

Généralités

❖ Introduction :

Physique & biologie ?

→ *Filière scientifique, non ?*

Prétention de la physique : compréhension d'objets inertes, des plus petits aux plus grands.

Physique ancienne :

Le voyage sur la Lune était déjà, théoriquement, possible

(Il manquait juste des petits détails pratiques...)

+ Concept de continuité de la matière (lumière, matériaux comme une planche de bois)

Or, c'est faux !

La lumière est discontinue (émission de particules), une planche de bois n'est qu'un assemblage de vide.

→ Physique moderne : Changement de vision des choses

Tout est discontinu

Maintenant, il est possible de calculer une probabilité de position d'un électron autour d'un atome.

❖ Les objets de l'univers :

➤ L'univers :

Âge : $13,7 \cdot 10^9$ ans

Soit $4,32 \cdot 10^{17}$ secondes

Son origine est le BIG-BANG, une explosion de matière dont de la lumière. De là, on peut deviner sa taille :

$$v = d / t \quad d = c \cdot t = 3 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} \cdot 4,32 \cdot 10^{17} \text{ s.}$$

Taille : $1,3 \cdot 10^{26}$ m.

Une telle distance est inconcevable en mètres, il faut chercher une autre unité : les années-lumière (= la distance que la lumière parcourt en 1 année)

$$\begin{aligned} 1 \text{ année-lumière} &= 365 \cdot 24 \cdot 3600 \cdot 3 \cdot 10^8 \\ &= 9,48 \cdot 10^{15} \text{ m} \end{aligned}$$

Taille : $13,7 \cdot 10^9$ années-lumière.

➤ Le domaine humain :

= dimensions à l'échelle humaine :

Plus grand : quelques dizaines ou centaines de kilogrammes, mètres, secondes, heures ou jours. Plus petit : quelques micromètres.

➤ L'atome :

Ordre de grandeur : l'angström $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$.

Il est constitué d'un noyau et d'électrons. Le noyau est constitué de A nucléons.

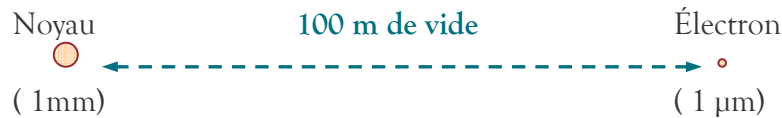
dont Z protons,
+ A - Z neutrons.

L'ensemble des protons - neutrons constitue les nucléons (composés chacun de 3 quarks)

Tout atome est neutre : les électrons sont au même nombre que les protons : Z.

Un élément chimique est défini par le nombre Z de protons dans le noyau.

La masse de la matière est exclusivement dans le noyau. $m = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$. La masse d'un électron est 1836 fois moindre.



Dimensions . 10^{12}

➤ Notion de temps :

Univers	Temps de vie :	$13,7 \cdot 10^9 \text{ ans} = 4,7 \cdot 10^{17} \text{ s}$
Homme	Temps de vie :	$75 \text{ ans} = 2 \cdot 10^9 \text{ s}$
Atome	Période de vibration :	10^{-14} s
Noyau	Temps de la lumière pour le traverser :	$3 \cdot 10^{-24} \text{ s}$

❖ Interactions entre ces objets :

➤ Interaction gravitationnelle :

= force de gravité.

Découverte par Newton.

= Force entre 2 objets massiques.

$$F_G = G \cdot \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2} \quad G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ MKSA}$$

C'est elle qui gouverne le cosmos, le mouvement des planètes, les marées, la gravité.

➤ Interaction électromagnétique :

= Force entre 2 objets chargés.

$$F_E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2} \quad \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ MKSA}$$

C'est cette force qui gère l'interaction entre 2 objets chargés, mais aussi les frottements (résistance) La charge électrique en mouvement entraîne une force magnétique sur une autre charge électrique.

Le noyau pose problème : les protons (particules chargées à l'intérieur du noyau) se repoussent.

➤ Interaction nucléaire forte :

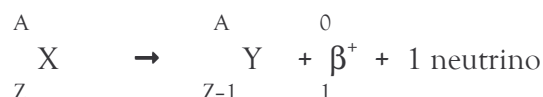
Elle assure la cohésion du noyau et la cohésion des quarks dans le nucléon. Leur découverte reste empirique : on ne visualise que leurs effets. On sait que leur portée est petite, de l'ordre du noyau (10^{-15} m) et suffisamment forte pour contrecarrer la force électromagnétique.

➤ Interaction nucléaire faible :

Elle permet de modifier les quarks de type U en type D et vice-versa. Cela entraîne la transformation de proton en neutron et réciproquement.

Elle est 10^6 moins forte que l'interaction nucléaire forte et sa portée est de 10^{-18} m. Mais elle explique le phénomène de fusion des atomes d'Hydrogène en atome d'Hélium dans le soleil. Sans cette fusion il n'y a pas d'énergie nucléaire, donc pas de soleil et donc aucune vie possible sur la Terre.

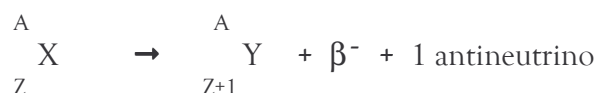
Proton (charge +) $\rightarrow$ Neutron + β^+ + 1 neutrino



$\Rightarrow$ **Radioactivité β^+**

β^+ : électron qui porte une charge + e (= anti-électron)
Neutrino : particule sans masse (ou très faible)
qui a une interaction quasi nulle
avec la matière.

Neutron $\rightarrow$ Proton + β^- + 1 antineutrino



$\Rightarrow$ **Radioactivité β^-**

β^- : électron « classique » qui porte une charge - e .
On utilise le « β » pour indiquer que cet électron
n'est pas originaire du cortège électronique.

β^- et β^+ = particule et antiparticule.

La rencontre d'une particule avec son antiparticule entraîne une disparition de la matière et une libération d'énergie sous forme de photons.

Ce processus est utilisé dans l'imagerie médicale avec l'émission de β^+ qui, une fois qu'ils rencontrent de la matière, rencontrent forcément des électrons.

$(\beta^+ ; e^-)$  **Rayonnement γ**
et disparition de la matière.

Comprendre un atome avec la précision la plus fine :

→ Comprendre un noyau :

↳ Calcul des 4 interactions entre les nucléons 2 à 2.

*Possible quand il n'y en a pas trop, comme l'Hydrogène ou Hélium...
Après cela devient vite impossible, même pour un ordinateur...*

+ Calcul des 4 interactions avec et dans le cortège électronique.

*C'est déjà fini avant d'avoir commencé...
Alors essayer de comprendre 2 atomes...*

À l'échelle macroscopique :

On ne considère pas les manifestations des interactions entre les atomes ; il suffit de travailler avec les forces gravitationnelles et coulombienne.

À l'échelle de l'atome :

On ne cherche pas à voir ce qui se passe à l'intérieur du noyau ; il suffit de travailler avec la force coulombienne (la force gravitationnelle est négligeable)

À l'échelle du noyau :

On ne travaille qu'avec les interactions Proton - Proton : la force coulombienne et l'interaction nucléaire forte.

Même avec 2 forces seulement, c'est déjà compliqué...

❖ Mesures d'une grandeur – Outils et méthodes :

Expérience → mesures → corrélation entre les des différentes mesures.

Les quantités fondamentales : Longueur – Temps – Masse – Intensité électrique

Les unités du Système International SI ou MKSA :

Longueur : le Mètre, m

Masse : le Kilogramme, kg

Temps : la Seconde, s

Intensité de courant : l'Ampère, A

+ Température : le Kelvin, K

Quantité de matière : la Mole, mol

➤ La longueur :

Défini par un mètre étalon en alliage de titane.
Mais une définition vis-à-vis d'un objet est risquée car l'objet peut être perdu.

→ 1 mètre = distance parcourue par la lumière en un temps de 1/299792458 seconde.

10^{-6} m	1 μ m (cellule)
10^{-9} m	1 nm (molécule)
10^{-10} m	1 Å (atome)
10^{-12} m	1 pm = 1 picomètre
10^{-15} m	1 fm (noyau)

➤ La masse :

Défini par un kilogramme étalon, il en existe 10 exemplaires précieusement gardés.

= propriété de tout objet qui, lorsqu'il est en présence d'un autre objet, l'attire.

10^{-3} kg	1 g
10^{-6} kg	1 mg
10^{-9} kg	1 μ g
10^{-12} kg	1 ng
10^{-18} kg	1 fg

1 atome : $1,66 \cdot 10^{-27}$ kg

→ 1 u.m.a = 1 unité de masse atomique

= 1/12 de la masse d'un atome de carbone ^{12}C .

La masse d'une mole (soit N_A atomes) de ^{12}C = 12 g

$$\text{Donc } 1 \text{ u.m.a} = \frac{1 \cdot 12 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 6,03 \cdot 10^{23}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

➤ Le temps :

Au départ, on observait une périodicité (jour-nuit ; saisons)

Maintenant, on définit la seconde à partir des vibrations de l'atome de Césium 133.

→ 1 seconde = le temps que l'atome de Césium vibre 9 192 631 770 fois.

On obtient un temps différent selon que l'on est au niveau de la mer ou en altitude : ceci est dû à la gravitation.

➤ L'énergie :

La masse peut disparaître : ce n'est pas une unité fiable. L'énergie est partout et est fiable. C'est une quantité fondamentale dans le sens où, sans énergie, on ne fait rien.

Exemple : les réserves de pétrole :

À activité constante (sans tenir compte de l'émergence de la Chine et de l'Inde), elles seront vides dans 50 à 70 ans.

Unité :

- En MKSA : le Joule
- En cm g s : l'erg
- Pour l'atome : l'eV

1 eV = l'énergie donnée à un électron quand on le soumet à un potentiel de 1 Volt.

$$\begin{aligned} E &= q \cdot V \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Coulomb} \cdot 1 \text{ Volt} \\ &= 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Joule} \end{aligned}$$

10^3 eV	1 keV
10^6 eV	1 MeV

➤ Dimension et analyse dimensionnelle :

Soit : $[L]$; $[M]$ et $[T]$

$$\text{Distance} = d \Leftrightarrow [L]$$

$$\text{Vitesse} = v = d/t \Leftrightarrow [L] \cdot [T]^{-1}$$

$$\text{Accélération} = a = v/t \Leftrightarrow [L] \cdot [T]^{-2}$$

$$\text{Force} = m.a \Leftrightarrow [M] \cdot [L] \cdot [T]^{-2}$$

Énergie = ? On recherche des expressions de l'énergie :

$$E = m.c^2 = [M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2}$$

$$E = m.g.h = m.a.h = [M] \cdot [L]^2 \cdot [T]^{-2} \quad (g = a)$$

Avec 2 expressions, on obtient une même dimension : ça ne veut pas dire que l'on a forcément bon, mais ça veut au moins dire que cette relation n'est pas délirante.

$$\begin{aligned} 1 \text{ Joule} &= 1 \text{ kg} \cdot (1 \text{ m})^2 \cdot (1 \text{ s})^{-2} \\ &= 10^3 \text{ g} \cdot 100^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-2} \\ &= 10^7 \text{ g.cm}^2.\text{s}^{-2} \\ &= 10^7 \text{ erg.} \end{aligned}$$

Soit 2 grandeurs A et B :

$$\begin{array}{lll} \text{Si } A = B & \Rightarrow & [A] = [B] \\ \text{MAIS Si } [A] = [B] & \nRightarrow & A = B \end{array}$$

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda \quad h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$$

$$\begin{array}{ll} E = k / \lambda & \\ (\text{eV}) & (\text{\AA}) \end{array}$$

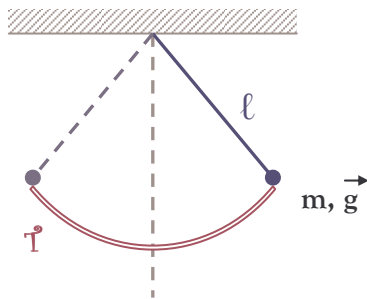
→ Trouvons k :

Soit la gamme du visible : 4000 à 8000 Å

$$\begin{array}{lll} & (\text{m.s}^{-1}) & \\ E = h \cdot c / \lambda & & \\ (\text{J}) & (\text{J.s}) & (\text{m}) \end{array}$$

$$\begin{array}{lll} (\text{eV}) & 6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \cdot 10^{10} (\text{\AA.s}^{-1}) & \\ E = \frac{}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot \lambda (\text{\AA})} & = & \frac{12\,400 (\text{eV} \cdot \text{\AA})}{\lambda (\text{\AA})} = k \end{array}$$

$$\begin{array}{ll} \text{Si } \lambda = 4\,000 \text{ \AA} & \text{alors } E = 3,1 \text{ eV} \\ \lambda = 8\,000 \text{ \AA} & \text{alors } E = 1,55 \text{ eV} \end{array}$$



$$T = \text{période} = f(m, g, \ell)$$

$$T = m^A \cdot g^B \cdot \ell^C$$

$$[g] = [L] \cdot [T]^{-2}$$

$$[T]^1 = [m]^A \cdot [g]^B \cdot [\ell]^C$$

$$[T]^1 = [M]^A \cdot \overbrace{[L]^B \cdot [T]^{-2B}} \cdot [L]^C$$

$$[T]^1 = [L]^0 \cdot [T]^1 \cdot [M]^0$$

$$\text{Donc : } -2B = 1 \quad \Rightarrow \quad B = -\frac{1}{2}$$

$$A = 0$$

$$B + C = 0 \quad \Rightarrow \quad C = \frac{1}{2}$$

$$\text{D'où : } T = \sqrt{\ell/g} \cdot 2\pi$$

➤ Chiffres significatifs :

On peut : Compter → valeur exacte

Mesurer → incertitude

Soit une longueur mesurée $\ell = 41,55 \text{ cm}$

On émet des doutes sur le dernier chiffre, on ne garde que 3 chiffres significatifs.

Autre exemple :

$$E = a \cdot C$$

$$\text{avec } C = 2\,250$$

$$\text{On mesure : } E = 30,85 \text{ keV} \quad \Rightarrow \quad a = 0,013\,711\,111\,11$$

Si on reprend le calcul de E avec des valeurs plus ou moins précises de a déterminée à partir de la mesure :

a = 0,013 711 111 11	E = 30,85
a = 0,013 711	E = 30,84975
a = 0,013 71	E = 30,8475
a = 0,013 7	E = 30,825
a = 0,014	E = 31,5
a = 0,01	E = 22,5

➤ Les incertitudes sur les mesures :

Soit La mesure d'une grandeur **X** donnant un résultat **x**,
Et le résultat réel : **x₀**.

L'erreur : $e = x - x_0$ Soit positive, soit négative.

L'incertitude : $\Delta x = |e|$ On prend toujours l'arrondi au dessous.

L'incertitude relative : $\Delta x / x_0$ Problème : on ne connaît pas x_0 !
→ $\Delta x / x$

Exemple :

La masse du soleil = $1,9889 \pm 0,0030 \cdot 10^{30} \text{ kg}$

$$\Delta M / M = 0,0020 / 1,9889 = 1,508 \cdot 10^{-3}$$

La masse de la Terre = $5,974 \pm 0,009 \cdot 10^{24} \text{ kg}$

$$\Delta M / M = 0,009 / 5,974 = 1,506 \cdot 10^{-3}$$

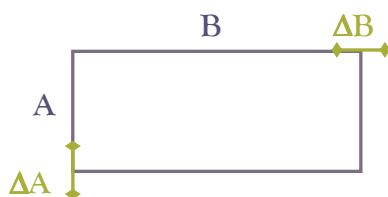
Mesure directe :

On mesure : $x \rightarrow \Delta x = \Delta_R + \Delta_{x_l} + \Delta_{x_E}$
↓ ↓ ↓
Réglage Lecture Étalonnage

Mesure indirecte :

On a mesuré :

A avec une erreur ΔA
B avec une erreur ΔB



$$\text{Périmètre} = 2 (A+B) = P$$

$$\rightarrow \Delta P = (P_{\text{MAX}} - P_{\text{MIN}})/2$$

$$= \frac{2 (\cancel{A} + \Delta A + \cancel{B} + \Delta B) - 2 (\cancel{A} - \Delta A + \cancel{B} - \Delta B)}{2}$$

$$= 2 (\Delta A + \Delta B)$$

$$P_0 = P \pm \Delta P$$

$$\text{Surface} = A \cdot B = S$$

$$\rightarrow \Delta S = (S_{\text{MAX}} - S_{\text{MIN}})/2$$

$$\begin{aligned} & (A + \Delta A) \cdot (B + \Delta B) - (A - \Delta A) \cdot (B - \Delta B) \\ = & \frac{(A + \Delta A) \cdot (B + \Delta B) - (A - \Delta A) \cdot (B - \Delta B)}{2} \\ = & \frac{\cancel{A \cdot B} + A \cdot \Delta B + \Delta A \cdot B + \cancel{\Delta A \cdot \Delta B} - \cancel{A \cdot B} + A \cdot \Delta B + \Delta A \cdot B - \cancel{\Delta A \cdot \Delta B}}{2} \\ = & A \cdot \Delta B + \Delta A \cdot B \end{aligned}$$

$$S_V = S \pm \Delta S$$

$$f'(x) = \frac{\Delta f}{\Delta x (x \rightarrow 0)} = \frac{df}{dx}$$

$$S = f(a, b)$$

$$dS = \frac{\delta S}{\delta a} \cdot da + \frac{\delta S}{\delta b} \cdot db$$

$$= b \cdot da + a \cdot db$$

$$\Rightarrow \Delta S = \left| \frac{\delta S}{\delta a} \right| \cdot \Delta a + \left| \frac{\delta S}{\delta b} \right| \cdot \Delta b = b \cdot \Delta a + a \cdot \Delta b$$

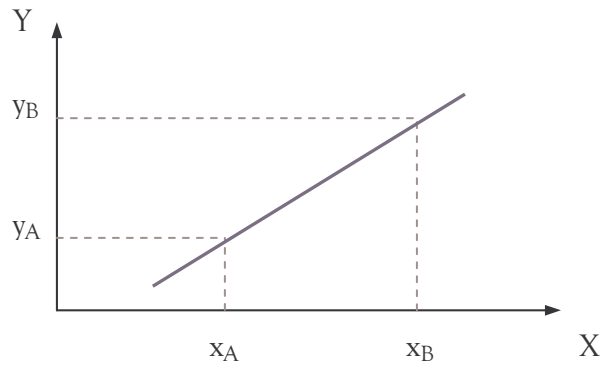
Exemples de fonction :

Soit une grandeur G

et 2 quantités mesurées a et b.

Relation :	Dérivée :	Incertitude :
$G = a + b$	$dG = da + db$	$\Delta G = \Delta a + \Delta b$
$G = a - b$	$dG = da - db$	$\Delta G = \Delta a + \Delta b$
$G = a \cdot b$	$dG = a \cdot db + b \cdot da$	$\Delta G = a \cdot \Delta b + b \cdot \Delta a$
$G = a / b$	$dG = \frac{a \cdot db - b \cdot da}{b^2}$	$\Delta G = \frac{ a \cdot \Delta b + b \cdot \Delta a}{b^2}$
$G = a^m$	$dG = m \cdot a^{m-1} \cdot da$	$\Delta G = m \cdot a^{m-1} \Delta a$
$G = e^a$	$dG = e^a \cdot da$	$\Delta G = e^a \cdot \Delta a$
$G = \ln(a)$	$dG = da / a$	$\Delta G = \Delta a / a$

TP émission α :



$$L = \sqrt{X^2 + Y^2} \quad X = x_B - x_A \quad \text{et} \quad Y = y_B - y_A$$

Avec les incertitudes : $\Delta x_A, \Delta x_B, \Delta y_A, \Delta y_B$.

$$L^2 = X^2 + Y^2 \quad \text{que l'on dérive :}$$

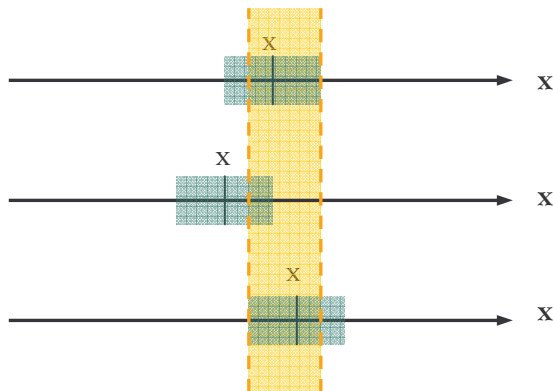
$$2L \cdot dL = 2X \cdot dX + 2Y \cdot dY$$

$$dL = X/L \cdot dX + Y/L \cdot dY$$

$$\Delta L = \frac{|X|}{L} \cdot \Delta X + \frac{|Y|}{L} \cdot \Delta Y$$

Mesure d'une grandeur fixe :

(rare)

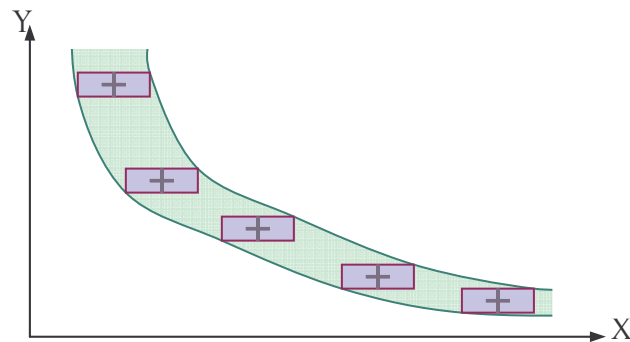


Domaine de compatibilité

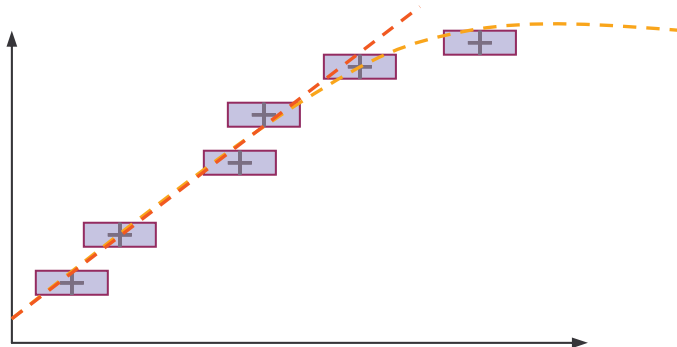
→ Ça vaut le coût de faire plusieurs mesures de la même grandeur.

Mais il n'est pas possible d'effectuer plusieurs fois la mesure d'une même grandeur dans un système dynamique !

Mesure de 2 grandeurs :



Comportement linéaire :



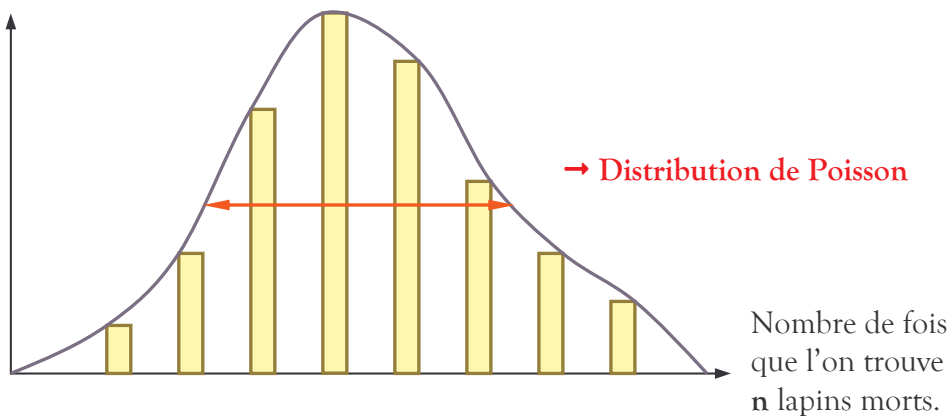
→ Soit la loi n'est pas linéaire ; soit la dernière valeur n'est pas bonne.

Comptage d'un phénomène géré par une probabilité :

Exemple : la probabilité qu'un traitement donné a un effet donné sur une espèce donnée.

On fait systématiquement une erreur statistique en ne prenant pas en compte des fluctuations.

Nombre de
lapins morts



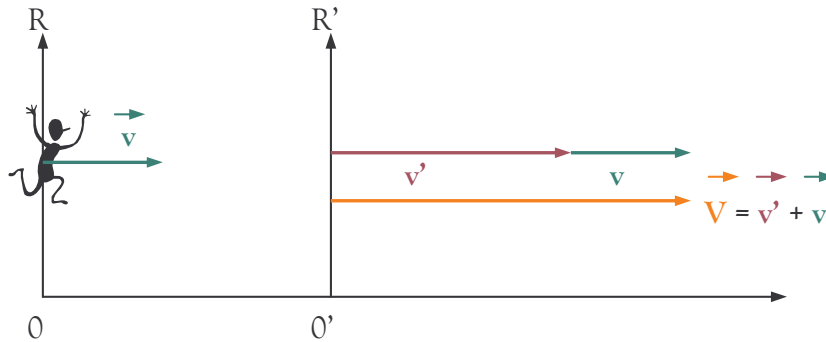
❖ Notion de relativité :

Soit 2 repères : R, le repère fixe et R', le repère mobile.

Et les vitesses : v , la vitesse de quelqu'un qui marche à pied par rapport à R ;

v' , la vitesse d'un train par rapport à R ;

V , la vitesse de quelqu'un qui marche dans un train et dans le même sens de déplacement que ce dernier par rapport à R.



$$\vec{v} = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A} = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

La vitesse de la lumière :

Pendant quelques millisecondes, on peut considérer que la Terre a un mouvement rectiligne uniforme.

La mesure de la vitesse de la lumière dans R et R' est la même

Or, avec la mécanique classique c'est impossible : remise en cause totale !

Travaux d'Einstein :

$$R \left| \begin{array}{cc} x_A & x_B \\ t_A & t_B \end{array} \right.$$

$$R' \left| \begin{array}{cc} x'_A & x'_B \\ t'_A & t'_B \end{array} \right.$$

$$v = \frac{x_B - x_A}{t_B - t_A}$$

$$v' = \frac{x'_B - x'_A}{t'_B - t'_A}$$

$$x_B - x_A \neq x'_B - x'_A$$

Or : $v = v'$

Donc : $t_B - t_A \neq t'_B - t'_A$

→ *Le temps n'est plus une grandeur absolue.*

Cela remet en cause toutes les théories incluant le temps.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad m : \text{masse} \quad ; \quad m_0 : \text{masse au repos}$$

10 ans après, les mathématiciens ont démontré que cette formule est la seule à pouvoir expliquer ce phénomène.

$$\text{Impulsion d'une particule} = \vec{p} = m \cdot \vec{v} = \frac{m_0 \cdot \vec{v}}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$E_0 = m_0 \cdot c^2$$

$$E_{\text{TOTAL}} = E_T = m \cdot c^2 = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad E_T = E_0 + E_C$$

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

$$E_C = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - E_0 = m_0 \cdot c^2 \left[(1 - v^2/c^2)^{-1/2} - 1 \right]$$

On travaille régulièrement avec des vitesses largement inférieures à la vitesse de la lumière :

$$(1 + \epsilon)^N = 1 + N\epsilon + N(N-1) \epsilon^2/2! + \dots$$

$$(1 - v^2/c^2)^{-1/2} = 1 - 1/2 \cdot (-v^2/c^2) = 1 + 1/2(v^2/c^2)$$

$$E_C = m_0 \cdot c^2 \cdot (v^2/2c^2) = 1/2 m_0 \cdot v^2$$

→ *Il s'agit de la forme classique de l'énergie cinétique.*

Que se passe-t-il si l'on travaille avec les électrons ?

$$m_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \quad E_0 = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2 = 8,9 \cdot 10^{-14} \text{ J} = \mathbf{511 \text{ keV}}$$

Valeur de référence à connaître.

Calcul de la vitesse d'un électron :

$$E_T = E_0 + E_C = \frac{m_0 \cdot c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{E_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$\sqrt{1 - v^2/c^2} = \frac{E_0}{E_0 + E_C} \quad (1 - v^2/c^2) = \left(\frac{E_0}{E_0 + E_C} \right)^2$$

$$(v^2/c^2) = 1 - \left(\frac{E_0}{E_0 + E_C} \right)^2 = \left(1 + \frac{E_0}{E_0 + E_C} \right) \cdot \left(1 - \frac{E_0}{E_0 + E_C} \right)$$

$$(v/c) = \left[\left(\frac{E_C}{E_0 + E_C} \right) \cdot \left(\frac{2 \cdot E_0 + E_C}{E_0 + E_C} \right) \right]^{1/2}$$

→ Il s'agit de la forme relativiste (= absolue) utilisable pour toutes les particules.

Avec la physique classique, on obtient :

$$E_C = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot m_0 \cdot c^2 \cdot (v^2/c^2)$$

$$(v^2/c^2) = 2 \cdot E_C / m_0$$

$$(v/c) = \sqrt{2 \cdot E_C / m_0}$$

Pour un électron à différentes énergies cinétiques :

E_C	(v/c) classique	(v/c) relativiste	Écart
$E_0/100 = 5,11 \text{ keV}$	0,141	0,140	0,7 %
$E_0/10 = 51,1 \text{ keV}$	0,447	0,416	7 %
$E_0 = 511 \text{ keV}$	1,414	0,866	63 %

Et encore, on n'a pas pris de grandes énergies cinétiques ; dans une réaction nucléaire, un électron peut avoir quelques MeV.

Déjà, via la méthode de la physique classique, la dernière valeur est délirante :

L'électron serait 1,4 fois plus rapide que la lumière !? ...

$$E_T = E_0 + E_C = \frac{E_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Si :

$$\begin{aligned} v &\rightarrow c, \\ v/c &\rightarrow 1, \\ v^2/c^2 &\rightarrow 1, \\ 1 - (v^2/c^2) &\rightarrow 0, \\ \sqrt{1 - v^2/c^2} &\rightarrow 0, \\ E_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2} &\rightarrow \infty \end{aligned}$$

Le calcul relativiste est nécessaire pour une particule ayant une vitesse supérieure à 0,1 c. Avant, l'approximation de la physique classique est admise.

$$E_T = \frac{E_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$E_T^2 = \frac{E_0^2}{(1 - v^2/c^2)}$$

$$\text{Impulsion } p = \frac{m_0 \cdot v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$p^2 \cdot c^2 = \frac{m_0^2 \cdot v^2 \cdot c^2}{(1 - v^2/c^2)}$$

$$p^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4 = \frac{m_0^2 \cdot v^2 \cdot c^2}{(1 - v^2/c^2)} + m_0^2 \cdot c^4$$

$$p^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4 = \frac{\cancel{m_0^2 \cdot v^2 \cdot c^2} + m_0^2 \cdot c^4 - \cancel{m_0^2 \cdot c^4 \cdot v^2/c^2}}{(1 - v^2/c^2)}$$

$$p^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4 = \frac{m_0^2 \cdot c^4}{(1 - v^2/c^2)} = E_T^2$$

$$E_T = E_0 + E_C = \sqrt{(p^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4)}$$

→ Expression relativiste

Le cas d'un photon :

$$m_0 = 0$$

$$E_0 = m_0 \cdot c^2 = 0$$

?? Le photon n'aurait pas d'énergie ? Si !!

$$E_T = E_0 + E_C = \sqrt{(p^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4)}$$

$$= \sqrt{(p^2 \cdot c^2)} = p \cdot c$$

$$p = E_T/c$$

→ *Le photon transporte de l'énergie et d'impulsion.*

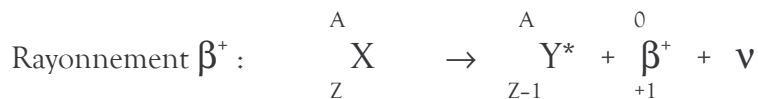
Calcul des énergies au repos :

Particule :	Masse :	Énergie au repos : $E_0 = m_0 \cdot c^2$
Électron	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	511 keV
Nucléon	$1 \text{ u.m.a} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	931,5 MeV
Proton	1,00782 u.m.a	938,272 MeV
Neutron	1,00866 u.m.a	939,563 MeV

$$m_0 \text{ ÉLECTRON} \approx 1/2000 \cdot m_0 \text{ NUCLÉON}$$

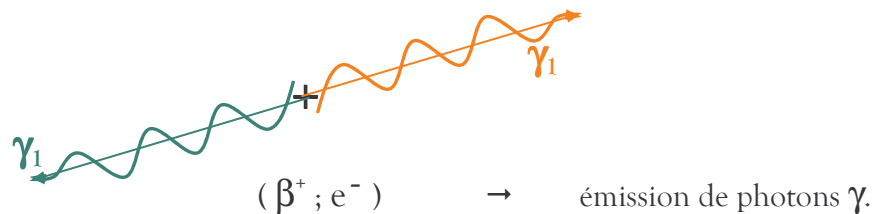
$$\Rightarrow E_0 \text{ ÉLECTRON} \approx 1/2000 \cdot E_0 \text{ NUCLÉON}$$

Explication de $E = m \cdot c^2$:



β^+ : positron = anti-électron

Ce β^+ est émis avec une certaine impulsion dans la matière. Il y est freiné au point que sa vitesse devient nulle. Il va être attiré par le premier électron qui passe (attraction de 2 charges électriques opposées) Ils vont se regrouper en un point précis :



Conservation de l'énergie : $E = 2 \cdot m_0 \cdot c^2 = E_{\gamma_1} + E_{\gamma_2}$

L'impulsion d'entrée = l'impulsion de sortie

$$\vec{p}_E = \vec{p}_S$$

$$\vec{p}_E = \vec{0}$$

Ils sont à l'arrêt

$$\vec{0} = \vec{p}_S = \vec{p}_{\gamma_1} + \vec{p}_{\gamma_2}$$

$$|\vec{p}_{\gamma_1}| + |\vec{p}_{\gamma_2}| = E_{\gamma_1}/c + E_{\gamma_2}/c$$

$$\vec{E}_{\gamma_1} = -\vec{E}_{\gamma_2} \quad (\text{angle à } 180^\circ)$$

$$E_{\gamma_1} = E_{\gamma_2} = m_0 \cdot c^2 = 511 \text{ keV}$$

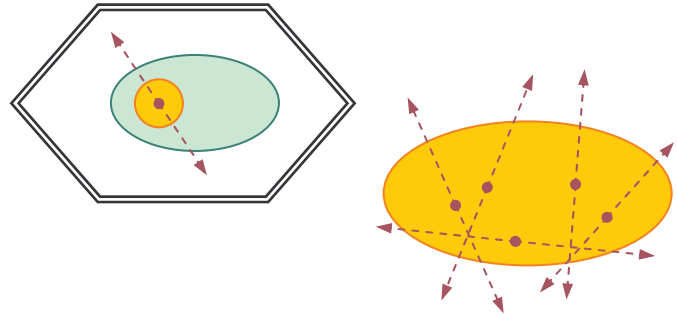
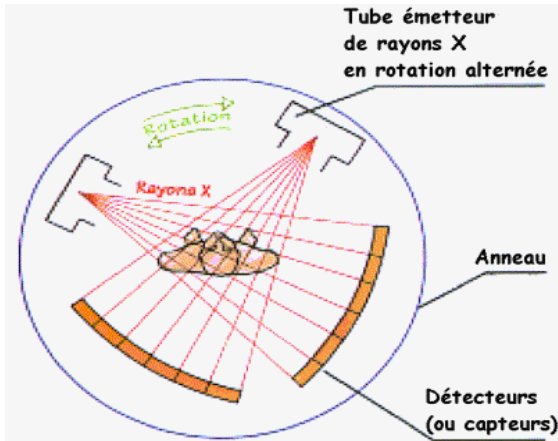
Application : IM par émission γ - γ .

On prend un noyau (ou atome) émetteur β^+ que l'on insère dans une molécule biologique et on l'intègre dans l'organisme.

On place le patient dans un cylindre (= ensemble de détecteurs de γ) appelé caméra TEP.

Les capteurs détectent les photons γ_0 à partir des γ détectés à 180° et d'énergie 511 keV.

On arrive à converger vers l'organe où la molécule s'est intégrée.



→ Visualisation de l'organe qui a fixé la molécule marquée.

Exemple d'application sur le cerveau :

La maladie de Parkinson résulte de la perte de neurones dopaminergiques. Ces neurones sont caractérisés par la fixation de Fluor.

Lorsque l'on effectue une greffe, on vérifie son évolution en injectant au patient du ^{18}F qui émet des β^+ . Si, lors de l'IRM, on observe des taches signifiant un rayonnement γ , cela indique que la greffe a pris.

En demandant au patient de penser à des souvenirs datant de 10 ans, on voit évoluer les tâches nous permettant de visualiser la ou les zones qui travaillent.

❖ **Rayonnement électromagnétique : Onde & corpuscule :**

➤ **Notion d'ondes et de particule :**

La particule : Objet massif, localisé : $x ; y ; z ; t$

→ de là, on peut déterminer sa vitesse $\vec{v} : v_X ; v_Y ; v_Z ; t$

L'onde : Perturbation - Déformation - Vibration

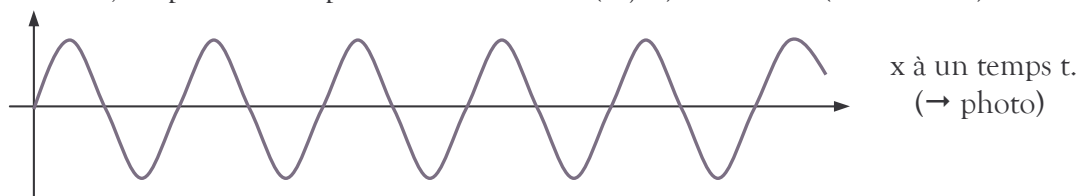
Elle n'est pas localisable.

De ce fait, elle est difficile à définir...

On travaillera avec l'exemple le plus simple : le mouvement ondulatoire de la corde.

➤ **Propriété ondulatoire : la propagation :**

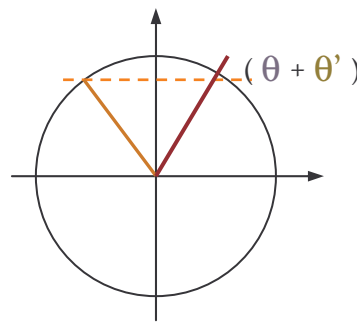
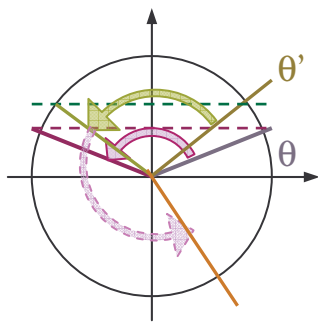
Prenons notre exemple : pour une corde que l'on fait onduler selon un mouvement sinusoïdal entretenu, on peut définir par une fonction : $\Psi(x, t) = a \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x)$



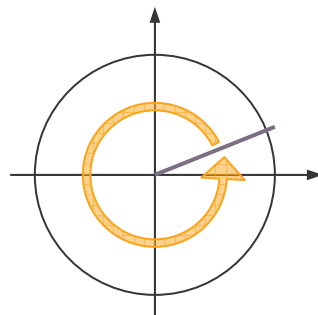
$\Psi(x, t)$: Déformation,
 ω : Pulsation,
 t : Date,
 k : Vecteur d'onde,
 x : Position.

▪ Périodicité :

Périodicité temporelle : Il existe un temps T tel que : $\Psi(x, t+T) = \Psi(x, t)$
 $a \cdot \sin[\omega \cdot (t+T) - k \cdot x] = a \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x)$



$$\rightarrow \sin(\theta + \theta') \neq \sin(\theta) + \sin(\theta')$$



$$\rightarrow \sin(\theta + 2\pi) = \sin(\theta)$$

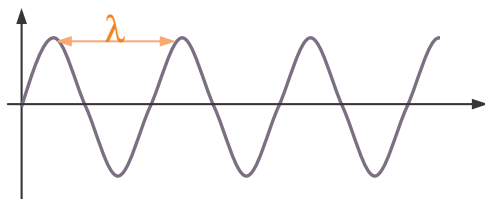
$$\Leftrightarrow \omega \cdot t + \omega \cdot T - k \cdot x = \omega \cdot t - k \cdot x + n \cdot 2\pi$$

$$\Leftrightarrow \omega \cdot t + \omega \cdot T - k \cdot x = \omega \cdot t - k \cdot x + 2\pi$$

$$\Leftrightarrow \omega \cdot T = 2\pi \quad \Leftrightarrow T = 2\pi/\omega$$

(à n tours près ;
pour faciliter l'équation,
on prend $n = 1$)

Périodicité spatiale :



Il existe une longueur λ telle que : $\Psi(x+\lambda, t) = \Psi(x, t)$
 $a \cdot \sin[\omega \cdot t - k \cdot (x+\lambda)] = a \cdot \sin(\omega \cdot t - k \cdot x)$

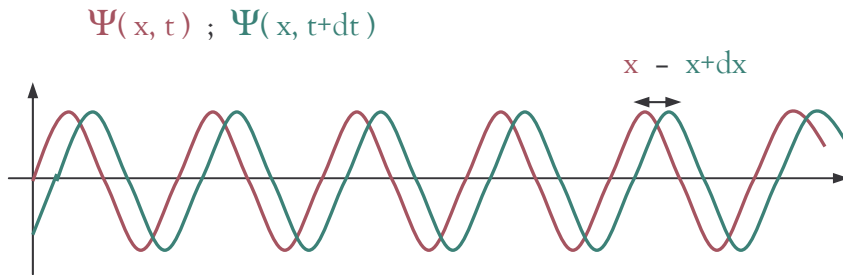
$$\Leftrightarrow \omega.t - \kappa.x - \kappa.\lambda = \omega.t - \kappa.x + n.2\pi$$

(à n tours près ;
pour faciliter l'équation,
on prend $n = -1$)

$$\Leftrightarrow \omega.t - \kappa.x - \kappa.\lambda = \omega.t - \kappa.x - 2\pi$$

$$\Leftrightarrow \kappa.\lambda = 2\pi \quad \Leftrightarrow \lambda = 2\pi/\kappa$$

= longueur d'onde



$$\Psi(x, t) = \Psi(x+dx, t+dt)$$

$$a \cdot \sin(\omega.t - \kappa.x) = a \cdot \sin[\omega.(t+dt) - \kappa.(x+dx)]$$

$$\Leftrightarrow \omega.t - \kappa.x = \omega.t + \omega.dt - \kappa.x - \kappa.dx$$

$$\Leftrightarrow \omega.dt = \kappa.dx$$

Or, la vitesse : $v = dx/dt = \omega/\kappa$

$$\begin{aligned} &= \frac{2\pi/T}{2\pi/\lambda} \\ &= (2\pi/T) \cdot (\lambda/2\pi) \end{aligned}$$

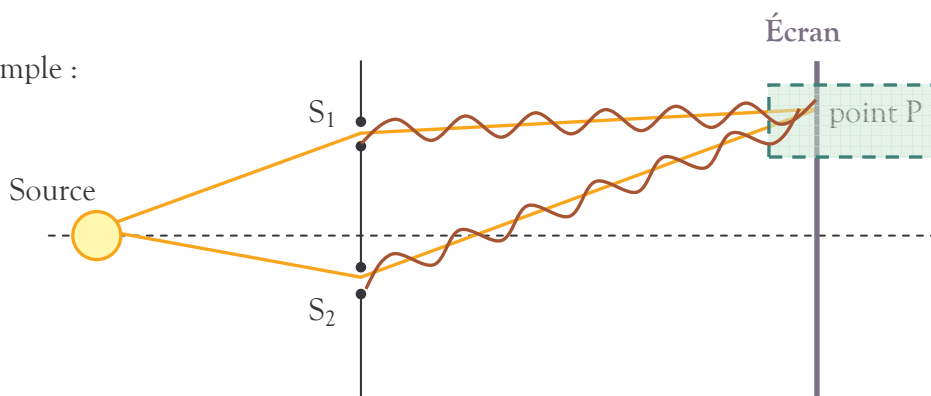
$$v = \lambda/T \quad \Rightarrow \quad \lambda = v \cdot T$$

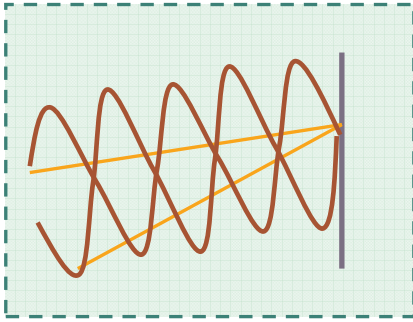
et avec la vitesse de la lumière :

$$\lambda = c \cdot T$$

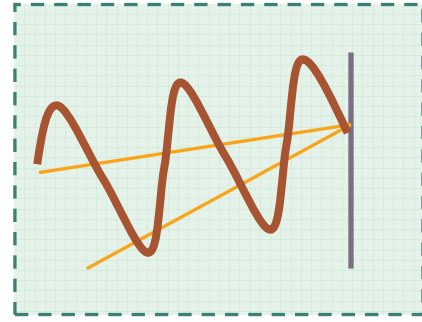
▪ Interférence :

Exemple :



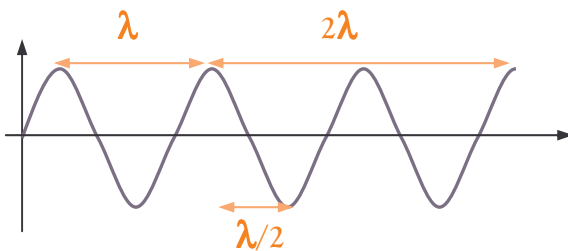


→ *Interférence destructive*
(il n'y a pas de tache lumineuse au point P)



→ *Interférence constructive*
(il y a une tache lumineuse au point P)

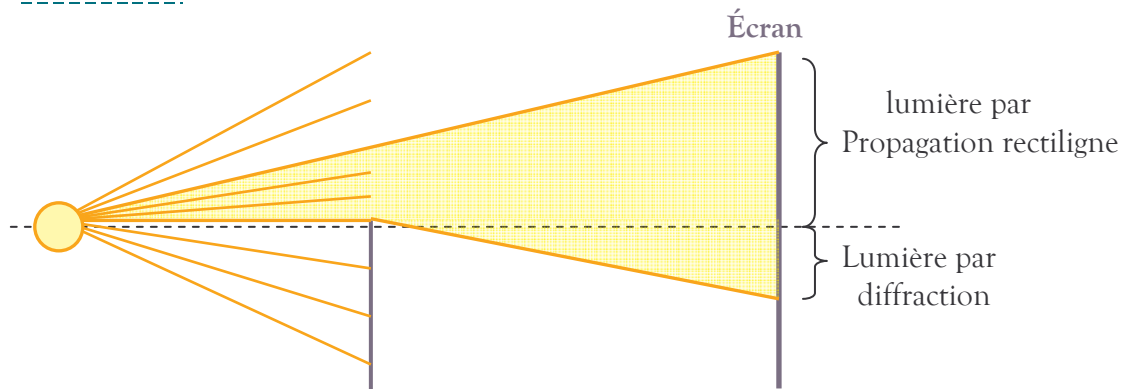
La nature des interférences dépend de la distance source – écran et du temps.



Si : $S_2 - S_1 = n \cdot \lambda$
→ Interférence constructive.

Si : $S_2 - S_1 = n \cdot \lambda + \lambda/2$
→ Interférence destructive.

■ Diffraction :



➤ Propriété corpusculaire :

■ Démonstration par des exemples :

• Éclairage de la roue à barreaux :

Soit une roue aux frottements négligeables (roulement à bille) et bien équilibrée.

On pose sur chaque barreau :

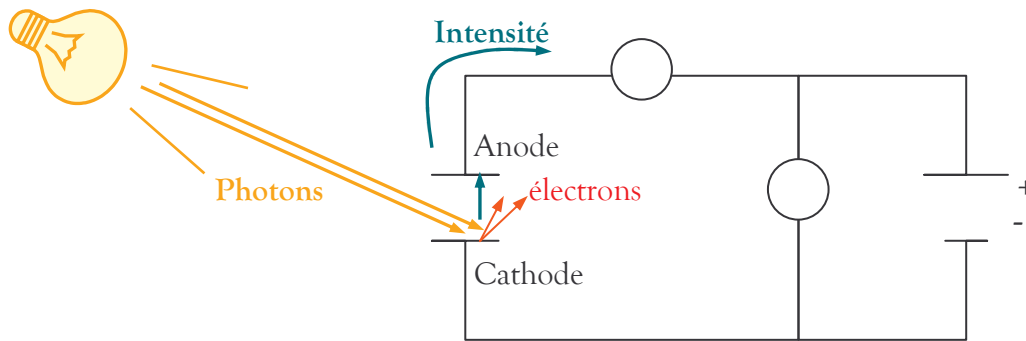
- Une feuille de papier noir (sur un côté)
- Et une feuille d'aluminium (sur l'autre côté)



Quand on allume la lampe, la roue se met en mouvement.

Cela démontre qu'il y a transport de quantité de mouvement (impulsion et énergie)

- La cellule photoélectrique :



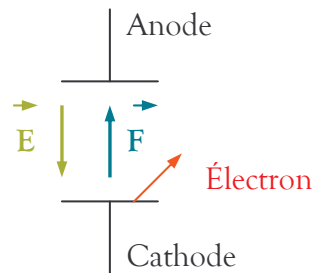
Lorsque l'on allume la lumière, on mesure une intensité électrique.

Les photons qui frappent la cathode arrachent des électrons.

Cela démontre un état corpusculaire des photons à une certaine énergie (à une certaine longueur d'onde)

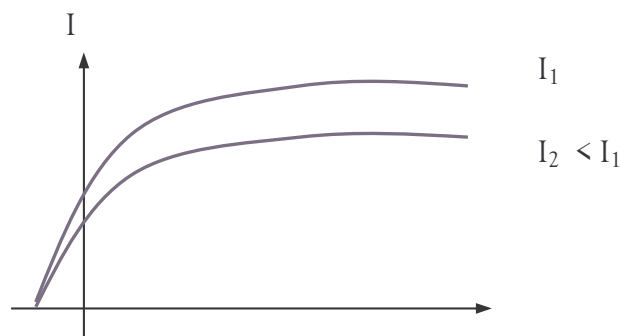
$$\vec{F} = q \cdot \vec{E}$$

F est la force créée
par le potentiel
du générateur.



q est négatif, le champ électrique $\vec{E}$ est dans le sens opposé de la force $\vec{F}$.

Si le potentiel de la pile n'est pas assez puissant, alors le champ n'est pas puissant. La probabilité que les électrons arrachés soient récupérés par l'anode est, elle aussi, réduite. Les électrons peuvent être réabsorbés soit dans la cathode, soit dans le gaz résiduel.



Lorsque l'on utilise des filtres, limitant la lumière à certaines longueurs d'ondes, il n'y a plus d'électricité.

$$E_{\gamma} = h \cdot \nu$$

$$E_e = h \cdot \nu - E_L$$

= énergie cinétique des électrons

$$U_0 = \text{Potentiel d'arrêt}$$

$$E_L = \text{Énergie de liaison des électrons}$$

$$q \cdot U_0 = h \cdot \nu - E_L$$

Un photon correspond à un quantum d'énergie :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda = 12397 \text{ eV} \cdot \text{\AA} / \lambda \text{ (en } \text{\AA})$$

Pour un champ uniforme :

$$\vec{F} = q \cdot \vec{E} = -dE_P/dx \cdot \vec{u}_X \quad E = -dV/dx \cdot \vec{u}_X \quad |\vec{E}| = V/d$$

Si $E_{\text{PHOTON}} < E_L$, il n'y a pas d'électrons d'arrachés → Intensité est nulle.

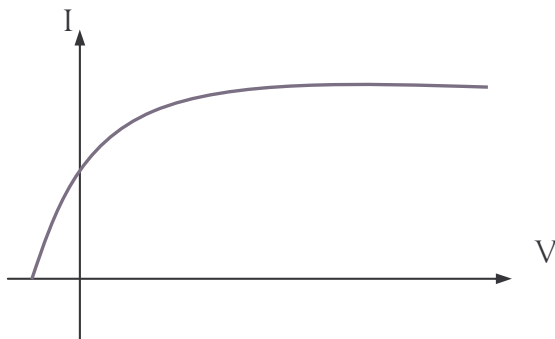
Exemple :

$$\lambda = 7\,000 \text{ \AA (par un filtre)} \rightarrow E_\gamma \approx 1,77 \text{ eV}$$

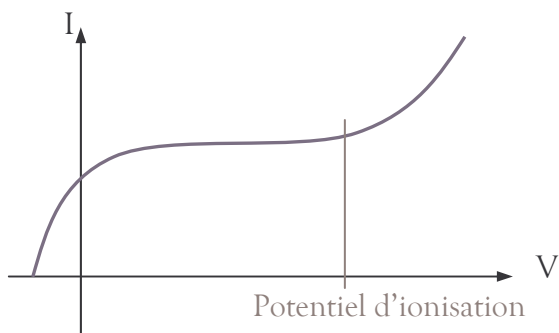
$$\rightarrow I = 0$$

$$\text{Si } \lambda < 7\,000 \text{ \AA} \rightarrow I \neq 0$$

Cellule à vide :



Cellule à gaz :



Quand $Te > E_{\text{LIAISON MOLÉCULAIRE}}$,

il y a une ionisation.

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = q \cdot V$$

Interactions du rayonnement avec la matière

Dans la matière, on rencontre des particules massives et chargées : les électrons, les ions, les particules α , ... et des particules neutres massives : les neutrons et non massives : les photons.

L'existence de différentes particules induit l'existence de différentes interactions.

Les particules chargées → Interaction coulombienne avec les électrons.

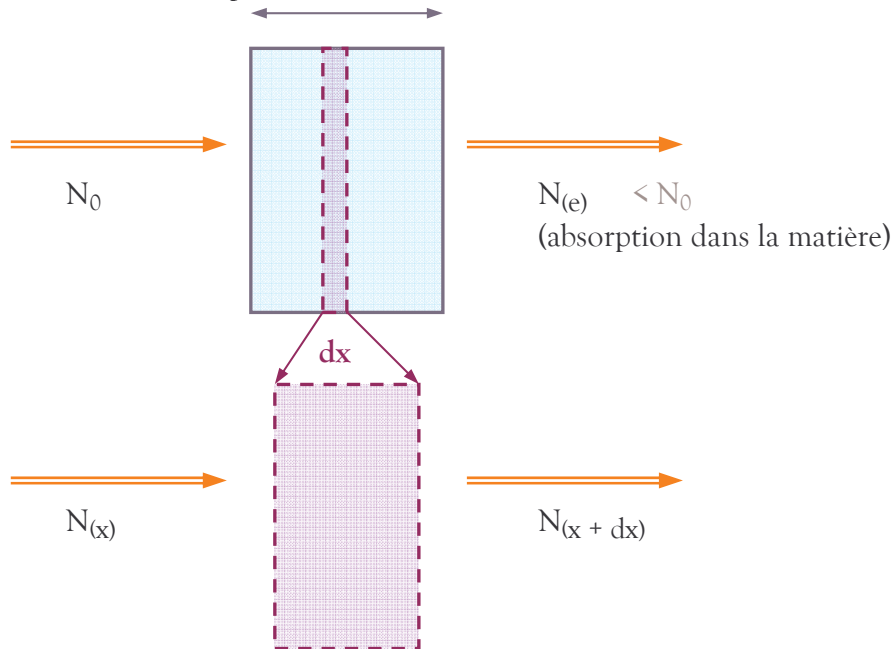
Les particules neutres :

Neutrons → Interaction nucléaire (probabilité très faible)

Photons → Interaction électromagnétique avec les électrons mais non coulombienne.

❖ Interactions photon – matière :

Soit un matériau d'une épaisseur e



$$dN = N_{(x + dx)} - N_{(x)} \quad (dN \text{ est négatif})$$

Soit μ , la probabilité d'interaction d'un photon par unité de longueur de matériau traversé :

$$dN = - \mu \cdot dx \cdot N(x)$$

On prend un dx tendant vers 0, permettant un calcul infinitésimal. On obtient alors une équation différentielle du 1^{er} ordre :

$$dN/dx + \mu \cdot N(x) = 0$$

$$dN/N(x) = - \mu \cdot dx$$

$$\rightarrow \int dN / N(x) = \int -\mu \cdot dx$$

$$\ln(N) = -\mu \cdot x + C$$

$$N = \exp(-\mu \cdot x + C)$$

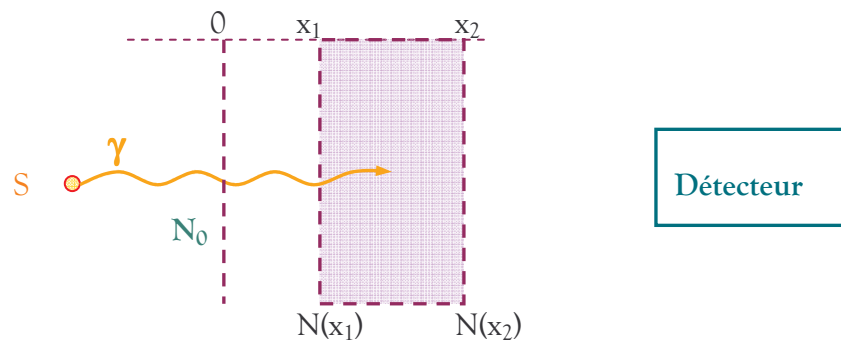
$$N = \exp(C) \cdot \exp(-\mu \cdot x)$$

Détermination de $\exp(C)$: Avec les conditions initiales : $N(0) = N_0$

$$N(0) = \exp(C) \cdot \exp(0)$$

$$N(0) = \exp(C)$$

$$\Rightarrow N(e) = N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot e)$$

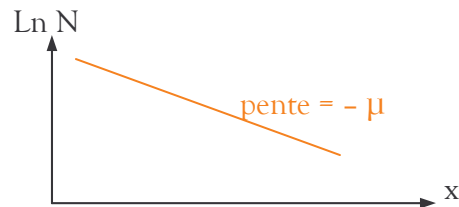


$$N(x_1) = N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_1)$$

$$N(x_2) = N_0 \cdot \exp(-\mu \cdot x_2)$$

$$\ln N(x_1) = -\mu \cdot x_1 + \ln N_0$$

$$\ln N(x_2) = -\mu \cdot x_2 + \ln N_0$$



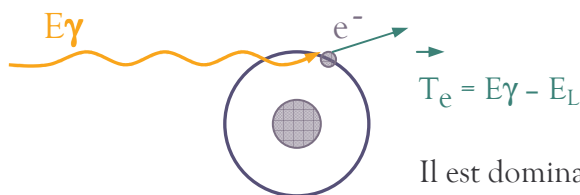
Qu'est-ce que μ ?

Il s'agit du processus d'interaction des photons dans la matière.

3 Processus :

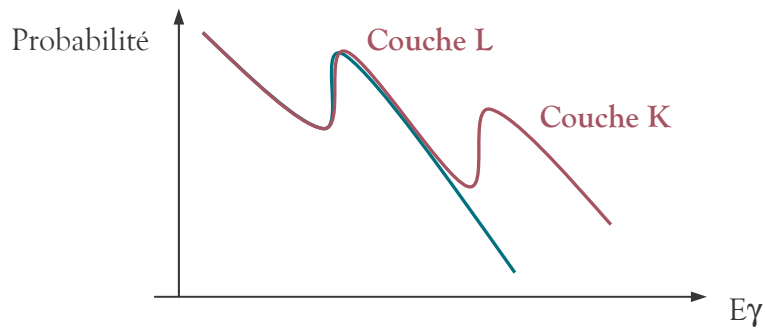
- Effet photo-électrique,
- Effet Compton,
- Matérialisation (= création de paires e^- ; e^+)

➤ Effet photo-électrique :

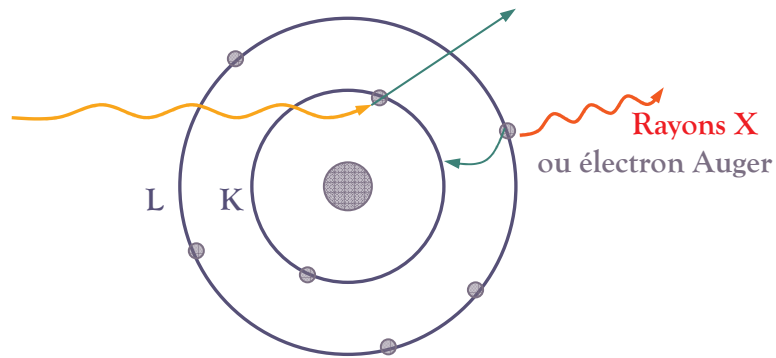


Il est dominant à basse énergie : $E\gamma$ inférieur à 500 keV.

Il s'agit d'un processus à seuil : $E\gamma > E_L$

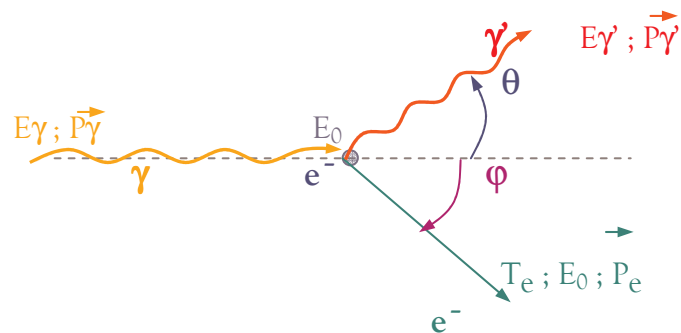


De plus, il y a une réorganisation du cortège électronique :



➤ Effet Compton :

Il est dominant pour $E_\gamma \approx 1 \text{ MeV}$. On parle de diffusion :
Il est basé sur la conservation de l'énergie et d'impulsion.



$$E_0 = m_e \cdot c^2$$

$$E_\gamma = P_\gamma \cdot c$$

Équation de la relativité : $E_{\text{TOTALE}}^2 = P_e^2 \cdot c^2 + E_0^2$

$$(E_0 + T)^2 = E_0^2 + T^2 + 2 W_{0T} \quad \rightarrow \quad \cancel{E_0^2} + T^2 + 2 E_0 T = P_e^2 \cdot c^2 + \cancel{E_0^2}$$

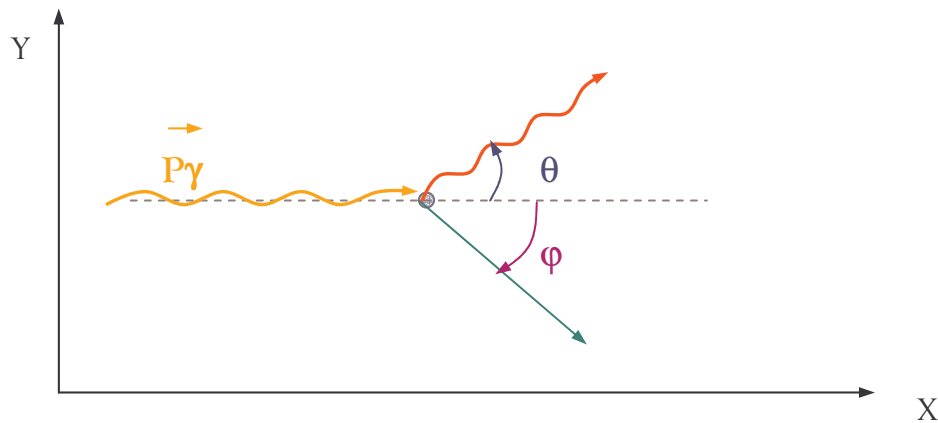
$$\rightarrow P_e^2 \cdot c^2 = T^2 + 2 E_0 T$$

Conservation de E_{TOTALE} : $E\gamma + E_0 = E\gamma' + E_0 + T_e$

$E\gamma = E\gamma' + T_e$

Il s'agit de la conservation d'énergie classique que l'on retrouve dans toute diffusion élastique.

Conservation de P : $P\gamma = P\gamma' + P_e$



Projections sur les axes: $x: P\gamma = P\gamma' \cdot \cos\theta + P_e \cdot \cos\phi$

$y: 0 = P\gamma' \cdot \sin\theta - P_e \cdot \sin\phi$

Mais on a plusieurs inconnues : $E\gamma'$; T_e ; θ ; ϕ

$\rightarrow E\gamma'$ est fonction de $E\gamma$ et de θ .

$$P_e^2 = (P\gamma - P\gamma' \cdot \cos\theta)^2 + (P\gamma' \cdot \sin\theta)^2$$

$$= P\gamma^2 + P\gamma'^2 \cdot \cos^2\theta - 2 \cdot P\gamma \cdot P\gamma' \cdot \cos\theta + P\gamma'^2 \cdot \sin^2\theta$$

$$P_e^2 = P\gamma^2 + P\gamma'^2 - 2 \cdot P\gamma \cdot P\gamma' \cdot \cos\theta$$

$$P_e^2 \cdot c^2 = P\gamma^2 \cdot c^2 + P\gamma'^2 \cdot c^2 - 2 \cdot P\gamma \cdot c^2 \cdot P\gamma' \cdot c^2 \cdot \cos\theta$$

$$E\gamma'^2 = P\gamma^2 \cdot P\gamma'^2 + m_0^2 \cdot c^4$$

Pour un photon: $E\gamma = P\gamma \cdot c$

Pour un électron: $E_e^2 = P_e^2 \cdot c^2 + m_0^2 \cdot c^4 = (m_0 \cdot c^2 + T_e)^2$

$$= m_0^2 \cdot c^4 + T_e^2 + 2 \cdot T_e \cdot m_0 \cdot c^2$$

$$P_e^2 \cdot c^2 = T_e \cdot (T_e + 2.m_0.c^2)$$

$$= P\gamma^2 \cdot c^2 + P\gamma'^2 \cdot c^2 - 2 \cdot P\gamma \cdot c^2 \cdot P\gamma' \cdot c^2 \cdot \cos\theta$$

$$T_e \cdot (T_e + 2.m_0.c^2) = E\gamma^2 + E\gamma'^2 - 2 \cdot E\gamma \cdot E\gamma' \cdot \cos\theta$$

$$= (E\gamma - E\gamma') (E\gamma - E\gamma' + 2.m_0.c^2)$$

$$= E\gamma^2 - E\gamma.E\gamma' + 2.E\gamma.m_0.c^2 - E\gamma.E\gamma' + E\gamma'^2 - 2.E\gamma'.m_0.c^2$$

$$\underbrace{- 2.E\gamma.E\gamma' \cdot \cos\theta}_{2.E\gamma.E\gamma' \cdot (1-\cos\theta)} = -2.E\gamma.E\gamma' + (E\gamma - E\gamma').2.m_0.c^2$$

$$2.E\gamma.E\gamma' \cdot (1-\cos\theta) = (E\gamma - E\gamma') \cdot 2.m_0.c^2$$

$$\left[1/(m_0.c^2) \right] \cdot (1-\cos\theta) = (E\gamma - E\gamma') / (E\gamma.E\gamma')$$

$$= (E\gamma) / (E\gamma.E\gamma') - (E\gamma') / (E\gamma.E\gamma')$$

$$1/(m_0.c^2) \cdot (1-\cos\theta) = 1/E\gamma' - 1/E\gamma$$

Si $\theta = 0$:



$$1/E\gamma' - 1/E\gamma = 0 \quad \rightarrow \quad E\gamma' = E\gamma$$

$$\text{Et comme : } E\gamma = E\gamma' + T_e \quad \text{Alors : } T_e = 0$$

Si $\theta = 180$:



→ Il s'agit d'un cas limite.

$$1/E\gamma' - 1/E\gamma = 2/511 \quad m_0c^2 = 511 \text{ keV} \quad (1-\cos\theta) = 2$$

$$\text{Et comme : } E\gamma = E\gamma' + T_e \quad \text{Alors : } T_e = E\gamma - E\gamma'$$

Exemple :

$$^{137}\text{Cs} \rightarrow E = 662 \text{ keV}$$

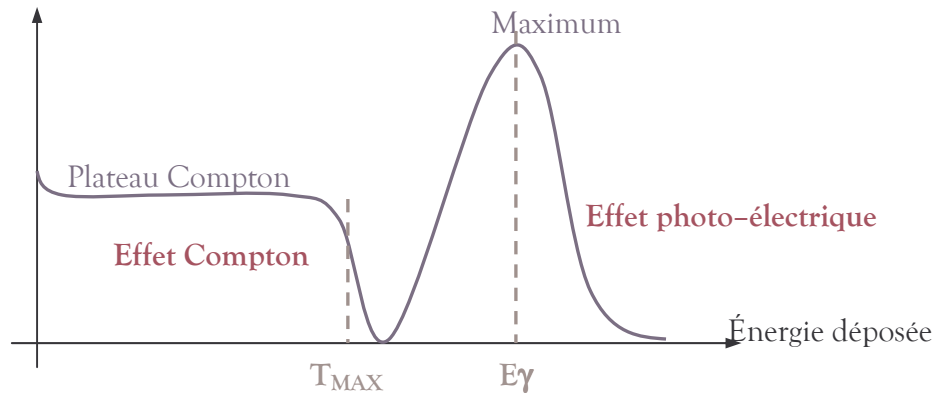
$$\text{Effet photo-électrique : } E = E_L + T_e \rightarrow E_{\text{TRANSFÉRÉE AU MILIEU}}$$

$$\text{Effet Compton : } E_{\text{TRANSFÉRÉE À L'ÉLECTRON}} \text{ va de } T=0 \text{ à } T_{\text{MAX}}$$

$$1/E\gamma' - 1/662 = 2/511 \quad \rightarrow \quad E\gamma' = 185 \text{ keV} \quad E\gamma = E\gamma' + T_e$$

(→ Max de l'énergie transférée par le photon)

$$\rightarrow T_{\text{MAX}} = 478 \text{ keV}$$



$$1/E_\gamma' - 1/E_\gamma = 1/(m_0 \cdot c^2) \cdot (1 - \cos\theta) = (1 - \cos\theta)/511$$

Cas de E_γ très grand :

$$E_\gamma \gg 511 \text{ keV}$$

$$\begin{aligned} 1/E_\gamma &\ll 1/511 & \text{Donc :} & & 1/E_\gamma' &\approx (1 - \cos\theta)/511 \\ E_\gamma' &\approx 511 \text{ keV} \end{aligned}$$

$$\rightarrow T_e = E_\gamma - E_\gamma' \approx E_\gamma$$

Par effet Compton, si l'énergie du photon est grande, ce photon transmet une grande énergie $T_e \cong E_\gamma$ dans la matière.

Cas de E_γ très petit :

$$E_\gamma \ll 511 \text{ keV}$$

$$\begin{aligned} 1/E_\gamma &\gg 1/511 & \text{Donc :} & & 1/E_\gamma' &\approx 1/E_\gamma \\ \rightarrow E_\gamma' &\approx E_\gamma \end{aligned}$$

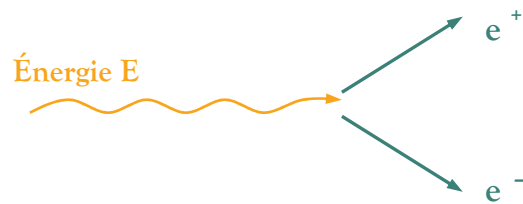
Si $E_\gamma \ll 511 \text{ keV}$, Alors, il y a diffusion :



L'électron a une énergie bien supérieure à celle du photon. Il ne bouge pas (ou peu) lors du choc et le photon est diffusé.

➤ Matérialisation :

La masse peut être transformée en énergie. Le sens inverse est aussi possible. On suppose que c'est ce qui s'est passé lors du Big-Bang.

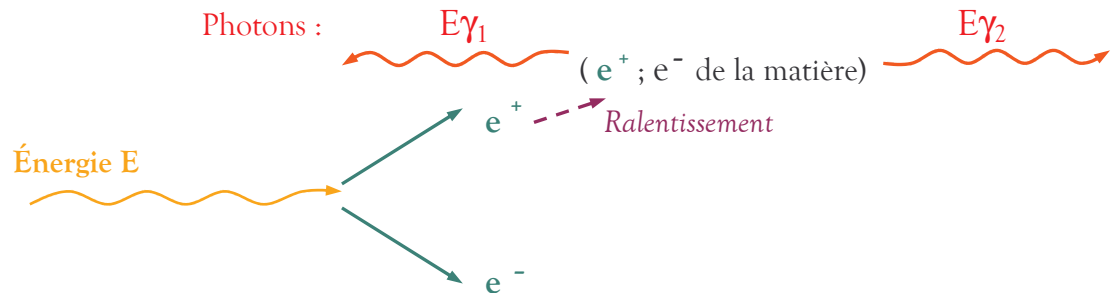


$$E = m_{e^-} \cdot c^2 + m_{e^+} \cdot c^2 + T_{e^-} + T_{e^+}$$

$$= 2 m_e \cdot c^2 + T_{e^-} + T_{e^+}$$

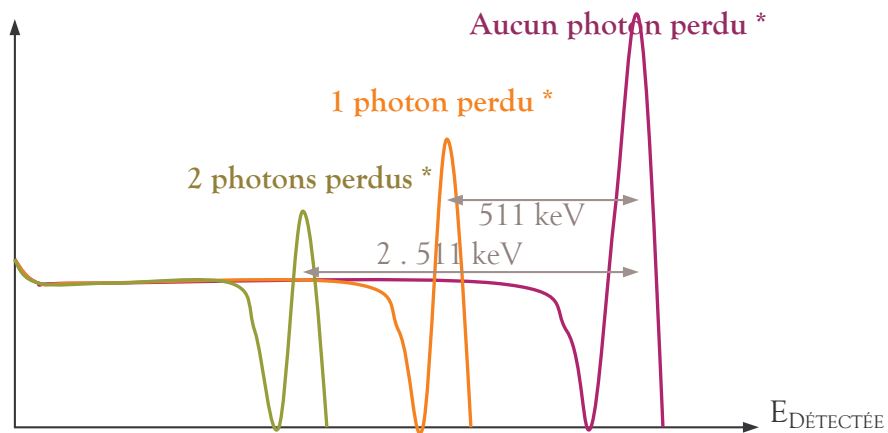
$$E > 2 m_e \cdot c^2 \\ = 1,022 \text{ MeV}$$

Cet effet est dit « à seuil » : il faut au minimum d' 1,022 MeV d'énergie



$$E_{\text{DÉTECTÉE}} = T_{e^-} + T_{e^+} \\ = E - 2 \cdot 511 \text{ keV}$$

$N(E_D) = N$ fois que l'on détecte telle énergie



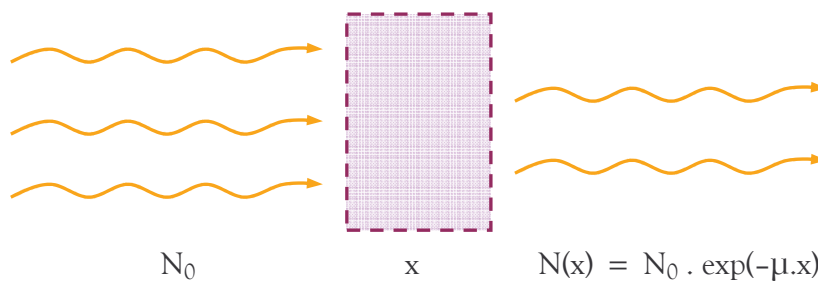
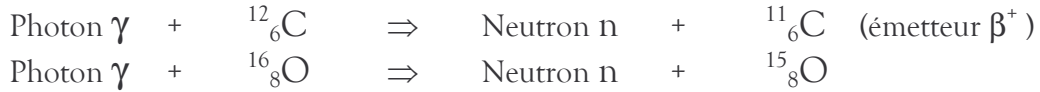
* : dans le détecteur.

➤ Réaction nucléaire :

Il s'agit d'interactions photon - noyau mais elles sont marginales (rares)



Par exemple : les atomes de Carbone et d'Oxygène :



$\mu =$ μ_{PE} : la probabilité d'interaction par effet photo-électrique,
+ μ_{C} : la probabilité d'interaction par effet Compton,
+ μ_{MAT} : la probabilité d'interaction par matérialisation,
+ μ_{NUCL} : la probabilité d'interaction nucléaire (négligeable)

➤ Évolution des probabilités :

▪ Évolution de la probabilité d'interaction par effet Compton :

Les interactions par effet Compton (et donc leur probabilité) augmentent avec la densité du matériau.

On rappelle qu'il s'agit de réactions avec les électrons de la matière et que la densité augmente avec le nombre d'atomes dans le matériau.

La probabilité d'interactions par effet Compton diminue quand l'énergie augmente.

μ_{C} est proportionnelle à $1/E$

▪ Évolution de la probabilité d'interaction par effet photo-électrique :

Les interactions par effet photo-électrique (et donc leur probabilité) dépendent de la densité du matériau, de l'énergie et de la charge Z des éléments.

On rappelle qu'il s'agit de réactions avec les électrons de la matière et que la densité augmente avec le nombre d'atomes dans le matériau.

La probabilité d'interactions par effet photo-électrique diminue quand l'énergie augmente.

$$\mu_{EP} \text{ est proportionnelle à } \frac{\text{Densité} \cdot (\text{charge } Z \text{ des éléments})^3}{\text{Énergie } E^2}$$

C'est-à-dire :

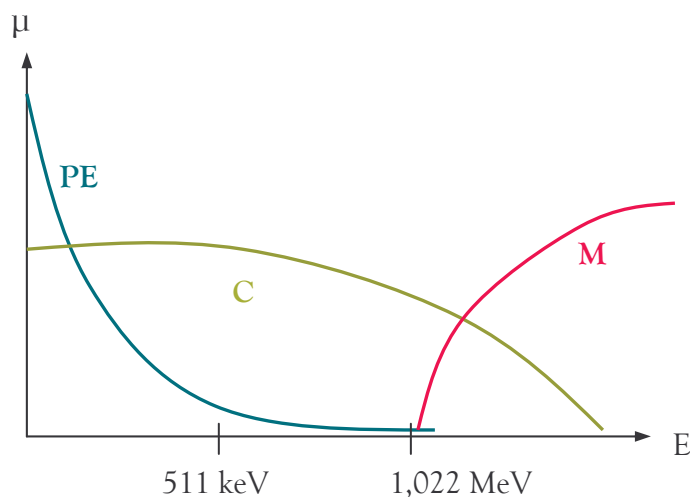
- $\mu_{EP} \nearrow$ avec $\nearrow$ de la densité,
- $\mu_{EP} \nearrow \nearrow \nearrow$ avec $\nearrow$ de la charge Z des éléments,
- $\mu_{EP} \searrow \searrow$ avec $\nearrow$ de l'énergie,

▪ Évolution de la probabilité d'interaction par matérialisation :

Il s'agit d'interactions à effet seuil : leur probabilité est nulle pour une énergie inférieure ou égale à 1,022 MeV.

La probabilité d'interaction par matérialisation augmente avec l'énergie, avec la charge Z des éléments et avec la densité.

▪ La courbe d'évolution est pour un matériau donné (charge et densité données) :



- À basse énergie, bien inférieure à 511 keV :
→ Il y a une dominance de l'effet photo-électrique.
- À moyenne énergie, aux alentours de 511 keV :
→ Il y a une dominance de l'effet Compton.
- À haute énergie, supérieure à 1,022 MeV :
→ Il y a une dominance de la matérialisation.

et non une exclusivité !

Pour un matériau, on détermine sa densité, et son épaisseur moiitié. Elle est l'épaisseur pour laquelle N_0 est diminué de moitié et on la calcule par : $\log(2) / \mu$.

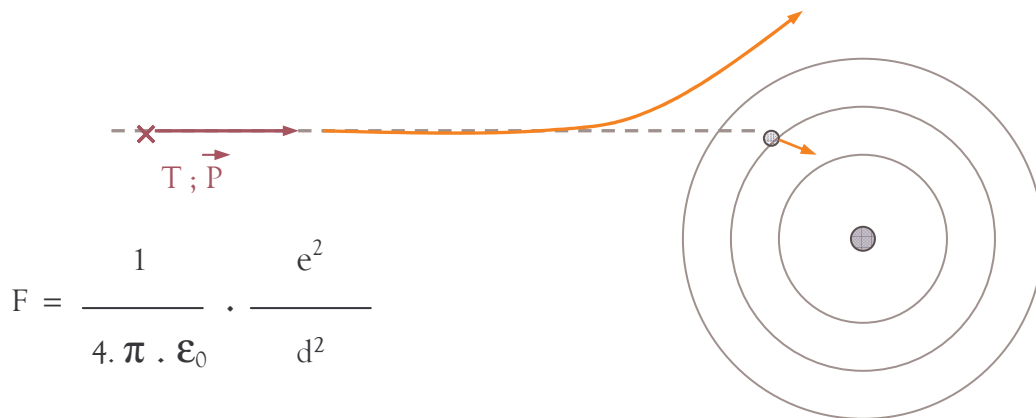
❖ Interactions particules chargées – matière :

- Électrons (les plus importants car ils sont mis en mouvement à chaque fois qu'il y a une interaction avec des photons)
- Protons,
- Les particules alpha,
- Les ions lourds.

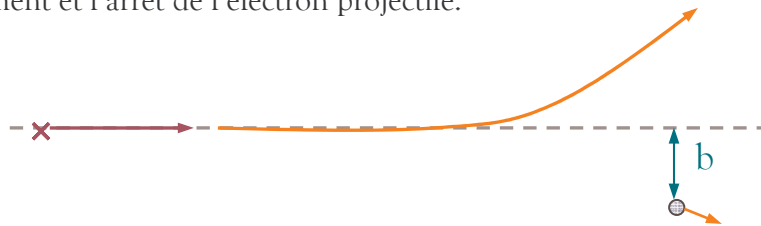
➤ Interactions électrons – matière :

▪ Collision :

Il s'agit d'une interaction coulombienne entre un électron « projectile » (en mouvement) et un électron « cible » (de la matière)



Cette interaction est répétée avec d'autres atomes et leur cortège électronique jusqu'au ralentissement et l'arrêt de l'électron projectile.



Le paramètre b correspond à la distance des 2 particules s'il n'y avait pas de déviation. Des échanges d'énergie y sont associés (dans les cas limites) :

$b :$	0	∞
$\Delta T :$	troponine	0
Probabilité :	0	∞

Toute l'énergie est transférée de l'électron projectile à l'électron cible. L'électron projectile est juste en face de l'électron (assimilable au carreau dans la pétanque)

La probabilité est importante de croiser un électron à une grande distance dans la matière.

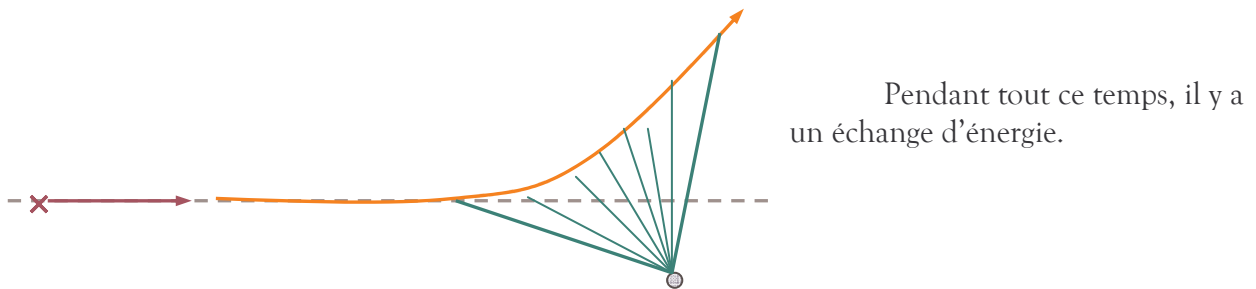
Les échanges sont plus souvent de faible quantité d'énergie avec parfois un échange de forte quantité.

- Le pouvoir d'arrêt par collision :

Il est noté S_C et exprimé en MeV.cm^{-1} . Il signifie la perte d'énergie par cm de matière traversée.

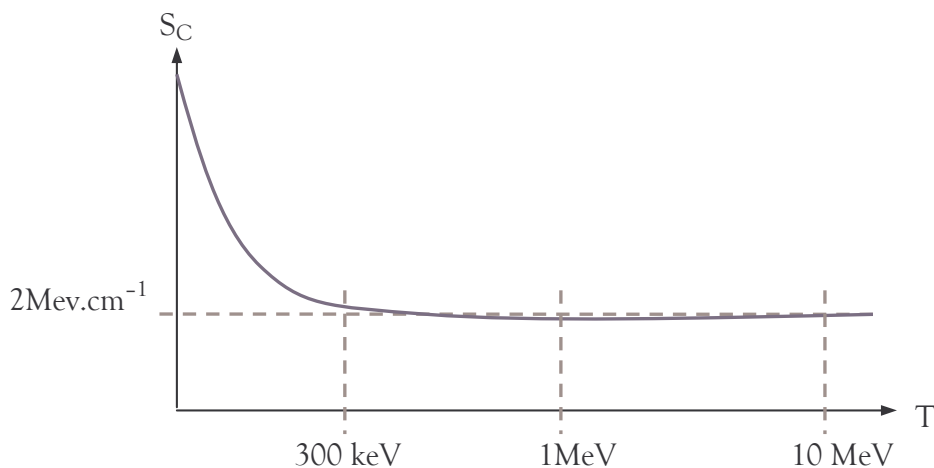
$$S_C / \rho \text{ (densité)} \quad \text{en } (\text{MeV.cm}^{-1})/(\text{g.cm}^{-3}) = \text{en } \text{MeV.cm}^{+2} \cdot \text{g}^{-1}$$

S_C dépend du matériau (ce qui est évident puisqu'il dépend de la densité d'électrons dans la matière) et de l'énergie cinétique T des électrons projectiles.



Si l'énergie cinétique T de l'électron projectile augmente, alors sa vitesse augmente. Donc ce dernier « voit » (= interagit) moins longtemps avec l'électron cible, et donc il y a moins d'énergie transférée.

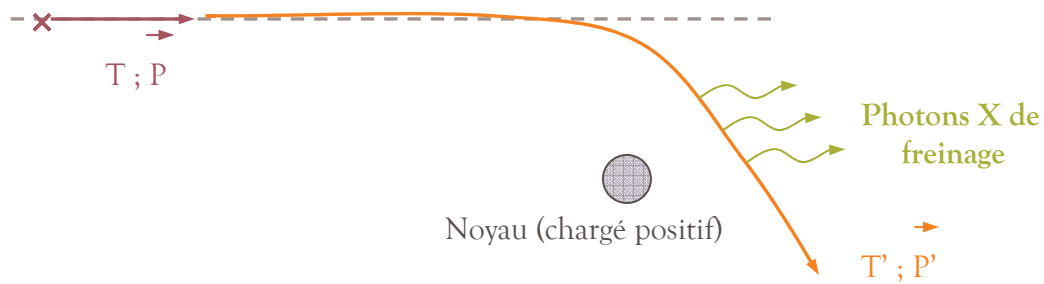
Exemple de l'eau :



À partir de 300 keV d'énergie cinétique, il n'y a plus que 2 MeV de transférés par cm.

- Freinage :

Il s'agit d'une interaction entre un électron « projectile » (en mouvement) et un noyau de la matière. C'est un phénomène plus rare mais inévitable.



Le transfert d'énergie au noyau : $\Delta T = T - T'$

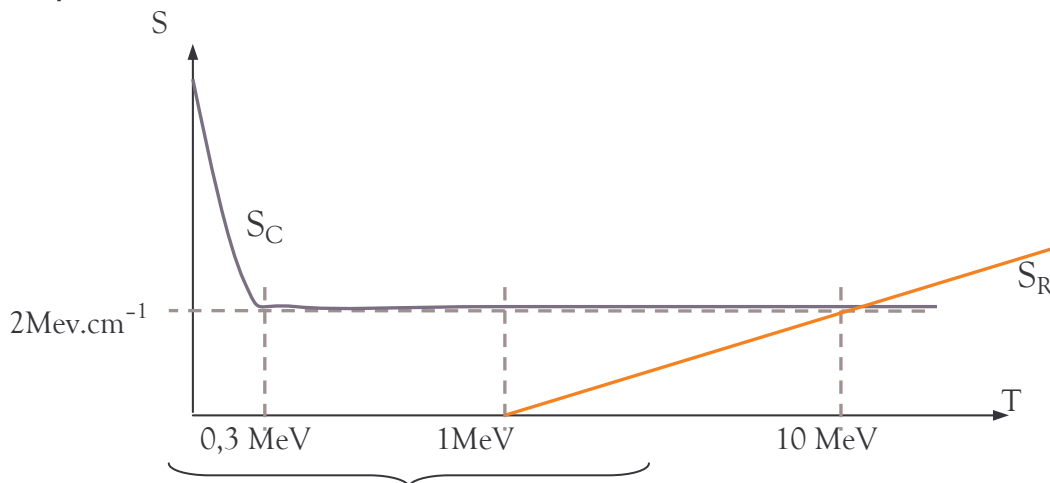
L'énergie perdue par l'électron ne peut être transmise au noyau qui est trop gros pour être déplacé par gain d'énergie cinétique (sa masse est 2 000 fois plus importante que celle de l'électron)

Une perte d'énergie se fait sous forme de rayonnement de freinage.

- Le pouvoir d'arrêt par freinage :

Il est noté $S_R = \Delta T / \Delta x$, exprimé en $\text{MeV} \cdot \text{cm}^{-1}$.

S_R / ρ (densité) en $\text{MeV} \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$



La collision est le phénomène le plus importante pour une énergie moyenne et un matériau léger.

(énergie très importante pour un électron)

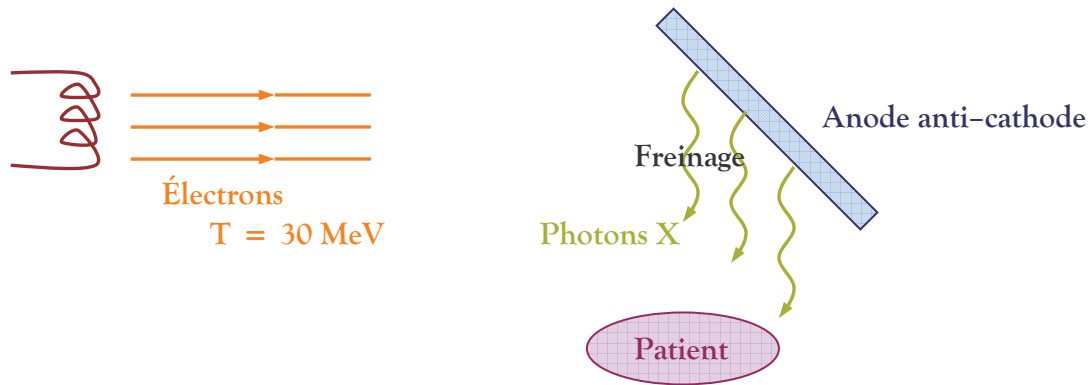
Application :

En radiothérapie, on utilisait (et on utilise encore dans certains cas) le Cobalt 60 qui émet des photons gammas de 1,17 et 1,33 MeV.

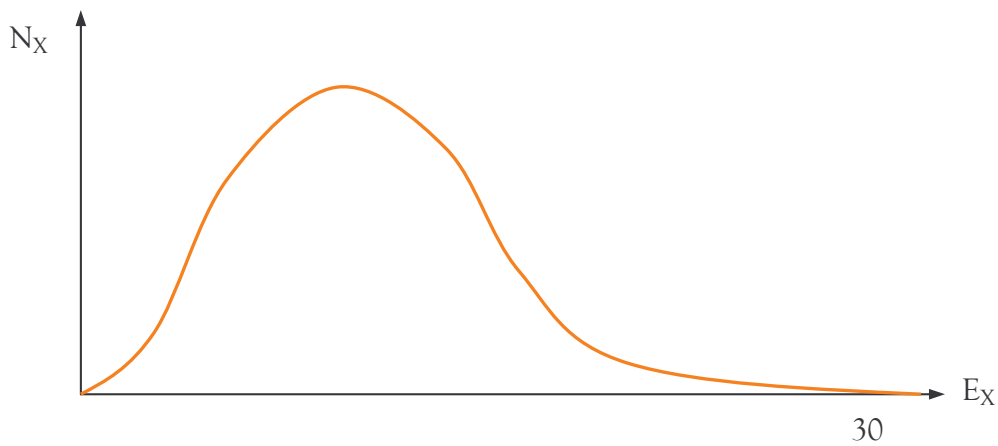
Maintenant, on utilise des photons X de 15 à 25 MeV.

On les fabrique à l'aide d'un accélérateur d'électrons à haute énergie par attraction de ces électrons vers une anode portée à un potentiel de $30 \cdot 10^6$ Volts (= 30 MV)

L'avantage est qu'avec 2 boutons on règle l'énergie et la quantité des photons.



Quand il s'agit de tissus biologiques, on peut les assimiler à de l'eau.



Le seuil d'énergie transférée par collision est de 2 MeV.cm^{-1} . Le freinage (interaction avec un noyau) est peu important en dessous de quelques MeV ; mais il devient important avec une grande énergie et des matériaux lourds.

▪ Notion de dégâts occasionnés :

On évalue le nombre d'ionisations et d'excitations.

L'énergie moyenne nécessaire pour ionisation (= arracher un électron) d'une molécule est de 16 eV. Mais il y a aussi un changement d'énergie des électrons (= excitation) et des effets thermiques qui consomment aussi 16 eV.

Il faut réellement donc 32 eV, en moyenne, pour ioniser une molécule d'eau.

$$\begin{aligned} 2 \text{ MeV.cm}^{-1} &= \Delta T / \Delta x = 2\,000\,000 \text{ eV.cm}^{-1} \text{ perdus} \\ &= 200\,000 \text{ eV.mm}^{-1} \text{ perdus} \end{aligned}$$

$$\text{Nombre d'ionisations par millimètre de tissus traversé} = 200\,000 / 32 = 6\,250$$

Si l'on compare ce nombre avec le nombre total de molécule d'eau dans 1 mm, il y a le nombre d'Avogadro qui va intervenir quelque part dans la formule ($N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$) permettant de relativiser ces 6 250 ionisations.

▪ Parcours des électrons dans la matière :

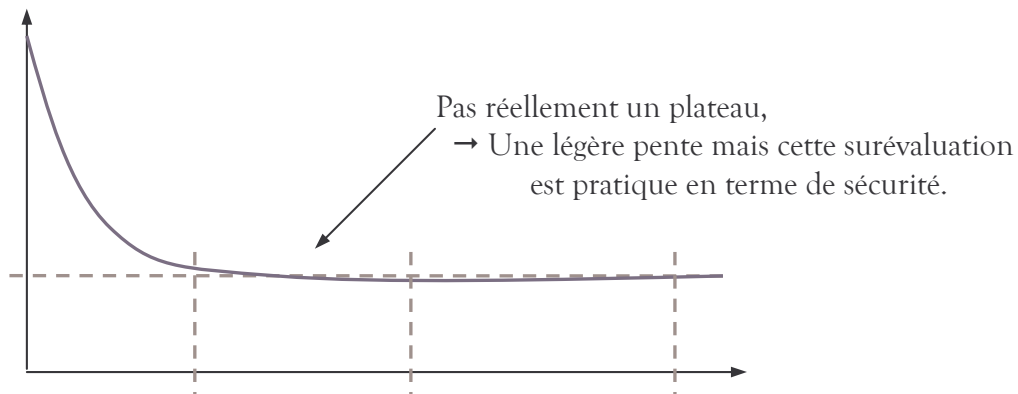
Pour des électrons dont l'énergie cinétique T est supérieure à 300 KeV, le pouvoir d'arrêt par collision est de 2 MeV.cm^{-1} .

→ *Quelle est l'épaisseur d'enfoncement (de pénétration) des électrons dans la matière ?*

$$\Delta x = \Delta T / S_C$$

Soit la distance parcourue par les électrons dans la matière : R (Range) $\approx \Delta T / S_C$

Et pour un arrêt total : $\Delta T = T$ $R = T / S_C$



Énergie de l'électron T :	2 MeV	5 MeV	10 MeV
Parcours pour un arrêt total dans l'eau :	1 cm	2,5 cm	5 cm

C'est un peu moins : ce sont des ordres de grandeur, mais on reste encore raisonnable dans les arrondis. Voilà des valeurs plus détaillées :

Matériau	Énergie (en MeV)	$\Delta T / \Delta x$ collision (en $10^{-3} \text{ MeV.cm}^{-1}$)	$\Delta T / \Delta x$ freinage (en MeV.cm^{-1})	Parcours R
Aluminium $\rho = 2,7 \text{ g.cm}^{-1}$	0,5	1,58	$1,83 \cdot 10^{-5}$	0,83 mm
	5	1,66	$1,29 \cdot 10^{-4}$	11,4 mm
	10	1,638	$2,82 \cdot 10^{-4}$	21,4 mm
Air $\rho = 1,29 \text{ mg.cm}^{-1}$	1	1,657	$1,76 \cdot 10^{-5}$	3,8 m
	5	1,83	$8,12 \cdot 10^{-5}$	22 m
	10	1,97	$1,78 \cdot 10^{-4}$	40 m
Eau $\rho = 1 \text{ g.cm}^{-1}$	1	18,7	$1,76 \cdot 10^{-5}$	0,43 cm
	5	19,4	$8,20 \cdot 10^{-5}$	2,50 cm
	10	20,3	$1,80 \cdot 10^{-4}$	4,80 cm

➤ Interactions des autres particules chargées avec la matière :

Dans tous les cas, il y a une force de frottement.

Pour la collision, il y a une force de Coulomb :

$$F_E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{d^2}$$

Z : la charge de la particule incidente (= projectile)

Pour un électron :

$$F_E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{d^2}$$

Pour une particule α ou un ion :

$$F_E = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{Z \cdot e^2}{d^2}$$

Pour expliquer les pertes d'énergie, on utilise la formule de Bethe :

Force de frottement :

$$-dE/dx = \frac{4 \cdot \pi \cdot z^2 \cdot e^2}{m_e \cdot v^2} \cdot n^\square \cdot Z \left(\ln \frac{2 \cdot m_e \cdot v^2}{I} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right)$$

$\beta = v/c$: vitesse de la particule,

z : charge de la particule incidente,

$n^\square$: noyaux d'atomes cibles par unité de volume,

Z : charge des atomes cibles,

I : potentiel de ionisation.

Cette force de frottement va varier selon z^2/v^2 . De toute apparence, il n'y a pas de variation selon la masse. Donc on aperçoit un parcours à peu près identique pour un électron que pour un proton.

À peu près, mais pas réellement...

→ On sait que la vitesse a une influence et qu'elle est en relation avec l'énergie transférée et donc avec la masse.

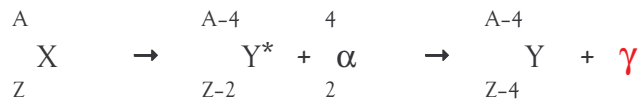
Quelques chiffres :

Particules :	Énergie (en MeV)	Vitesse (en cm.s ⁻¹)		Parcours R (en μm)	
		Dans l'eau	Dans l'air	Dans l'eau	Dans l'air
Électron	10 ⁻²	5,8		2,15	
	1	28,23	28,23	4 300	3,8 . 10 ⁶
	5	29,87	29,87	25 00	21,9 . 10 ⁶
	10	29,96	29,96	48 00 (~ 5 cm)	40 . 10 ⁶
Proton	1	1,39		21,6	
	5	3,1		350	
	10	4,39		1 220	
Particule α	1	0,69	0,69	6,8	6,9 . 10 ³
	5	1,55	1,55	33,2	34 . 10 ³
	10	2,19	2,19	103,3 (~ 0,1 mm)	102 . 10 ³ (~ 10 cm)

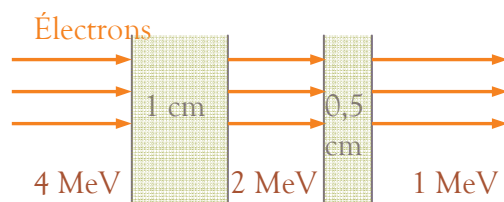
Pour des vitesses similaires, on obtient des parcours comparables.

Pourtant, la charge d'un proton est $z=1$ et celle d'une particule α est $z=2$; mais il y a une compensation du fait que la masse du proton est moins importante que celle de la particule α .

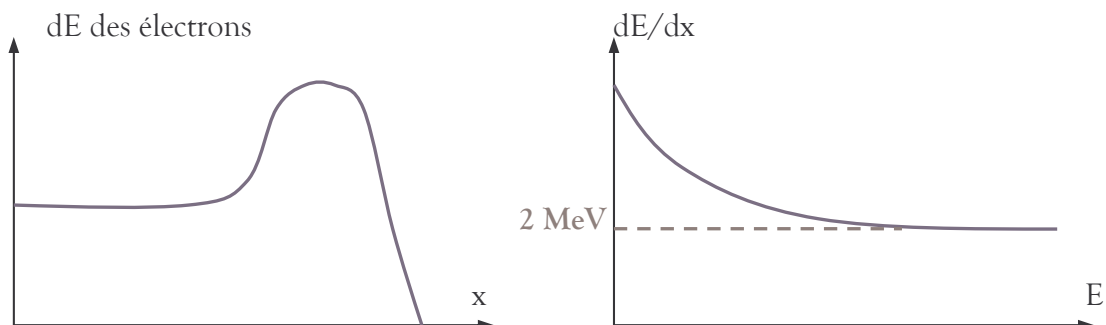
À 1 m d'une source d' α , je ne devrais pas avoir de problème. En effet, je ne risque rien du rayonnement α à partir de 10 cm de parcours dans l'air ; mais pour la plus part des cas :



Et les rayons γ sont bien plus nocifs. On se trouve dans la même situation avec les électrons de 5 MeV.



Plus ils traversent des tissus, plus ils déposent de l'énergie car $S_C > 2$ MeV quand $T_e < 300$ keV



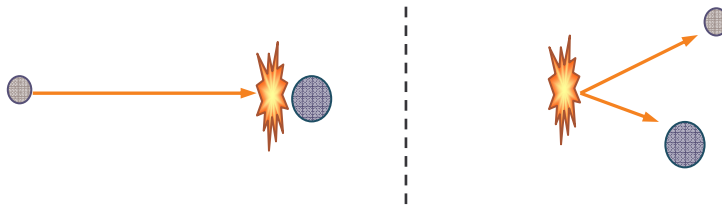
➤ Interactions des neutrons avec la matière :

Ce sont des particules particulières : elles sont non chargées, mais elles ont une masse. Elles sont régies par une probabilité d'interaction (parce qu'elles sont neutres)

Il y a 2 modes d'interaction : la collision (ou diffusion) et la capture des neutrons par des noyaux (la radioprotection se fait en 2 étapes : les neutrons sont ralentis puis capturés)

▪ Collision et ralentissement :

Il s'agit d'interaction entre des neutrons et les noyaux de la matière. Il y a transmission d'énergie du neutron au noyau :



Quel est le matériau le plus efficace ?

→ l'Hydrogène.

Un neutron de 2 MeV va transmettre toute son énergie avec :

- 19 collisions dans de l'Hydrogène,
- 519 collisions dans du Fer.

▪ Capture :

Quelques exemples :

${}_3^6\text{n} + {}_3^6\text{Li} \rightarrow {}_3^7\text{Li}$	${}_0^1\text{n} + {}_5^{10}\text{B} \rightarrow {}_2^4\alpha + {}_3^7\text{Li}$
$\text{n} + {}_{48}^{113}\text{Cd} \rightarrow {}_{48}^{114}\text{Cd} + \gamma$	$\text{n} + {}_{64}^{158}\text{Gd} \rightarrow {}_{64}^{159}\text{Gd} + \gamma$

Pour les particules chargées :

Il y a des interactions directes avec une pénétration donnée dans le matériau et on parle de **parcours** pour exprimer la profondeur traversée (toutes les particules sont arrêtées à une distance précise, le parcours)

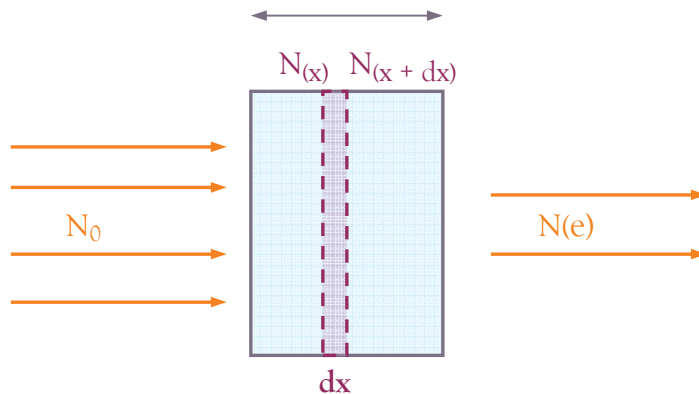
Pour les particules neutres et les photons :

Il y a des interactions indirectes avec une traversée du matériau et on parle **d'atténuation du faisceau** qui est due à une probabilité d'interaction des particules dans le matériau.

Elle est caractérisée par une épaisseur moitié (où le faisceau a été atténué d'un facteur 2)

Atténuation du faisceau :

Soit un matériau d'une épaisseur e



Soit μ , la probabilité d'interaction d'un photon par l'unité de longueur :

$$dN / N(x) = - \mu \cdot dx$$

$$N(x) = N_0 \cdot \exp(- \mu \cdot x)$$

$$N(x_{1/2}) = N_0 / 2 \qquad x_{1/2} = \ln(2) / \mu$$

Le générateur de rayons (= photons) X :

C'est un accélérateur d'électrons qui vont interagir avec les noyaux de l'anode (= freinage)

Il présente un rendement du photon inférieur à 1 % de l'énergie fournie.

Dosimétrie

❖ Grandeurs et unités utilisées en radioprotection :

L'objectif de la radioprotection est l'évaluation quantitative des risques pris devant une source radioactive.

Il y a un problème d'unités : rem, rad, sievert...

Qu'est-ce que c'est que ces bêtes là ?

→ La traduction en MKSA est incontournable.

Autrement dit : ☺

Que représentent ces différentes unités ?

➤ Grandeurs liées à la source :

▪ Nombre de particules ou de photons :

- Si la source de rayonnement est un générateur de rayons X, alors il est plus intéressant de connaître le nombre de photons X produits. Ce nombre est donné par les caractéristiques de la machine (paramètres contrôlables et contrôlés : le courant, la tension et le filtre)
- Si la source est radioactive, il est plus intéressant de connaître l'activité (= le nombre de désintégrations par seconde) de cette source.

$$N(t) = N_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

$N(t)$: le nombre de noyaux radioactifs,

λ : la probabilité de désintégration

Et on a comme paramètre le temps, car le rayonnement d'une source n'est pas constant (pas linéaire) dans le temps.

Une désintégration correspond à l'émission d'éléments : α , β ou γ .

$$A(t) = A_0 \cdot \exp(-\lambda \cdot t)$$

Pour un noyau donné, on connaît le nombre de désintégrations (relation entre N et A)

$$\begin{aligned} [A] &= \text{Becquerel (Bq)} = 1 \text{ désintégration par seconde} \\ &= \text{Curie (Ci)} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ désintégrations par seconde} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} \\ &\quad (\text{échelle plus pratique}) \end{aligned}$$

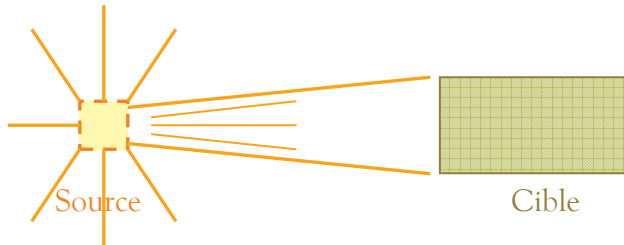
On définit aussi la période $T_{1/2}$ qui correspond au temps au bout duquel la moitié des noyaux se sont désintégrés.

$$T_{1/2} = \ln(2) / \lambda$$

▪ Énergie des rayonnements :

En MKSA, l'énergie s'exprime en Joules ; mais on utilise une autre échelle : l'électronvolt (eV, keV, MeV voire GeV)

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



On prend en compte le flux : $\Phi = dN/dS$
 = Fluence de particule (ou fluence particulaire)
 = Nombre de particules par unité de surface.

On prend aussi en compte le temps et on obtient :

$$\text{Le débit de flux : } \Phi^o = d\Phi/dt = d^2N/(dS \cdot dt)$$

= Nombre de particules par unité de surface et par unité de temps.

Fluence énergétique :

$$F = dE/dS = \text{Énergie par unité de surface.}$$

$$\text{Débit de flux énergétique : } F^o = dF/dt = d^2E/(dS \cdot dt)$$

= Énergie par unité de surface et par unité de temps.

➤ Grandeurs liées au milieu irradié :

▪ Notion de dose :

On peut lire sur un médicament : « Ne pas dépasser la dose prescrite »

→ *Mais qu'est-ce que cette dose ?*

Définition médicale et pharmaceutique : La quantité « dose » est la quantité d'un agent chimique qui produit un effet donné.

La quantité prise au-delà de cette dose peut produire des effets secondaires indésirables. La dose est définie en fonction de l'âge (ce qui cache en réalité la masse de l'individu)

Pour le rayonnement : La dose est la quantité d'énergie déposée (qui a un effet ionisant) par unité de masse. Elle est exprimée en $\text{Joules} \cdot \text{kg}^{-1}$ qui correspondent à des Grays, Gy (unité MKSA) Mais on utilise aussi les rads : $1 \text{ rad} = 10^{-2} \text{ Gy}$

$$D = E_{\text{DÉPOSÉE}} / \text{Masse}$$

→ *Comment fait-on pour définir les doses ?*

On a commencé à les définir par l'observation des effets immédiatement mesurables.
Par exemple : on administre différentes quantités de poison et on observe les effets.

*Quand l'individu commence à vaciller et claquer,
c'est que l'on a dépassé la dose vitale... ☹*

Dans ce sens, un médicament est un poison : tout est une question de dosage.

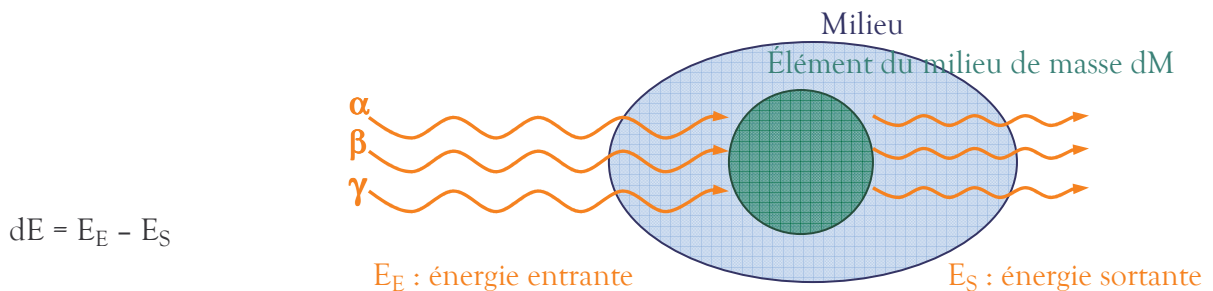
Pour le rayonnement, les premières manifestations observées sont des rougeurs sur la peau.

→ Pour une source donnée et une quantité donnée, à partir de quand a-t-on un début de rougeur ?

Puis on compare différents rayonnements sur les tissus biologiques avec d'autres sources.

→ *Comment fait-on pour quantifier les doses ?*

La dose absorbée : $D = dE/dM$ → il y a un problème pour calculer :



$$D = (E_E - E_S)/dM$$

Presque vrai... à un petit détail près...

... la matérialisation !

$$E_\gamma = T_{e^-} + T_{e^+} + 2m_0.c^2 = 1,022 \text{ MeV}$$

Cette énergie ne fait pas de dégât : la fabrication de masse n'est pas nuisible et ne doit donc pas être prise en compte.

$$D = dE / dM = (E_E - E_S - E_M)/dM$$

dE est l'énergie déposée dans le milieu qui va arracher des électrons.

dM ne peut pas être infiniment petite car la probabilité d'interaction serait trop faible.
Elle ne peut non plus être infiniment grande car la dose moyenne n'aurait plus de sens.

Application numérique :

Un milieu de masse 100 g irradié uniformément par une source de Cobalt 60. Celle-ci émet des photons de 1,17 et 1,33 MeV.

- Nombre de photons à l'entrée : $1,332 \cdot 10^9$ photons pour chaque énergie.
- Nombre de photons à la sortie : 20 % de ces photons et $9,6 \cdot 10^8$ photons d'énergies différentes moyennées à 0,5 MeV.

Quelle est la dose absorbée par ce milieu ?

$$\rightarrow 3,5 \cdot 10^{-3} \text{ Gray}$$

▪ Équivalent de dose :

Or : les particules α ne pénètrent que quelques μm d'eau,
les électrons ne pénètrent que quelques mm d'eau,
et la même énergie y est déposée (pour 1 MeV d'incidence)

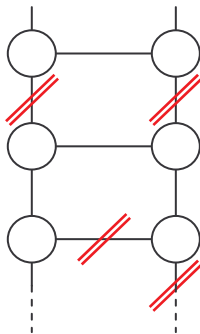
Donc que ce soit une irradiation de particules α ou d'électrons, il y a le même dégât...

... le même dégât, oui, mais pas la même densité de dégât.

À même dépôt d'énergie, cette densité de dégâts est plus grande avec un parcours court qu'avec un parcours long.

$$\text{Parcours}_{\text{ION LOURDS}} < \text{Parcours}_{\text{PARTICULES } \alpha} < \text{Parcours}_{\text{ÉLECTRON}}$$

Notre gros problème du moment : l'ADN



Des liaisons sont cassées à cause du départ de l'électron responsable de la liaison. Une seule cassure n'est pas important car l'ADN présente un système de réparation.

Mais ce système a une faille : la réparation se fait par rapport à ce qu'il y a à côté ; donc si, à côté, il y a une faille, la réparation est mauvaise.

La gravité des dégâts est relative à la quantité de ces dégâts sur une petite zone.

Elle est caractérisée par une dose efficace : $H = D \cdot Q$ exprimé en Sievert (Sv)
Q : facteur de qualité sans unité.

Elle correspond à l'intégration de la gravité des dégâts.

Le Sievert est l'unité MKSA, mais on utilise encore le rem. On retrouve la même correspondance entre le Sievert et le rem qu'entre le Gray et le rad :

$$1 \text{ Sievert} = 100 \text{ rem}$$

$$1 \text{ Gray} = 100 \text{ rad}$$

La valeur du facteur de qualité Q est en lien avec le transfert linéique d'énergie (TEL) exprimé en $\text{MeV.cm}_{\text{EAU}}^{-1}$:

Particules	Facteur de qualité Q	TEL en $\text{MeV.cm}_{\text{EAU}}^{-1}$
Photons X et γ	1	
Électrons d'énergie supérieure à 300 keV	1	2
Électrons d'énergie supérieure à 30 keV	1	2,5
Électrons d'énergie inférieure à 300 keV	1,7	5,7
Neutrons lents	3	12
Neutrons rapides	10	53
Protons	10	53
Particules α	20	175
Ions lourds	20	175

Plus le facteur de qualité Q augmente, plus le transfert d'énergie augmente aussi (mais ce n'est pas linéaire pour autant)

➤ Synthèse :

Grandeur	Symbole	Unité SI	Unité pratique	Correspondance
Activité	A	Becquerel (Bq)	Curie (Ci)	$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$
Fluence	ϕ	Particules.m^{-2}	$\text{Particules.cm}^{-2}$	$1 \text{ cm}^2 = 10^4 \text{ m}^2$
Débit de fluence	ϕ°	$\text{Particules.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$	$\text{Particules.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$	-
Énergie	E	Joules (J)	MeV ou eV	$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$
Dose absorbée	D	Gray (Gy)	Rad	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$
Débit de dose	D°	Gy.s^{-1}	Rad.h^{-1}	$1 \text{ Gy.s}^{-1} = 36 \cdot 10^4 \text{ Rad.h}^{-1}$
Équivalent de dose	H	Sievert (Sv)	Rem	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ Rem}$
Débit d'équivalence de dose	H°	Sv.s^{-1}	Rem.h^{-1}	$1 \text{ Sv.s}^{-1} = 36 \cdot 10^4 \text{ Rem.h}^{-1}$

❖ Calcul de dose :

➤ Particules indirectement ionisantes (photons et neutrons) :

▪ Les photons :

$$N(x) = N_0 \cdot \exp^{-\mu x}$$

$$\text{Nombre d'interactions : } N_I = N(x) - N_0 = N_0 \cdot (1 - \exp^{-\mu x})$$

On calcule la dose maximale en considérant de façon excessive que tous les photons, qui ont interagi, ont déposé toute leur énergie.

*C'est vrai pour l'effet photoélectrique
mais pas forcément pour l'effet Compton et la
matérialisation...*

$$D_{\text{MAX}} = E_{\text{MAX}}/M$$

$$D_{\text{MAX}} = N_I \cdot E / M \quad \text{mais : } D_{\text{RÉEL}} < D_{\text{MAX}}$$

Dans l'expression de D, on va retrouver :

- $\mu_{\text{EN}} \text{ (cm}^{-1}\text{)},$
- $E \text{ (MeV)},$
- $\phi \text{ (cm}^{-2}\text{)}$

$$\rightarrow \text{MeV.cm}^{-3}$$

Or la dose est en MeV.g^{-1} ,
il faut la densité $\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}$

$$D = \frac{\mu_{\text{EN}} \cdot E \cdot \phi}{\rho}$$

Mais les unités ne sont pas dans le Système International.

Il faut une conversion :

$$D = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{\mu_{\text{EN}} \text{ (cm}^{-1}\text{)} \cdot E \text{ (en MeV)} \cdot \phi \text{ (cm}^{-2}\text{)}}{\rho \text{ (g.cm}^{-3}\text{)}}$$

On simplifie la formule :

- Pour un tissu biologique : on prend $\rho = \rho_{\text{EAU}} = 1$ (au lieu de 0,98) *Ça va...*
- Pour tout photon dont l'énergie est supérieure à 60 keV (donc quasiment tous) :
on prend $\mu_{\text{EN}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^{-1}$
- ϕ = nombre de photons . cm^{-2} n'est pas connu, par contre on connaît l'activité de la source (en Becquerel ou en Curie) : A = nombre de photons . s^{-1}
 $\phi^{\circ} = A / (4 \cdot \pi \cdot R^2)$ en nombre de photons . $\text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$

Il n'est pas anodin de prendre l'activité en Curie : on enlève un 10^{10} !

$$D^{\circ} = 3600 \cdot 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \frac{3 \cdot 10^{-2} \cdot E \text{ (MeV)} \cdot A \text{ (Ci)} \cdot 3,7 \cdot 10^{10}}{1 \cdot 4 \cdot \pi \cdot R^2 \text{ (m}^2\text{)}}$$

(Gy.h⁻¹)  *Activité par heure*

△ Ce ne sont pas les unités MKSA !

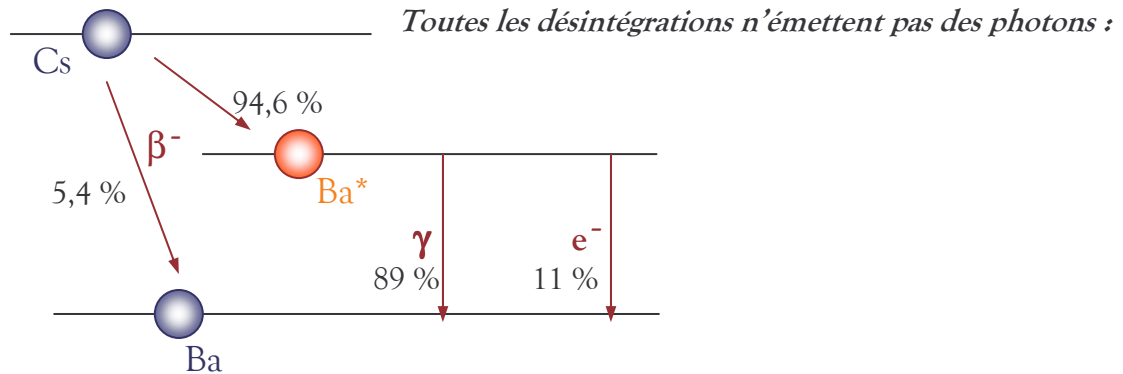
$$D = 0,54 \cdot \frac{E \text{ (MeV)} \cdot A \text{ (Ci)} \cdot P}{R^2 \text{ (m}^2\text{)}} \quad (\text{Rad.h}^{-1})$$

$$1 \text{ Gy} = 100 \text{ Rad}$$

→ Il est plus simple de diviser par 2 que multiplier par 54...

Avec l'activité, ce que l'on vient de calculer est le nombre de désintégration subies par une source.

Mais...



$$P = 0,946 \cdot 0,89 = 0,81$$

Pour 100 désintégrations, il y a 81 photons γ .

P est le rapport d'embranchement.

Les radiations subies lors des TPs :

On utilise une source ^{137}Cs d'activité $A_0 = 5 \mu\text{Ci}$ achetée en 2000 et ayant une demi vie de 30 ans.

$$\text{L'activité } A \text{ en 2005} = A_0 \cdot e^{-\lambda \cdot t} = A_0 \cdot e^{-(\ln 2 \cdot t) / t_{1/2}} = 4 \mu\text{Ci}$$

$$\begin{aligned} \text{À une distance de 1 m : } D\gamma &= 0,54 \cdot 4 \cdot 10^{-6} \cdot 0,662 \cdot 0,81 \\ &= 10^{-6} \text{ Rad.h}^{-1} \\ &= 10^{-2} \mu\text{Gy.h}^{-1} \end{aligned}$$

$$\text{À une distance de 10 cm : } D\gamma = 1 \mu\text{Gy.h}^{-1}$$

$$\text{Lors du TP, on est en moyenne à 1 m de la source pendant 3 heures : } D\gamma = 3 \cdot 10^{-2} \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$$



C'est grave docteur ?

La référence en terme de radioprotection :

Pour les professionnels les plus exposés, la dose maximale annuelle est de 20 mSv par an.

Si on ramène cette dose annuelle à l'heure de travail (on en considèrerait 2000 avant les 35 heures), on arrive à une dose horaire de $25 \mu\text{Sv} \cdot \text{h}^{-1}$ soit $25 \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$.

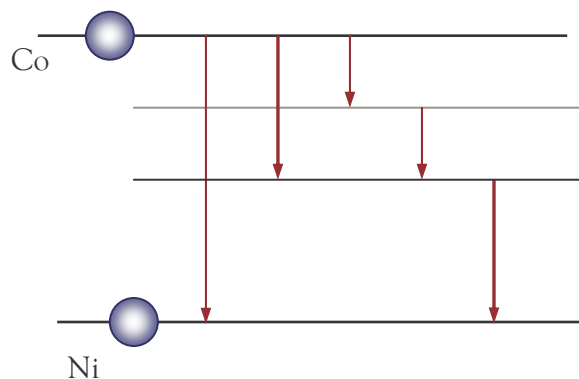
Alors, avec notre pauvre petit $3 \cdot 10^{-2} \mu\text{Gy} \cdot \text{h}^{-1}$...



... On rigole !

Exemple : le Cobalt

Il y a une descente en cascade et différentes possibilités de désintégrations avec des photons d'énergies différentes.



Il y a une « voie » principale de désintégration proche de 100 %. Les autres sont de l'ordre de 0,00...% et sont donc négligeables.

$$D\gamma = \left[(0,54 \cdot A \cdot E_1 \cdot P_1) + (0,54 \cdot A \cdot E_2 \cdot P_2) \right] / d^2 \quad E_1 = 1,17 \text{ MeV} \quad E_2 = 1,33 \text{ MeV}$$

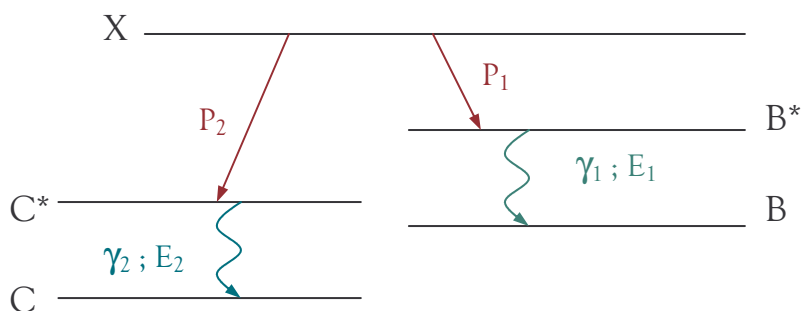
Mais comme $P_1 \sim P_2 \sim 100 \%$

$$D\gamma = \left[(0,54 \cdot A \cdot (E_1 + E_2)) \right] / d^2$$

Il existe différentes façons de calculer les doses dont l'utilisation de courbes appelées abaques.

Ces abaques ont pour abscisse l'énergie des particules émises, et pour ordonnée soit une dose, soit un équivalent de dose.

Autre cas :



$D(\gamma_1) + D(\gamma_2)$ Rien ne change car l'activité A correspond à celle des noyaux de départ.

$$= (0,54 \cdot A \cdot E_1 \cdot P_1) + (0,54 \cdot A \cdot E_2 \cdot P_2) / d^2$$

▪ Les neutrons :

Ce que l'on vient de dire est applicable pour les neutrons à une adaptation près :

$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x} = N_0 \cdot e^{-n \cdot \sigma x} \quad (\mu = n \cdot \sigma)$$

On observe un plateau de 1 MeV à 100 MeV.

→ 7 neutrons par cm^2 et par seconde correspondent à 1 milli rem par heure.

➤ Particules chargées :

Ces interactions sont toujours présentes car il s'agit d'interactions avec les électrons de la matière.

Elles correspondent à une perte d'énergie dans la matière de ces particules caractérisées par le pouvoir d'arrêt d'une seule particule par unité de longueur.

Pour une dose, il va y avoir :

- Le pouvoir d'arrêt d'une particule en MeV.cm^{-1} ,
- Le flux : le nombre de particules envoyées par la source en cm^{-2} ,
- La masse volumique du matériau en g.cm^{-3} .

$$(\text{MeV.g}^{-1})$$

$$D = \phi \cdot S / \rho$$

$$(\text{Joules.kg}^{-1})$$

$$D = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \phi \cdot S / \rho$$

Ici, le problème qui se pose est de connaître le S (pouvoir d'arrêt)

Formule pratique pour les électrons d'énergie supérieure à 300 keV et pour une distance de 10 cm :

Pour cette formule, on se limite aux électrons : il n'est pas possible de mettre toutes les particules dans le même panier.

Le pouvoir d'arrêt, S, est égal à 2 MeV.cm^{-1} (pour l'eau : $\rho = 1 \text{ g.cm}^{-3}$)
pour une énergie incidente entre 300 keV jusqu'à de très grandes énergies.

$$D = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \phi \cdot S / \rho$$

(Gray)

$$\text{Avec : } \rho = A / (4 \cdot \pi \cdot d^2)$$

$$\text{Débit de dose à 10 cm} = D \approx 3\,330 \cdot A \text{ (Curie)} \cdot P \text{ (rad.h}^{-1}\text{)}$$

Soit on utilise ce calcul, soit on utilise une abaque.

Pour toutes les autres particules chargées, notamment les particules α , on doit utiliser la formule classique.

Mais cela ne pose pas trop de problème car, en général, ces particules sont stoppées dans l'air. Un risque n'est présent que si on est en contact direct de la source.

❖ Les normes fondamentales :

➤ Historique :

Très tôt après la découverte de ces rayonnements, il y eut la création d'un comité international ayant pour mission de formuler des recommandations sur la protection (1950)

En 1950, ce comité devient le CIPR (Commission Internationale de Protection Radiologique)

Son rôle est de protéger les individus exposés, pas par le biais de lois à cause de son caractère international, mais par le biais de recommandations sur l'observation des personnels directement exposés

(chercheurs, médecins, armée, les populations d'Hiroshima et de Nagasaki, l'exposition naturelle de faibles doses, les animaux de laboratoire, etc.)

➤ Principe :

Le but est la protection des individus, leur descendance et plus globalement le genre humain.

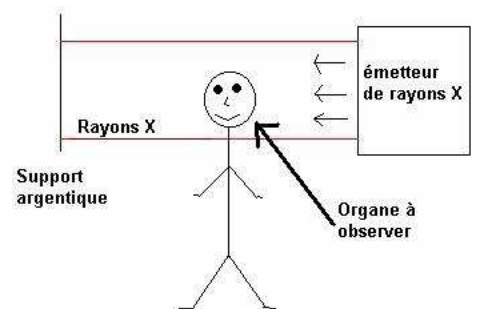
➤ Moyens :

- On réclame une justification de l'utilisation de radioéléments pour le personnel. C'est déjà un peu plus délicat pour la médecine avec les techniques de traitement et de diagnostics.

- Exemple : Le TEP consiste en une injection d'émetteurs β^+ . Il faut justifier son utilisation et savoir si une autre technique n'aurait pas pu la remplacer comme l'échographie, la Résonance Magnétique Nucléaire

(mais, pour la RMN, il n'y a pas beaucoup d'appareil en France donc on soumet des patients à des rayonnements alors que l'on pourrait parfois faire autrement)

- On optimise la radioprotection. Si on soumet quelqu'un à un rayonnement, il faut qu'il soit le plus faible possible avec l'utilisation de filtres (pour le patient et aussi pour le manipulateur)
- On fixe la dose à des valeurs limites et classe les effets en 2 catégories.



Les effets non aléatoires	Les effets aléatoires
Ce sont des effets déterminés pour une dose déterminée. Ils sont dits « à seuil » : on est en mesure de voir les conséquences immédiates ou presque (1 heure, 1 jour, etc.) Il s'agit d'effets précoces.	Ils sont régis par une probabilité d'apparition en fonction de la dose reçue. Ils ne présentent pas de seuil. Ce sont des effets tardifs.
La norme = le seuil Ils sont faciles à gérer : on se met en dessous de ces doses et on ne risque rien.	Les normes = les chiffres limites où la probabilité est « acceptable »
Exemples : - Altération de la formule sanguine - Rougeurs de la peau « coup de soleil », - Chute des cheveux (aussi une cause chimique), - Dermite, - Cataracte : usure et opacification du cristallin (naturelle chez les personnes âgées) prématurées par les rayonnements ionisants, - Atrophie, - Stérilité, - Etc.	

➤ Valeurs pratiques des normes :

▪ Effets non aléatoires :

Une limite de dose H_L est 500 mSv pour tous les tissus. Sauf le cristallin, elle est fixée à 150 mSv.

▪ Effets aléatoires :

Il va falloir gérer un risque (développement de cancer) On définit le risque d'apparition de cancer pour une quantité reçue de rayonnement donné (c'est-à-dire pour une dose donnée)

Le risque est différent entre les hommes et les femmes.

→ Le nombre de cancers observés par Sievert de dose reçue :

Pour la femme : $1,65 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

Pour l'homme : $1,40 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$

Il s'agit ici du risque global sur tout l'individu. Mais des radiations peuvent n'affecter qu'un seul organe.

Exemple : l'os :

Si on injecte un produit qui se fixe sur l'os, les désintégrations vont surtout altérer les tissus osseux.

Exemple : la thyroïde :

C'est une glande qui absorbe quasiment tout l'iode.

On définit un risque partiel qui correspond au risque au niveau d'un tissu.

Exemple de risques partiels :

Moelle osseuse :	$0,20 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$,
Sein et thyroïde :	$0,08 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$,
Poumons :	$0,20 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1}$,
Os :	$0,016 \text{ Sv}^{-1}$,

Les risques partiels (ou locaux) sont reliés au risque global par des facteurs de pondération de chaque tissu T : W_T .

Ce facteur de pondération du tissu T : $W_T = \text{risque partiel} / \text{risque global}$

Exemple : le poumon :

$$\begin{aligned} W_P &= 0,20 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1} / 1,65 \cdot 10^{-2} \text{ Sv}^{-1} && (\text{pour la femme}) \\ &= 0,12 \end{aligned}$$

Une dose de 1 mSv reçue sur les poumons correspond, en terme de risque, à une dose de 0,12 mSv reçue sur tout l'organisme.

Le risque associé à 1 mSv pour les poumons = $0,2 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-6}$

Le risque associé à 0,12 mSv sur tout l'organisme = $0,12 \cdot 10^{-3} \cdot 1,65 \cdot 10^{-2} = 1,98 \cdot 10^{-6}$

La dose limite pour les effets aléatoires est fixée à 50 mSv/an

Or, pour les effets non aléatoires, la dose limite fixée à 500 mSv/an s'applique à tous les tissus.

Alors que, pour les effets aléatoires, la dose limite fixée à 50 mSv/an s'applique pour une globalité de l'organisme.

Si on calcule les doses limites par tissus : $H_L = W_T \cdot H_{TL}$

Quand il y a plusieurs tissus touchés : $H_L = \sum W_i \cdot H_i$

$$H_{TL} = H_L / W_T$$

Exemple : les poumons :

$$H_{TPOUMON} = 50 \text{ mSv} / 0,12 = \mathbf{420 \text{ mSv}}$$

Dose pour les effets non aléatoires = **500 mSv**

Exemple : l'os :

$$W_T = \text{risque partiel} / \text{risque global} = 0,016 \text{ Sv}^{-1}$$

$$H_{OS} = 50 \text{ mSv}^{-1} / 0,016 = \mathbf{4,125 \text{ Sv}}$$

C'est bien trop, on ne doit dépasser la dose pour les effets non aléatoires : **500 mSv**

Il existe des contraintes différentes entre les effets non aléatoires et les effets aléatoires, on respecte la plus petite.

Des adaptations des risques sont faites en fonction des différentes catégories socio-professionnelles.

Les professionnels en contact avec des sources acceptent des risques différents accompagnés d'un suivi médical qui doit compenser l'excès de risque (un suivi plus strict et plus régulier permet une détection plus précoce des maladies et donc des soins plus appropriés)

- Professionnels de catégorie A : $H > 6 \text{ mSv/an} \rightarrow H_L = 20 \text{ mSv/an}$
- Professionnels de catégorie B : $H < 6 \text{ mSv/an}$
- Public : $H < 1 \text{ mSv/an} \rightarrow H_L = 1 \text{ mSv/an}$
- Femmes en âge de procréer : C'est le moment où elle ne sait pas encore qu'elle est enceinte qui est le plus dangereux.

Le fœtus est considéré comme un être vivant, donc « public ».

Mais si la mère fait partie du personnel de catégorie A, le fœtus peut subir pendant le premier mois de grossesse un rayonnement supérieur à la limite public.

→ On place alors les femmes en âge de procréer en catégorie A.

Contamination interne :

Un problème se pose pour les radioéléments volatiles (exemple : l'Iode) ou présents dans du lait contaminé.

On a alors défini la LAI (Limite annuelle d'Incorporation)

Exemple :

L'Iode inhalé présente une activité $2 \cdot 10^6 \text{ Bq} \rightarrow 50 \text{ mSv/an}$

L'Iode ingéré présente une activité $1 \cdot 10^6 \text{ Bq} \rightarrow 50 \text{ mSv/an}$

→ On fait alors la correspondance avec la dose efficace engagée par unité d'incorporation en Sv.Bq (simple règle de 3)

On utilise une autre valeur pratique : la LDCA (Limite Dérivée de Concentration dans l'Air)

Elle s'exprime en Bq.m^{-3} et conduit à 50 mSv/an pour quelqu'un qui travaille pendant 2000 heures (volume horaire calculé avant le passage au 35H et conservé après)

Doses des travailleurs :

		Travailleurs	Apprentis et étudiants (de 16 à 18 ans)	Femmes enceintes (grossesse déclarée)
Dose efficace		20	6	Les dispositions prises pour l'exposition de la femme dans son emploi doivent être telles que l'exposition de l'enfant à naître soit aussi faible que raisonnablement possible et en tout état de cause en dessous de 1 mSv.
Dose équivalente	Cristallin	150	50	
	Mains, avant-bras, pieds et chevilles	500	150	
	Peau (dose moyenne sur 1 cm ²)	500	150	

	Zone non surveillée	Zone surveillée	Verte	Jaune	Orange	Rouge
Risque unique d'exposition externe	5 mSv/an 2,5 µSv/h	13 mSv/an 7,5 µSv/h	7,5µSv/h	2 mSv/h	2 mSv/h	
Risque unique d'exposition interne	1/10 LCDA	3/10 LCDA	1 LCDA	10 LCDA	4000 LCDA	
Accès du personnel A	Autorisé	Autorisé	Autorisé	Autorisé pour une durée limitée	Service compétent	Interdite
Accès du personnel B	Autorisé	Autorisé	Autorisé pour une durée limitée	Service compétent	Interdite	Interdite
Accès du personnel non accompagné	Autorisé	Autorisé pour une durée limitée	Interdite	Interdite	Interdite	Interdite

▪ Bilan :

Les effets précoces :

Ils ne sont pas observés en dessous de 500 mSv. → **Effets à seuil.**

- Exemple : au niveau des testicules, au dessus de 2 Sv, on observe une stérilité transitoire.

- En dessus de 6 Sv, on observe une stérilité définitive.

Pour la peau :

- De 3 à 8 Sv : rougeurs,
- De 7 à 10 Sv : cloques,
- À partir de 11 Sv : mort du tissu.

Les effets tardifs :

Il n'y a pas encore eu d'identification d'effet sur la santé humaine en dessous de 100 mSv (pas encore)

▪ Calcul de risque :

Le risque R correspond à la probabilité d'occurrence de problème de santé lié à une action particulière :

$$R = \text{nombre de morts} / \text{nombre de personnes ayant fait cette action.}$$

Exemple :

$3 \cdot 10^6$ hongrois fument chacun 9 000 cigarettes par an. 29 000 meurent chaque année du tabac.

$$R = 29\,000 / (3 \cdot 10^6) \approx 1 \%$$

→ Fumer 1 cigarette correspond à un risque $1/100 \cdot 9000 \approx 10^{-6}$ risque soit environ 1 μ risque.

Effet stochastique (Hiroshima, Nagasaki) :

- Il y eu 210 000 victimes à cause du souffle de l'explosion sur 1 530 300 habitants.
- 86 572 survivants ont reçu, en moyenne, une dose 100 mSv. 7 827 d'entre-eux ont développé un cancer entre 1950 et 1990 (l'enquête a été arrêtée faute de réalité dans les résultats vis-à-vis des personnes âgées mais les développements de maladies ont encore pu se déclarer)

Le nombre de cancers que l'on attendait pour une telle population était de 7406.

$$R = \frac{7\,827 - 7\,406}{86\,572} = \frac{5}{1000} \quad \text{pour 100 mSv}$$

Risque et normes :

Il n'existe pas d'action qui ne comporte pas de risque.

Situation générale : 10 à 100 μ risque par an pour les professionnels.

Situation particulière :

- Mineurs : 800 μ risque par an,
- Pécheurs : 1 800 μ risque par an,
- Opérateurs dans les centrales : 125 μ risque par an.

Normes relatives aux rayonnements :

- Professionnels de catégorie A : 20 mSv par an,

Bilan des radiations reçues annuellement :

		Valeur moyenne	Valeur élevée
Radiations cosmiques		0,4 mSv (au niveau de la mer)	2 mSv (en altitude)
Radiations du sol		0,5 mSv	40 mSv
Radiations lors de radiodiagnostic		1 mSv	20 mSv
Radiation naturelle		2,5 mSv	
Expérience médicale (un seul examen)	Radio pulmonaire	0,3 mSv	
	Radio abdominale	1 mSv	
	Scanner thorax	5 mSv	
	Scanner abdominal	2 à 15 mSv	
	Traceur Scintigraphie osseuse	4 mSv	
	Traceur Scintigraphie cardiaque	20 mSv	
Traitement de doses absorbées localement pour détruire des tissus tumoraux (radiothérapie et curiethérapie)		10 000 à 100 000 mGy	
Opérateurs de centrale		2,5 mGy	
Manipulateurs de radio en médecine		0,5 mGy	
Pilotes d'avion (selon l'altitude)		2 à 3 mGy	
Mineurs (confinement et minéraux)		1 à 10 (plus risque de grisou)	

Remarque : On a découvert des populations vivant depuis toujours avec des radiations au niveau du sol environnant les 150 mSv et qui ne présentent pas de problèmes particuliers.

❖ Détecteurs et dosimètres :

Il s'agit de capteurs utilisant des matériaux solides, liquides ou gazeux. On utilise les interactions des rayonnements dans le capteur soit par le biais :

- De processus d'ionisation directs ou indirects → **courant électrique**,
- De processus d'excitation des électrons de la matière (pas d'arrachement de ces électrons donc pas de courant) → **émission de lumière lors du retour à l'état fondamental (signal électrique)**,
- De processus physicochimiques → **production de radicaux ou de nouvelles molécules**.

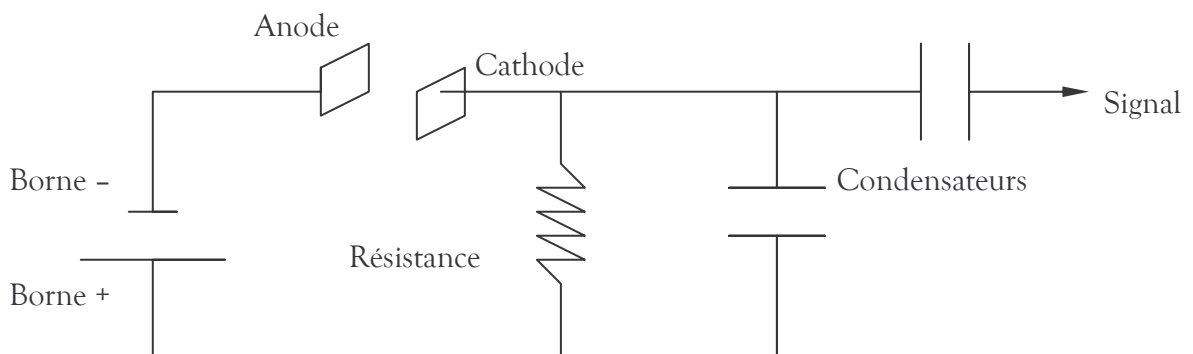
➤ Processus d'ionisation – exemples de détecteur :

▪ Le plus courant : le détecteur à gaz :

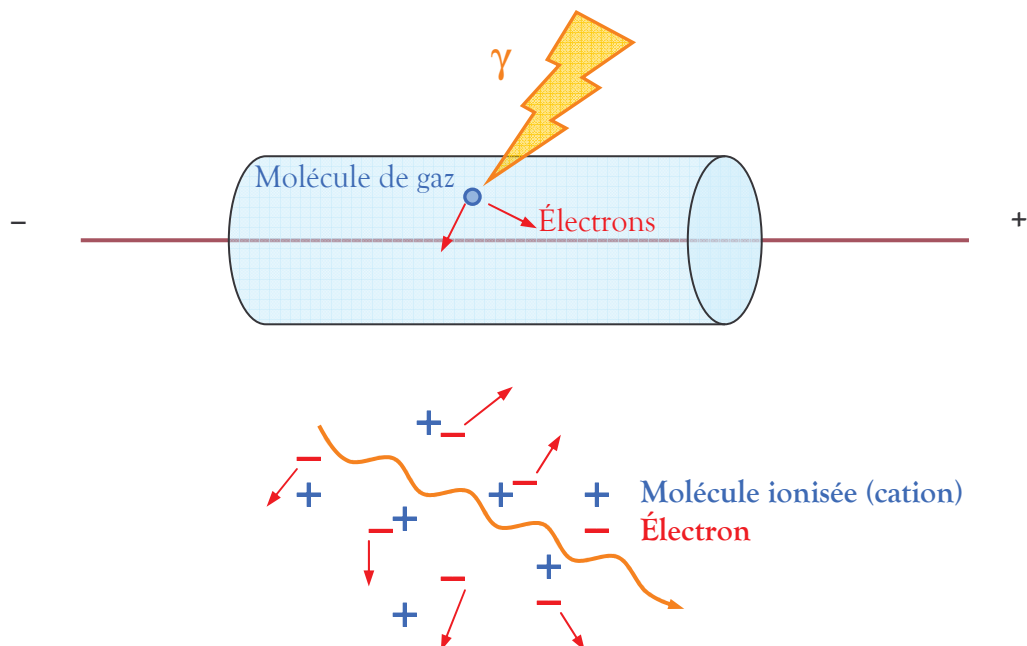
Il consiste en un simple cylindre de gaz...



... avec un circuit électrique.

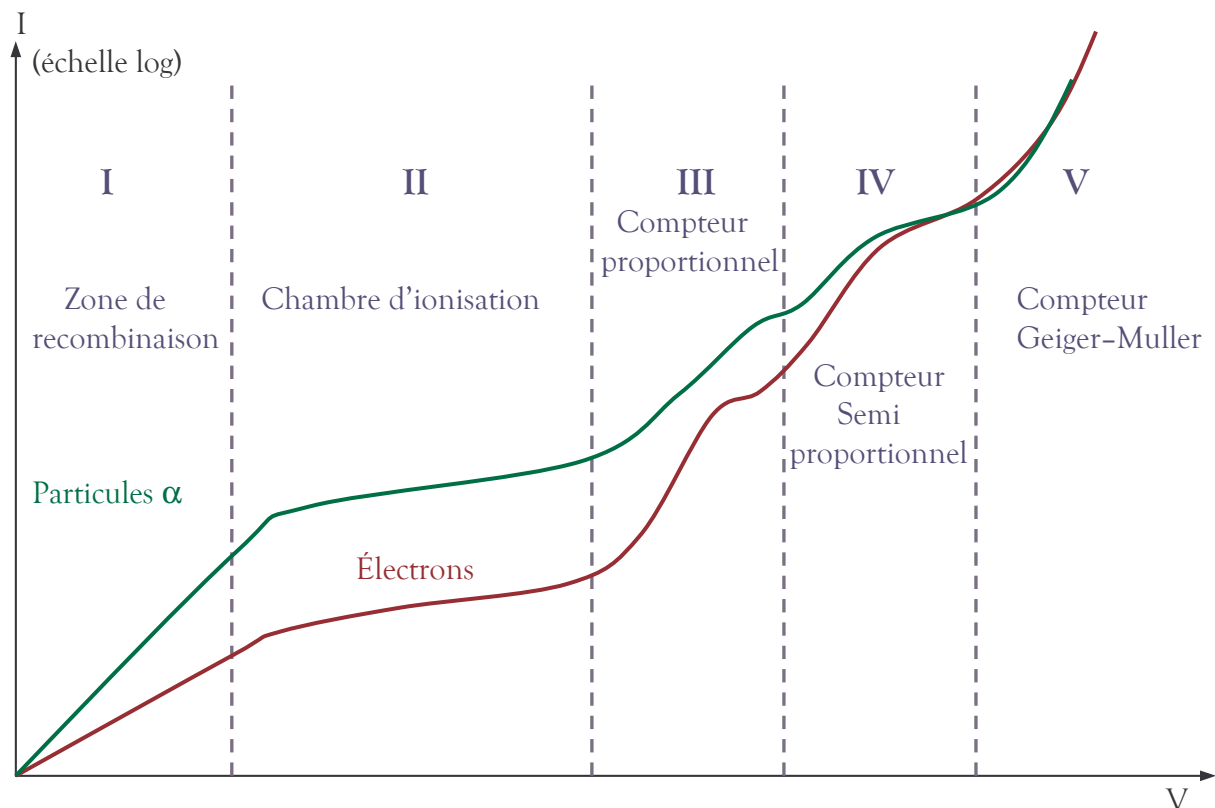


On met un courant dans notre fil d'anode.



Il y a une possibilité de ne pas collecter les électrons sur le fil d'anode et que ceux-ci se recombinent avec des molécules de gaz ionisées.

Pour éviter les recombinaisons, il faut augmenter la tension d'anode.



- Zone de recombinaison :

On ne collecte pas tous les électrons issus de l'ionisation des molécules de gaz.

- Chambre d'ionisation :

On collecte tous les électrons produits par les particules ionisantes incidentes, aucun ne s'est recombiné. Mais on a le problème d'avoir un tout petit courant, difficilement détectable par un voltmètre.

- Compteur proportionnel :

On collecte plus d'électrons que ceux issus de l'ionisation. Les électrons arrachés des molécules de gaz ont assez d'énergie cinétique pour arracher un autre électron d'une autre molécule de gaz.

Malgré cette amplification, on garde la proportionnalité entre le nombre d'électrons collectés et l'énergie des particules incidentes.

- Compteur Geiger – Muller :

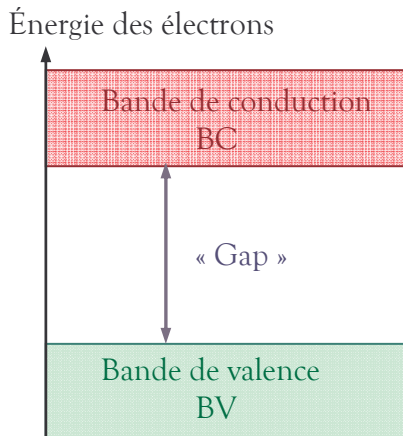
Il y a une grande cascade d'ionisation. L'amplification est tellement grande que l'on perd la proportionnalité avec l'énergie des particules incidentes. Il ne permet que de compter.

- Si on augmente encore le courant :

Il y a formation d'arcs électriques. Ce n'est plus un détecteur mais un appareil à souder.

Ce type de détecteur fonctionne pour les particules ionisantes. Il existe une probabilité mince que les photons interagissent avec le gaz.

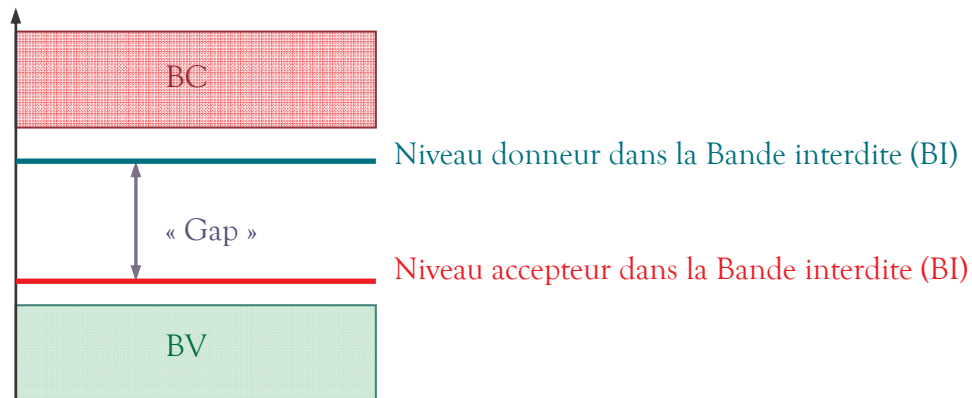
▪ Détecteur semi-conducteur :



Pour utiliser un matériau, il faut que les électrons de la bande de valence puissent passer dans la bande de conduction.

Si le gap est trop important, on a affaire à un matériau isolant. S'il n'y a pas de gap, on a affaire à un matériau conducteur.

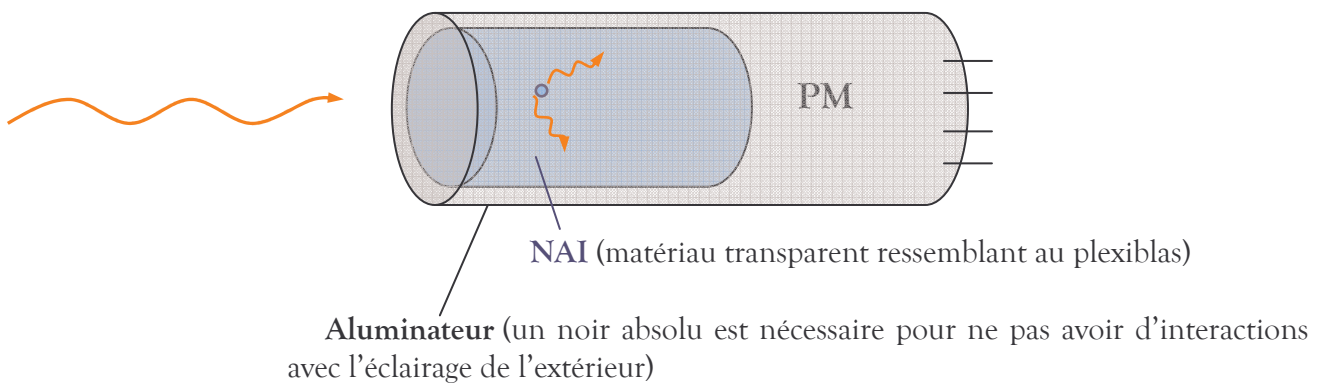
Pour les matériaux semi-conducteur, le gap est d'environ 1 eV.



Ce type de matériau est difficile à manipuler (refroidissement du matériau dans l'azote) mais offre une très grande qualité de mesure.

➤ Processus d'excitation :

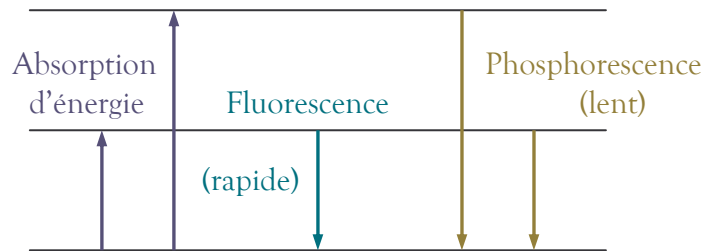
▪ Scintillateurs :



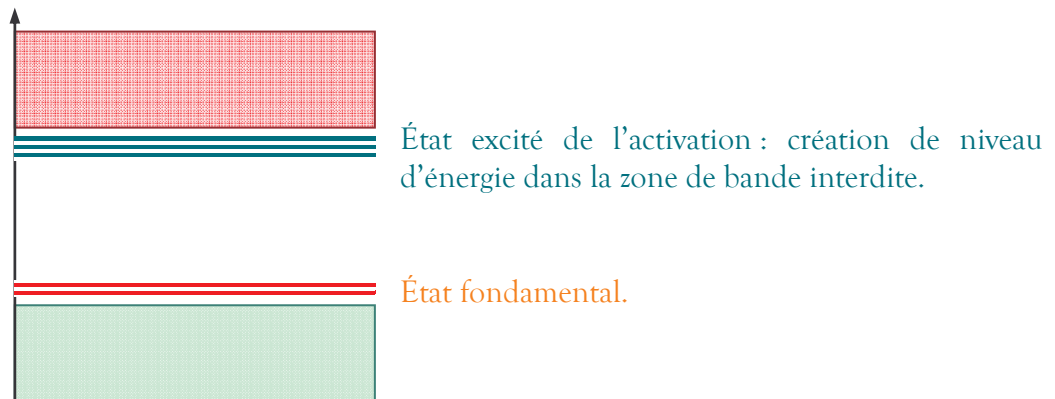
PM : Photomultiplicateur (cellules photo-électriques pour transformer la lumière en électricité)

$$1 \text{ photon } \gamma \rightarrow 1 \text{ électron} \rightarrow 10^4 \text{ photons visibles} \rightarrow 10^2 \text{ électrons} \rightarrow \text{PM}$$

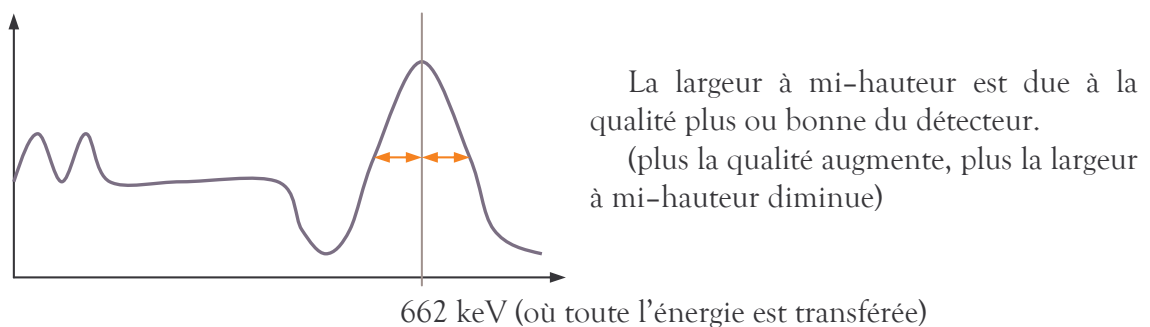
Les **scintillateurs organiques** dépendent des propriétés intrinsèques de la molécule indépendantes de son état solide ou liquide (cristaux, liquides, plastique)



Les **scintillateurs inorganiques** correspondent à peu près à des détecteurs semi-conducteurs avec ou sans activateur (exemple : NAI, CSI)

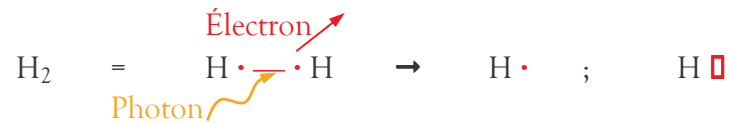


Le **tube PM** constitue une structure multiplicatrice où on observe un phénomène de cascade (cf TD)



➤ Transformation physico-chimique :

▪ Exemple de l'émulsion photographique :



On utilise un support de gélatine et d'ions Bromure-Argent. Ces ions deviennent des atomes d'Argent, des traces qui noircissent par révélation et déterminent la quantité d'ionisation.

▪ Détecteur solides de traces :

Ils sont basés sur le même principe.

→ Le rayonnement transforme les matériaux et les fragilise. On produit alors des agressions chimiques (comme avec l'acide) formant alors des micro-trous aux endroits fragilisés.

On compte alors ces trous à l'aide d'un microscope.

*On peut diriger notre plus grande admiration
aux scientifiques qui emploient cette technique !*

Origine des rayonnements Processus atomique

❖ Atome Hydrogène, modèle de Bohr :

Quand on soumet un atome d'Hydrogène à une décharge électrique, on observe des raies à des longueurs d'onde précise.

Personne ne comprend pourquoi...

➤ D'un point de vue mécanique :

On sait gérer un mouvement circulaire et une force d'attraction (force coulombienne)

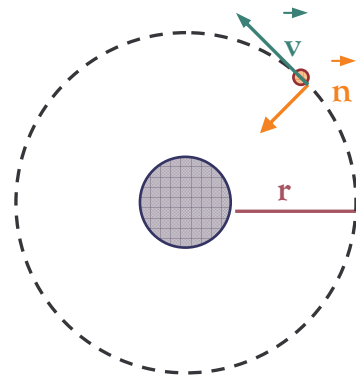
$$\vec{F}_n = \frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} \cdot \vec{n} \quad \text{avec } \vec{n}, \text{ un vecteur unitaire.}$$

La somme des forces est égale à l'accélération : $\sum \vec{F} = m \cdot \vec{g}$

Pour un mouvement circulaire : $g = v^2 / r$

$$\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2} = m \cdot g = m \cdot v^2 / r$$

$$\frac{1}{4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} = m \cdot v^2$$



L'énergie d'un électron :

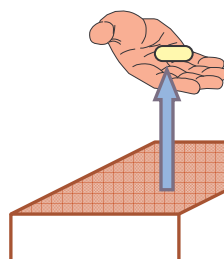
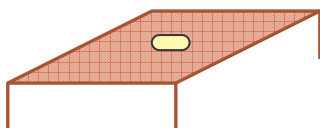
$$E_{\text{TOTALE}} = E_{\text{CINETIQUE}} + E_{\text{POTENTIELLE}}$$

$$E_C \text{ d'une particule classique} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_P = ?$$

Soit une craie posée sur une table avec une énergie de référence :

Au repos
(énergie de référence)



Toujours au repos mais elle présente une énergie potentielle.

$$E_P = m \cdot g \cdot h$$

Mais pour l'électron : quelle est l'énergie de référence ?

$$E_P = 0 \text{ si } r \rightarrow \infty$$

$$\begin{aligned} E_P &= \int_{\infty}^r F_n dx = \int_{\infty}^r \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot e^2 \cdot \frac{dx}{x^2} \\ &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[-\frac{1}{x}\right]_{\infty}^r = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \left[-\frac{1}{\infty} - (-\frac{1}{r})\right] \\ &= \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \end{aligned}$$

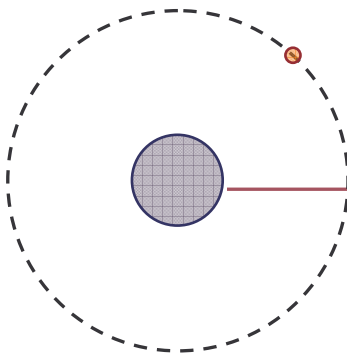
$$\begin{aligned} E_T &= E_C + E_P = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{1}{r} \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} - \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} \end{aligned}$$

$$E_T = -\frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{2} \times \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \times \frac{e^2}{r}$$

$E_T = f(r)$ avec r allant de 0 à ∞ .

Alors pourquoi des longueurs d'ondes précises ?

Énergie de liaison d'un système :



$$E_P + E_C = E_T(i)$$

On suppose qu'ils sont à une distance $r = \infty$
et qu'ainsi ils sont au repos :

$$v = 0 \quad E_C = 0 \quad \text{Et comme } r = \infty, \quad E_P = 0$$

$$\text{Donc } E_T(f) = 0$$

$$E_{\text{LIAISON}} + E_T(i) = E_T(f)$$

$$E_L = E_T(f) - E_T(i) = -E_T(i) = \frac{1}{2} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r}$$

Cela supposerait que l'électron de l'atome H pourrait avoir toutes les énergies possibles.
Or expérimentalement, c'est faux à causes des longueurs d'onde précises.

➤ Postulats de Bohr :

Beaucoup de bidouilles...

▪ 1^{er} postulat : postulat mécanisme :

Il fixe des moments cinétiques $\sigma = n \cdot \hbar$ avec $\sigma = m \cdot v \cdot r$ et $\hbar = h/2\pi$ $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}^{-1}$
 $n \in \mathbb{N}$

On entre dans la mécanique quantique...

$$m \cdot v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r} \quad \text{et } \sigma = n \cdot \hbar = m \cdot v \cdot r \text{ donc } v = n \cdot \hbar / (m \cdot r)$$

Donc $m \cdot n^2 \cdot \hbar^2 / (m \cdot r)^2 = 1 / (4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0) \cdot e^2 / r$

On fixe alors r : $r = n^2 \cdot \hbar^2 / (m \cdot e^2) \cdot 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0$ et $r = n^2 \cdot r_0$
Avec $r_0 = \hbar^2 / (m \cdot e^2) \cdot 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 = 0,53 \text{ \AA}$

$$E_T = -\frac{1}{2} \frac{1}{(4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)} \cdot \frac{e^2}{r}$$

$$E_T = -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{(4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)} \right]^2 \cdot \frac{e^4 \cdot m}{(n^2 \cdot \hbar^2)}$$

$$E_T = -\frac{1}{2} \left[\frac{1}{(4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0)} \right]^2 \cdot \frac{e^4 \cdot m}{\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

$$E_T = -E_0 / n^2 \quad \text{avec } E_0 = 13,6 \text{ eV}$$

$$E_n = -E_0 / n^2 \quad r_n = n^2 \cdot r_0 \quad r_0 = 0,53 \text{ \AA} \quad (n=1)$$

■ 2^{ème} postulat : postulat optique :

L'électron peut se déplacer entre les différents états d'énergie accessibles. $n \in \mathbb{N}$

(n=1)	(n=2)	(n=3)	(n=4)
$E_n = -13,6 \text{ eV}$	$-13,6/4$	$-13,6/9$	$-13,6/16$

État initial i	→	État final f
E_i		E_f

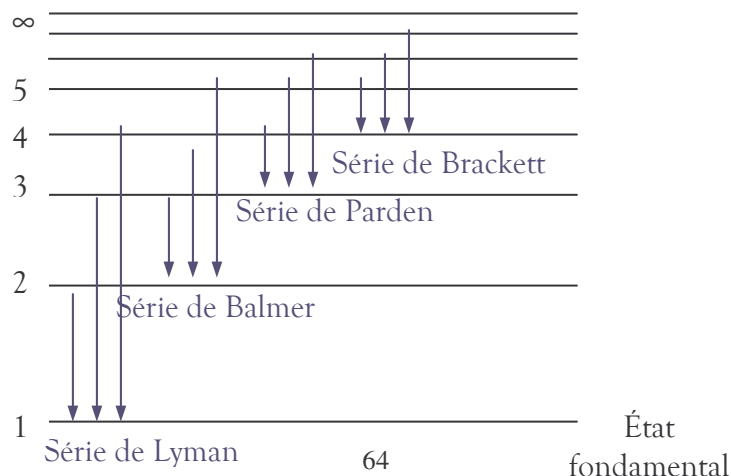
Si $E_i < E_f$, l'électron absorbe de l'énergie (= $E_f - E_i$)
Si $E_i > E_f$, l'électron émet de l'énergie (= $E_i - E_f$)

Transitions :

L'électron va de $n=4$ à $n=1$. $E_4 = -13/16$ $E_1 = -13 \text{ eV}$
 $E = E_4 - E_1 = 13,6 (1 - 1/16) = 15/16 \cdot 13,6$

→ Possible pour toutes les transitions (avec tous les états)

$$E = E_i - E_f = -E_0 \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \quad (= \text{énergie émise})$$



Voir le site <http://www.physique-eea.unicaen.fr/~tice/coursenligne.html> → Atome de Bohr

Absorption d'énergie par l'atome :

La structure atomique peut stocker de l'énergie par un changement du niveau d'énergie de l'électron.

Mais il faut apporter l'énergie correspondant précisément à un état possible pour l'électron.

Si on apporte une énergie entre E_n et E_{n+1} , rien ne se passe.

Si on apporte une énergie supérieure à l'énergie de liaison E_L , l'électron quitte l'atome. On parle d'ionisation de l'atome.

L'apport d'énergie peut se faire par une décharge électrique ou par des photons.

Tout élément tend vers son état fondamental.

Quand l'électron est sur une couche différente que sa couche fondamentale, il y retourne en libérant son surplus d'énergie par un quantum (= photon) d'énergie.

Pour l'atome de Bohr, l'état fondamental de l'électron est $n=1$ et correspond à l'énergie de liaison maximale avec l'atome.

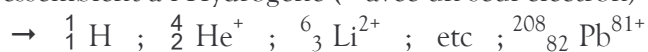
L'électron a la possibilité de passer de l'état n à l'état fondamental directement ou par une cascade jusqu'à l'état fondamental.

Les photons libérés ont une longueur d'onde différente en fonction des différences d'énergie entre les états.

Toutes les transitions d'un état $n>2$ vers $n=2$ (= série de Balmer) ont pour conséquence l'émission de photons avec des longueurs d'ondes dans le domaine du visible.

❖ Généralisation aux atomes hydrogénéoïdes :

Ils ressemblent à l'Hydrogène (= avec un seul électron)



(on sait le faire)

Pour l'atome de Bohr :

$$F = 1/(4.\pi.\epsilon_0) . e^2/r^2$$

Pour un atome hydrogénéoïde :

$$F = 1/(4.\pi.\epsilon_0) . Z . e^2/r^2$$

$$E_n = - E_0 . Z^2 / n^2$$

❖ Généralisation à tous les atomes :

Les autres électrons font écran
au noyau.

$$F = 1/(4.\pi.\epsilon_0) . Z_{\text{EFF}} . e^2/r^2$$

$$F = 1/(4.\pi.\epsilon_0) . (Z-\sigma_e) . e^2/r^2$$

Avec σ_e = constante d'écran des autres électrons.

$$E_n = - E_0 . (Z-\sigma_e)^2 / n^2$$

$\sqrt{(E_n)}$ est proportionnel à Z

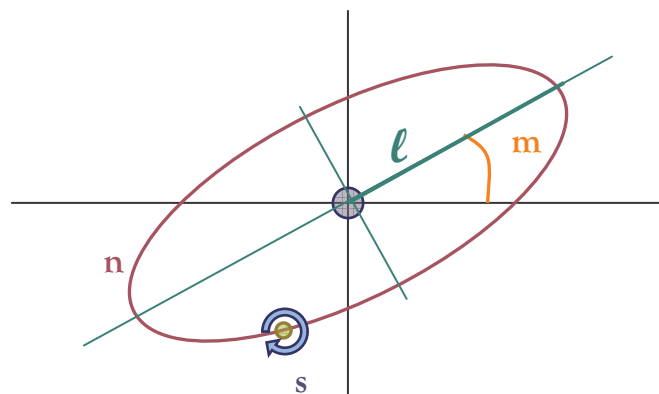
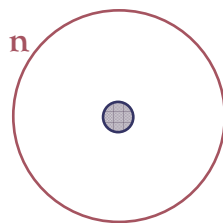
$$\sqrt{(E_n)} = \sqrt{(- E_0 / n^2)} . Z - \sigma_e$$

Cette démarche est bonne au point de vue de l'énergie mais pas au point de vue de la localisation.

La position de l'électron n'est pas définie mais seulement une fonction d'onde $\Psi(x, y, z, t)$ telle que la probabilité de trouver l'électron entre x et x+dx ; y et y+dy ; z et z+dz et entre t et t+dt correspond à $dP = |\Psi(x, y, z, t)|^2 dx dy dz dt$

La position de l'électron n'est pas définie sur une sphère parfaite avec un rayon précis. On peut trouver un électron partout dans l'espace ; la probabilité dP n'est donc jamais nulle.

➤ Modèle de Bohr Sommerfeld :



n : nombre quantique principal

ℓ : nombre quantique orbital (= rapport grande orbite/petite orbite)

m : nombre quantique magnétique (angle entre l'horizontale et le grand axe)

s : nombre quantique de spin (rotation de l'électron sur lui-même)

n : 1 ; 2 ; 3 ; 4 ; 5 ; etc.
Couche : K, L, M, N, O, etc.

ℓ : 0 ; 1 ; 2 ; 3 ; ... ; n-1
Sous-couche : s ; p ; d ; f ; ...

m_L : projection de m : $-\ell \geq m_L \geq \ell$

m_S : projection de s : $+/- \frac{1}{2}$

Quand n augmente, l'énergie E augmente et l'énergie de liaison E_L diminue.

Pour un n donné :

Quand ℓ augmente, l'énergie E augmente et l'énergie de liaison E_L diminue.

L'état d'un électron est donné par n , ℓ , m_L et m_S .

Exemple : $n=1$ $\ell=0$

L'état fondamental correspond à l'état d'énergie de liaison maximale (= état le plus stable)

▪ Tableau de Mendeleïev :

Nombres quantiques				Sous-couche	Couche	Nb d'électrons dans la sous- couche	Nb total sur la couche
n	ℓ	m_L	m_S				
1	0	0	$\pm \frac{1}{2}$	1 s	K	2	2
2	0	0	$\pm \frac{1}{2}$	2 s	L	2	8
	1	-1 0 1	$\pm \frac{1}{2}$	2 p		6	
3	0	0	$\pm \frac{1}{2}$	3 s	M	2	18
	1	-1 0 1	$\pm \frac{1}{2}$	3 p		6	
	2	-2 -1 0 1 2	$\pm \frac{1}{2}$	3 d		10	
4	0	0	$\pm \frac{1}{2}$	4 s	N	2	32
	1	-1 0 1	$\pm \frac{1}{2}$	4 p		6	
	2	-2 -1 0 1 2	$\pm \frac{1}{2}$	4 d		10	
	3	-3 -2 -1 0 1 2 3	$\pm \frac{1}{2}$	4 f		14	

Le nombre total d'électrons par couche : $N_T = 2n^2$

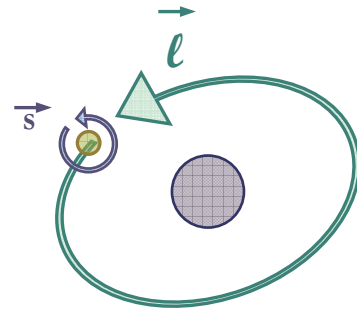
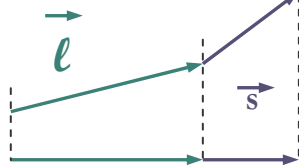
On ne peut pas avoir 2 électrons avec les mêmes nombres quantiques n , ℓ , m_L et m_S .

▪ Organisation en énergie :

→ Couplage spin - orbite.

$$\vec{j} = \vec{\ell} + \vec{s}$$

$$|\ell - s| < j < |\ell + s|$$



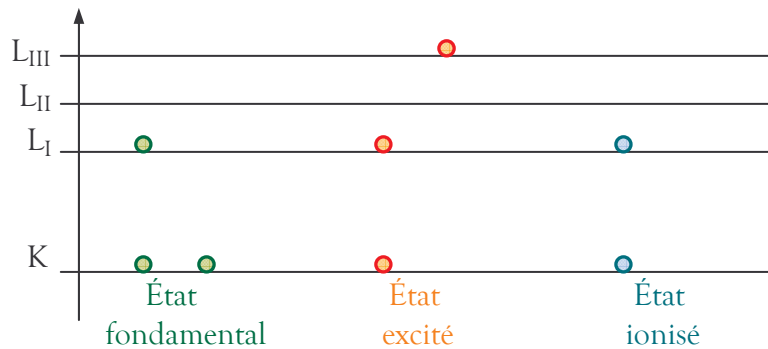
$$\vec{j} = \vec{\ell} + \vec{s}$$

$$\vec{j} = \vec{\ell} - \vec{s}$$

n=1	$\ell=0$	$s=+/- \frac{1}{2}$	$j = \frac{1}{2}$	Une seule valeur d'énergie	K
n=2	$\ell=0$	$s=+/- \frac{1}{2}$	$j = \frac{1}{2}$	Une seule valeur d'énergie	L_I
	$\ell=1$	$s=+/- \frac{1}{2}$	$J = \frac{1}{2} ; \frac{3}{2}$	2 valeurs d'énergie	L_{II} et L_{III}
n=3	$\ell=0$	$s=+/- \frac{1}{2}$	$j = \frac{1}{2}$	Une seule valeur d'énergie	M_I
	$\ell=1$	$s=+/- \frac{1}{2}$	$J = \frac{1}{2} ; \frac{3}{2}$	2 valeurs d'énergie	M_{II} et M_{III}
	$\ell=2$	$s=+/- \frac{1}{2}$	$j = \frac{3}{2} ; \frac{5}{2}$	2 valeurs d'énergie	M_{IV} et M_V

} 3 énergies différentes

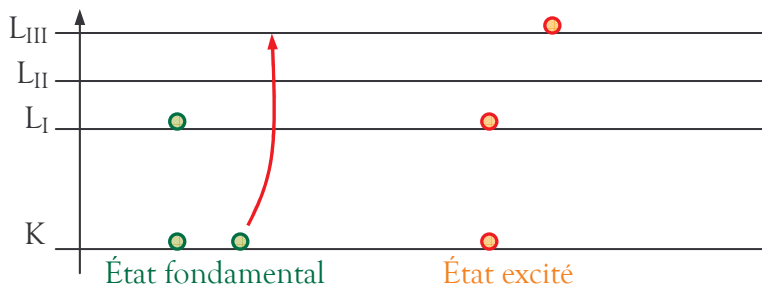
Exemple : ${}^6_3\text{Li}$



❖ Absorption et émission d'énergie par la structure atomique :

➤ Absorption :

▪ Excitation :



L'énergie apportée est exactement : $E = E_{L_{III}} - E_K$

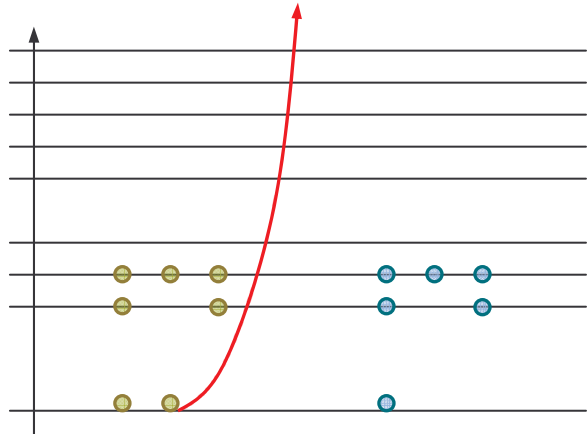
De plus, il faut que la sous-couche L_{III} ne soit pas déjà occupée par des électrons.

Ce processus peut permettre des réactions chimiques, dites photo-induites (= excitation par des photons)

▪ Ionisation :

L'énergie apportée : $E \geq E_{\ell_K}$

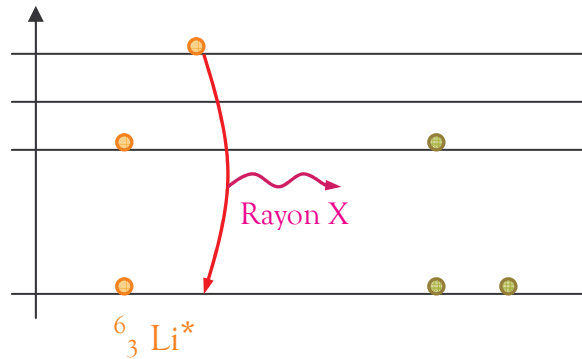
$$E = E_{\ell_K} + T_{e^-}$$



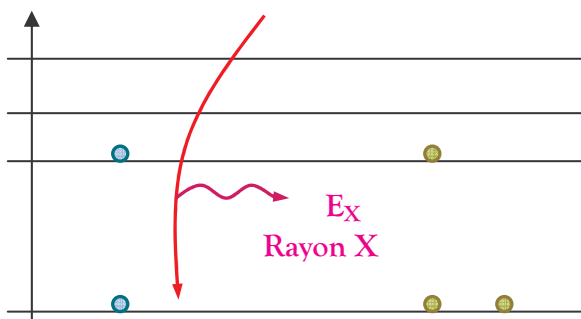
➤ Émission :

▪ Fluorescence :

Point de départ : État excité (voire ionisé)



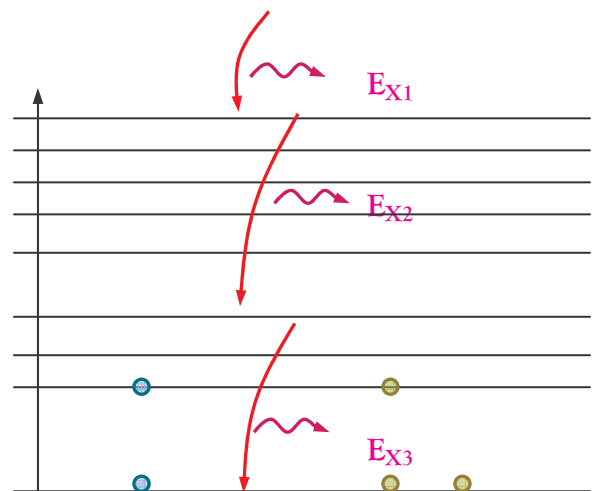
$$\begin{aligned} E &= E_{L_{III}} - E_K \\ &= E_{\ell_K} - E_{\ell_{L_{III}}} \end{aligned}$$



$$E = -E_K = E_{\ell_K}$$

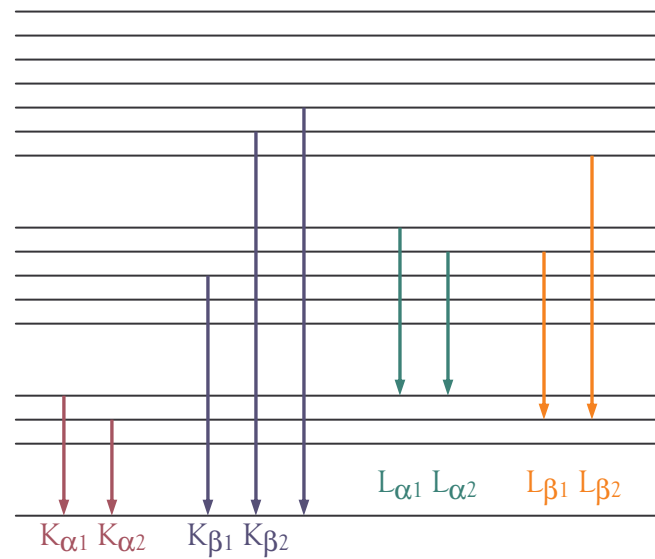
$$E_{\ell_K} = E_{X1} + E_{X2} + E_{X3}$$

OU



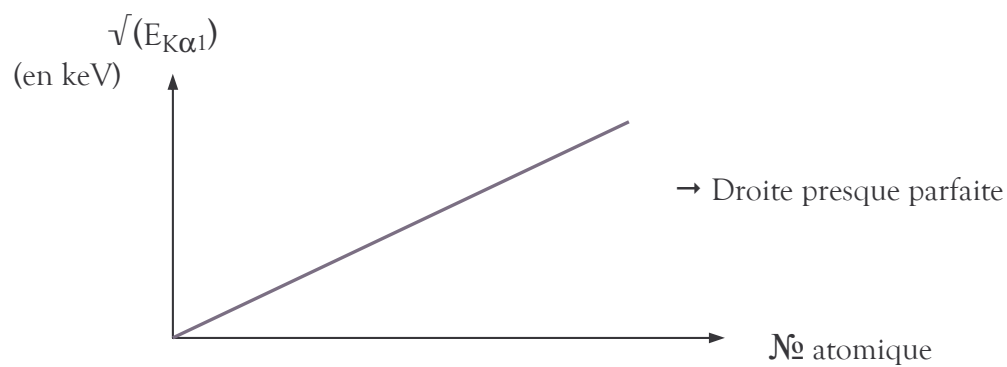
$$E_{X1} = E_{\ell_{Mv}} ; E_{X2} = E_{\ell_{L_{III}}} - E_{\ell_{Mv}} ; E_{X3} = E_{\ell_K} - E_{\ell_{L_{III}}}$$

- Nomenclature des transitions électroniques donnant les raies X les plus intenses :



On établit une table d'énergie pour tous les éléments.

Loi de Moseley :

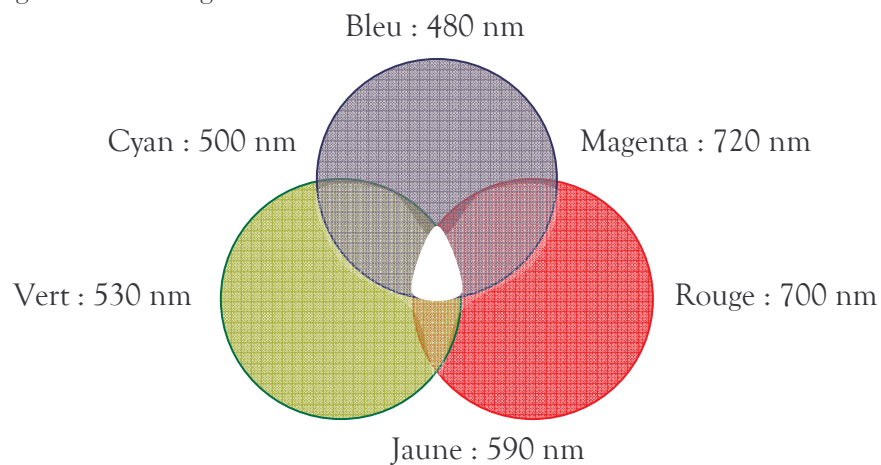


❖ Interaction rayonnement – matière :

➤ Application :

La lumière blanche :

Il s'agit d'un mélange de toutes les radiations :

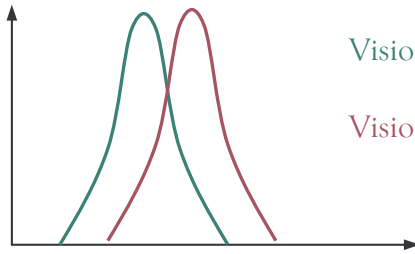


Exemple : La chlorophylle absorbe le magenta, on voit donc la couleur verte.

La vision nocturne :

Elle est possible grâce à la sensibilité des cellules à bâtonnet.

Sensibilité relative 5100 Å 5550 Å
(arbitraire)



Vision nocturne (cellules à bâtonnets)

= Sensibilité aux bleus

Vision diurne (cellules à cône)

= Capacité de supporter de grandes variations d'intensité de la lumière.

→ peu de sensibilité dans les bleus et une grande finesse dans le rouge.

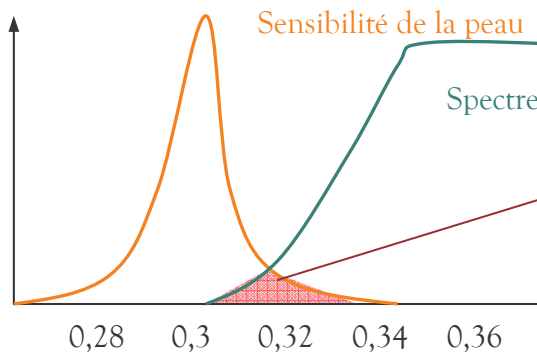
La longueur d'onde 5550 Å correspond à la couleur verte → les lunettes de soleil ont un reflet vert.

Le soleil et la peau :

Le soleil émet des longueurs d'onde de 3 000 Å et 50 000 Å. Entre le soleil et nous, il y a l'atmosphère qui filtre.

Intensité à la surface :	UV : 8 %	entre 0,2 µm et 0,4 µm
	Visible : 41 %	entre 0,4 µm et 0,4 µm
	IR : 51 %	entre 0,7 µm et 5 µm

Intensité



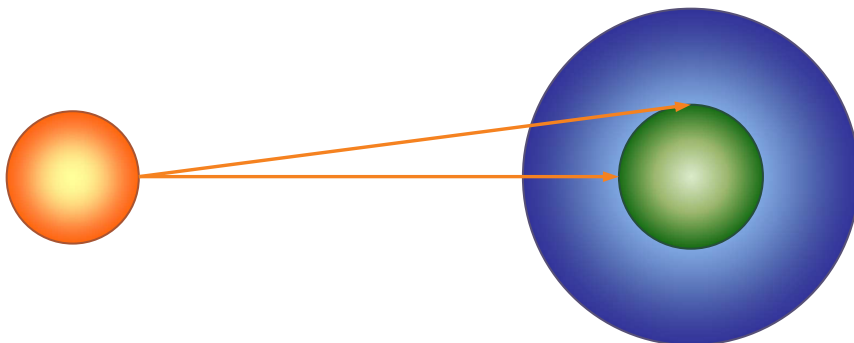
Spectre du soleil au zénith

Tout petit domaine en longueur d'onde qui fait réagir la peau (rougeurs)

→ Protection par une crème.

λ (en µm)

L'épaisseur de la couche d'atmosphère va jouer sur le filtrage (différence aussi entre le niveau de mer et l'altitude)

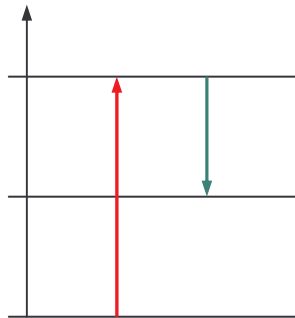


Le laser :

(Light Amplification by Stimulated Emission Radiation)

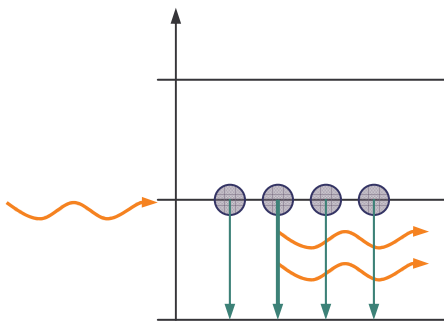
Il est souvent utilisé dans des applications médicales. Il est basé sur le principe du stockage d'énergie dans les structures atomiques et en la concentration de cette énergie.

Un électron va de la couche K vers une couche supérieure par excitation. Celui-ci va retomber de la couche M à K, lors de la réorganisation atomique, avec l'émission d'un photon.



Pour le laser, on utilise des matériaux tels que la retombée se fasse sur le niveau 2 (niveau métastable) pendant quelques millisecondes.

Il y a alors un fort peuplement d'électrons dans ce niveau. On parle d'inversion de population du niveau 1 au niveau 2.



On éclaire ensuite ces atomes ayant cette configuration avec des photons d'énergie $E = E_2 - E_1$.

Il y a une retombée des électrons du niveau 2 au niveau 1, avec 2 fois plus de photons d'énergie $E = E_2 - E_1$.

Il s'agit d'un stockage de l'énergie et de sa libération instantanée sous forme lumineuse. De plus, une direction fine du faisceau est possible.

Son utilisation :

- Show laser en discothèque,
- Applications médicales :
 - Chirurgie fine (soudure de petit vaisseaux sanguins),
 - Stérilisation (pas de contact avec les instruments),
 - Choix des réactions (avec le choix de couleur),
 - Chirurgie avec incision fine avec une diminution de la douleur,
 - Etc.
- Ophtalmologie (avec un laser excimètre : UV) :
 - Décollement de la rétine,
 - Défaut de vision par la modification de la forme de la cornée,
 - Etc.
- Détatouage (dissociation des molécules d'encre),
- Etc.

Origine des rayonnements Processus nucléaire

 Le noyau :

➤ Description rapide :

- Sa taille est de l'ordre du Fermi (10^{-15} m) de 1 à 10 fm.
→ La taille de l'atome est de l'ordre de l'angström (10^{-10} m)
- Sa masse constitue plus de 99 % de la masse de l'atome.
- Les forces qui y sont exercées sont des répulsions coulombiennes entre les protons. Pour les contrecarrer, il faut une force colossale : la force nucléaire.

Le noyau radioactif est un noyau instable. Le terme d'« atome radioactif » est mal adapté puisqu'il s'agit plus particulièrement du noyau.

La radioactivité est la seule transformation qui se fait toute seule.

➤ Nomenclature :

- Noyau :

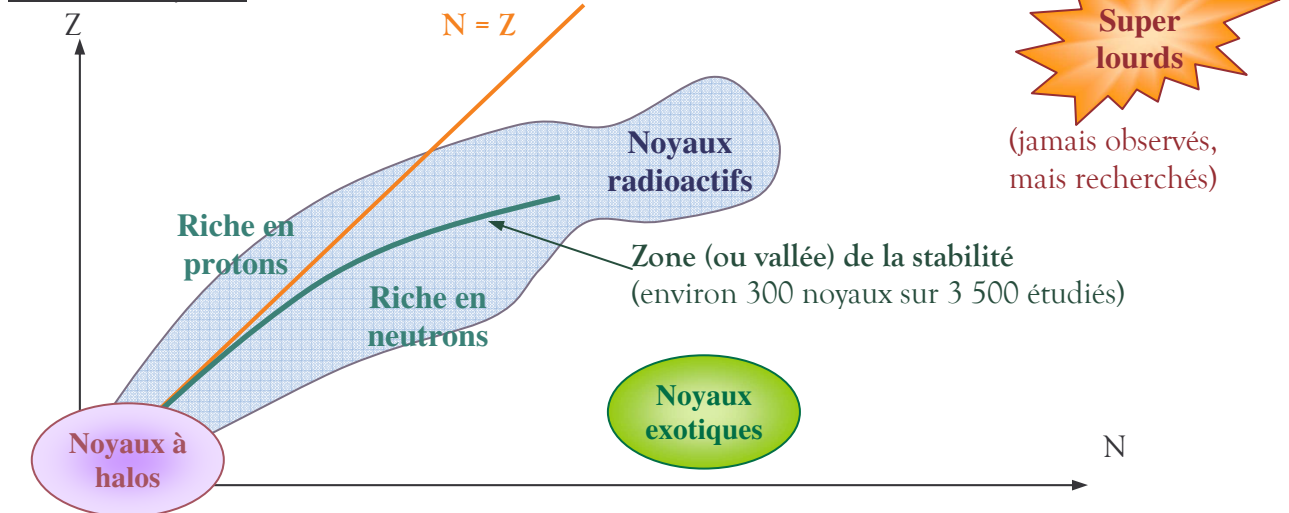
A : nombre de nucléons (= nombre de masse) 1 uma = 1 masse d'un nucléon

Z : nombre de protons (= de charge) = nombre d'électrons (pour un atome neutre)
 → Il permet la définition d'un élément chimique.

N : nombre de neutrons = $A - Z$

Exemple : L'élément Iode $53 \text{ protons} \rightarrow {}_{53}\text{I}$
et différents nombre de neutrons (127, 129, 131, 132, etc.)
 $\rightarrow$ Définition des différents isotopes de l'Iode.

Carte des noyaux :



Plus on s'éloigne de la vallée de stabilité, plus les noyaux sont instables et plus leur durée est courte.

On peut considérer que tous les noyaux sont radioactifs, mais avec des durées de vie plus ou moins longues.

Au dessus de la zone de stabilité, les noyaux sont riches en protons.

Ils en perdent lors de leur désintégration :

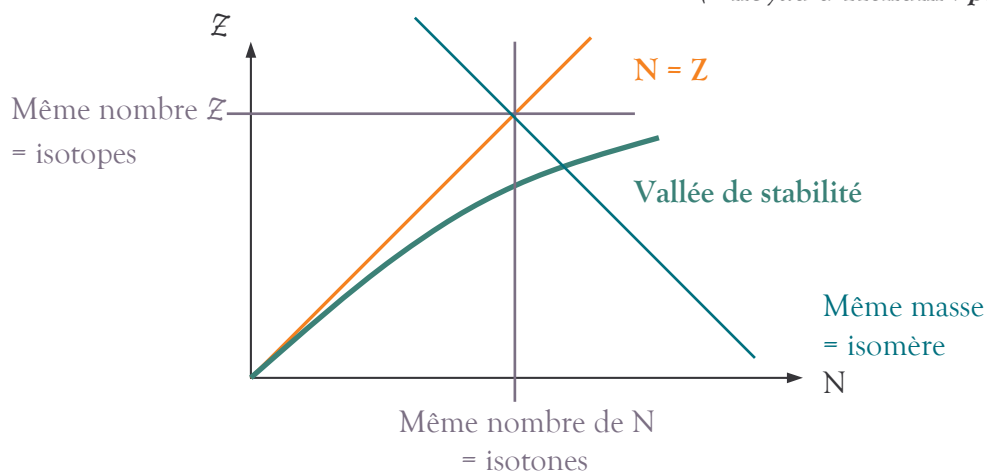
Proton $\rightarrow$ Neutron + β^+ + 1 neutrino

Au dessus de la zone de stabilité, les noyaux sont riches en neutrons.

Ils en perdent lors de leur désintégration :

Neutron $\rightarrow$ Proton + β^- + 1 antineutrino

Pour un noyau lourd, il y a une perte de matière avec l'émission d'une particule ${}^4_2\alpha$
(= noyau d'Hélium : pas d'électron !!)



▪ Réactions nucléaires :

Il s'agit du passage (ou transformation) d'un état initial « i » à un état final « f ».

Diffusion élastique : « i » $\Leftrightarrow$ « f » Exemple : ${}_0^1n + {}_{5}^{10}B \rightarrow {}_0^1n + {}_{5}^{10}B$

Diffusion inélastique : « i » $\neq$ « f » Exemple : $n + {}_{5}^{10}B \rightarrow {}_2^4\alpha + {}_3^7Li$
 $a + A \rightarrow b + B$

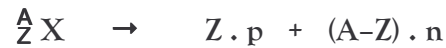
Bilan énergétique : $Q = m_a \cdot c^2 + m_A \cdot c^2 - m_b \cdot c^2 - m_B \cdot c^2$
 $= c^2 (m_a + m_A - m_b - m_B)$

$\rightarrow$ Le bilan énergétique consiste en fait en un bilan de masse.

$Q > 0$: $m_i > m_f$ $\rightarrow$ Production d'énergie
(souvent sous forme d'énergie cinétique des produits)
= réaction exothermique.

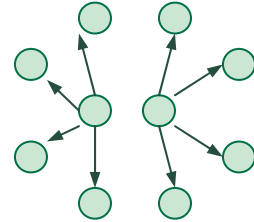
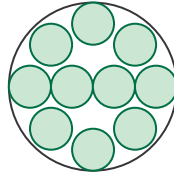
$Q < 0$: $m_i < m_f$ $\rightarrow$ Apport d'énergie cinétique par les réactifs
et consommation de cette énergie

❖ Énergie de liaison des noyaux :



L'énergie de liaison E , $E_{l_{A-Z}}$, est nécessaire pour éclater un noyau en Z protons et $(A-Z)$ neutrons.

Comment la calculer ?



$$m_X \cdot c^2 + E_{l_{A-Z}} = Z \cdot m_p \cdot c^2 + (A-Z) m_n \cdot c^2$$

$$E_{l_{A-Z}} = Z \cdot m_p \cdot c^2 + (A-Z) m_n \cdot c^2 - m_X \cdot c^2$$

On a besoin de connaître m_X (= la masse du noyau X) Or, on ne connaît que M_X (= masse de l'atome, donnée dans les tables)



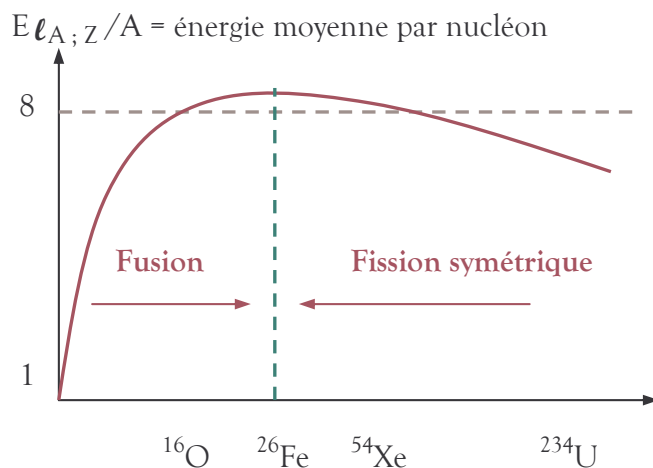
$$M_X \cdot c^2 + E_{l_{Ze}} = m_X \cdot c^2 + Z m_e \cdot c^2$$

$$m_X \cdot c^2 = M_X \cdot c^2 + E_{l_{Ze}} - Z m_e \cdot c^2$$

Pour l'Hydrogène : (1 proton et 1 électron) $m_p \cdot c^2 = M_H \cdot c^2 + E_{l_{(eH)}} - m_e \cdot c^2$

$$E_{l_{A;Z}} = Z \cdot M_H \cdot c^2 + Z \cdot E_{l_{Ze}} - \cancel{Z \cdot m_e \cdot c^2} + (A-Z) m_n \cdot c^2 - M_X \cdot c^2 - E_{l_{Ze}} + \cancel{Z \cdot m_e \cdot c^2}$$

$$E_{l_{A;Z}} = Z \cdot M_H \cdot c^2 + (A-Z) m_n \cdot c^2 - M_X \cdot c^2 + \underbrace{Z \cdot E_{l_{Ze}} - E_{l_{Ze}}}_{?}$$



Le noyau le plus stable est le Fer.

→ Il a la plus forte énergie par nucléon.

Noyau lourd $\rightarrow$ 2 noyaux légers



$$M_X \cdot c^2 = M_{X_1} \cdot c^2 + M_{X_2} \cdot c^2 + \Delta E$$

$$\begin{aligned} \Delta E &= M_X \cdot c^2 - [M_{X_1} \cdot c^2 + M_{X_2} \cdot c^2] \\ &= Z \cdot M_X \cdot c^2 - (A-Z) \cdot m_n \cdot c^2 + E_{\ell_{A;Z}} + E_{\ell_{A_1;Z_1}} - Z \cdot M_X \cdot c^2 - (A_1-Z_1) \cdot m_n \cdot c^2 + E_{\ell_{A_2;Z_2}} + \\ &\quad Z \cdot M_X \cdot c^2 - (A_2-Z_2) \cdot m_n \cdot c^2 \end{aligned}$$

$$\Delta E = E_{\ell_{A_1;Z_1}} + E_{\ell_{A_2;Z_2}} - E_{\ell_{A;Z}}$$

$$\Delta E = A_1 \cdot E_{\ell_{A_1;Z_1}} / A_1 + A_2 \cdot E_{\ell_{A_2;Z_2}} / A_2 - A \cdot E_{\ell_{A;Z}} / A$$

$$\left. \begin{aligned} E_{\ell_{A_1;Z_1}} / A_1 &> E_{\ell_{A;Z}} / A \\ E_{\ell_{A_2;Z_2}} / A_2 &> E_{\ell_{A;Z}} / A \end{aligned} \right\} \Delta E > 0$$

$$\begin{aligned} E_{\ell_{A-Z}} &= Z \cdot M_H \cdot c^2 + (A-Z) m_n \cdot c^2 - M_{A;Z} \cdot c^2 \\ &= \Delta m \cdot c^2 \end{aligned}$$

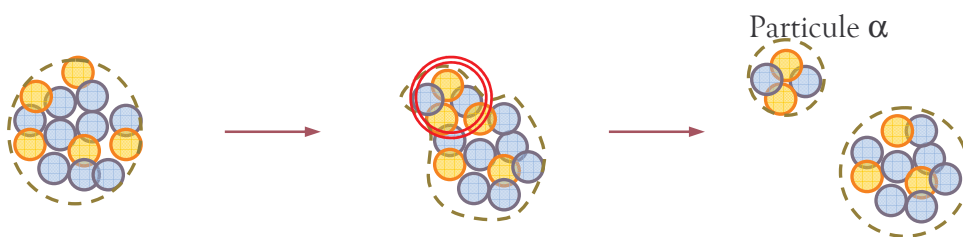
$\rightarrow$ Énergie = Masse Cette formule rappelle celle d'Einstein : $E = m \cdot c^2$

$E_{\ell_{A-Z}}$ correspond à l'organisation (ou configuration) des nucléons dans le noyau.

❖ Radioactivité :

Pour une énergie $E_{\ell_{A-Z}}$, il y a un grand nombre de configurations des nucléons possibles.

Soit : n_S : le nombre de configurations stables,
 n_{IS} : le nombre de configurations instables.



Sur un temps infini, la probabilité totale de transformer sa configuration = $n_{IS} / (n_S + n_{IS})$

La constante radioactive λ est la probabilité pour un noyau de se désintégrer par unité de temps.

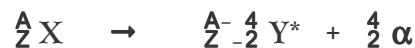
Si $\lambda = 0$, le noyau est rigoureusement stable ;

Si $\lambda \neq 0$, le noyau est instable (ou radioactif), c'est-à-dire avec une certaine probabilité de se désintégrer.

➤ Processus de désintégration :

▪ Processus α :

Cela concerne les noyaux lourds.



Cette désintégration entraîne une pagaille dans les nucléons qui restent dans le noyau. Donc celui-ci est sûrement dans un état excité (l'organisation des nucléons n'est pas idéale)

La durée de vie de cet élément excité est très courte (10^{-15} s) Il y a des cas où elle est plus longue (supérieure à 10^{-9} s) On parle d'état isomère ou métastable (vu avec le laser)

Retour à un état stable :



Qu'est-ce qui nous intéresse dans ce processus ?

Les particules α sont arrêtées dans l'air ; il n'y a un problème que s'il y a un contact direct avec la peau, en cas d'ingestion ou en cas d'inhalation.

Les photons γ sont plus dangereux car ils traversent de grandes épaisseurs d'air.

→ $E\alpha$?

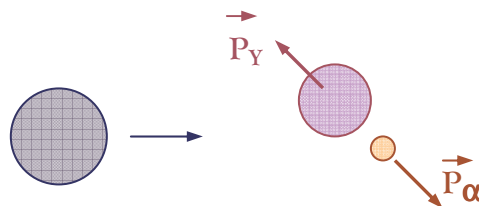
Principe de conservation de l'énergie :

$$M_X \cdot c^2 = M_Y \cdot c^2 + M_\alpha \cdot c^2 + T_\alpha + T_Y + E_Y^*$$

$$Q_\alpha = M_X \cdot c^2 - M_Y \cdot c^2 - M_\alpha \cdot c^2 = T_\alpha + T_Y + E_Y^*$$

Principe de conservation de la masse :

$$\vec{0} = \vec{P}_\alpha + \vec{P}_Y$$



$$T = P^2/2M$$

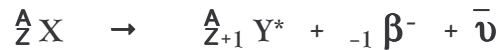
$$P_\alpha = P_Y$$

$$Q_{\alpha} = P_Y^2/2M_Y + P_{\alpha}^2/2M_{\alpha} + E_Y^* = P_{\alpha}^2/2M_{\alpha} (1 + M_{\alpha}/M_Y) + E_Y^*$$

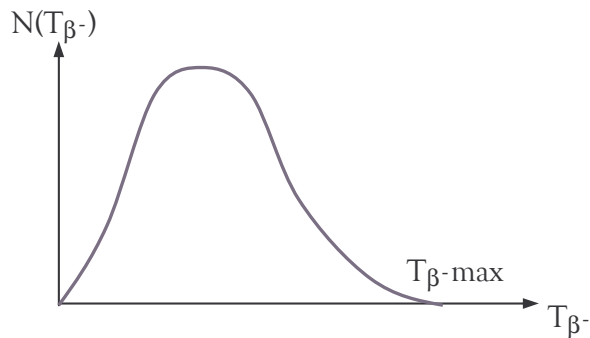
$$Q_{\alpha} = T_{\alpha} (1 + M_{\alpha}/M_Y) + E_Y^*$$

Donné pour les tables Mesuré Donné pour les tables Mesuré

▪ Processus β^- :



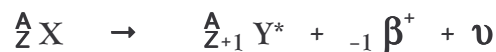
Un neutron est transformé en un proton.



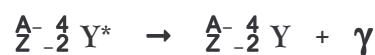
Le β^- peut avoir toutes les énergies possibles de 0 à $T_{\beta^- \text{-max}}$ à cause de la présence de $\bar{\nu}$ dont l'énergie varie



▪ Processus β^+ :

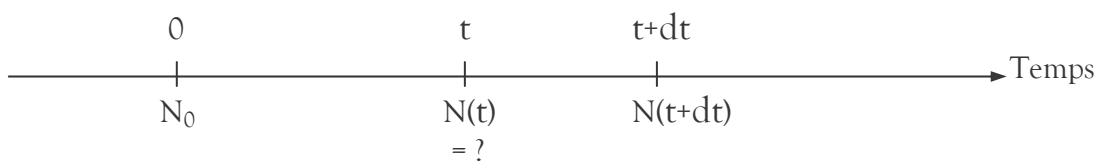


Un proton est transformé en un neutron.



➤ Décroissance radioactive :

Le noyau est le seul objet capable de se transformer.



$$dN = N(t+dt) - N(t) = -\lambda \cdot N(t) \cdot dt$$

$$\begin{aligned} dN/N &= -\lambda dt & \rightarrow & \int dN/N = \ln N \\ \ln N &= -\lambda.t + C & & C = \text{constante} \end{aligned}$$

$$N(t) = e^{\ln[N(t)]} = e^{-\lambda t + C} = e^C \cdot e^{-\lambda t}$$

$$N(t) = e^C \cdot e^{-\lambda t}$$

Détermination de e^C :

$$N(t=0) = e^C \cdot e^{-\lambda \cdot 0}$$

$$N_0 = e^C$$

$$\rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Δ λ ressemble à la probabilité d'interaction du photon dans la matière : $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$
 x correspond alors à l'épaisseur de la matière ; alors qu'ici t correspond à l'évolution dans le temps.

➤ Nomenclature :

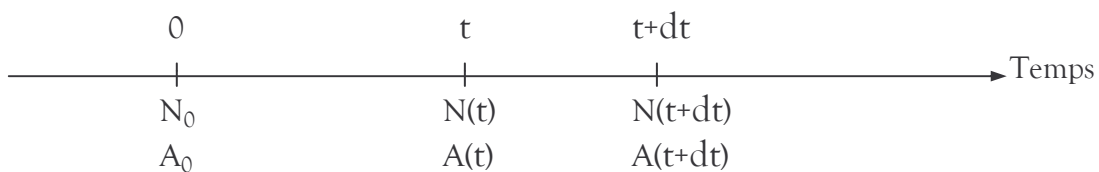
▪ Activité :

Il s'agit du nombre de désintégrations par unité de temps à la date t .

Son unité est le Becquerel : $1 \text{ Bq} = 1 \text{ désintégration par seconde.}$

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}$$

Historiquement, 1 Curie correspond au nombre de désintégrations d'un gramme de Radium (Rn) par seconde.

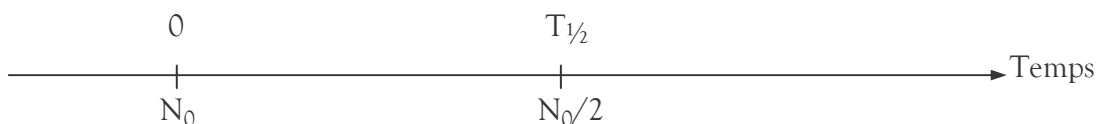


$$A(t) = \lambda \cdot N(t) = \lambda \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda t} = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Avec A_0 : l'activité d'un échantillon à $t = 0$

▪ Période :

Elle correspond au temps au bout duquel la moitié des noyaux se sont désintégrés.



$$N(t = T_{1/2}) = \cancel{N_0}/2 = \cancel{N_0} \cdot e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$e^{-\lambda T_{1/2}} = \frac{1}{2} \quad \rightarrow \quad \ln e^{-\lambda T_{1/2}} = -\ln 2$$

$$\lambda \cdot T_{1/2} = \ln 2 \quad \rightarrow \quad \boxed{T_{1/2} = \ln 2 / \lambda}$$

troponine	0	$T_{1/2}$	$2 T_{1/2}$	...	$10 T_{1/2}$
N	N_0	$N_0/2$	$N_0/4$	...	$N_0/1024$

$$\text{À } t = n T_{1/2} \quad N(t) = N_0 / 2^n$$

$$N(t = n T_{1/2}) = N_0 \cdot e^{-\lambda n T_{1/2}} = N_0 \cdot e^{-\ln 2 / T_{1/2} \cdot n T_{1/2}}$$

$$= N_0 \cdot e^{-n \ln 2} = N_0 \cdot 2^{-n} = N_0 / 2^n$$

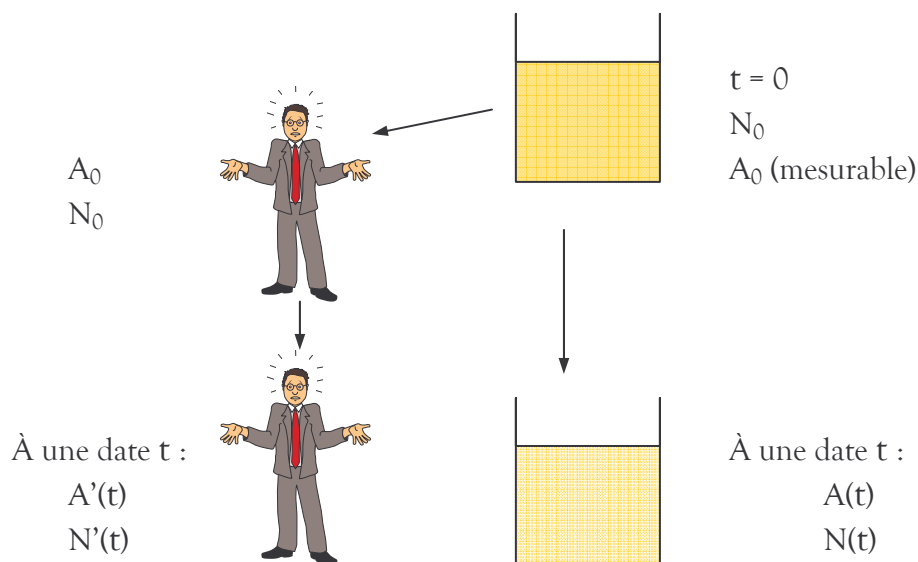
Exemple de Tchernobyl :

Le ^{137}Cs dans l'environnement a une période de 30 ans.

De 1986 à 2005, il y a eu 19 ans. Il reste plus de la moitié Césium initial dans l'environnement.

▪ Période biologique :

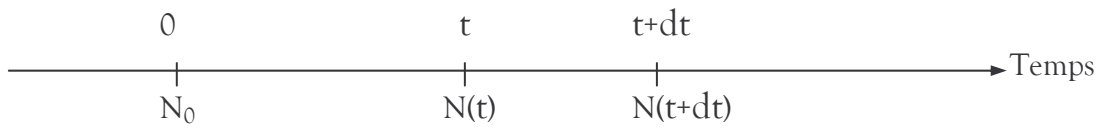
Soit un échantillon liquide avec quelques noyaux radioactifs.



$$A'(t) < A(t)$$

parce que des noyaux radioactifs se sont échappés de l'individu par la transpiration, les excréments et les urines.

Dans le bonhomme :



$$dN = -\lambda_p \cdot Ndt - \lambda_b \cdot Ndt$$

λ_p : Constante radioactive physique.

λ_b : Probabilité pour un noyau radioactif (l'élément chimique correspondant) d'être éliminé par l'organisme.

$$dN = -(\lambda_p + \lambda_b) \cdot Ndt = -\lambda_{\text{effectif}} \cdot Ndt$$

Intégration :

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda_{\text{effectif}} t} = N_0 \cdot e^{-(\lambda_p + \lambda_b) t}$$

Application médicale :

L'injection de produits radioactifs dans le sang permet de déterminer le volume du sang par un rapport de dilution (qui se fait en quelques secondes)

Exemple de l'Iode, le rapport de dilution dans le sang est très faible. En effet, quasiment tout l'Iode se fixe dans la thyroïde et donc il est sorti du système sanguin.

Donc si l'on calcule le rapport de dilution dans le sang, il sera faussé et on trouvera quelques centaines de m³.

L'injection de produits radioactifs constitue une contamination ; donc il faut faire attention aux doses.

Exemple : L'élément ¹³¹I :

T_b : 139 jours

T_p : 8,04 jours

T_b : la période biologique ; c'est le temps mis par l'organisme pour rejeter la moitié de l'élément (au sens chimique)

$$T_b = \ln 2 / \lambda$$

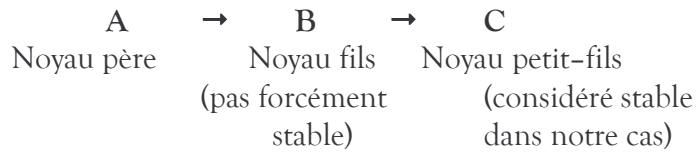
$$T_p = \ln 2 / \lambda$$

Donc $\lambda_{\text{effective}} = \lambda_p + \lambda_b = \cancel{\ln 2 / T_p} + \cancel{\ln 2 / T_b} = \cancel{\ln 2 / T_{\text{effective}}}$

$$\rightarrow \ln 2 / T_{\text{effective}} = 1/T_p + 1/T_b$$

ΔEt pas une somme directe !

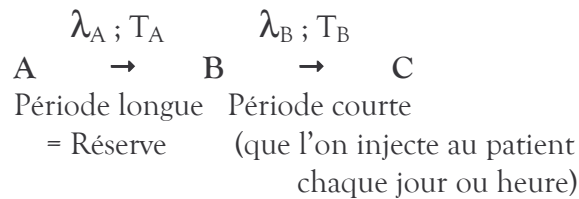
➤ Filiation radioactive :



Exemple : L'examen médical :

Sur le temps d'étude, il faut que l'on ait un phénomène produit, donnant lieu à une observation médicale.

Souvent :



Il faut connaître : $N_A(t)$; $N_B(t)$ et $N_C(t)$

0	t	t+dt	
N_0	$N_A(t)$	$N_A(t+dt)$	→ Temps
	$N_B(t)$	$N_B(t+dt)$	
	$N_C(t)$	$N_C(t+dt)$	

À t = 0 :

On suppose que $N_A(t=0) = N_0$ → Il n'y a que des noyaux A
 $N_B(t=0) = 0$
 $N_C(t=0) = 0$

À une date t quelconque :

$$N_A(t) + N_B(t) + N_C(t) = N_0$$

Nombre de noyaux A :

$$dN_A = -\lambda_A N_A dt \quad \rightarrow \quad dN_A/N_A = -\lambda_A dt$$

Intégration : $\ln N_A = -\lambda_A \cdot t + a$

$$N_A(t) = e^{-\lambda_A t + a} = e^{-\lambda_A t} \cdot e^a \quad N_A(t=0) = N_0 = 1 \cdot e^a$$

$$N_A(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda_A t}$$

Nombre de noyaux B :

$$dN_B = \lambda_A N_A dt - \lambda_B N_B dt$$

Solution partielle : $dN_B = -\lambda_B N_B dt \rightarrow N_B(t) = B_1 \cdot e^{-\lambda_B t}$

Solution générale : $N_B(t) = B_1(t) \cdot e^{-\lambda_B t}$

On accepte que B_1 ne soit pas une constante et dépende du temps pour prendre en compte $\lambda_A N_A dt$. *On va donc bidouiller B_1 pour qu'elle soit valable tout le temps.*

Dérivation de $B_1(t) \cdot e^{-\lambda_B t}$:

$$dB_1/dt \cdot e^{-\lambda_B t} + B_1 \cancel{(-\lambda_B) e^{-\lambda_B t}} = B_1 \cancel{(-\lambda_B) e^{-\lambda_B t}} + \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t}$$

$$dB_1/dt \cdot e^{-\lambda_B t} = \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t}$$

$$\rightarrow dB_1/dt = \lambda_A N_0 e^{-(\lambda_A - \lambda_B) t}$$

Intégration :

$$B_1 = \frac{\lambda_A N_0}{\lambda_B - \lambda_A} e^{-(\lambda_A - \lambda_B) t} + B_2 \quad \text{avec } B_2 = \text{constante}$$

$$N_B(t) = B_1(t) \cdot e^{-\lambda_B t} = (\lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A) \cdot e^{-\lambda_A t} + B_2 \cdot e^{-\lambda_B t}$$

$$N_B(t=0) = 0 = (\lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A) \cdot 1 + B_2 \cdot 1$$

$$\rightarrow B_2 = -(\lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A)$$

$$N_B(t) = (\lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A) [e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}]$$

Nombre de noyaux C :

$$N_C(t) = N_0 - N_A(t) - N_B(t)$$

Activité :

$$A_A(t) = \lambda_A N_A(t) = \pm \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t} \text{ de même : } A_B(t) = \lambda_B N_B(t) = \frac{\lambda_B \cdot \lambda_A \cdot N_0}{\lambda_B - \lambda_A} \cdot [e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}]$$
$$A_C(t) = 0 \quad (\text{les noyaux sont stables})$$



Cas particulier : $T_A \gg T_B$

$$A_B(t) = \lambda_B (\lambda_A N_0) / (\lambda_B - \lambda_A) [e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}]$$

Si $T_A \gg T_B$; alors $\lambda_A \ll \lambda_B$.

Donc il existe un temps t tel que : $T_A \gg t \gg T_B$

$$e^{-\lambda_A t} = e^{-\ln 2 t / T_A}$$

$$e^{-\lambda_B t} = e^{-\ln 2 t / T_B} \text{ qui tend vers } 0$$

$$A_B(t) = \cancel{\lambda_B} \lambda_A N_0 / (\cancel{\lambda_B} - \lambda_A) \cdot e^{-\lambda_A t} = \lambda_A N_0 e^{-\lambda_A t} = A_A(t)$$

négligeable

Autre cas de figure :

Soit T_A et T_B quelconques (avec des valeurs standard)

À $t = 0$:

$$N_A(t=0) = N_0$$

$$N_B(t=0) = 0$$

$$N_C(t=0) = 0$$

Quand t tend vers ∞ :

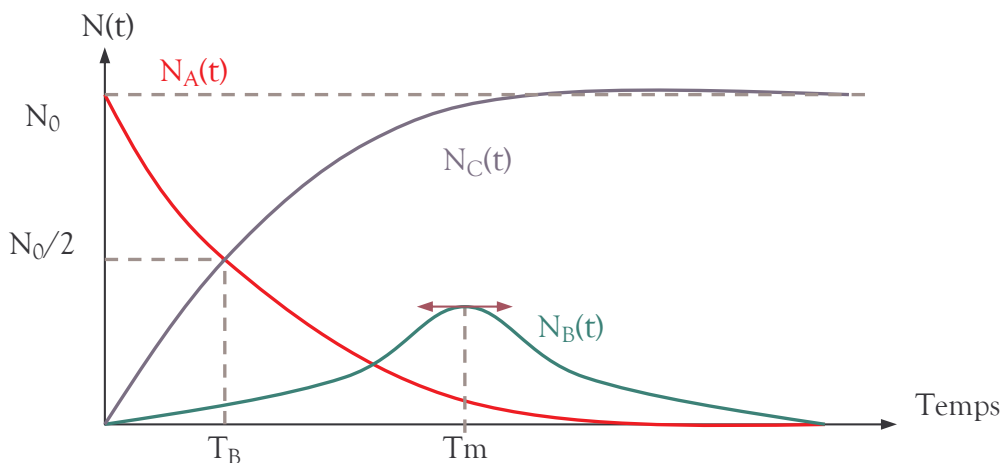
N_A tend vers 0

N_B tend vers 0

N_C tend vers N_0

On remarque que N_B part de 0 et va vers 0.

Hum hum...



$$N_B(t) = (\lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A) [e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t}]$$

$$dN_B(t)/dt = (\lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A) [-\lambda_A \cdot e^{-\lambda_A t} + \lambda_B \cdot e^{-\lambda_B t}]$$

Pour le temps $t = T_m$: $dN_B/dt = 0$

$$\text{Donc : } -\lambda_A \cdot e^{-\lambda_A T_m} = \lambda_B \cdot e^{-\lambda_B T_m}$$

$$T_m = 1/(\lambda_B - \lambda_A) \cdot \ln(\lambda_A/\lambda_B) \quad e^{-\lambda_B T_m} = (\lambda_A/\lambda_B) e^{-\lambda_A T_m}$$

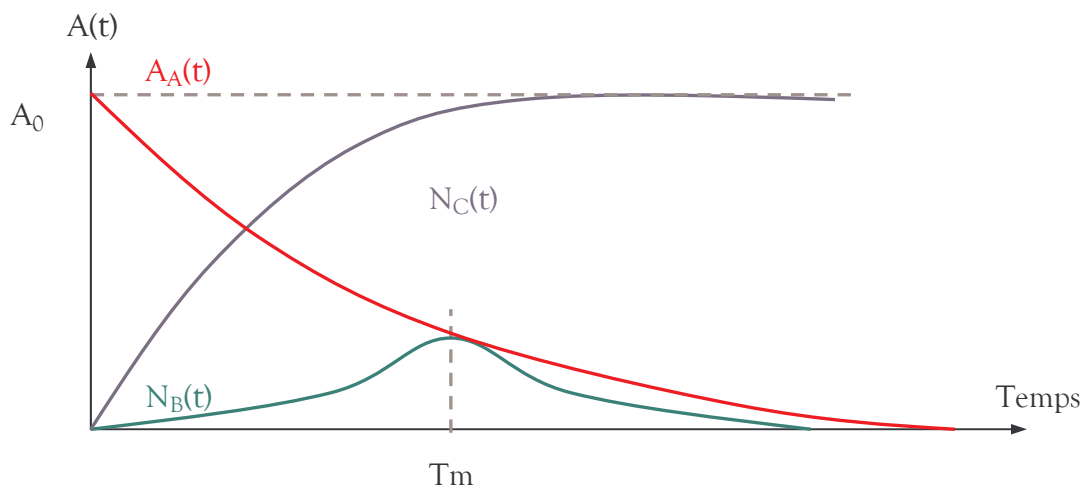
$$A_B(t=T_m) = (\lambda_B \lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A) [e^{-\lambda_A T_m} - (\lambda_A/\lambda_B) e^{-\lambda_A T_m}]$$

$$= (\lambda_B \lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A) \cdot e^{-\lambda_A T_m} [1 - (\lambda_A/\lambda_B)]$$

$$= \cancel{(\lambda_B \lambda_A N_0)/(\lambda_B - \lambda_A)} \cdot e^{-\lambda_A T_m} [\cancel{(\lambda_A - \lambda_B)/\lambda_B}]$$

$$= \lambda_A \cdot N_0 \cdot e^{-\lambda_A T_m}$$

$$= A_A(t=T_m)$$



Pour les filiations des grandes familles de radioéléments, les désintégrations amènent à chaque fois vers le plomb Pb.

Cet élément présente un nombre de nucléons dit « magique » qui le rend très stable.