

Interaction rayonnement ionisant-matière

Fiche complète

I. Introduction aux rayonnements ionisants

A. Définition

Un rayonnement ionisant (RI) est un **rayonnement électromagnétique** (REM) ou **particulaire/corpusculaire** capable de produire **directement** ou **indirectement** des ionisations d'atomes lors de sa traversée de la matière.

Une ionisation est un rayonnement (électromagnétique ou particulaire) qui va atteindre un atome de la substance qu'il traverse, il **interfère avec un électron** de cet atome et **l'expulse** de l'édifice atomique.

B. Intérêt des RI en santé

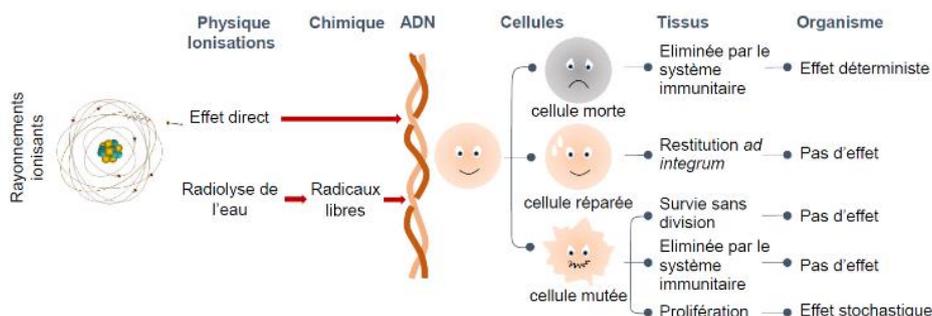
La pénétration des rayonnements dans les tissus implique des effets biologiques (directs ou indirects sur l'ADN).

Dans l'ordre, l'ionisation des atomes de la matière va entraîner des effets chimiques, qui pourront avoir **des effets sur l'ADN**. Ces effets se traduiront alors à l'échelle de la cellule, des tissus, voire de l'organisme.

De plus, les RI sont utilisés pour **l'exploration diagnostique** ainsi que pour certains **traitements** (système d'imagerie, compteurs, dosimètres...).

Petite intervention qui fait plaisir : Coucou, les petits P1, pour être sûre que ma leçon était à jour et qu'il n'y avait pas de grandes notions oubliées, j'ai révisé les vidéos. Je me suis rendue compte que le prof n'avait pas mis une des vidéos sur les RI correspondant à « l'introduction aux RI » (malheureusement elle est très courte)

Donc si vous voulez vous pouvez ne pas apprendre l'exemple qui suit et le C) Fondement physique. Si j'étais vous j'apprendrais juste la fin du C (la provenance des RI) Fin de l'intervention <3



Exemple de cas clinique :

On reçoit un homme de 52 ans, fumeur, qui présente des douleurs thoraciques et de la toux.

*Voilà un exemple de tomodensitométrie (scanner) : on utilise ici **des rayons X**, qui sont des rayonnements ionisants.*

On voit ici une zone plus claire dans le poumon droit, qui correspond probablement à une tumeur pulmonaire.



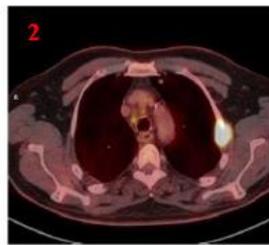
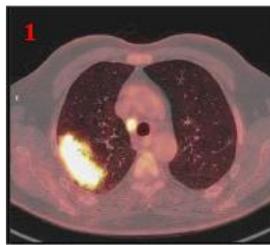
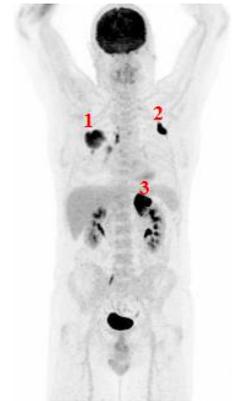
*On réalise un autre examen d'imagerie : une tomographie par émission de positons (TEP) au 18-FDG, une molécule de glucose à laquelle on a attaché un **atome radioactif de fluor 18**, émetteur de **radioactivité β^+** .*

Cette technique peut également être couplée au scanner, on aperçoit ici :

- 1- La tumeur pulmonaire avec une lésion d'un ggg du médiastin
- 2- Une métastase osseuse costale
- 3- Une métastase au niveau de la surrénale gauche

*On peut alors décider du **traitement le plus adapté** : une radiothérapie, utilisant des RX de haute énergie. On voit donc l'intérêt des RI dans le diagnostic et le traitement.*

*Petit rappel : certains organes ont **physiologiquement** besoin d'un apport important en glucose ce qui explique qu'ils fixent abondamment le 18 FDG et qu'ils apparaissent en noir. C'est le cas du **cerveau**, du **rein** et de la **vessie**. Il ne faut pas confondre ces zones physiologiques avec des métastases !*



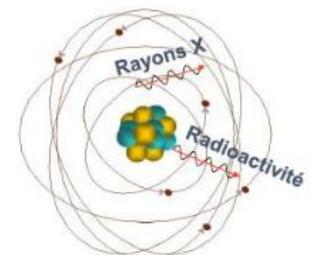
C. Fondements physiques

Les physiciens du corps humain :

- Wilhem Cd Röntgen : les rayons X, 1895 (Nobel de physique 1901)
- Henri Becquerel, Pierre Curie et Marie Curie née Sklodowska : la radioactivité naturelle, 1896 (Nobel de physique 1903)
- Marie Curie : le radium et le polonium, 1898 (Nobel de Chimie 1911)
- Frédéric et Irène Joliot-Curie : la radioactivité artificielle, 1934 (Nobel de chimie 1935)

Les RI proviennent de l'atome mais pas forcément du même niveau :

les **rayons X** qui proviennent de l'EXTERIEUR du noyau
la **radioactivité**, qui provient du NOYAU lui-même.



A partir de là, il y a les vidéos sur Moodle donc on apprend...

II. Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

Un **rayonnement** (électromagnétique ou particulaire) qui traverse la matière, lui **transfert une partie de son énergie** par :

- Échauffement
- Excitation
- Ionisation

Cette interaction se traduit par un transfert d'énergie **entre rayonnement et la matière**.

Cela a de l'importance pour :

- **Les explorations médicales** : interaction pour **détecter un rayonnement** (interactions dans le patient puis interactions rayonnement/détecteur pour l'imagerie).
- **La santé** : les interactions sont la **première étape de l'action biologique** des rayonnements (intérêt en radiothérapie et en radioprotection).

Les rayonnements (électromagnétiques ou particulaires) qui traversent un milieu vont interagir avec les atomes mais surtout ils **entrent en « collision »** avec les éléments de ce milieu, essentiellement les **électrons** des atomes. Ce qu'on appelle interaction correspond à un échange d'énergie entre le rayonnement et la matière(=atome).

On lui décrira 3 aspects :

- **L'interaction élémentaire** : transfert d'énergie, mécanisme, probabilité...
- **Les conséquences pour le rayonnement** : perte d'énergie, déviation, ralentissement...
- **Les conséquences pour la matière** : absorption et restitution d'énergie...

Pour décrire les interactions élémentaires, on prendra l'exemple des photons (rayonnements électromagnétiques).

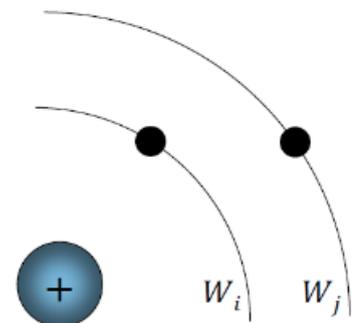
Quelques conventions d'écriture :

Photon $E = h\nu$

Atomes de la matière selon le modèle de Bohr ($K, L, M...$)

Energie de l'électron = W_i

Energie de liaison de l'électron = $|W_i|$



A. Interactions élémentaires

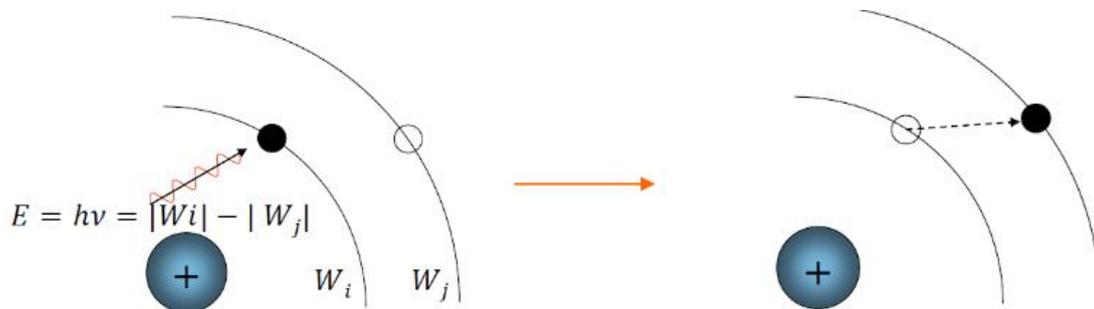
1. Interaction par excitation :

L'atome peut **absorber l'énergie apportée par un photon** incident.

Si $E = h\nu$ est inférieure à l'énergie de liaison de l'électron ($E < W_i$) et correspond exactement à l'écart entre deux énergies de liaison ($E = |W_i| - |W_j|$), **l'électron change d'orbite** (sur une case quantique libre) en utilisant cette énergie.

Il y a EXCITATION car l'atome passe de son état fondamental (=couche les plus basses remplies) à un **excès d'énergie** qui vaut : $E = |W_i| - |W_j|$.

L'énergie absorbée est QUANTIFIÉE (elle ne peut prendre comme valeurs que les différences d'énergie de liaison des électrons entre deux couches).



On voit ici un photon entrer en contact avec un électron d'une couche notée i , son énergie est égale à la différence d'énergie de liaison entre les couches i et j . L'atome passe dans un état excité avec un excès d'énergie, avec l'électron qui se retrouve sur la couche j .

2. Interaction par ionisation :

Si $E = h\nu$ est supérieure ou égale à l'énergie de liaison $|W_i|$ d'un électron, celui-ci est **expulsé**, il y a alors **IONISATION** de l'atome.

L'atome passe de son état fondamental à un **excès d'énergie** qui vaut $|W_i|$.

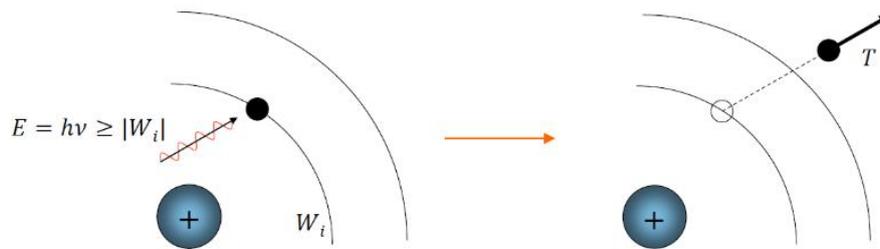
L'électron est alors expulsé avec une énergie cinétique T :

On a $E = h\nu = W_i + T$ et $T = h\nu - |W_i|$

Une partie de l'énergie incidente du photon est **consommée** pour expulser l'électron, ça correspond à l'énergie de liaison $|W_i|$.

Le reste de l'énergie est **apportée à l'électron** sous forme d'énergie cinétique T .

L'énergie absorbée n'est PAS QUANTIFIÉE (tant que l'énergie du photon est supérieure à l'énergie de liaison de l'électron, celle-ci peut prendre n'importe quelle valeur).



On voit ici que le photon incident a une énergie supérieure à l'énergie de liaison d'un électron d'une couche i , ce qui va permettre de l'expulser de l'atome **avec une énergie cinétique** T .

B. Caractère ionisant ou non d'un rayonnement

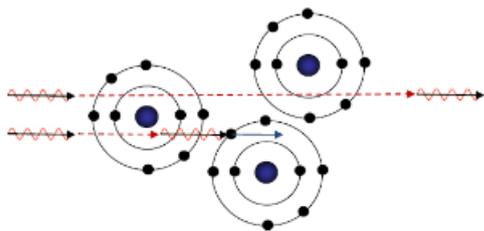
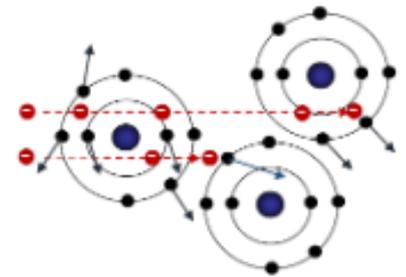
1. Rayonnements directement et indirectement ionisants :

Les **particules chargées** ont des interactions **coulombiennes obligatoires** avec la matière, puisqu'elle est elle-même chargée. Ce sont des interactions **électrostatiques** qui peuvent avoir lieu même à **distance** de la trajectoire.

Si elles sont chargées **positivement** elles vont **attirer** les électrons et si elles sont chargées **négativement** elles vont **repousser** les électrons

Exemples de particules chargées : α^{2+} ; β^- ; β^+ ; e^- ; p^+

Ces particules **directement ionisantes**.



Les **REM** (rayonnement électro-magnétique) et les **particules neutres** ont des interactions **non-obligatoires** : **balistiques** (statistiques).

Ils sont **indirectement ionisants**, par les électrons mis en mouvement (avec les photons γ et X) ou par les protons secondaires 0_1n .

2. Caractère ionisant des REM :

Voici les énergies de liaison des principaux atomes biologiques (pas à retenir) :

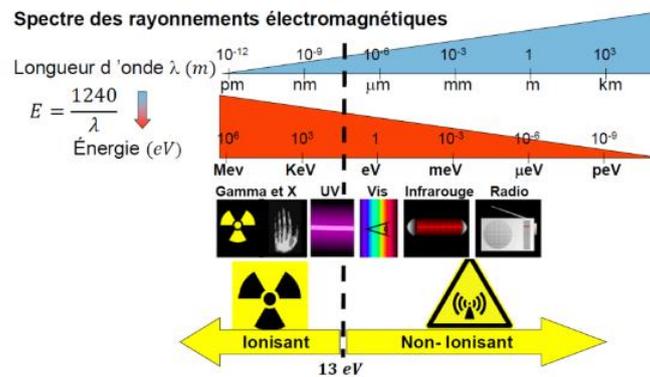
On va donc définir comme limite $|WH_2O| \cong 13,6 \text{ eV}$, cela correspond à la limite entre les REM ionisants et non ionisants.

Ainsi :

- Si $E \geq 13,6 \text{ eV} \rightarrow$ **REM ionisant++**
- Si $E < 13,6 \text{ eV} \rightarrow$ **REM non ionisant++**

Atome	$ W $ (eV)
C	11,24
H	13,54
O	13,57
N	14,24

En plaçant cette limite sur notre spectre des REM, on voit que les rayons gamma, X et une partie des UV sont **ionisants**, et que **l'autre partie des UV**, le **visible**, les **ondes infrarouge** et **radio** sont **non-ionisants**.



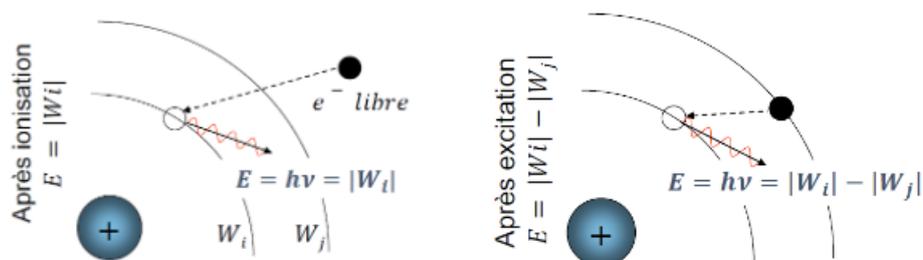
C. Conséquences pour la matière

1. Emission d'un photon de fluorescence :

L'atome excité ou ionisé n'est plus dans son état fondamental, il possède un **excès d'énergie** (il est instable).

Il tend à retourner à son **état fondamental** (se désexciter) pour retrouver son **architecture initiale** (la répartition qu'il a à l'état fondamental) et restituer l'excès d'énergie (qui lui a été apporté par le rayonnement).

Un électron vient combler la case quantique laissée vacante, et un **photon dit de fluorescence** $E=hf$ est émis, E étant égale à l'excès d'énergie qui est libéré.

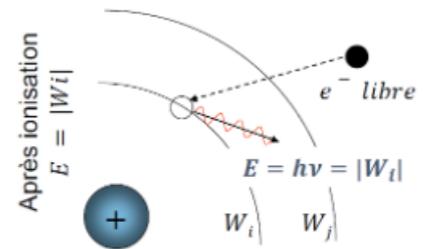


Après une **ionisation**, il manque un électron dans l'atome donc on aura besoin d'un électron libre du milieu extérieur, alors qu'après une **excitation** on a le bon nombre d'électrons dans l'atome il s'agit d'un simple réarrangement de leurs positions.

Le retour à l'état fondamental peut se faire de manière directe ou via une **cascade de réarrangement**.

- Ionisation avec retour à l'état fondamental de manière direct :

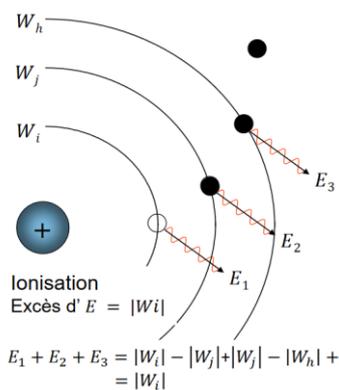
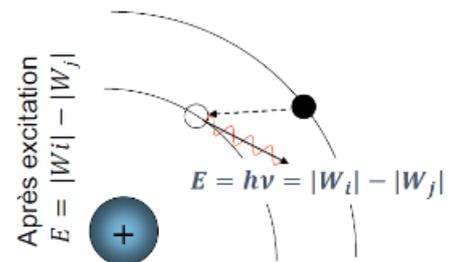
Après ionisation d'un électron d'une couche i il y a une place laissée vacante sur la couche i qui peut venir être comblée par un électron libre qui vient de l'extérieur. En venant, il va générer un photon de fluorescence d'énergie E qui correspond l'énergie de liaison de l'électron sur la couche i (qui correspond à l'excès d'énergie qu'avait l'atome ionisé)



- Excitation avec retour à l'état fondamental de manière direct :

Après excitation où l'atome a un excès d'énergie égal à $|W_i| - |W_j|$, l'électron qui a été positionné (sur une couche plus périphérique) peut revenir sur cette vacance électronique de la couche i . Il va émettre un photon de fluorescence qui sera égal à $|W_i| - |W_j|$

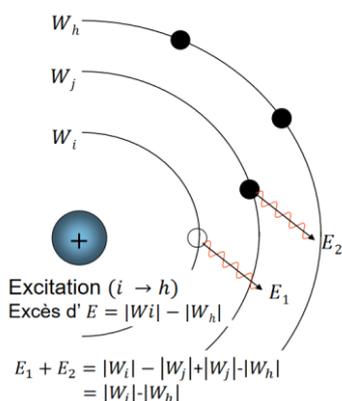
L'atome va restituer son excès d'énergie sous la forme de son photon de fluorescence.



- Ionisation avec retour à l'état fondamental de manière indirect :

Un électron de la couche j peut combler la case vacante sur i et donner un photon de fluorescence E_1 : une nouvelle case vacante se formera sur la couche j . Cette case vacante peut être comblée par un électron de la couche h et produire un photon E_2 . La nouvelle case vacante sur la couche h peut être comblée par un électron libre qui produira un troisième photon de fluorescence E_3 .

La somme des énergies de tous les photons émis reste égale à l'excès d'énergie qu'avait l'atome après son ionisation.



- Excitation d'un électron de la couche i à h avec retour à l'état fondamental de manière indirecte :

La case peut être comblée par un électron de la couche j qui produit un premier photon de fluorescence E_1 . Cette vacance d'électron sur la couche j peut être comblée par un électron de la couche h qui produit un deuxième photon de fluorescence E_2 .

Encore une fois, la somme des énergies de tous les photons émis est égale à l'excès d'énergie qu'avait l'atome après son excitation.

Ce qu'il y a au-dessus, c'est pas à apprendre par cœur mais surtout à comprendre pqc c'est pas des QCM de leçon qui tombent mais plus les QCM de calculs++

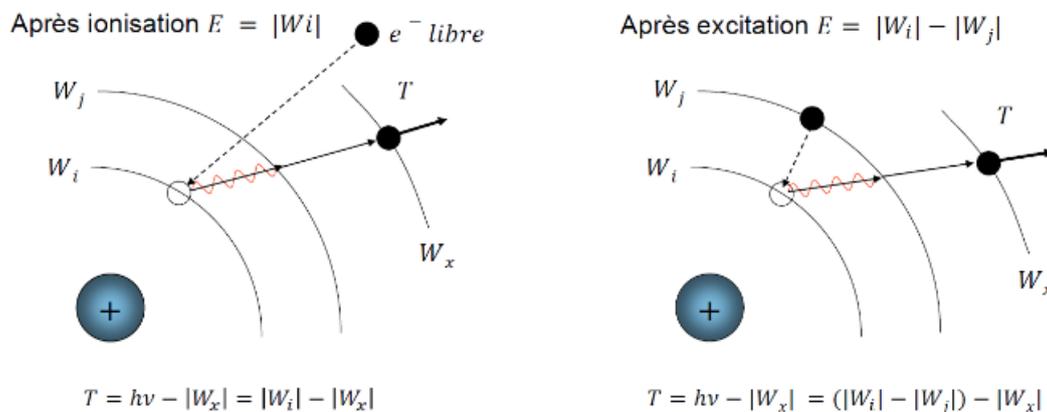
2. Emission d'un électron Auger

Un photon de fluorescence peut lui-même expulser un électron de l'atome qui lui a donné naissance : **électron Auger** (électron volontiers périphérique)

Energie cinétique de l'électron Auger : $T = \text{l'excès d'énergie de l'atome } E - |W_x|$
(il faut comprendre ici que E correspond de fait à l'énergie du photon de fluorescence émis, en supposant qu'il n'y ait pas eu de cascade de réarrangement)

Après ionisation, l'atome a une vacance électronique sur la couche i. Admettons que cette vacance soit comblée par un électron libre directement. Il y a donc émission d'un photon de fluorescence dont l'énergie est égale à W_i . Ici, ce photon de fluorescence va arracher un autre électron plus périphérique par exemple sur la couche x.

Cet électron aura une énergie cinétique $T = h\nu - |W_x| = |W_i| - |W_x|$



Conclusion sur les conséquences pour la matière :

Un atome ionisé ou excité peut retourner à son état fondamental :

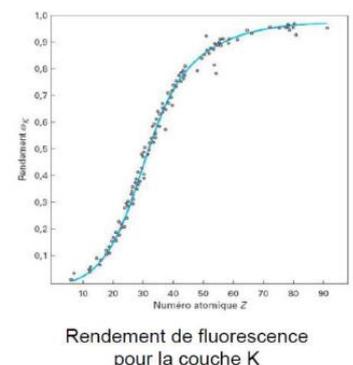
- Soit par émission **d'un photon de fluorescence**
- Soit par émission **d'un électron Auger**

La compétition entre ces 2 phénomènes est caractérisée par le rendement de fluorescence ω_i qui dépend du Z de l'atome.

$$\omega_i = \frac{\text{Proba Fluorescence}}{\text{Proba Auger}}$$

On voit que **plus le Z augmente plus le rendement de fluorescence augmente**, et donc la probabilité d'émettre **un photon de fluorescence** est importante.

L'émission Auger est donc plus probable pour les atomes légers, avec un Z faible



III. Interactions des photons avec la matière

A. Atténuation des photons dans la matière

Les photons dans la matière vont pouvoir être : **absorbés** / **diffusés** (déviés) / **transmis** (traversent la matière sans interagir).

1. La loi d'atténuation (photons transmis) :

Soit un faisceau étroit de N photons mono énergétiques qui traversent une épaisseur dx de matière, le nombre de **photons transmis** est :

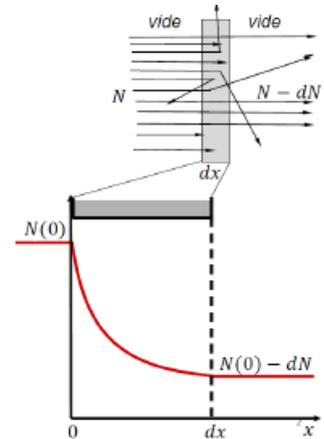
$$N - dN \text{ avec } -dN = \mu N dx$$

On note μ = probabilité d'interaction par unité de longueur

D'une manière générale on peut noter le nombre de photons transmis :

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

L'atténuation des photons se fait donc de façon exponentielle.



2. Les différentes expressions de μ :

μ correspond **au coefficient linéique d'atténuation** :

C'est une probabilité d'interaction par unité de longueur. Il a donc pour dimension l'inverse d'une longueur [L-1] (par exemple le cm-1).

Ce coefficient est spécifique du **milieu** et de **l'énergie des photons**, et dépend de l'état de ce milieu (compression, densité...).

On a donc notre expression du nombre de photons transmis : $N(x) = N(0) \cdot e^{-\mu x}$

Le problème étant que **l'épaisseur x peut être difficile à mesurer**.

On peut donc utiliser μ/ρ qui correspond **au coefficient massique d'atténuation**.

L'expression du nombre de photons transmis selon le coefficient massique d'atténuation devient alors :

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

On n'a donc plus besoin de mesurer l'épaisseur x mais la **masse surfacique** ρx ce qui est plus facile :

$$\rho x = \frac{m}{vol} \times x = \frac{m \cdot x}{s \cdot x} = \frac{m}{s}$$

Ce coefficient massique d'atténuation ne dépend pas de l'état du milieu (compression, densité ...). Il a pour dimension une longueur au carré par unité de masse [L².M⁻¹] (par exemple des cm².g⁻¹)

3. Couche de demi-atténuation :

La couche de demi-atténuation ou **CDA** correspond à l'épaisseur x qui diminue le flux de photon d'un facteur 2 : On peut donc écrire : **$CDA = \ln 2 / \mu$**

On peut alors exprimer d'une autre façon la loi d'atténuation des photons, en fonction de la CDA :

$$N(k, CDA) = N(0)e^{-\mu \cdot k \cdot CDA} = N(0) \left(\frac{1}{2}\right)^k = \frac{N(0)}{2^k}$$

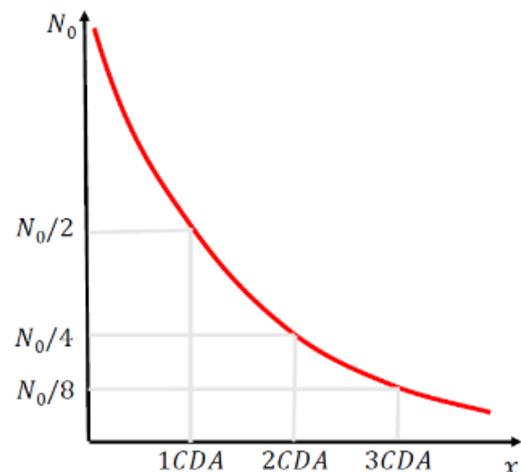
Ce qu'il faut vraiment comprendre c'est que k correspond au nombre de CDA. Si $k=3$ il y a 3 CDA donc le nombre de photon est divisé par $2 \cdot 2 \cdot 2 = 8$

En modifiant un peu l'équation, on obtient directement la proportion de photons transmis :

$$\frac{N(k, CDA)}{N(0)} = \left(\frac{1}{2}\right)^k$$

Le tableau associé à cette formule ainsi que le graphique qui permet de bien comprendre tout ça :

x	$N(x)/N(0)$	%
$1 \times CDA$	$1/2$	50
$2 \times CDA$	$(1/2)^2$	25
$3 \times CDA$	$(1/2)^3$	12,5
$n \times CDA$	$(1/2)^n$	
$10 \times CDA$	$1/1024$	0,1



L'absorption d'un faisceau de photon **n'est jamais totale**, cependant on considère que le nombre de photons transmis après **10 CDA est négligeable**.

B. Mécanismes d'interactions des photons

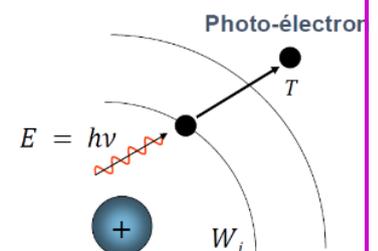
1. Effet photo-électrique :

Cela correspond à un transfert de la **TOTALITE** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière. On note T l'énergie cinétique du photo-électron :

$$T = h\nu - |W_i|$$

Les conséquences sont :

- Pour l'atome : réarrangement par photons de fluorescence et e- Auger
- Pour l'électron ionisé : perte de son énergie T par ionisations successives
- Pour le rayonnement : disparition

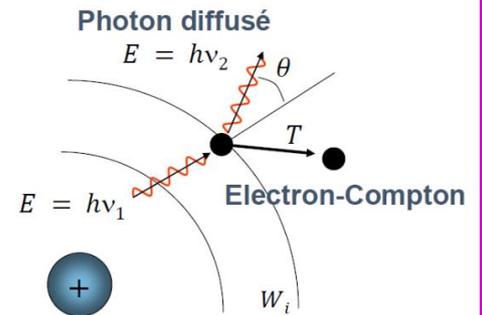


2. Effet Compton :

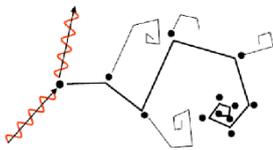
Cela correspond à un transfert **PARTIEL** de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière (électron faiblement lié).

L'énergie incidente se répartit alors entre l'énergie cinétique de l'électron-Compton émis, l'énergie consommée pour l'arracher (énergie de liaison), et l'énergie du photon diffusé :

$$h\nu_1 = T + h\nu_2 + |W_i|$$



Les conséquences sont :

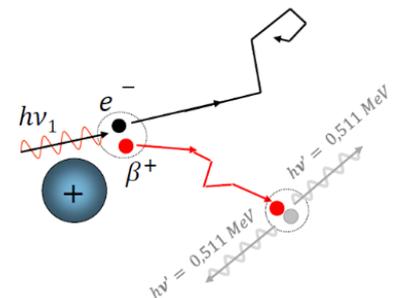


- Pour l'atome : réarrangement par photons de fluorescence et e- Auger
- Pour l'électron ionisé : perte de son énergie T par ionisations successives, cette énergie correspond à l'énergie absorbée Ea (ou transférée)
- Pour le photon : une partie du rayonnement est diffusée, avec l'énergie diffusée Ed ($h\nu_2$)

3. Création de paires :

Un photon très énergétique passant à proximité d'un noyau voit son énergie transformée en 2 particules.

Exemple de l'équivalence masse-énergie pour l' e^- :
On a donc une notion de seuil, si $h\nu \geq 1022 \text{ KeV}$ (2×511),
l'énergie peut se transformer en masse (2 particules).



C. Probabilités des différents mécanismes d'interactions

1. Effet photo-électrique :

La probabilité d'interaction par effet photo-électrique est notée τ .

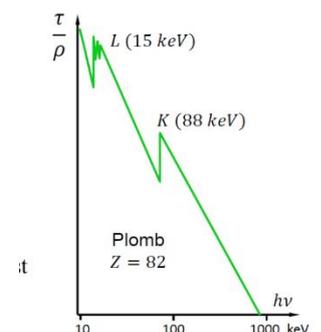
On a donc : $N(x) = N(0)e^{-\tau x}$

$$\tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3} \quad \frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$$

Ce qu'il faut retenir, c'est que la probabilité d'interaction par cet effet est élevée pour :

- les **éléments lourds** avec un Z élevé (Z^3 au numérateur)
- les **photons de faible énergie** ($(h\nu)^3$ au dénominateur)

Les maxima (pics) sur le graphique correspondent aux énergies exactes des énergies de liaison des différentes couches de l'atome.



Cette propriété est utilisée dans le cadre des rayons X :

Les atomes du vivant ont une faible probabilité d'interaction par effet photo-électrique, à la différence du calcium ou des produits de contraste radiologique utilisés, d'où les contrastes observés sur les radios.

	H	C	N	O	Ca	I	Ba
Z	1	6	7	8	20	53	56

Produits de contraste radiologique

2. Effet Compton :

La probabilité d'interaction par effet Compton est notée σ .

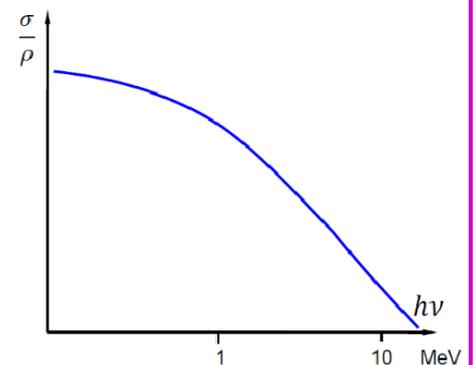
On a donc : $N(x) = N(0)e^{-\sigma x}$

$$\sigma = k\rho \frac{1}{hv} \quad \frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{hv}$$

La probabilité d'interaction pour l'effet Compton est pratiquement **INDEPENDANTE de la nature de la matière**, comme le montre cette comparaison entre l'eau et le plomb :

- Eau $\sigma/\rho = 0,15 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$
- Plomb $\sigma/\rho = 0,13 \text{ cm}^2 \cdot \text{g}^{-1}$

De plus, cette **probabilité diminue** quand l'énergie du photon augmente (hv au dénominateur).



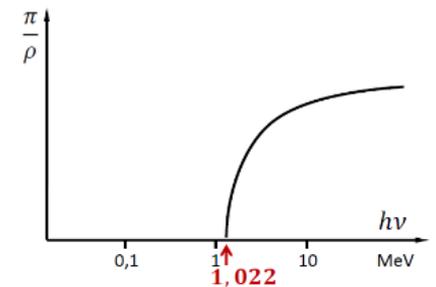
3. Création de paires :

La probabilité de la création de paires est notée π .

On a :

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

On voit sur le graphique le seuil d'énergie nécessaire de **1,022 MeV** (1022 keV), qui correspond à l'énergie équivalente à la **masse des deux particules créées**.

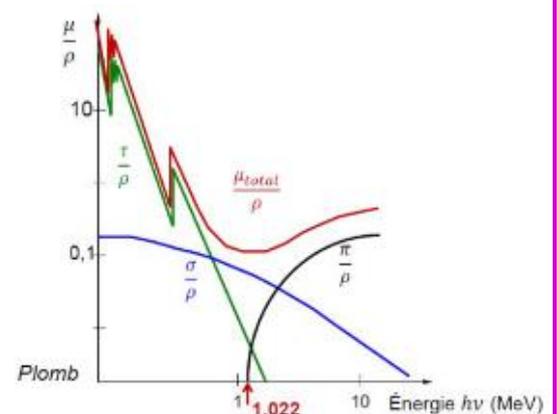


4. Importances relatives :

En fonction de l'énergie du photon :

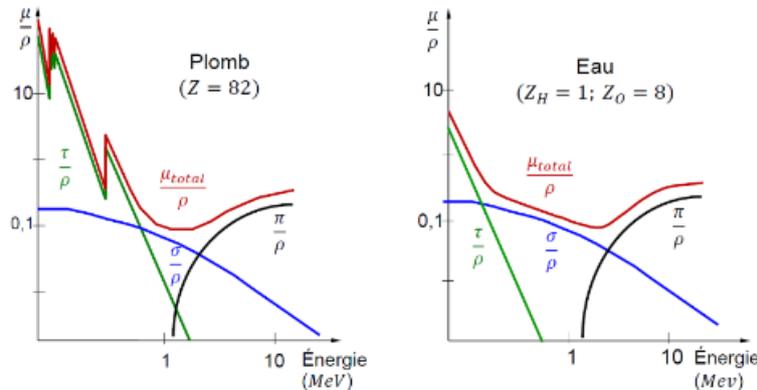
Pour les photons à énergie faible, **l'effet photo électrique** est le plus **probable**.

L'effet Compton est également **possible**. Plus l'énergie augmente plus les probabilités d'effet photo-électrique et d'effet Compton diminuent (moins rapidement pour l'effet Compton). Encore une fois, la création de paires ne peut se faire qu'au-delà de **1,022 MeV**.



En fonction du milieu :

Seule la probabilité d'interaction par **effet photo-électrique** dépend du Z du milieu, on voit ici qu'elle augmente avec le Z (la proba pour le plomb est plus importante que pour l'eau). Les autres probabilités d'interactions ne sont pas significativement modifiées.



D. Interactions des particules avec la matière

1. Interactions des neutrons

Les neutrons étant non-chargés, on a des interactions balistiques avec les **noyaux** des atomes par choc direct.

La **probabilité d'interactions** est donc **faible** du fait du faible diamètre du noyau par rapport à l'atome.

Les neutrons sont donc très pénétrants (=interagissent très peu).

On va alors distinguer :

- Les neutrons rapides (d'énergie cinétique élevée) :
 - Dans les **milieux riches en hydrogène** (où la masse du noyau est proche de celle du neutron) : transfert d'E maximal.

Le noyau H percuté est alors expulsé avec une E cinétique, on parle alors de **proton secondaire**, qui peut provoquer des ionisations (les neutrons sont donc indirectement ionisants).

- Dans les milieux composés de **noyaux lourds**, les neutrons « rebondissent » sans perdre beaucoup d'énergie (diffusion).

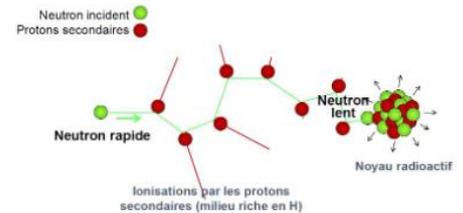
Ces propriétés expliquent l'utilisation d'eau dans les réacteurs nucléaires, afin de créer beaucoup d'interactions et de ralentir les neutrons du réacteur.

Cela explique aussi l'utilisation de bombes à neutrons, qui vont respecter les infrastructures (diffusion des noyaux lourds), tout en affectant principalement les organismes (milieu riche en hydrogène).

- Les neutrons lents (d'énergie cinétique faible ou neutrons «thermiques») :

Ils sont **absorbés par les noyaux** (cela correspond à la capture nucléaire à l'origine de transformations radioactives («capture radiative»)).

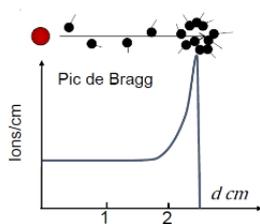
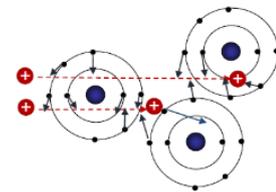
On voit ici le trajet d'un neutron incident, d'abord rapide ce qui provoque des ionisations grâce à des protons secondaires, puis qui ralentit à force de perdre de l'énergie cinétique, il devient alors trop lent et est simplement absorbé par un noyau qui devient radioactif.



2. Interactions des particules chargées positivement

On parle ici des **protons** et des **particules α** qui vont avoir des interactions coulombiennes avec les électrons de la matière. Ce sont des particules **directement ionisantes**, dont la masse est largement supérieure à celle de l'électron. Cela implique donc une trajectoire avec peu de fluctuations (rectiligne), et de très nombreuses ionisations, avec des ionisations secondaires.

Il est important de parler de la distribution particulière des ionisations provoquées par ces particules. En effet elles ont un parcours relativement **COURT** comparé à un électron de même énergie, et elles provoquent des effets biologiques importants.

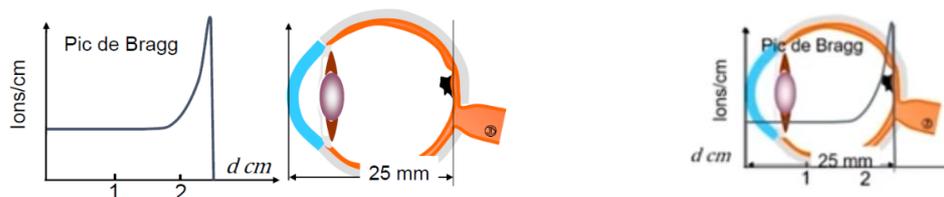


On voit ainsi sur ce schéma le nombre d'ionisations effectuées selon la distance, et on voit qu'il existe un **Pic de Bragg**, qui correspond à une augmentation brutale de la concentration des ionisations au moment où la vitesse diminue, avec une chute brutale des ionisations à partir d'une certaine distance, lorsque la totalité de l'énergie de la particule a été consommée.

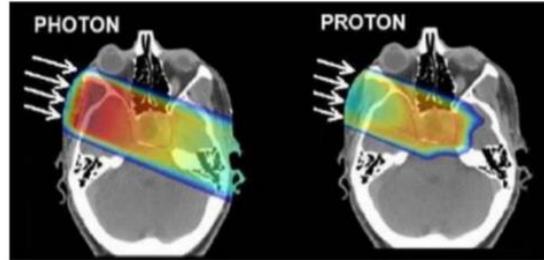
Exemple de la protonthérapie++ :

*Cela a un intérêt thérapeutique, avec la **protonthérapie** par exemple. Cette méthode consiste à diriger un faisceau de protons sur une tumeur afin de la détruire, principalement pour des **tumeurs superficielles**. Le trajet rectiligne de ces particules permet une certaine précision pour ne pas endommager les tissus environnants, et la propriété du Pic de Bragg permet de déterminer l'énergie nécessaire pour avoir un maximum d'ionisations à la distance de la tumeur, en **préservant les tissus sous-jacents** notamment.*

On voit ici l'exemple de la protonthérapie dans le cadre du traitement des mélanomes de la choroïde. Avec des photons de 65 MeV, le Pic de Bragg est à la même distance que la rétine, ce qui permet d'avoir peu d'ionisations dans la partie antérieure de l'œil, un dépôt maximal d'énergie au niveau de la tumeur, et pas du tout d'effet au-delà de celle-ci, donc aucune atteinte du nerf optique.



*Autre exemple avec la protonthérapie de haute énergie, avec des protons de 230 MeV pour le traitement **de tumeurs plus profondes**. On voit la comparaison avec d'un côté les photons qui ont un dépôt d'énergie trop large, avec des dépôts également en avant et en arrière de la tumeur, et de l'autre côté les protons qui sont plus ciblés, avec un faible dépôt en avant de la tumeur et aucun dépôt en arrière, ce qui permet de **mieux préserver les tissus sains**.*



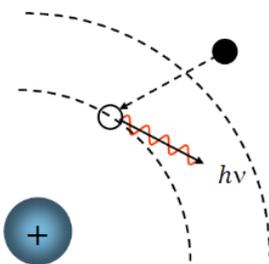
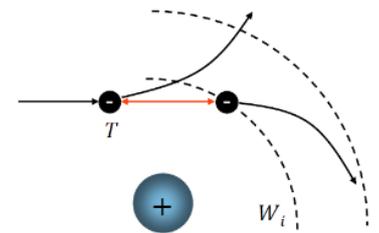
3. Interactions des électrons

Interaction électron-électron : interaction dite « par collision » :

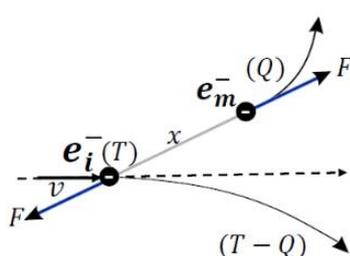
Il s'agit d'une interaction coulombienne.

On note T = l'énergie cinétique de l'e⁻ incident et $|W_i|$ = énergie de liaison d'un e⁻ d'une matière cible.

- Si $T < |W_i|$ et $\neq \Delta|W_i|$ → **vibration et chaleur**
- Si $T = \Delta|W_i|$ → **excitation**
- Si $T \geq |W_i|$ → **ionisation**



La conséquence pour la cible en cas **d'ionisation ou d'excitation** est un retour à l'état fondamental de l'atome par émission d'un **photon de fluorescence d'énergie $h\nu$ quantifiée** (on a donc un spectre de raies). Le photon est alors un **rayon X dit « caractéristique »** de la cible (*on dit RX car ils sont produits par les électrons*).



L'électron incident va avoir de très nombreuses interactions coulombiennes avec des électrons de la matière plus ou moins distants : son **énergie initiale T va se répartir entre l'électron incident ($T - Q$) et l'électron mis en mouvement (d'énergie Q)**. On aura des interactions successives de l'e⁻ incident tant que $T - Q$ le permet, de même que les e⁻ secondaires auront aussi des interactions tant que Q le permet.

Au cours de ces interactions successives, des **photons** caractéristiques vont être **émis**, et les électrons pourront être déviés.



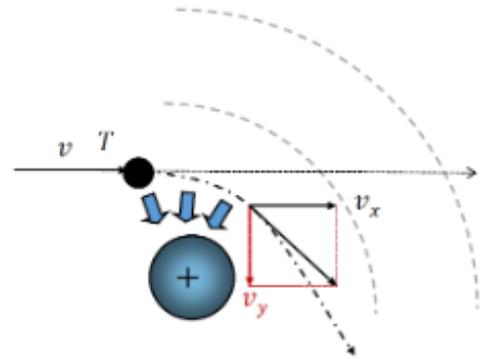
Interaction électron-noyau : interaction dite « par freinage » :

Du fait de la différence des masses, le transfert d'énergie au noyau est pratiquement nul.

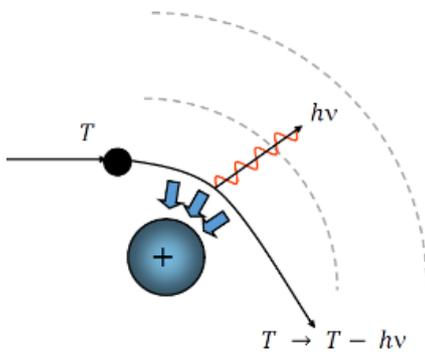
Si les deux particules étaient neutres, on aurait une simple diffusion de l'e⁻. Mais du fait de l'attraction coulombienne exercée par le noyau (+) sur l'e⁻ (-), celui-ci subit une «accélération centripète».

En termes de vecteurs, il subit :

- Une accélération v_y (dans le sens du noyau)
- Un freinage v_x (dans le sens de sa trajectoire initiale)



La conséquence pour la matière est la production d'un REM d'énergie $h\nu$ (photon X également) due à l'accélération centripète de l'e⁻ par le noyau.



L'énergie $h\nu$ est d'autant plus élevée que l'e⁻ incident passe à **proximité du noyau**, et elle peut prendre toutes les valeurs entre 0 et T l'énergie incidente, elle n'est donc **pas quantifiée** (spectre continu).

L'électron incident sera lui dévié, et va perdre son énergie petit à petit : $T \rightarrow T - h\nu$ d'où le nom de « rayonnement de freinage ».

IV. Conclusion

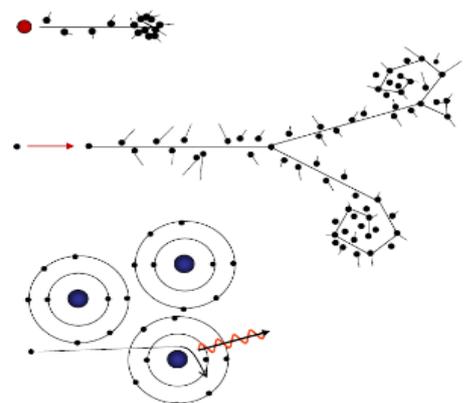
Lorsqu'elles traversent la matière, les particules perdent progressivement leur énergie en y provoquant des ionisations.

L'importance et la distribution de ce transfert d'énergie dépend du type de particule, de son énergie et des milieux traversés.

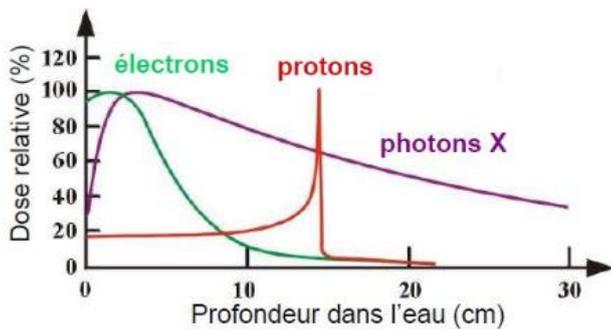
Est représentée en haut la trajectoire courte et rectiligne des protons, avec une quantité importante d'ionisations en fin de courses.

On voit au milieu l'interaction d'un électron avec d'autres électrons, avec une trajectoire plus longue et sinueuse.

Enfin en bas est représentée l'interaction entre un électron et un noyau produisant un REM.



On voit sur ce graphique que la distribution de l'énergie déposée dépend du type de RI.

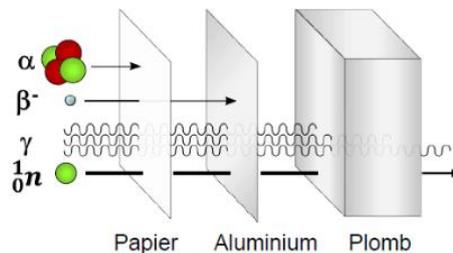


- Pour l'électron, l'énergie est déposée en début de parcours et s'atténue rapidement
- Pour les REM (photon X), l'énergie est déposée surtout en début de parcours et d'atténue plus progressivement
- Pour les protons, l'énergie est déposée est faible au début du parcours, avec un pic et une absence de dépôt à la suite de ce pic.

On voit que l'importance des interactions (le pouvoir d'arrêt) dépend de l'énergie et de la matière.

Ainsi :

- une feuille de papier suffit à arrêter les particules α
- les particules β^- sont arrêtées par une fine couche d'aluminium
- les rayons γ (REM) sont partiellement arrêtés après plusieurs épaisseurs de plomb
- enfin les neutrons sont très pénétrants dans les milieux



Dédis, on va quand même pas les oublier...

- Merci à ma mère qui m'a supportée durant cette année. Les mots ne sont pas assez forts pour lui dire à quel point je la remercie et que c'est en grande partie grâce à elle si je suis en P2.
- Merci à mon père et mes frères qui ont cru en moi, même quand moi je n'y croyais plus
- Merci à mes grands-parents qui m'ont aidés (toute l'année) et accueillis durant le mois de révision du S1
- Dédi au tutorat qui sans lui, je n'aurais jamais pu réussir
- Et bien sûr dédi à la biophy qui est une matière magnifique mais que l'on aime avec le temps
- Dédi aux P1 que je connais : Safa, JB, Benjamin, Antoine, Loriane, Jihad, et tous les P1 du groupe « des P1 grincheux » Je crois en vous alors croyez en vous <3333
- Dédi à vous tous ! Ne lâchez rien