électron de l'atome, celui-ci présente donc un électron en moins



4.2 Interactions d'un photon avec la matière

Un rayonnement (modélisé par un photon d'une énergie quantifiée) peut avoir diverses interactions avec la matière, à travers ses effets sur le cortège électronique. En effet, un photon entrant en contact avec la matière finira forcément par rencontrer un atome, et lors de la collision il lui transmettra tout ou partie de son énergie, énergie qui pourra entraîner une excitation voire une ionisation !



Cet excès d'énergie reçu par l'atome devra être restitué, par émission d'énergie

Absorption par excitation : Le photon a une énergie égale à la stricte différence des énergies de liaison des électrons entre deux couches : l'électron passe d'une couche à l'autre
Energie du photon: $E = h\nu = |W_1| - |W_2|$ et l'excès d'énergie résultant à l'excitation correspond à $|W_i| - |W_j|$

Absorption par ionisation : l'énergie du photon est supérieure ou égale à l'énergie de liaison : l'électron est éjecté de la structure électronique
Energie du photon $E = h\nu \geq |W_1|$ L'électron va lui partir avec une énergie cinétique de $T = h\nu - |W_1|$

Restitution de l'énergie excédentaire :

Tout excès d'énergie devra être restitué au milieu, par émission de fluorescence : par capture ou réarrangement électronique, il y aura émission d'un photon de fluorescence d'énergie égale à l'excès correspondant.

Plusieurs cas de figure :

pour l'atome ionisé, l'atome va capturer un électron du milieu, qui pourra rejoindre la couche où la case est vacante, ou rejoindre une couche plus externe et se réarranger en cascade.

Dans le premier cas, on aura un seul photon, dans le second cas, plusieurs photons résulteront.

pour l'atome excité, le réarrangement pourra être direct, ou alors en cascade, avec donc différents photons

Exemple :

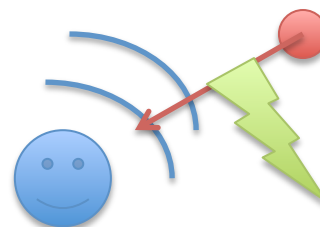
Atome d'Hydrogène (1;1)



Ionisation, donc deux cas de figure :

un électron du milieu vient directement combler la case vacante sur la couche K, émettant un photon égalant la valeur de l'énergie de liaison

$E_l = 13,6 \times \frac{1}{n^2}$ avec $n=1$, on a $E_l = 13,6 \text{ eV}$, et donc le photon de fluorescence a une même énergie !



un électron vient sur une couche plus externe (ex : couche M) et plusieurs réarrangements sont envisageables, de M à K
de M à L, puis à K
etc... } le nombre de photons et leur énergie sera différent

Pour l'excitation, c'est la même chose, sauf qu'il n'y a pas de capture électronique !

Electron Auger

Lors d'un réarrangement électronique, on a vu que des photons de fluorescence étaient émis. Ceux ci, comme tout photon, ont une énergie propre et peuvent donc être amenés à interagir avec un électron d'une couche plus périphérique, et éventuellement le ioniser. S'ensuivront une cascade de réarrangements pour que l'atome retrouve son état basal d'énergie.

L'électron expulsé par le photon de fluorescence est appelé électron d'Auger, et son énergie cinétique est égale à l'énergie du photon de fluorescence diminuée de l'énergie de liaison

Ce phénomène est essentiellement appréciable pour les électrons des couches les plus externes

Exemple : Après ionisation, un atome de tungstène (Z=74) va se réarranger par passage d'un électron de la couche L à la couche K

$$El_K = 1866 \text{ eV}$$

$$El_L = 466 \text{ eV}$$

...

$$El_N = 116$$

Le réarrangement de L à K va entraîner l'émission d'un photon de $1866 - 466 = 1400 \text{ eV}$

Ce photon va par la suite pouvoir expulser un électron d'une couche externe, par exemple la couche N, et cet électron d'Auger partira avec une énergie cinétique de $1400 - 116 = 1284 \text{ eV}$

5) Rayonnements ionisants et atténuation dans la matière

5.1 Définition d'un rayonnement ionisant :

« Rayonnements électromagnétiques ou corpusculaires capable de produire directement ou indirectement des ions, lors de leur passage à travers les atomes et les molécules ».

RX, Rayons Gamma et UV sont ionisants !

5.2 Interactions avec la matière

Les interactions entre les photons et la matière vont dépendre d'une part du nombre de photons initial, de l'épaisseur de la matière, et d'un coefficient de probabilité, selon la loi :

$$N(x) = N(0)e^{-\mu x}$$

Soit $N(x)$ le nombre de photons pour une épaisseur de "x" mètres

$N(0)$ représente le nombre de photons dans le faisceau initial

μ est le coefficient d'atténuation, il représente la probabilité d'interaction par unité de longueur.

5.3 Couche de demi-atténuation (CDA)

C'est la couche de matière qui permet de diviser par deux la quantité de photons, c'est à dire atténuer de 50% le faisceau.

Algébriquement :

$$\frac{N(0)}{2} = N(0)e^{-\mu \text{CDA}} \quad \text{CDA} = \frac{\ln 2}{\mu} \quad N(k\text{CDA}) = \frac{N(0)}{2^k} \quad (\text{où } k \text{ est le nombre de CDA})$$

Pour 1 CDA, on a donc 50% du faisceau qui traverse, pour 2CDA, 25% (75% qui est atténué) et ainsi de suite... On considère que, pour 10CDA, le faisceau est atténué totalement

5.4 Mécanismes particuliers d'atténuation

Quel Mécanisme ?	Quel Effet ?	Quels sont les principaux Intéressés ?	Quelles conséquences ?
Effet photoélectrique	Transfert de la totalité de l'énergie du photon à un e- de la matière	Photons de faible énergie, Et les atomes lourds	Pour l'atome ionisé : réarrangement Via photons fluo. Electron : perte de son énergie par Ionisation successives
Effet Compton	Transfert d'une partie de l'énergie à un e- de la matière qui sera ionisé. Le reste de l'énergie sera diffusée via un 2 nd photon	Effet compton est indépendant de la nature de la matière ! Probabilité diminue quand l'énergie augmente	Idem que pour photoélec., cependant le transfert d'énergie n'est pas total et un 2 nd photon diffuse
Diffusion de Thomson Rayleigh	Le photon change de direction	photons peu énergétiques	Pas de transfert d'énergie !!
Création de Paire	L'énergie d'un photon passant près D'un noyau est transformée en 2 Particules	photons très énergétiques	