

## **CH 4**

# **INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE**

# CH 4 INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE

Introduction

## I Rayonnements chargés

- 1- Intéraktion des particules chargées lourdes avec la matière.
  - a-Intéraktion avec les électrons
  - b- Conséquences
- 2- Intéraktion des particules chargées légères avec la matière.
  - a-Intéraktion avec les noyaux
  - b-Intéraktion avec les électrons

# CH 4 INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE

## II Interaction des photons avec la matière:

1- Généralités

2- Effet global

a- Atténuation d'un faisceau  $\gamma$  ou X

b- Couche de demi atténuation

# CH 4 INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE

## 3-Phénomènes élémentaires:

A-Effet photo –électrique

B-Effet Compton

C-Effet de création de paire: matérialisation

D-Coéfficient d'atténuation total:

1-Coéfficient d'atténuation linéaire

2-Coéfficient d'atténuation massique

*E-probabilité de l'un des effets en fonction  
de Z*

# CH 4 INTERACTIONS DES RAYONNEMENTS IONISANTS AVEC LA MATIERE

## Introduction:

- Un rayonnement est une émission d'énergie à partir d'une source.
- On classe les rayonnements en 3 catégories :
  - \*Chargés.
  - \*Neutres.
  - \*Électromagnétiques.



## Rayonnements Chargés :

\* Particules chargées légères :

$\beta^-$  ( $e^-$ )

$\beta^+$  ( $e^+$ ) (positon)

\* Particules chargées lourdes :

Protons (P)

Particules ( $\alpha$ )

\* Fragments lourds de fission : F1, F2 (ions lourds)

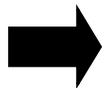


## Rayonnements neutres :

Anti-neutrinos :  $\bar{\nu}$

Neutrinos :  $\nu$

Neutrons : N



## Rayonnements électromagnétiques :

X,  $\gamma$

- Un rayonnement chargé ou électromagnétique est dit ionisant : s'il est susceptible d'arracher des e- à la matière: pour cela, l'énergie du rayonnement incident doit être supérieure à l'énergie de liaison des électrons.
- Les rayonnements non ionisants :  
UV proches du visible.  
IR et ondes hertziennes.
- L'interaction du rayonnement avec la matière est un transfert d'énergie du rayonnement incident au milieu traversé (électrons et noyau).

- Cette interaction dépend de :
  - la nature du rayonnement.
  - l'énergie de ce rayonnement.
  - la nature de la matière traversée.

# I- Rayonnements chargés :

## 1. Interactions des particules chargées lourdes avec la matière :

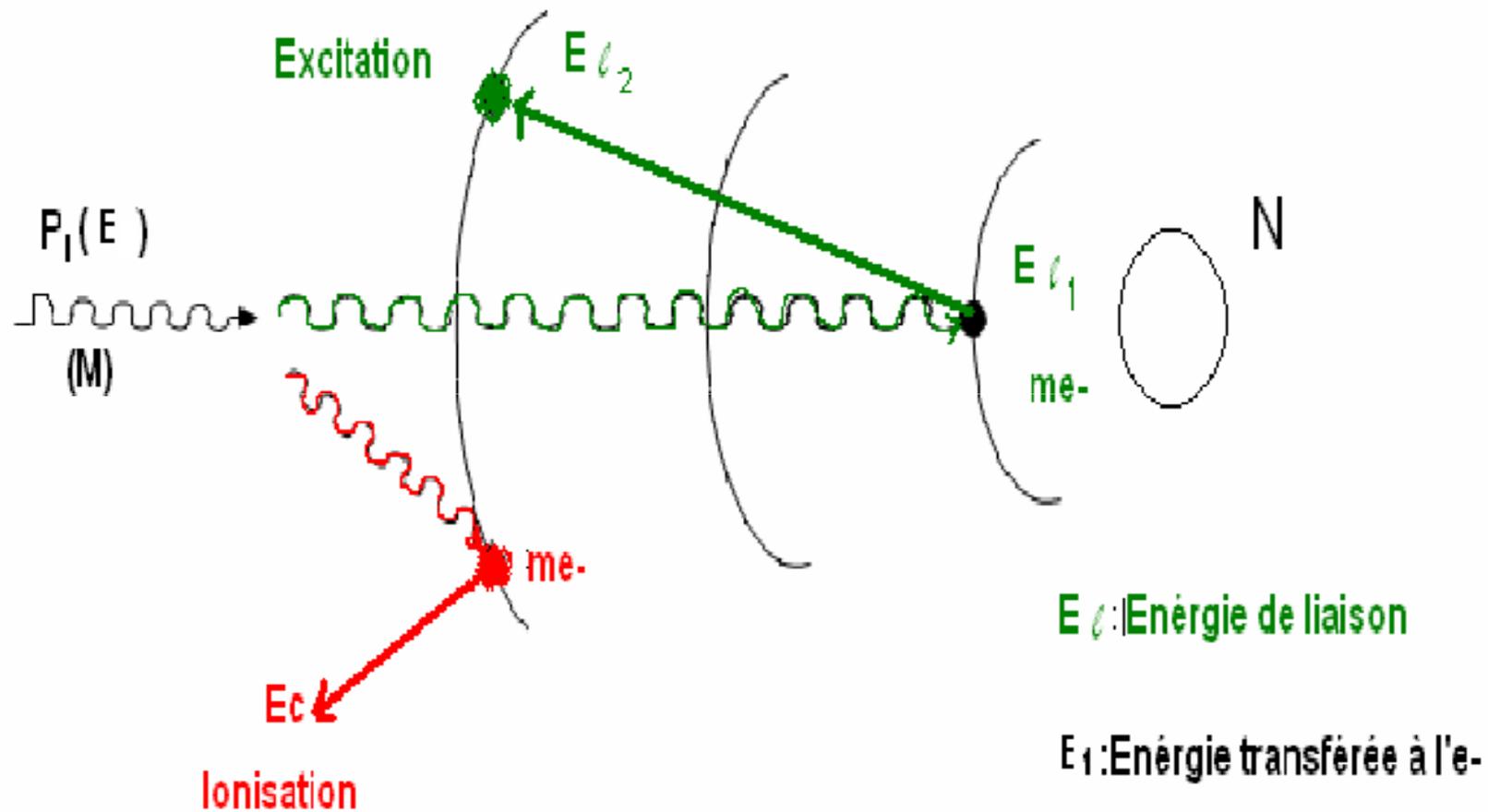
P ,  $\alpha$  , ions lourds

Interactions à caractère obligatoire. Elles se font principalement avec :

- les électrons +++
- les noyaux.

## a. Interaction avec les électrons :

- La particule incidente (PI) cède une partie de son énergie cinétique  $E_1$  aux électrons du milieu  $\Rightarrow$  **excitation** ou **ionisation**.



- **Ionisation** : l'électron atomique est arraché de sa couche et reçoit une énergie cinétique:  $E_c$

$$E_c = E_1 - E_l$$

$E_1$  est l'énergie transférée à l'électron

L'atome est alors ionisé.

- **Excitation** :  $E_1$  sert seulement à déplacer l'électron atomique d'une couche profonde vers une couche périphérique.

L'atome est excité.

- $M(P_1) \neq m_e \Rightarrow$  la trajectoire de  $P_1$  est peu modifiée  $\approx$  rectiligne.
- Interactions multiples à faible transfert.

## **b. Conséquences :**

- La perte d'énergie des particules chargées lourdes par excitation et ionisation s'exprime par :

**TEL** = transfert d'énergie linéique.  
S'exprime en KeV/  $\mu\text{m}$ .

**DLI** : densité linéique d'ionisation :  
Nombre de paires d'ions par  $\mu\text{m}$ .

Cette DLI augmente fortement en fin de parcours quand  $P_1$  pénètre en profondeur et se ralentit.

## 2. Interaction des particules chargées légères

avec la matière: e-

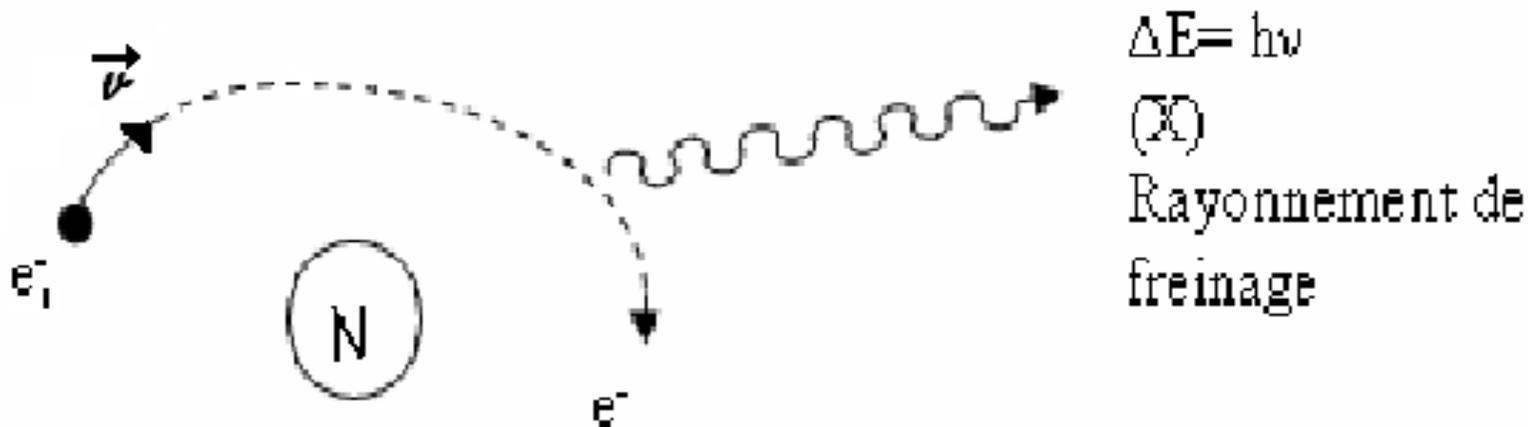
e- surtout  $\gamma$  , (e+)...

la matière est constituée d'atomes faits d'électrons et de noyaux .

**a- Interaction des e- avec les noyaux :**

**e- entre en interaction avec le noyau**

$e^-_i$   $\longrightarrow$  champ coulombien du noyau



- Accélération importante de l'électron avec déviation et perte d'énergie cinétique de l'électron.
- L'électron rayonne de l'énergie sous forme d'un rayonnement X de freinage, à l'origine de production des rayons X dans le tube de Coolidge. (Bremstrahlung)
- TEL  $\approx 0,25\text{KeV}/\mu\text{m}$  : eau  
Pour des électrons de 5MeV : Parcours = 2cm.

## b- Interaction des $e^-$ avec les électrons atomiques :

- $e^-_1 \longrightarrow$  collision e- milieu  $\left\{ \begin{array}{l} \text{excitation} \\ \Rightarrow \\ \text{ionisation} \end{array} \right.$
- Collision : déviation par répulsion coulombienne  
→ Diffusion de l' $e^-_1$  avec une perte d'énergie importante : Trajectoire en **ligne brisée**.



## II- Interaction des photons avec la matière :

### RX - $R_\gamma$

#### 1. Généralités :

**RX -  $R_\gamma$**  sont des rayonnements indirectement ionisants.

→ **RX** : ont une double origine :

- \* émis par freinage d'un faisceau d'e- accélérés.

- \* émis lors du retour à l'état fondamental d'un atome ( $Z\uparrow$ ) excité (origine électronique).

→ **R $\gamma$**  : \* ont une origine nucléaire puisqu'ils sont émis par un noyau qui passe d'une transition d'un état excité → état stable.

\* émis dans les accélérateurs de particules.

\* Les rayonnements  $\gamma$  ont en général une énergie plus élevée que les rayonnements X.

- Mais les  $R_X$  et  $R_\gamma$  ont le même comportement vis-à-vis de la matière.
- Ces photons sont différents des particules chargées ( $m = 0$ , charge = 0).
- Leur comportement vis-à-vis la matière est différent de celui des particules chargées.



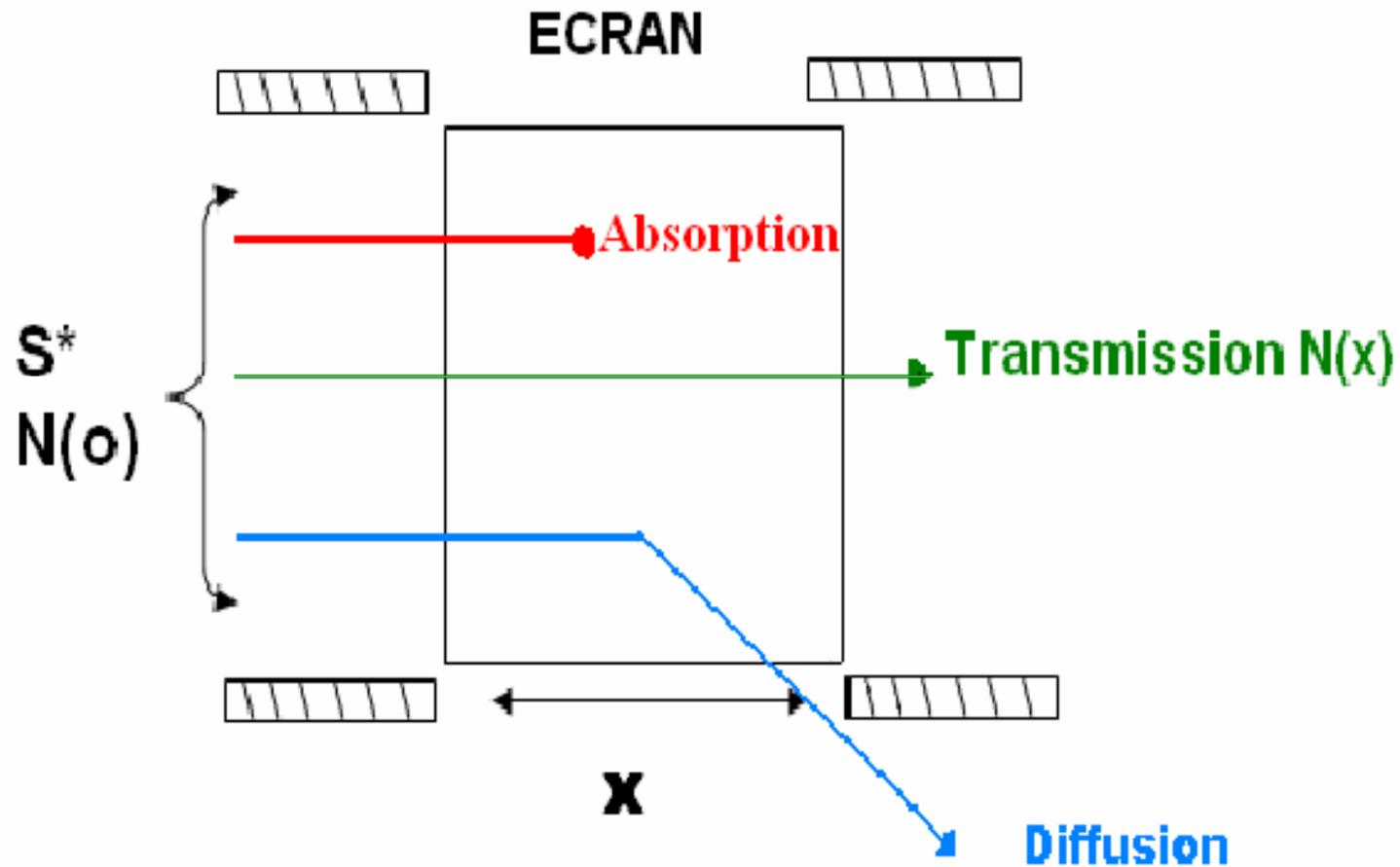
- Cette interaction est aléatoire.

## 2. Effet global :

Les photons sont caractérisés par :

- leur fréquence  $\nu$
- leur longueur d'onde  $\lambda = c / \nu$
- leur énergie :  $E = h \nu$

# a. Atténuation d'un faisceau $\gamma$ (X) :



- Le faisceau traverse un écran d'épaisseur  $x$  : certains photons vont être **absorbés**, d'autres diffusés (changement de direction) et les autres **transmis**.
- Les photons ( $X$  ou  $\gamma$ ) sont enlevés du faisceau incident par une seule interaction : absorption ou diffusion.

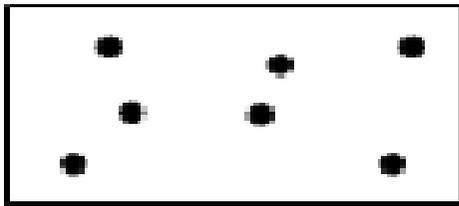
$$\boxed{N(x) = N(0)e^{-\mu x}} \quad (\text{Faisceau transmis})$$

- $\mu$  = probabilité d'interagir par unité de longueur, d'un photon avec la matière.
- $N(0)$  = nombre de photons incidents.
- $N(x)$  = nombre de photons après traversée de l'écran ( $x$ ).

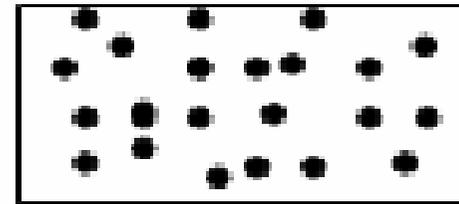
- De même, si  $I(0)$  = intensité du rayonnement à l'entrée de l'écran ( $x$ ),

$$I(x) = I(o) e^{-\mu x}$$

- $\mu$  s'appelle également le coefficient d'atténuation linéaire total.
- $\mu$  s'exprime en  $\text{cm}^{-1}$ .
- $\mu$  est caractéristique de l'énergie du rayonnement et du matériau considéré.
- De même, la compacité du matériau est importante  $\rightarrow \rho$  : masse volumique ( $\rho = m/v$ )



**Cu**



**Cu  
comprimé**

- Le comportement est différent vis-à-vis du même faisceau de photons, d'où la notion du coefficient d'atténuation massique :  $\mu/\rho$
- Unité :  $\mu/\rho: \text{cm}^{-1}/\text{g}\cdot\text{cm}^{-3} \rightarrow \mu/\rho: \text{cm}^2 \text{g}^{-1}$

## b. Couche de demi atténuation = CDA++

- C'est l'épaisseur de matière traversée qui atténue de moitié l'intensité du rayonnement:

$$I_{\text{CDA}} = I_0/2$$

$$I_{\text{CDA}} = I_0 e^{-\mu (\text{CDA})} = I_0/2$$

$$2 = e^{\mu (\text{CDA})} \rightarrow \text{Ln } 2 = \mu (\text{CDA})$$

$$\text{CDA} = \text{Ln } 2 / \mu = 0.693/\mu \rightarrow \text{cm}$$

- Ex : Pour un faisceau de rayonnement de 1,14MeV, la CDA = 9,8mm pour le plomb.

## Applications:

- Le plomb est utilisé en médecine nucléaire , radiologie et radiothérapie pour la protection contre les rayonnements ionisants.
- Pour chaque type de rayonnement, on précise l'énergie et la CDA

### 3. Phénomènes élémentaires :

Un faisceau de photons peut interagir avec :

\* Les électrons :

- Diffusion simple (Thomson Rayleigh)
- Effet Compton +++
- Effet photo-électrique +++.

\* le noyau :

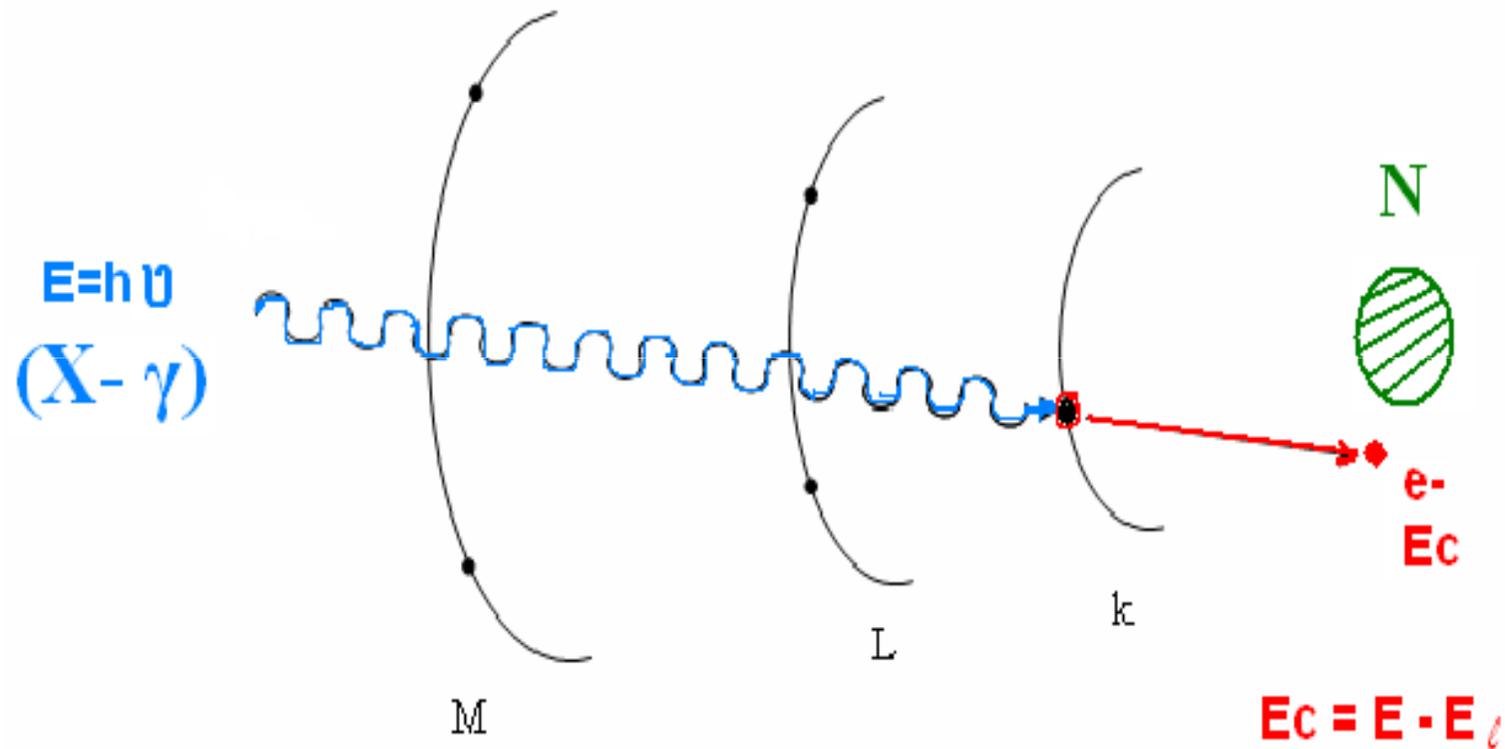
- Matérialisation +++
- Réactions photo nucléaires.

Les principales interactions sont :

- L'effet photo-électrique.
- L'effet Compton.
- La matérialisation

## A- Effet photo-électrique : +++

- \* Phénomène primaire : e- lié.  
Photon disparaît.



$E_\ell$  = énergie de liaison

L'énergie  $E = h\nu$  du photon sert à :

- extraire l'électron de sa couche.
- communiquer à l'électron une  $E_c$ .

\*Conditions :

- $E > E_\ell$
- l'électron est **lié** (K+++, L++, M+..).

\* Phénomènes secondaires :

- Ionisations/ excitations des atomes du milieu.
- Réorganisation du cortège électronique avec émission de :
  - rayonnement de fluorescence  $X(Z\uparrow\uparrow)$
  - e- Auger.

\* Probabilité d'interaction par effet photo-électrique :  $\mu\Phi$

- $\mu\Phi$  dépend :
  - de l'énergie du photon :  $E$
  - de la cible :  $Z$  (écran).

$$\mu\Phi = C_K \rho \frac{Z^3}{E^3}$$

- $\mu\Phi$  augmente avec  $Z$ .
- $\mu\Phi$  diminue avec  $E$ .
- $\rho$  = masse volumique
- $C_K$  = constante caractéristique de la couche  $K$ .

L'effet  $\Phi$  prédomine :

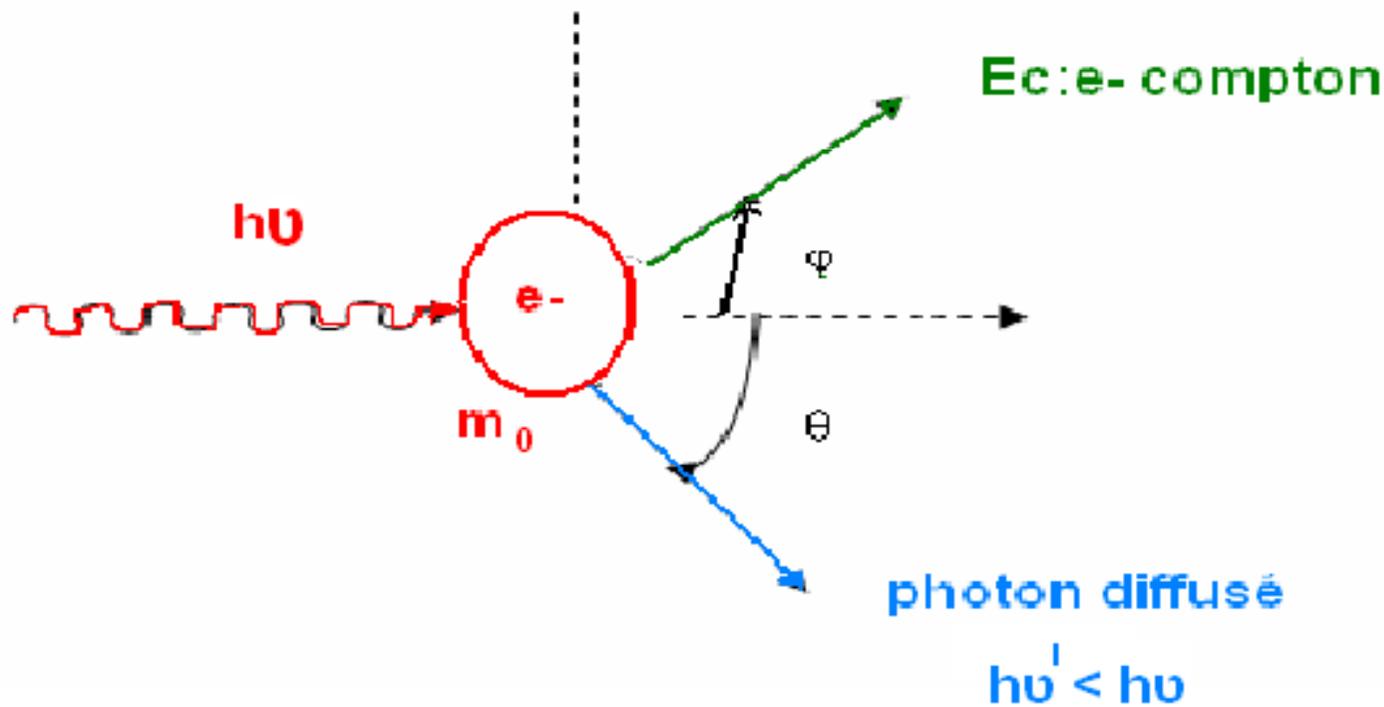
- jusqu'à une énergie  $E = 0,5\text{MeV}$   
( $E \leq 0,5\text{MeV}$ ).
- $Z$  élevé : noyaux lourds.

Application : Utilisation du plomb en radio-protection car :

- Les énergies utilisées en diagnostic médical sont en général  $\leq 0,5\text{MeV}$ .
- Le plomb possède un  $Z$  très élevé.

## **B- Effet Compton :**

- Description : c'est une interaction entre un photon  $h\nu$  et un **électron libre ou lié**.
- L'électron est projeté selon un angle  $\varphi$  et le photon est dévié selon un angle  $\theta$  ( $0 < \theta < \pi$ ).



- $m_0$  = masse de l'électron au repos.
- $0 \leq \varphi \leq 90^\circ$
- $0 \leq \theta \leq 180^\circ$

- $$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu(1 - \cos \theta)}{m_0 c^2}}$$

- $E_{C_{(e^-)}} = h\nu - h\nu'$

$$E_{C_{(e^-)}} = h\nu - \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu(1 - \cos \theta)}{m_0 c^2}}$$

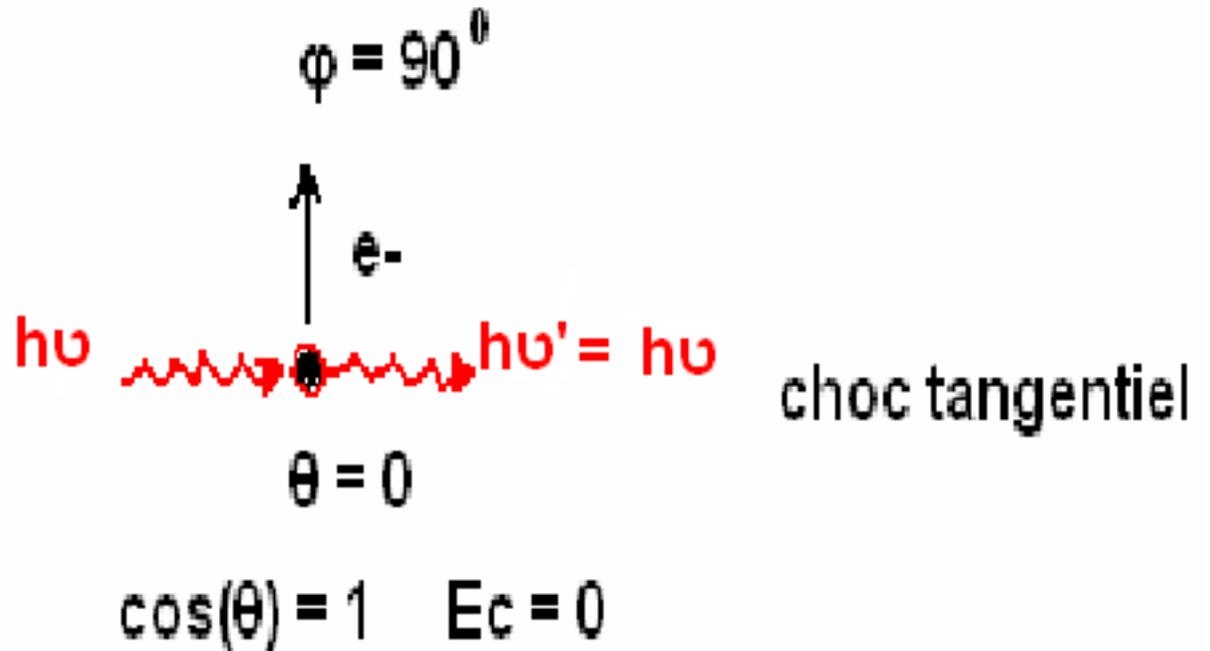
L'électron compton ( $E_c$ )  $\rightarrow$   $\left\{ \begin{array}{l} \text{Excitation} \\ \text{Ionisation} \end{array} \right. \quad +++$

**\* cas extrêmes :**

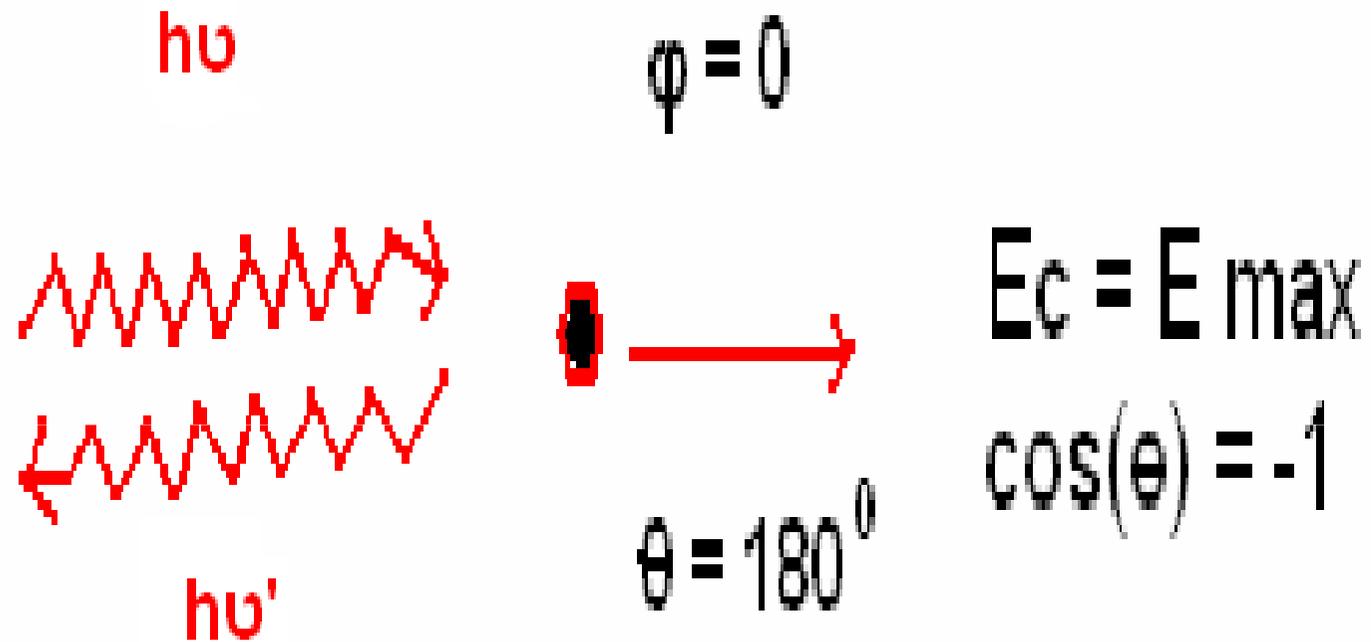
**a) choc tangentiel**

$$h\nu = h\nu'$$

$$E_{c(e^-)} = 0$$



## b) Rétrodiffusion :



### Rétrodiffusion

\*Probabilité d'atténuation par effet Compton: (1MeV)+++

$$\mu_c = K \frac{Z}{h\nu}$$

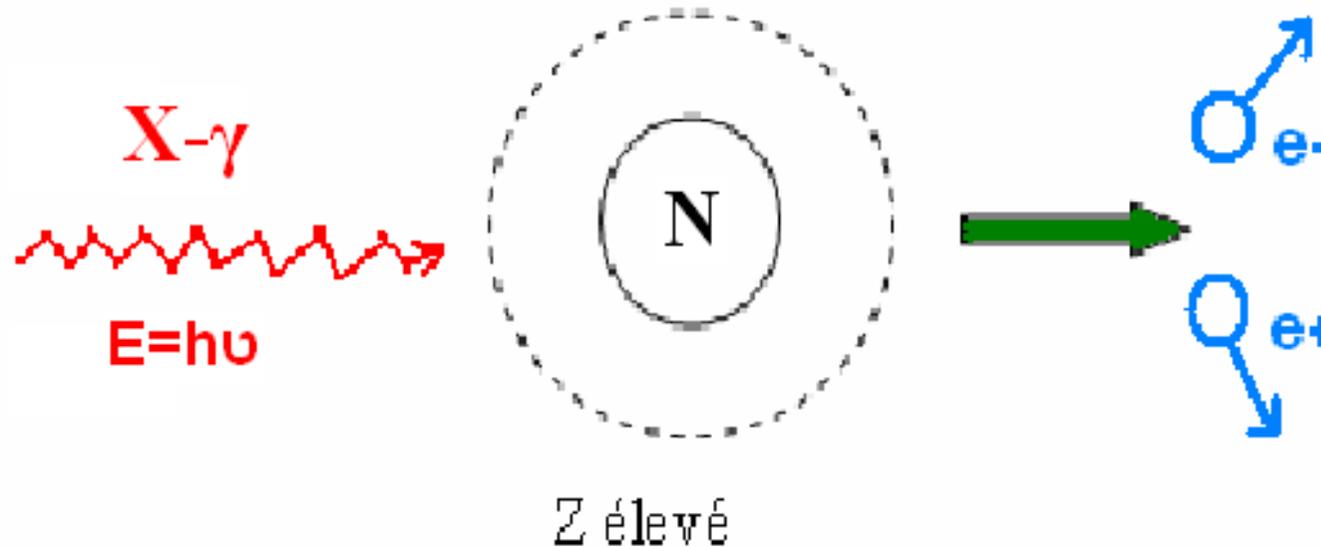
Formule valable si  $E < 0.5 \text{ MeV}$  (Z léger+/-)

$\mu_c/\rho$  :  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Indépendant de } Z \\ \downarrow \text{ Lentement quand } E \uparrow \end{array} \right.$

Aux énergies utilisées en médecine ( $E < 0,5 \text{ MeV}$ ), l'effet compton existe, mais il reste peu probable lorsque  $Z$  est élevé.

**C- Effet de création de paires = matérialisation :**

Le mécanisme est possible si :  $h\nu \geq 1,022\text{MeV}$ .

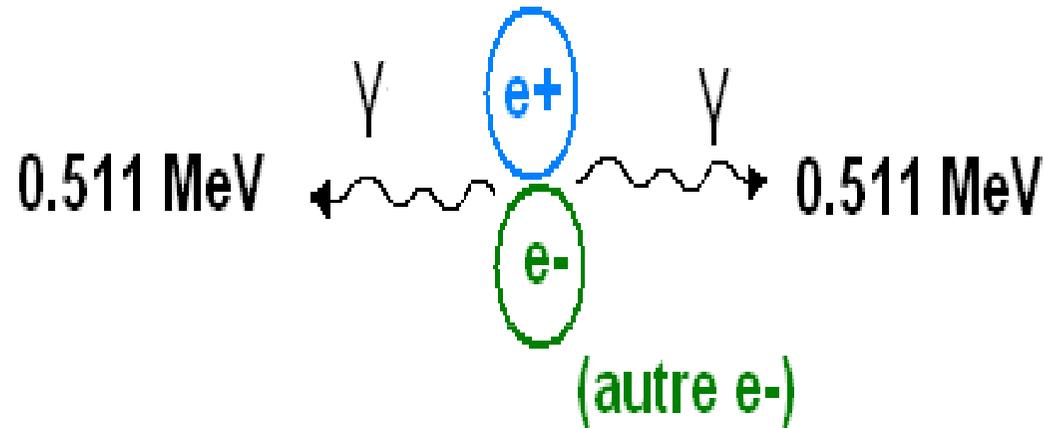


- avec disparition du photon.

- $E - 1,022\text{MeV} = E_{ce^+} + E_{ce^-}$

\* Conséquences :

- L'e- perd son  $E_c$  par excitation/ionisation.
- L'e+ s'annihile en rencontrant un e- libre de la matière.



\* Probabilité d'interaction par production de paire :  $\mu_p$

$\mu_p = 0$  lorsque  $E < 1,022 \text{ MeV}$

$\mu_p$  : - croit avec  $Z$ .

- croit lentement avec  $h\nu$ .

## **D- coefficient d'atténuation total :**

**1. coefficient d'atténuation linéaire:**

$$\mu \text{ (cm-1)} = \mu_{\phi} + \mu_c + \mu_p$$

**2. coefficient d'atténuation massique :  $\mu/\rho$**

$$\mu/\rho = \mu_{\phi}/\rho + \mu_c/\rho + \mu_p/\rho$$

La variation de  $\mu/\rho$  en fonction de Z est moins grande que  $\mu$ .

**E. probabilité de l'un des effets en fonction de Z :**

