

The background features a gradient from red at the top to blue at the bottom, overlaid with faint, semi-transparent circular patterns and a scale. The scale is a large arc on the left side, with numerical markings from 140 to 260 in increments of 10. Several smaller circles and arcs are scattered across the background, some with arrows indicating direction.

INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIÈRE

UE3A - BIOPHYSIQUE
TUT'ENTRÉE 2016/2017 - COURS 2

INTRODUCTION

- Cette interaction se traduit par un **transfert d'énergie** du **rayonnement** vers la **matière**.
- Une **interaction** est nécessaire pour **détecter un rayonnement** : intérêt des interactions **rayonnement-détecteur** pour **l'imagerie**.
- Les interactions sont la **1e étape de l'action biologique des rayonnements** : intérêt en **radiothérapie** et en **radioprotection**.

PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

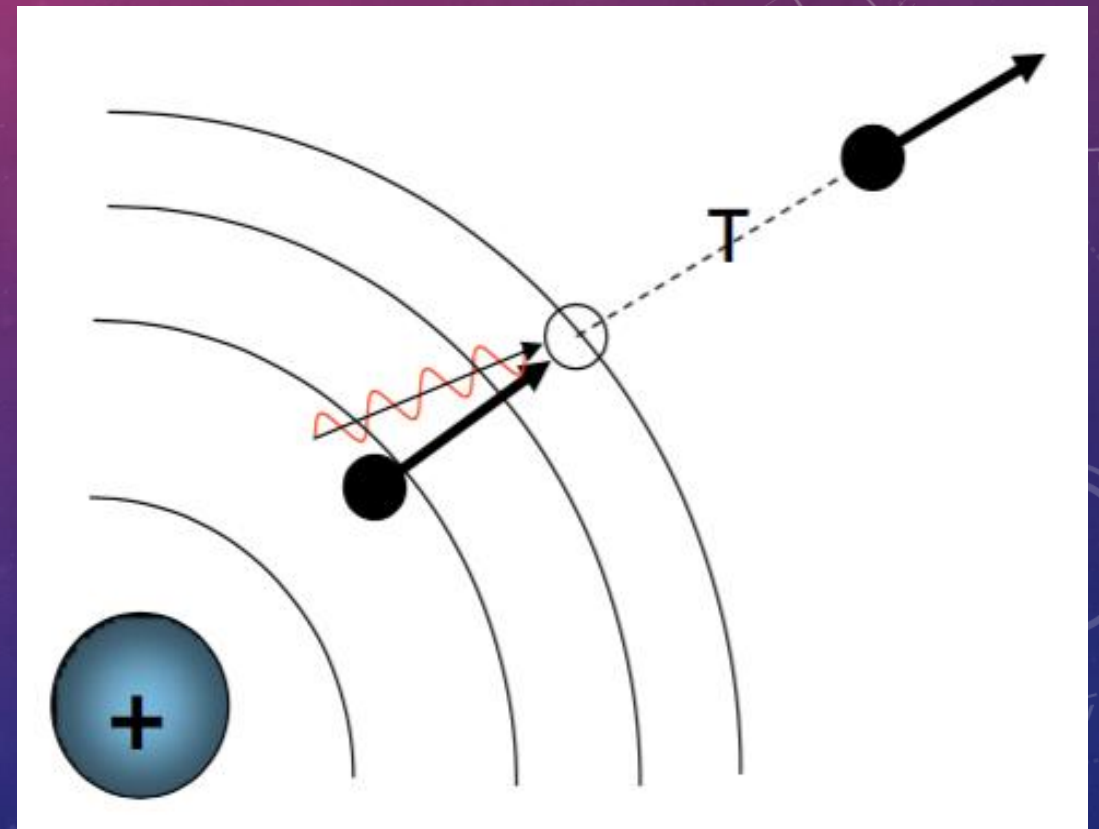
III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

A. RAYONNEMENTS IONISANTS

Rayonnements **électromagnétiques** ou **corpusculaires** capables de **produire directement ou indirectement** des **ions**, lors de leur passage à travers les atomes et les molécules

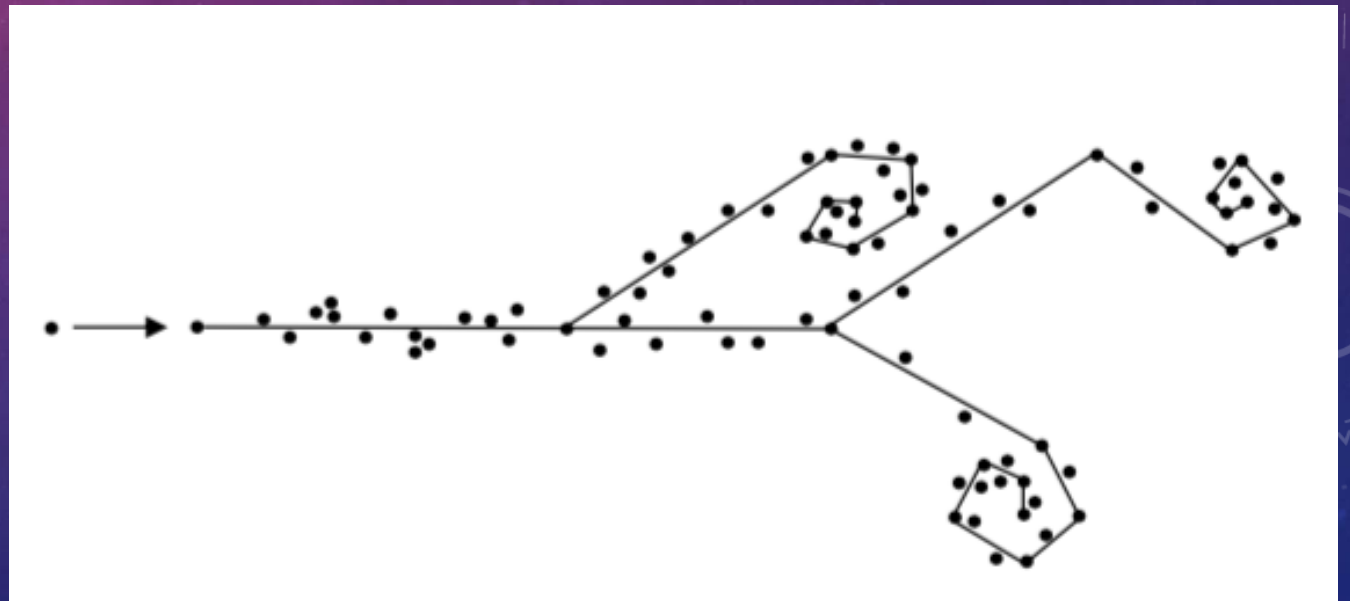
- Les **ions** sont à la base de la **détection** des rayonnements (*systèmes d'imagerie, compteurs de particules, dosimètres...*)
- Les **ions** ont des **effets biologiques** sur l'ADN...



B. RAYONNEMENTS DIRECTEMENT ET INDIRECTEMENT IONISANTS

Les particules chargées (α^{2+} , β^- , β^+ , e^- , p^+) :

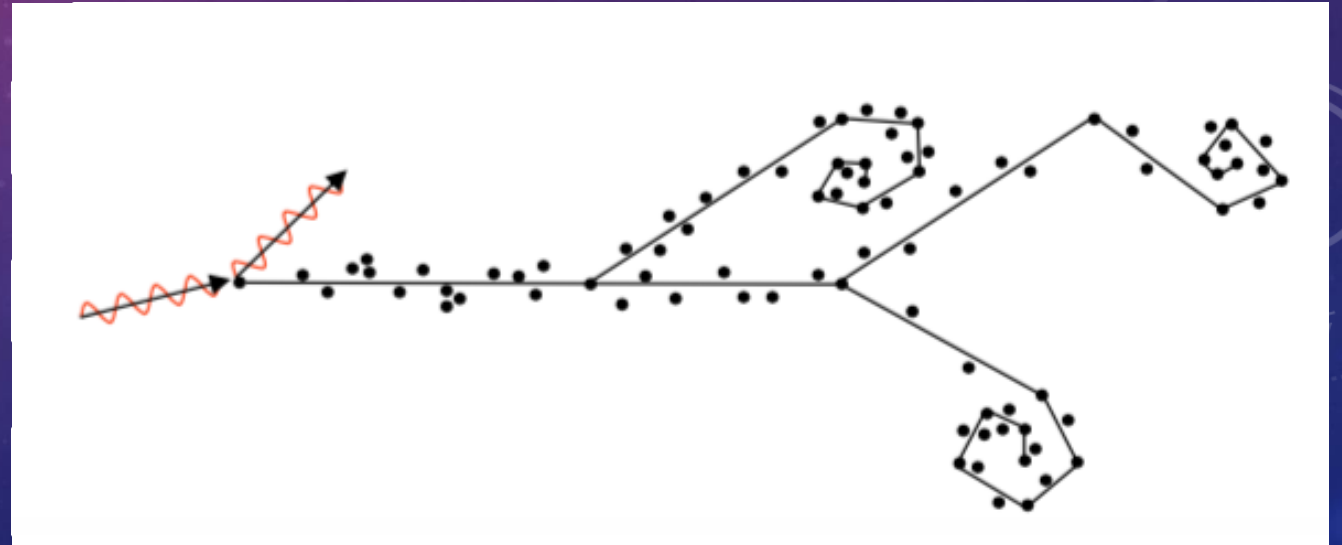
- interagissent **obligatoirement** avec la matière (elle-même chargée)
- sont **directement ionisantes**



B. RAYONNEMENTS DIRECTEMENT ET INDIRECTEMENT IONISANTS (SUITE)

Les rayonnements et les particules neutres (γ , X , 1_0n) :

- interagissent de façon **non-obligatoire** (*statistique, stochastique*) :
- sont **indirectement ionisants** :
 - par les **électrons mis en mouvement** (γ , X)
 - par les **protons secondaires** (1_0n)



C. CARACTÈRE IONISANT DES RAYONNEMENTS ÉLECTROMAGNÉTIQUES

Pour qu'un **rayonnement électromagnétique** soit **ionisant**, il faut que **l'énergie $h\nu$ du photon** soit **supérieure** à une **énergie de liaison d'un électron** :

$$h\nu > |Wn|$$

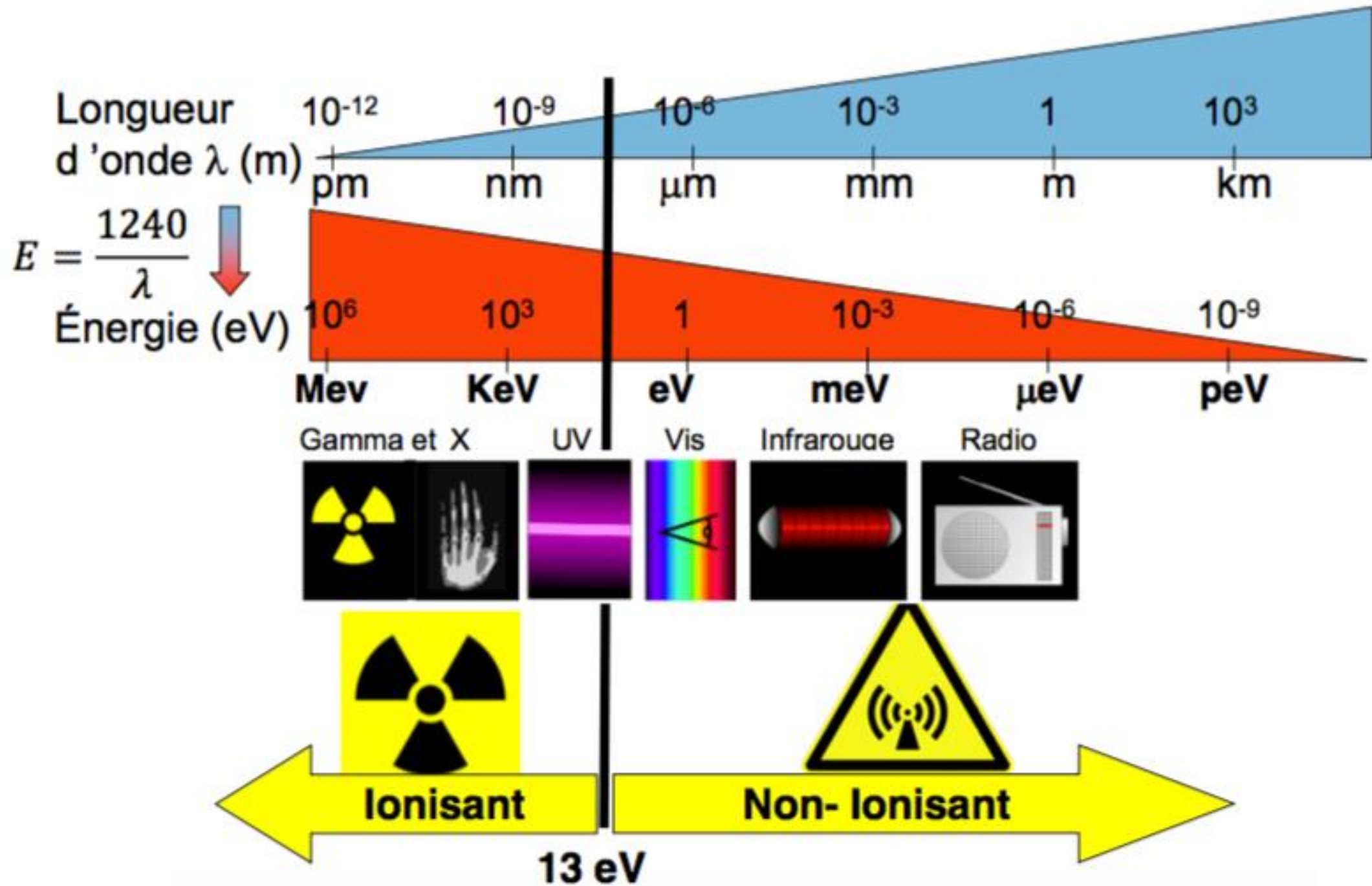
La **molécule la plus abondante** est **l'eau**, et **l'énergie moyenne des électrons** de cette molécule est d'environ **13,6 eV**.

Statistiquement, dans le milieu biologique :

- un **rayonnement d'énergie < 13 eV** ne provoque pas d'ionisation
- un **rayonnement d'énergie > 13 eV** est capable d'expulser des électrons

Atome	IWI (eV)
<i>C</i>	11,24
<i>H</i>	13,54
<i>O</i>	13,57
<i>N</i>	14,24

$H_2O \cong 13,6$ eV



PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

- Les **rayonnements qui traversent un milieu** entrent en **collision** avec les **éléments de ce milieu**, essentiellement les **électrons des atomes**.
- Au cours de ces collisions, **une partie de l'énergie** des rayonnements est **consommée** pour **déplacer ces électrons** : il y a **transfert d'énergie** du rayonnement **aux atomes de la matière** (**absorption** d'énergie). **Selon l'importance de l'énergie** mise en jeu, on observera soit une **ionisation** soit une **excitation** des atomes concernés.
- Dans tous les cas, **l'énergie absorbée** par l'atome **sera restituée** (**émission** d'énergie)

A. Absorption par excitation

B. Absorption par ionisation

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

Si l'énergie du photon ($E = h\nu$) est inférieure à l'énergie de liaison d'un électron ($E < |W_i|$), mais correspond à l'écart entre 2 énergies de liaison ($E = |W_i| - |W_j|$):

- l'électron change d'orbitale (sur une case quantique libre)
- il y a **excitation** de l'atome
- l'atome passe de son état fondamental à un **excès d'énergie** :

$$E = |W_i| - |W_j|$$

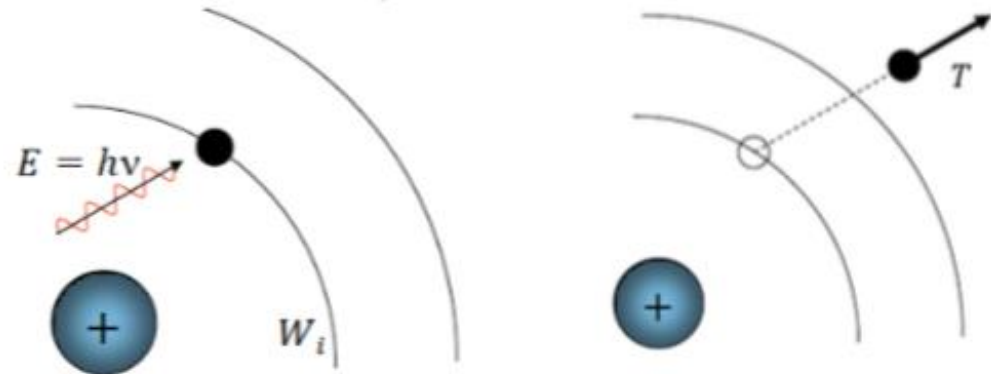
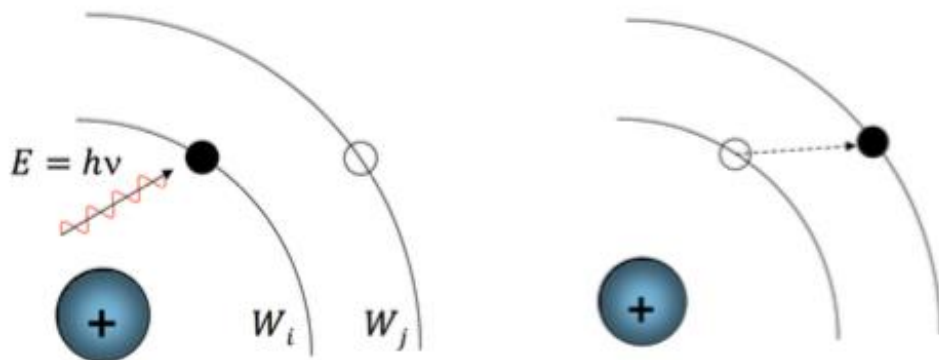
⇒ L'énergie absorbée est quantifiée

Si l'énergie du photon ($E = h\nu$) est supérieure à l'énergie de liaison $|W_i|$ d'un électron :

- celui-ci est **expulsé**
- il y a **ionisation** de l'atome
- l'atome passe de son état fondamental à un **excès d'énergie** $|W_i|$
- l'électron part avec une **énergie cinétique** T

$$|W_i| + T = E = h\nu \quad \text{et} \quad T = h\nu - |W_i|$$

⇒ L'énergie absorbée n'est pas quantifiée



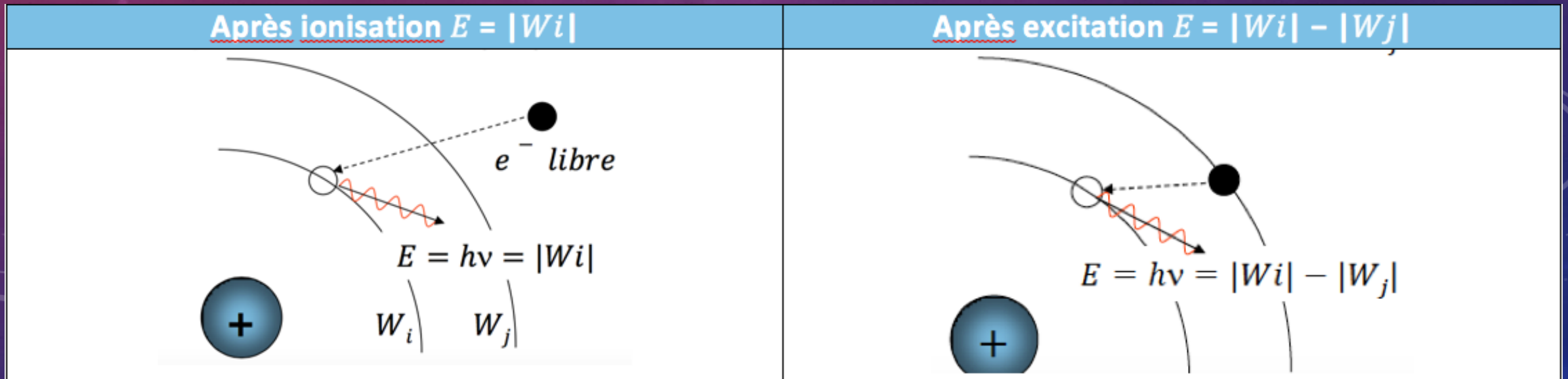
C. ÉMISSION D'UN PHOTON DE FLUORESCENCE

L'atome **excité ou ionisé** n'est plus dans son état fondamental (il est **instable**). Il possède un **excès d'énergie**. Il tend à retourner à son état fondamental (**se désexciter**) pour :

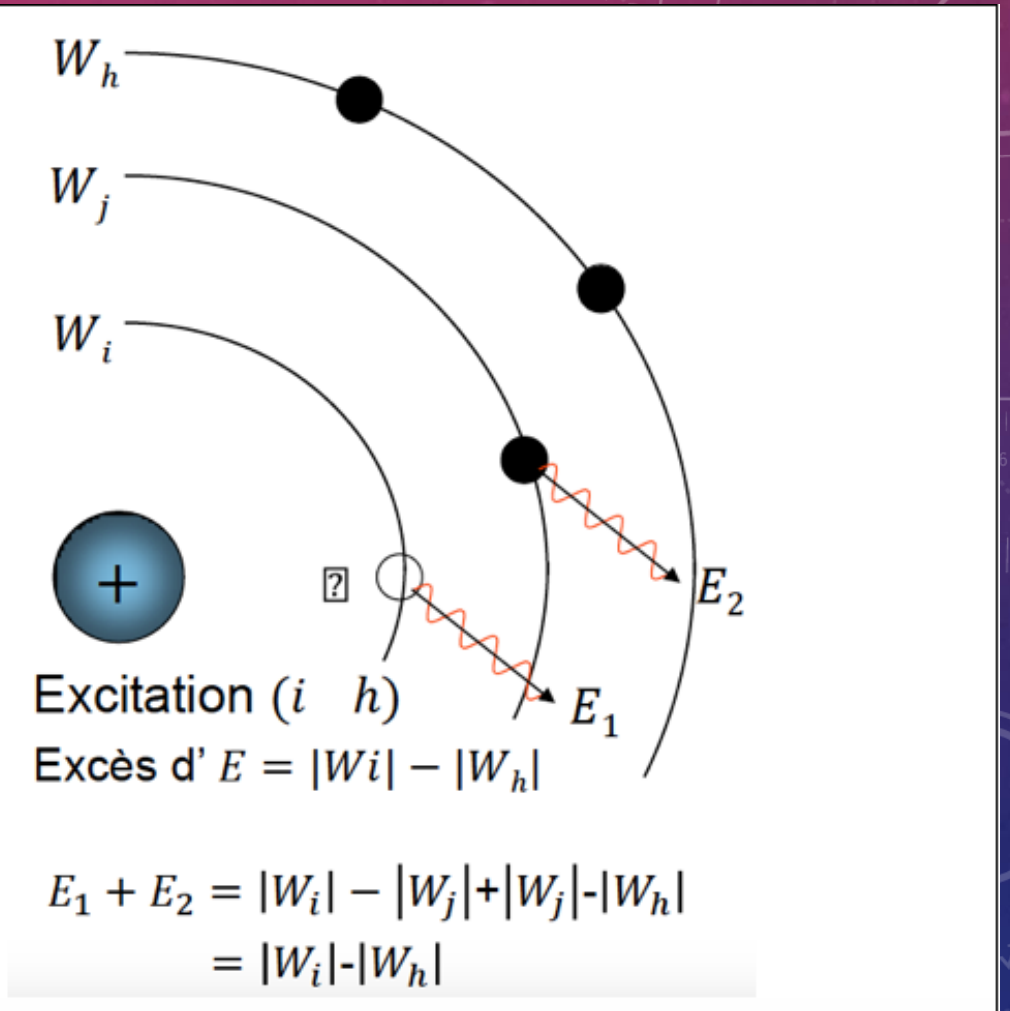
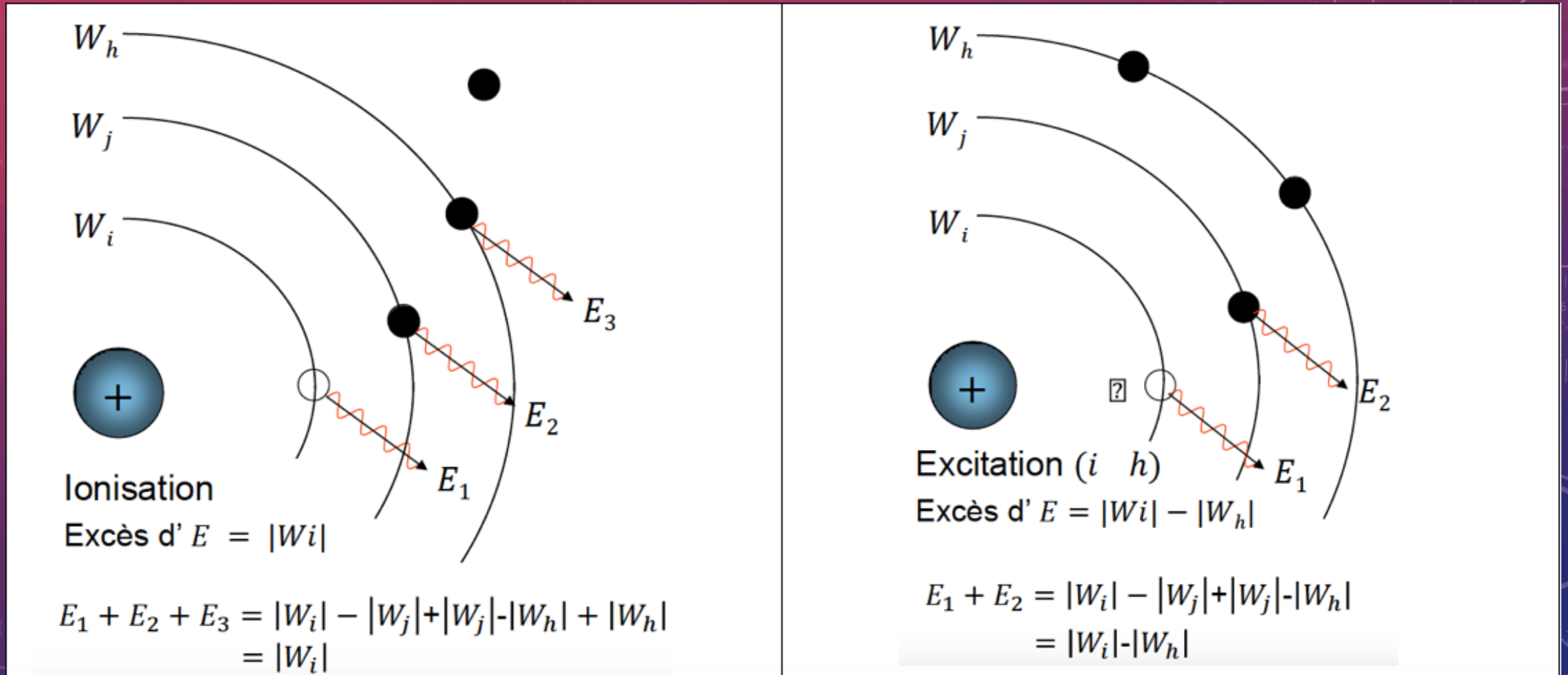
- retrouver son architecture initiale
- et restituer l'excès d'énergie

Un électron vient combler la case quantique laissée vacante.

Un photon dit de fluorescence $E = h\nu$ est émis.

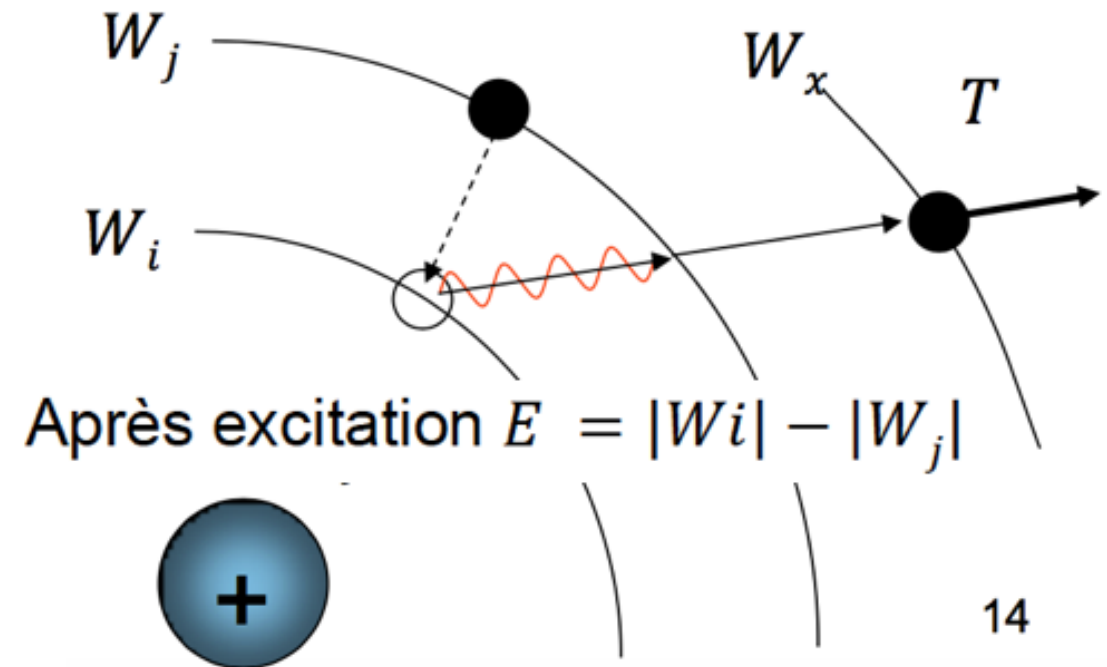
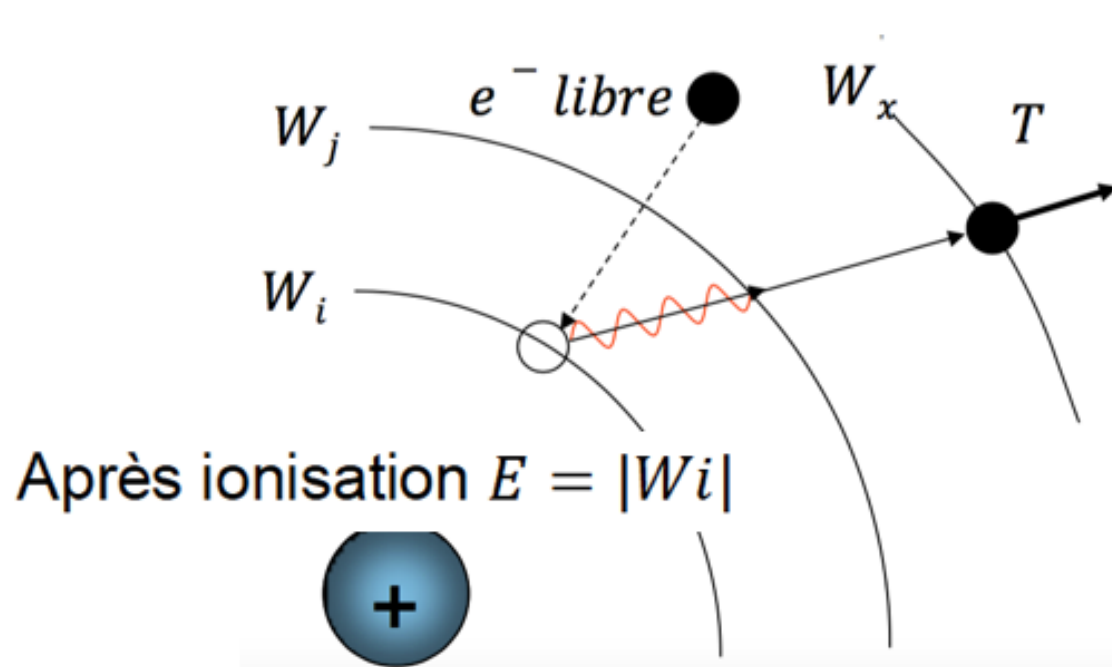


Le retour à l'état fondamental peut aussi se faire en plusieurs étapes par une cascade de réarrangements électroniques



D.ÉMISSION D'UN ÉLECTRON AUGER

Un photon de fluorescence peut lui-même **expulser un électron** de l'atome qui lui a donné naissance.



PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

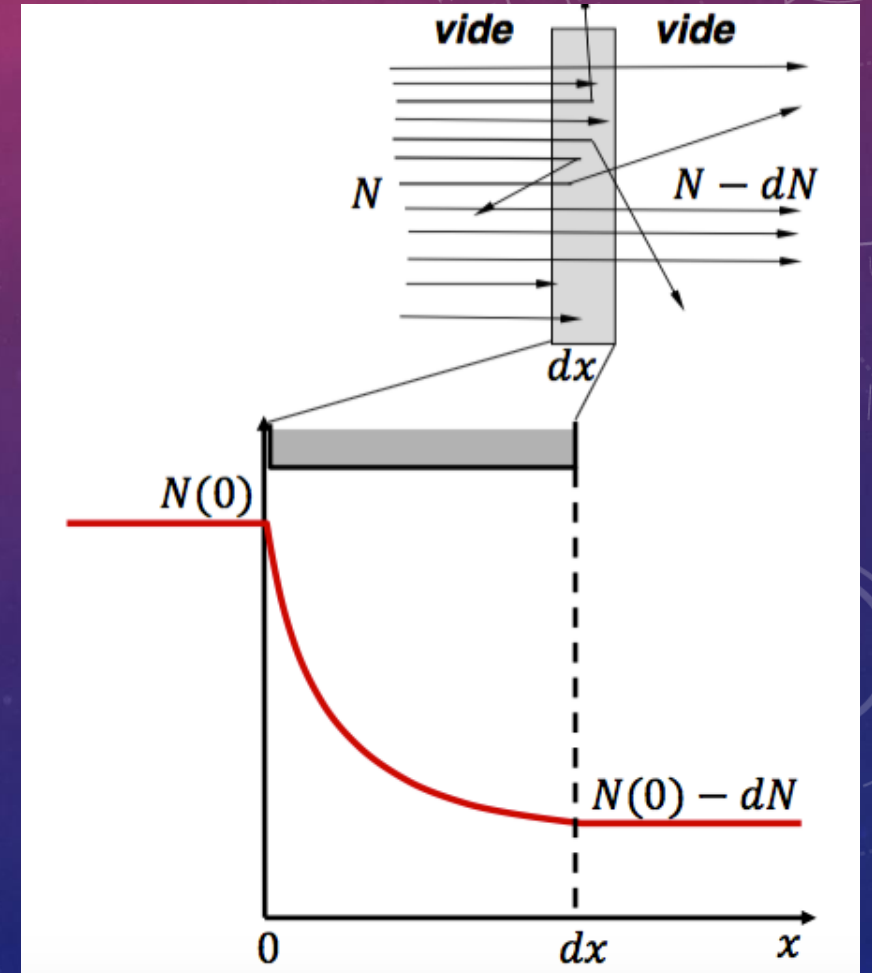
III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

A. LOI D'ATTÉNUATION DES PHOTONS DANS LA MATIÈRE

Expression de la loi :

- Soit un faisceau étroit de **N photons mono-énergétiques** qui traversent une épaisseur **dx** de matière, le nombre de photons persistant après cette traversée est : **$N - dN$** avec **$-dN = \mu N dx$** avec **$\mu = \text{probabilité d'interaction par unité de longueur}$**
- D'une manière générale, le nombre de photons présents à l'épaisseur x est :

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

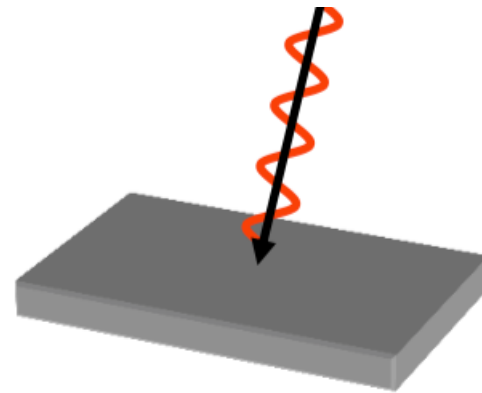


III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

A. LOI D'ATTÉNUATION DES PHOTONS DANS LA MATIÈRE

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

x = épaisseur difficile à mesurer {



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

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

A. LOI D'ATTÉNUATION DES PHOTONS DANS LA MATIÈRE

Différentes expressions de μ :

μ = coefficient linéique
d'atténuation

- **probabilité d'interaction** par unité de longueur
- **dimension** $[L^{-1}]$ (par exemple cm^{-1})
- **spécifique** du milieu et de l'énergie des photons
- dépend de l'état du milieu (compression, densité...)

$\frac{\mu}{\rho}$ = coefficient massique
d'atténuation

- ne dépend pas de l'état du milieu (compression, densité...)
- dimension $L^2 \cdot M^{-1}$ (par exemple $cm^2 \cdot g^{-1}$)
- masse surfacique : $\frac{m}{s} = \rho x$, plus facile à mesurer que l'épaisseur x

$$\rho = \frac{m}{vol} = \frac{m}{Sx} \implies \rho x = \frac{m}{s}$$

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

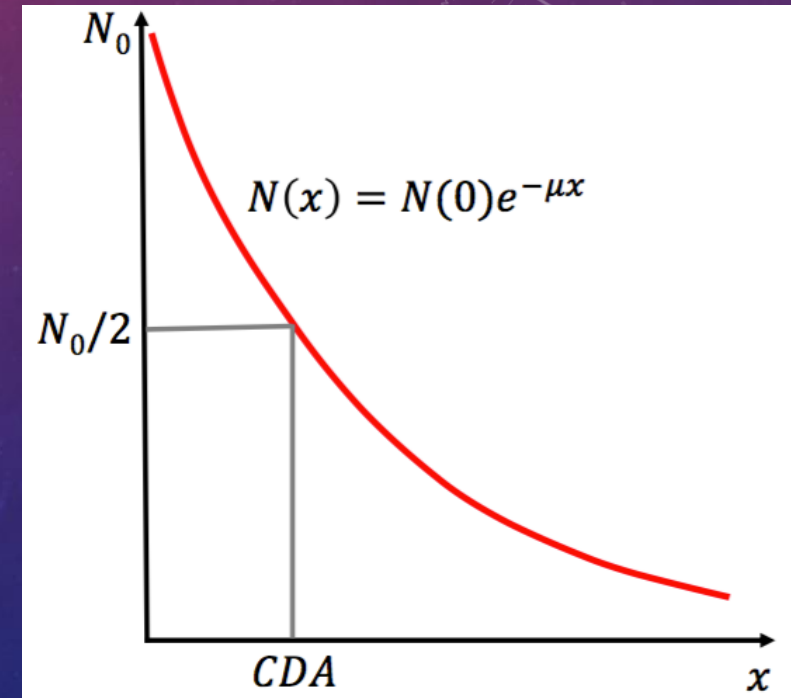
A. LOI D'ATTÉNUATION DES PHOTONS DANS LA MATIÈRE

Couche de demi atténuation CDA :

= épaisseur x qui diminue le flux de photons d'un facteur 2

$$\frac{N(0)}{2} = N(0)e^{-\mu \cdot CDA}$$

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu}$$



III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

A. LOI D'ATTÉNUATION DES PHOTONS DANS LA MATIÈRE

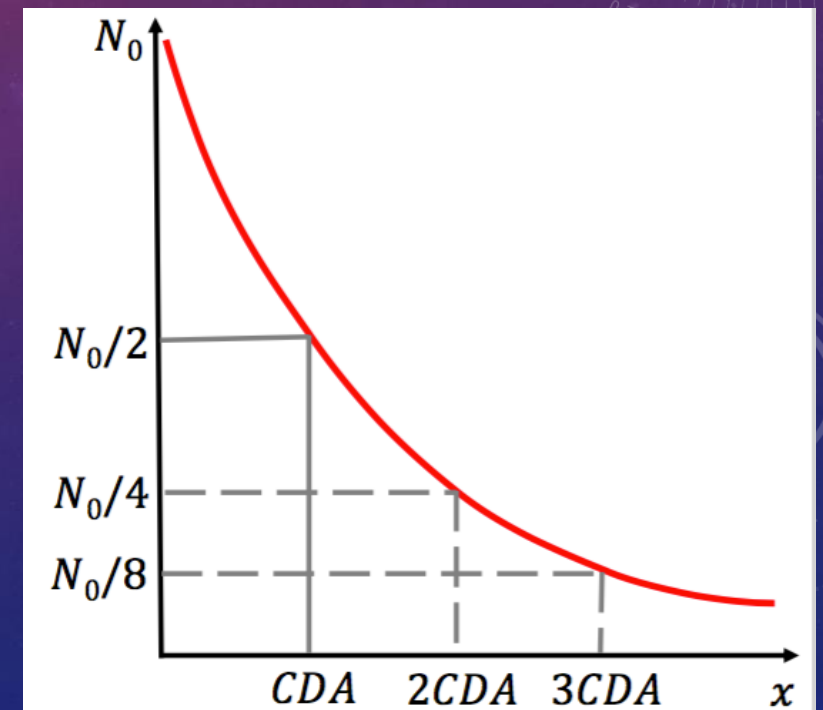
Couche de demi atténuation CDA :

Autre façon d'écrire la loi d'atténuation en fonction de la CDA :

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

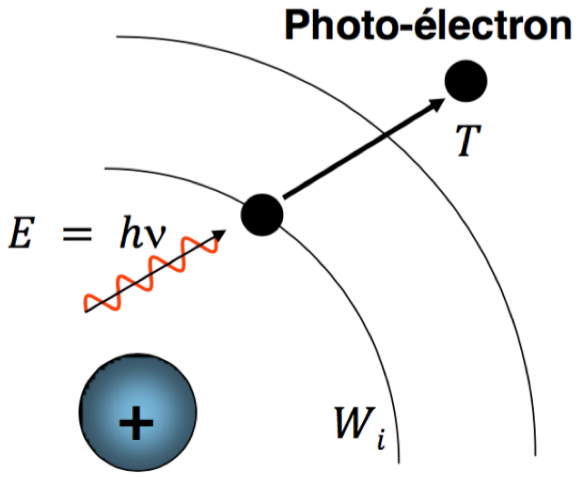
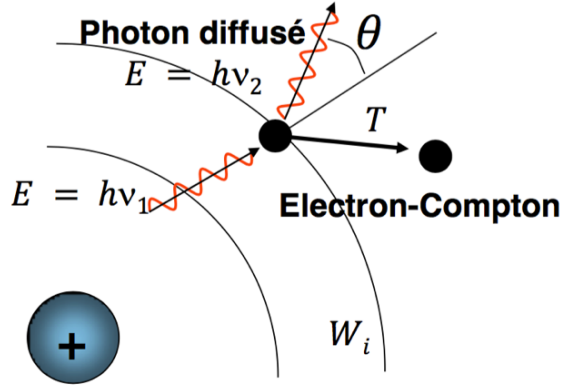
L'absorption d'un faisceau de photons n'est jamais totale, mais on considère que **le nombre de photons restants après 10xCDA est négligeable.**

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



III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

B. MÉCANISMES D'ATTÉNUATION

Effet photo-électrique	Effet Compton
PRINCIPE	
<p>Transfert de la totalité de l'énergie du photon incident à un électron des atomes de la matière.</p> <p>Le photon a une énergie $E = h\nu$ supérieure à l'énergie de liaison de l'électron considéré, et dans ces conditions le photo-électron part avec une énergie cinétique $T = h\nu - W_i$.</p>	<p>Transfert partiel de l'énergie du photon incident à un électron (faiblement lié) qui est expulsé avec une énergie cinétique T. L'autre partie de l'énergie du photon incident est diffusée via un photon de fluorescence.</p> $h\nu_1 = T + h\nu_2 + W_i $ <p style="text-align: center;">Electron Compton + photon diffusé</p> <p>L'énergie du photon incident $E_1 = h\nu_1$ va être répartie entre l'énergie cinétique T de l'électron Compton, l'énergie du photon diffusé $E_2 = h\nu_2$ et l'énergie de liaison de l'électron Compton arraché W_i (négligée en pratique).</p>
	

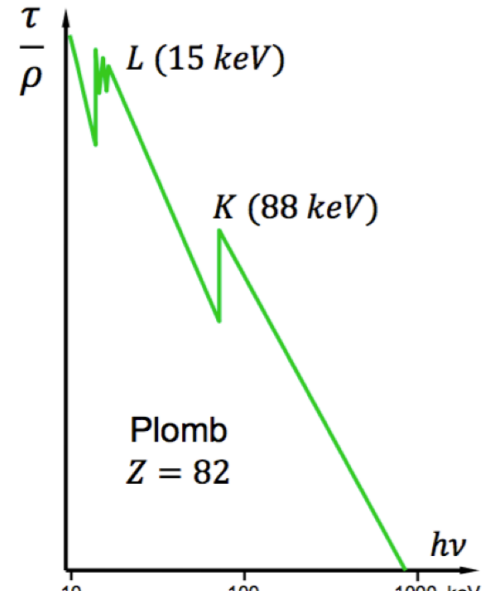
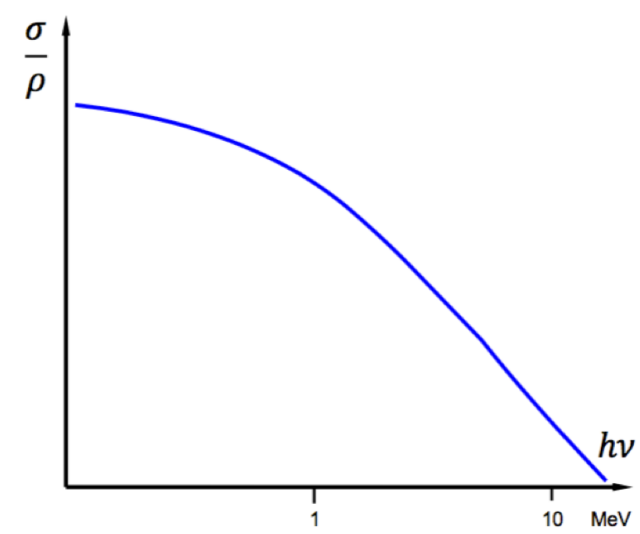
III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

B. MÉCANISMES D'ATTÉNUATION

<i>Effet photo-électrique</i>	<i>Effet Compton</i>
CONSÉQUENCES	
<ul style="list-style-type: none">• <u>Pour l'atome</u> : réarrangement par photons de fluorescence et électron Auger• <u>Pour l'électron expulsé</u> : perte de son énergie T par ionisations successives (indirectes) Toute l'énergie est absorbée.	<ul style="list-style-type: none">• <u>Pour l'atome</u> : réarrangement par photons de fluorescence et électron Auger• <u>Pour l'électron expulsé</u> : perte de son énergie T par ionisations successives, c'est l'énergie absorbée E_a (ou transférée) Une partie de l'énergie est diffusée $E_d (h\nu_2)$.

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

B. MÉCANISMES D'ATTÉNUATION

<i>Effet photo-électrique</i>	<i>Effet Compton</i>
PROBABILITÉ D'INTERACTION PAR CET EFFET	
$N(x) = N(0)e^{-\tau x}$	$N(x) = N(0)e^{-\sigma x}$
Probabilité $\tau = k\rho \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$ $\frac{\tau}{\rho} = k \frac{Z^3}{(h\nu)^3}$	Probabilité $\sigma = k\rho \frac{1}{h\nu}$ $\frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$
<p>Probabilité élevée pour :</p> <ul style="list-style-type: none">- les éléments lourds (Z élevé)- les photons d'énergie $h\nu$ faible <p>Maxima (pics) correspondant aux énergies de liaisons W_K , W_L ... du plomb par exemple :</p>	<p>Pratiquement indépendante de la nature de la matière.</p> <p>La probabilité augmente quand l'énergie du photon diminue.</p>
	

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

B. MÉCANISMES D'ATTÉNUATION

Proportion des énergies absorbée et diffusée dans l'effet Compton

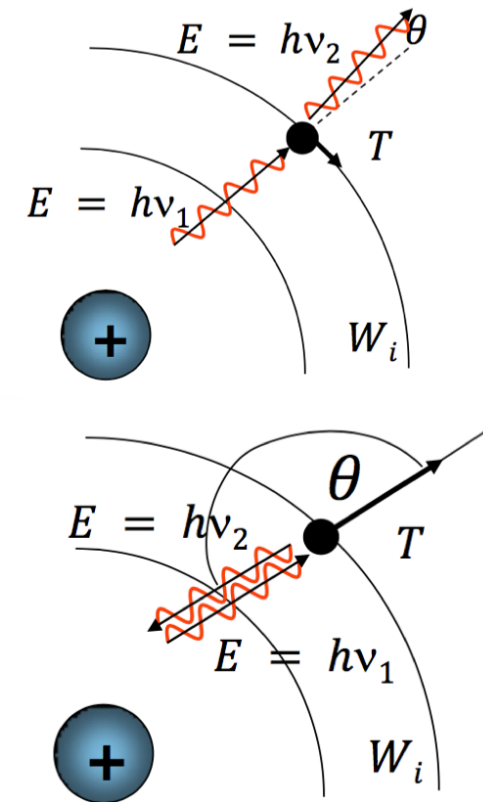
Formules de Compton et rapport E_a/E_d :

$$\frac{E_{\text{absorbée}}}{E_{\text{diffusée}}} = \frac{T}{h\nu_2} = \frac{h\nu_1(1 - \cos \theta)}{mc^2}$$

➤ **Effet de l'angle θ :**

- Lorsque θ est faible : E_a/E_d est faible
→ Choc «tangential», $\theta = 0$ et $\cos \theta = 1$ $E_a/E_d \cong 0$
- Lorsque θ est grand : E_a/E_d est élevé
→ Choc «frontal», $\theta = \Pi$ et $\cos \theta = -1$ $\frac{E_a}{E_d} = \frac{2h\nu_1}{mc^2}$
et T est maximum

➤ **Effet de l'énergie $h\nu_1$:** plus $h\nu_1$ est élevée, plus E_a/E_d est élevé.



III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

B. MÉCANISMES D'ATTÉNUATION

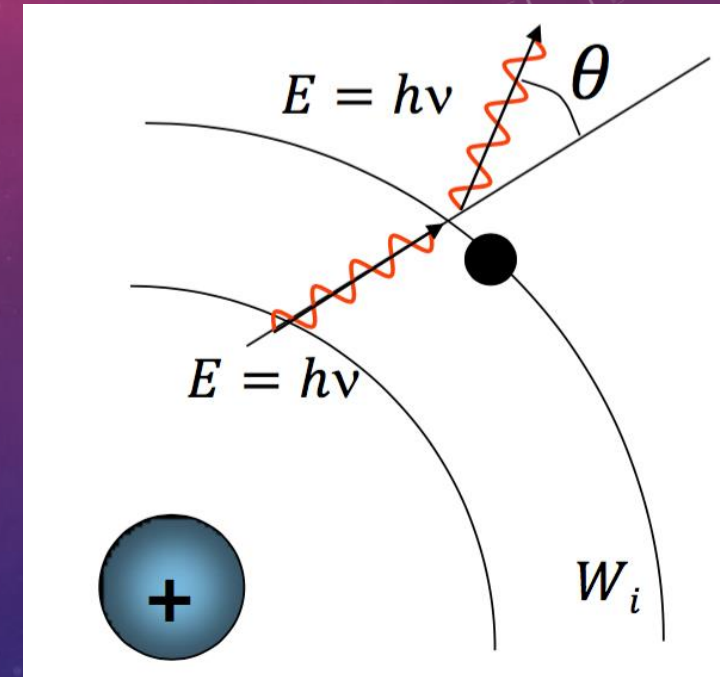
Autres types d'interaction :

- Diffusion de Thomson-Rayleigh

→ Simple changement de direction sans changement d'énergie (de longueur d'onde)

→ Important pour les photons peu énergétiques (IR, visible, UV)

→ Négligeable pour les photons X et γ



III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

B. MÉCANISMES D'ATTÉNUATION

Autres types d'interaction :

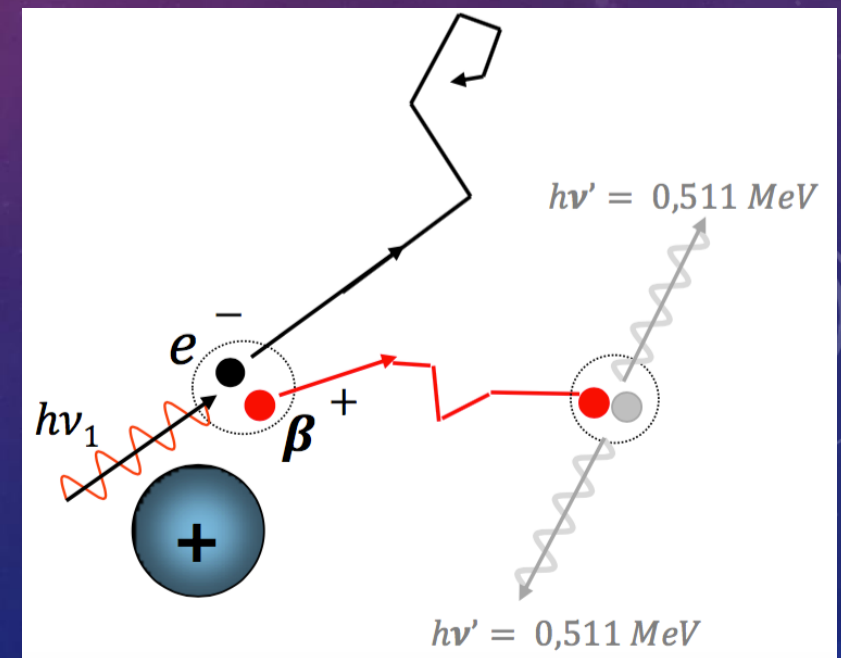
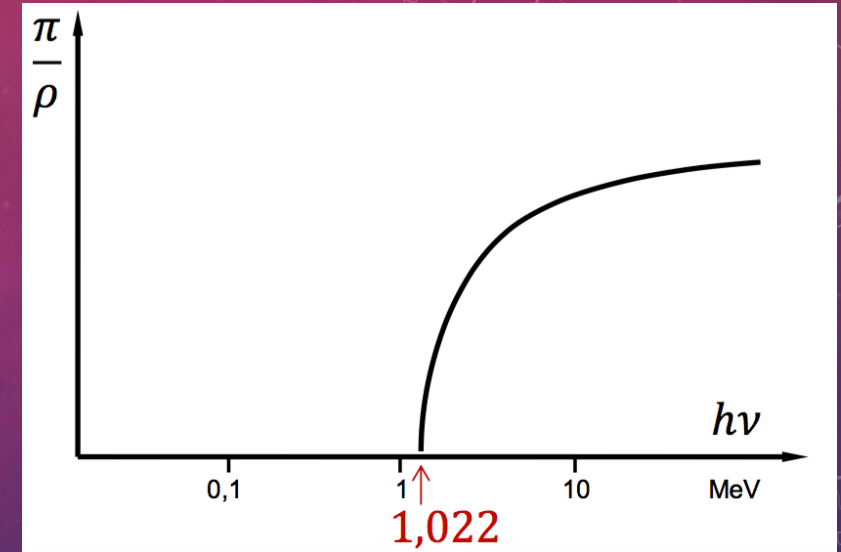
- Création de paire ou matérialisation

→ Un **photon très énergétique** passant à **proximité d'un noyau** voit son **énergie transformée en 2 particules** (un électron et un positon).

→ La probabilité de création de paire π :

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

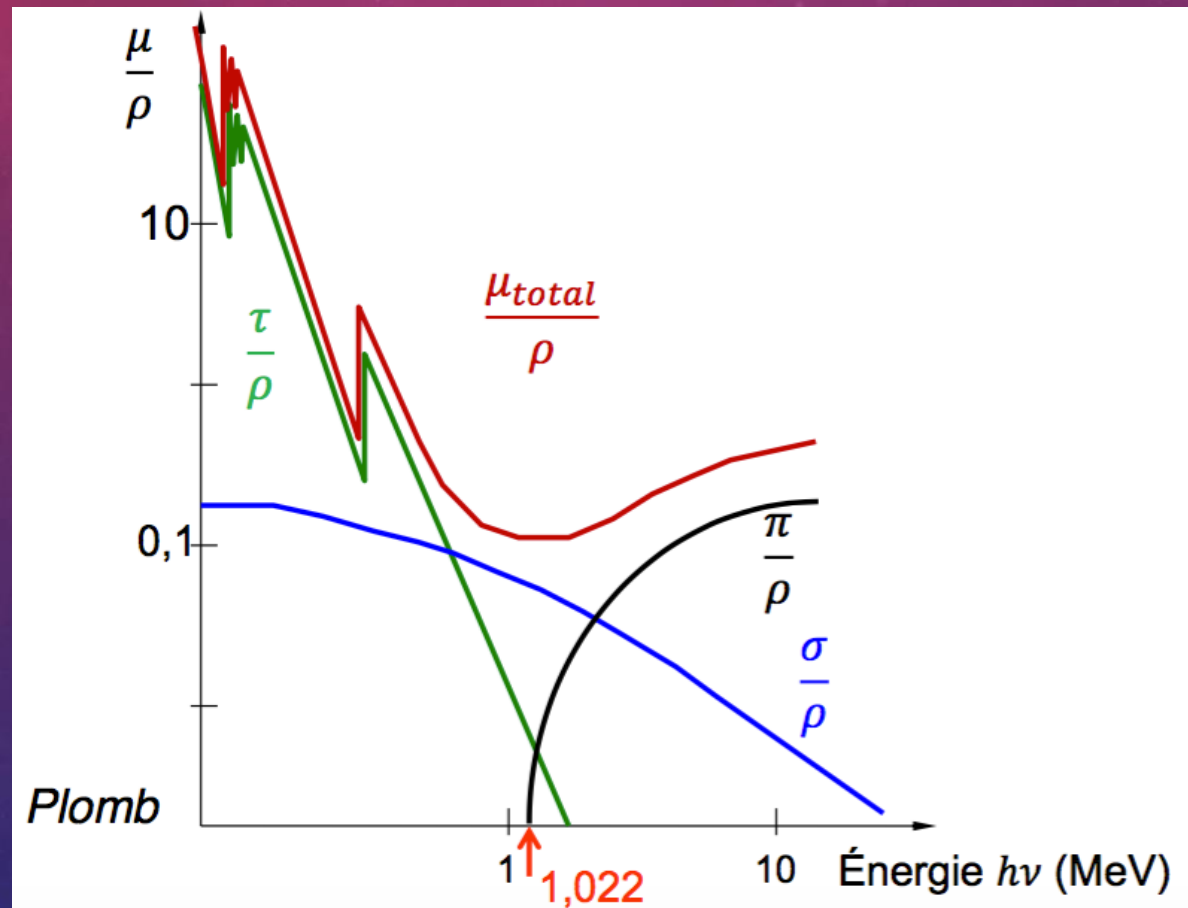
→ **Seuil de 1,022 MeV** (=énergie minimale du photon) correspondant à l'énergie équivalente à la masse des deux particules. **Quand l'énergie du photon augmente** au-delà de ce seuil, la **probabilité augmente également**.



III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

C. IMPORTANCE RELATIVE DES MÉCANISMES D'INTERACTIONS

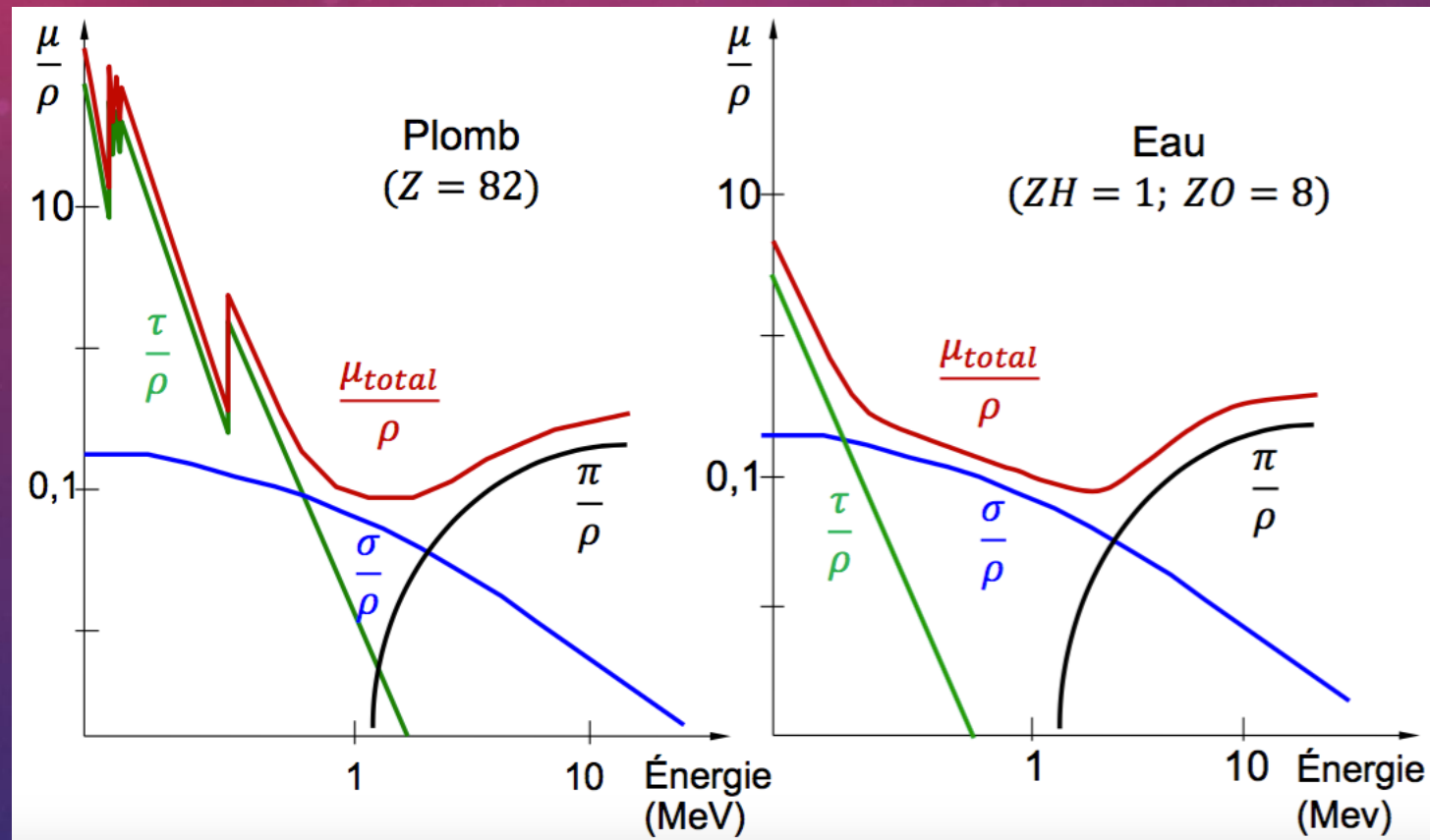
1) Selon l'énergie :



III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

C. IMPORTANCE RELATIVE DES MÉCANISMES D'INTERACTIONS

2) Selon le milieu :



PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

PLAN

I. RAYONNEMENTS IONISANTS

II. INTERACTIONS ÉLÉMENTAIRES

III. INTERACTIONS DES PHOTONS AVEC LA MATIÈRE

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

A. INTERACTIONS DES NEUTRONS AVEC LA MATIÈRE

Les neutrons (non chargés) interagissent par **choc direct** avec les **noyaux**.

La **probabilité d'interaction** est **faible** car le diamètre d'un noyau par rapport à l'atome est très faible. Les neutrons sont donc très **pénétrants** (interagissent peu).

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

A. INTERACTIONS DES NEUTRONS AVEC LA MATIÈRE

- Les neutrons rapides (d'énergie cinétique élevée)

Dans les **milieux riches en hydrogène** (la masse du noyau est proche de celle du neutron), le **transfert d'énergie** est **maximal**. Le **noyau H⁺** percuté est **expulsé** avec une énergie cinétique : c'est un **proton secondaire** qui va alors provoquer des ionisations (les neutrons sont **indirectement ionisants**).

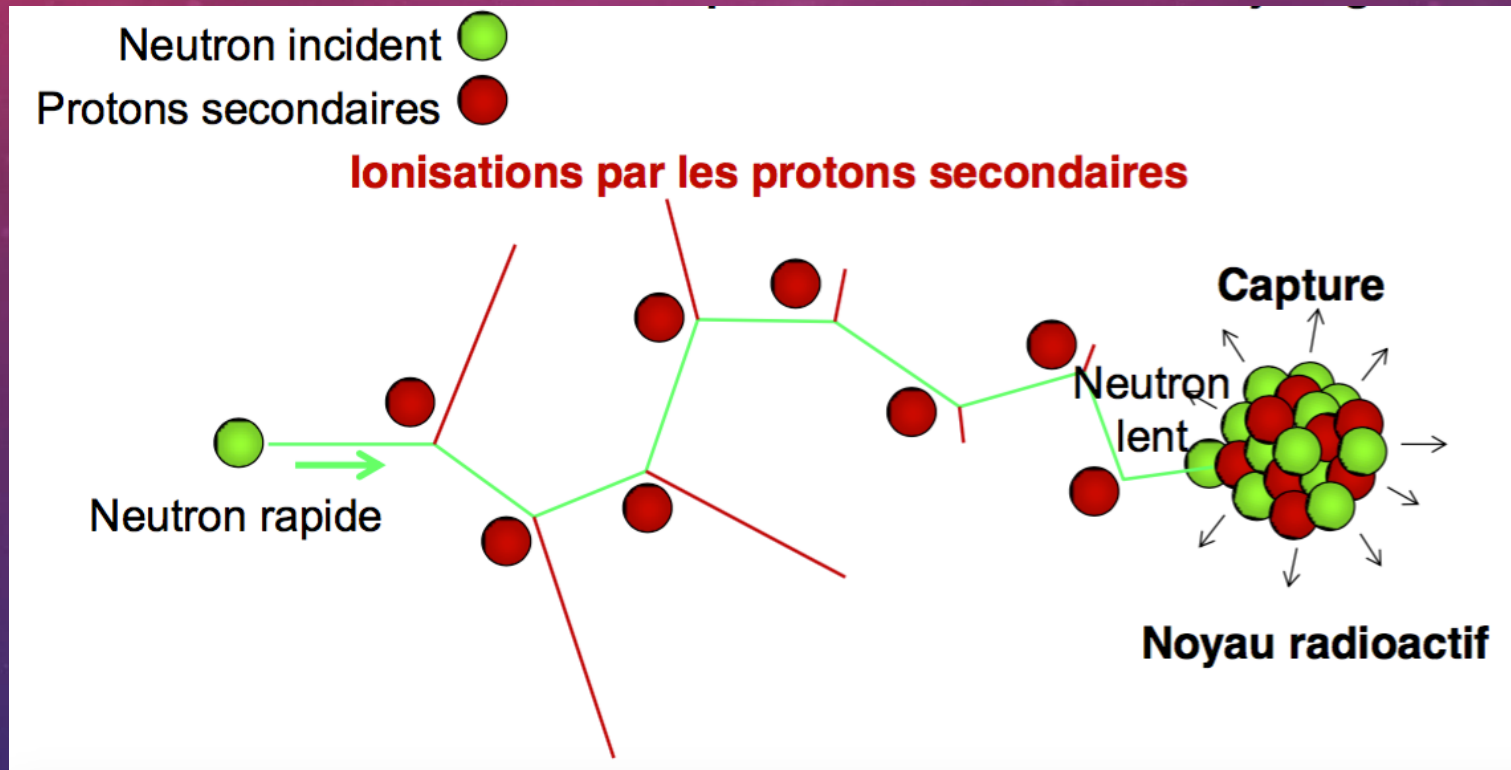
Dans les **milieux composés de noyaux lourds**, les neutrons « rebondissent » sans perdre beaucoup d'énergie (**diffusion**).

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

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

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

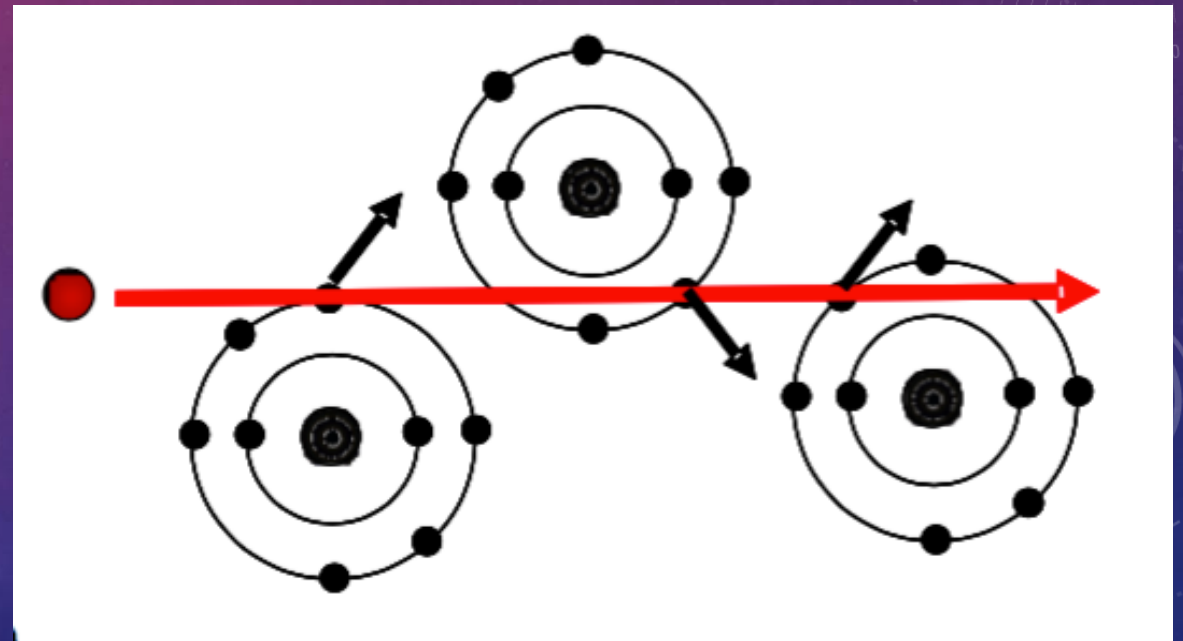
A. INTERACTIONS DES NEUTRONS AVEC LA MATIÈRE



IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

B. INTERACTIONS DES PARTICULES POSITIVES AVEC LA MATIÈRE

- Elles **interagissent avec les électrons** de la matière et sont **directement ionisantes**
- Leur **masse est supérieure** à celle de l'**électron** donc :
 - transfert d'énergie faible
 - peu de déviation : **trajectoire rectiligne**
 - peu de fluctuations des trajectoires

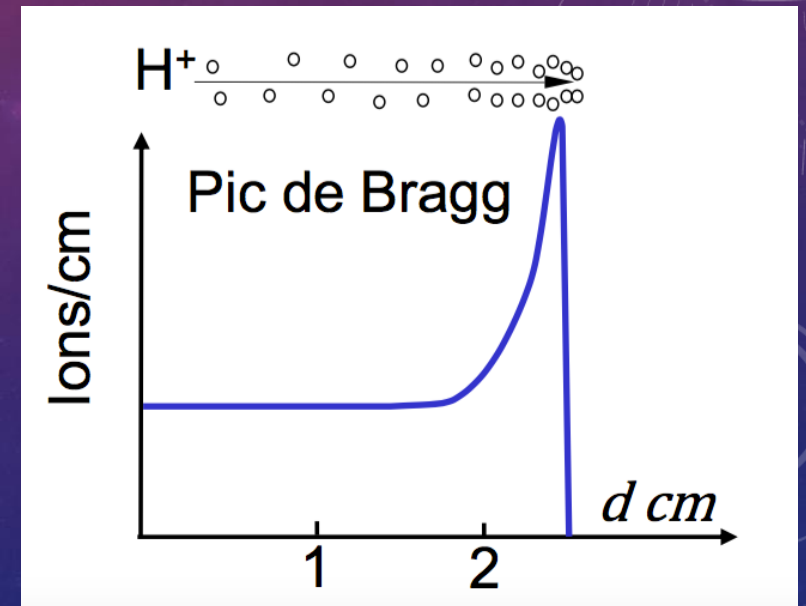


IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

B. INTERACTIONS DES PARTICULES POSITIVES AVEC LA MATIÈRE

- Elles ont un **pouvoir d'arrêt** ($S_x = \frac{\Delta T}{\Delta x} = k \frac{Z^2}{v^2}$) **très élevé**

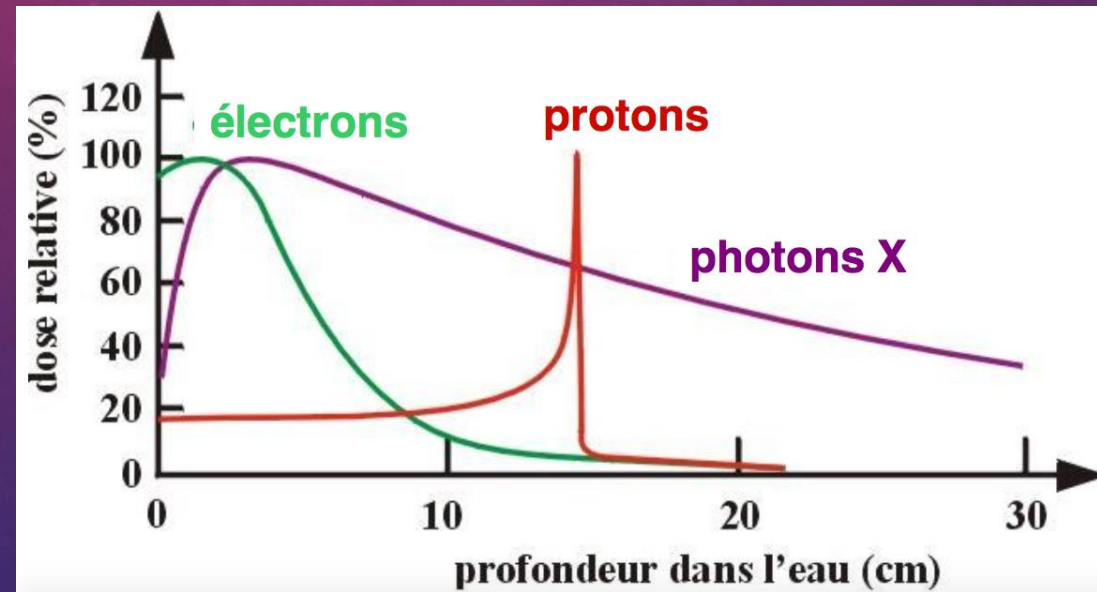
- Leur **parcours** est **court** (à énergie égale par rapport aux électrons)
- Les **effets biologiques** sont importants (beaucoup d'ionisations)
- Elles provoquent un maximum d'ionisations en fin de parcours appelé **pic de Bragg** (quand leur vitesse diminue, leur pouvoir d'arrêt augmente fortement). Après ce pic de Bragg, elles s'arrêtent complètement et il n'y a plus d'ionisations



IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

B. INTERACTIONS DES PARTICULES POSITIVES AVEC LA MATIÈRE

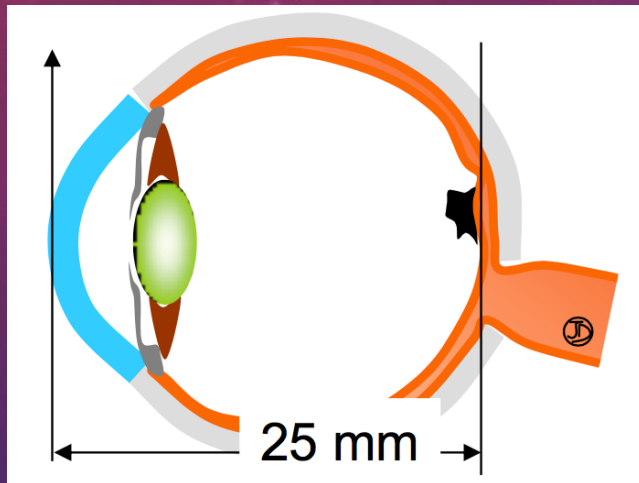
Application à la radiothérapie externe :



IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

B. INTERACTIONS DES PARTICULES POSITIVES AVEC LA MATIÈRE

Application à la radiothérapie externe :



*Ex : protonthérapie des mélanomes de la choroïde :
Pour irradier cette tumeur sans toucher le nerf optique, sachant que la profondeur de l'œil est de 25 mm, on utilise des protons tels que le pic de Bragg est à 25 mm. L'essentiel de l'énergie va se déposer sur la tumeur à détruire et il n'y aura pas d'effet sur le nerf optique.*

IV. INTERACTIONS DES PARTICULES

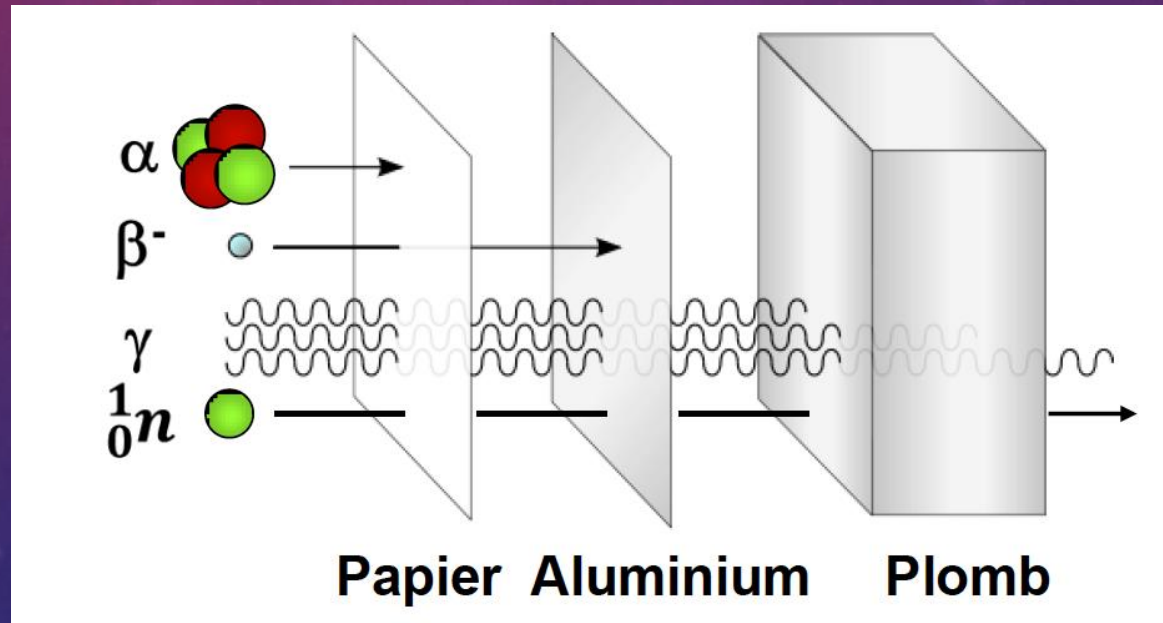
C. INTERACTIONS DES ÉLECTRONS AVEC LA MATIÈRE

Les électrons interagissent **avec les autres électrons** de la matière par des **interactions coulombiennes** et dans ce cas, sont **directement ionisants**.

Mais ils peuvent aussi interagir avec les **noyaux**, chargés positivement

CONCLUSION

- Lorsqu'ils traversent la matière, les rayonnements ionisants perdent progressivement leur énergie en y provoquant des ionisations.
- L'importance de ce transfert d'énergie dépend du type de rayonnement ionisant, de son énergie et des milieux traversés.



QCM

Soit l'atome de Bore ($Z=5$). Les énergies de ses électrons sont (en eV) : $W_K = -188$ et $W_L = -7,3$. Il subit une excitation avec passage d'un électron de la couche K à la couche L. Il se désexcite par émission d'un électron Auger. Quelle est l'énergie cinétique T de cet électron ?

A) 173,4

B) 180,7

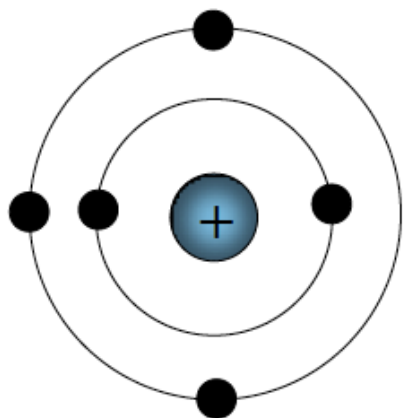
C) 188

D) 195,3

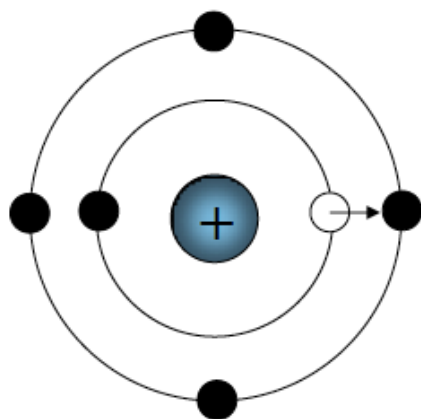
E) 202,6

QCM

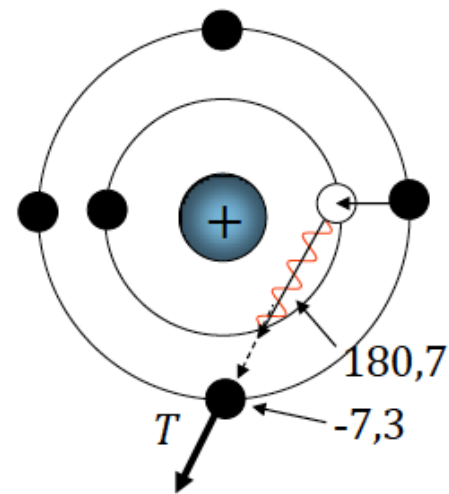
État fondamental



Excitation $K \rightarrow L$



Désexcitation Auger



Calcul de T

$$T = (|W_K| - |W_L|) - |W_L| = (188 - 7,3) - 7,3 = 173,4 \text{ eV}$$

E d'excitation disponible



E pour arracher un électron L

Merci pour votre attention

The background features a vertical gradient from dark blue at the bottom to bright red at the top. It is decorated with faint, light-colored circular patterns, including dashed lines and solid lines. On the right side, there is a large, semi-transparent circular gauge or dial with numerical markings (100, 110, 120, 130, 140, 150, 160, 170, 180, 190, 200) and a central circular element.