

Cours de Biophysique

2023/2024
2^{ème} semestre

Pr. Youssef Mir

Université Privée de la Santé et des Sciences d'Agadir
UPSSA

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Plan

II.1. INTERACTION DES PARTICULES CHARGÉES AVEC LA MATIÈRE

II.1.1. Le pouvoir de ralentissement

II.1.2. Notion de TEL et DLI

II.3. INTERACTION DES PHOTONS IONISANTS AVEC LA MATIÈRE

II.3.1. L'atténuation du faisceau primaire

II.3.2. Les diffusions élastiques

II.3.2. Les diffusions inélastiques

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des particules chargées avec la matière

Le pouvoir de ralentissement linéaire

Le pouvoir de ralentissement est le rythme de perte d'énergie de la particule par unité de longueur de trajectoire (MeV/m, MeV/cm ou KeV/ μ).

Le pouvoir de ralentissement est la somme des énergies déposées par **collision** et par **freinage**

$$S = S_{coll} + S_{rad}$$

Le pouvoir de ralentissement par collisions: collision entre la particule chargée et les électrons du matériau. Ces collisions engendrent des excitations et ionisations des électrons du matériau.

Le pouvoir de ralentissement radiatif généré par l'émission du rayonnement continu de freinage dû au champ électrique des noyaux du matériau cible.

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des particules chargées avec la matière

Le pouvoir de ralentissement (linéaire) par collision

Collision {

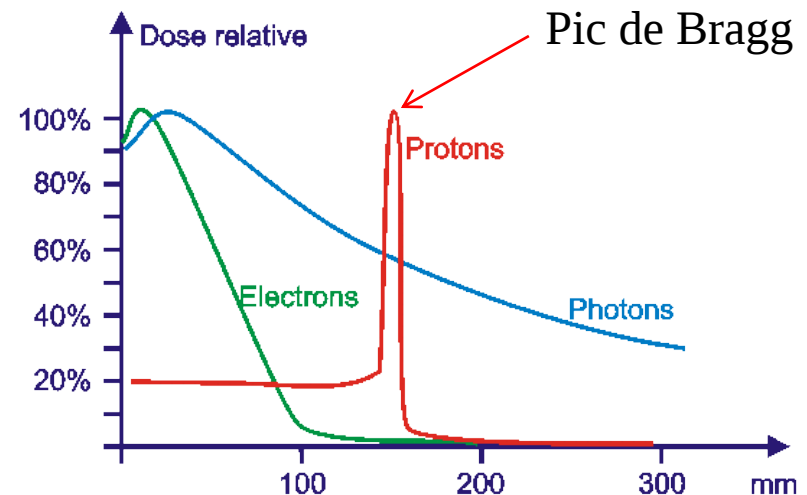
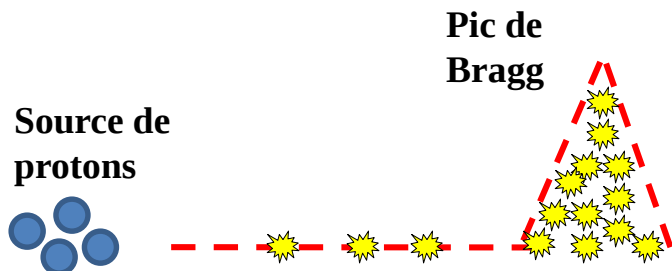
Particule:	z^2 : la charge
	v^2 : vitesse
Cible:	ρ : la densité
	Z : Numéro atomique

$$S_{coll} \text{ proportionnel à } \frac{z^2 \times \rho \times Z}{v^2}$$

Le pouvoir de ralentissement augmente quand la vitesse diminue

les interactions sont beaucoup plus nombreuses en fin de trajectoire

Dépôt d'énergie en profondeur sous forme de pic (pic de Bragg).



Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des particules chargées avec la matière

Le pouvoir de ralentissement radiatif

Freinage

Particule: T_0 = énergie cinétique

m = mass

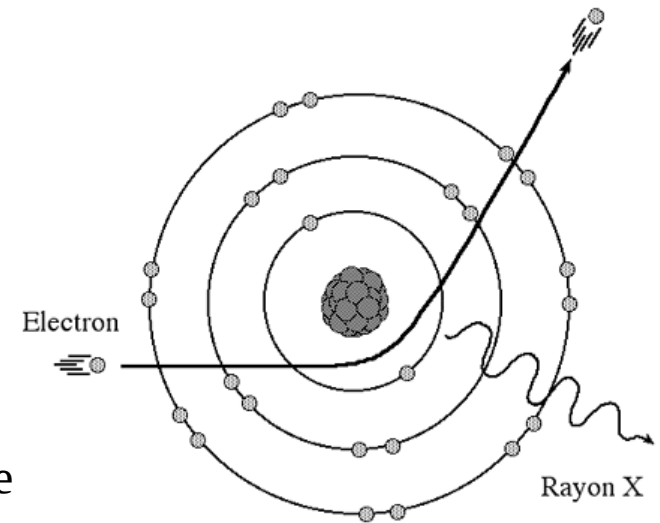
Cible: Z = numéro atomique de l'atome cible

N_a = le nombre d'atomes par unité de masse

ρ = la densité

$$S_{rad} \text{ proportionnel à } \frac{Z^2 \times N_a \times \rho \times T_0}{m^2}$$

Le processus radiatif correspond à l'émission par les électrons projectiles de photons (rayonnement de freinage) dus à la forte accélération des électrons lors de leur passage dans le champ électromagnétique intense des noyaux.

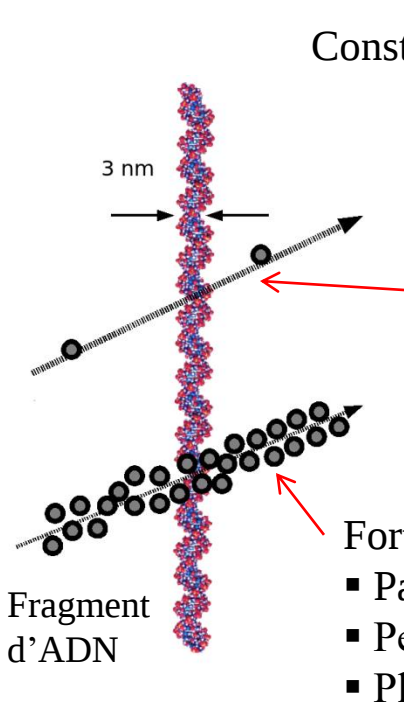


Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des particules chargées avec la matière

Notion de TEL

Le transfert d'énergie linéaire est l'énergie moyenne déposée localement dans un milieu par une particule chargée qui traverse une distance donnée.



Constante

Charge de la particule

Nombre d'atomes par unité de volume de la cible

Numéro atomique

Vitesse

$$TEL = K \times z^2 \times \frac{n}{v^2} \times Z$$

Faible TEL

- Photons ou neutrons
- Faible ionisation
- Interaction aléatoire

Forte TEL

- Particules chargées
- Perte d'énergie rapide
- Plus d'ionisation
- Interaction obligatoire

Fragment d'ADN

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des particules chargées avec la matière

Notion de densité linéique d'ionisation (DLI)

La densité linéique d'ionisation (DLI) d'une particule est le nombre de paires d'ions qu'elle crée par unité de longueur de trajectoire pour un matériau cible donné.

Pour un matériau donné (eau), on pourra créer en moyenne une paire d'ions (ion de charge positive et un autre de charge négative) par 34 eV déposés.

$$DLI(\text{ions}/\mu) = \frac{TEL(eV/\mu)}{W(eV)}$$

Avec W est l'énergie moyenne déposée par ionisation

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des photons ionisants avec la matière

Atténuation du faisceau primaire

Coefficients d'atténuation

Le coefficient d'atténuation linéaire est la probabilité d'interaction du faisceau primaire par unité d'épaisseur traversée.

$$\phi = \phi_0 \times e^{-\mu x}$$

x est l'épaisseur de matière traversée

μ est le coefficient d'atténuation linéaire

ϕ est le flux de photons (ou d'énergie) transmis à travers x sans interaction

ϕ_0 est le flux incident (à $x = 0$)

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des photons ionisants avec la matière

Atténuation du faisceau primaire

Couche de demi-atténuation (CDA)

La couche de demi-atténuation est l'épaisseur de matériel requis pour atténuer le faisceau primaire de moitié.

$$N = N_0 \times e^{-\mu x} \longrightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 \times e^{-\mu CDA} \longrightarrow \frac{1}{2} = e^{-\mu CDA} \longrightarrow \ln \frac{1}{2} = \ln(e^{-\mu CDA}) = -\mu CDA$$

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu} = \frac{0.693}{\mu} \quad (\text{m, cm ou mm})$$

$$CDA = \frac{\ln 2}{\mu / \rho} = \frac{0.693}{\mu / \rho} \quad (\text{g/cm}^2, \text{kg/m}^2)$$

À travers $n \times CDA$, le faisceau primaire sera atténué d'un facteur $1/2^n$

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

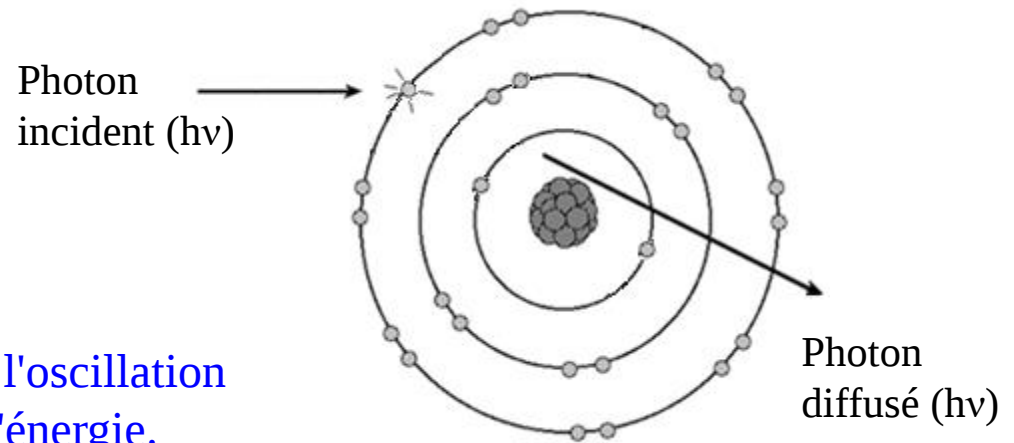
Interaction des photons ionisants avec la matière

Les diffusions élastiques

Diffusion Thomson

Diffusion élastique d'un photon par un électron libre du milieu

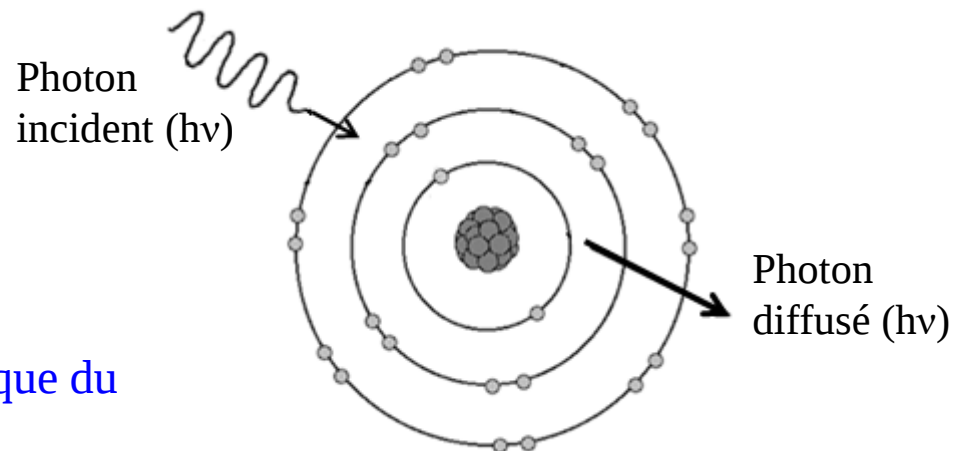
Interaction avec le photon (absorption), l'oscillation de l'électron et réémission intégrale de l'énergie.



Diffusion cohérente

Diffusion élastique d'un photon par l'ensemble des électrons d'un atome

Résonance entre l'onde électromagnétique du photon et les électrons atomiques.



Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des photons ionisants avec la matière

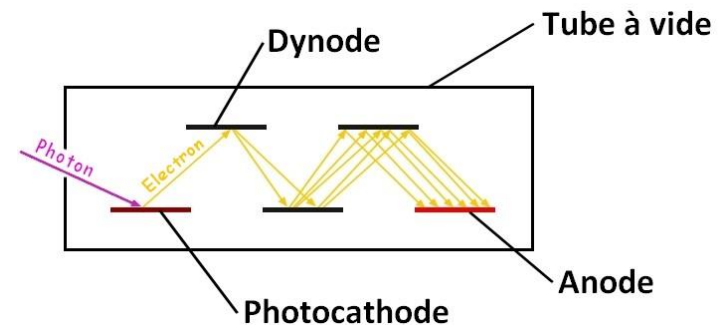
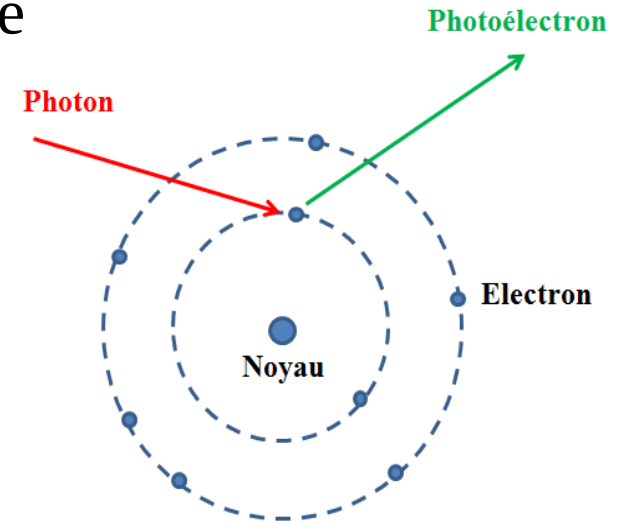
Les diffusions inélastiques

Effet photoélectrique

$$E_{\text{photoélectron}} = E_{\text{photon incident}} - E_{\text{liaison}}$$

L'effet photoélectrique n'a lieu que sur les électrons atomiques (liés). Cet effet crée une vacance dans une couche interne de l'atome, il y aura donc émission d'une cascade de R-x et/ou des électrons Auger correspondants

Exemple d'application en imagerie médicale : tube photomultiplicateur qui permet la détection des photons.



Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des photons ionisants avec la matière

Les diffusions inélastiques

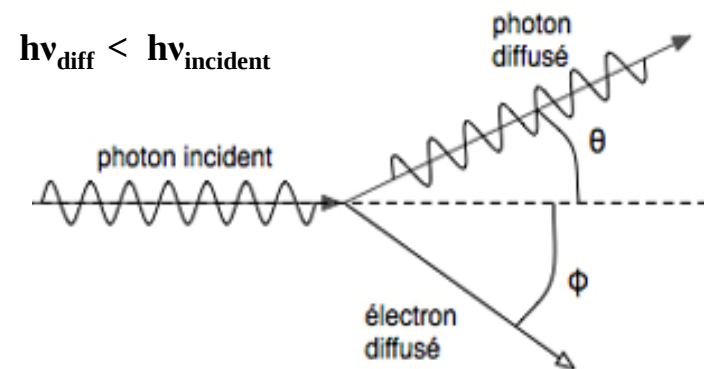
Effet Compton

$$E_{Compton} = E_{\text{photon incident}} - E_{\text{photon diffusé}}$$

$$\lambda_{diff} - \lambda_{incid} = \frac{(1 - \cos\theta) \times h}{m \times c}$$

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ j.s}$$

m est la masse de l'électron et c la vitesse de la lumière.



L'effet Compton est la diffusion inélastique du photon sur un électron libre ou quasi libre du milieu.

Effet prédominant dans les tissus organiques avec des rayons x de forte énergie ($> 100 \text{ keV}$). La probabilité dépend de la densité électronique du matériau.

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des photons ionisants avec la matière

Les diffusions inélastiques

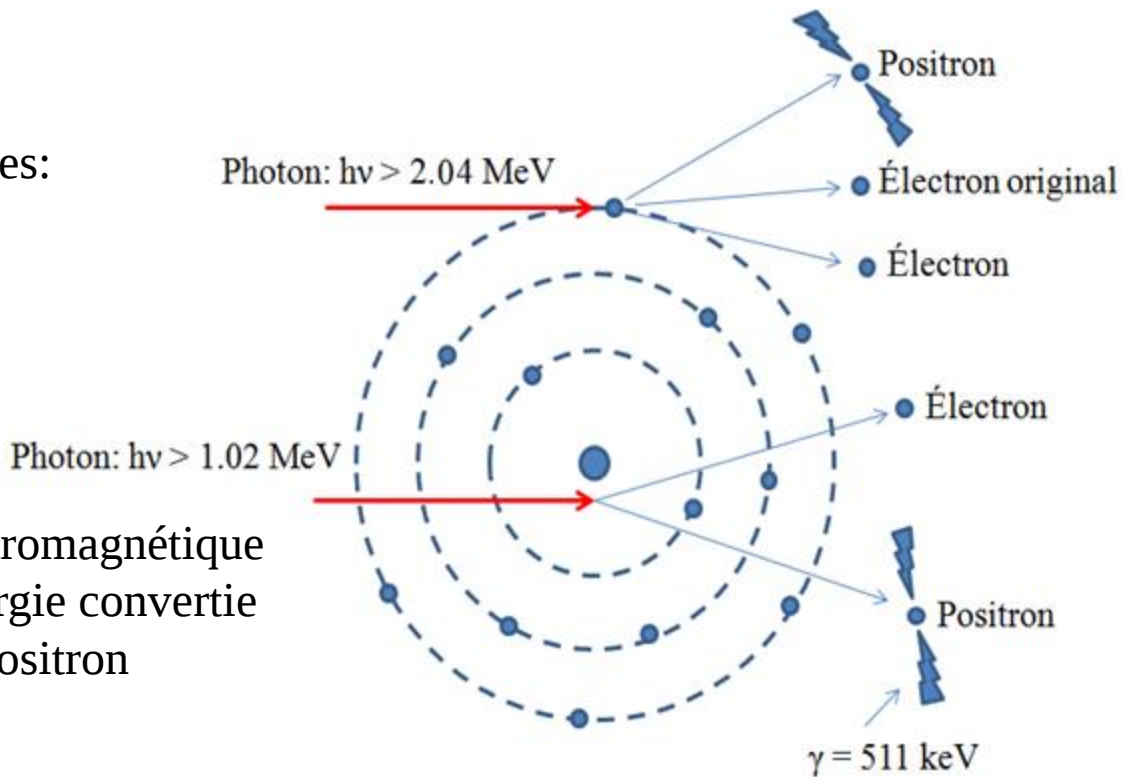
Création de paires

Création de triplets: trois particules:
l'électron et la paire produite se
partageront l'énergie disponible.

$$h\nu_{\min} = 4m_0c^2 = 2.044 \text{ MeV}$$

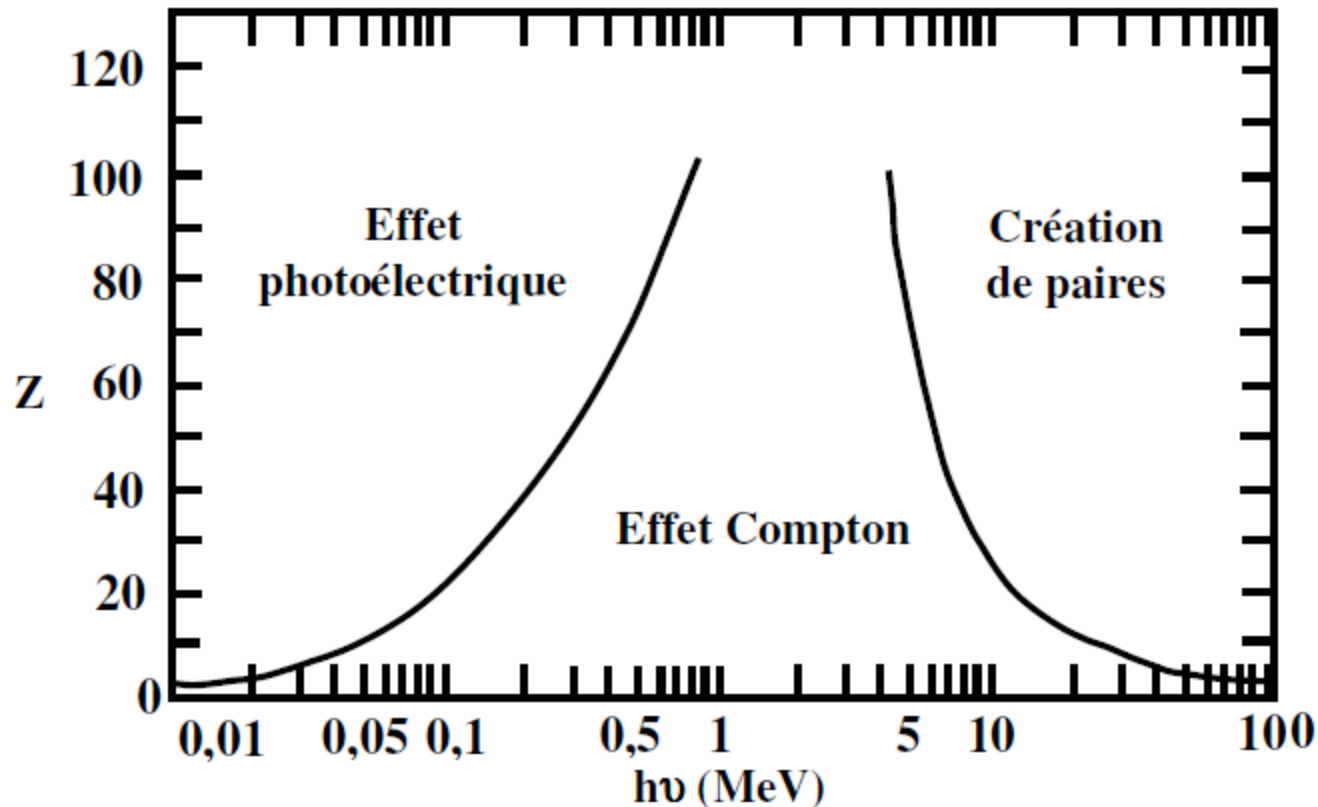
Un photon soumis au champ électromagnétique
d'un noyau atomique voit son énergie convertie
en une paire de masses électron-positron

$$h\nu_{\min} = 2m_0c^2 = 1.022 \text{ MeV}$$



Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des photons ionisants avec la matière



Les interactions dominantes entre rayonnement et matière en fonction du numéro atomique Z de l'atome et de l'énergie $h\nu$ du photon incident

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des neutrons avec la matière

- Les neutrons n'ont pas de charges, ils sont indirectement ionisants;
- Les interactions se font entre les neutrons et les noyaux, alors qu'elles sont négligeables avec les électrons;
- Les Neutrons sont arbitrairement divisés en deux catégories "**lents**" (< 0.025 eV, 2190 m/s) ou "**rapides**" (énergies de 1 MeV et plus, 13170 km/s);
- Tous les neutrons sont "nés rapides" puis ils perdent de l'énergie en interagissant avec la matière;
- Le ralentissement est d'autant plus efficace que le noyau a une masse proche de celle du neutron : (noyaux d'Hydrogène)
- Les principaux mécanismes d'interaction des neutrons **sont la diffusion élastique et inélastique et la capture par le noyau** (suivie par l'émission d'un photon ou d'une autre particule chargée).

Chapitre II : Interaction des rayonnements avec la matière

Interaction des neutrons avec la matière

Section efficace

La section efficace est la somme des différentes sections efficaces pour tous les processus qui peuvent se produire avec un atome donné. L'unité est le m²

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{capture}} + \sigma_{\text{fission}} + \sigma_{\text{diffusion}}$$

Atténuation d'un neutron par un absorbeur

$$I = I_0 \times e^{-n_v \times \sigma_{\text{tot}} \times x}$$

où

I = neutrons qui passent à travers l'absorbeur

I_0 = neutrons incidents dans l'absorbeur

$n_v \sigma_{\text{total}}$ = section efficace macroscopique totale

x = épaisseur de l'absorbeur