INTÉRACTIONS DES RI AVEC LA MATIÈRE

*Hellooooooo les **πONE** (petit jeu de mots 😉) je me présente, je m'appelle Valentin aka* Valen**β+** *sur le forum et je serai un de vos tuteurs de Biophysique (la meilleure matière 🤩) parmi mes merveilleux co-tut'. Je suis tellement content d'être votre tuteur !!!! Je voulais tout d'abord vous dire BRAVO de vous être engagé dans cette aventure, vous allez voir c'est tellement enrichissant !!!!!!*
Je vous ferai les cours sur les rayonnements (vous avez la répartition des cours entre tuteurs sur le forum). Bon trêve de BLABLA 😏, AUJOURD'HUI, on va commencer par ✨ Les interactions des RI avec la matière ✨
C'est un cours super intéressant et pas mal de QCM qui tombent sur ce cours sont assez marrant à résoudre. (❁´◡`❁)
Je vous mets la fiche complète même si on a pas tout vu à la TTR comme ça vous avez tout !
ALORS il y a beaucoup de pages mais j'ai mis BEAUCOUP d'explications (de cette couleur) qui ne sont pas à apprendre
Le sommaire, les dédis et mon intro prennent déjà 4 PAGES !!
#PIPELLETTEsorryy
Pour le sommaire je vous conseille de le regarder si vous êtes perdu et après une première lecture du cours
Par contre si vous n'en avez pas besoin OUBLIEZ LE !
Mes commentaires (qui ne sont pas dans le cours ➔ PAS À APPRENDRE) seront de cette couleur et en italique

RI = Rayonnements Ionisants
REM= Rayonnements Electromagnétiques

DISCLAIMERRRR :
➔ Partis avec barres rouges = fiche TTR (peut tomber à l'EB)
➔ Toute la fiche = fiche complète (je vous sors la fiche complète direct comme ça vous avez tout !)

Malgré le fait que le sommaire paraisse longggggggggg, le cours reste le même.
Je m'explique.
J'ai préféré faire beaucoup de parties et de sous parties pour ceux qui aiment bien avoir un cadre bien clair dans leur tête avant de rentrer dans les détails pour ne pas se perdre
C'est parti Let's GOOOOOOOOOOO !!!!

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

SOMMAIRE :

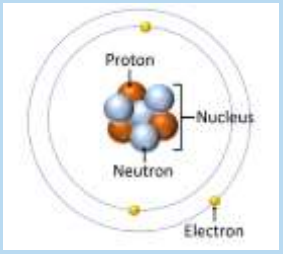
I. INTRODUCTION AUX RI
   A. Généralités
   B. Les intérêts de ces RI
   C. Phénomènes physiques de base des RI
II. MECANISMES GENERAUX DES INTERACTIONS DES RI AVEC LA MATIERE
   A. Le photon et les conventions d'écriture
III. INTERACTIONS ELEMENTAIRES
   A. Interaction par EXCITATION
   B. Interaction par IONISATION
IV. CARACTERE IONISANT OU NON IONISANT D'UN RAYONNEMENT
   A. Définition d'un rayonnement Ionisant
   B. Rayonnement Directement ou Indirectement Ionisant
V. LES CONSEQUENCES DE CES INTERACTIONS AVEC LA MATIERE
   A. Emission d'un photon de fluorescence
   B. Emission d'un électron d'Auger
VI. INTERACTION DES PHOTONS AVEC LA MATIERE
   A. Atténuation des photons à travers la matière
   B. Loi d'atténuation (photons transmis)
   C. Les différentes expressions de μ
   D. Couche de demi atténuation (CDA)
   E. Les mécanismes d'interactions des photons
      1) L'effet Photoélectrique
      2) L'effet Compton
      3) La Création de paire
   F. Les probabilités des différents mécanismes
      1) La probabilité de l'effet photoélectrique
      2) La probabilité de l'effet Compton
      3) La probabilité de la création de paire
VII. INTERACTION DES PARTICULES AVEC LA MATIERE
   A. Interactions des neutrons
   B. Interactions des particules chargées
   C. Interactions des électrons
      1) Les interactions électron-électron : interactions dites « par collision »
      2) Les interactions électron-noyau : interaction dites « par freinage »
VIII. CONCLUSION

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

I-INTRODUCTION AUX RI :

A) Généralités :

RI = Rayonnement ionisant : est un rayonnement électromagnétique (REM) ou rayonnement particulaire (neutron, proton…), qui est capable d'interagir directement ou indirectement avec les atomes de la matière qu'il traverse.



On rappelle qu'un **atome** c'est un noyau avec des **électrons** qui gravitent autour.
Si un rayonnement est ionisant, il est capable d'arracher un des électrons de l'atome.
Un atome qui a perdu un électron est appelé **ion**, d'où le nom de **rayonnement ionisant.**

Un RI est donc un rayonnement capable de créer des ions, c'est-à-dire de modifier des atomes. +++

Ces **RI** vont avoir des effets chimiques sur la santé.
En effet, la pénétration de ces RI dans les tissus va impliquer des effets biologiques, notamment sur l'ADN. *(vous le verrez dans un autre cours de mon cotut')*
Il peut y avoir :

- des cassures de brins d'ADN **(effet direct)**

  ou
- des radicaux libres via l'interaction avec l'**eau** (effet indirect).

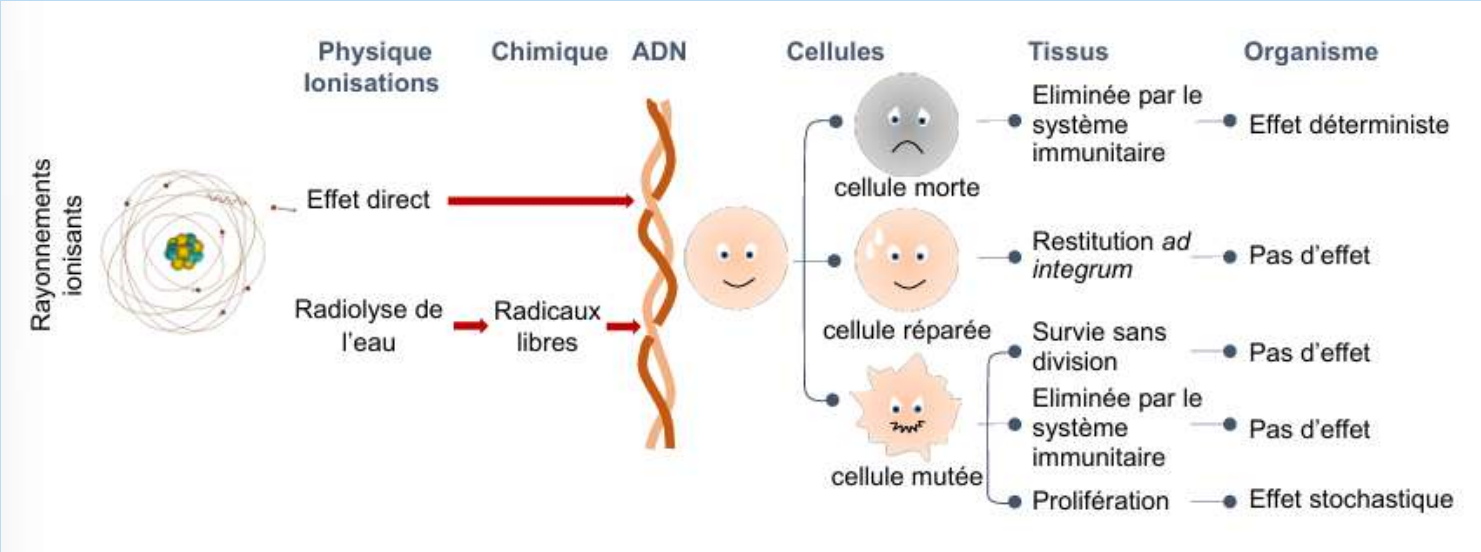
Ces radicaux libres vont avoir une influence chimique qui va être à l'origine de cassures de brins d'ADN.
Ces cassures de brins d'ADN vont transformer la cellule.

On distingue plusieurs effets sur ces cellules : *(les cellules de notre corps)*

- La cellule peut être **tuée** ☠ (elle sera ensuite éliminée par le système immunitaire)
- La cellule peut être **réparée** 🔨
- La cellule peut être **mutée** 😵, et c'est ces **mutations** qui peuvent avoir des conséquences sur les tissus de l'organisme

Si la cellule a des lésions et n'est pas réparée ou n'est pas détruite pas le système immunitaire, cela peut induire une prolifération et donc un **cancer**.
On le reverra en **radiobiologie** mais on considère que les effets de destruction de cellule sont des effet **déterministes** (il faut atteindre un seuil pour arriver à la destruction cellulaire).
Alors que la **mutation**/**création d'un cancer** c'est quelque chose qui est plutôt **stochastique/probabiliste** et qui peut arriver avec des faibles quantités de rayonnements ionisants.

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite



Petit mot historique sur les grands physiciens du corps humain :

- **Röntgen** : découvre les rayons X en 1895 (ça lui a valu le premier prix Nobel)
- **Pierre et Marie Curie** : des français à l'origine de la découverte de la radioactivité naturelle
- **Marie Curie** : travaux sur le polonium et elle a augmenté nos connaissances sur la radioactivité
- **Frédéric et Irène Joliot-Curie** : ont mis en évidence la possibilité d'une radioactivité dite artificielle

Le prof a précisé l'année dernière qu'il n'y aura pas de questions sur cette partie historique ! (on verra cette année mais normalement ce sera toujours pareil 😊)

B) Les intérêts de ces RI

Ces RI vont être indispensables dans deux aspects qui nous concernent :

- **Les explorations diagnostiques**, avec la détection des rayonnements avec la création d'une image. Comme exemple, on peut citer le scanner ou la tomographie par émission de positons (TEP). Et avec ces techniques, on va pouvoir détecter différentes **pathologies** comme des **tumeurs** et des **métastases**.

- **La santé**, on va pouvoir choisir des effets biologiques que l'on va créer à la demande en utilisant le phénomène physique de base des RI, tout ça dans un but **thérapeutique**. On appelle ça la **radiothérapie** (notamment pour détruire des cellules cancéreuses). On va pouvoir également se protéger de ces effets biologiques, c'est ce qu'on appelle la **radioprotection**. *(encore un autre cours...)*

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

Cas clinique :

- Homme
- 52 ans
- Tabagique
- Symptômes : douleurs thoraciques et toux

On va l'interroger, l'examiner, l'ausculter et on va lui faire passer des examens (un scanner (=*tomodensitométrie*) qui utilise des rayons X).

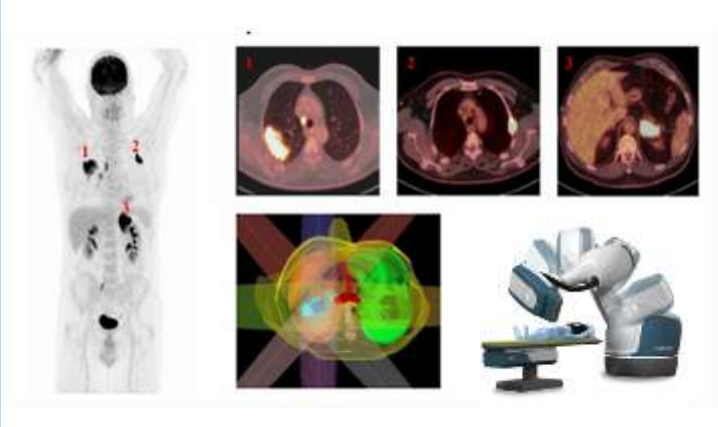


Voici le scanner de ce patient. On peut observer une zone de densité plus claire au niveau du poumon droit *(attention sur la photo c'est à gauche, parce qu'en scanner on regarde le patient par-dessous par les pieds)*, qui correspond à une anomalie, probablement un cancer.

Ensuite on va lui faire passer une tomographie par émission de positons (TEP) pour vérifier l'extension de la maladie.

Cette TEP utilise un produit radioactif que l'on appelle le **18-FDG** (**Fluoro-Désoxy-Glucose**), une molécule de glucose à laquelle on a attaché un atome radioactif de fluor, émetteur de radioactivité **β+**. Cela nous a permis de voir qu'il y a des métastases du cancer du poumon. *(En fait on a mis un atome radioactif sur du glucose. L'atome de fluor radioactif va émettre une particule β+ et on pourra le détecter et donc le voir sur nos images. Donc on pourra voir à quels endroits le glucose s'est fixé, et si c'est pathologique ou non.)*

Les fixations sont normales au niveau du cerveau car celui-ci tire son énergie du glucose. Les autres tâches noires, à part celles qui sont liées aux reins et à la vessie, sont anormales.

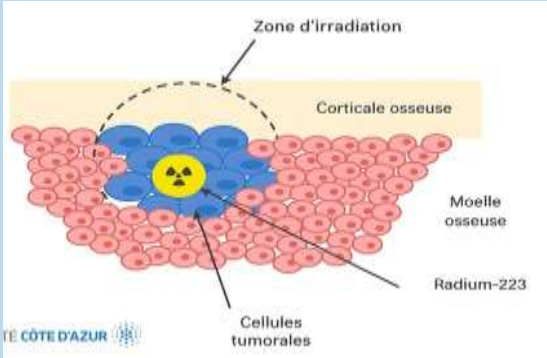


Elles témoignent de cancers qui, pour proliférer, ont besoin de capter plus de glucose pour produire plus d'ATP et avoir plus d'énergie :

- **1** La tumeur pulmonaire avec une lésion d'un ganglion du médiastin (entre les poumons)
- **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 ; c'est l'utilisation de rayons de haute énergie qui vont servir à traiter le patient.

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite



Autre exemple :

Ici on a un patient qui est venu pour des douleurs osseuses diffuses. On lui a injecté un traceur qui nous montre le fonctionnement osseux. Ce traceur émet des **rayons gamma** et on peut capter ces rayons grâce à une gamma caméra. On trouve qu'il a plusieurs lésions osseuses qui lui font mal.

Il y a un traitement qui s'appelle la **radiothérapie interne vectorisée** : détruit les cellules en injectant un produit radioactif émetteur de **particules alpha** (le radium 223). Il va se lier aux lésions métastatiques et ces dernières vont être détruites.

- On voit donc ici que les RI peuvent alors servir pour le **diagnostic** et **le traitement des patients**. C'est important de bien les comprendre pour limiter le risque de cancers liés à ces RI.

C) Phénomènes physique de base des RI :

Les RI proviennent de l'atome mais pas forcément du même niveau, on va avoir :

- **Les rayons X**, qui proviennent de **l'extérieur du noyau**.
- **La radioactivité**, qui provient **du noyau lui-même**, ce sont des **phénomènes nucléaires**.

La majorité des particules proviennent du noyau (ex : **alpha**, **positon**). L'électron lui, peut venir d'une désintégration **β-** ou **du cortège électronique**. Pour les rayonnements électromagnétiques (REM), **les rayons X** proviennent de **l'extérieur du noyau** alors que **les rayons gamma sont d'origine nucléaire**.

On va essayer de maîtriser ces rayonnements en comprenant les principes physiques de leurs interactions avec la matière.

II- MÉCANISMES GÉNÉRAUX DES INTERACTIONS DES RI AVEC LA MATIÈRE :

Un rayonnement (électromagnétique ou particulaire) qui traverse la matière lui transfère une partie de son énergie. On distingue 3 manières différentes :

- Par simple échauffement (sous forme de **chaleur**) *(on ne l'étudiera pas)*
- Par **excitation**
- Par **ionisation**



Oh Hi !

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

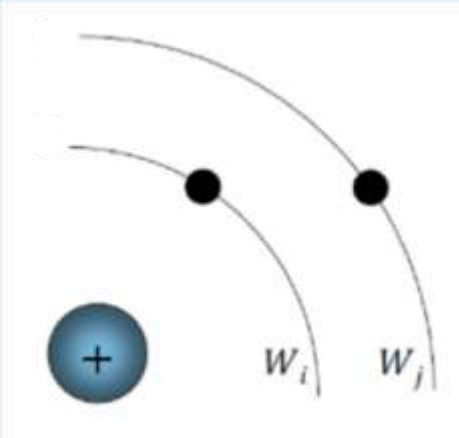
Dans tous les cas, on a **un transfert d'énergie** entre le rayonnement et la matière. C'est ce transfert d'énergie qui est à la base de l'utilisation des rayons de manière générale. C'est également ce qui explique les actions biologiques des rayonnements.

Les rayonnements (électromagnétiques ou particulaires/corpusculaires) qui traversent un milieu entrent en collision avec les éléments du milieu, essentiellement avec les électrons des atomes. Pour essayer de comprendre, on va prendre l'exemple d'un rayonnement électromagnétique que l'on appelle **photon** (on aurait pu prendre une autre particule, ça donne la même chose).

A) Le photon et les conventions d'écriture :

Le photon est porteur d'une certaine énergie, que l'on appelle hv *(c'est la lettre grec nu et pas le v de vitesse)* Il est figuré par ce petit symbole : 

photon $\mathbf{E = h\nu}$
h = constante de Planck
ν = fréquence de vibration de ce rayonnement électromagnetique



On décrit l'atome selon **le modèle de Bohr** (à gauche). Ce modèle est une description simple de l'atome, avec des électrons qui sont répartis sur différentes couches électroniques (K,L,M,N ou i,j,k...).
Chaque électron, positionné sur l'une de ces couches possède une certaine liaison avec le noyau de l'atome auquel il appartient. Cette liaison est source d'une énergie de l'électron (**exprimée négativement**), et d'une **énergie de liaison**, qui est la **valeur absolue** (donc sans le signe) de cette énergie de l'électron.

→ Énergie de l'électron = **Wi**
→ Énergie de liaison de l'électron = **|Wi|**
Énergie qu'il faut fournir à l'électron pour l'arracher++++

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

III) INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES :

Ici c'est avant tout de la compréhension ! Aidez-vous beaucoup des schémas 😊

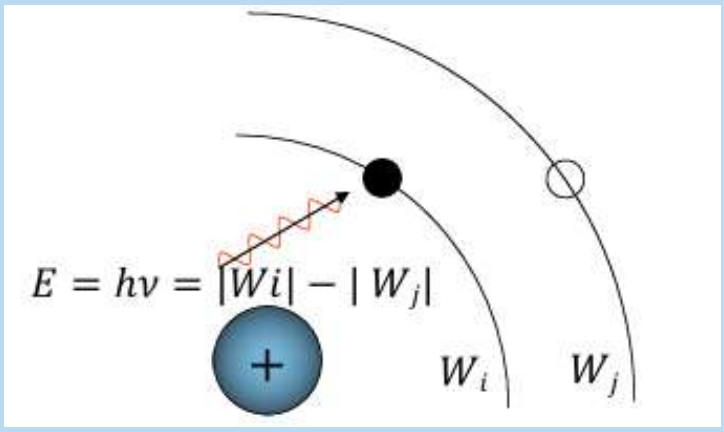
A) Interaction par Excitation :

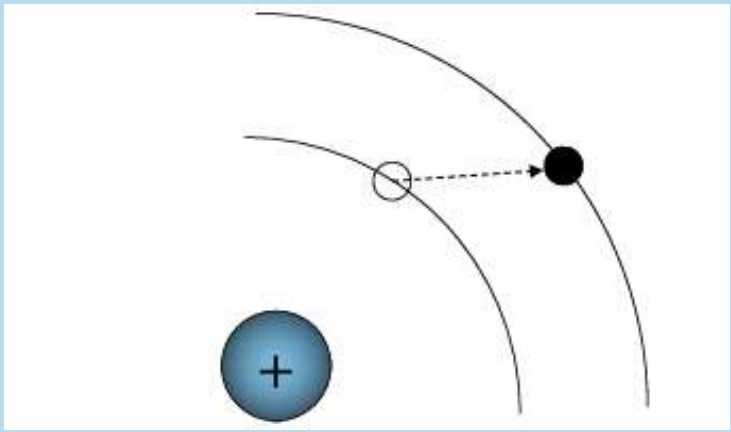
- L' atome peut absorber l'énergie apportée par un photon incident :

  - Si **l'énergie du photon** E=hν est inférieure à l'énergie de liaison de l'électron : **E < | Wi | - | Wj |** ; le photon ne pourra pas arracher l'électron.

  - Si cette énergie correspond exactement à l'écart entre deux énergies de liaison : **E = | Wi | - | Wj |** ; alors l'électron pourra absorber l'énergie du photon en passant de la couche **i** à la couche **j**. L'électron change d'orbite : il va libérer ce qu'on appelle une **case quantique** (une place libre sur la couche d'origine) (vous reverrez ce terme en CHIMIEE)

    ⇨ On parle alors d'**excitation**, l'atome est passé de son état fondamental (stable) à un état **excité** (moins stable) grâce à l'énergie fournie.
    ⇨ On lui a transféré de l'énergie donc dans cet état excité, il a un excès d'énergie, qui lui, est égal à la différence d'énergie entre les 2 couches concernées : **E = | Wi | - | Wj |**
    ⇨ Cette énergie absorbée par l'atome est **QUANTIFIÉE** : **elle ne peut PAS prendre n'importe quelle valeur**, mais uniquement des valeurs qui sont bien définies par les différences des énergies de liaison des électrons sur chacune des couches.





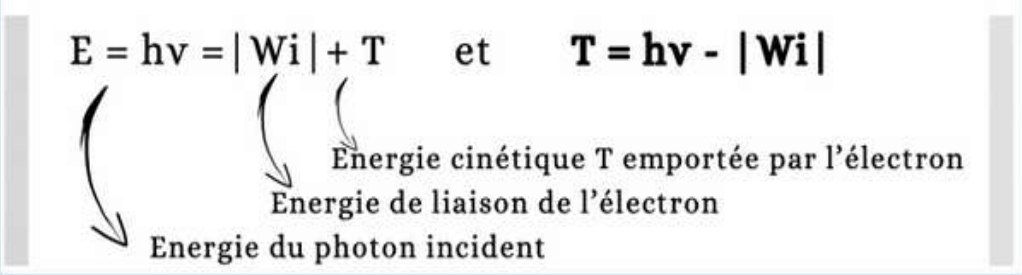
⚠ Attention ⚠ : Cet état n'est pas du tout stable, donc on va avoir différents réarrangements pour retourner à l'état fondamental (qui lui est stable). On va voir tout cela juste après ne vous inquiétez pas

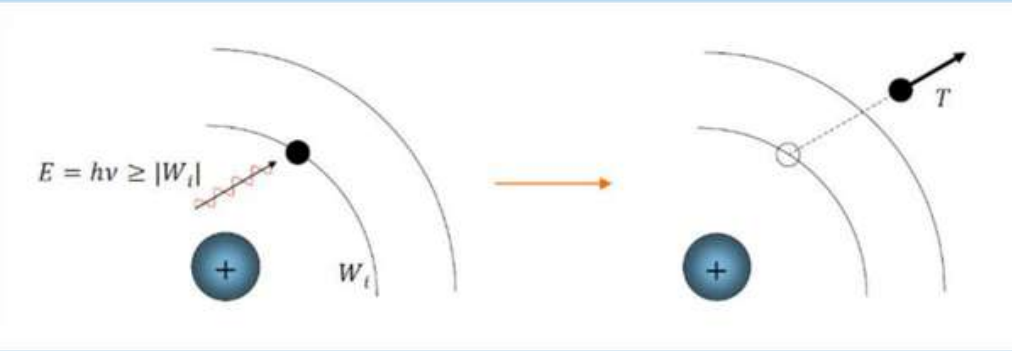
Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

B) Interaction par Ionisation :

- L' interaction par ionisation survient dans le cas où le rayonnement incident *(toujours un photon dans notre cas)* a une énergie E=hv qui est **supérieure ou égale** à **l' |Wi| d'un électron** :
  E= hv ≥ | Wi |
  ⟶ Il va alors **expulser** l'électron en dehors de sa couche électronique et de son orbite. On parle alors d'ionisation quand l'atome perd un électron. (=on forme un ion) (par exemple Na+)

- Là aussi, l'atome passe d'un état fondamental à un état excité. Lui aussi possède **un excès d'énergie égal à | Wi |** , c'est-à-dire l'énergie de liaison de l'électron expulsé
  (| Wi | c'est l'énergie transmise par le photon à l'électron).
  De plus, il va rester de l'énergie qui sera emportée par l'électron expulsé sous forme **d' énergie cinétique T**. Cette énergie cinétique est égale à l' énergie du photon incident qui l'a expulsé moins l'énergie qui a été consommée pour arracher l'électron :





Dans cette situation, **l'énergie T n'est PAS QUANTIFIÉE.**
À partir du moment où l'énergie incidente du photon est supérieure à | Wi | , toutes les valeurs à partir de ce minimum sont possibles.

(On voit bien que l'énergie du photon incident est bien supérieure à l 'énergie de liaison de l'électron sur la couche i. Donc l'électron va être ionisé et va complètement partir de sa couche électronique, avec une énergie cinétique T).

⚠ **Attention n°2** ⚠ : Cet état n'est toujours différents PAS stable, donc on va devoir encore une fois avoir des réarrangements pour retourner à l'état fondamental (stable). Encore une fois on le voit juste après

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

IV) CARACTÈRE IONISANT OU NON IONISANT D'UN RAYONNEMENT :

A) Définition des rayonnements Ionisants :

Le caractère ionisant ou non d'un rayonnement est important, car comme nous l'avons dit plus tôt, cela conditionne la présence ou non d'effets biologiques.

En effet l'excitation seule ne va pas avoir d'effets chimiques sur le vivant, pas d'impact sur la biologie.
À partir de quel seuil, pouvons-nous dire qu'un rayonnement est ionisant ? Cela dépend de la matière traversée. En matière de biologie, cela va dépendre de l' énergie de liaison moyenne des électrons dans les atomes qui constituent cette matière.
Il faut que hv ≥ | Wn | .

$$W_{H_2O} \approx 13{,}6\ eV$$

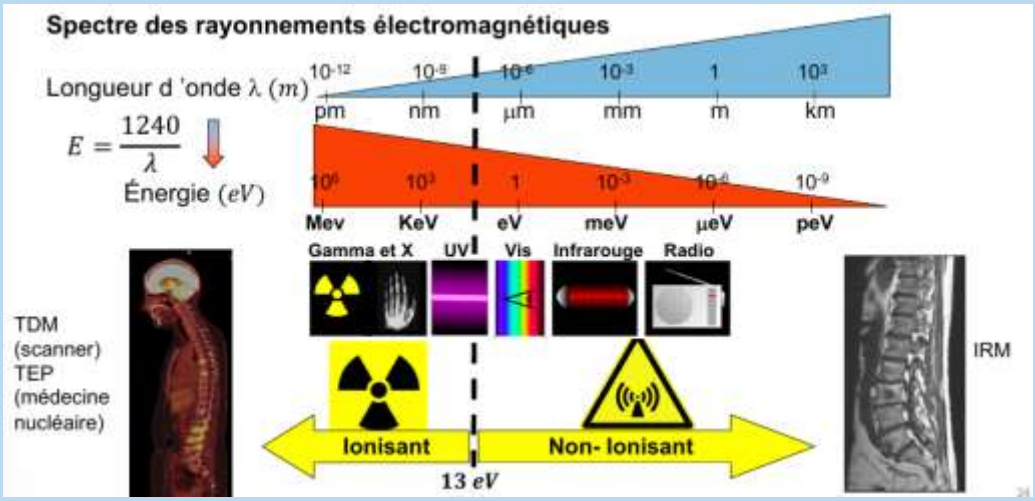
C'est donc cette valeur qui va constituer pour nous la **frontière** entre les rayonnements ionisants et non ionisants.

On considère finalement comme limite l'énergie moyenne de liaison d'un électron d'une molécule d'eau :

ATOME	|W| (eV)
C	11,24
H	13,54
O	13,57
N	14,24

Si E ≥ 13,6 eV : REM ionisant

Si E ≤ 13,6 eV : REM NON ionisant



C'est important en médecine parce qu'on va utiliser des rayonnements ionisants (X, gamma) mais aussi des non ionisants comme pour l'IRM (ondes électromagnétiques d'énergies plus faibles, qui ne seront pas ionisantes).

Ce qu'il faut retenir ici :
Plus un REM a une longueur d'onde petite, plus il aura une énergie importante. +++

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

On peut passer de ces longueurs d'ondes à ces énergies par **la relation de Duane et Hunt** :

$$E = \frac{1240}{\lambda}$$

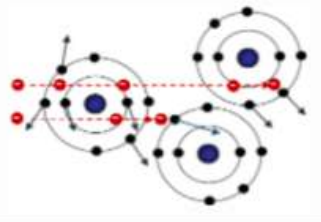
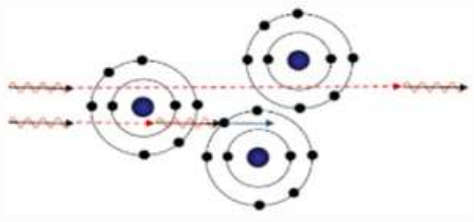
On voit que notre frontière de **13,6 eV** se situe au niveau des UV, donc tout ce qui est à gauche est ionisant et ce qui est à droite ne l'est pas :

- Les **rayons gamma**, **rayons X** et une partie des **UV** sont **IONISANTS** ++
- **L'autre partie des UV**, **le visible**, **les ondes infrarouge** et **radio** sont **NON IONISANTS** ++

Si on passe un **scanner**, on utilise des rayons X, qui sont donc ionisants, et pour les **IRM**, on utilise des ondes radio qui ne sont pas ionisantes (on remarque donc qu'il vaut mieux passer des IRM que des scanners).

B) Rayonnements directement ou indirectement ionisant :

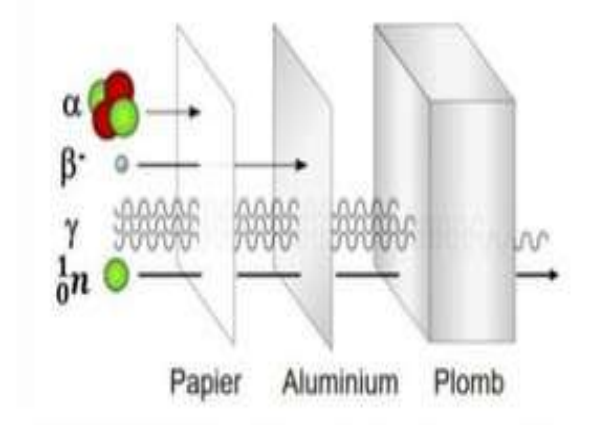
Les rayonnements ionisants (électromagnétiques ou particulaires/corpusculaires) sont capables de produire directement ou indirectement des ions qui eux sont à la base de la détection des rayonnements systèmes d'imagerie, compteurs, dosimètres…) et des effets biologiques (directs ou indirects sur l'ADN).

LES PARTICULES CHARGÉES: $\alpha^{2+}; \beta^-; \beta^+; e^-; p^+$	**LES REM ET LES PARTCULES NEUTRES:** $\gamma; X; {}^1_0n$
Sont directement ionisantes.	Sont indirectement ionisants.
• Interactions obligatoires avec la matière: car celle-ci est elle-même chargée. • ***Interactions coulombiennes*** (électrostatiques) qui se font même à distance de la trajectoire. • Quelle que soit leur trajectoire dans la matière, leur charge va les faire interagir avec les électrons. • Si elles sont chargées positivement, elles vont attirer les électrons, et si elles sont chargées négativement elles vont repousser les électrons.	• Interactions non obligatoires avec la matière. • ***Interactions balistiques*** (statistiques) • Cela signifie qu'elles vont interagir avec les électrons à condition que leurs trajectoires se rencontrent. • Elles sont dites «indirectement ionisantes» par les électrons mis en mouvement (avec les photons γ et X) ou par les protons secondaires ${}^1_0n$. • C'est important parce que cela détermine les parcours dans la matière.
	

Alors ce tableau c'est par cœur ++++++++++++++

Les rayonnements particulaires ont une forte probabilité d'interagir avec la matière, ils sont rapidement arrêtés : *(c'est normal car ils sont plus gros et plus chargés (chargéééé,chargéééé,chargéééé)*

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite



- Une **particule α** est arrêtée par une **feuille de papier**, car elle est très chargée positivement donc il n'y a aucune chance qu'elle n'interagisse pas.

- Une **particule β** va interagir *partiellement* avec la feuille de papier, mais sera arrêtée par **une feuille d'aluminium**.

- Un **REM** passera facilement la feuille de papier et celle d'aluminium et interagira partiellement avec **le plomb**. Certains rayonnements seront arrêtés mais pas tous.

Plus une particule est chargée, plus elle est arrêtée facilement par les matériaux.

C'est donc très important en radioprotection mais aussi médicalement parce que le parcours dans les tissus est à la base de l'utilisation des rayonnements et de la radioactivité pour le **diagnostic** et **le traitement**.
Pour traiter une tumeur, le but c'est que le rayonnement dépose son énergie dans la tumeur, alors qu'en imagerie au contraire, le but c'est que le RI **sorte** du patient.

C'est pour ça que les **rayonnements particulaires** sont particulièrement utilisés dans le **traitement** (dans le but d'être arrêtés), et les **rayons électromagnétiques** en **imagerie médicale** (dans le but de traverser les tissus avec le moins de dommages possibles).

- Les rayonnements **particulaires** sont **directement ionisants** et déposent rapidement leur énergie dans les tissus :
  EFFETS BIOLOGIQUES IMPORTANTS ⟶ THÉRAPIE
- Les rayonnements **électromagnétiques** sont **INdirectement ionisants** et déposent peu leur énergie dans les tissus :
  PEU D'EFFETS BIOLOGIQUES ⟶ DIAGNOSTIC

V) LES CONSÉQUENCES DE CES INTERACTIONS AVEC LA MATIÈRE :

Désolé j'ai pas la place de tout descendre

A) Émission d'un photon de fluorescence :

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

On a vu plus haut que la matière traversée par un RI, a un **excès d'énergie**, et va avoir tendance à la restituer (pour redevenir stable).
Du coup l'atome tend à retourner à son état fondamental pour retrouver son architecture et restituer l'excès d'énergie. Il va pouvoir le faire par l'émission de ce qu'on appelle un **photon de fluorescence**.

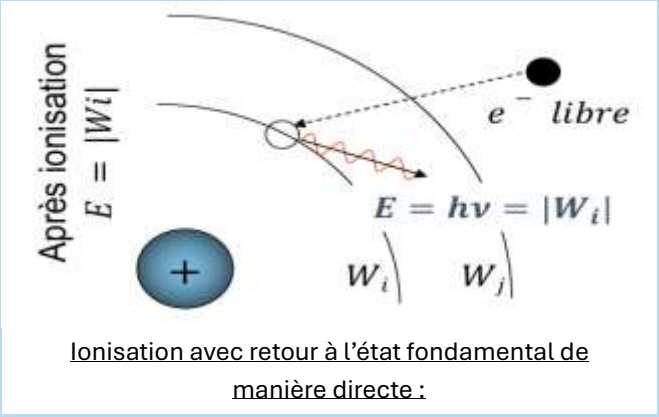
Le photon de fluorescence :

Quand on a une ionisation ou une **excitation**, on a un excès d'énergie et une case vacante laissée vide, donc :

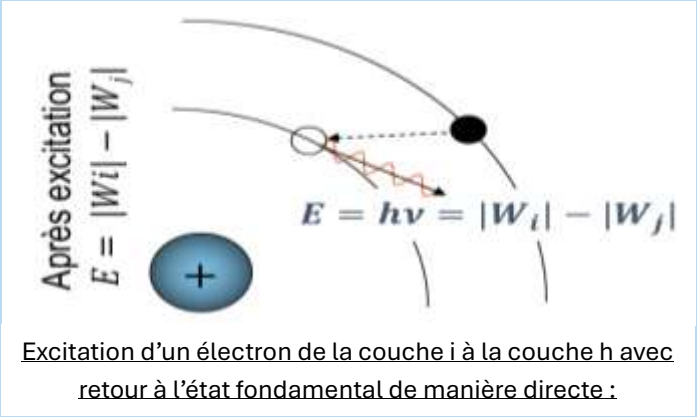
- ➔ Un électron va venir combler la case quantique laissée vacante par l'ionisation ou l'excitation.
- ➔ Lorsque cela se fait, il y a une émission **d'un photon de fluorescence**, qui emporte une certaine énergie **E= hv** (E étant égale à l'excès d'énergie qui est libéré).

La matière reprend son architecture et libère son excès d'énergie sous forme **d'un photon de fluorescence**. C'est un mécanisme général.

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 juste d'un réarrangement de leurs positions.



Ionisation avec retour à l'état fondamental de manière directe :



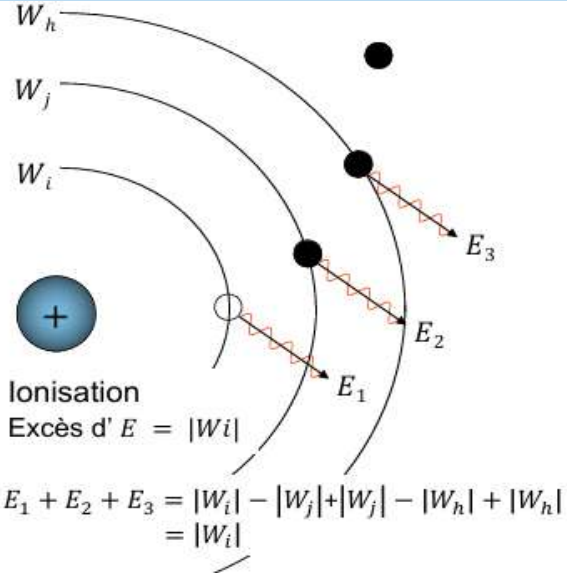
Excitation d'un électron de la couche i à la couche h avec retour à l'état fondamental de manière directe :

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 = |Wi|** qui correspond à l'énergie de liaison de l'électron sur la couche **i**
(qui correspond à l'excès d'énergie qu'avait l'atome ionisé)

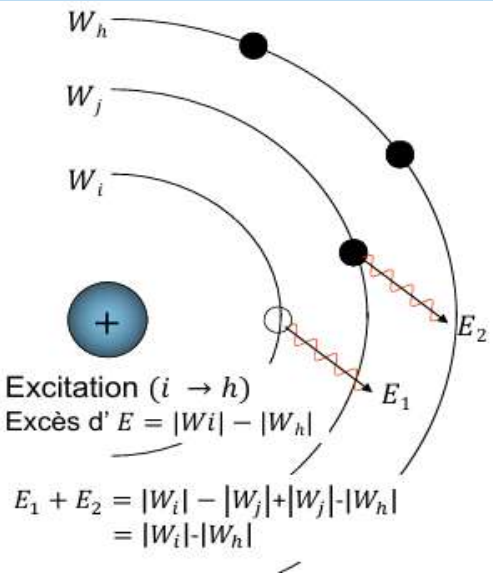
Après **Excitation** où l'atome a un excès d'énergie égal à **|Wi| - |Wj|** , l'électron qui a été positionné sur une couche plus périphérique (excité) peut revenir sur cette vacance électronique de la couche **i**. Il va émettre un **Photon de FLUORESCENCE** qui sera égal à **|Wi| - |Wj|** .
L'atome va pouvoir restituer son excès d'énergie sous la forme de **son Photon de FLUORESCENCE**.

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

Le retour à l'état fondamental peut se faire **de manière directe** *(ce qu'on vient de voir)* ou via une **cascade de réarrangements** (de manière indirecte)



Ionisation avec retour à l'état fondamental de manière indirecte :



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

Après l'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 de FLUORESCENCE E2**.
La nouvelle case vacante sur la couche **h** peut être comblée par un électron libre qui produira un 3e
Photon de FLUORESCENCE E3

- ⇨ La somme des énergies de tous les photons émis reste égale à **l'excès d'énergie** de l'atome

Après l'excitation :

La case peut être comblée par un électron de la couche **j** qui produit un
1er Photon de FLUORESCENCE E1
Cette case vacante sur la couche **j** peut être comblée par un électron de la couche **h** qui produit un
2ème Photon de FLUORESCENCE E2.

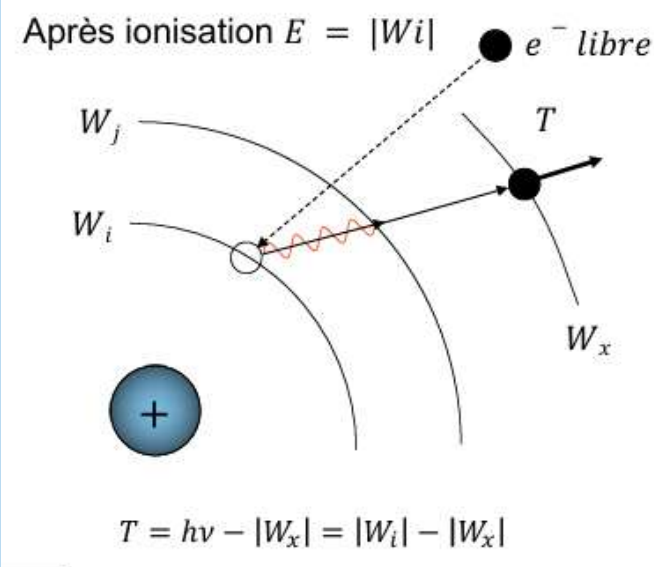
Encore une fois, la somme des énergies de tous les photons émis est égale à **l'excès d'énergie** qu'avait l'atome après son excitation

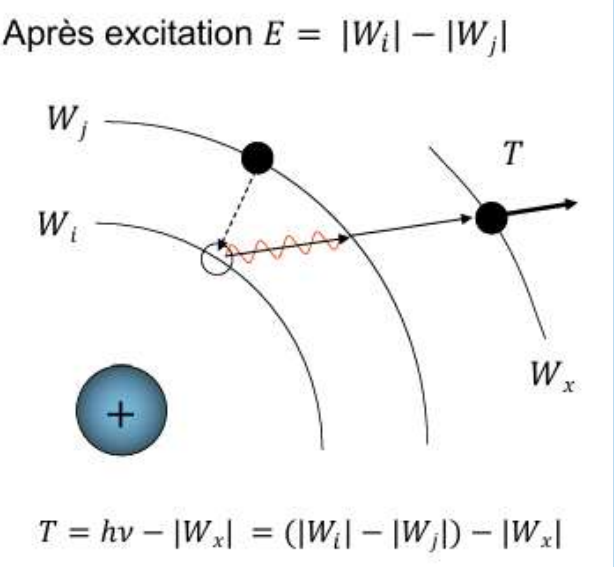
Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

B) Émission d'un électron d'Auger

Un photon de fluorescence (qui est un rayonnement énergétique) peut lui-même expulser un électron de l'atome qui lui a donné naissance, c'est ce qu'on appelle un **électron d'Auger**. C'est en général un électron d'une couche plus périphérique. (de l'atome)
Cet électron est émis avec une certaine énergie cinétique :

- T= excès d'énergie de l'atome - | Wx |





Après l'Ionisation :

Un atome a subi une **ionisation** d'un électron de la couche **i**. Admettons que cette vacance soit directement comblée par un électron libre, ce qui va produire un **photon de fluorescence** dont l'énergie sera égale à |Wi|.
Ce **photon de fluorescence** ne va pas directement sortir de l'atome, mais va produire le déplacement, sur une couche que l'on va appeler **x**.
L'énergie cinétique de cet **électron d'AUGER** sera :

T = hv - |Wx| = |Wi| - |Wx| *(c'est un nu)*

Après l'Excitation :

L'atome a un excès d'énergie **E= |Wi| - |Wj|** .

La restitution d'énergie peut se faire par le retour d'un électron de la couche **j** à la couche **i**. (**i → j**)
Il va y avoir émission **d'un photon de fluorescence**, qui va transférer son énergie à un électron plus périphérique qui sera arraché.
Cet **électron d'AUGER** sera arraché avec une énergie cinétique :

T = hv - |Wx| = (|Wi| - |Wj|) - |Wx|
(encore une fois c'est un nu)

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

RECAAAAP :

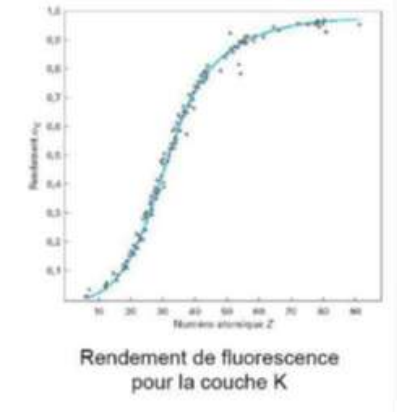
Un atome ionisé ou excité peut retourner à son état fondamental :

- Soit par émission **d'un photon de FLUORESCENCE**
- Soit par émission **d'un électron AUGER**

La **compétition** entre ces deux phénomènes est caractérisée par **le rendement de fluorescence ωi** qui dépend du Z de l'atome. *Pour rappel, le Z de l'atome c'est le nombre d'électron = le numéro atomique = nombre de charge (pas à apprendre, c'est pour votre compréhension)*

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

(oméga minuscule)



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.

Recap : Proba fluo plus élevée pour atomes lourds avec Z élevé
Proba Auger plus élevée pour atomes légers avec Z faible

VI) INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE :

A) Atténuation des photons à travers la matière :

Lorsqu'un flux de photons va traverser un échantillon de matière, chaque photon peut avoir un devenir différent. Il peut soit être :

- **Absorbé** : il ne franchit pas au-delà de la matière
- **Diffusé** : il va être dévié
- **Transmis** : il va traverser la matière sans interagir



Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

Il est important de connaître la proportion de ces photons qui sont transmis : c'est ce qu'on appelle **la loi d'atténuation**, le nombre de photons qui va pouvoir traverser un échantillon donné.

B) La loi d'atténuation (photons transmis) :

(Les formules qui suivent ne tombent pas vraiment, il faut surtout comprendre le principe mais je demanderai au prof pour être sûr)

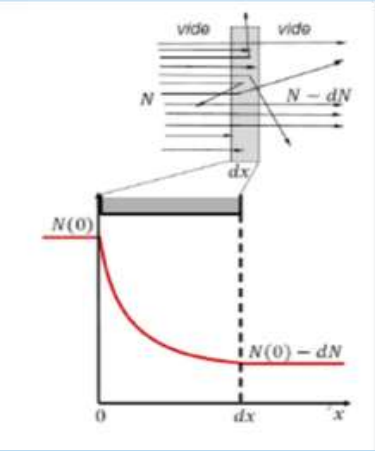
Soit un faisceau étroit de **N** photons mono énergétiques qui traversent une épaisseur **dx** de matière, le nombre de photons transmis est : **N - dN** (avec -dN=μNdx)

Le nombre de photons transmis est donc **proportionnel** à l'épaisseur **x**, à **N** le nombre de photons et à **μ**, la probabilité d'interaction par unité de longueur. Plus cette probabilité est élevée, plus un grand nombre de photons va être atténué → donc moins de photon transmis.

En gros plus l'épaisseur est élevée, plus le nombre de photon transmis est faible –> Donc dépend de l'épaisseur
Dépend du nombre de photon au début
Dépend de la probabilité d'interaction car si les photons ont une probabilité d'interaction faible alors il y a plus de photons qui passent.

De manière générale, le nombre de photons transmis s'écrit : **N(x)=N(0). e -μx**
Avec **N(0)** le nombre de photons atteignant l'échantillon de matière
μ cette probabilité d'interaction et **x** l'épaisseur traversée.

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



On voit bien qu'au début, la courbe descend vite, le nombre de photons diminue rapidement. C'est logique en soit : on en a beaucoup au début donc forcément, ils vont rencontrer des obstacles et être atténués. Ensuite y'a moins de photons donc l'atténuation diminue. ***(Pas à apprendre mais si ça vous intéresse)*** *: la vitesse d'atténuation est donnée par la dérivée de la courbe qui donne la quantité de photons (celle à gauche). On voit que la dérivée (tangente à la courbe) diminue de plus en plus, donc la vitesse d'atténuation diminue aussi !*

C) Les différentes expressions de μ :

μ (mu) 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).

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

Ce coefficient est spécifique du milieu et de son état (compression, densité…) et de l'énergie des photons. On a donc notre expression du nombre de photons transmis :

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

Le problème étant que l'épaisseur **x** peut être difficile à mesurer. On peut donc utiliser **μ/ρ** *(mu/rhô pour ceux qui sont pas bilingues en grec 😏) (rhô étant la masse volumique)*) qui correspond au coefficient massique d'atténuation. L'expression du nombre de photons transmis selon le coefficient massique d'atténuation devient alors :

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

Nous n'avons donc plus besoin de mesurer l'épaisseur **x** mais la masse surfacique rx ce qui est plus facile :

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

Ce coefficient massique d'atténuation ne dépend pas de l'état du milieu mais **il est spécifique du milieu !** Il a pour dimension une longueur au carré par unité de masse **[$L^2.M^{-1}$]** (par exemple des $cm^2.g^{-1}$)

Attention à la subtilité ici : il est spécifique du milieu mais ne dépend pas de l' état du milieu !!

RECAAAAP :

- **μ** (coefficient linéique d'atténuation) : probabilité d'interaction par unité de longueur. Dépend du type de milieu et de son état, de l'énergie des photons considérés.
- **μ/ρ** (coefficient massique d'atténuation) : dépend du coefficient linéique, plus facile à calculer et est spécifique du milieu.

ATTENTION : le professeur fait la distinction entre le milieu et l'état du milieu. Ce coefficient ne dépend **pas** de l'ÉTAT du milieu

Dans les qcm parfois on vous donne **μ/ρ** et **ρ** et vous vous voulez seulement μ pour calculer la CDA
Il faut ainsi multiplier → **μ/ρ x ρ = μ** → Ensuite vous pouvez calculer votre merveilleuse CDA 😉

D) Couche de demi-atténuation (CDA) :

La **couche de demi-atténuation** ou **CDA** correspond à l'épaisseur x qui diminue le flux de photons incident d'un facteur 2.

On peut donc écrire : **CDA=ln2/μ** ++++++++
On peut alors exprimer d'une autre façon la loi d'atténuation des photons, en fonction de la CDA :

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

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

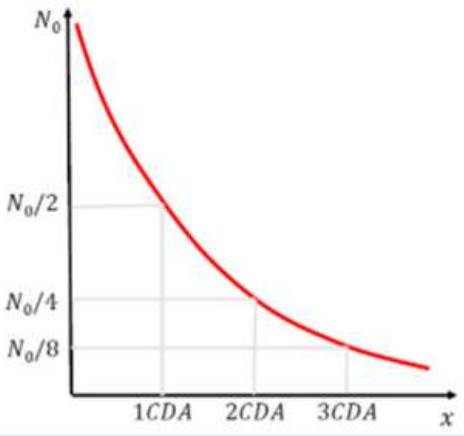
Ce qu'il faut comprendre, c'est que k correspond au nombre de CDA.
Si k=3, il y a 3 CDA donc le nombre de photons est divisé par 2*2*2*=8. *(on a divisé par 2 ; 3 fois)*
En modifiant un peu l'équation, on obtient directement la proportion de photons transmis :

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

Les deux formules ne sont pas à apprendre, la seule qu'il faut connaître c'est cella là :

++ **CDA=ln2/μ** ++

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



En gros souvent dans les qcm on va vous donner l'épaisseur d'une matière qui arrête un pourcentage de photon.
Ensuite il faudra trouver le nombre de CDA et ensuite retrouver la valeur d'une CDA.
→ J'ai mis un exemple dans le diapo de la TTR (n'hésitez pas à poser des questions si vous ne comprenez pas

Ou sinon on vous demandera d'appliquer la formule.

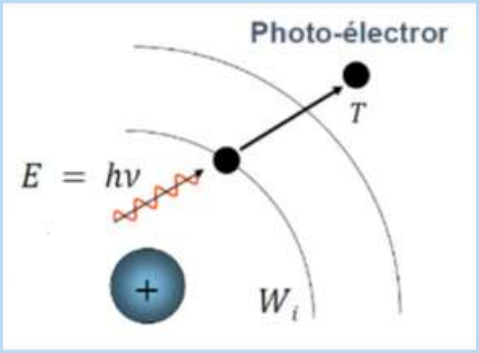
Ce tableau représente bien ce qu'on a expliqué en haut.

De plus, l'absorption d'un faisceau de photons n'est jamais totale. Cependant on considère que le nombre de photons transmis après **10 CDA est négligeable**.
Dans les calculs, si on trouve 12 CDA, on considère qu'aucun photon ne passe.

E) Les mécanismes d'interactions des photons :

1) L'effet photoélectrique

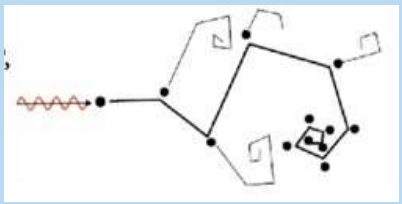
Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite



Cela correspond à un transfert de la **TOTALITÉ** de l'énergie du photon incident à un électron dans la matière. Admettons que nous avons un photon incident **E=hv** dont l'énergie est suffisante pour expulser un électron qui va devenir un **photo-électron**, émis avec une énergie cinétique **T= hv - | Wi |**.

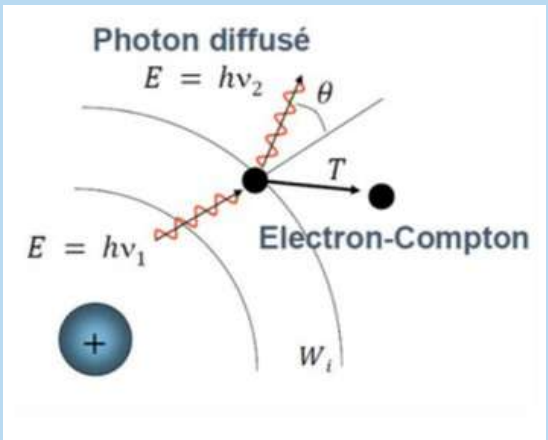
Les conséquences :

- Pour l'atome :
  - Une case vacante va être créée et il y aura un excès d'énergie. *(l'ionisation de tout à l'heure)*.
  - Il va y avoir un réarrangement de cet atome qui peut se faire par l'émission de **photons de fluorescence**, **et/ou** par l'émission **d'un ou plusieurs électrons Auger**.
- Pour l 'électron ionisé :
  - Puisqu'il possède une **énergie cinétique T**, il va avoir un parcours dans la matière et lui-même aura des interactions (coulombiennes) et produira des ionisations jusqu'à épuiser toute son énergie.
- Pour le rayonnement/photon : Il va disparaître puisqu'il a transféré la totalité de son énergie au **photo-électron**.



Ça c'est le trajet de l'électron ionisé qui va avoir des interactions.

2) L'effet Compton



Cela correspond à un transfert **PARTIEL** de l'énergie du photon incident à un électron de la matière (électron faiblement lié). L'énergie incidente se répartit alors entre :

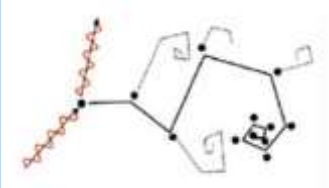
- l'énergie cinétique de **l'électron-Compton** émis,
- l'énergie consommée pour l'arracher (énergie de liaison)
- et l'énergie du photon diffusé (dévié)

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

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

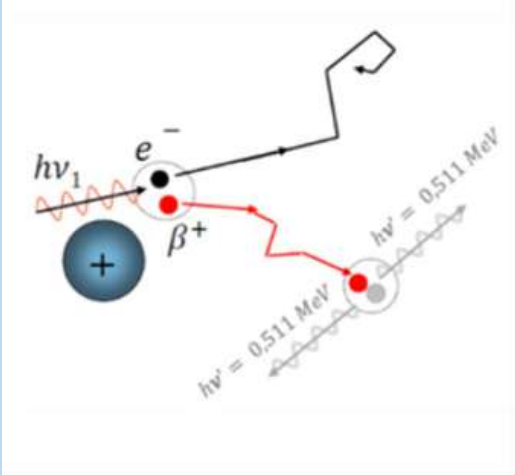
Les conséquences :

- Pour l' atome : réarrangement par **photons de fluorescence** et **électrons 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 (hn_2)



Pareil, là c'est le trajet de l'électron

3) La création de paire



Cela concerne un **photon très énergétique** passant à proximité d'un noyau, il voit son énergie transformée en **2 particules**. Les deux particules formées (un **électron** et une particule **β⁺** qui a la même masse qu'un électron mais qui est chargée positivement) étant des équivalents d'électrons,
il faut que cette énergie soit équivalente à la **masse de deux fois celle d'un électron**
(=9,1.10^{-31} kg soit **0,511 MeV/c2** avec l'équivalence masse-énergie) .

Si hv ≥1022keV, l'énergie peut se transformer en ces deux particules. (#leplusIMPORTANT)

Ou 1,022MeV

F) Les probabilités des différents mécanismes :

1) La probabilité de l'effet photo-électrique

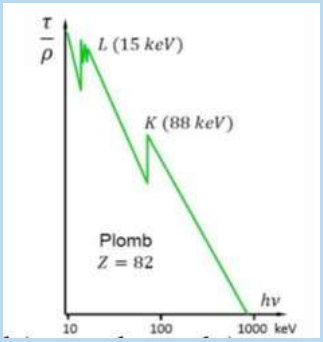
La **probabilité** qu'a un photon d'interagir **par effet photo-électrique** est notée **τ** et représente le **coefficient linéique d'atténuation** par un effet photo-électrique **pur**.
On peut donc écrire :

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

On peut réécrire la loi d'atténuation en ne tenant compte que de t si on ne considère **que l'effet photo-électrique** :

$$\tau = k\rho\frac{Z^3}{(hv)^3} \qquad \frac{\tau}{\rho} = k\frac{Z^3}{(hv)^3}$$

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite



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 maximas (pics) sur le graphique correspondent aux énergies exactes de liaison des différentes couches de l'atome.
  Cette propriété (probabilité d'effet photo-électrique) est utilisée dans le cadre des rayons X : les atomes du vivant (H,C,N,O) ont une faible probabilité d'interaction par effet photo électrique, à la différence du calcium ou des produits de contraste radiologique utilisés avec un Z élevé, 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) La probabilité de l'effet Compton

La probabilité qu'a un photon d'interagir par **effet Compton** est notée **σ** et représente **le coefficient linéique d'atténuation** par **un effet Compton**. On peut donc écrire :

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

On peut réécrire la loi d'atténuation en ne tenant compte que de **σ** si on ne considère **que l'effet Compton** :

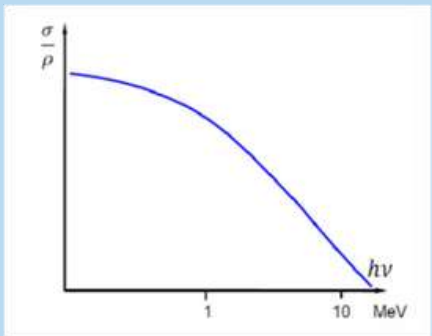
$$\sigma = k\rho\frac{1}{h\nu} \qquad \frac{\sigma}{\rho} = k\frac{1}{h\nu}$$

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

Exemple pour 140 keV :

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

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



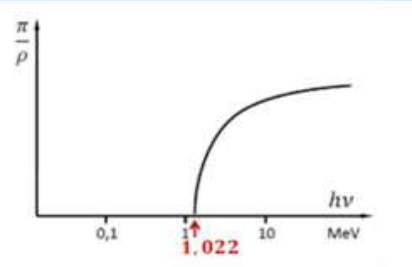
Il y a donc une **probabilité d'interaction en effet Compton élevée** pour les photons **d'énergie faible**. La probabilité d'interaction par effet Compton est pratiquement indépendante de la nature de la matière (Z).

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

3) La probabilité de la création de paire

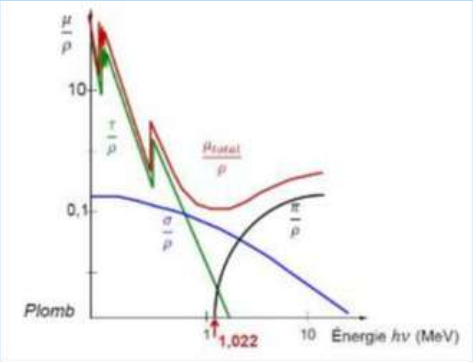
La probabilité qu'a un photon d'interagir par **effet de création de paire** est notée **π** et est régie principalement par un **effet de seuil** puisque l'on a vu qu'il fallait que le photon ait une énergie qui soit équivalente à **2 fois la masse d'un électron**.
Il y a donc une impossibilité de création de paire tant que les photons n'ont pas atteint et dépassé cette énergie de **1,022 MeV**. (1,022 MeV = 1022 keV ATTENTION aux unités !!!!!)
La probabilité est ensuite croissante en fonction de l'énergie des photons incidents.

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



En fonction de l'énergie du photon :

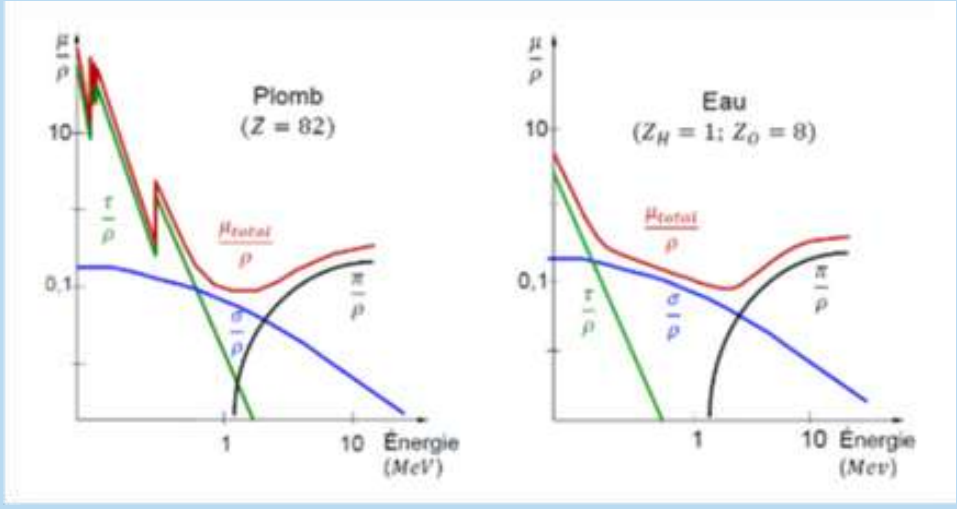
Pour les photons à énergie **faible**, l'effet photo électrique (vert) est le plus probable, mais l'effet Compton (bleu) est également possible. Et plus l'énergie augmente, plus les probabilités d'effet photo-électrique et Compton diminuent (moins rapidement pour l'effet Compton).



Encore une fois, **la création de paire** (noir) 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 probabilité pour le plomb est plus importante que pour l'eau). Les autres probabilités d'interactions ne sont pas significativement modifiées.



Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

VII) INTERACTIONS DES PARTICULES AVEC LA MATIÈRE :

A) Les interactions des neutrons :

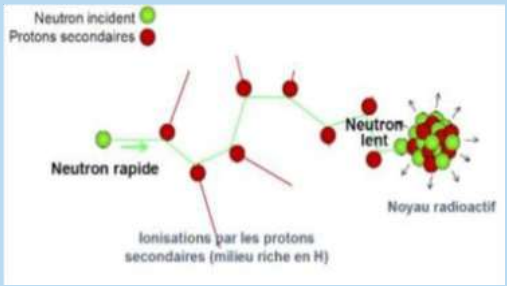
Les neutrons étant **non-chargés**, ils sont dits « **indirectement ionisants** » et ont des interactions **balistiques** avec les noyaux des atomes par choc direct. La probabilité d'interaction est donc **faible** du fait du faible diamètre du noyau par rapport à l'atome. Les neutrons sont donc dits « **très pénétrants** » (ils 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 d'hydrogène (composé d'un unique proton) percuté est alors expulsé avec une E cinétique. On parle de proton secondaire, qui peut alors provoquer des ionisations. (Les neutrons sont donc indirectement ionisants car le neutron n'est pas chargé mais va percuter le proton qui va lui être ionisant).
    - 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 (cela correspond à la capture nucléaire à l'origine de transformations radioactives) ("capture radiative") *(on verra ça en détail dans un autre cours)*

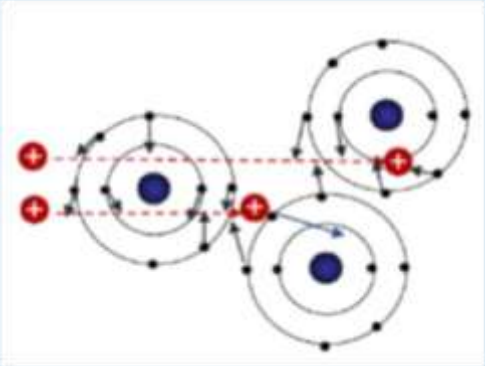
Ces propriétés expliquent l' utilisation d'eau dans les réacteurs nucléaires, afin de créer beaucoup d'interactions et de ralentir les neutrons du réacteur. Cela explique aussi l'utilisation de bombes à neutrons, qui vont respecter les infrastructures (diffusion des noyaux lourds), tout en affectant principalement les organismes (milieu riche en hydrogène).



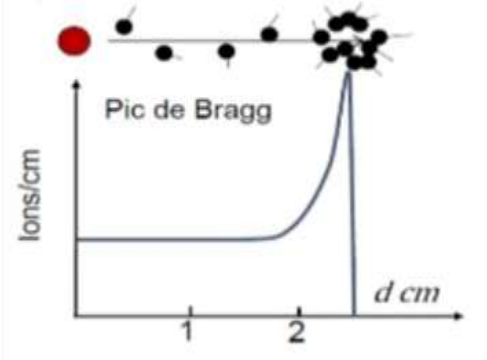
Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

B) Interactions des particules chargées :

On parle ici des **protons** et des **particules α** qui vont avoir des interactions coulombiennes avec les électrons de la matière. Elles vont avoir une influence extrêmement importante sur les électrons puisque même si leurs trajectoires passe à distance, elles vont interagir par le biais coulombien (de leur charge). 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 et 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.

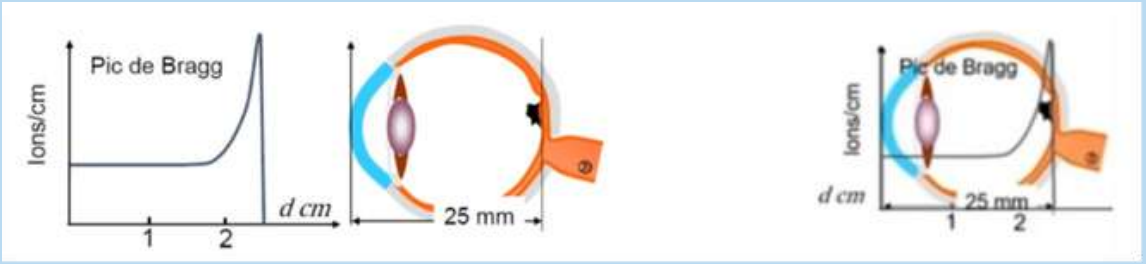


On voit ainsi sur ce schéma le nombre d'ionisations effectuées selon la distance, et on voit qu'il existe **un pic de Bragg**, qui correspond à une augmentation brutale de la concentration des ionisations au moment où la vitesse diminue, avec une chute brutale des ionisations à partir d'une certaine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

Exemple de la protonthérapie : *(il y a aussi un pic de Bragg pour les particules alpha)*

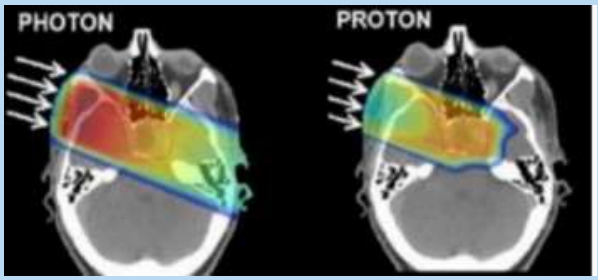
Cela a un intérêt thérapeutique, avec la **protonthérapie** par exemple. Cette méthode consiste à diriger un faisceau de protons sur une tumeur afin de la détruire, principalement pour des tumeurs superficielles. Le **trajet rectiligne** de ces particules permet une certaine précision pour ne pas endommager 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 protons de 65 MeV (créés par le cyclotron Médicyc), 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.
Si la tumeur est un peu plus superficielle, on rajoute de la matière devant l'œil pour avancer **le pic de Bragg**.

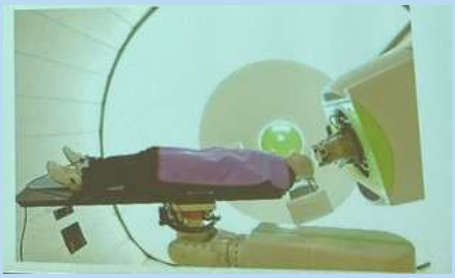
Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite



<u>Autre exemple avec la protonthérapie de haute énergie,</u> avec des protons de 230 MeV pour le traitement <u>des tumeurs plus profondes</u>. 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 ciblés, avec un faible dépôt en avant de la tumeur et aucun dépôt en arrière, ce qui permet de mieux préserver les tissus sains. *(on recapepete ALORS ici on dit juste que l'utilisation des protons est plus précise que celle des photons par exemple sur une tumeur)*





C) Les interactions des électrons :

Last one ouff

Les électrons (directement ionisants) vont pouvoir interagir avec la matière de différentes façons : avec **d'autres électrons** et **avec les noyaux**.

1. Les interactions électron-électron : interactions dites « par collision » :

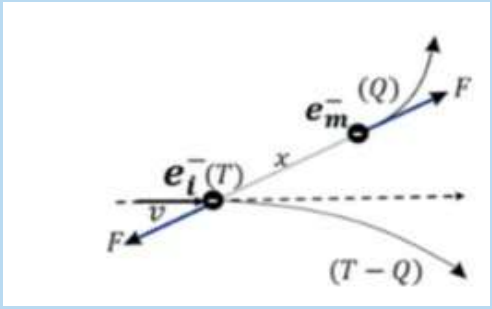
Un électron est chargé négativement et va interagir avec un autre électron évidemment chargé négativement lui aussi. Ce ne sont pas des interactions (chocs) physiques mais **des interactions coulombiennes** par deux charges qui vont se repousser.

Les conséquences pour la matière : on considère **T** comme **l'énergie cinétique** d'un électron incident dans la matière et **| Wi | l'énergie de liaison** d'un électron d'une manière cible :

- Si **T< |Wi |** et **≠ Δ | Wi |** , il ne va pas y avoir de déplacements des électrons mais simplement des phénomènes de vibration et des dépôts de chaleur.
- Si **T = Δ | Wi |** , il y a **excitation**.
- Si **T ≥ | Wi |**, il y a **ionisation** avec expulsion d'un électron.

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

S'il y a **ionisation** ou **excitation**, l'atome va revenir à son état fondamental par les mécanismes généraux, en particulier par **l'émission de photons de fluorescence**. Ces **photons de fluorescence** émis après l'intervention d'électrons sont les **rayons X** caractéristiques de la cible.



Les rayons X sont des types de photons de fluorescence

Dans ce cas, l'énergie des photons qui sont produits est dite **quantifiée** parce qu'elle est liée aux valeurs précises des énergies de liaison des électrons de la matière traversée (**spectre de raies**).



Les conséquences pour l'électron incident sont qu'il va interagir avec les électrons de la cible à distance puisque ce sont des interactions coulombiennes. Lors de la première interaction, l'énergie initiale (T) se répartit entre l'électron incident (T-Q) et l'électron mis en mouvement (Q). Cet électron incident a toujours une énergie cinétique donc il va pouvoir produire d'autres interactions successives avec d'autres électrons tant que l'énergie T-Q dont il dispose est suffisante pour le faire.

2. Les interactions électron-noyau : interactions dites « par freinage » :

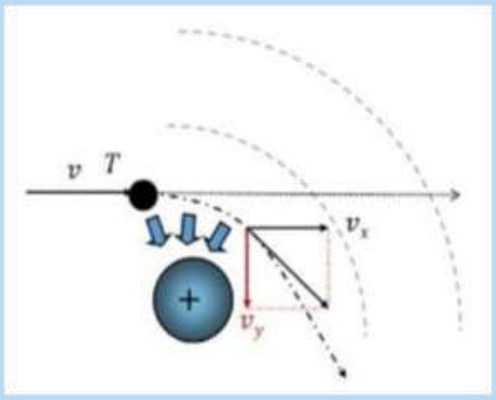
Le mécanisme est différent : il est lié à l'interaction entre un électron incident et les noyaux des atomes de la matière traversée. En effet, dans cette situation, la différence de masse entre la particule incidente (électron) et le noyau est **considérable**. Le passage d'un électron à proximité de ce noyau va influencer l'électron mais ne va pas produire d'effets significatifs au niveau de ce noyau.

L'électron étant chargé négativement et le noyau chargé positivement, il va y avoir une attraction coulombienne de l'électron par le noyau. Du fait de cette attraction coulombienne, l'électron va être dévié et subir une accélération centripète (vy). Cette accélération va générer une énergie manifestée sous forme d'un rayonnement électromagnétique :

→ **des photons X**

(rayons X c'est pareil).

La diminution de sa vitesse va causer un freinage (vx) en même temps.



Petit rappel au cas où :
Centrifuge= vers l'extérieur
Centripète=vers l'intérieur

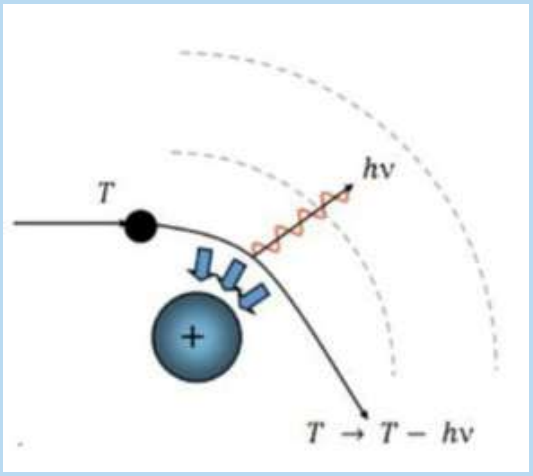
Mnémo de mon super co-tut Tahernie

Centrifuge fais penser à fuguer donc vers l'extérieur

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

L'importance de cette énergie emportée par le rayonnement est d'autant plus forte que l'électron va passer à proximité du noyau. La valeur de l'énergie des photons générés hv n'est **pas quantifiée**, elle peut prendre toutes les valeurs **entre 0 et T** (spectre continu).

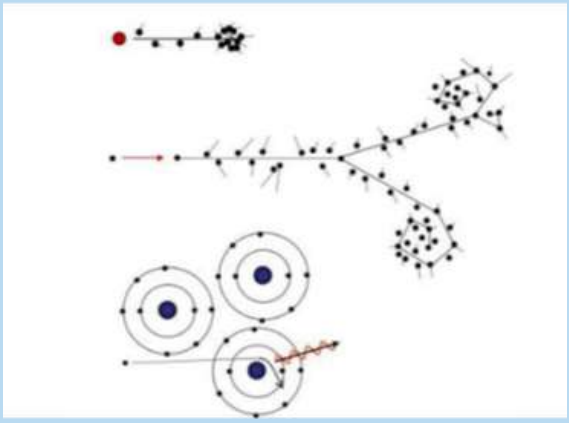
- Les conséquences pour la matière sont que cette attraction par le noyau de l'atome va générer un rayonnement électromagnétique qui appartient aussi aux **photons X**.
- Les conséquences pour l'électron incident sont qu'il est dévié et perd de l'énergie puisqu'une partie va être perdue par ce rayonnement produit par son passage à proximité du noyau (T→ T-hv d'où le nom de « rayonnement de freinage »).



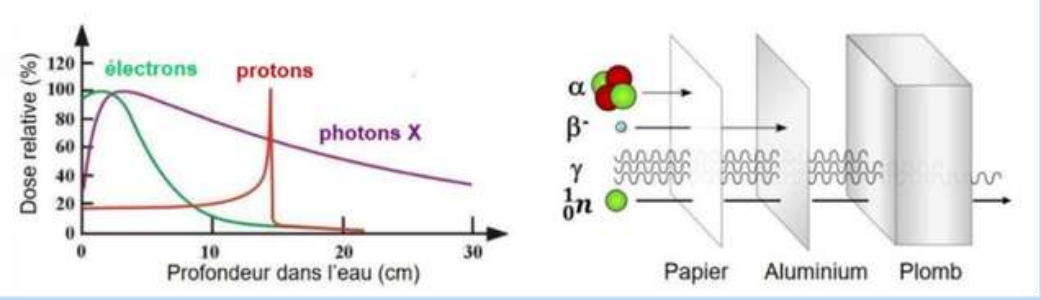
VIII) CONCLUSION :

Enfinnnn

Lorsque des particules traversent la matière, elles vont perdre progressivement leur énergie en produisant des ionisations. Cette distribution des ionisations dépend beaucoup du type de particule, de son énergie et des milieux traversés.



On peut constater que la distribution de l'énergie déposée dépend du type de rayonnement/particule. L'importance des interactions (le pouvoir d'arrêt) dépend alors de l'énergie et de la matière traversée.



Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

FINNNNNNNNN

BRAVOO d'avoir terminé cette LOOOOONNNGUUEEE fiche



Et maintenant le moment que j'attends le plus depuis 2 ans !!!!

DEDISSSSSSSSSS : (#pipeletteagain) (#dédisrandom)

Tout d'abord dédi au TUTORAT qui est VRAIMENT génial !!!!

Dédi à mes parents !!!

Dédi à mon merveilleux frère (il est fan de JUL ...)

Dédi à mes bestiesssssssss 🫶 (Noa,Océ,Laurie je vous aime 🫀)

Dédi à la Tut' rentrée c'est génialllll et au make you moove !!

Dédi à mon Anglais en Amphi 2 (je suis pas bilingue hein) (« Alright, So »)



Dédi à CAS (cigarette after sexe) que j'écoute en ce moment → C'est tellement apaisant

Dédi à mes co-tut qui sont INCROYABLESSSS on va vous faire un travail monstre !!
(Taher , Hugo et Norhan ❤️‍🩹❤️‍🩹❤️‍🩹)

Dédi au CT de Taher !!!

DEDI à BIOPHYKWAKKKKKKKK la Star de la Biophysique (et du tutorat)
D'ailleurs si vous êtes pas abonnez à son insta (@biophykwak) allez y maintenant (je vous vois) !!

Dédi à ceux qui lisent les dédis avant de lire la fiche (et c'est ok)

Dédi à tous nos CT (même Lucas)

Dédi à tous les tuteurs qui font un travail de malade

Dédi à Alix (qui slay toujours ses outfits et aussi l'accent british) et Ugo (oui y a pas de H)

Dédi à notre boîte improvisé (Alizé et Hélène)



Dédi à Myriam qui me prend tout le temps en photo (fan)

Dédi à Cosmina (swiftiiiiiiieee)

Dédi à Taylor Swift (c'est sa ficheeee #1989)

Dédi à Théo la Star du Tutorat

Dédi à Kelliah et ses fiches (vous verrez en Embryo au S2 elles sont trop belles)

Dédi à Marie et notre danse (**I keep dancing on my own**) → On dead

Dédi à Océane la starr (la mascotte et le cheval ...)

Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite

Dédi à Safa et sa merveilleuse ficheeeeeee (goat)

Dédi à la montagne en général (la rando, le trail, le mooddd)

Dédi au fromage (miam)

Dédi au trail de St jeannet



Dédis à tous les LAS 2 / LAS 3 vous avez tellement de courage !!! (surtout toi Schaima 💓)
Je crois tellement en vous !!!!!
Pour les LAS 2/3 SV on se sait

Et enfin dédis à vous les P1 qui commencez pour la première fois cette merveilleuse année !!
Vous allez voir cette année est pleins d'émotions et vous avez tellement de chance de la vivre !
Ne désespérez pas et ne culpabilisez pas vous faites de votre mieux.
Si vous vous sentez dépassé par les cours c'est normal et petit à petit ça va aller !!!!

à scanner avec spotify

Pour tout le monde un mot d'ordre CROYEZ EN VOUS !
Et en tout cas moi je crois en vous 😊

Si jamais vous avez des suggestions, des conseils ou que vous repérez des erratas dans mes fiches n'hésitez pas à me le dire
Si vous avez un coup de mou ou besoin de soutien, vous pouvez me contacter sur Messenger.

Messenger : Valentin Lacroix

Allez des bisousssss on se retrouve bientôt !!!!!! 😊







Le tutorat est un service GRATUIT (et super méga génial). Toute vente ou reproduction est interdite