



Eh Jaune, plutôt pas mal ce cours nan?



# BIOPHYSIQUE:

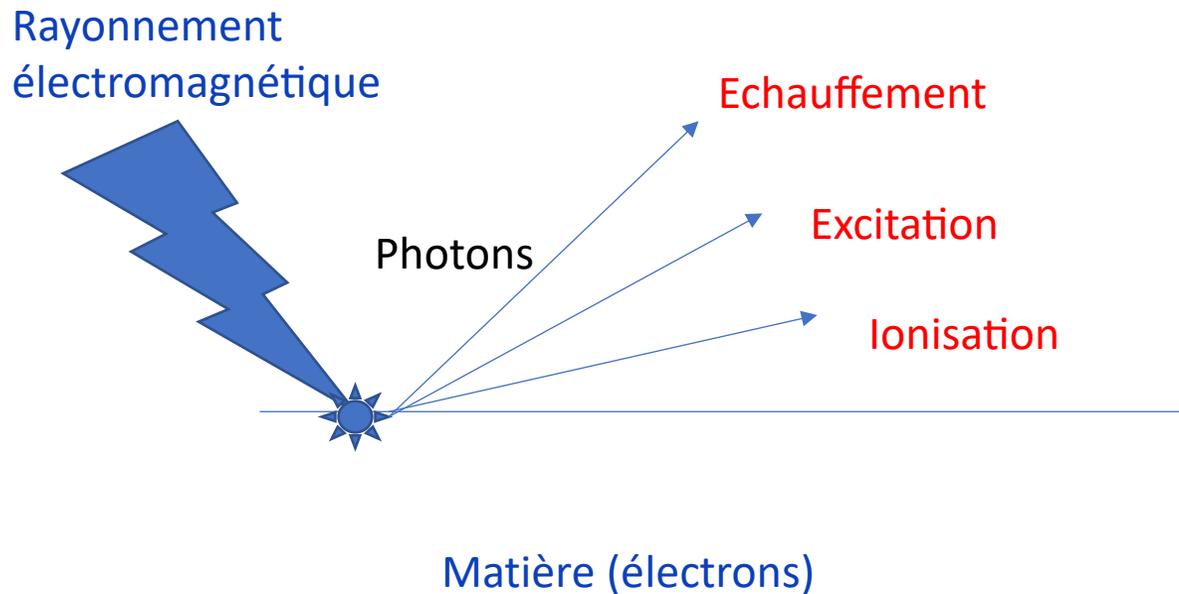
Interactions des rayonnements avec la matière  
(donné par le Pr. Darcourt)



La Team M&M's

# Introduction

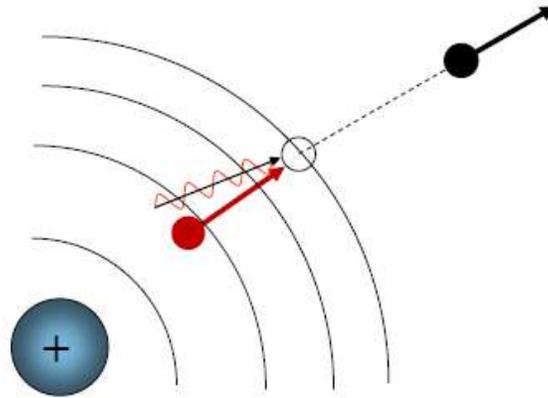
- Rayonnement
  - Électromagnétique (photons)
  - Particulaire ( particules avec masse)



Intérêts en:

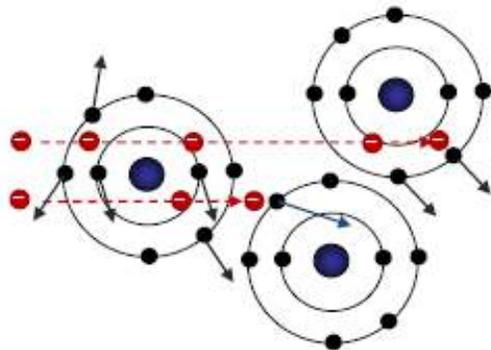
- **Imagerie médicale**: à la base de la détection des rayonnements
- **Radiothérapie et radioprotection**: à la base des effets biologiques des rayonnements ionisants.

# I- Les rayonnements ionisants (= produisent des ions)



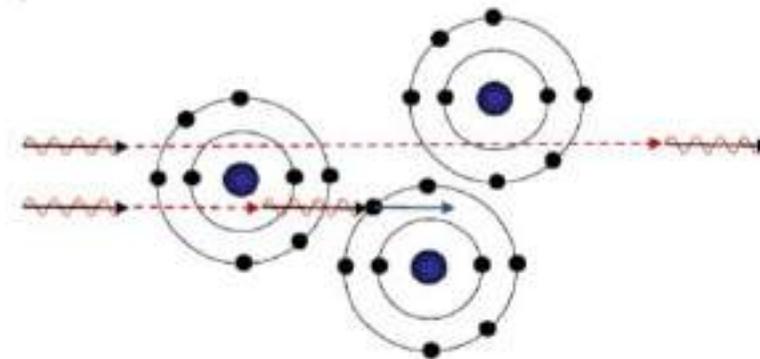
## 1) Directement ionisants

- Particules chargées: électrons, protons, particules  $\alpha$ ,  $\beta^+$ ,  $\beta^-$
- Interactions obligatoires
- Interactions électrostatiques/ coulombiennes.



## 2) Indirectement ionisants:

- Particules neutres (neutrons) + REM
- Interactions non obligatoires
- Interactions balistiques/statistiques



### 3) Caractères ionisants ou non des REM\*

**Condition:**

$$E \geq |W|$$

avec  $|W|$  l'énergie de liaison de l'électron

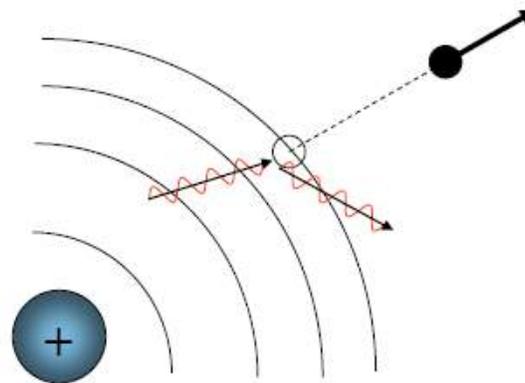
Rappel:  $E=h\nu$

Seuil énergétique  $\cong 13,6 \text{ eV}$

(= énergie de liaison des électrons la molécule d'eau)

Donc dans les milieux biologiques:

REM ionisant si  $E \geq 13,6 \text{ eV}$



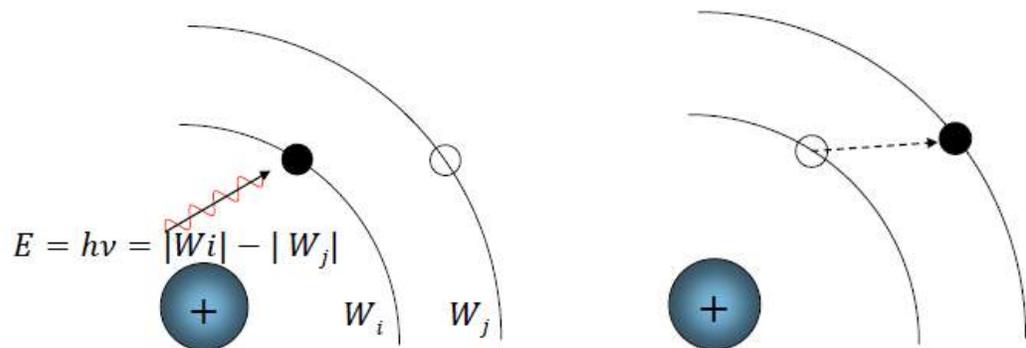
Atome	$ W $ (eV)
<i>C</i>	11,24
<i>H</i>	13,54
<i>O</i>	13,57
<i>N</i>	14,24

\* REM= rayonnements électromagnétiques

# II- interactions élémentaires

## 1) Interaction par excitation

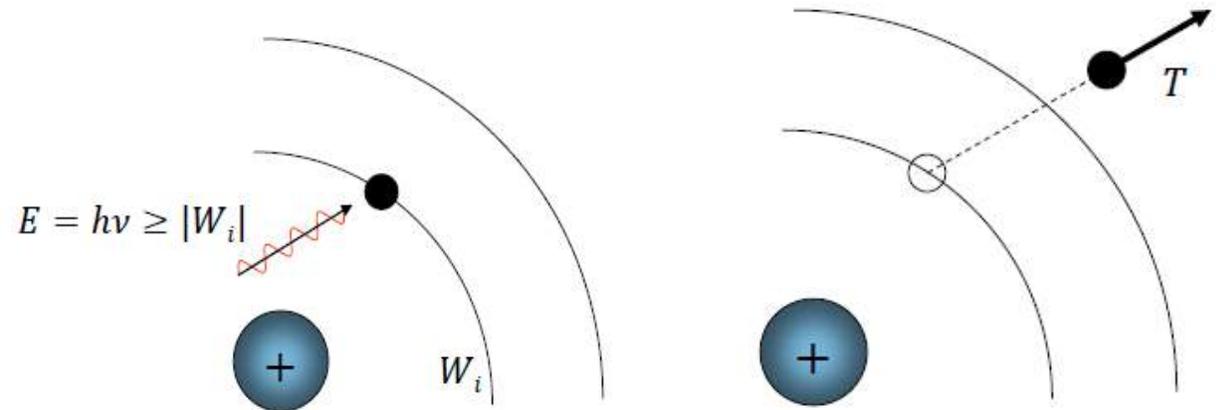
- $E < |W_i|$
- $E = |W_i| - |W_j|$
- Energie absorbée est **quantifiée**



## 2) Interaction par ionisation

- $E \geq |W_i| \rightarrow$  atome **ionisé**
- Électron expulsé avec une énergie cinétique
- Energie absorbée **non quantifiée**

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

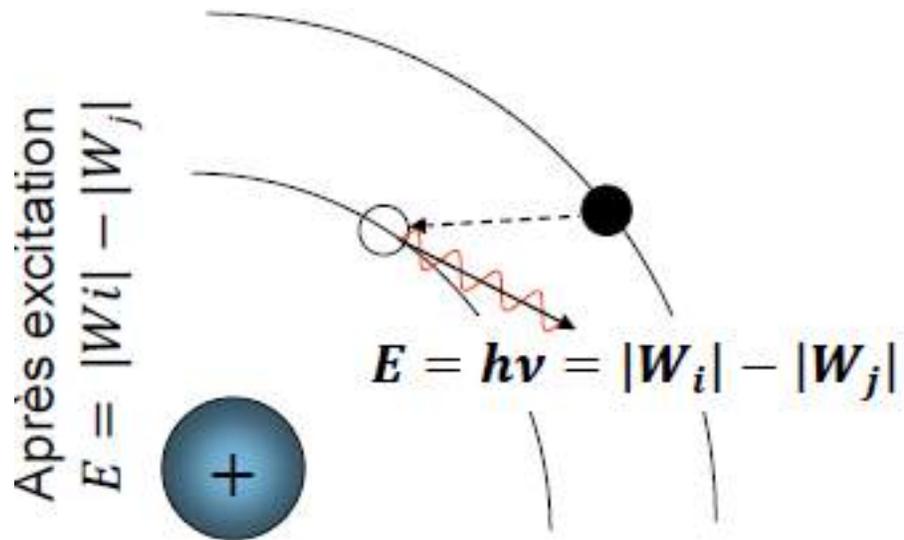


# III- Conséquence pour la matière

## 1) Emission d'un photon de fluorescence

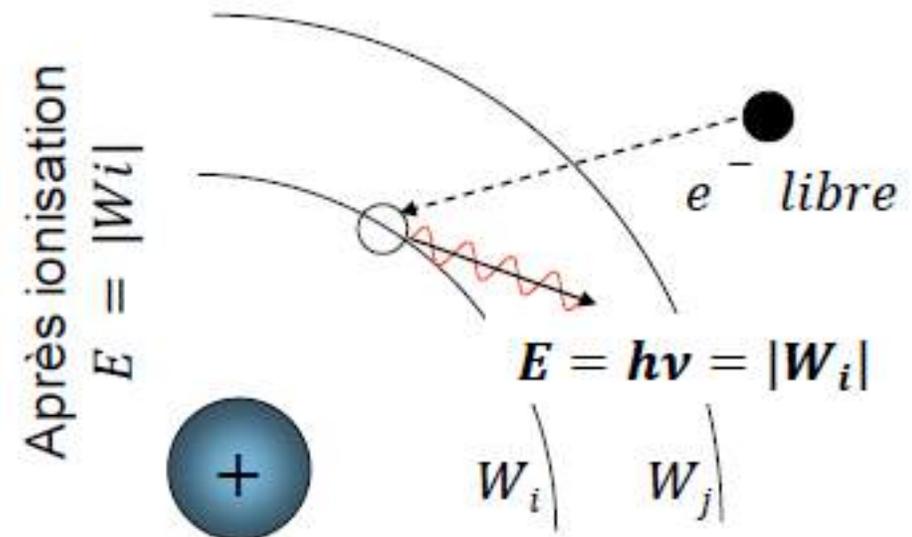
Après excitation

$$E = h\nu = |W_i| - |W_j|$$



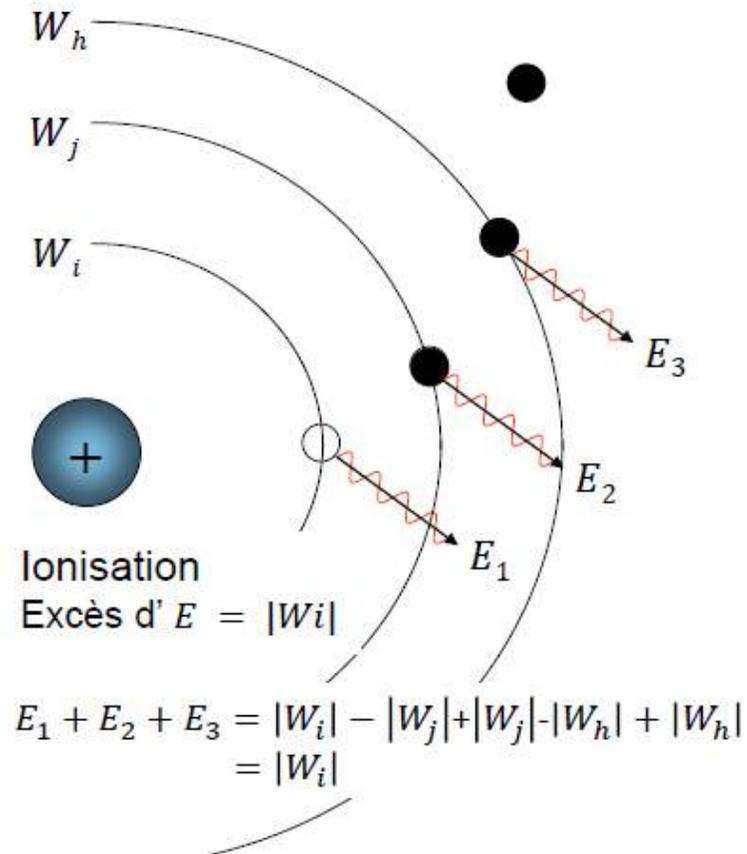
Après ionisation

$$E = h\nu = |W_i|$$

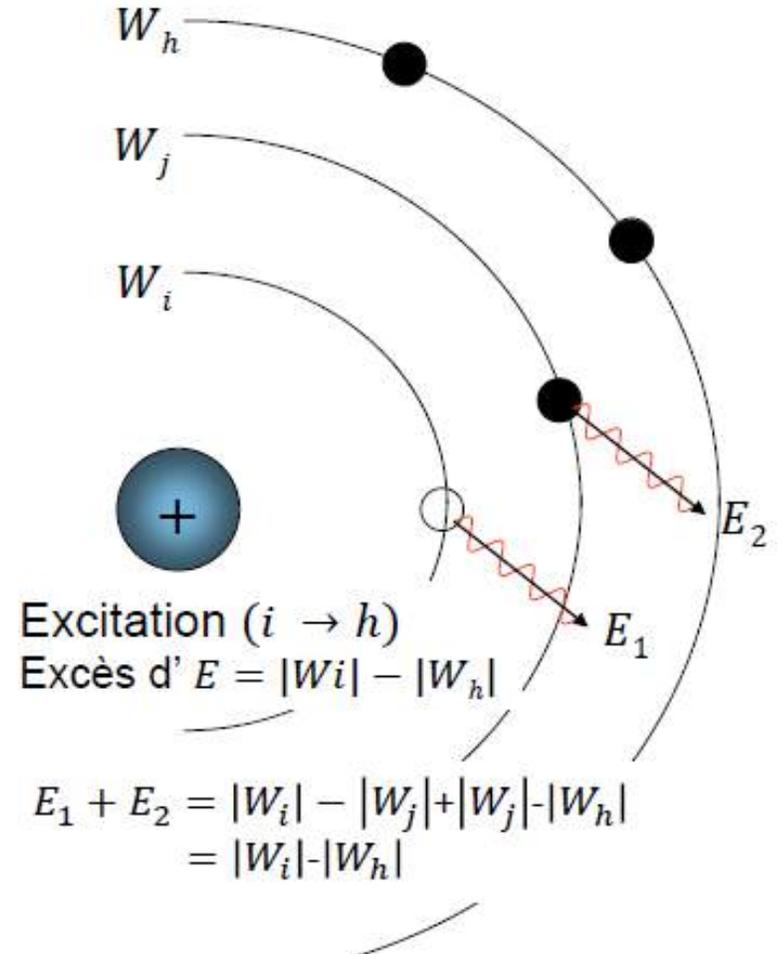


Le retour à l'état fondamental se fait en plusieurs étapes par une **cascade de réarrangements**

Après une ionisation



Après une excitation

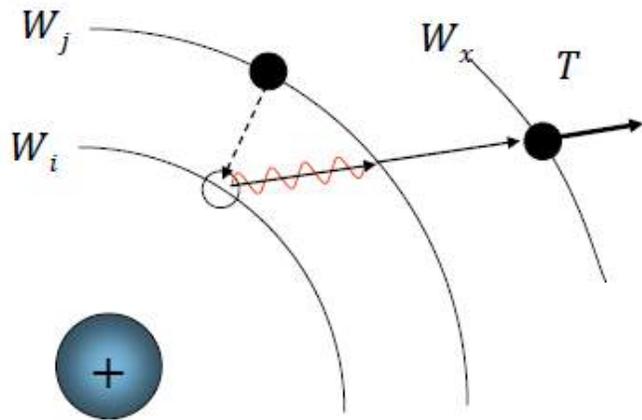


## 2) Emission d'un électron de Auger

Après une excitation

Electron expulsé avec une énergie cinétique:

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

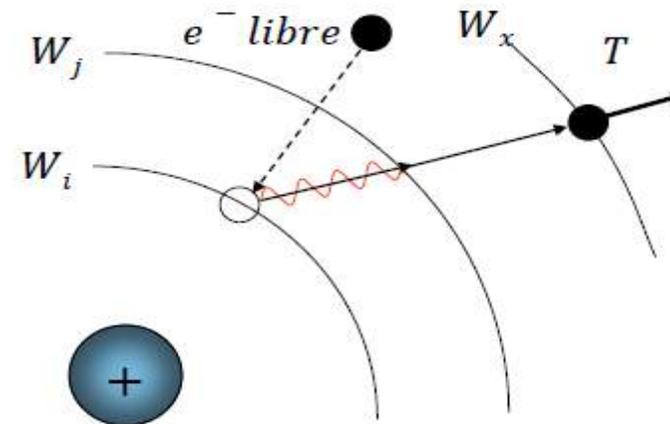


$$T = h\nu - |W_x| = (|W_i| - |W_j|) - |W_x|$$

Après une ionisation

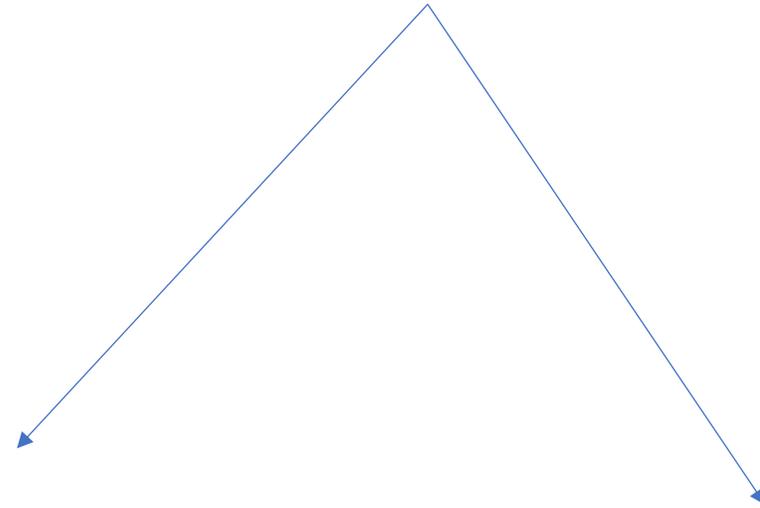
Electron expulsé avec une énergie cinétique:

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



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

# Retour à l'état fondamental d'un atome ionisé



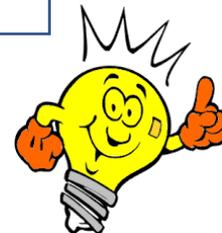
Emission photon de fluorescence

Emission d'un électron de Auger

Rendement de fluorescence:

$$W_i = \frac{\text{proba fluorescence}}{\text{proba Auger}}$$

Z élevé → photon de fluorescence  
Z faible → auger



Astuces: (atome léger → Auger)

# QCM

## QCM n°1 :

Dans le modèle de Bohr, les énergies de liaison de l'atome de bore ( $Z=5$ ) :  $W_K = -190$  eV ;  $W_L = -10$  eV. Il subit une excitation avec passage d'un de ses électrons de la couche K à la couche L.

Quels sont les phénomènes observables ?

- A) Émission d'un photon de fluorescence de 180 eV
- B) Émission d'un photon de fluorescence de 33 eV
- C) Émission d'un électron de Auger d'énergie cinétique de 17,5 eV
- D) Émission d'un électron de Auger d'énergie cinétique de 170 eV
- E) Les items A,B,C,D sont faux

# Correction

## QCM n°1

Dans le modèle de Bohr, les énergies de liaison de l'atome de bore ( $Z=5$ ) :  $W_K = -190$  eV ;  $W_L = -10$  eV. Il subit une **excitation** avec passage d'un de ses électrons de la couche K à la couche L.

Quels sont les phénomènes observables ?

- A) Émission d'un photon de fluorescence de 180 eV
- B) Émission d'un photon de fluorescence de 33 eV
- C) Émission d'un électron de Auger d'énergie cinétique de 17,5 eV
- D) Émission d'un électron de Auger d'énergie cinétique de 170 eV
- E) Les items A,B,C,D sont faux

# IV- interaction des photons avec la matière

## 1) Loi d'atténuation:

$N-dN$

avec  $-dN = \mu N dx$

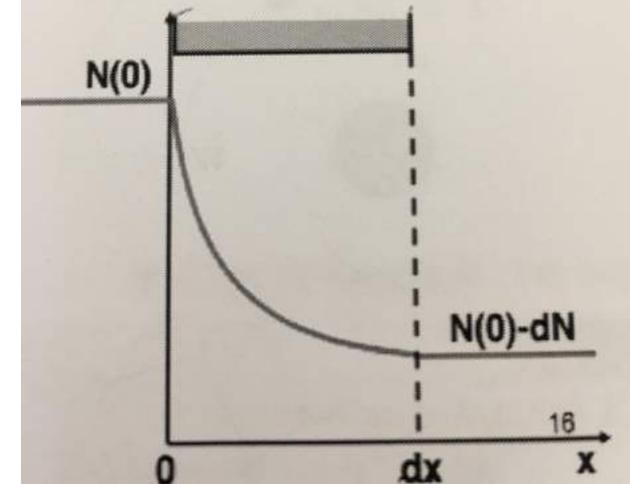
$N$  = nombre de photon

$\mu$  = probabilité d'interaction par unité de longueur

$X$  = épaisseur

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

◆ Expression de la loi



## Diapo explicative à ne pas retenir pour l'instant

$\mu$  = coefficient **linéique** d'atténuation → spécifique de l'énergie du photon

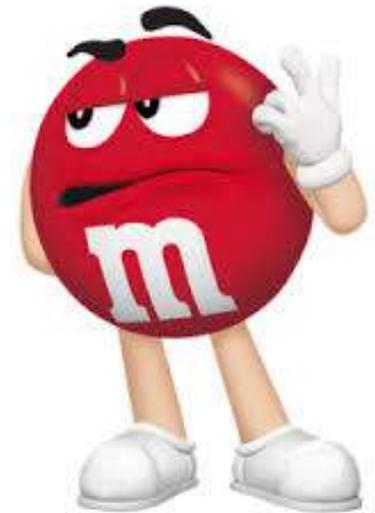
→ dépend de l'état du milieu

$\frac{\mu}{\rho}$  = coefficient **massique** d'atténuation → ne dépend pas du milieu



Mais qu'est-ce qu'elle raconte bordel?

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



## 2) La couche de demi-atténuation (CDA)

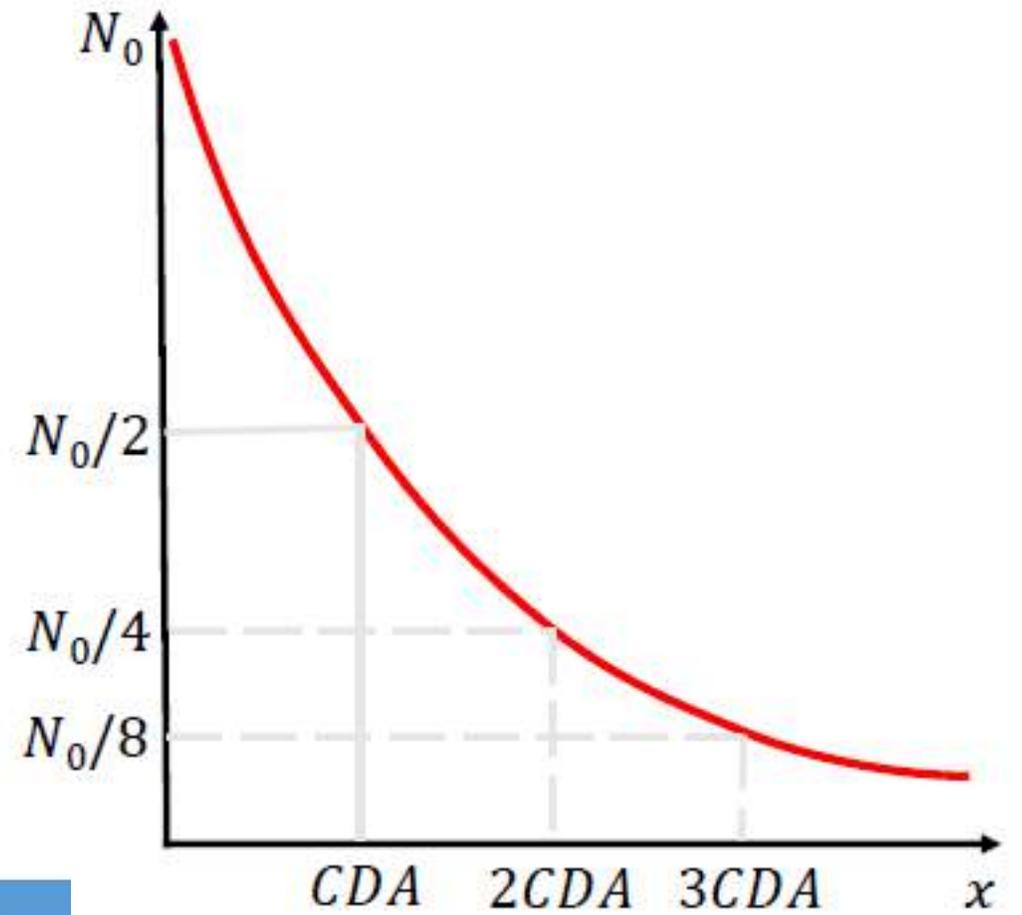
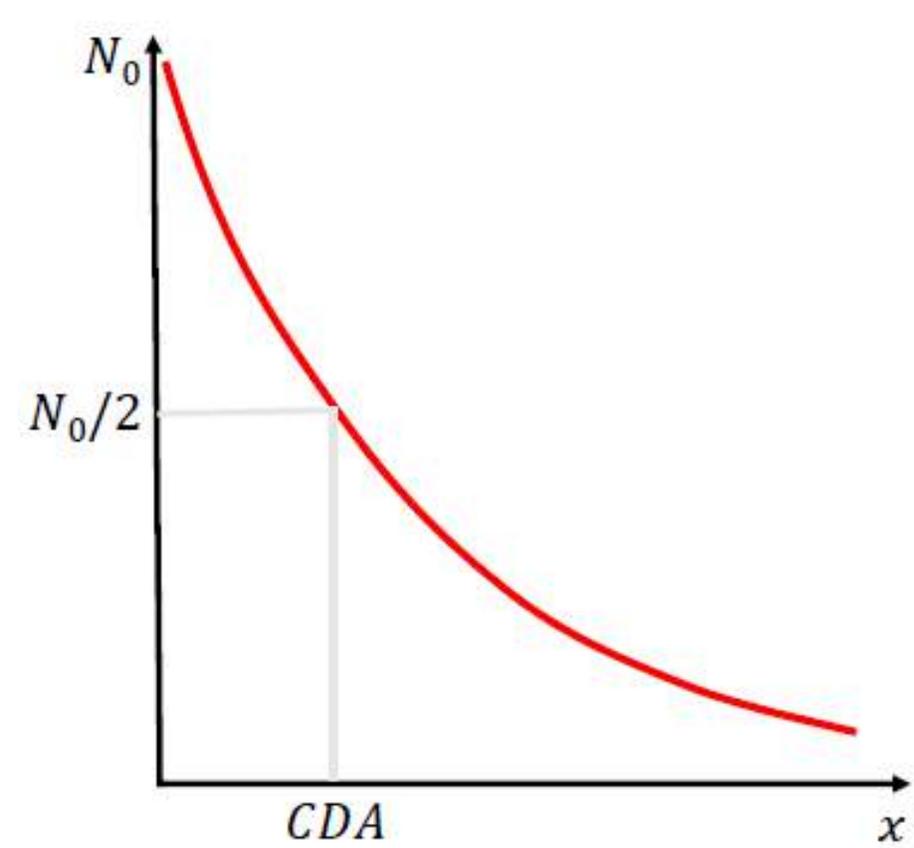
$$\frac{N(0)}{2} = N(0)e^{-\mu CDA}$$

$$CDA = \frac{\ln(2)}{\mu} \approx \frac{0,7}{\mu}$$

Loi d'atténuation en fonction du nombre de CDA:

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

10 CDA  $\approx 0,1\%$  soit  $\frac{1}{1000}$   $\rightarrow$  nombre de photons transmis **négligeable**



$x$	$N(x)/N(0)$	%
$CDA$	$1/2$	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

# QCM

## QCM n°2:

On dispose de béton dont la couche de demi-atténuation est de 5 cm et de verre dont la CDA est de 1,6 cm pour se protéger d'un flux de photons monoénergétique de 511keV. Quelle(s) sont les propositions exactes ?

- A) 5cm de béton laisse passer 50% du flux de photons initial
- B) 16 mm de verre laisse passer 50% du flux de photons initial
- C) L'association de 5 cm de béton et 1,6 cm de verre atténue tous les photons
- D) L'association de 5cm de béton et 1,6 cm de verre laisse passer 75% du flux de photons initial
- E) Les items A,B,C,D sont faux

# Correction

## QCM n°2:

On dispose de béton dont la couche de demi-atténuation est de 5 cm et de verre dont la CDA est de 1,6 cm pour se protéger d'un flux de photons monoénergétique de 511keV. Quelle(s) sont les propositions exactes ?

A) 5cm de béton laisse passer 50% du flux de photons initial

B) 16 mm de verre laisse passer 50% du flux de photons initial ⚠ Unités!!

C) L'association de 5 cm de béton et 1,6 cm de verre atténue tous les photons ⚠ → ils ne sont jamais tous atténués; il en reste un nombre négligeable!!

D) L'association de 5cm de béton et 1,6 cm de verre laisse passer 75% du flux de photons initial ⚠ VOCAB!! Laisse passer ≠ atténué!!

E) Les items A,B,C,D sont faux

# QCM

## QCM n°3:

Pour se protéger d'un flux de photons monoénergétique de 100 keV, on dispose de plomb dont la CDA est de 0,4cm et d'eau dont la CDA est de 4cm. Quelle(s) sont les propositions exactes :

- A) Le coefficient d'atténuation linéique du plomb est inférieur à celui de l'eau
- B) 12 cm d'eau laissent passer 12,5% du flux de photons
- C) 40 cm de plomb atténuent tous les photons
- D) L'association de 0,8cm de plomb et de 12 cm d'eau atténue 96,88 % des photons
- E) Les items A,B,C,D sont faux

# Correction

## QCM n°3:

Pour se protéger d'un flux de photons monoénergétique de 100 keV, on dispose de plomb dont la CDA est de 0,4cm et d'eau dont la CDA est de 4cm. Quelle(s) sont les propositions exactes :

- A) Le coefficient d'atténuation linéique du plomb est inférieur à celui de l'eau → dans la formule de la CDA il est au dénominateur!!
- B) 12 cm d'eau laissent passer 12,5% du flux de photons
- C) 40 cm de plomb atténuent tous les photons
- D) L'association de 1,2 cm de plomb et de 12 cm d'eau atténue 96,88% des photons
- E) Les items A,B,C,D sont faux

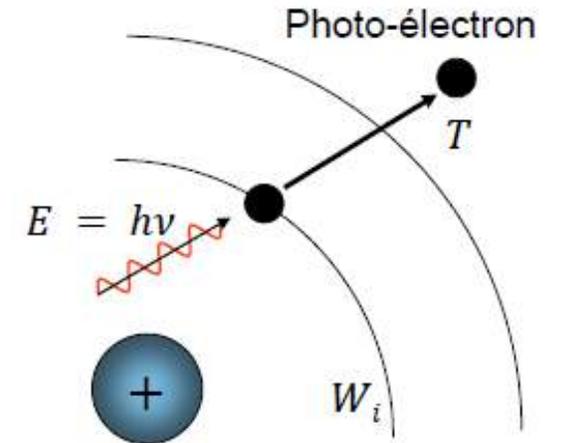
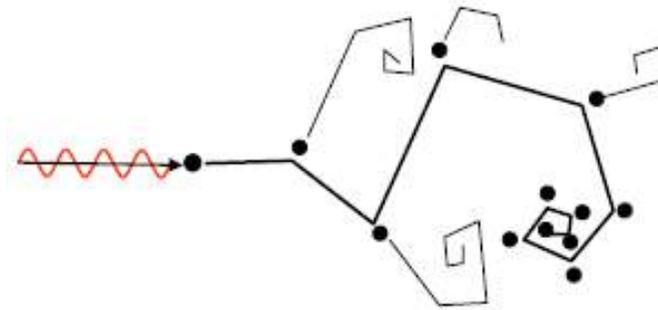
### 3) mécanisme d'atténuation des photons

#### a) l'effet photo-électrique

Transfert de la **TOTALITE** de l'énergie d'un photon incident à un électron de la matière

Énergie cinétique de l'électron arraché:

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



Conséquences:

- L'atome se réarrange par **émission de photon de fluorescence/ électron de Auger**
- L'électron expulsé **perd de son énergie cinétique** par ionisations successives
- Le rayonnement **disparaît** car le photon donne toute son énergie à l'électron

## Probabilité d'interaction $\tau$ :

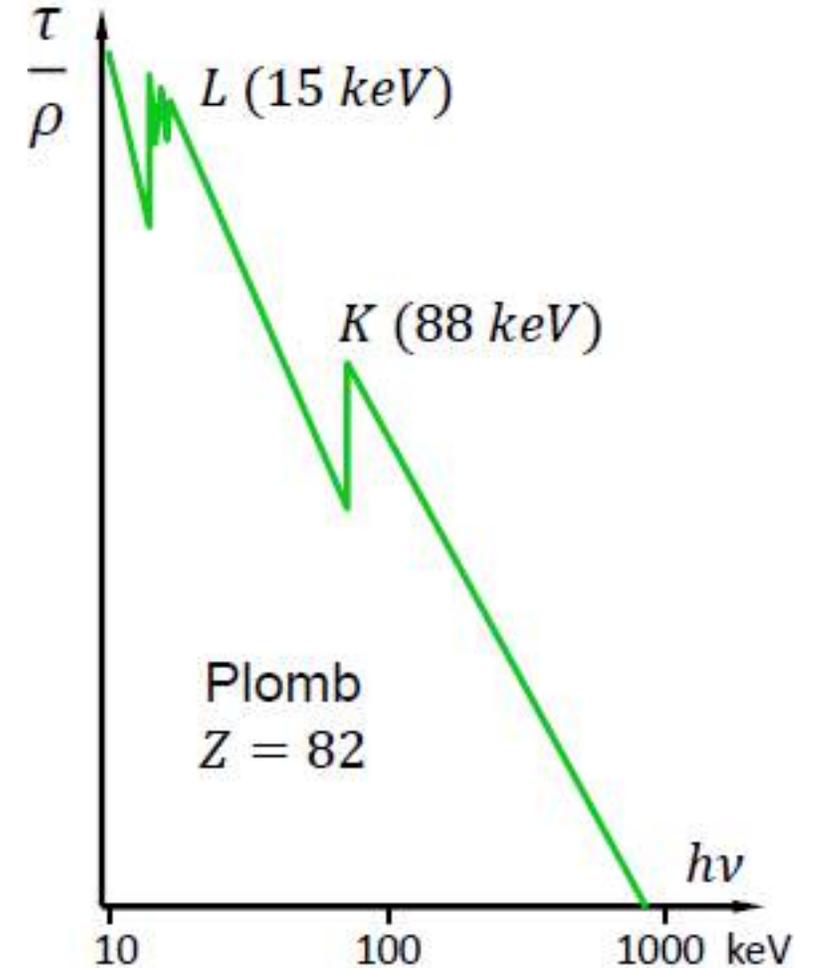
$$\tau = k\rho \frac{z^3}{(h\nu)^3}$$

ou

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

Probabilité élevée pour: - les éléments lourds  
- les photons d'énergie faible

! L'effet photo-électrique dépend du Z!!!

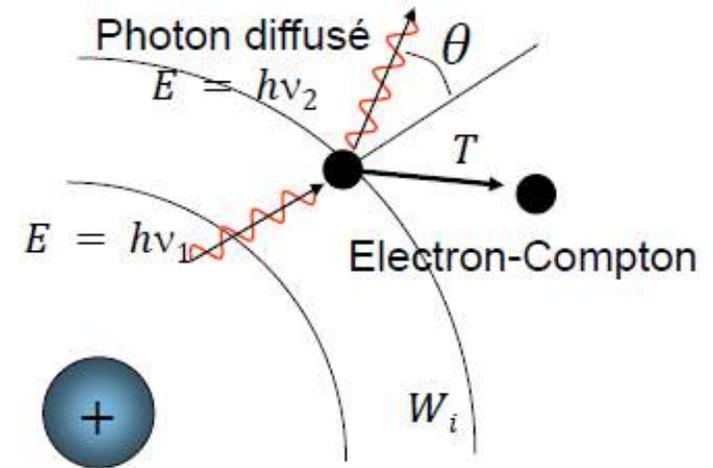


## b) l'effet Compton

Transfert **PARTIEL** de l'énergie d'un photon incident à un électron de la matière

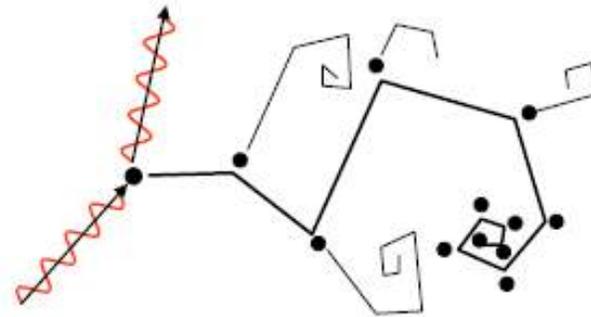
$$T = h\nu_1 - |W_i|$$

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



### Conséquences:

- L'atome se réarrange
- L'électron **perd son énergie** par ionisations successives (énergie absorbée  $E_a = T$ )
- Une partie du rayonnement est **diffusée** (énergie diffusée  $E_d = h\nu_2$ )



## La formule Compton:

$$\frac{E_a}{E_d} = \frac{T}{h\nu_2} = \frac{h\nu_1(1 - \cos \theta)}{mc^2}$$

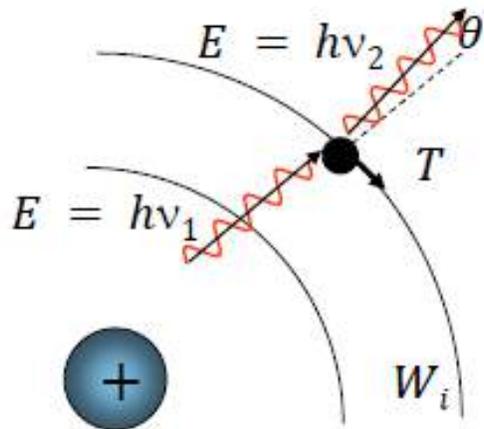
## L'effet de l'angle $\theta$ (= angle de déviation du photon)

$\theta$  faible

→  $\frac{E_a}{E_d}$  faible → majorité de l'énergie est diffusée

$\theta=0$  choc « tangentiel »

Toute l'énergie est diffusée

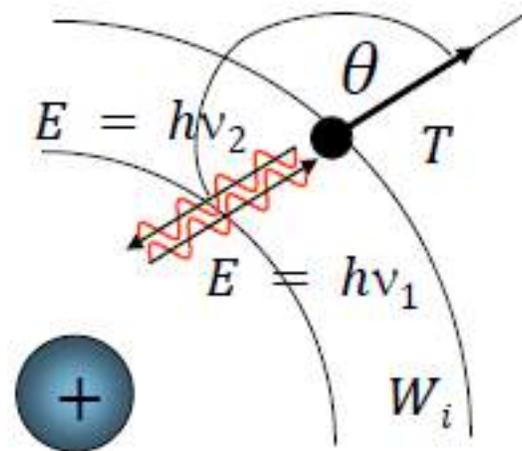


$\theta$  élevé

→  $\frac{E_a}{E_d}$  élevé → majorité de l'énergie absorbée

$\theta=\pi$  choc « frontal »

L'énergie cinétique  $T$  est maximale



## Probabilité d'interaction $\sigma$ :

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

ou

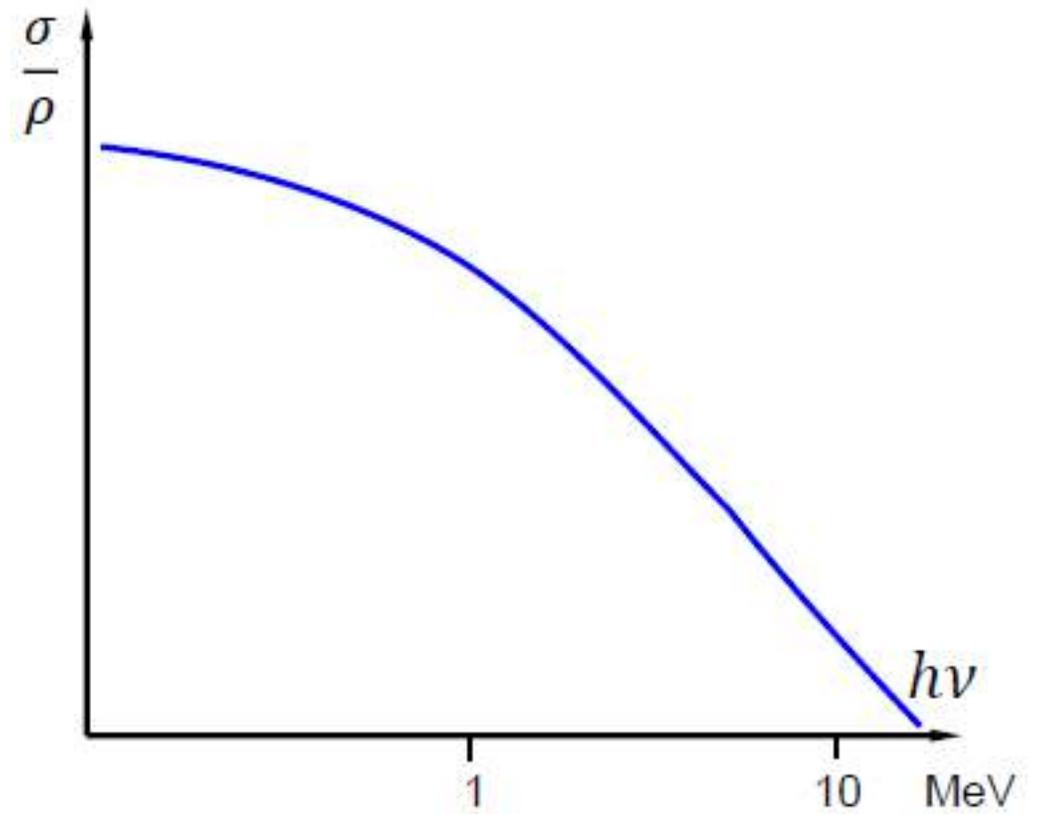
$$\frac{\sigma}{\rho} = k \frac{1}{h\nu}$$

Il est maximal pour les énergies faibles

! L'effet Compton ne dépend pas de Z!!

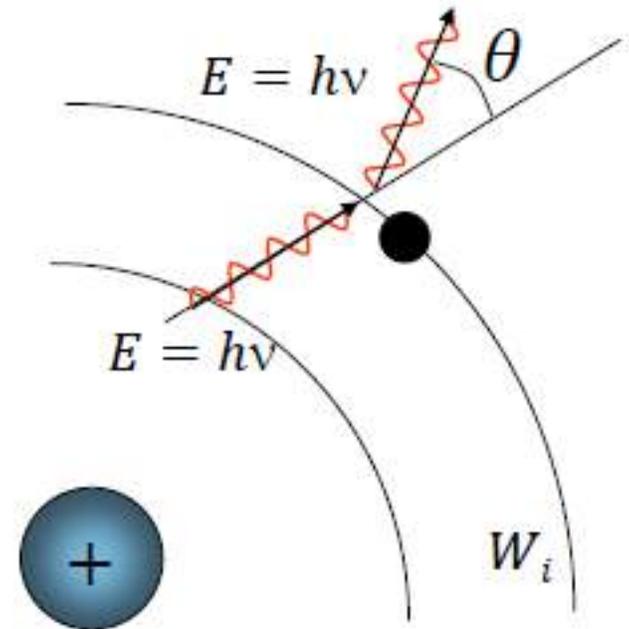


Allez restez concentrés 😊 c'est bientôt fini !!

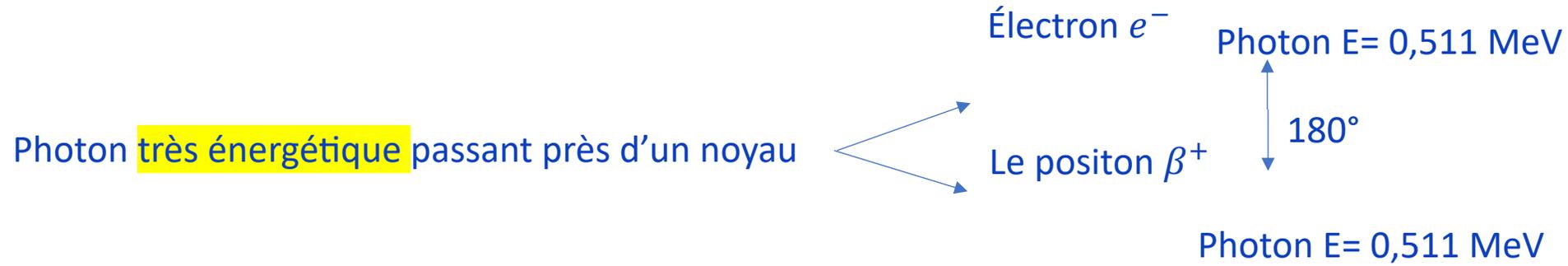


## c) Diffusion de Thomson-Rayleigh

- Changement de direction du photon sans changement d'énergie= il est dévié
- Concerne les photons peu énergétiques
- Négligeable pour les photons X et  $\gamma$



## d) Création de paire/matérialisation



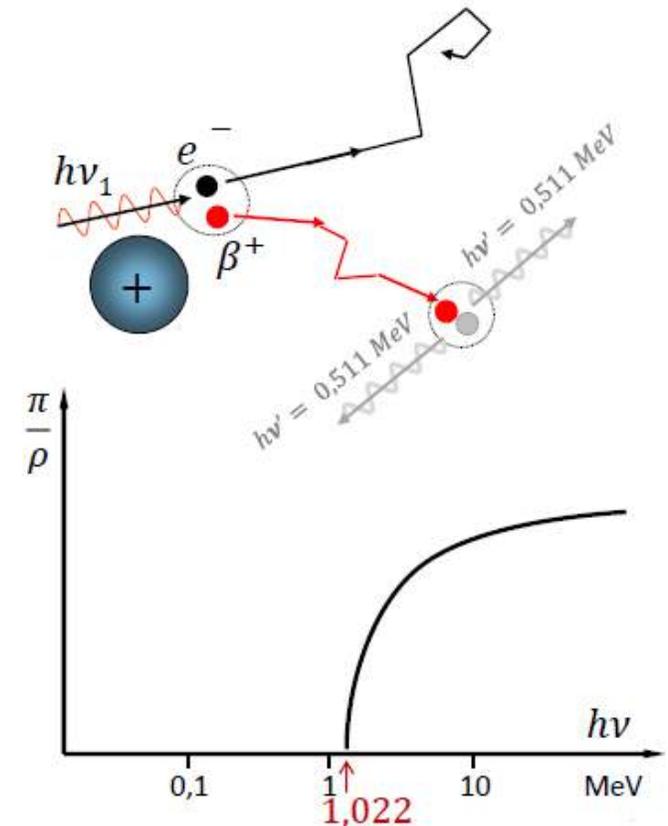
La probabilité d'interaction  $\pi$  augmente avec l'énergie des photons incidents



Seuil énergétique:  $1,022 \text{ MeV} = 1022 \text{ keV}$

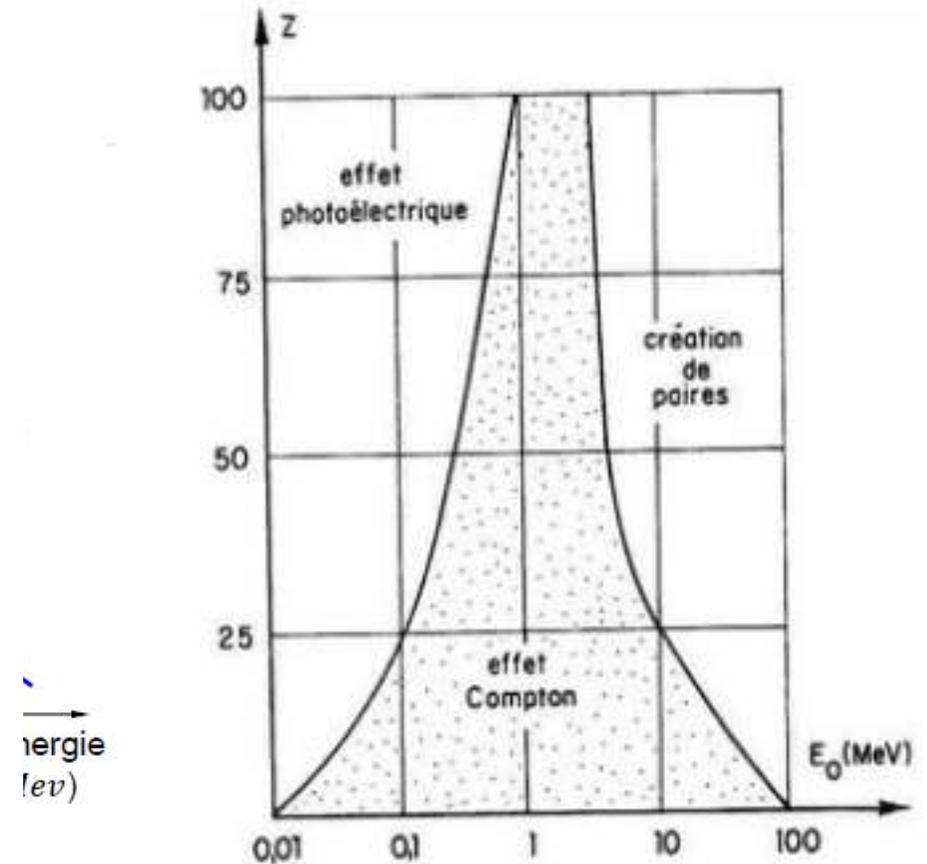
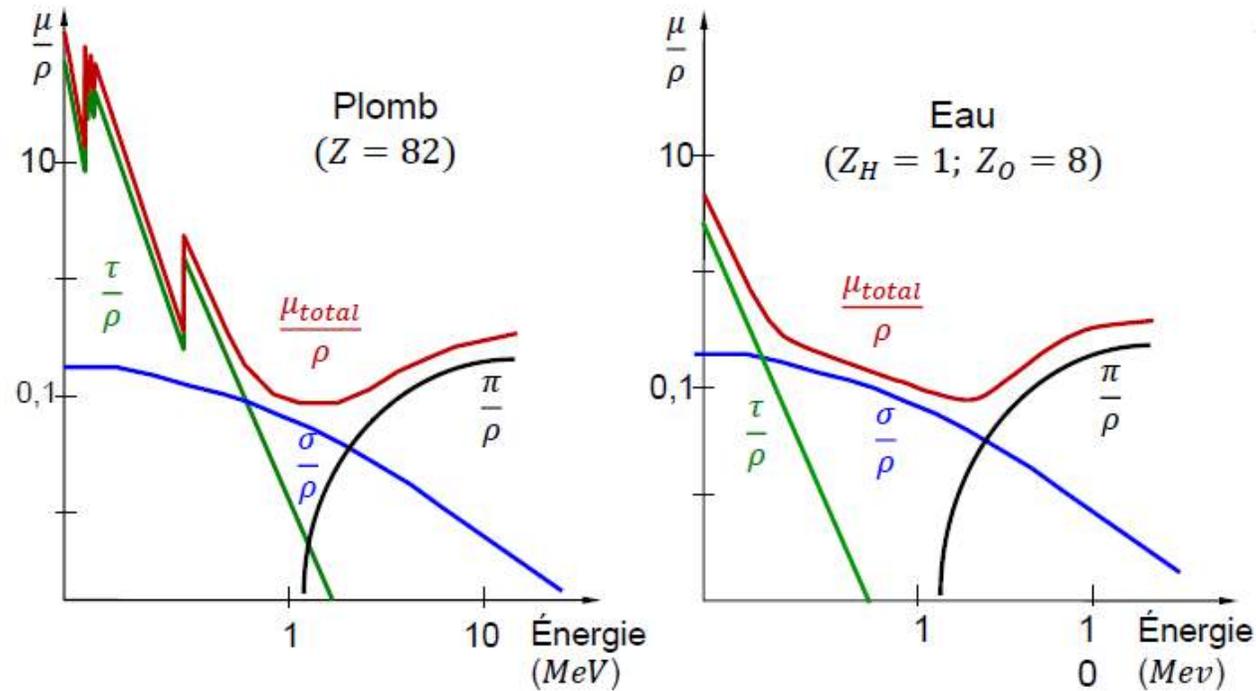


(= énergie des deux particules formées)



## 4) Importance relative des mécanismes d'interaction

Quand on change de milieu ce qui fait varier de façon significative la probabilité d'atténuation globale c'est l'effet photo-électrique qui dépend du Z

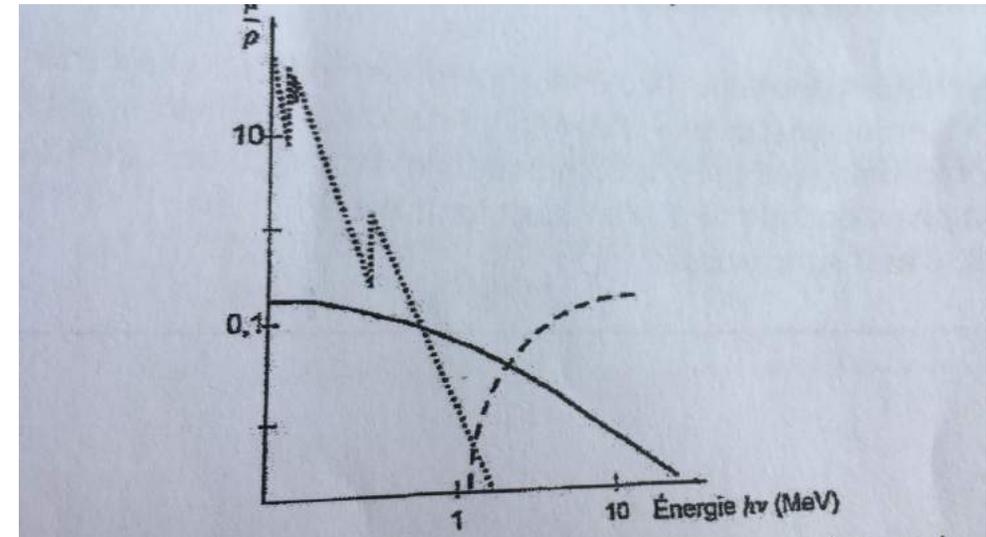


# QCM

## QCM n°4:

Soit le schéma des coefficients massiques d'atténuation des photons avec la matière d'une cible. Pour un faisceau de photons mono-énergétiques de 1000keV, quelle(s) est/sont la/les interactions possible(s) dans cette cible?

- A) Un effet Compton
- B) Un effet photoélectrique
- C) Une création de paire/matérialisation
- D) Une émission de photon de fluorescence
- E) Les items A,B,C,D sont faux



# Correction

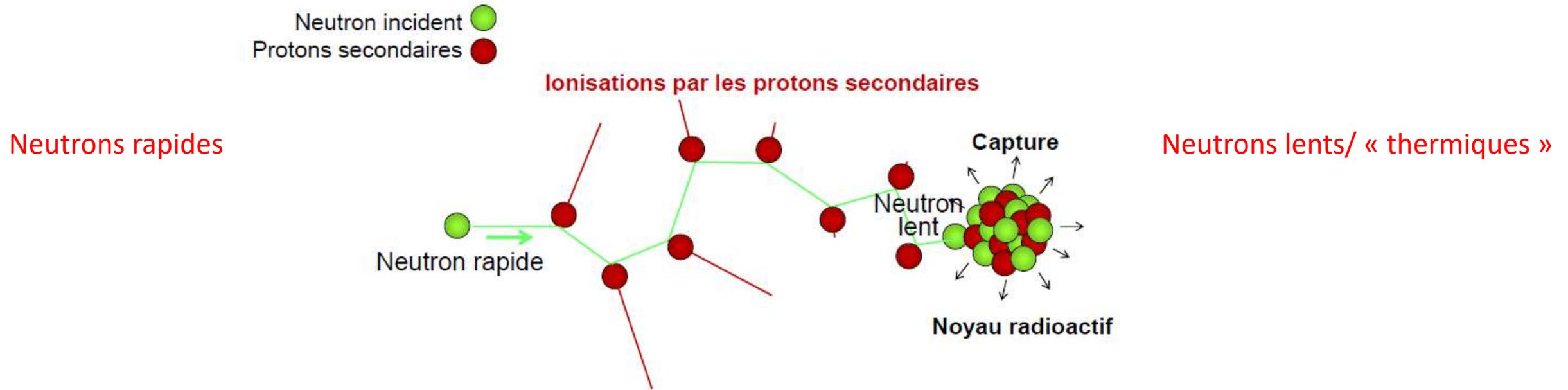
**QCM n°4:** Soit le schéma des coefficients massiques d'atténuation des photons avec la matière d'une cible. Pour un faisceau de photons mono-énergétiques de 1000keV, quelle(s) est/sont la/les interactions possible(s) dans cette cible?

- A) Un effet compton
- B) Un effet photoélectrique
- C) Une création de paire/matérialisation
- D) Une émission de photon de fluorescence
- E) Les items A,B,C,D sont faux

# V- Interactions des particules avec la matière

## 1) Interactions des neutrons

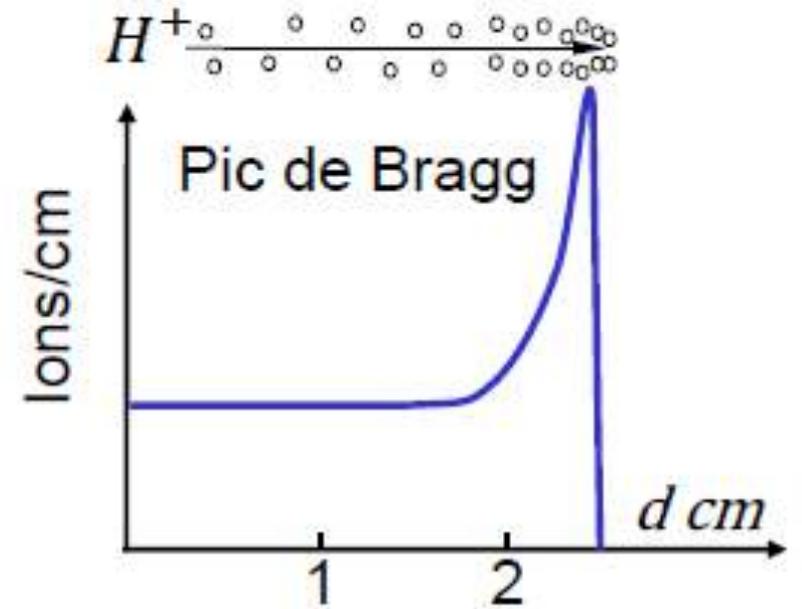
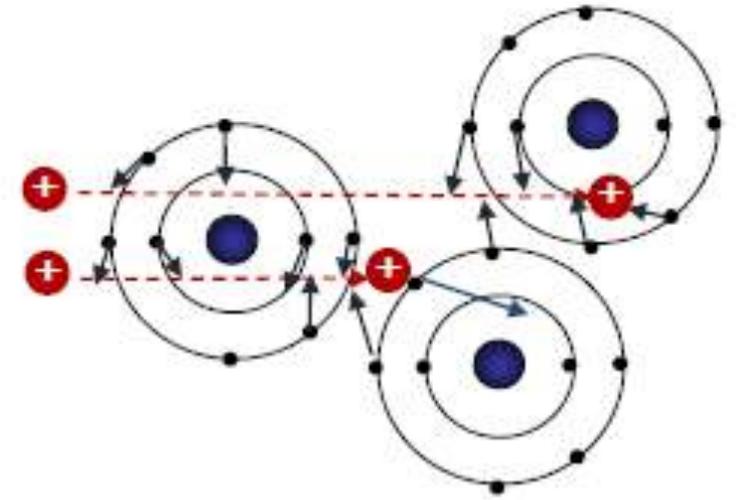
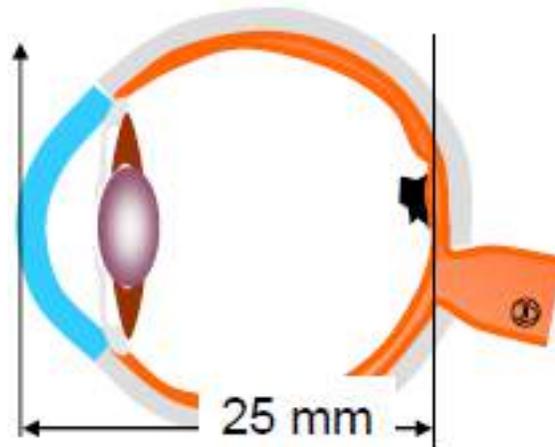
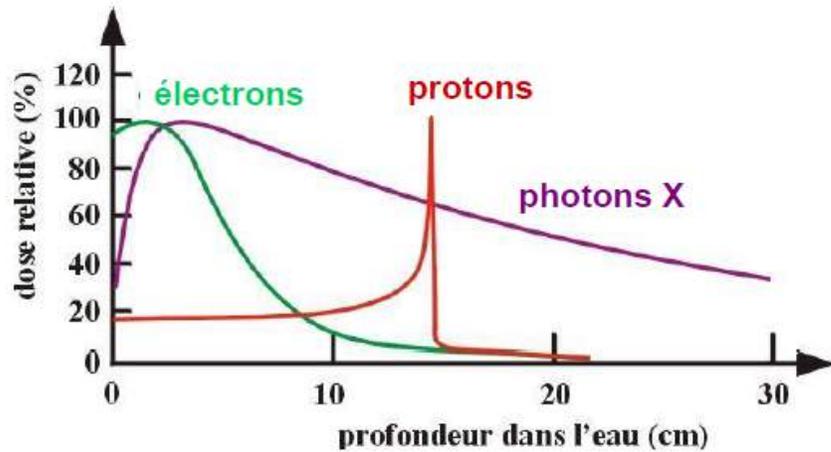
- Indirectement ionisants
- Interagissent avec les noyaux
- Probabilité faible d'interaction
- Très pénétrants



## 2) Interactions des particules chargées positivement

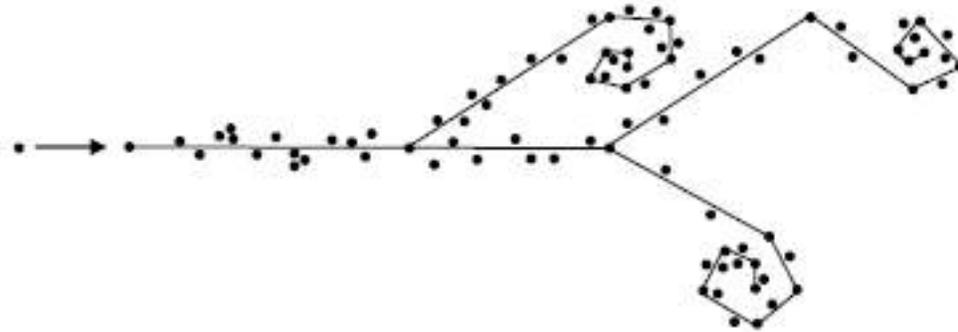
- Directement ionisantes
- Masse des particules positives  $\gg$  à celle de l'électron
- Trajet assez rectiligne dans la matière
- Pic de bragg ++++

Intérêt en Radiothérapie: la protonthérapie



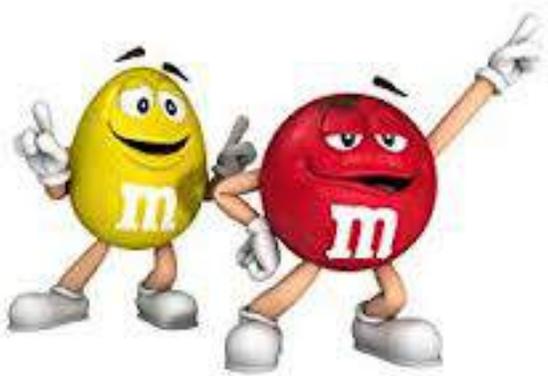
### 3) Interactions des électrons

- Directement ionisants
- Interagissent avec les électrons et les noyaux
- Cette interaction est à l'origine des rayons x



# Conclusion

- RI en traversant la matière perdent progressivement leur énergie par des ionisations
- Le transfert d'énergie dépend du type de rayonnement, de son énergie et des milieux traversés



Quand tu vois écrit le mot « conclusion »





*Suite au prochain épisode...*