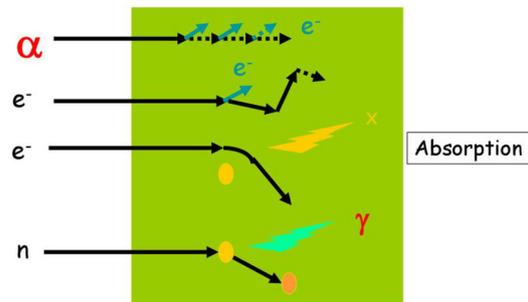


Chapitre II : Interaction rayonnements ionisants particulaires (alpha, électrons, protons, neutrons) - matière

Cours Radiobiologie Radioprotection



Dr Lezzar

Table des matières



I - Propriétés générales	3
1. Pouvoir d'arrêt	3
2. Parcours dans la matière	4
3. Ionisation spécifique, totale et parcours moyen	5
4. Transfert linéique d'énergie (TLE)	5
II - Cas des particule légère beta	6
1. Le pouvoir d'arrêt par freinage	7
2. Le pouvoir d'arrêt par collision	7
III - Cas des particule lourd chargées (alpha)	9
IV - Cas des neutrons avec la matière	11

Propriétés générales

I

Les rayonnements traversant la matière interagissent avec les atomes du milieu et *leur cèdent leur énergie cinétique* en provoquant des excitations (si l'énergie est faible) et/ou des ionisation (si l'énergie est supérieur à l'énergie de liaison des électrons), il existe deux grande types d'interaction qui dépendent de la nature du rayonnement

- les interaction coulombienne ou obligatoire : une particule chargée lourde (α , protons) ou légère (β^+ , β^-) interagit avec les atomes du milieu même sans qu'il y ait collision entre eux. les forces électromagnétique exercées par le nuage électronique ou le noyau ont un effet attracteur ou répulsif.
- l'interaction stochastique ou aléatoire : une particule interagit avec la matière soit en passant très près de la cible (interaction à courte portée), soit en entrant en collision avec l'électron périphérique ou avec le noyau.

1. Pouvoir d'arrêt

Définition

Par définition le pouvoir d'arrêt (ou de ralentissement) d'un matériau pour une particule donnée d'énergie E_c : est la perte d'énergie ΔE subie par la particule dans ce matériau par unité de longueur Δx (généralement le MeV/cm) : $\sigma \text{ (MeV/cm)} = dE / dx$.

Complément

On exprime couramment le pouvoir d'arrêt par unité de masse volumique : $\sigma_m = \sigma / \rho$

ou ρ est la masse volumique du matériau (en g.cm^{-3}), et σ est alors exprimé en $\text{MeV.g}^{-1}.\text{cm}^2$

Remarque : Pic de bragg en médecine

Le pouvoir d'arrêt est une propriété du matériau qui croit avec la décélération de la particule lorsqu'elle est chargée. On représente son évolution par une courbe de bragg. Peu avant la fin du parcours, on observe une perte d'énergie maximum appelée pic de bragg phénomène primordial en radiothérapie

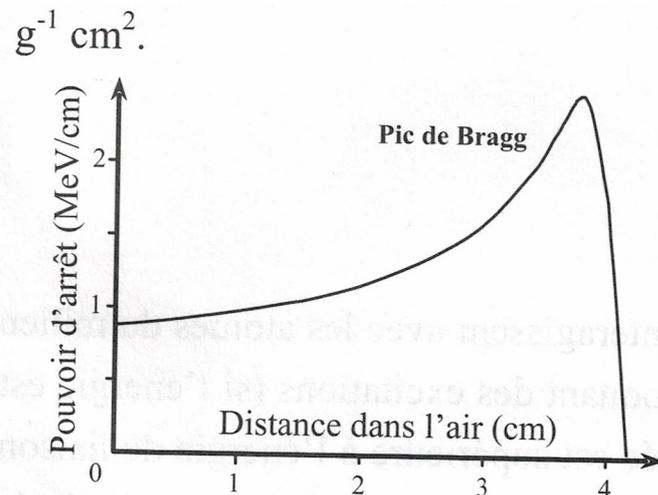


Figure 1

2. Parcours dans la matière

🔑 Définition

On appelle parcours moyen la distance Δx effectuée par le rayonnement dans la matière jusqu'à perte complet de son énergie cinétique. on peut donc définir la distance totale $\Delta x = E_c / \sigma$

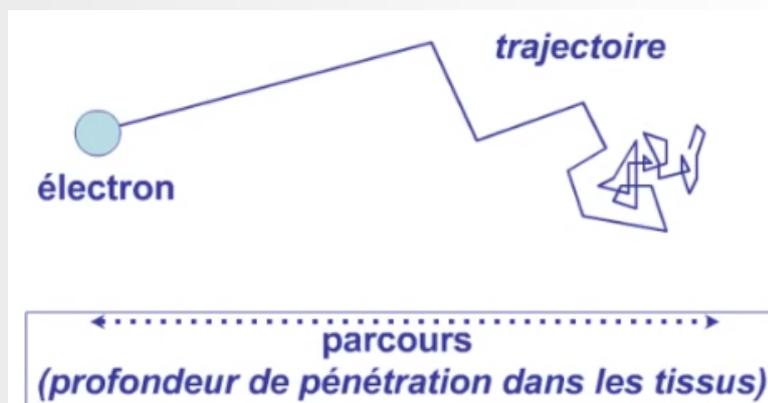
E_c est l'énergie cinétique initial.

📌 Rappel : Pouvoir d'arrêt totale

Pour une particule d'énergie cinétique E_c , la perte de toutes l'énergie nous donne un pouvoir d'arrêt $\sigma = E_c / \Delta x$

⚠️ Attention

il faut pas confondre parcours et trajectoire : la trajectoire c'est la distance totale qui est formé par les lignes briser, mais la parcours (profondeur) c'est la distance entre le point d'entrée et le point finale atteint par la particule dans la matière.



Différence entre trajectoire et parcours

3. Ionisation spécifique, totale et parcours moyen

L'ionisation produite par une particule chargée traversant un matériau est proportionnelle à l'énergie E_c de cette particule. on appelle ionisation spécifique I_s (ionisation/cm) (densité d'ionisation linéaire DIL) le nombre de paires d'ions créés par unité de longueur parcourue par une partie de l'énergie E_c .

L'ionisation totale I_t (ionisation) le nombre total de paires d'ions créés par cette même particule le long de son

parcours totale x_0 : $I_s = dI / dx$ et $I_t = \int_0^{x_0} I_s dx$

Le parcours moyen Δx d'une particule s'écrit $\Delta x = I_t / I_s$

Complément : Énergie moyenne d'ionisation

L'énergie moyenne d'ionisation est définie comme l'énergie nécessaire pour créer une paire d'ions : $\omega = E_c / I_t$

Elle correspond d'une part à l'énergie nécessaire à l'ionisation elle même , d'autre part à l'énergie cédée par excitation, soit : $\omega = \omega_i + \omega_e$

4. Transfert linéique d'énergie (TLE)

Définition

le TLE est la quantité d'énergie perdue par unité de longueur par un rayonnement traversant un milieu matériel :

$$TLE = \frac{dE}{dx} = K * \left(\frac{z^2}{v^2}\right) * (n * Z)$$

Avec : K : constante de proportionnalité qui dépend des unités employées, s'il est en (keV/ μ m) alors le TLE est en (keV/ μ m)

z : la charge de la particule : pour β (z = 1) et (z = 2) pour l'alpha

v : la vitesse de l'électron.

Z : le numéro atomique de la matière traversé.

n : nombre d'atomes par unité de volume de la matière traversée.

dE et dx représente une partie de l'énergie et une partie du parcours respectivement, Donc pour une particule qui transfère la totalité de son énergie durant son parcours dans la matière le TLE devient : $TLE = E_c / \Delta x$

On peut écrire le transfert linéique d'énergie en fonction de la densité d'ionisation linéique :

$$TLE = \omega * I_s = \omega * DIL$$

Le TLE est proportionnel à la masse volumique du matériau traversé, ainsi pour un rayonnement donné

traversant deux matériaux A et B différents, on a : $\frac{(TLE)_A}{\sigma_A} = \frac{(TLE)_B}{\sigma_B}$

Cas des particule légère beta

II

Ces particules bien plus légères que les particules α sont d'avantage déviées pendant leur parcours dans la matière. la perte progressive d'énergie se fait de deux façons : soit par collision avec le cortège électronique, soit par freinage avec émission d'un rayonnement

⚠ Attention : cas des bêta+

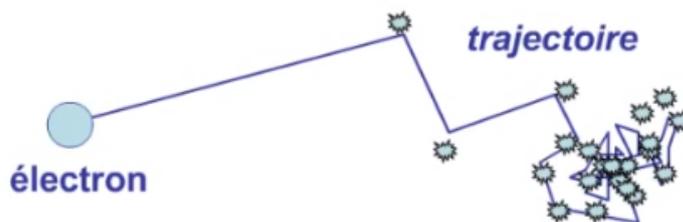
Le positon a le même type et caractéristiques d'interaction avec la matière que l'électron. La principale différence entre électron et positron est la *réaction d'annihilation* pour ce dernier.

Quand le positron incident est au repos, c'est-à-dire quand il a perdu la totalité de son énergie initiale. Il s'associe à un électron et ces 2 particules se dématérialisent, c'est ce que l'on appelle l'annihilation.

Cependant, les lois de la conservation de l'énergie montrent, qu'il résulte de ce phénomène d'annihilation 2 rayonnements gamma (2 photons γ) émis dans des directions opposées et chacun d'une énergie de 511 keV.

🔍 Remarque : Trajectoire et parcours des particules légères

La trajectoire d'un électron ou particule β^- dans un milieu donné peut être très sinueuse, puisque les électrons peuvent subir des déviations de 180° dans le cas de la rétrodiffusion. En conséquence, la profondeur (parcours) maximale atteinte par un électron dans la direction incidente initiale est inférieure à la longueur de sa trajectoire.



Trajectoire des particules bêta dans la matière

Dans un milieu matériel, la profondeur de pénétration maximale est estimée par :

$$P_{max}(cm) = \frac{0,215}{\rho(g.cm^{-3})} * E^{\frac{5}{3}}(MeV)$$

Dans l'eau , la longueur totale de la trajectoire en cm est estimé grâce a la formule approchée : $l = E_c(MeV) / 2$

Dans un milieu matériel de masse volumique ρ , la longueur totale de la trajectoire de pénétration est approchée par la formule $l = E_c(MeV) / (2 * \rho)$

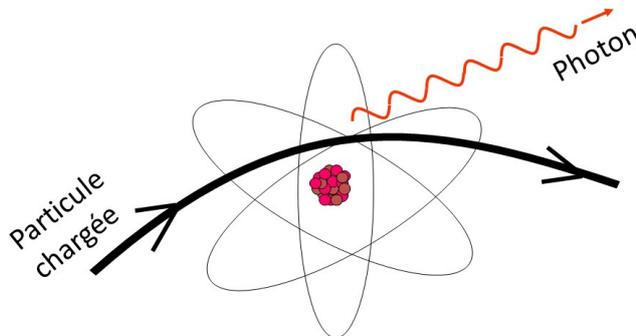
Le pouvoir d'arrêt totale des particule légères est la somme du pouvoir d'arrêt par collision S_c et le pouvoir d'arrêt par freinage S_f .

1. Le pouvoir d'arrêt par freinage

Plus rarement les électrons interagissent avec les noyaux des atomes constituant le milieu traversé. Ceci entraîne une perte d'énergie cinétique, l'électron incident est dévié dans le champ coulombien de l'atome cible et ce changement de trajectoire s'accompagne de l'émission d'un rayonnement X appelé rayonnement de freinage $E_x = E_0 - E_d = \Delta E$

E_d énergie de la particule après déviation et E_0 énergie initiale (cédée au milieu) de la particule avant déviation (avant le freinage par le noyau).

Ce phénomène ne concerne que les électrons de très fortes énergies et qui de plus traversent un milieu constitué d'atomes lourds, c-à-d un milieu dense



Interaction de la particule bêta avec le noyau (freinage)

On définit le pouvoir d'arrêt par freinage $S_f = \Delta E_f / \Delta x_f$

avec ΔE est l'énergie perdue par freinage

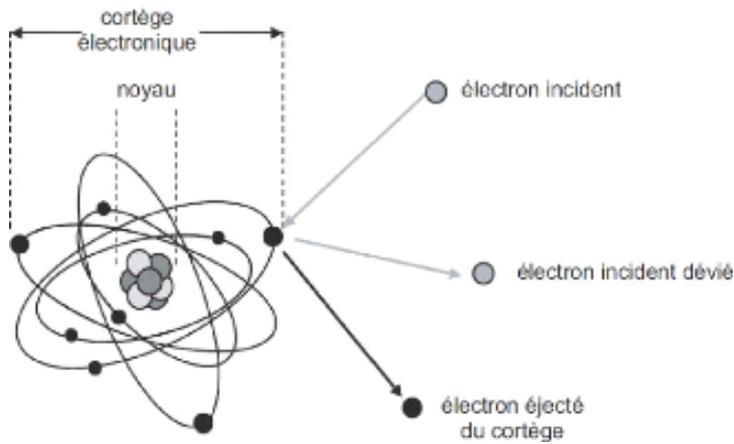
2. Le pouvoir d'arrêt par collision

L'énergie cinétique cédée ΔE par la particule incidente est transférée à un électron d'énergie de liaison E_l de l'atome cible.

- Chocs très éloignés ou tangentiels : l'électron e2 se trouve à une distance r de l'électron e1. La particule cible e2 est projetée sous un angle $\phi = \pi/2$ alors que la trajectoire de e1 se trouve très peu à peu modifiée. Le transfert d'énergie est faible.
- Chocs frontaux : l'électron e1 rencontre l'électron e2. L'électron incident e1 transfère une partie de son énergie ou toute son énergie cinétique à l'électron e2. Le transfert d'énergie est donc très important.

1. Si l'énergie transférée par l'électron incident est supérieure à l'énergie de liaison ($\Delta E > E_l$) d'un électron de l'atome cible, celui-ci est expulsé du cortège avec une énergie cinétique et il y a ionisation de l'atome $\Delta E = E_c + E_{liaison}$. Les électrons atomiques concernés sont les électrons fortement liés de la couche K. L'ionisation est suivie d'un réarrangement du cortège électronique avec émission de fluorescence X

2. Si l'énergie transférée par l'électron incident est exactement égale à la différence entre les énergies de liaison de 2 couches électroniques de l'atome cible. Un électron de cet atome saute sur une couche supérieure et il y a excitation. $\Delta E = E_n - E_{n+1}$. Les électrons atomiques concernés sont les électrons faiblement liés des couches externes.



Interaction des particules avec l'électron (collision)

On définit le pouvoir d'arrêt par freinage $Sc = \Delta E_c / \Delta x_c$

avec ΔE est l'énergie perdue par collision.

Remarque

La perte d'énergie par collision est en pratique le mécanisme le plus important car le ralentissement des électrons dans la matière résulte essentiellement de la collision.

Donc TLE est due à la perte par collision

Cas des particule lourd chargées (alpha)

III

Elles interagissent principalement avec les électrons des atomes cibles, engendrant une ionisation ou une excitation (les électrons mis en mouvement sont appelés rayons δ).

Les interactions avec les noyaux sont secondaires.

Les particules α ont une masse (7500 fois) plus importante que celle des électrons. En conséquence, étant beaucoup plus lourdes, elles ne sont pas sujettes au rayonnement de freinage.

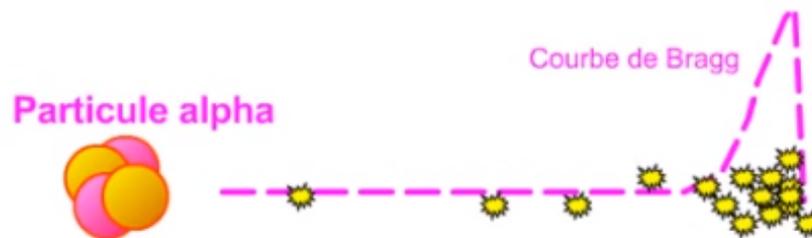
Remarque

Les processus de ralentissement des particules α sont identiques à ceux des particules β . Cependant, leur charge électrique et leur masse sont plus élevées. En conséquence, les particules α ont une trajectoire presque rectiligne et très courte.

Ainsi, on peut considérer que *le parcours et la profondeur de pénétration sont identiques*.

Elles sont arrêtées par quelques centimètres d'air ou une feuille de papier.

Par ailleurs, les particules α ont une énergie courante élevée (quelques MeV).



Trajectoire des particules alpha dans la matière

Dans l'air, la profondeur de pénétration maximale est estimée par : $P_{air}(cm) = 0,331 * E^{\frac{3}{2}}$

dans un milieu matériel, de masse volumique : $P_{matériau} = \frac{P_{air} * \rho_{air}}{\rho_{matériau}}$

La trajectoire totale de la particule dans le milieu est estimé par $l = Ec (MeV)/1500$

Fondamental

L'ionisation spécifique I_s est très importante, elle croit rapidement en fin de parcours.

Pour un matériau et une énergie cinétique initiale E_c données, la distance de freinage des particules α est appelé parcours x_0 , puisqu'elles ont un parcours très court. Elles sont caractérisées par un *TLE beaucoup plus élevé que celui des particules β* (entre 200 et 500 fois plus élevées).

Cas des neutrons avec la matière

IV

les neutrons n'interagissent que de façon négligeable avec les électrons du milieu traversé. En revanche, ils entrent en collision avec les noyaux.

Remarque

Le neutron est globalement neutre, il ne produit pas directement d'ionisations en traversant la matière. En revanche, il peut avoir de nombreuses réactions avec les noyaux des atomes, et comme ces réactions produisent chacune des rayonnements ionisants, on considère les neutrons comme un rayonnement ionisant.

Le choc est élastique pour les neutrons de très grande énergie : le neutron est dévié et cède une partie de son énergie au noyau.

à la limite, le neutron est stoppé net et transmet toute son énergie au noyau → diffusion inélastique

Un neutron de faible énergie cinétique est absorbé par le noyau. Le noyau ainsi formé est instable et se retrouve à l'état excité ; sa désexcitation donne lieu à l'émission d'un rayon γ . Le rayonnement γ émis est ionisant, cette réaction est très utilisée pour la production de radioéléments artificiels.

Complément

Les ionisations créées par les neutrons rapides auront des $DLI (I_s)$ très élevées.

Avec une grande densité d'ionisation il pose des problèmes en radioprotection, pour les arrêter on utilise des milieux en paraffine