

Biophysique TTR

Interaction rayonnement ionisant-matière

I. Introduction aux rayonnements ionisants

A. Définition

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

B. Intérêt des RI en santé

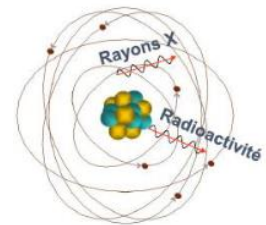
Dans l'ordre, l'ionisation des atomes de la matière va entraîner des effets chimiques, qui pourront avoir **des effets sur l'ADN**.

De plus, les RI sont utilisés pour **l'exploration diagnostique** ainsi que pour certains **traitements**.

C. Fondements physiques

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.



II. Mécanismes généraux des interactions des rayonnements avec la matière

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

- Échauffement
- Excitation
- Ionisation

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

Les rayonnements (électromagnétiques ou particuliers) 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.

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

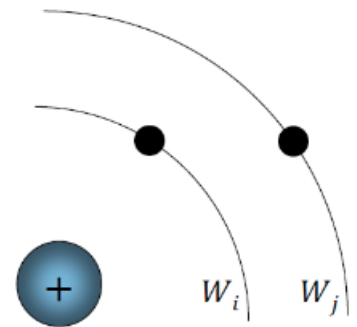
Rappel des conventions d'écriture :

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

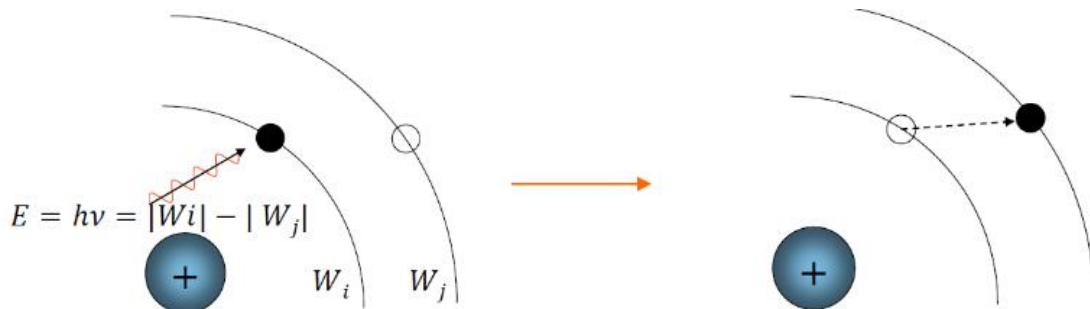
1. Interaction par excitation :

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 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 entre deux couches).



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 .

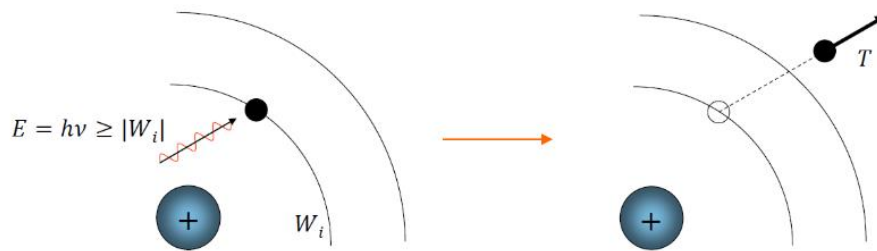
L'électron est alors expulsé avec une énergie cinétique T :

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).



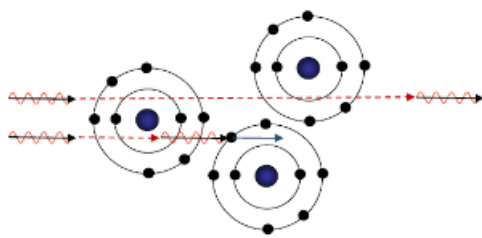
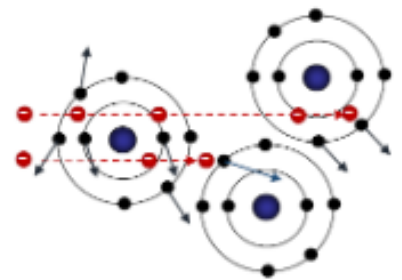
B. Caractère ionisant ou non d'un rayonnement

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.

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

Ces particules sont **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 .

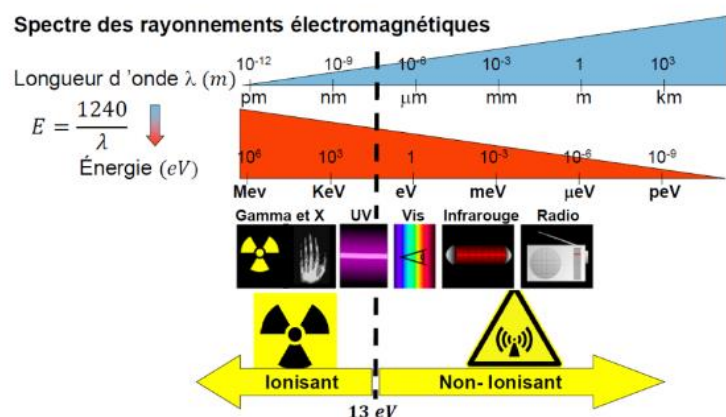
2. Caractère ionisant des REM :

La limite entre rayonnement ionisant et non ionisant est : $|WH_2O| \cong 13,6 \text{ eV}$.

Ainsi :

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

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**.



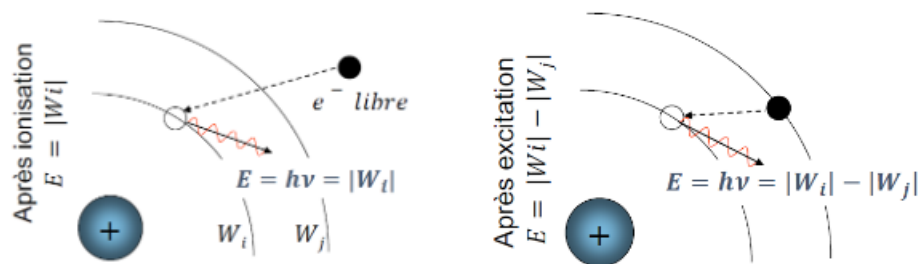
C. Conséquences pour la matière

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** et restituer l'excès d'énergie.

Un électron vient combler la case quantique laissée vacante, et **un photon dit de fluorescence** $E=h\nu$ 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, 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 via une **cascade de réarrangement**.

- **Ionisation** : un électron de la couche j peut combler la case vacante sur i et donner un photon de fluorescence $E1$: 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 $E2$. La nouvelle case vacante sur la couche h peut être comblée par un électron libre qui produira un troisième photon de fluorescence $E3$.

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** : la case peut être comblée par un électron de la couche j qui produit un premier photon de fluorescence $E1$. 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 $E2$.

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.

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)

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**

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

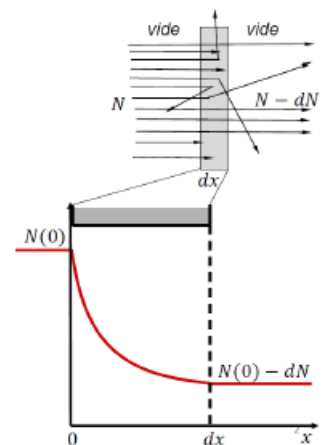
Les photons dans la matière vont pouvoir être : **absorbés** / **diffusés** (déviés) / **transmis** (traversent la matière sans interagir).

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

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 :

$-\mu$ correspond **au coefficient linéique d'atténuation** :

C'est une probabilité d'interaction par unité de longueur.

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

-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 :

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

Ce coefficient massique d'atténuation ne dépend pas de l'état du milieu (compression, densité...).

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 : **$CDA = \ln 2 / \mu$**

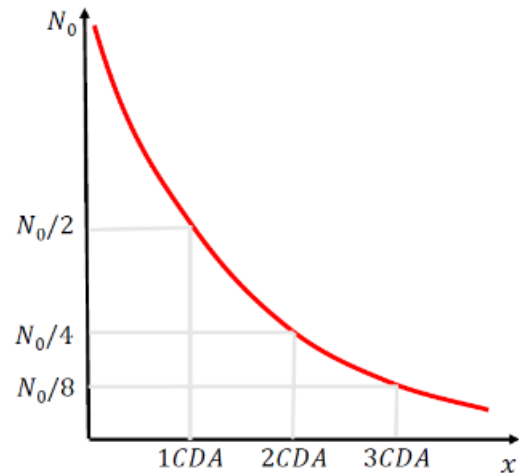
*Ce qu'il faut vrm comprendre c'est que k correspond au nombre de CDA. Si $k=3$ il y a 3 CDA donc le nombre de photon est divisé par $2*2*2=8$*

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



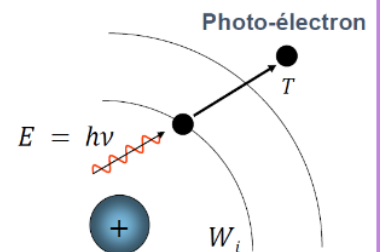
L'absorption d'un faisceau de photon **n'est jamais totale**, cependant on considère que le nombre de photons transmis après **10 CDA** est **négligeable**.

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 :

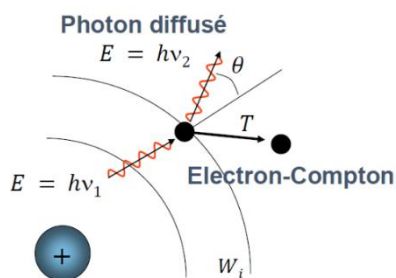
$$T = h\nu - |W_i|$$



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

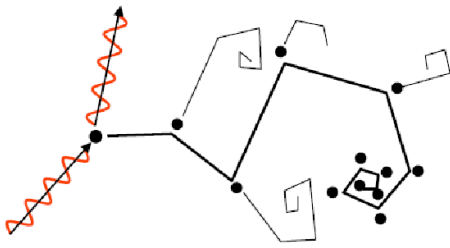
2. Effet Compton :



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 :

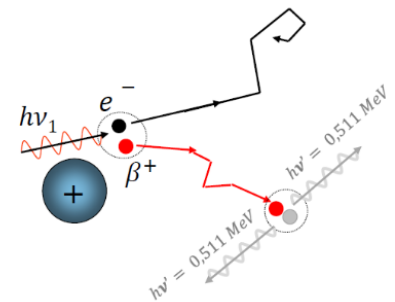
- Pour **l'atome** : réarrangement par photons de fluorescence et e- Auger
- Pour **l'électron ionisé** : perte de son énergie T par ionisations successives, cette énergie correspond à l'énergie absorbée Ea (ou transférée)
- Pour **le photon** : une partie du rayonnement est diffusée, avec l'énergie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

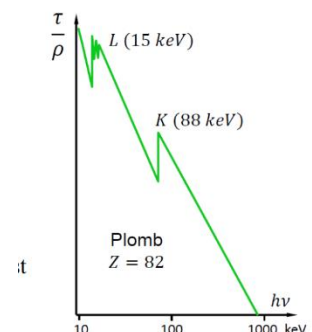


C. Probabilités des différents mécanismes d'interactions

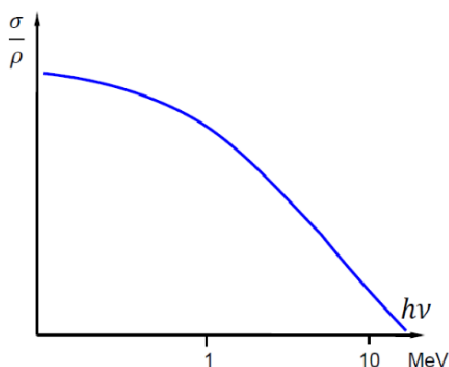
1. Effet photo-électrique :

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)



2. Effet Compton :



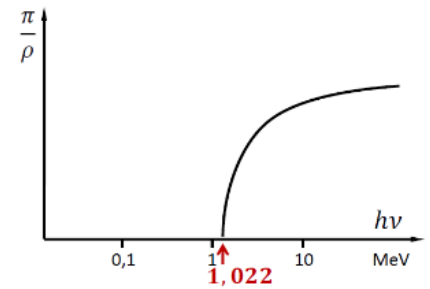
La probabilité d'interaction pour l'effet Compton est pratiquement **INDEPENDANTE de la nature de la matière**, comme le montre cette comparaison entre l'eau et le plomb :

- 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 ($h\nu$ au dénominateur).

3. Création de paires :

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**.

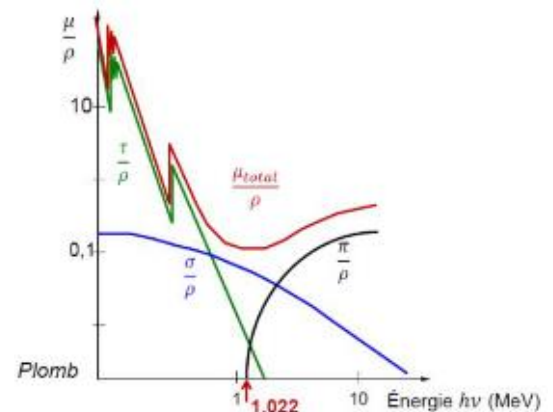


4. Importances relatives :

En fonction de l'énergie du photon :

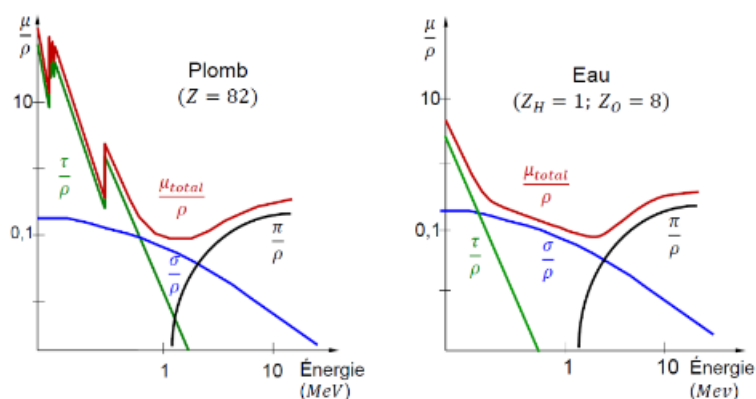
Pour les photons à énergie faible, **l'effet photo électrique** est le plus **probable**.

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.

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

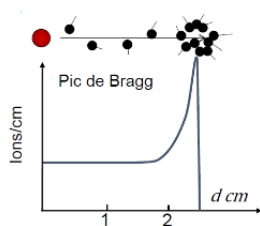
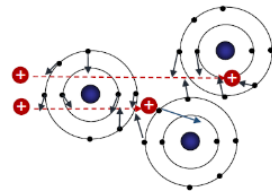
➔ Les neutrons lents (d'énergie cinétique faible ou neutrons « thermiques ») :

Ils sont **absorbés par les noyaux** (« capture radiative »).

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.

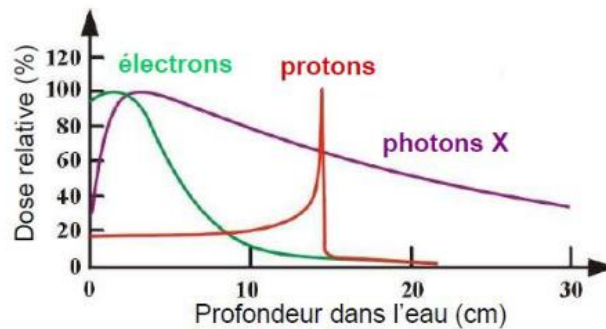


On voit ainsi sur ce schéma le nombre d'ionisations effectuées selon la distance, et on voit qu'il existe un **Pic de Bragg**, qui correspond à une augmentation brutale de la concentration des ionisations au moment où la vitesse diminue, avec une chute brutale des ionisations à partir d'une certaine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

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.

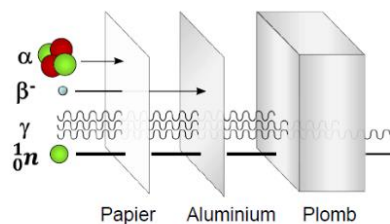


On voit sur ce graphique que la distribution de l'énergie déposée dépend du type de RI.

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



Instant dédié :

- 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 aidé (toute l'année) et accueilli durant le mois de révision du S1 (ils me voyaient maigrir à vue d'œil et pour pas que ça s'empire, ils m'ont dit de venir chez eux pour me faire prendre du poids...)
- Dédi à Manon, qui est une fille que j'ai découvert durant cette P1 et qui restera dans mon entourage !!!
- Dédi aussi à ceux qui ne sont pas passés, JP, je crois en toi. Cette année c'est la bonne.
- Dédi à mes co-tut que je ne connais pas encore super bien mais qui m'ont l'air d'être géniaux !
- Dédi au tutorat qui sans lui, je n'aurais jamais pu réussir
- Et bien sûr dédié à la biophy qui est une matière magnifique mais que l'on aime avec le temps (d'autres matières même avec le temps on ne peut pas les blairer # pharmacofraude)
- Dédi à vous ! Donnez tout et si vous avez un coup de mou, appelez vos parrains/marraines ou moi si préférez