

UE3-1 : Biophysique

Chapitre 2 :

Interactions des rayonnements avec la matière

Professeur Jean-Philippe VUILLEZ

Année universitaire 2010/2011

Université Joseph Fourier de Grenoble - Tous droits réservés.

Interactions des rayonnements avec la matière

Il faut distinguer

- les particules chargées :

rayonnements directement ionisants

- les particules neutres et les photons ($>13,6$ eV):

rayonnements indirectement ionisants

[L'énergie de liaison de l'électron le plus périphérique (« premier potentiel d'ionisation ») est de l'ordre de 10 eV, et vaut 13,6 eV pour l'atome H]

1) Interactions des particules chargées avec la matière et leurs conséquences

- **Particules chargées**

- électrons (e^-)
- protons (p^+)
- particules α (p^2n^2)
- positons (e^+)

- **Interactions : 3 aspects**

Particule

⇒ charge z

Énergie E {
⇒ masse m
⇒ vitesse v

Interaction

Matière

(= eau en biologie)

⇒ n° atomique Z

⇒ noyaux

⇒ électrons (*densité électronique*)

Les trois aspects des interactions des particules chargées avec la matière

- **L 'interaction elle-même = *transfert d 'énergie***
 - nature
 - mécanisme
 - fréquence/probabilité
- **Conséquences sur la particule = *ralentissement***
- **Conséquences sur le milieu = *effets physiques et radiobiologiques (+++)***

Notion centrale :
énergie transférée

- effet thermique
- excitations
- ionisations

1-1) Interactions des particules chargées avec la matière

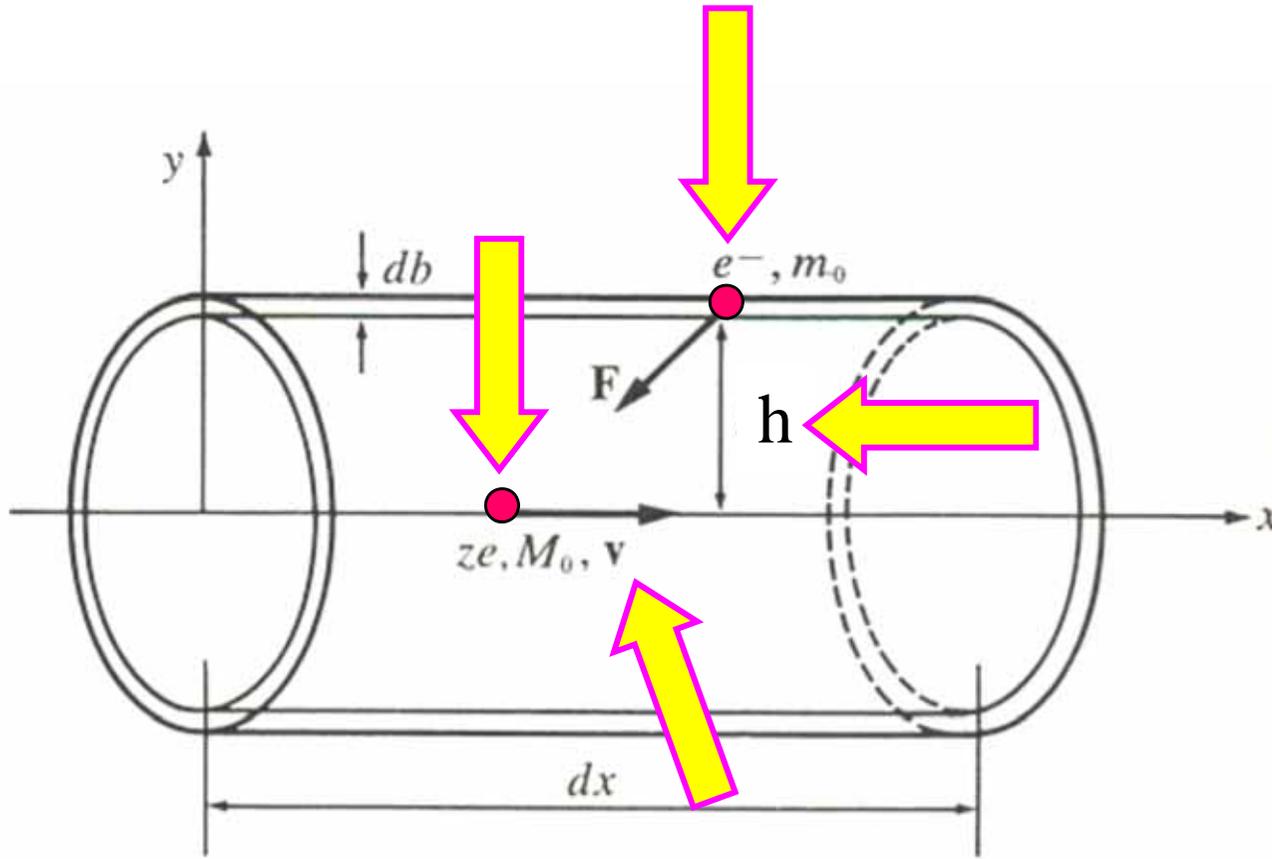
- **Elles peuvent se faire :**
 - Avec les électrons +++++
 - Choc « frontal » (rare)
 - Choc « à distance » +++++
 - Avec les noyaux
 - Choc « frontal » (rare)
 - Interaction à distance : rayonnements de freinage (X)

Interaction
des particules chargées
avec les électrons

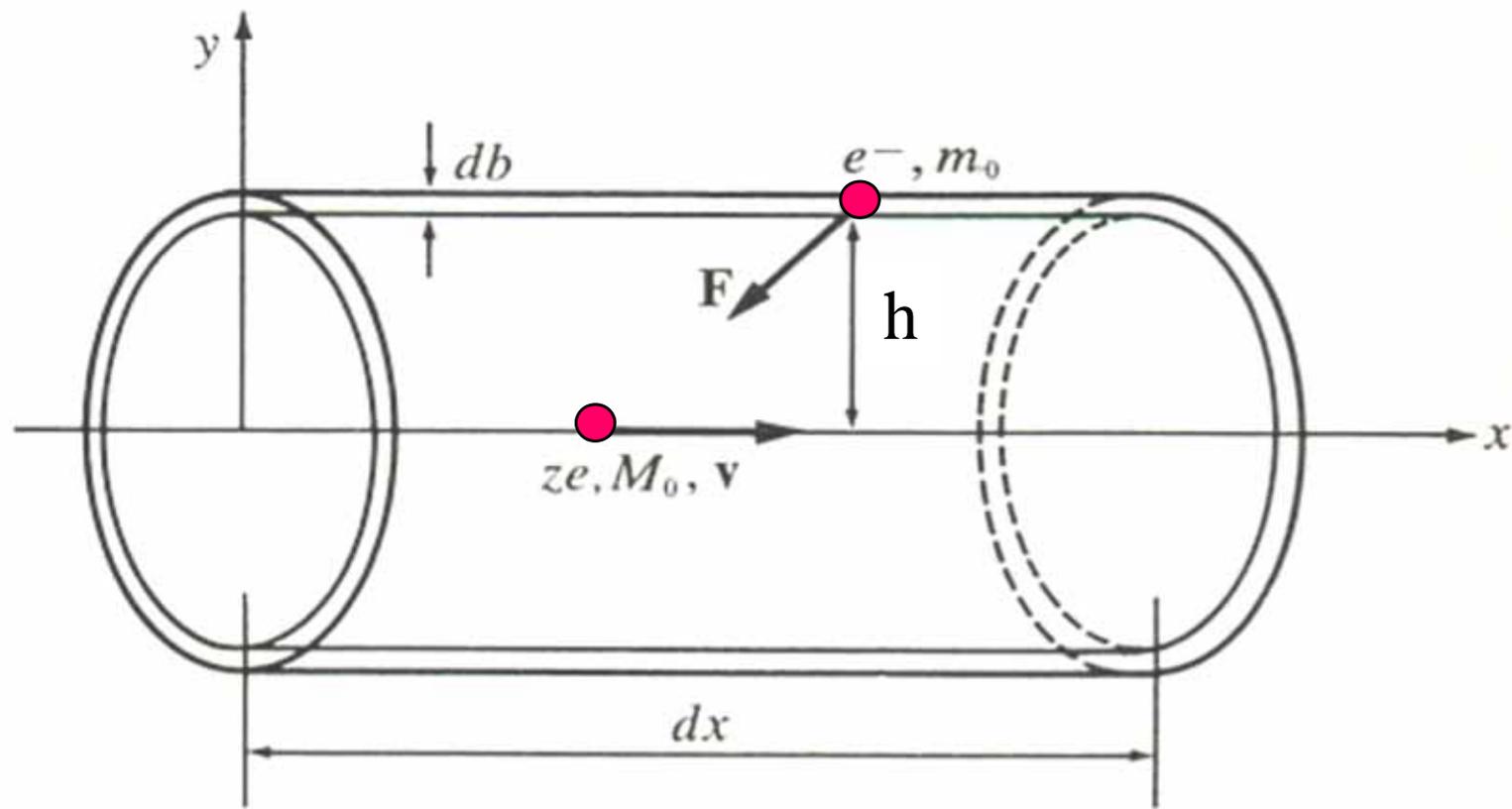
Interaction des particules chargées avec les électrons du milieu

- **Mécanisme commun à toutes les particules chargées :**
 - = Interaction coulombienne**
- **La force coulombienne (positive ou négative) qui, pendant le bref passage de la particule au voisinage de l'électron, s'exerce entre les deux charges électriques, communique une impulsion à l'électron**
 - è il y a TRANSFERT à l'électron cible d'une énergie Q prélevée sur l'énergie E de la particule incidente**

Cas le plus fréquent : « collision éloignée »



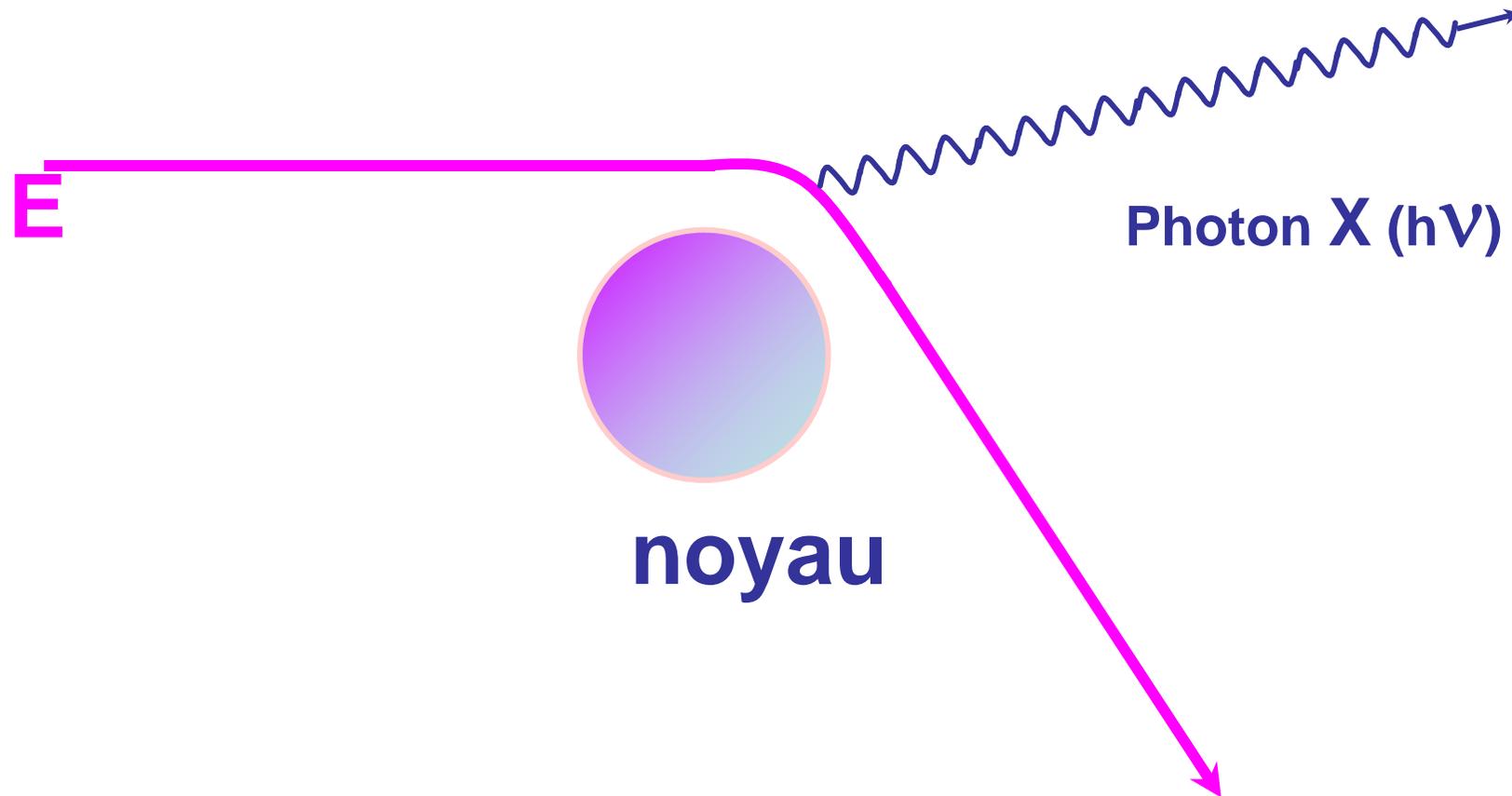
$$Q \cong K \frac{1}{h^2} \frac{z^2}{v^2}$$



L'impulsion communiquée croît avec la DUREE de l'interaction : $\Delta t \cong \frac{h}{v}$

- Q diminue rapidement lorsque h augmente
- pour une distance h donnée, Q est d'autant plus grand que la vitesse de la particule est plus faible

Interaction des particules chargées
avec les **noyaux du milieu**
⇒ *rayonnement de freinage*



1-2) Conséquences sur la particule : ralentissement

Pouvoir de ralentissement

Trajectoire et parcours

- **Pouvoir de ralentissement $S = \Delta E / \Delta X$**
- **$Q = K \cdot 1/h^2 \cdot z^2/v^2$**
donc ΔE et S sont proportionnels à z^2/v^2
- **À *vitesse égale*, toutes les particules portant une seule charge ont le même pouvoir de ralentissement**

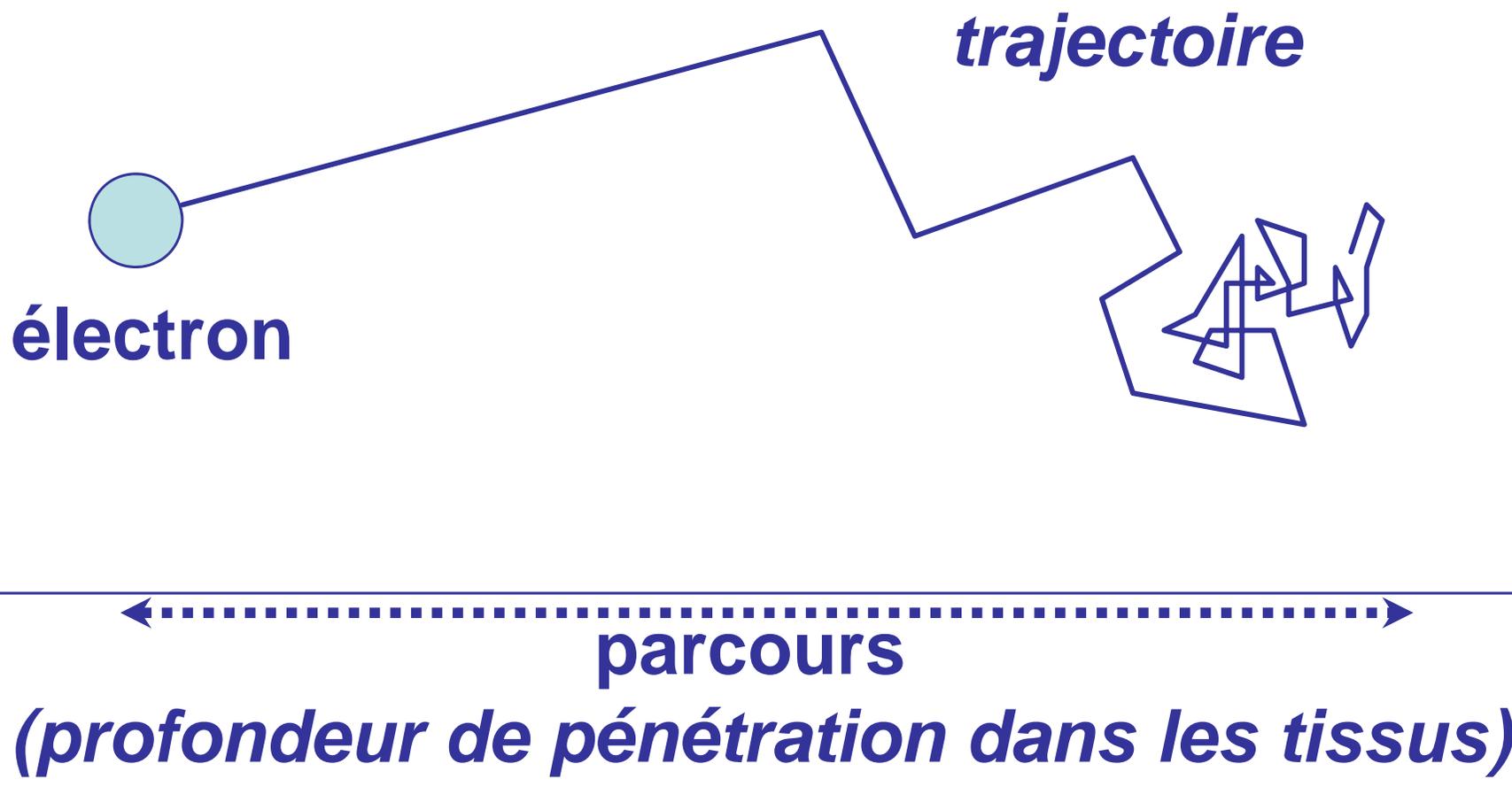
Pouvoir de ralentissement

- **Masse du proton = 1830 x masse de l'électron**
- **Protons : vitesse v , énergie $E_p \Rightarrow$ même pouvoir de ralentissement que des électrons qui, à la même vitesse v , ont une énergie très inférieure $E_e = E_p/1830$**
- **Effet de la charge : particule α ($z = 2$) : même vitesse $v \Rightarrow$ le pouvoir de ralentissement est : $2^2 = 4$ fois plus élevé**

Pouvoir de ralentissement

- **Conséquence importante :**
 à deux particules de **même énergie** mais de **masses** donc de **vitesse différentes** ont des ***pouvoirs de ralentissement différents***
- **Ceci a une importance considérable sur le plan radiobiologique +++++**

Trajectoire et parcours

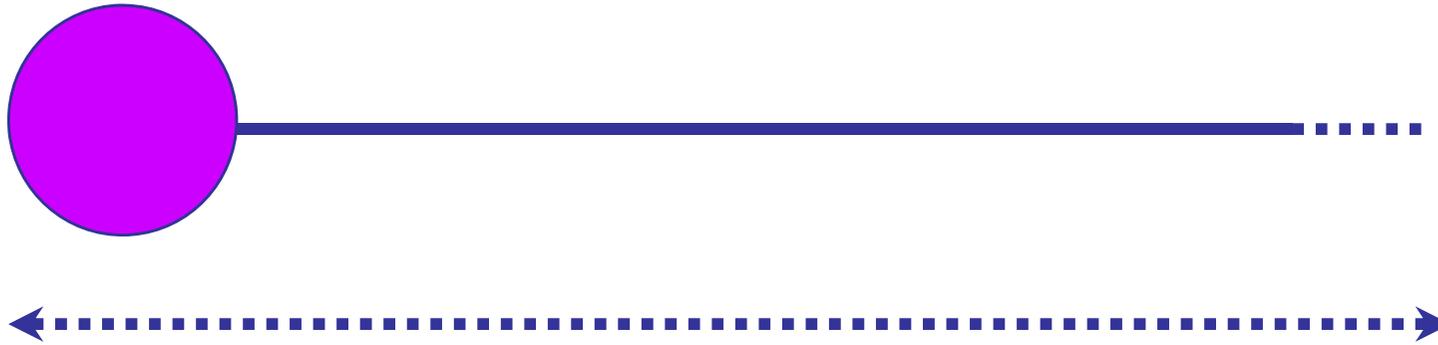


Le parcours R et le pouvoir de ralentissement S des électrons dans l'eau en fonction de leur énergie cinétique initiale E est donnée dans le tableau suivant :

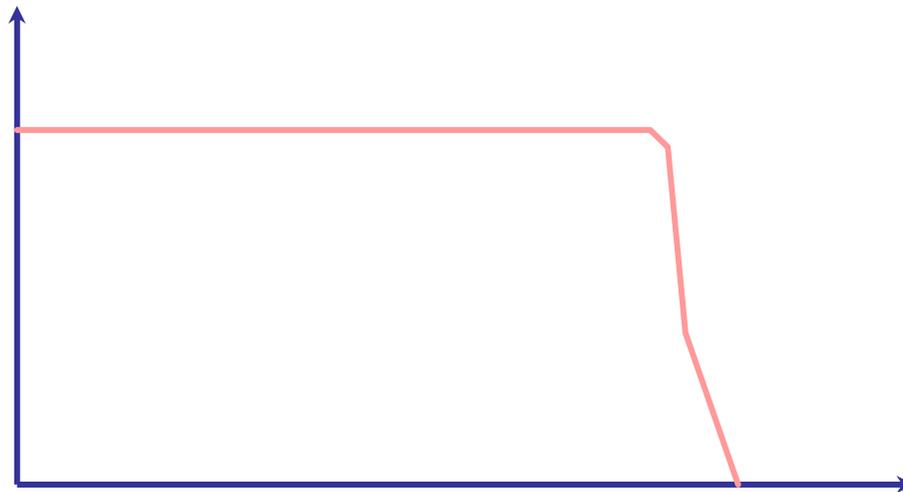
E	10	30	50	100	0,5	1	5	10
S(keV/ μm)	2,3	0,99	0,67	0,42	0,20	0,19	0,19	0,19
R	5	20	50	150	0,2	0,5	2,5	5
			μm				cm	

(d'après Tubiana M., Dutreix J., Wambersie A. Radiobiologie -Hermann 1986).

Trajectoire et parcours particules lourdes



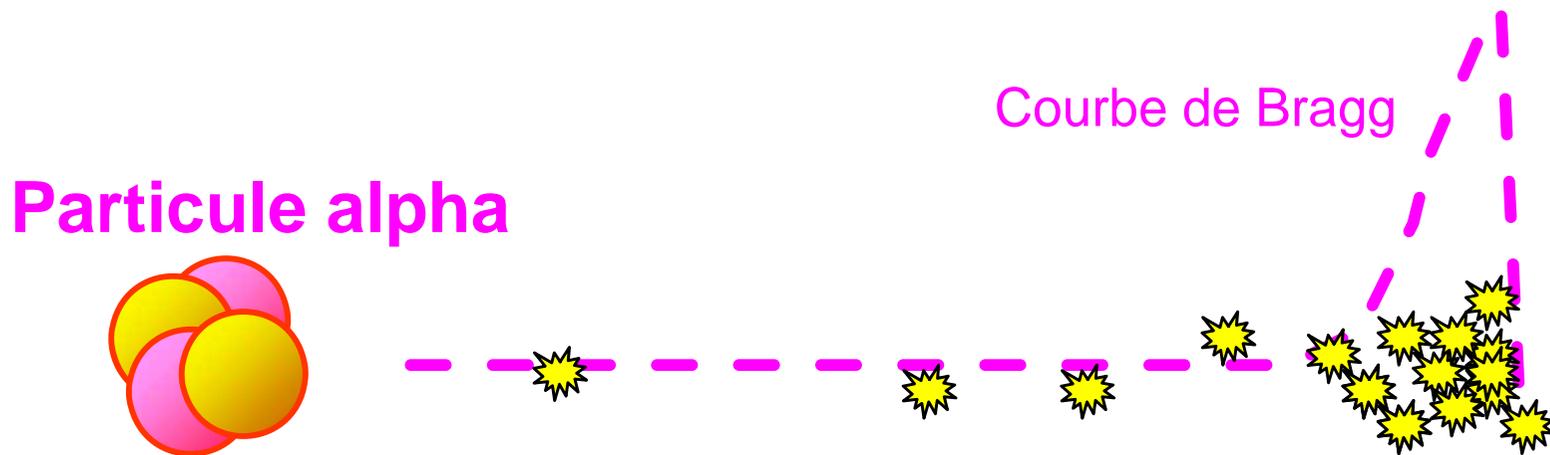
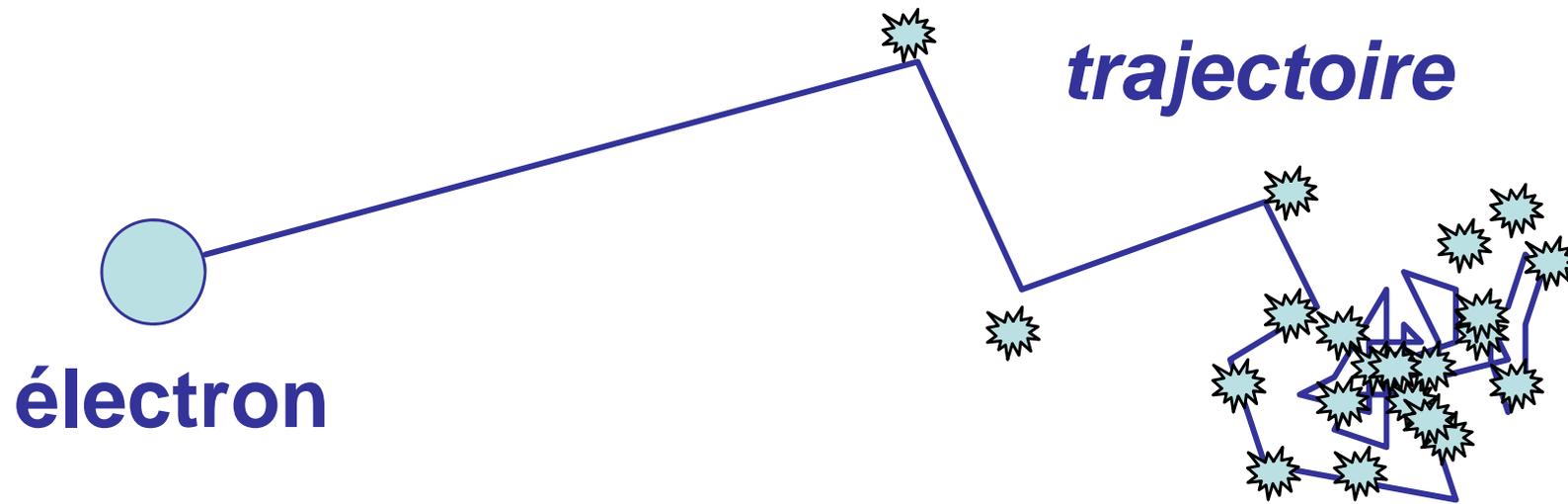
Parcours = *trajectoire*



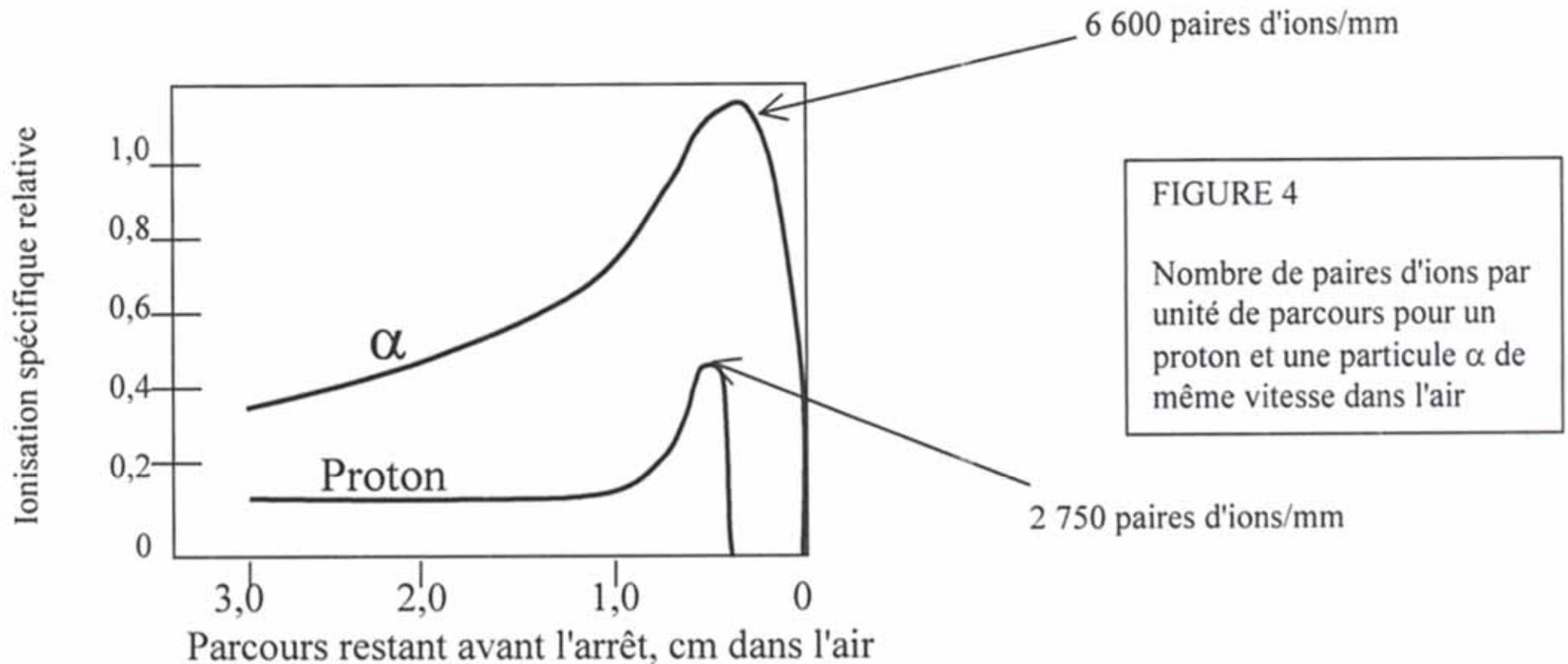
Le pouvoir de ralentissement dépend de la vitesse

- ... par conséquent, il augmente quand la vitesse diminue (proportionnel à z^2/v^2)
- **Donc plus la particule ralentit, plus le pouvoir de ralentissement augmente : les interactions sont beaucoup plus nombreuses en fin de trajectoire...**

Les interactions sont beaucoup plus nombreuses en fin de trajectoire

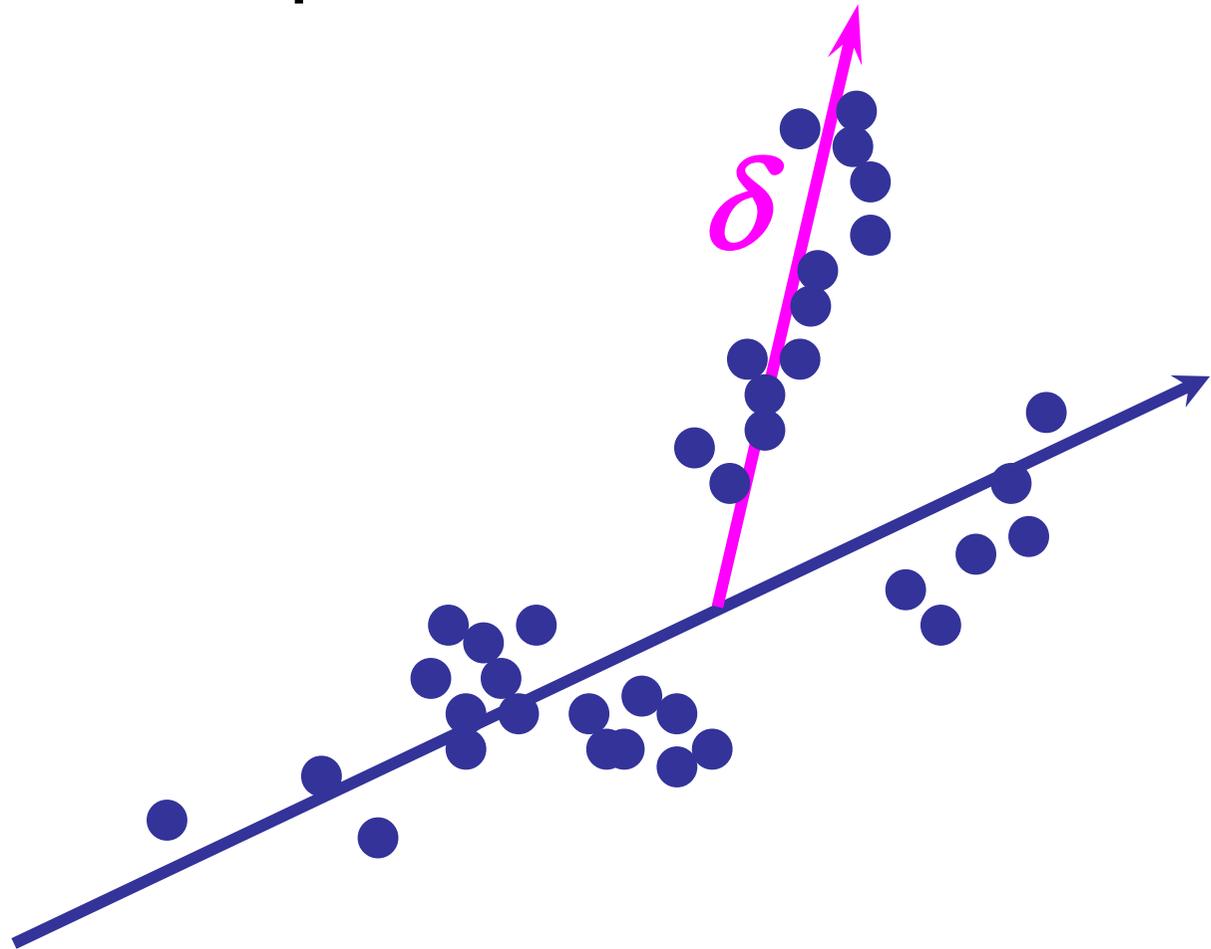


Avec les particules lourdes (protons, particules α), les ionisations sont plus nombreuses en fin de parcours : courbe de Bragg



1-3) Conséquences de l'interaction des particules chargées sur le milieu

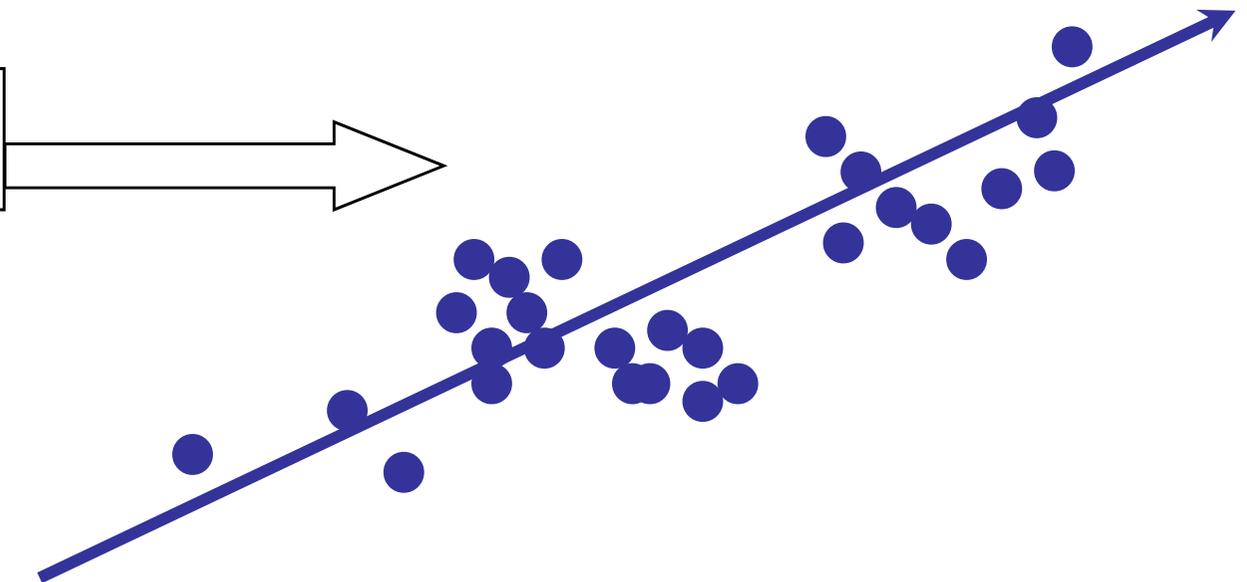
- Transferts thermiques
- Excitations
- Ionisations



Chaque interaction entraîne dans le milieu un effet qui dépend de la valeur Q de l'énergie transférée par la particule :

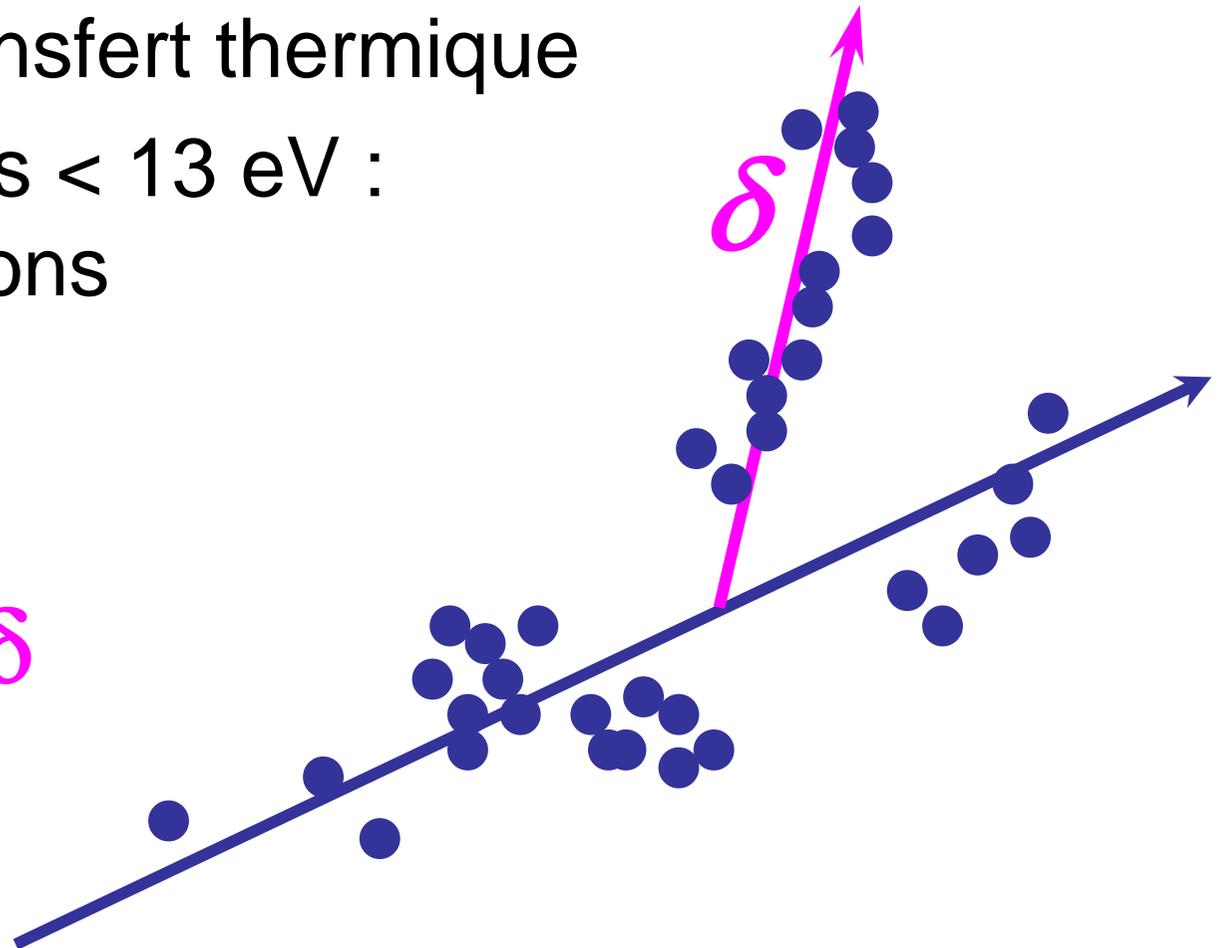
- Q très faible : transfert thermique
- Q plus élevé mais < 13 eV :
excitations
- Q élevé :

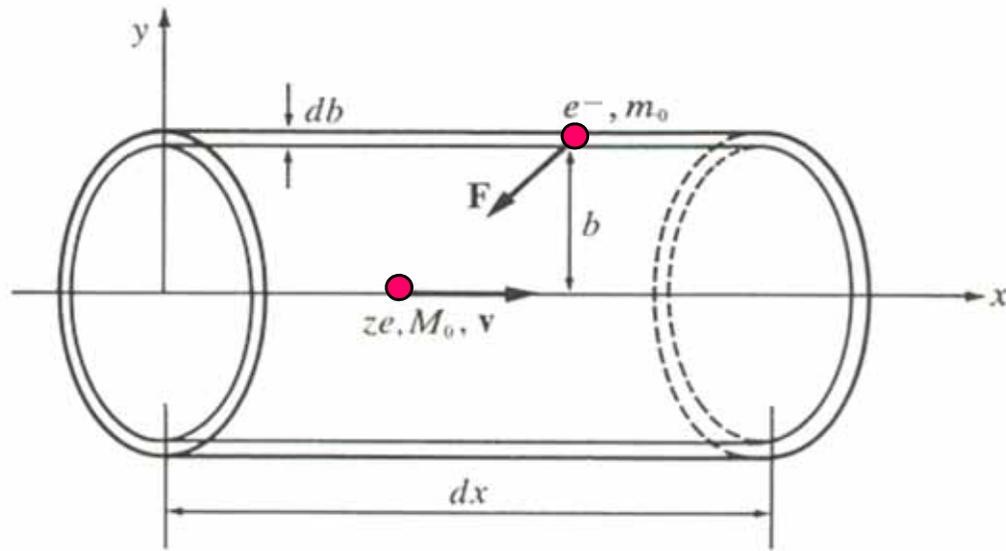
– Ionisations
– Électrons δ



Chaque interaction entraîne dans le milieu un effet qui dépend de la valeur Q de l'énergie transférée par la particule :

- Q très faible : transfert thermique
- Q plus élevé mais < 13 eV :
excitations
- Q élevé :
 - Ionisations
 - **Électrons δ**





$$Q \approx K \frac{1}{h^2} \cdot \frac{z^2}{v^2}$$

La probabilité d'une interaction au cours de laquelle est transférée l'énergie Q est proportionnelle à $1/Q^2$

La probabilité d'une interaction au cours de laquelle est transférée l'énergie Q est *proportionnelle à $1/Q^2$*

- **Les chocs à faible transfert (= à distance élevée) sont plus nombreux (probabilité plus élevée)**
- **Il en résulte que l'énergie ΔE perdue par la particule le long d'un segment Δx de sa trajectoire se répartit schématiquement en :**
 - 40 % sous forme de transferts $Q > 100$ eV (électrons Δ)
 - 30 % sous forme de transferts $10 < Q < 100$ eV (ionisations)
 - 30 % sous forme de transferts $Q < 10$ eV (excitations et transferts thermiques)

La probabilité d'une interaction au cours de laquelle est transférée l'énergie Q est *proportionnelle à $1/Q^2$*

- **Energie ΔE perdue par la particule le long d'un segment Δx de sa trajectoire :**
 - 40 % sous forme de transferts $Q > 100$ eV (électrons δ)
 - 30 % sous forme de transferts $10 < Q < 100$ eV (ionisations)
 - 30 % sous forme de transferts $Q < 10$ eV (excitations et transferts thermiques)
- **Cette répartition :**
 - dépend peu de la vitesse et de la charge de la particule, donc de son pouvoir de ralentissement
 - est constante tout au long de la trajectoire de la particule
 - est la même pour les électrons δ
- **De sorte qu'après épuisement des électrons secondaires, environ 50 % de l'énergie d'un électron incident a été déposée par ionisations**

TEL (transfert linéique d'énergie)

= quantité d'énergie transférée au milieu par la particule incidente par **unité de longueur de trajectoire** (en keV.μm⁻¹)

Pour des particules de vitesse faible par rapport à celle de la lumière :

$$\text{TEL} \approx K \frac{Z^2}{v^2} n Z$$

charge → Z^2

Nombre d'atomes par unité de volume de la cible → n

Numéro atomique → Z

Vitesse → v^2

DLI = densité linéique d'ionisation

- **C'est le nombre de paires d'ions créés par la particule incidente par unité de longueur de trajectoire**
 - **Conditionne les effets biologiques**
- **Si ω_i est l'énergie moyenne transférée pour chaque ionisation :**

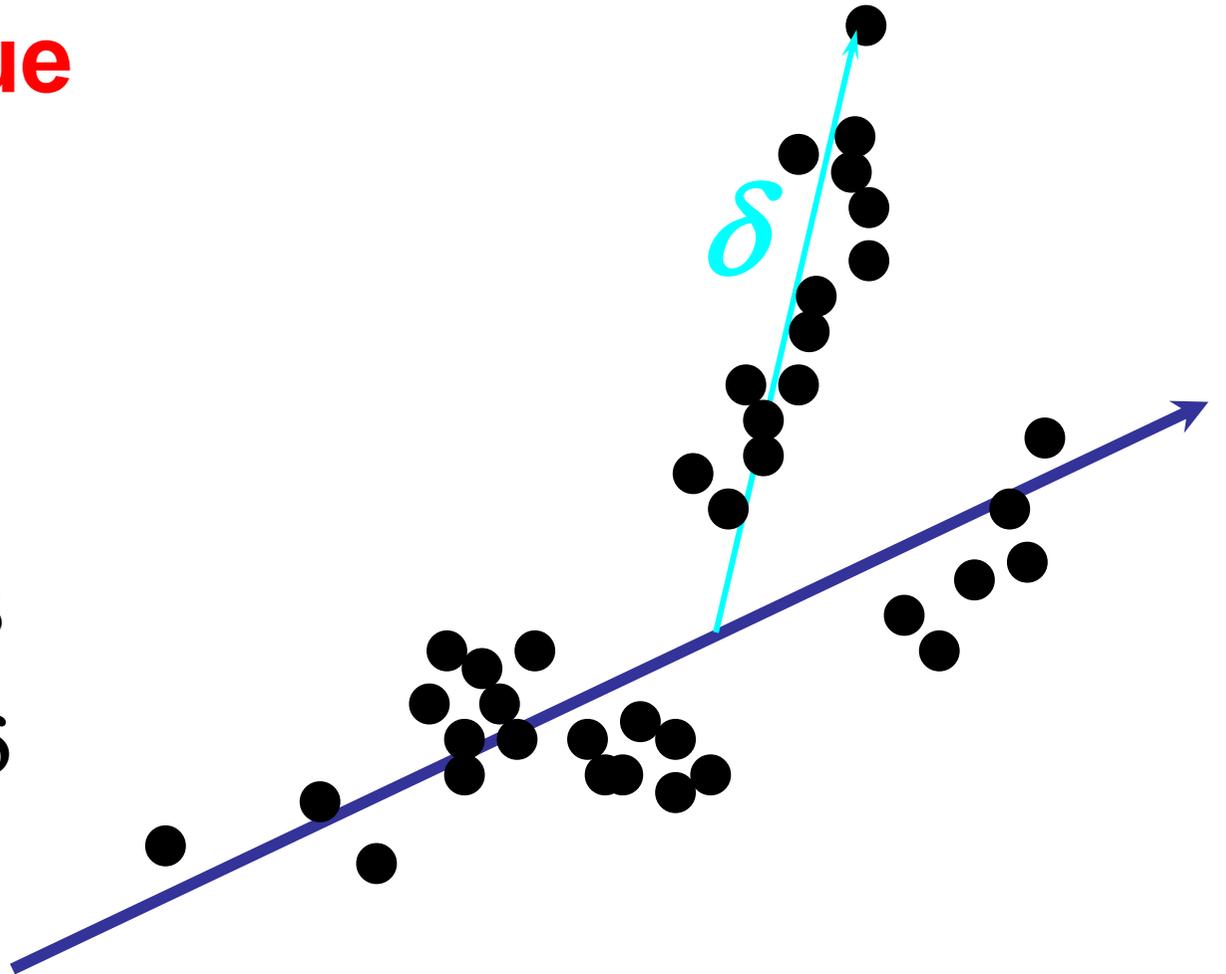
$$\text{TEL} = \text{DLI} \cdot \omega_i$$

Énergie moyenne par ionisation

- Cette répartition est constante tout au long de la trajectoire de la particule. Elle se retrouve le long de la trajectoire des électrons successifs, de sorte qu'au terme de la dégradation des électrons δ , l'énergie déposée dans le milieu est partagée à peu près également entre ionisations d'une part, excitations et transferts thermiques d'autre part.
- L'énergie absorbée en moyenne pour chaque ionisation, appelée ***énergie moyenne par ionisation*** (ω_i) est donc le double de l'énergie nécessaire à cette ionisation. Cette ***énergie nécessaire pour créer une paire d'ions*** dépend peu de la vitesse et de la charge des particules ; elle dépend essentiellement du milieu traversé.
- Dans l'eau, où une ionisation demande 16 eV, on a $\omega_i = 32$ eV (et environ 64 dans l'air).

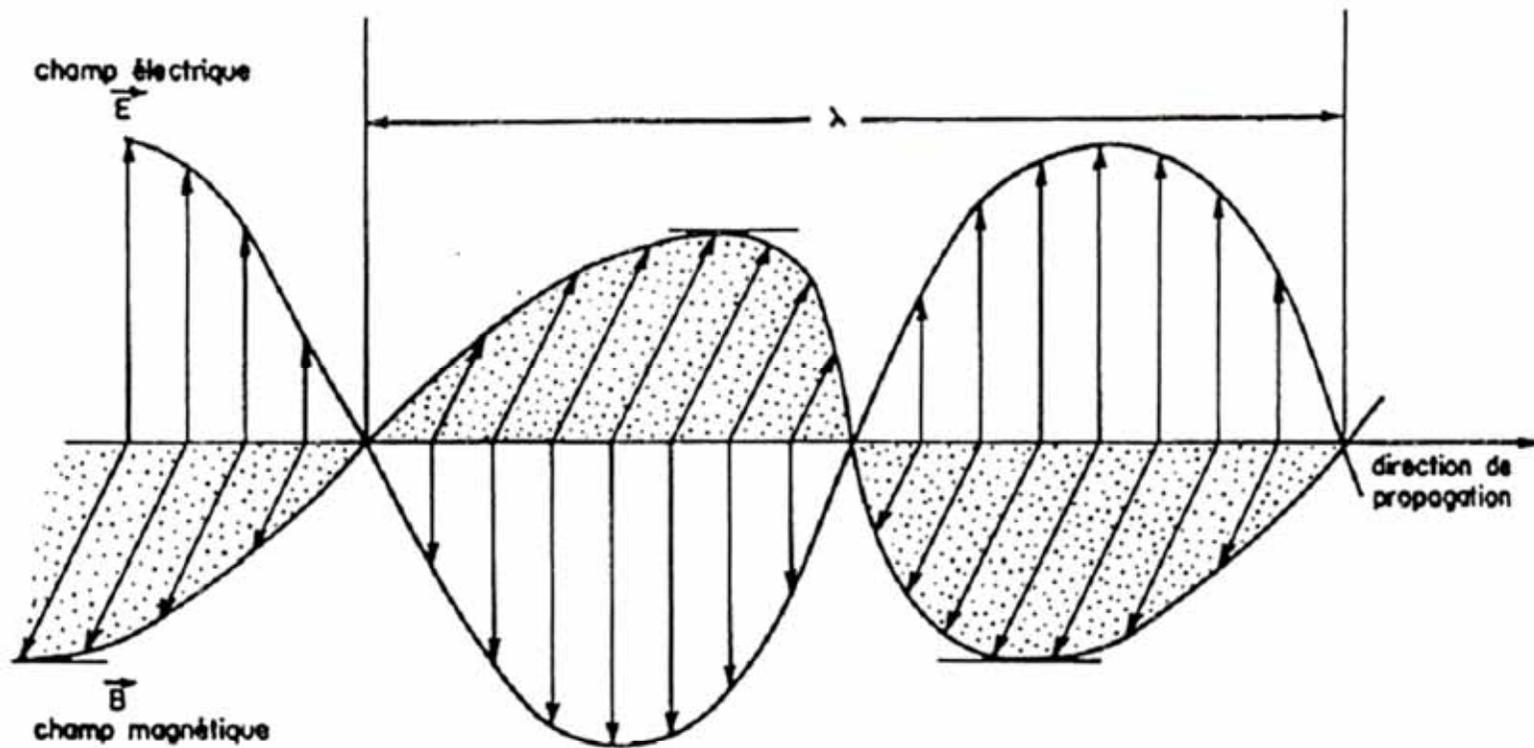
Notion centrale : énergie transférée

- effet thermique
- excitations
- ionisations
 - simples
 - en grappes
 - électrons δ

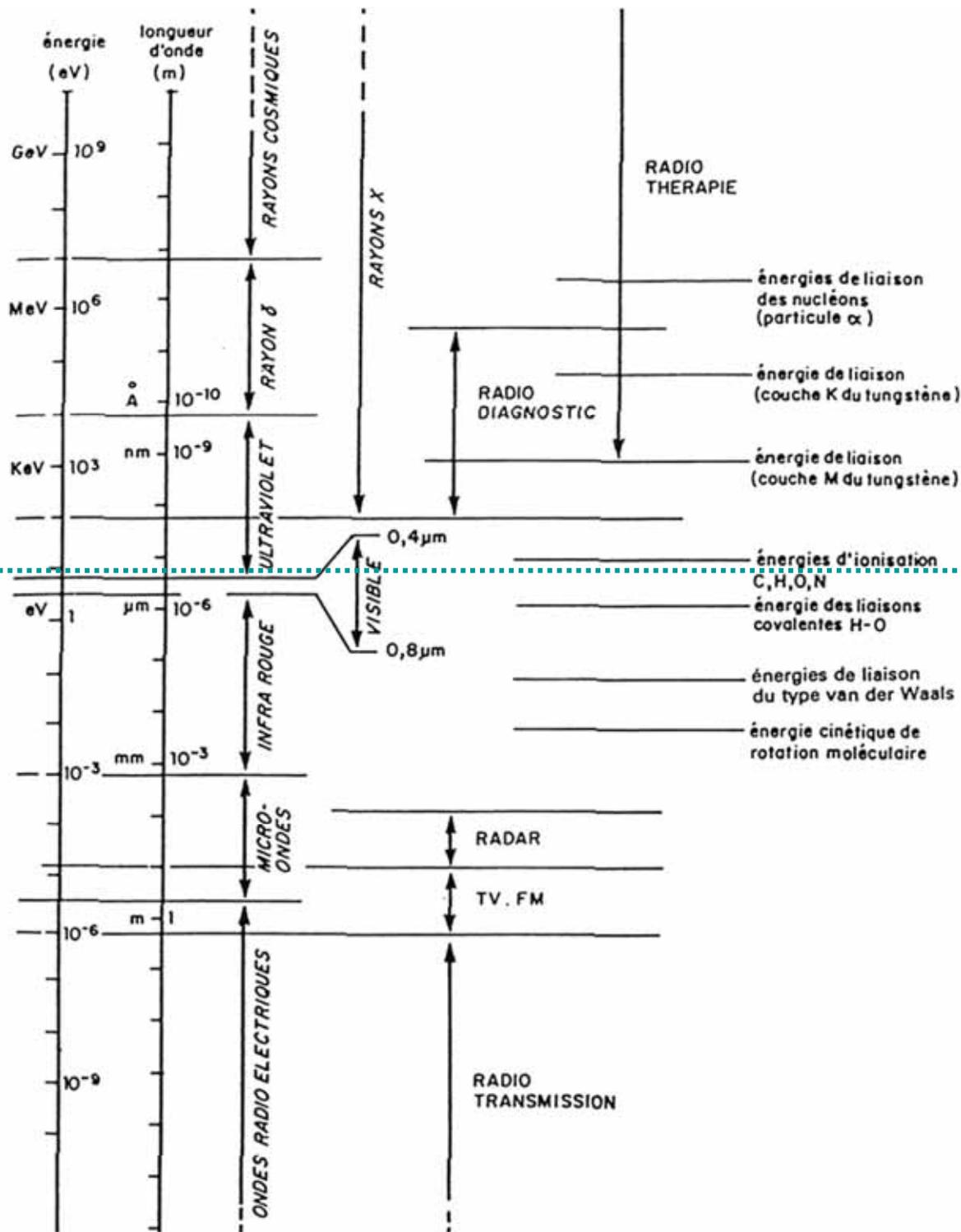


Interactions des rayonnements avec la matière

2) Interactions des photons



- sa période $T = \frac{1}{\nu}$ exprimée en secondes ;
- sa longueur d'onde dans le vide $\lambda = cT = \frac{c}{\nu}$, distance de propagation durant une période, exprimée en mètres ;
- son intensité énergétique, définie comme le flux énergétique $d\Phi$ (énergie transportée par unité de temps) émis dans un angle solide $d\Omega$, dans une direction \vec{u} déterminée (voir figure 16-1). Cette intensité notée $I(\vec{u}) = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ s'exprime en watt par stéradian ($\text{W} \cdot \text{sd}^{-1}$).



*Limite du domaine
des rayonnements
ionisants*

Photons : rayonnements électromagnétiques

- **Rayons γ**
- **Rayons X**
 - **X de freinage (spectre continu)**
 - **X de réarrangement (spectre de raies)**

Interactions des photons avec la matière

- **Dans un premier temps : interaction du photon avec un électron**
 - Non obligatoire : probabilité = coefficient d'atténuation ou d'absorption
 - Loi d'atténuation
- **L'électron éventuellement mis en mouvement se comporte alors comme une particule chargée (excitations, ionisations) è rayonnements **indirectement ionisants****

Photons : rayonnements électromagnétiques

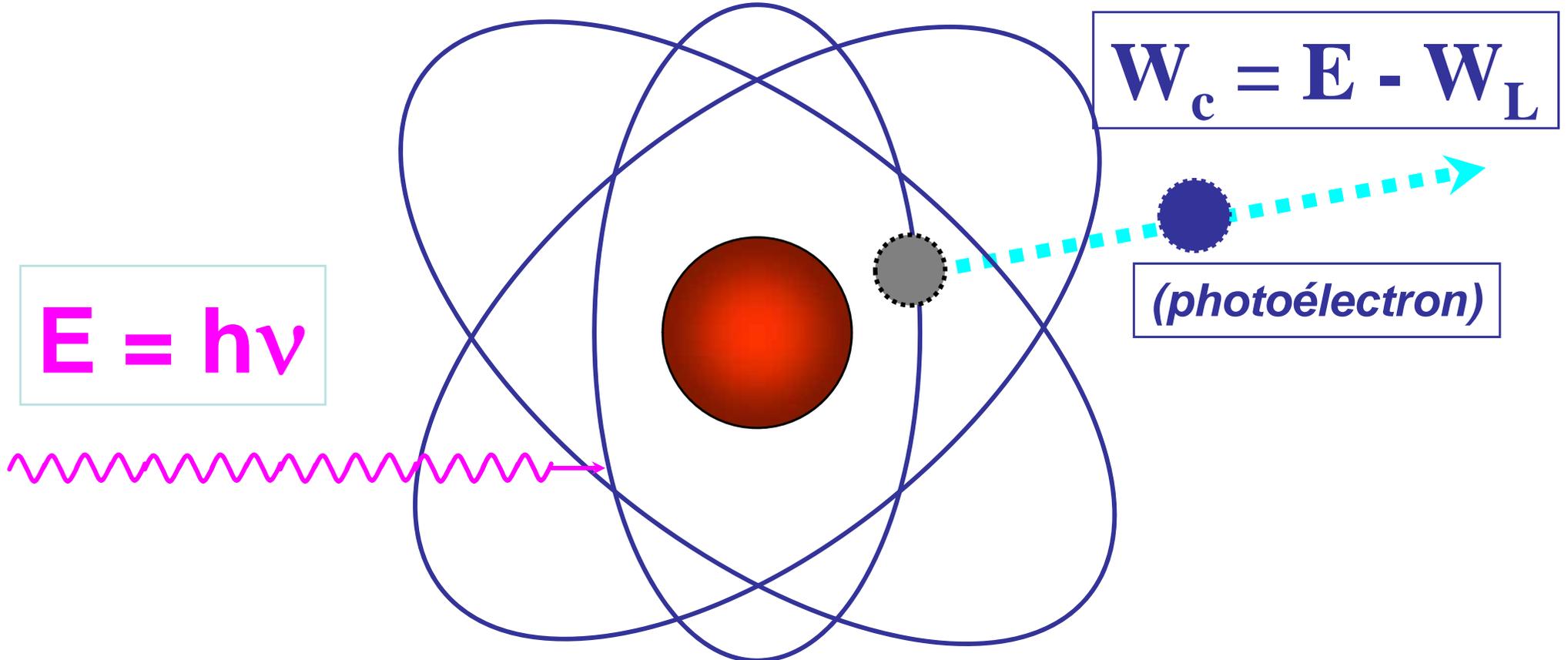
- **Indirectement ionisants : ne sont absorbés que s'ils interagissent avec un électron du milieu**
- **3 principaux types d'interactions :**
 - Effet photoélectrique
 - Effet Compton
 - *(création de paire)*

Interactions des rayonnements avec la matière

2) - Interactions des photons

2-1) les différentes interactions

Effet photoélectrique

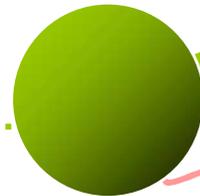


Effet Compton

« collision » ou « choc élastique »

Photon incident

$$E = h\nu$$



Énergie cinétique
 W_e



$$E = W_e + E_d$$

m_e masse de l'électron

$$m_e c^2 = 511 \text{ keV}$$

θ

Photon diffusé

$$E_d = E' = h\nu'$$



$$\mathbf{W}_e = \mathbf{E} \left(1 - \left(1 + \frac{\mathbf{E}}{mc^2} (1 - \cos \theta) \right)^{-1} \right)$$

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{E} - \mathbf{W}_e = \mathbf{E} \left(1 + \frac{\mathbf{E}}{mc^2} (1 - \cos \theta) \right)^{-1}$$

Choc tangentiel : $\theta = 0$

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{E}$$

$$\mathbf{W}_e = 0$$

choc frontal : $\theta = 180^\circ$

$$\mathbf{E}_d = \mathbf{E} \left(\frac{mc^2}{mc^2 + 2\mathbf{E}} \right)$$

$$\mathbf{W}_e = \mathbf{E} \left(\frac{2\mathbf{E}}{mc^2 + 2\mathbf{E}} \right)$$

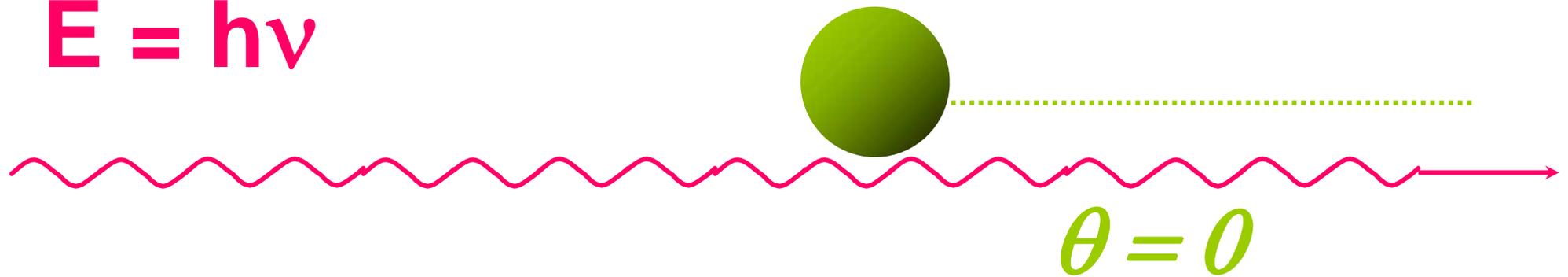
Effet Compton

« collision » ou « choc élastique »

Photon incident

$$E = h\nu$$

*Énergie
cinétique*
 $W_e = 0$



Choc tangentiel

Effet Compton

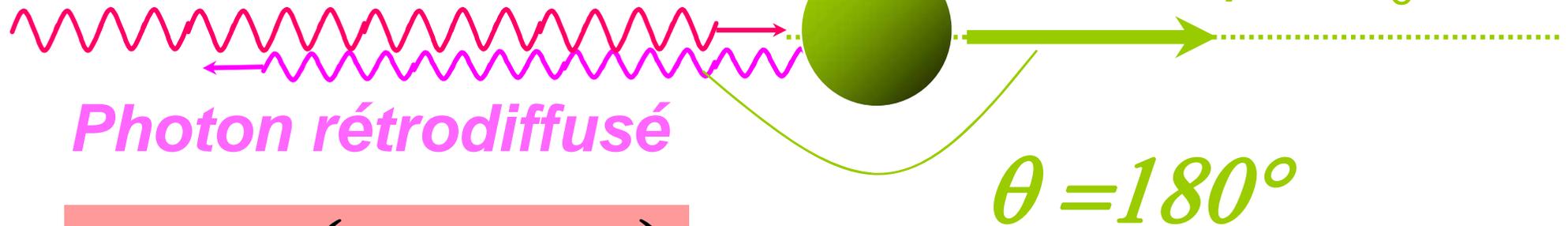
« collision » ou « choc élastique »

Photon incident

$$E = h\nu$$

$$W_e = E \left(\frac{2E}{mc^2 + 2E} \right)$$

Énergie
cinétique W_e max



$$E_d = E \left(\frac{mc^2}{mc^2 + 2E} \right)$$

Choc frontal

Effet Compton

$$\frac{W_e}{E_d} = \frac{\text{énergie absorbée}}{\text{énergie diffusée}} = \frac{E(1-\cos\theta)}{mc^2}$$

proportionnel à E

Ce qui compte pour les effets radiobiologiques, c'est l'énergie communiquée à l'électron, c'est-à-dire l'énergie absorbée, et qui varie donc

entre 0 et $E \left(\frac{2E}{mc^2 + 2E} \right)$

A Aurengo et T Peticlerc
Biophysique PCEM
Médecine Science
Flammarion

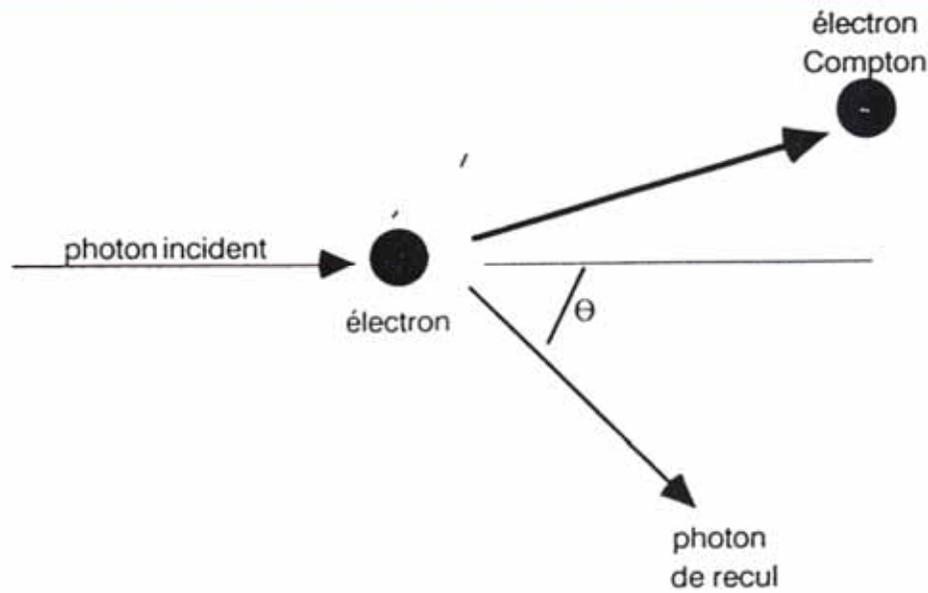
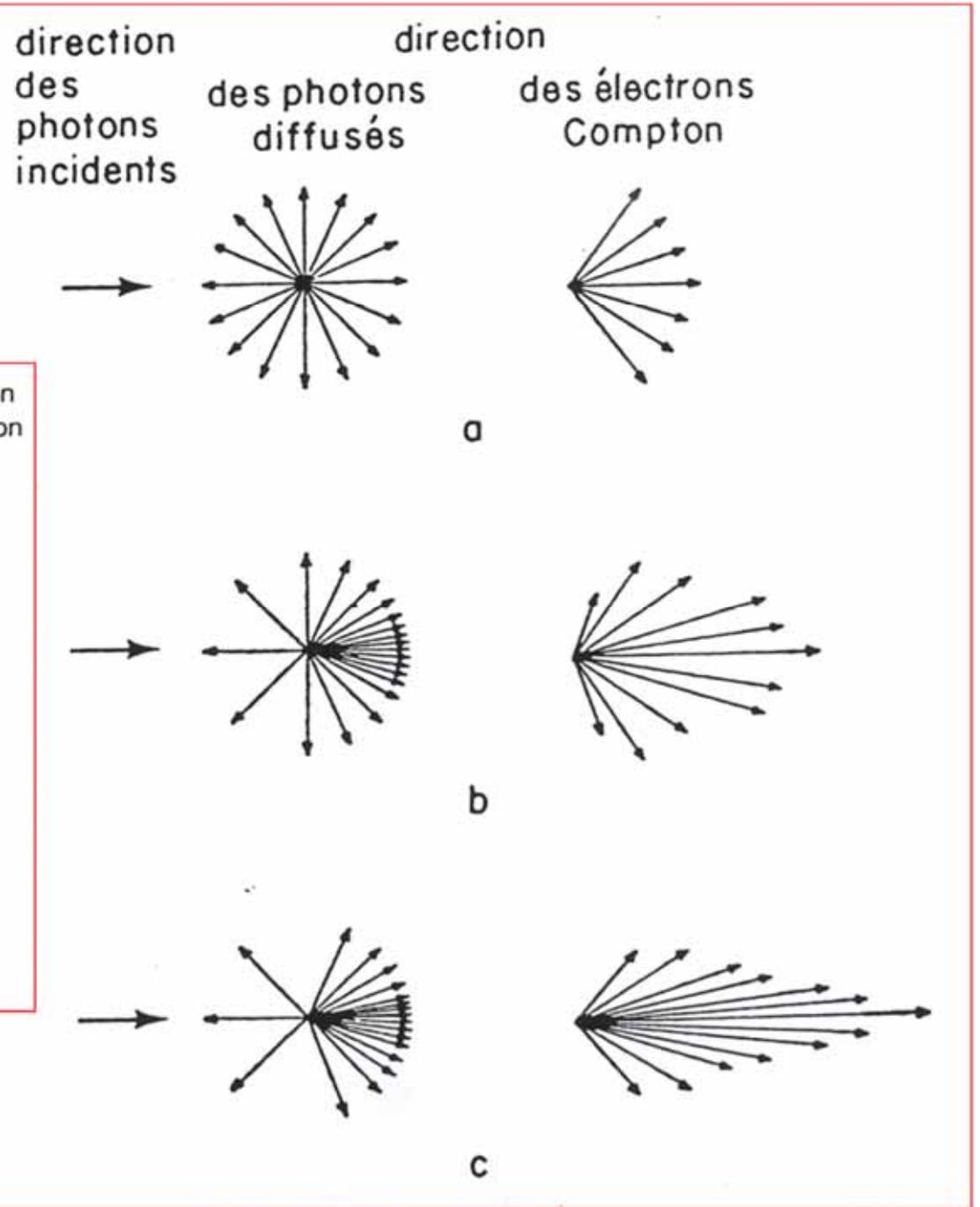


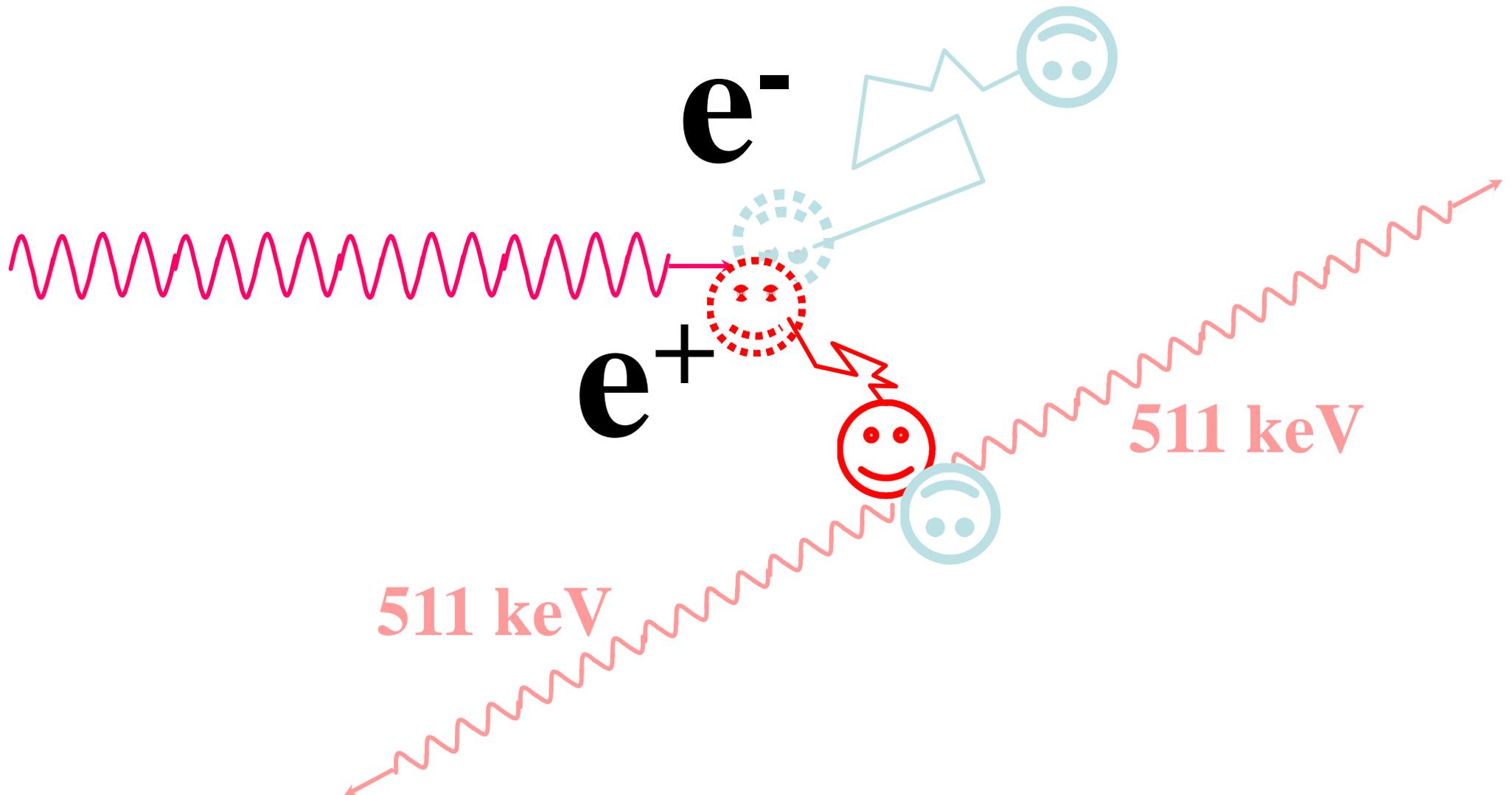
Figure 14-13 Effet Compton



Effet Compton

Plus l'énergie du photon incident est grande, plus la fraction d'énergie transférée à l'électron est grande.

Effet de création de paire (si $h\nu > 1,022 \text{ MeV}$)



Effet de création de paires

- «ce processus se produit pour des photons très énergétiques passant à proximité d'un noyau...

Le coefficient d'atténuation linéaire lié à la création de paires, noté π , croît approximativement comme le numéro atomique Z de la cible. Il est nul pour les valeurs de E inférieures à $2mc^2=1,022\text{MeV}$ et ne devient significatif que pour des valeurs très élevées de E .

Interactions des rayonnements avec la matière

- **2) Interactions des photons**
- *2-2) Loi d'atténuation*

Loi d'atténuation

- $dN = -\mu N dx$
- D'où : $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$

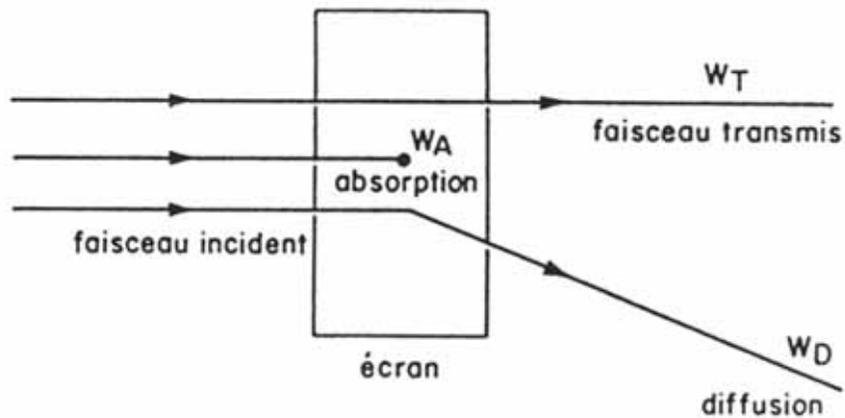


Figure 14-7 Atténuation d'un faisceau de photons

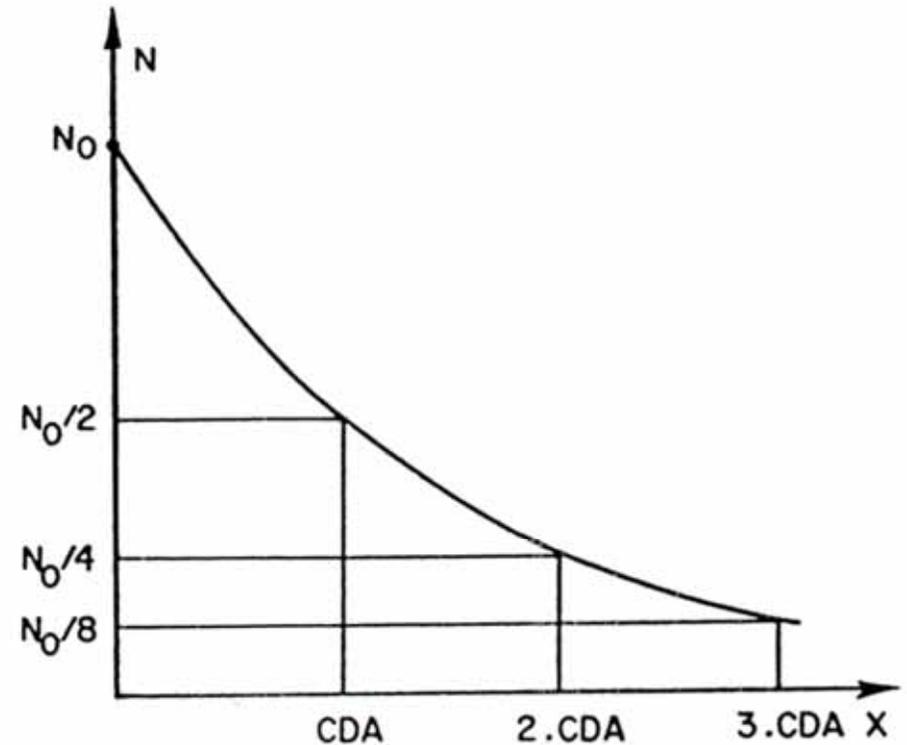


Figure 14-8 Variations du nombre de photons qui traversent un écran sans interaction en fonction de l'épaisseur x de l'écran

Le nombre de photons transmis décroît de manière exponentielle mais ne s'annule pas.

Coefficients d'atténuation

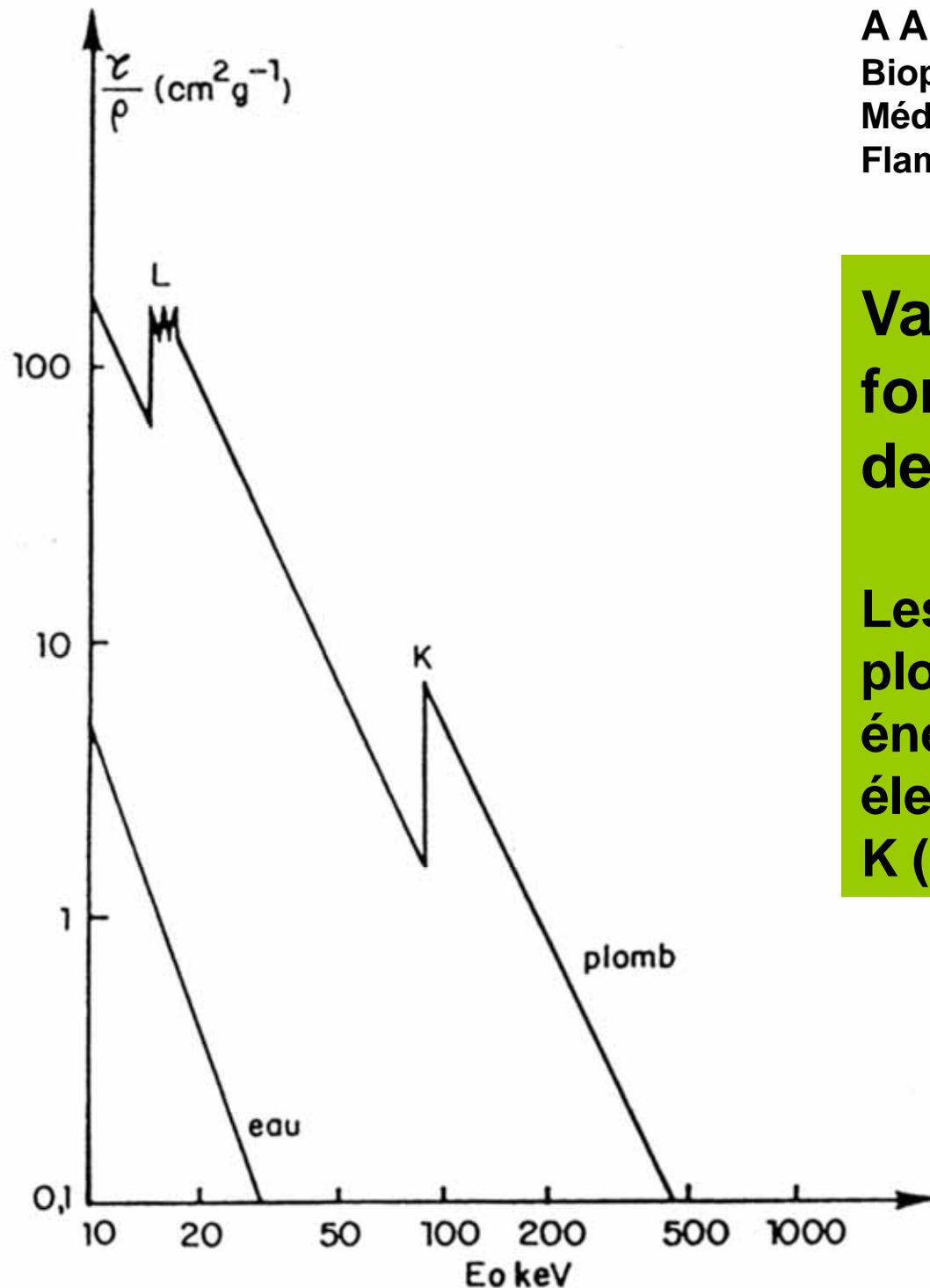
$$N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x}$$

- **Coefficient linéaire d'atténuation :**
 μ (cm⁻¹)
- **Coefficient massique d'atténuation :**
 μ/ρ (cm².g⁻¹)
- **Il faut distinguer :**
 - Énergie transférée et énergie absorbée (la différence correspond à l'énergie diffusée)
 - Atténuation et absorption

Coefficients d'atténuation effet photoélectrique

$$\frac{\tau}{\rho} \approx k \frac{Z^3}{E^3}$$

- **Photoélectron** : $W_c = E - W_L$
- **Réarrangements** : photons X de fluorescence (énergie perdue par diffusion) ou électron Auger (énergie absorbée)



Variations de τ/ρ en fonction de E dans le cas de l'eau et du plomb

Les discontinuités pour le plomb correspondent aux énergies de liaison des électrons des couches K (88 keV) et L (» 15 keV)

Coefficients d'atténuation

Effet Compton

- **Coefficient massique d'atténuation par effet Compton :**

- » indépendant du milieu (donc de Z)
- Décroît lentement quand l'énergie E du photon incident augmente (varie à peu près comme $1/E$)

$$\frac{\sigma}{\rho}$$

Importance relative des interactions des photons avec la matière

- $N(x) = N_0 \cdot e^{-\mu x} = N_0 \cdot e^{-\tau x} \cdot e^{-\sigma x} \cdot e^{-\pi x}$
- $\mu = \tau + \sigma + \pi \quad \mu/\rho = \tau/\rho + \sigma/\rho + \pi/\rho$
- **Dans l'eau (donc les milieux biologiques) :**
 - ⇒ **Effet prédominant**
 - Photoélectrique pour les photons < 50 keV
 - **COMPTON pour les photons de 50 keV à 20 MeV**
 - (création de paires au delà de 20 MeV)

FIGURE 3.16 Le coefficient d'atténuation massique pour des rayons gamma dans le plomb en fonction de l'énergie du rayonnement gamma. Les coefficients pour l'effet photoélectrique (μ_E/ρ), l'effet Compton (μ_C/ρ), et l'effet de paires (μ_P/ρ) sont indiqués séparément. Pour obtenir les coefficients en cm^{-1} , multiplier par la masse volumique du Pb = $11,35 \text{ g/cm}^3$. (Avec l'autorisation de Evans, 1955.)

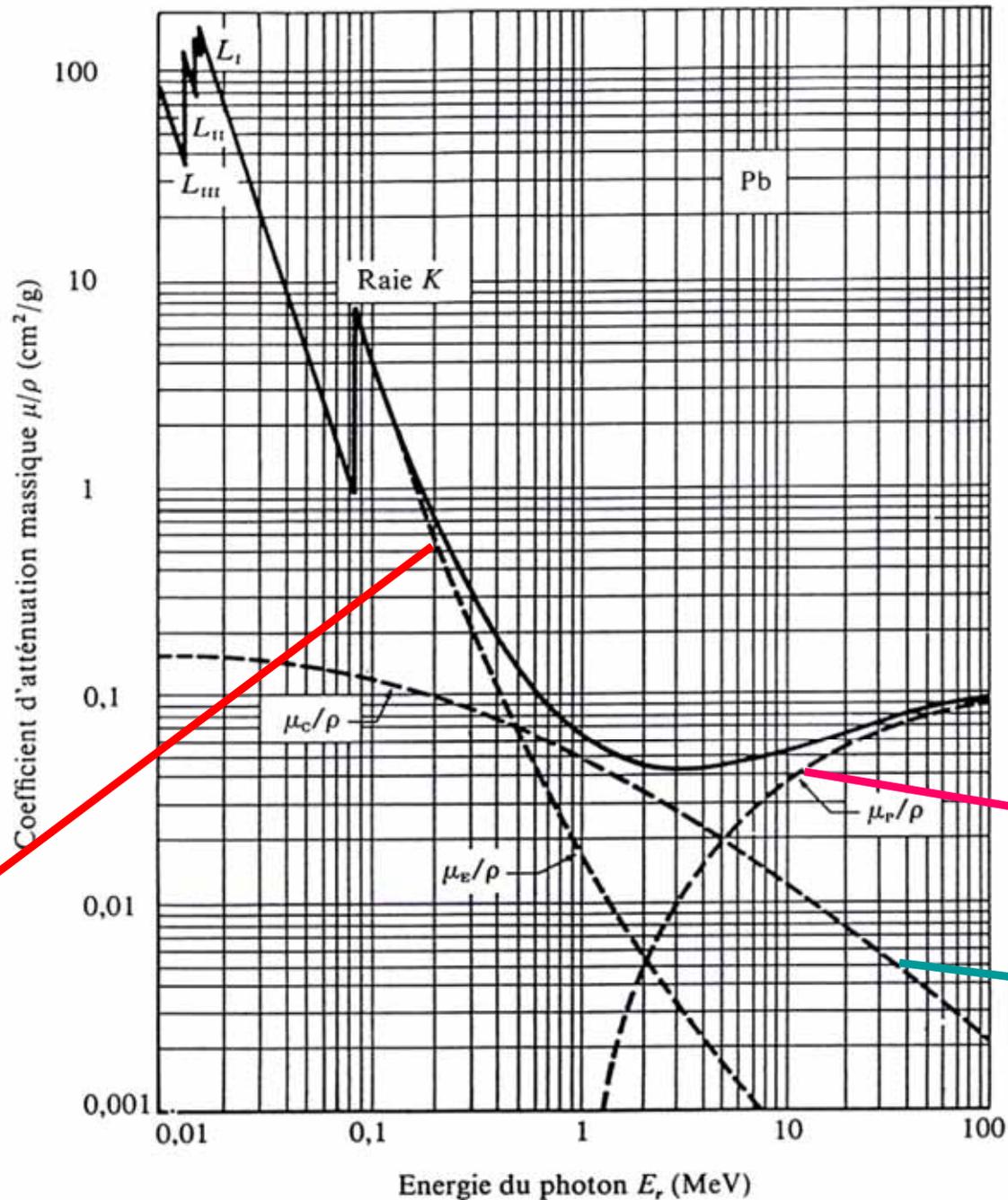


Photo-EI.

Création de paires.

Compton

FIGURE 3.15 Le coefficient d'atténuation massique pour des rayons gamma dans l'aluminium en fonction de l'énergie du rayonnement gamma. Les coefficients pour l'effet photoélectrique (μ_E/ρ), l'effet Compton (μ_C/ρ), et l'effet de paires (μ_P/ρ) sont indiqués séparément. Pour obtenir les coefficients en cm^{-1} , multiplier par la masse volumique de Al = $2,70 \text{ g/cm}^3$. (Avec l'autorisation de Evans, 1955.)

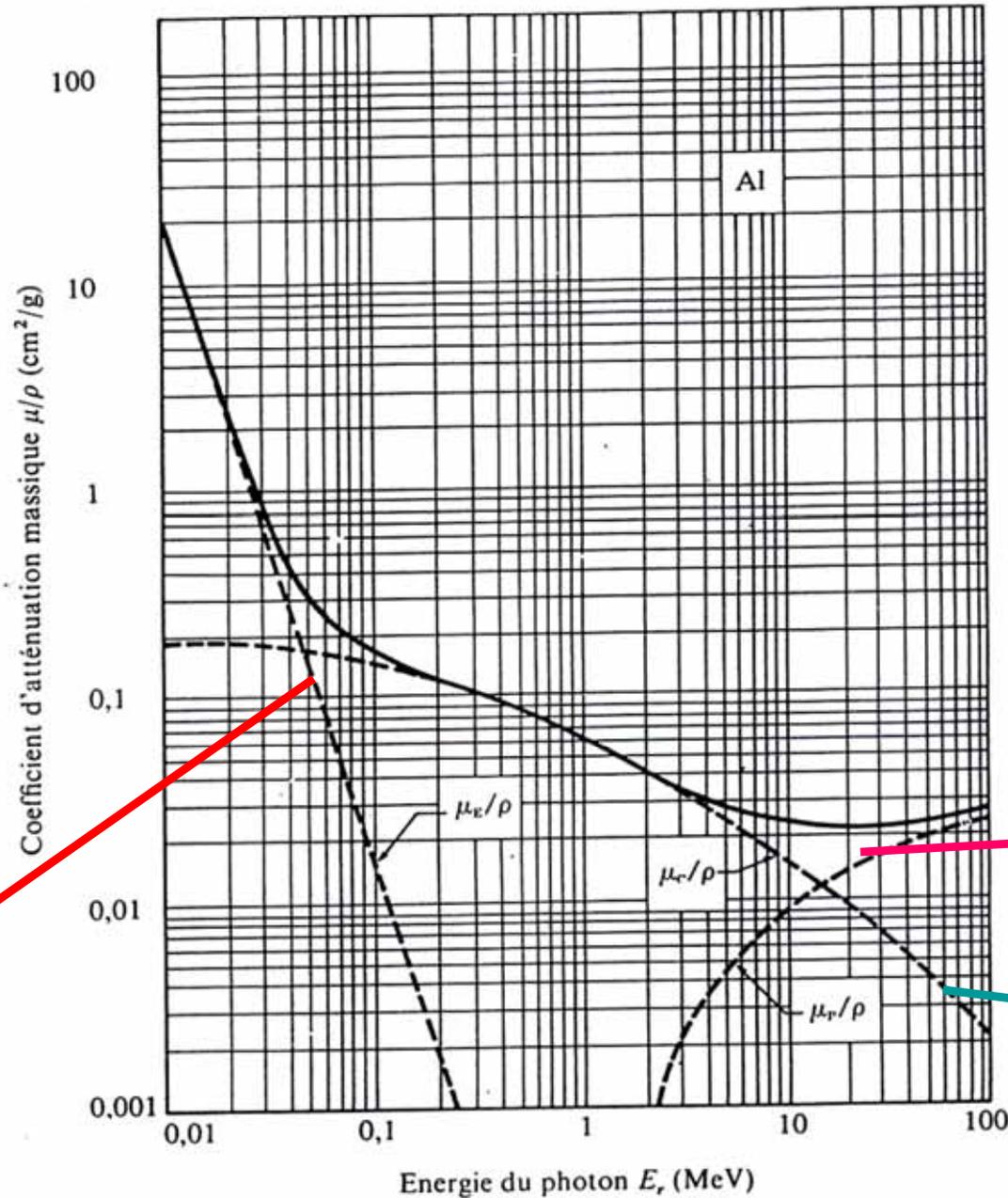
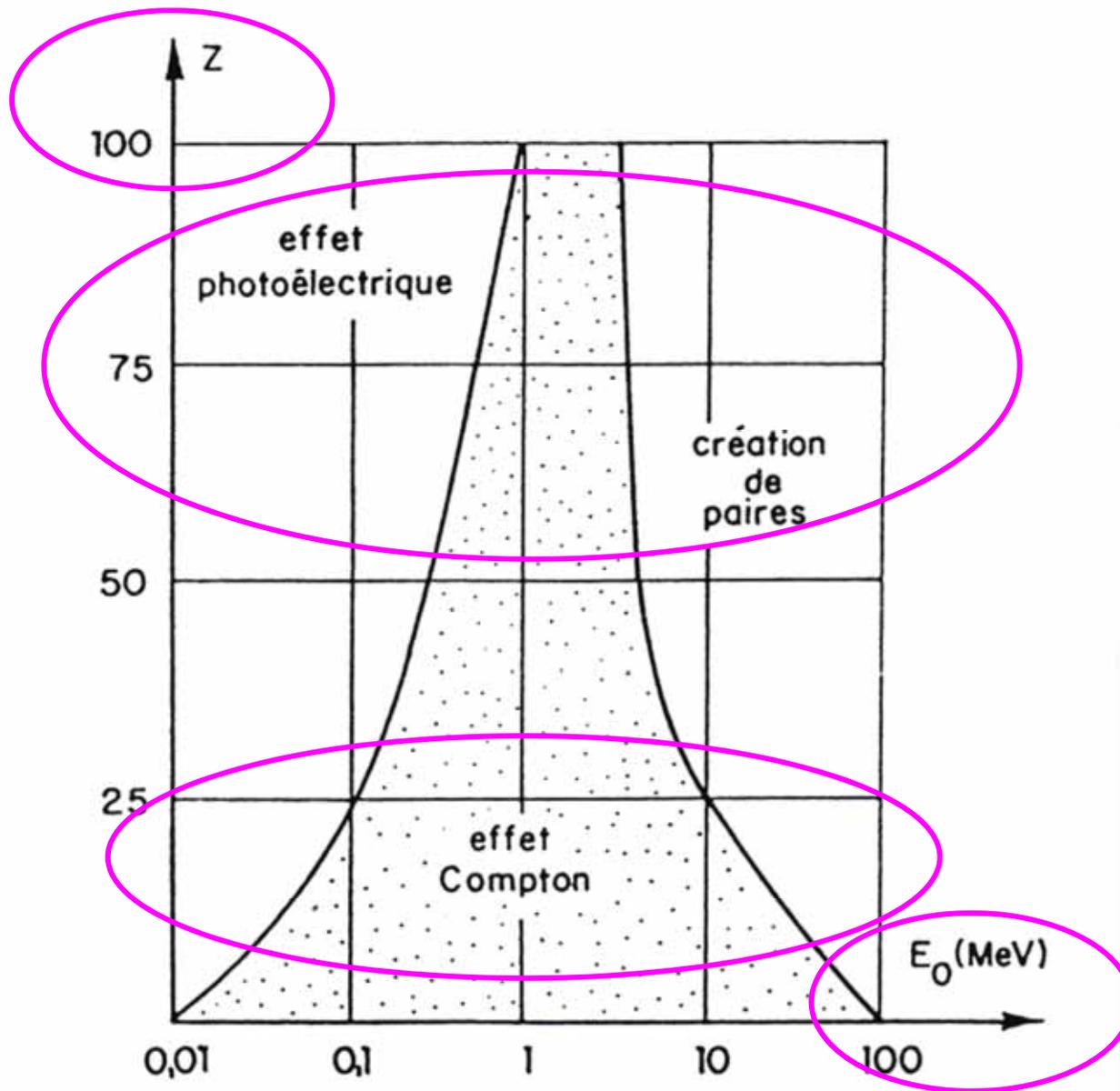


Photo-EI.

Création de paires.

Compton



A Aurengo et T Peticlerc
Biophysique PCEM
Médecine Science
Flammarion

Figure 14-15 Prédominance des trois effets élémentaires selon le numéro atomique Z de la cible et l'énergie E des photons incidents

Mentions légales

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'université Joseph Fourier de Grenoble.

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits en 1^{ère} année de Médecine ou de Pharmacie de l'Université Joseph Fourier de Grenoble, et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.