

Chapitre 5:

Interaction des neutrons avec la matière

Contenu

- Introduction
- Mécanismes d'interaction
- Sections efficaces d'interaction
- Modération et parcours des neutrons
- Pour plus de détails → voir cours de Physique des Réacteurs Nucléaires

Introduction

- Les neutrons sont des particules neutres → pas d'interactions coulombiennes comme les particules chargées
- Les neutrons ne vont interagir qu'avec les noyaux via les forces nucléaires → les sections efficaces sont faibles (comparées à celles d'un proton de même masse par exemple) → les neutrons sont des particules très pénétrantes
- Les neutrons ne sont pas des particule directement ionisantes → ils peuvent produire des particules secondaires chargées qui sont directement ionisantes → les neutrons sont des particules indirectement ionisantes comme les photons
- Dans beaucoup d'applications → les neutrons sont traités suivant le même formalisme que les photons
- Remarque → le neutron possède un moment dipolaire magnétique négatif → sensible à des champs magnétiques intenses

Classification des neutrons

- Neutrons de haute énergie: $E > 20 \text{ MeV}$
- Neutrons rapides: $10 \text{ keV} < E < 1 \text{ MeV}$
- Neutrons épithermiques: $1 \text{ eV} < E < 10 \text{ keV}$
- Neutrons lents: $0.025 \text{ eV} < E < 1 \text{ eV}$
- Neutrons thermiques: $E \approx 0.025 \text{ eV}$
- Neutrons froids: $E < 0.025 \text{ eV}$

Attention: Différentes classifications existent !

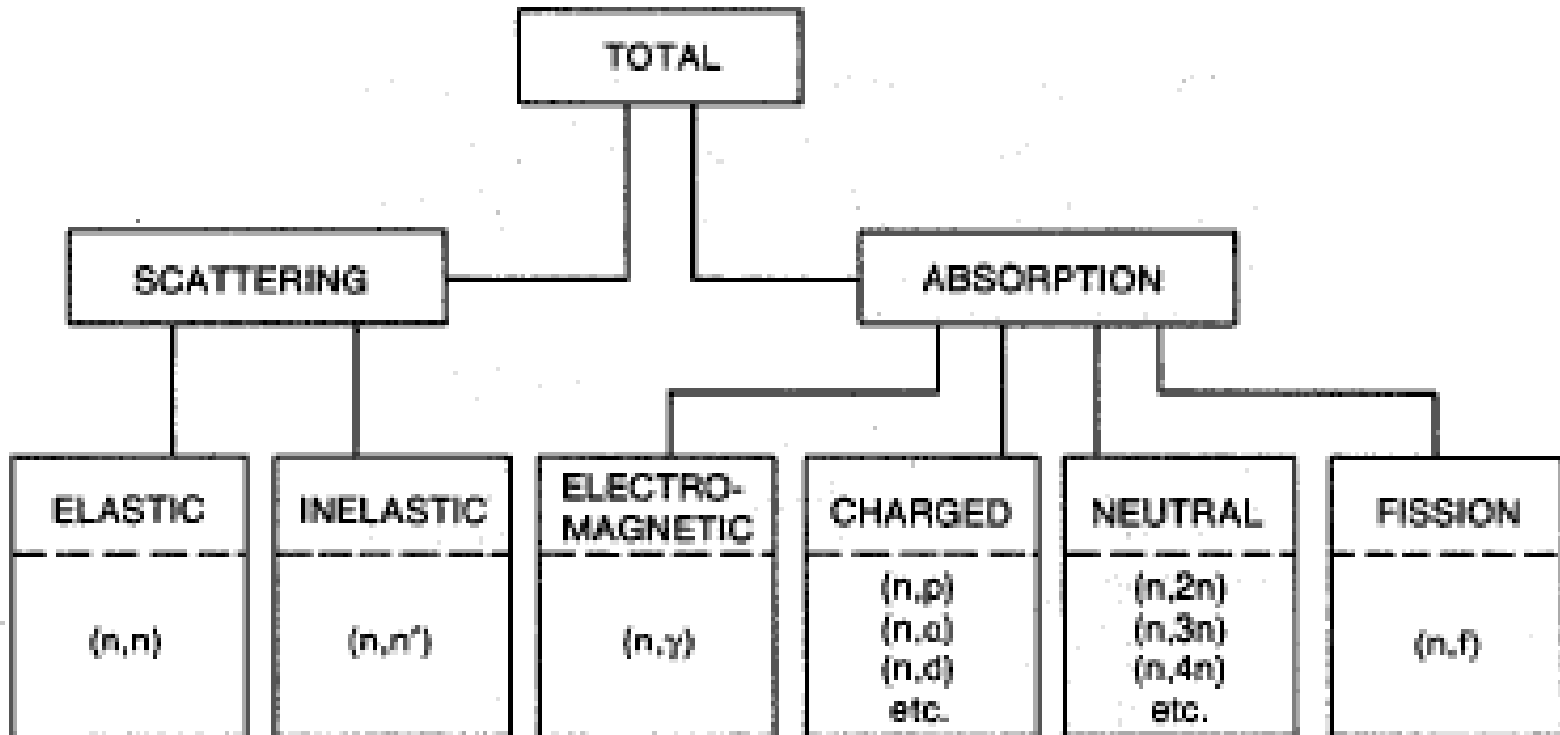
Remarques sur cette classification: Neutrons de haute énergie

- Pour les neutrons de haute énergie → il faut considérer individuellement les collisions avec les nucléons du noyau → utilisation de sections efficaces (mesurées) nucléon-nucléon
- Cependant → des interférences entre nucléons du noyau peuvent exister → elles peuvent affecter les interactions nucléon-nucléon → il faut corriger les sections efficaces nucléon-nucléon
- Le neutron incident peut mettre en mouvement un nucléon du noyau → ce nucléon peut à son tour interagir avec un autre nucléon du noyau et ainsi de suite → cascade intranucléaire → modèle complexe

Remarques sur cette classification

- Neutrons rapides → les sources de neutrons produisent toujours des neutrons dont l'énergie est de l'ordre de 1MeV ou au-dessus (en particulier les réactions de fission)
- Neutrons épithermiques → dans ce domaine d'énergie les sections efficaces d'interaction varient très rapidement et présentent souvent des résonances
- Neutrons thermiques → les neutrons (quelle que soit leur origine) ralentissent dans la matière, ils tendent donc à se thermaliser → les neutrons thermiques sont en équilibre thermique avec leur environnement à $\approx 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ → énergie moyenne voisine de 0.025 eV ($E = kT$ avec k la constante de Boltzmann)

Interactions neutroniques



2 types principaux d'interactions:

1. Diffusion: Modification de l'énergie et de la trajectoire du neutron mais le noyau conserve un nombre de protons et de neutrons identique
2. Absorption: Modification du noyau cible → émission de rayonnements

Diffusion élastique (n,n) (1)

- Durant une collision élastique → l'énergie cinétique totale du neutron et du noyau est inchangée
- Le noyau cible de masse m_2 initialement au repos reçoit du neutron (masse m_n et énergie cinétique E) une énergie cinétique T_c comprise entre 0 et T_{max} →

$$T_{max} = \frac{4m_n m_2}{(m_n + m_2)^2} E$$

- Un neutron peut communiquer toute son énergie à un atome d'hydrogène → la diffusion élastique est un processus très efficace pour ralentir les neutrons si $m_2 \approx m_n$

Diffusion élastique (n,n) (2)

- Par conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement → on obtient la relation qui lie l'énergie transférée par le neutron au noyau en fonction de l'angle de recul θ_r du noyau →

$$T_c = \frac{4m_n m_2}{(m_n + m_2)^2} E \cos^2 \theta_r$$

- Qui se note généralement →

$$T_c = \frac{4\alpha}{(\alpha + 1)^2} E \cos^2 \theta_r$$

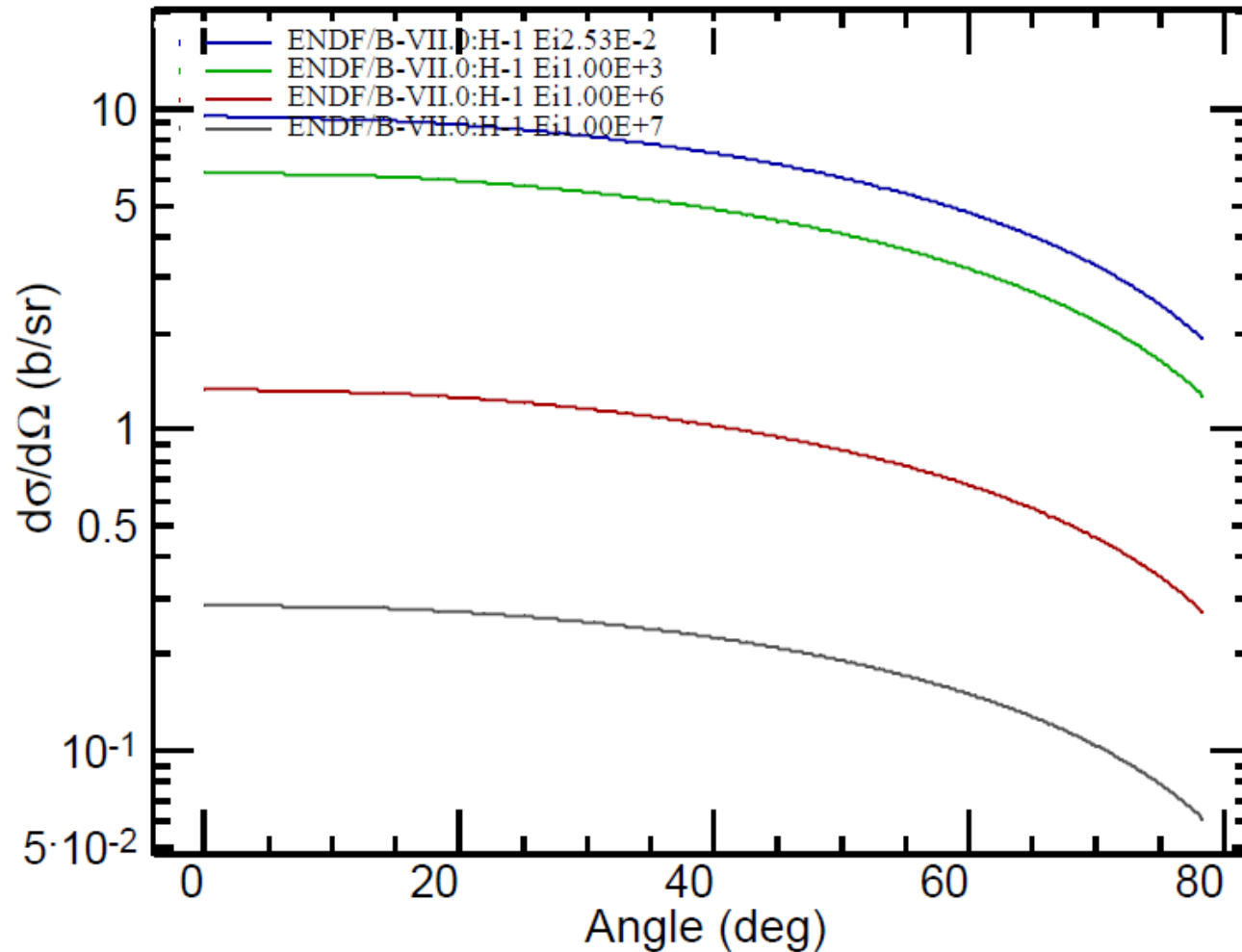
avec $\alpha = m_2/m_n$

- Pour connaître l'énergie moyenne cédée par le neutron → il faut déterminer la section efficace différentielle angulaire

Diffusion élastique (n,n) (3)

- La théorie distingue deux types de collision élastique →
 1. L'interaction directe du neutron avec le noyau → pour les faibles énergies cette section efficace tend vers $4\pi R^2$ où R est le rayon du noyau → ordre de grandeur ≈ 1 barn
 2. La diffusion en deux étapes → d'abord formation d'un noyau composé dans un état excité puis émission d'un neutron pour reformer le noyau de départ → la section efficace en fonction de l'énergie du neutron pour ce processus présente des résonances car le noyau composé ne peut être formé que dans des états bien définis (noyaux légers → niveaux d'énergie bien séparés → résonances bien séparées - noyaux lourds → densité des niveaux élevée → superposition des résonances → variation continue de la section efficace)
- Ces deux processus interfèrent → la section efficace totale de diffusion élastique n'est pas simplement la somme des deux sections efficaces
- Pour $\alpha = 1$ → la distribution angulaire varie en $\cos\theta_r$ (pour $\alpha \neq 1$ → plus compliqué)

Distribution angulaire de θ_n



Pour $\alpha = 1 \rightarrow$ la distribution angulaire de θ_n est = à la distribution angulaire de θ_r

Diffusion élastique (n,n) (4)

- On a donc $\langle T_c \rangle \propto \langle \cos^2 \theta_r \rangle = 1/2 \rightarrow$ la valeur moyenne de l'énergie transférée $\rightarrow$

$$\langle T_c \rangle = \frac{2\alpha}{(\alpha + 1)^2} E$$

- Pour de l'hydrogène $\rightarrow \alpha = 1 \rightarrow \langle T_c \rangle = E/2$
- De manière général $\rightarrow$ l'énergie du neutron $E'^{(n)}$ après n collisions élastiques $\rightarrow$

$$\langle E'^{(n)} \rangle = \left[\frac{(\alpha^2 + 1)}{(\alpha + 1)^2} \right]^n E$$

Diffusion élastique (n,n) (5)

- Pour atteindre une énergie $E'^{(n)}$ à partir d'une énergie $E \rightarrow$ il faut donc que le neutron subissent en moyenne n collisions élastiques avec

$$n = \frac{\log (E'^{(n)} / E)}{\log [(A^2 + 1) / (A + 1)^2]}$$

- Exemple: Pour un neutrons de 2 MeV interagissant avec de l'hydrogène $\rightarrow$ 27 collisions pour être thermalisé (valeur approximative)

Element	Atomic Weight	Number of Collisions
Hydrogen	1	27
Deuterium	2	31
Helium	4	48
Beryllium	9	92
Carbon	12	119
Uranium	238	2175

Diffusion élastique (n,n) (6)

- Après un choc élastique dû à un neutron rapide → le noyau est déplacé → s'il possède une énergie cinétique suffisante → il peut déplacer d'autres noyaux → cascade de déplacements atomiques
- Généralement → la cascade est localisée dans un volume dont le rayon $\approx 100 \text{ \AA}$
- Les atomes sont déplacés tant que l'énergie reçue lors de la collision est supérieure à une énergie caractéristique appelée énergie de seuil de déplacement (énergie juste suffisante pour rompre les liaisons et éjecter l'atome loin de son site de telle manière qu'il ne voit plus son potentiel attractif)
- Cette énergie de seuil $\approx 25 \text{ eV}$

Diffusion inélastique (n,n') (1)

- Durant une diffusion inélastique → le noyau cible est amené dans un état excité → le neutron perd une partie de son énergie que l'on retrouve sous la forme d'énergie cinétique et d'énergie potentielle du noyau cible
- Cette réaction passe par un état intermédiaire où il y a formation d'un noyau composé avec ensuite émission d'un neutron pour reformer le noyau dans un état excité
- Le plus souvent le noyau excité retourne dans son état fondamental en émettant un ou plusieurs γ
- La section efficace inélastique présente des résonances qui correspondent aux différents niveaux d'énergie du noyau composé

Diffusion inélastique (n,n') (2)

- La collision inélastique ne peut se produire que si l'énergie cinétique du neutron dépasse un certain seuil, $E_{seuil} \rightarrow$

$$E_{seuil} = \frac{A + 1}{A} E_{exc}$$

avec E_{exc} l'énergie d'excitation du noyau

- Pour du $^{12}\text{C} \rightarrow$ le premier état excité est tel que $E_{exc} = 4.43 \text{ MeV}$
 $\rightarrow$ le neutron doit donc avoir une énergie supérieure à 4.81 MeV

Absorption

- Après une absorption, un (ou plusieurs) rayonnement secondaire peut être émis $\rightarrow$ ce rayonnement peut (en général) être détecté
- Ce rayonnement secondaire peut être :
- Un rayonnement γ (absorption électromagnétique ou radiative) $\rightarrow (n, \gamma)$
- Une particule chargée $(p, \alpha) \rightarrow (n, p)$ ou (n, α)
- Des neutrons (si 1 $\rightarrow$ équivalent à de la diffusion $\rightarrow$ parfois considéré comme diffusion élastique mais présence de résonances) $\rightarrow (n, 2n), (n, 3n), \dots$
- Des produits de fission $\rightarrow (n, f)$

Absorption électromagnétique

- La capture radiative est une réaction (n, γ) où le neutron est absorbé par le noyau pour former un noyau dans un état excité qui émet un ou plusieurs γ
- La capture radiative domine surtout aux faibles énergies
- La section efficace capture radiative présente des résonances à certaines valeurs d'énergies

Absorption suivie de l'émission de particules chargées

- Il s'agit principalement de réactions telles que (n,p) ou (n,α)
- Elles se produisent surtout avec des neutrons rapides car ces réactions sont le plus souvent endoénergétiques $\rightarrow$ de plus, l'énergie cédée à la particule chargée dans le noyau doit être suffisante pour que cette particule puisse franchir la barrière de potentiel du noyau
- Pour quelques noyaux légers, les réactions (n,p) et (n,α) sont exoénergétiques $\rightarrow$ elle peuvent se produire avec des neutrons thermiques $\rightarrow$ exemples: ${}^3\text{He}(n, p){}^3\text{H}$, ${}^6\text{Li}(n,\alpha){}^3\text{H}$ et ${}^{10}\text{B}(n,\alpha){}^7\text{Li}$

Absorption suivie d'une réaction de fission

- La réaction de fission se produit pour des matériaux à Z élevé quand la capture d'un neutron conduit à la scission du noyau et à la production de fragments lourds ainsi que de nucléons de grande énergie cinétique
- Par exemple $\rightarrow$ la fission de ^{235}U libère une énergie de ≈ 200 MeV qui est distribuée entre les fragments de fission, des neutrons émis (2 ou 3), des particules β provenant de la désintégration radioactive des fragments de fission et des photons
- L'émission de neutrons est utilisée pour induire d'autres réactions de fission $\rightarrow$ réaction en chaîne $\rightarrow$ réacteur à fission (voir cours de Physique des Réacteurs Nucléaires)

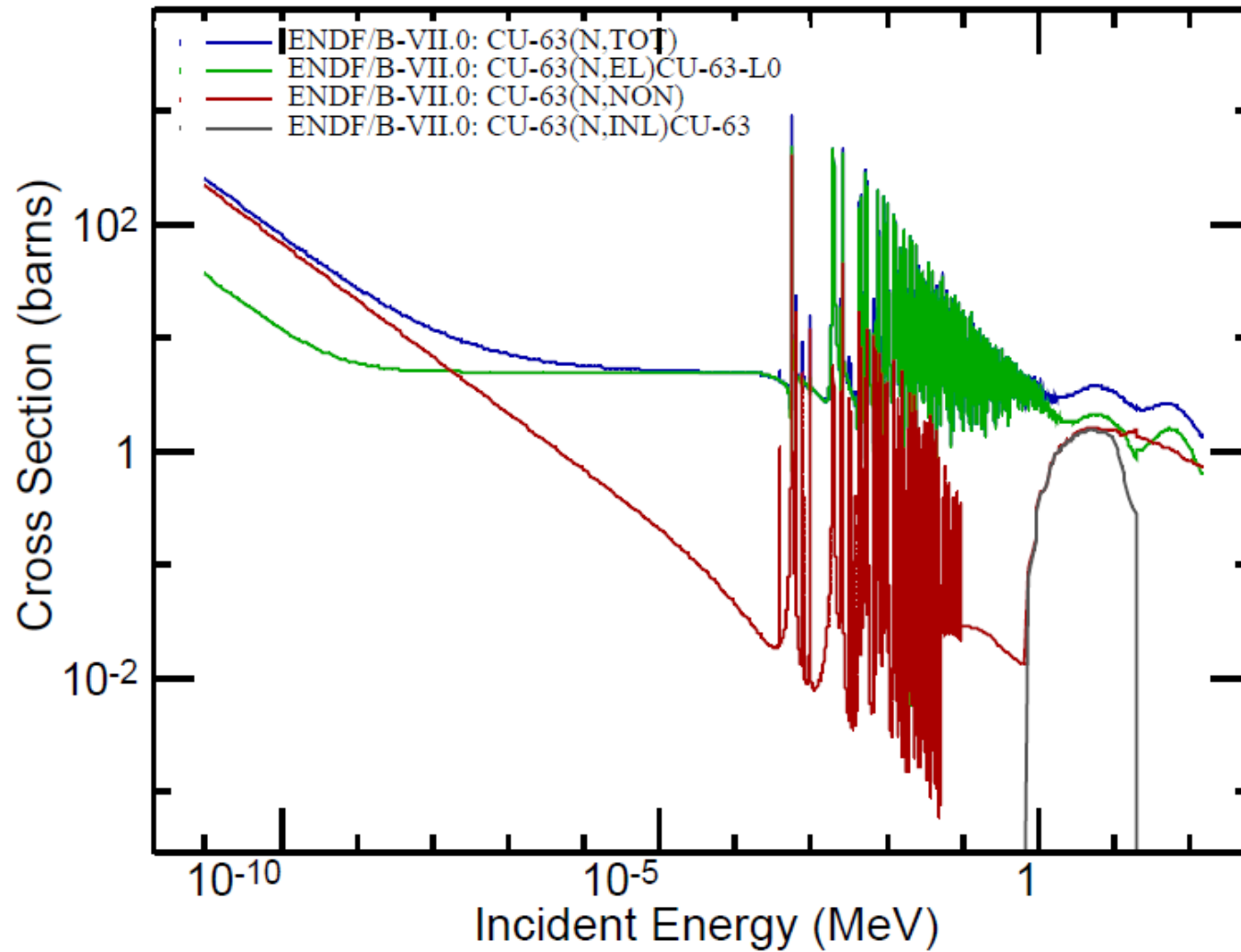
Sections efficaces d'interaction (1)

- La section efficace totale est la somme des sections efficaces pour les $\neq$ processus
- Il n'existe pas de calculs « complets » de section efficace → compilation de calculs théoriques et de données expérimentales
- Dépend fortement du matériau → difficile d'établir des « règles »
- Pour les matériaux à Z faible
 - la diffusion élastique est importante pour toutes les énergies
 - la diffusion inélastique est (potentiellement) importante pour les neutrons rapides
 - l'absorption est (potentiellement) importante pour les neutrons thermiques (essentiellement l'absorption radiative)
- Pour les matériaux à Z élevé
 - L'absorption est totalement dominante pour les neutrons thermiques (à cause de la réaction de fission)
 - aux hautes énergies → la diffusion élastique est importante

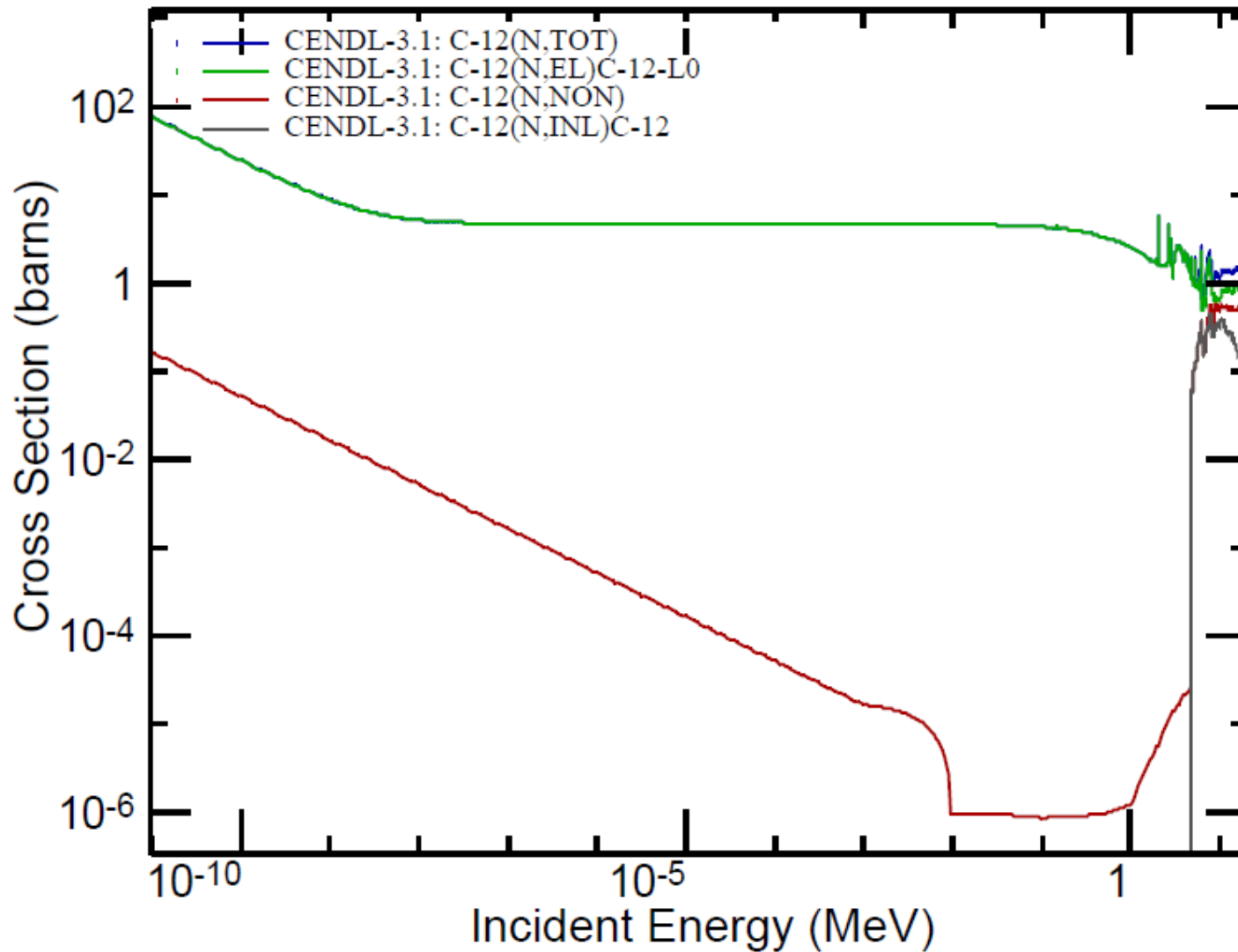
Sections efficaces d'interaction (2)

- De manière générale $\rightarrow$ la section efficace totale $\searrow$ quand l'énergie du neutron $\nearrow$
- La section efficace de diffusion élastique est $\approx$ constante (excepté pour les très basses énergies: $E < 10^{-3}$ eV)
- La section efficace d'absorption varie en $1/v$ (v : vitesse du neutron)
- La section efficace totale est soit constante soit varie en $1/v$ en fonction du processus dominant
- Pour les matériaux à Z élevé $\rightarrow$ nombreuses résonances pour la réaction de fission qui domine parfois la loi en $1/v$

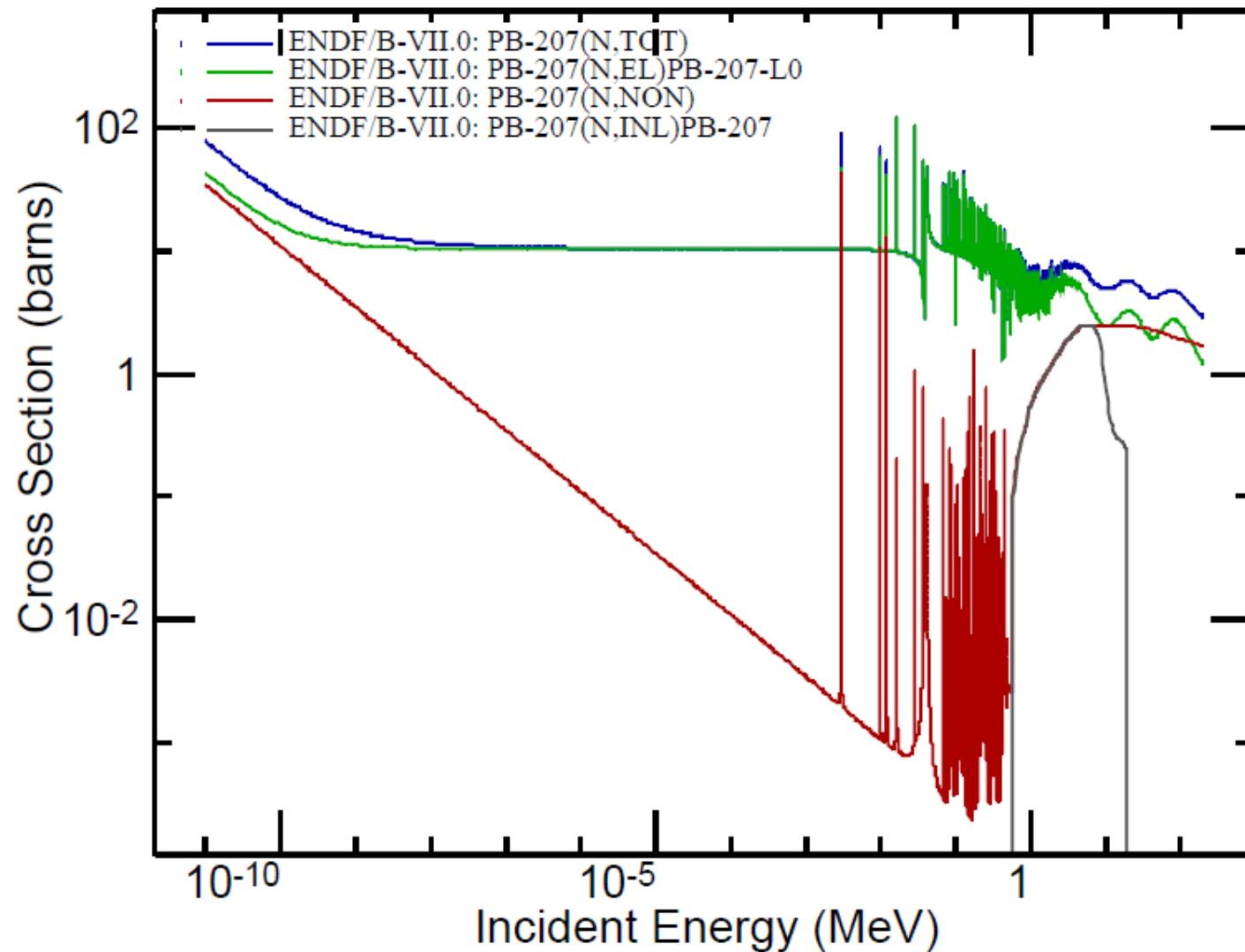
Sections efficaces pour le ^{63}Cu



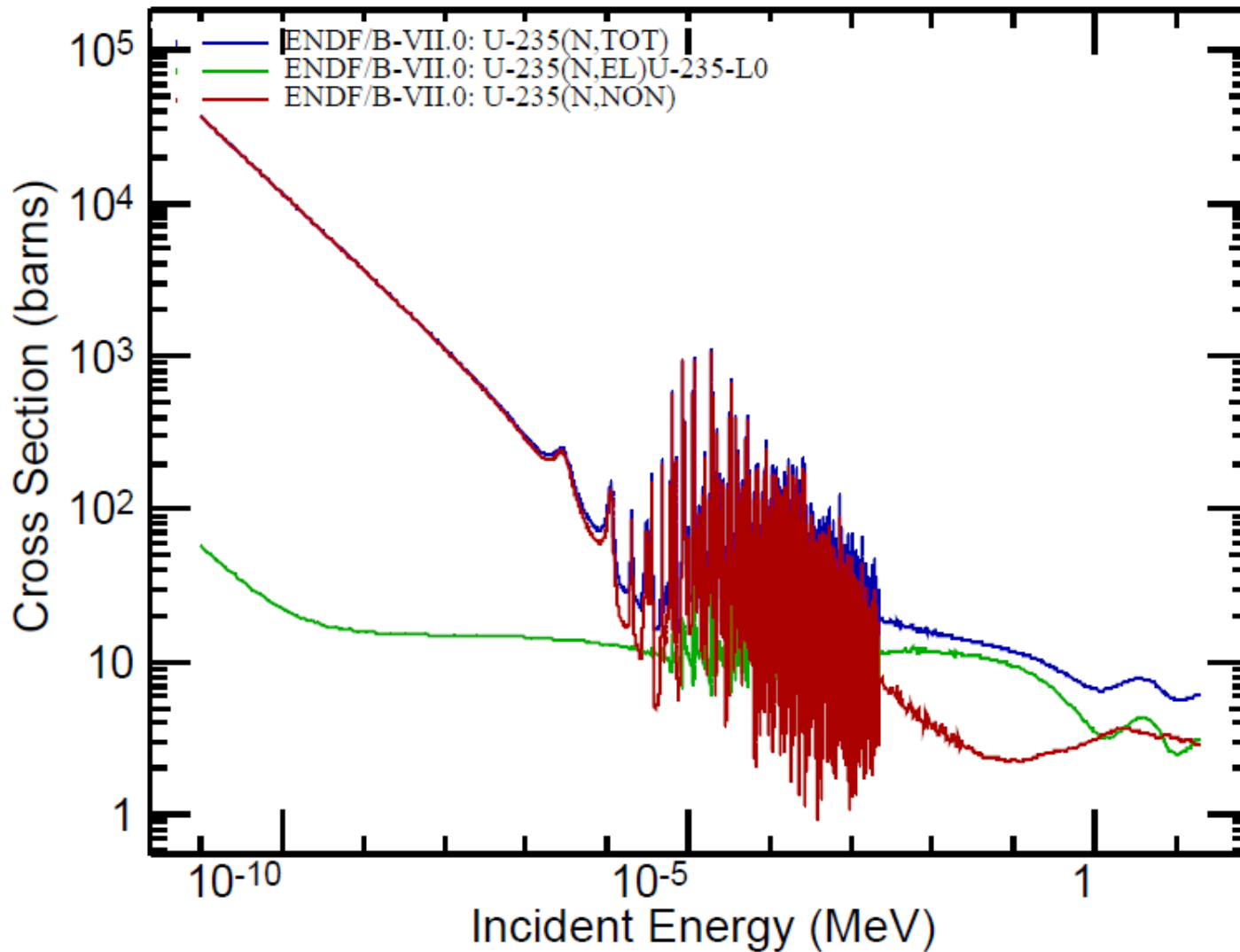
Sections efficaces pour le ^{12}C



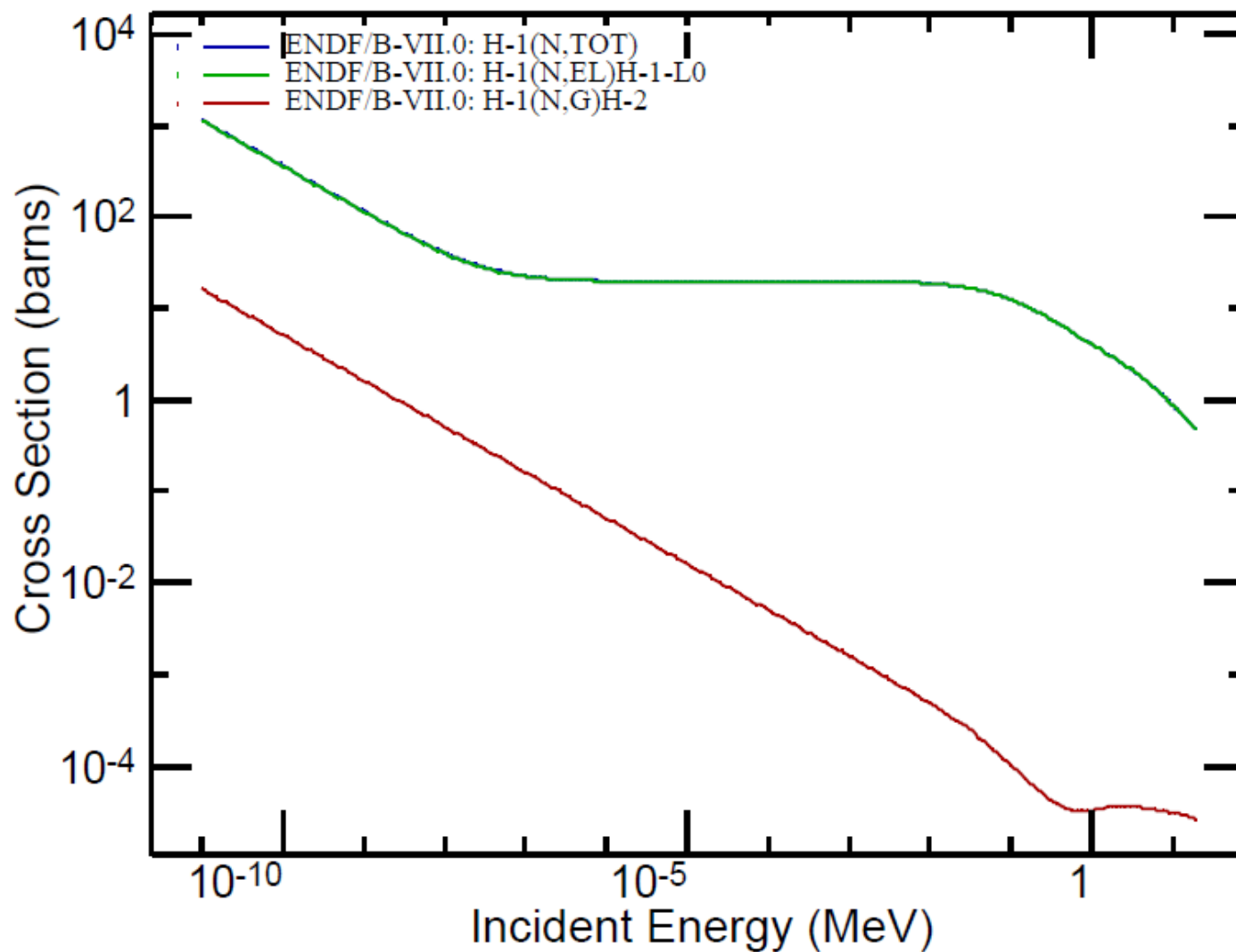
Sections efficaces pour le ^{207}Pb



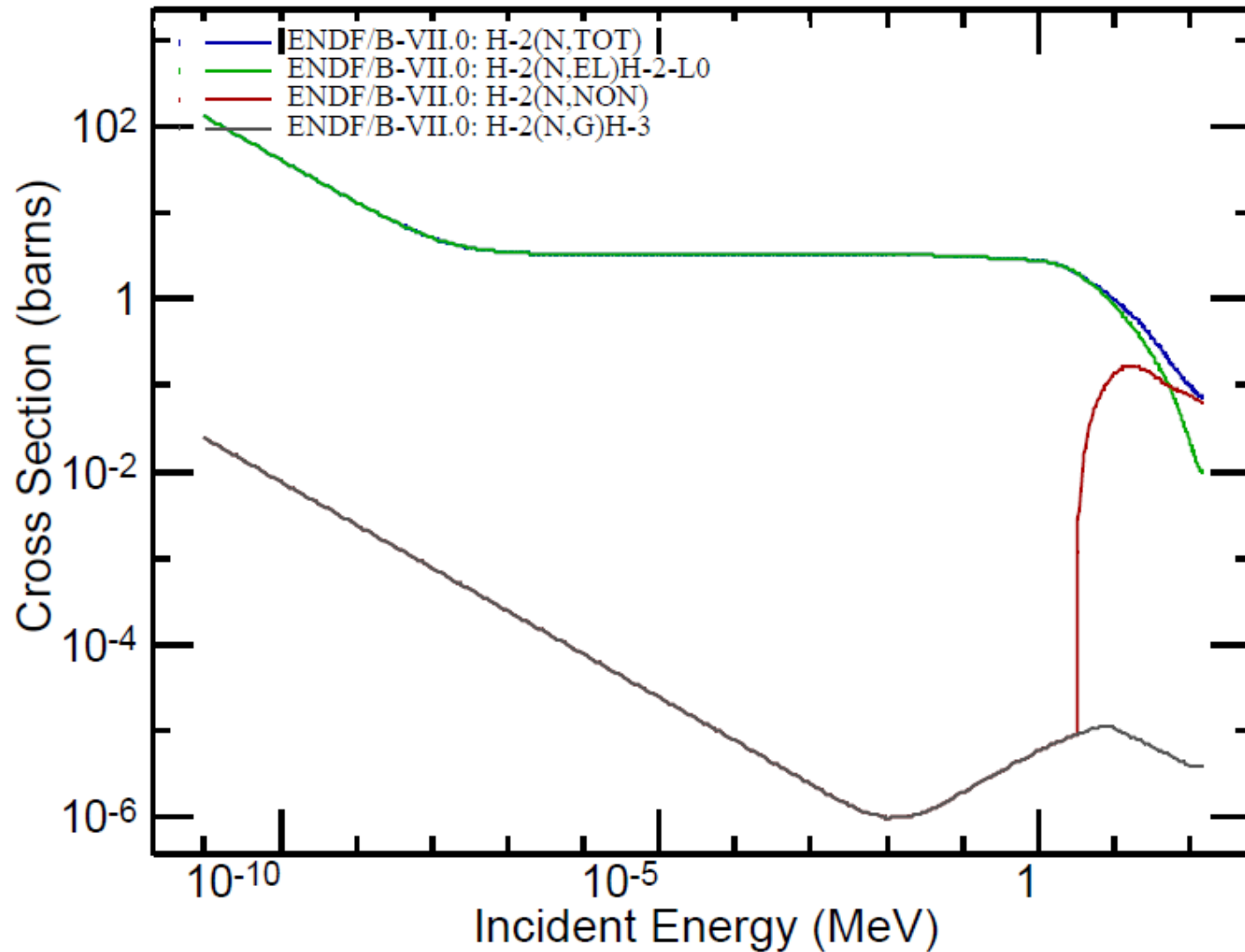
Sections efficaces pour le ^{235}U



Sections efficaces pour le ^1H



Sections efficaces pour le ^2H



Section efficace macroscopique

- Comme pour les photons $\rightarrow$ on considère la transmission d'un faisceau de neutrons à travers une cible épaisse (I : intensité finale, I_0 : intensité initiale, x : épaisseur, N : densité atomique, σ_t : section efficace totale) $\rightarrow$

$$I = I_0 \exp(-N\sigma_t x)$$

- On définit alors la section efficace macroscopique (m^{-1}) telle que $\rightarrow$

$$\Sigma_t = N\sigma_t$$

- Attention $\rightarrow$ dû principalement au phénomène de multiplication mais aussi à la diffusion multiple $\rightarrow$ l'équation donnant l'intensité après une distance x est souvent fausse

Pouvoir de modération

- Pour modérer (ralentir) un neutron rapide → 2 facteurs sont importants
 1. La probabilité de diffusion
 2. La modification en énergie moyenne subie par le neutron après interaction → pour un bon modérateur → nécessité d'avoir un matériau léger → riche en hydrogène
- Le pouvoir de modération est défini comme →

$$MP = \xi \Sigma_s$$

avec ξ , le décrément logarithmique moyen en énergie ($\xi = \ln(E_{\text{avant}}) - \ln(E_{\text{après}})$) et Σ_s , la section efficace macroscopique de diffusion

Rapport de modération (1)

- Cependant un matériau avec un grand pouvoir de modération qui possède une section efficace d'absorption élevée ne pourrait pas être considéré comme un bon modérateur → il réduirait l'énergie des neutrons mais la fraction des neutrons survivants pourrait être trop faible
- Finalement pour modérer des neutrons rapides → un grand pouvoir de modération est nécessaire mais aussi une faible probabilité d'absorption → on définit le rapport de modération (avec Σ_a , la section efficace macroscopique d'absorption) →

$$MR = \frac{\xi \Sigma_t}{\Sigma_a}$$

Rapport de modération (2)

MP et MR pour $\neq$ matériaux
pour des énergies initiales
et finales de 100 keV et 1 eV

Moderator	Moderating Power (1 eV to 100 keV)	Moderating Ratio (Approximate)
Water	1.28	58
Heavy Water	0.18	21 000
Helium at STP	0.00001	45
Beryllium	0.16	130
Graphite	0.064	200
Polyethylene (CH ₂)	3.26	122

L'eau possède un MP plus grand que l'eau lourde (D₂O ou ²H₂O) car la masse de l'hydrogène est 2 fois plus petite que celle du deutérium mais l'hydrogène capture un neutron (pour former du deutérium) plus facilement que le deutérium (pour former du tritium) → MR plus grand pour l'eau lourde (attention: eau lourde plus chère)

Modération: Conclusion

Pour modérer les neutrons rapides → on utilise des matériaux qui ont une masse proche de la masse du neutron → matériaux riches en hydrogènes (eau, paraffine) → **pas** du plomb

Libre parcours moyen

- Il est souvent intéressant de considérer un autre paramètre → le libre parcours moyen λ →

$$\lambda = \frac{1}{\Sigma_t}$$

càd la distance moyenne entre 2 interactions

- Paramètre utile pour les calculs de parcours des neutrons dans la matière par simulations Monte Carlo

Parcours de neutrons

Neutrons de 1 MeV incidents sur des cylindres de polyéthylène, d'aluminium et de plomb par simulations Monte Carlo

