



UE 3A

Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

Dr Tristan Richard

UE 3A : Organisation des appareils et des systèmes : Aspects fonctionnels et méthodes d'étude

- MODULE 1: Etats de la matière et leur caractérisation
- MODULE 2: Méthodes d'étude en électrophysiologie jusqu'à l'ECG
- MODULE 3: Les très basses fréquences du spectre électromagnétique
- MODULE 4: Le domaine de l'optique (prépare en particulier la microscopie en UE2)
- **MODULE 5: Rayons X et gamma – Rayonnements particuliers**
- MODULE 6: Utilisations thérapeutiques

Rayons X et gamma – Rayonnements particuliers

Natures et propriétés des REM

Principales caractéristiques des rayonnements α et β

Interaction avec la matière: effet photo-électrique, diffusions, matérialisation

Détection

- Physique Nucléaires : Généralités
- La Radioactivité
- Interactions Rayonnements – Matière
- Réactions Nucléaires
- Les Rayons EM
- Les Détecteurs

Interactions Rayonnements – Matière



radiographie d'une main, coll. musée des Arts et Métiers.

Interaction Rayonnements – Matière

1. Généralités

2. Interactions des photons X et γ

2.1 Atténuation d'un faisceau de photons

2.2 Interactions photons-matière

3. Interactions des neutrons

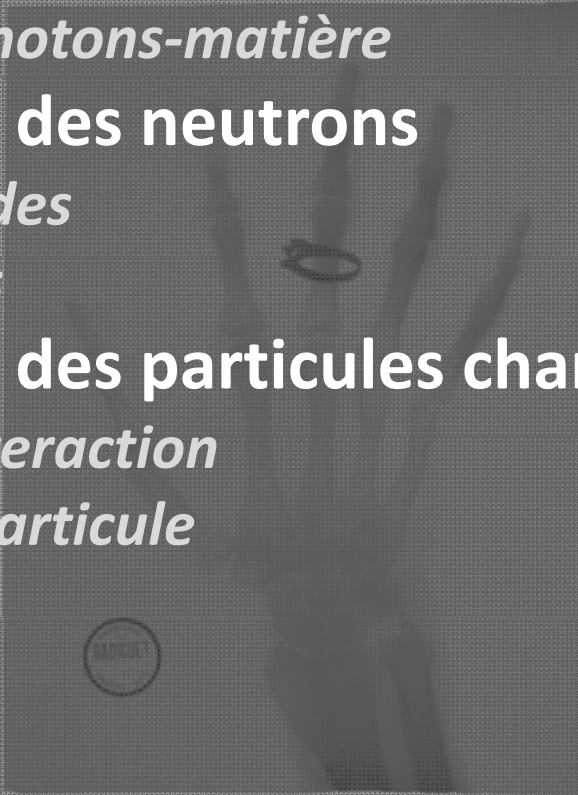
3.1 Neutrons rapides

3.2 Neutrons lents

4. Interactions des particules chargées

4.1 Nature de l'interaction

4.2 Nature de la particule



radiographie d'une main, coll. musée des Arts et Métiers.

1. Généralités

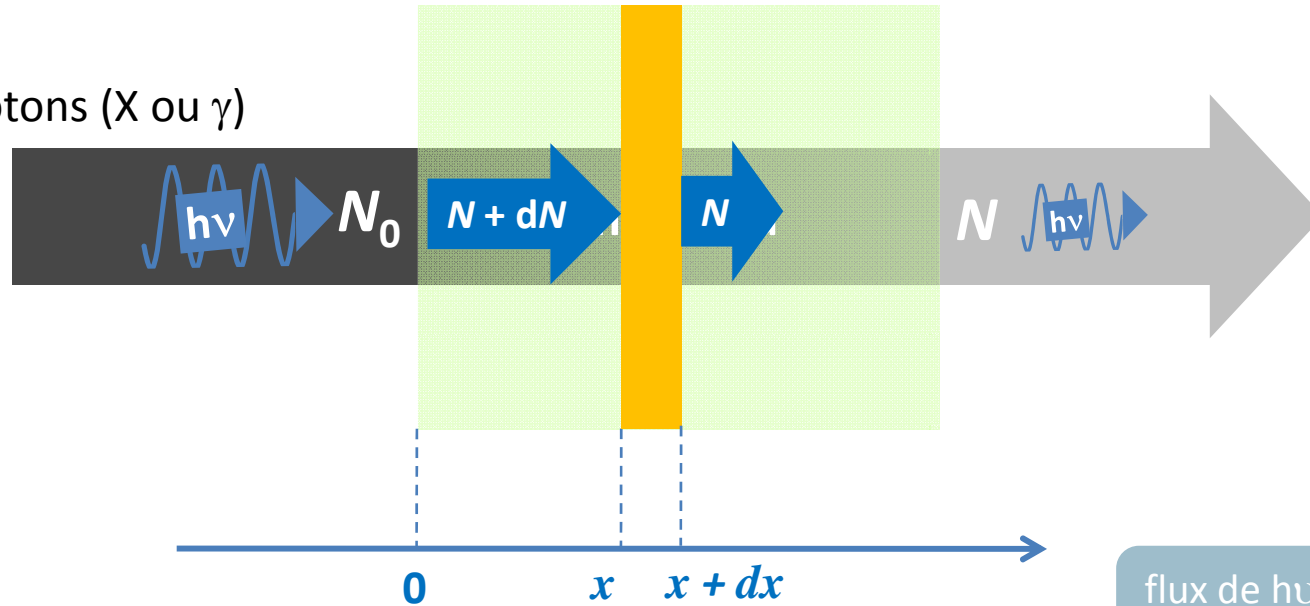
● **Interaction rayonnements – matière:** échange d'énergie entre les rayonnements (corpusculaire ou électromagnétique) et les atomes du milieu

particules non chargées	rayonnements EM	photons X et γ
	neutrons	
particules chargées	légères	électrons
	lourdes	α , p, fragments de fission

2. Interaction des photons X et γ

2.1 Atténuation d'un faisceau de photons

flux de photons (X ou γ)



• variation nombre photons dN :

$$dN = -\mu dx N$$

coef. linéique
d'absorption

• par intégration:

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

N_0 nombre de $h\nu$ incidents

- **couche de demi-atténuation (CDA ou $x_{1/2}$)**: épaisseur nécessaire pour atténuer la moitié du flux de photons incidents

$$N = \frac{N_0}{2} \rightarrow \frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\mu \text{CDA}} \rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\mu \text{CDA}} \quad \text{CDA} = \frac{\ln(2)}{\mu} \quad \text{unité m}^{-1}$$

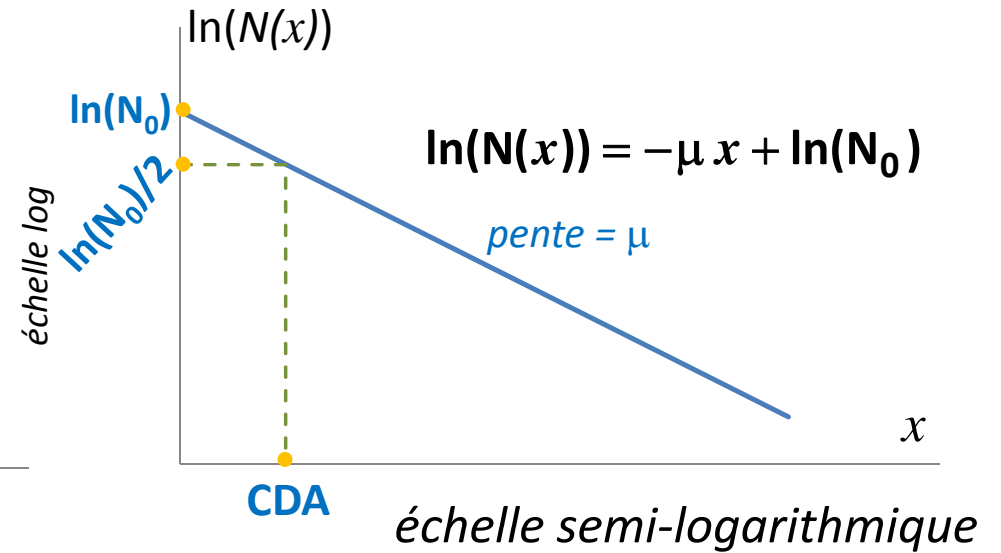
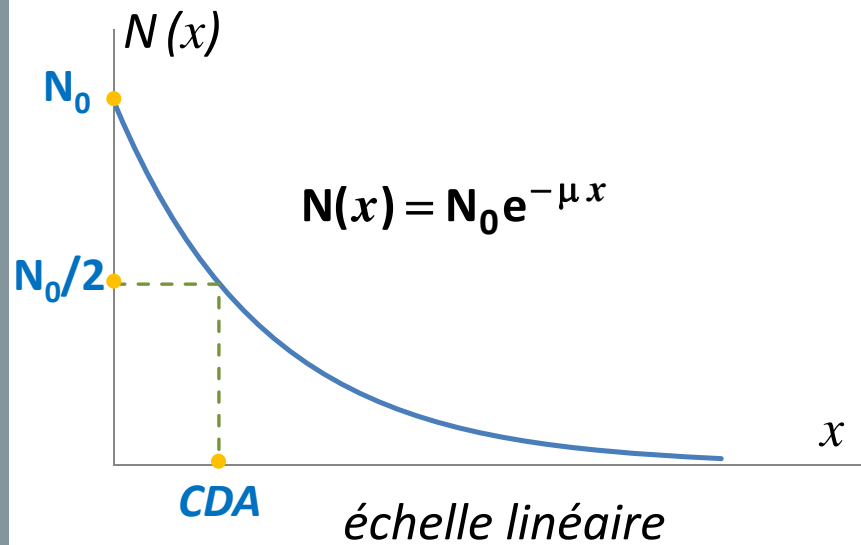
- **coefficient massique d'atténuation** et **masse surfacique de la matière**

- μ dépend état matière (*solide, liquide, gaz*)
- **coefficient massique d'atténuation**: μ/ρ (ρ *masse volumique*)
- **masse surfacique de la matière**: μx (*en kg.m⁻² ou en g.cm⁻²*)

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

- **autre expression de l'atténuation**: $N = N_0 e^{-\mu x}$
 - atténuation facteur 1024 (#1000): $\text{écran épaisseur } x = 10x\text{CDA}$
- $$\left. \begin{array}{l} N = N_0 e^{-\mu x} \\ \text{CDA} = \frac{\ln(2)}{\mu} \end{array} \right\} N = N_0 e^{-\ln(2) \frac{x}{\text{CDA}}}$$
- $$N = \frac{N_0}{2^{x/\text{CDA}}}$$

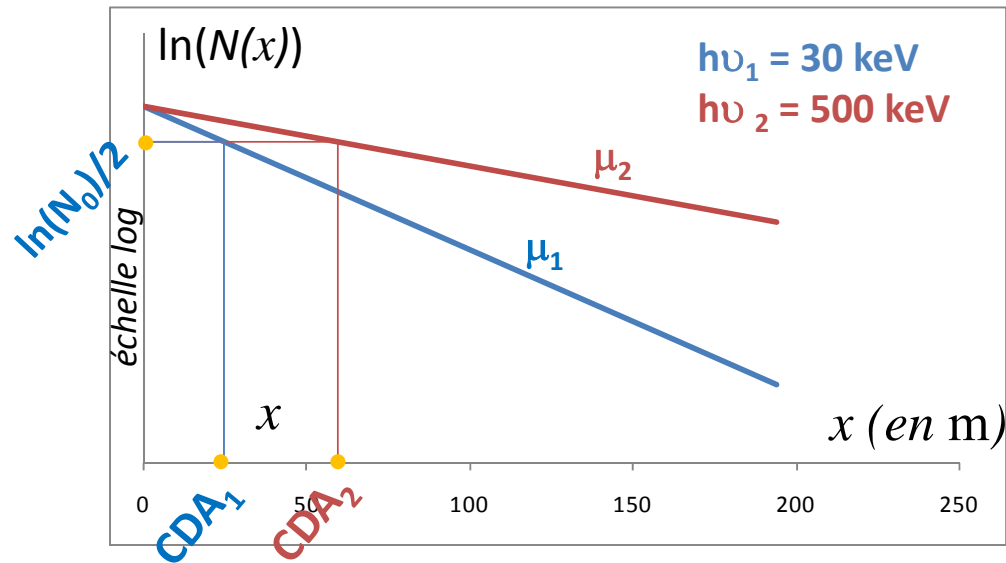
• **représentation graphique**



• **ordre de grandeur CDA:**

	30 keV	100 keV	500 keV
air	25 m	35 m	60 m
eau (<i>liquide</i>)	2 cm	4 cm	7 cm
béton	3 mm	2 cm	4 cm
plomb	0,02 mm	0,1 mm	4 mm

• μ dépend de l'énergie des photons

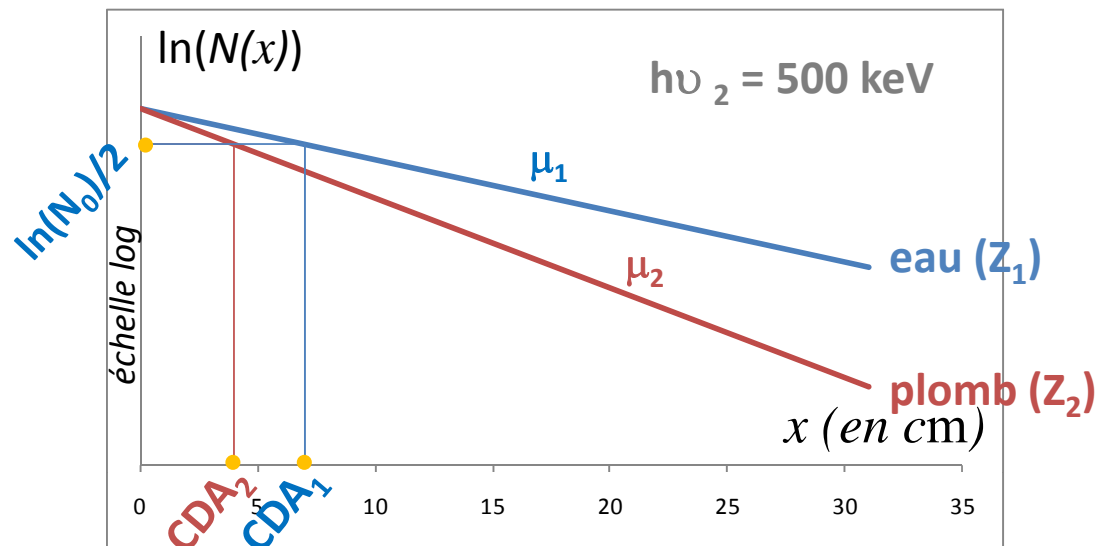


• $h\nu_2 > h\nu_1$

• $\mu_1 > \mu_2$

• $CDA_2 > CDA_1$

• μ dépend du matériau traversé (*Z matériau*)



• $Z_2 > Z_1$

• $\mu_2 > \mu_1$

• $CDA_1 > CDA_2$

2.2 Interaction photons – matière

atténuation du flux de photons	diffusion	diffusion Thomson – Rayleigh	
		diffusion Compton	
	absorption	interaction $h\nu$ – électron	effet photoélectrique
		interaction $h\nu$ – noyau	matérialisation réaction photonucléaire

● diffusion

- induction flou imagerie médicale

● absorption

- contraste imagerie médicale
- absorption par milieu biologique → irradiation patient

2.2.1 Diffusion Thomson-Rayleigh (diffusion simple)

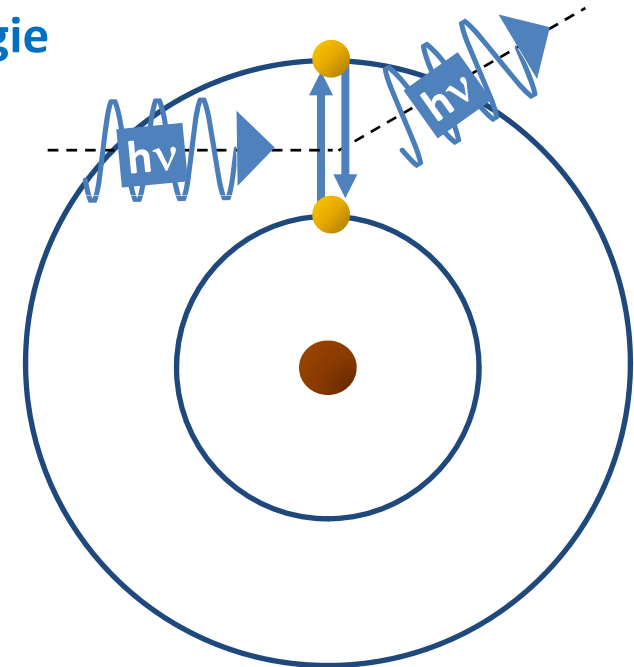
- **photons de faible énergie** ($< 45 \text{ keV}$, *sinon négligeable*)

- **déviat**ion direction photons sans transfert d'énergie

- $h\nu$ absorbé par atome

- atome état excité \rightarrow retour état fondamental

- émission $h\nu$ même énergie direction aléatoire



diffusion Thomson – Rayleigh

- **imagerie médicale**

- faible énergie \rightarrow négligeable autres interaction

- **mammographie** \rightarrow utilisation $h\nu$ faible énergie ($\# 30 \text{ keV}$)

2.2.2 Diffusion Compton

● tissus biologiques: **effet prédominant pour énergie > 45 keV (radiothérapie)**

● **absorption partie énergie $E_i = h\nu_i$ incident par électron**

● e^- éjecté (si $h\nu_i > W_K$ énergie liaison e^-)

● photon diffusé moins énergétique $E_d = h\nu_d < E_i$

● **conservation énergie et quantité de mouvement**

● **énergie cinétique électron E_{c_e} : $E_{c_e} = E_i - E_d - W_K$**

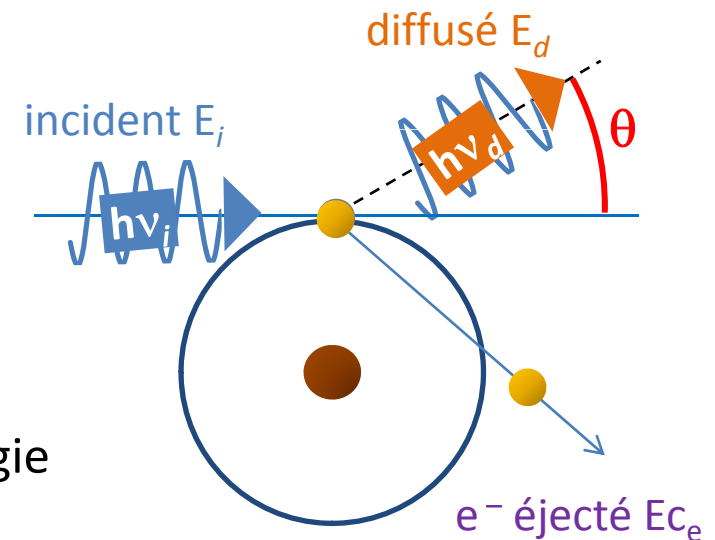
● relation entre E_i et E_d :

$$\frac{1}{E_d} - \frac{1}{E_i} = \frac{1 - \cos \theta}{mc^2}$$

● **imagerie médicale**

● **responsable artefacts** (fous) en radiobiologie

● irradiation patient



2.2.3 Effet photoélectrique

- transfert de l'intégralité de l'énergie du $h\nu$ incident à un électron du cortège électronique de l'atome

☼ énergie absorbée → disparition photon

☼ e^- éjecté (*couche interne*)

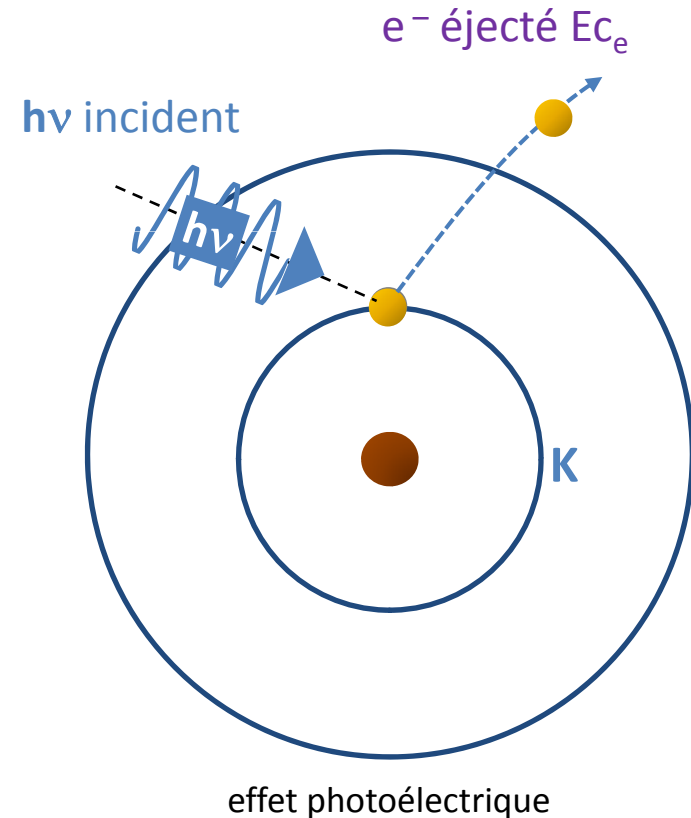
$$E_{c_e} = h\nu - W_K$$

énergie cinétique électron

énergie de liaison

- électron éjecté → source secondaire rayonnement ionisant

- réarrangement cortège électronique



● **section efficace par effet photoélectrique (PE)**

☼ **section efficace σ** : probabilité d'interaction entre un photon incident et un atome

$$\sigma = n \mu$$

coefficient linéique d'absorption

nombre d'atome par unité de volume

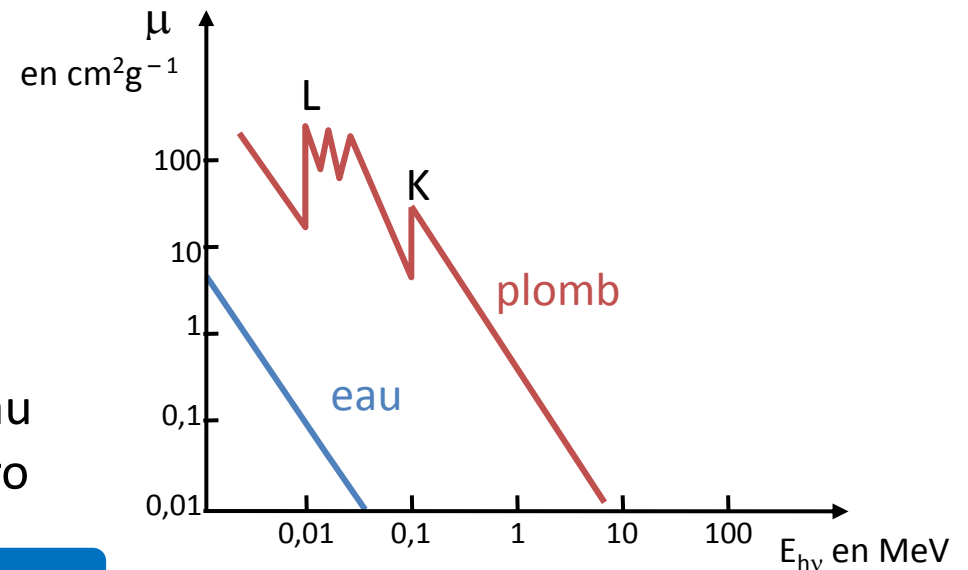
☼ **application médicale**: contraste en radiobiologie et radiotoxicité des rayonnements ionisants

☼ **relation de Bragg et Pierce** matériau de masse volumique ρ et de numéro atomique Z

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

énergie $h\nu$

constante
(couche e – ionisé)

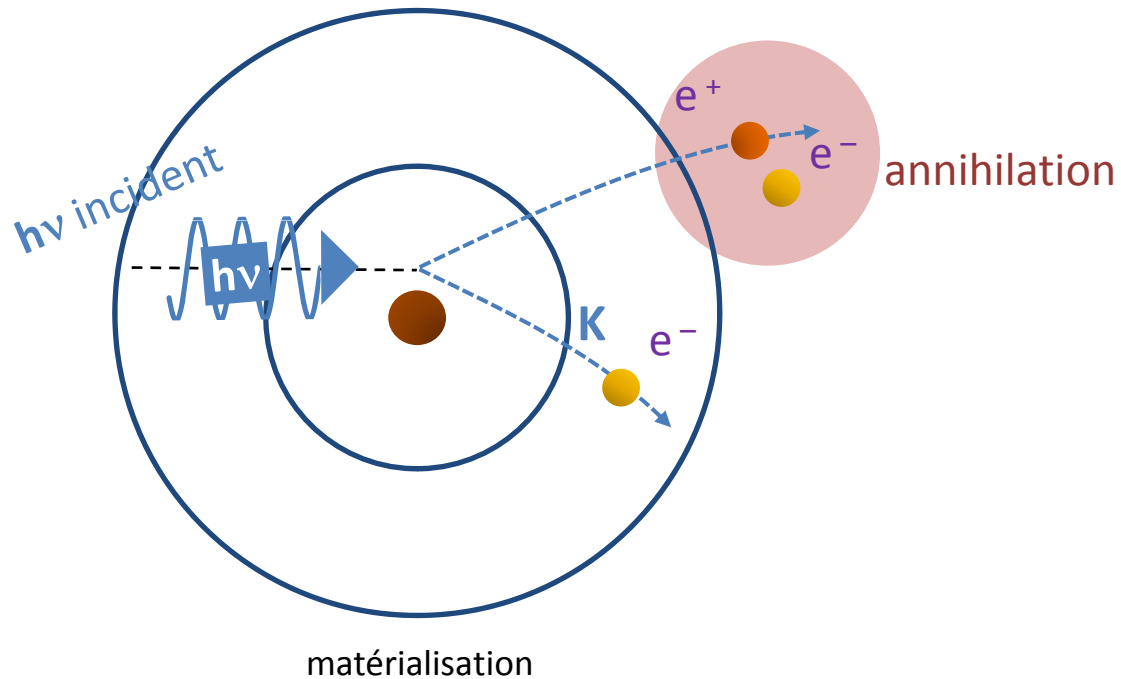


☼ **effet PE prépondérant milieu dense** (Z élevé) et **photon faible énergie** (10 à 50 keV)

2.2.4 Matérialisation

• voisinage noyau: matérialisation $h\nu$ incident en 1 positon et 1 électron

• condition: $h\nu > 2 \times 511 \text{ keV} = 1,022 \text{ MeV}$



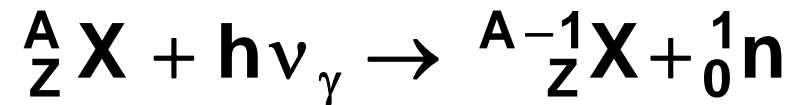
• marginal domaine médical

2.2.5 Réaction photonucléaire

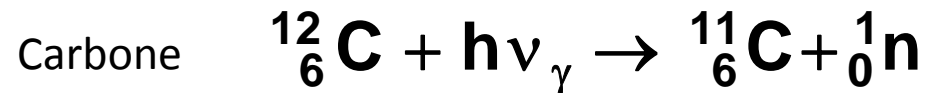
● $h\nu$ incident ($E > 10 \text{ MeV}$) absorbé par noyau

☼ noyau état excité

☼ retour stabilité → désintégration (*génération neutron*)



● formation isotope radioactif noyau initial

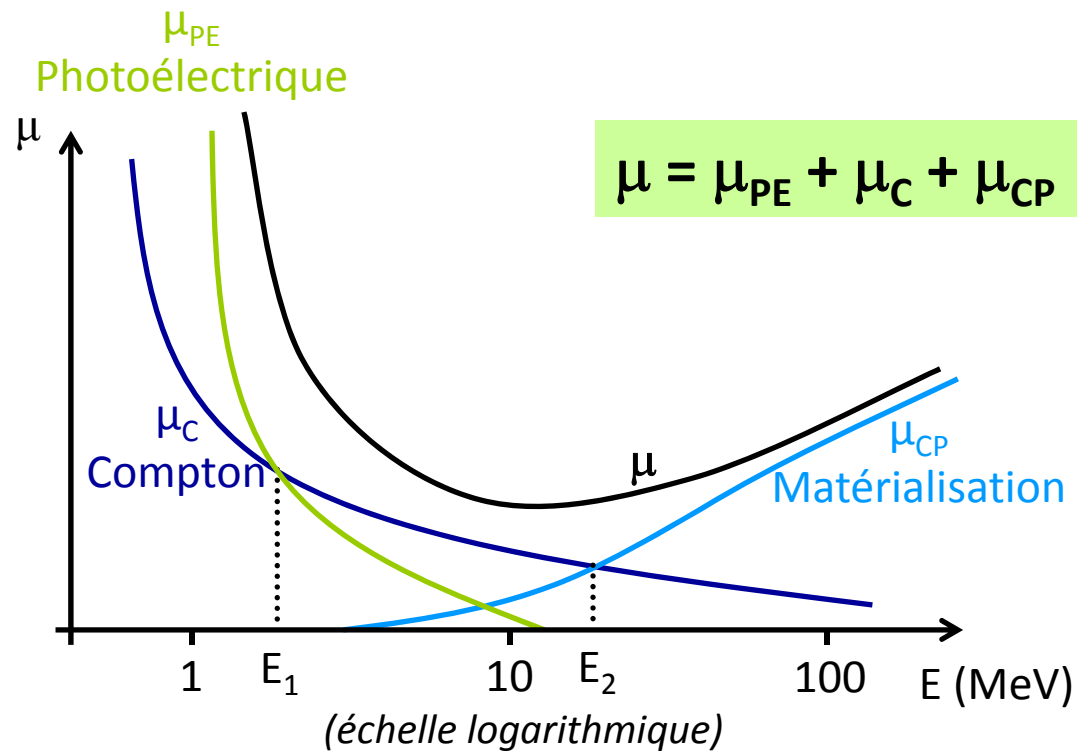


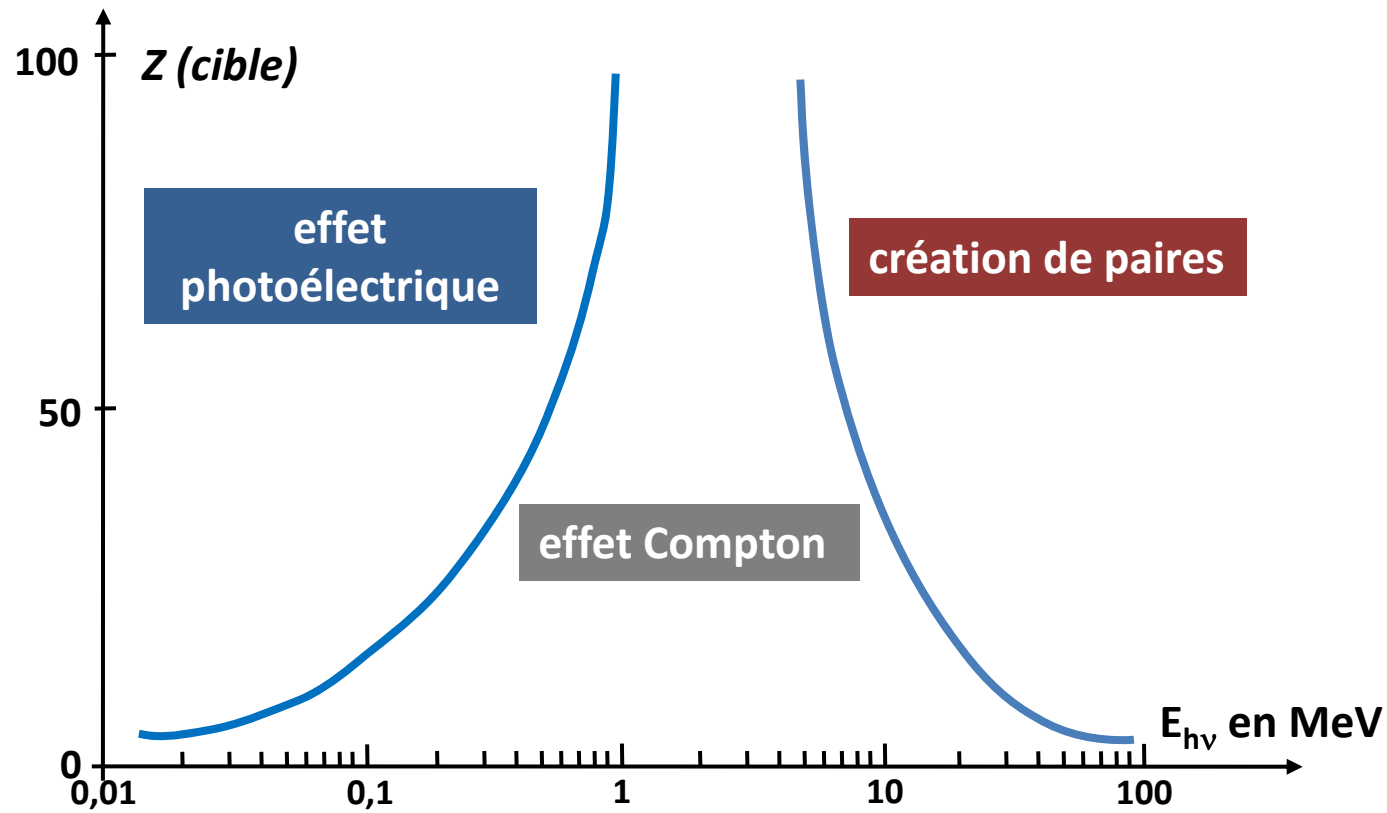
2.2.6 Domaine de prédominance

● phénomènes prépondérants

- effet photoélectrique (PE)
- effet Compton (C)
- création de paires (CP)

● coefficient d'atténuation linéique





domaines de prédominance en fonction de Z (cible) et de E ($h\nu$ incident)

3. Interaction des neutrons

● neutron: **charge nulle**

✱ interaction avec électrons négligeable

✱ interaction avec noyau

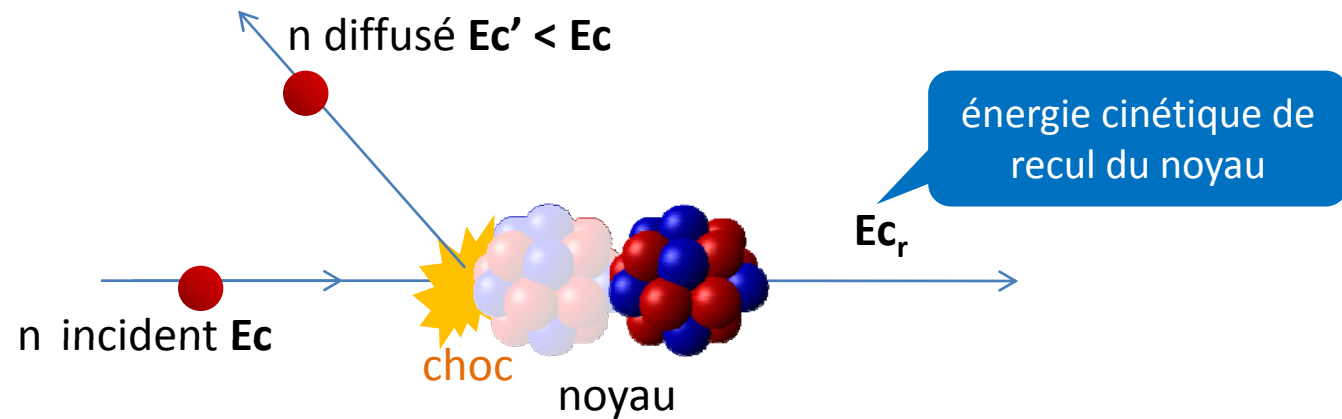
● **4 classes de neutrons**

Neutrons	Énergie	types d'interaction
lents ou thermiques	$E < 0,1 \text{ keV}$	$E < 10 \text{ keV}$ capture
intermédiaires	$0,1 \text{ keV} < E < 20 \text{ keV}$	
rapides	$20 \text{ keV} < E < 10 \text{ MeV}$	$E > 10 \text{ keV}$ diffusion
haute énergie	$E > 10 \text{ MeV}$	

3.1 Neutrons rapides

3.1.1 Diffusion élastique

- choc neutron – noyau: transfert énergie cinétique neutron vers noyau



- noyau en mouvement potentiellement ionisant

- ionisations indirectes dangereuses

- probabilité choc neutron – noyau faible

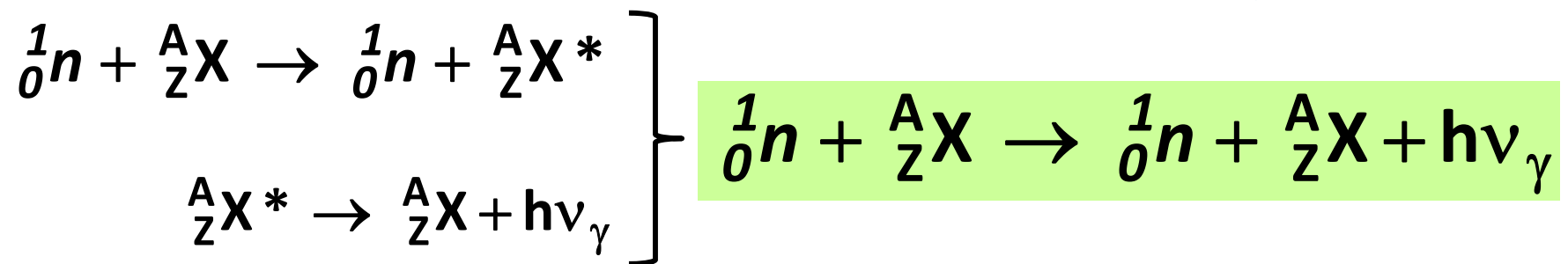
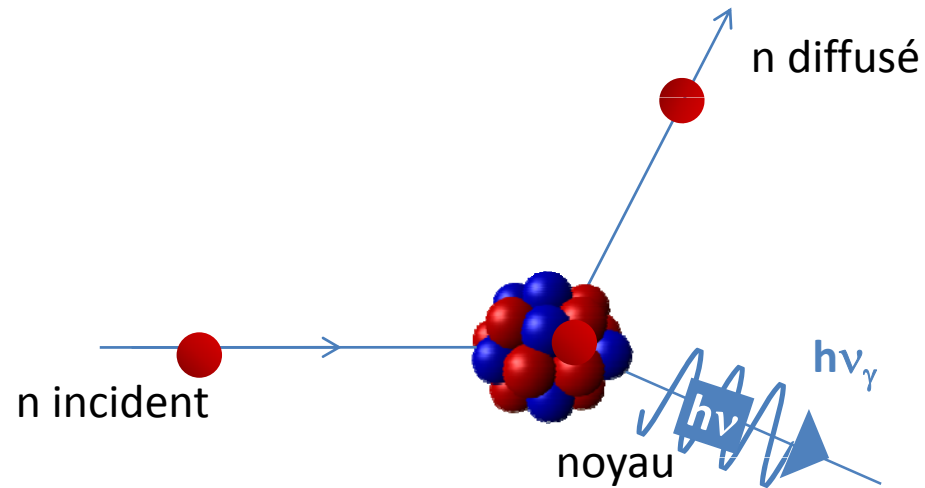
- neutrons rapides très pénétrants

3.1.2 Diffusion inélastique

● choc neutron – noyau: capture neutron par noyau puis e⁻ relâché

● noyau cible **état excité**

● **émission photon γ**

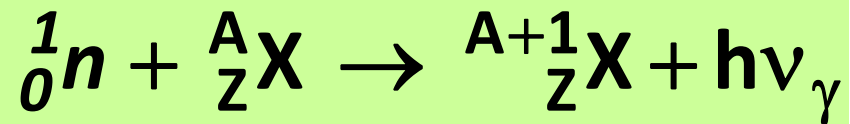
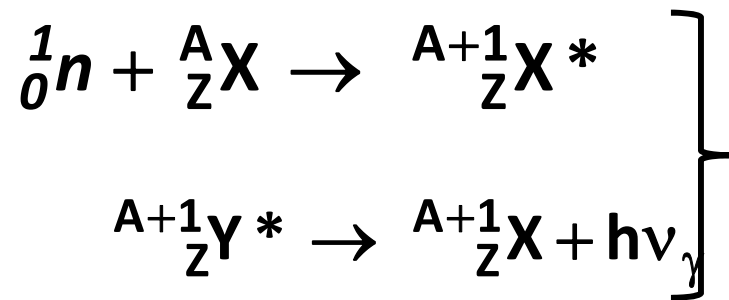
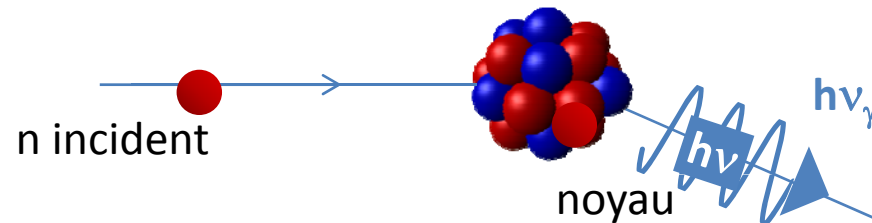


● photons γ émis ionisant

3.2 Neutrons lents

3.2.1 Capture radiative

- capture neutron par noyau: noyau état excité → stabilisation par émission $h\nu_\gamma$



3.2.2 Capture non radiative

- capture neutron par noyau: stabilisation par émissions β ou fission
- processus de production radioéléments émetteurs β^-

4. Interactions des particules chargées

- interaction avec les électrons
- interaction avec le noyau

- particules « lourdes » (protons, α , fragments de fission)
- particules légères (électrons)

4.1 Nature de l'interaction

4.1.1 Interaction avec le nuage électronique

● 2 cas:

☀ énergie transférée à l'e⁻ $E > W_L \rightarrow$ expulsion e⁻ cortège électronique

● atome ionisé: source secondaire d'ionisation

☀ énergie transférée à l'e⁻ $E < W_L \rightarrow$ atome état excité

● retour état stable par **dissipation de l'énergie** sous forme **thermique** ou par **émission hv peu énergétiques**

● **pouvoir d'arrêt du milieu:** perte d'énergie de la particule par unité de longueur

$$-\frac{dE}{dx} \propto z^2 \frac{m}{E} N$$

☀ z : charge de la particule

☀ m : masse de la particule

☀ E : énergie de la particule

☀ N : nombre d'e⁻ du milieu par unité de volume

☀ **Transfert d'Énergie Linéique (TEL):** énergie transférée par la particule par unité de longueur

☀ **Densité Linéique d'Ionisation (DLI):** nombre de paire d'ions créés par unité de longueur

$$\text{TEL} = \text{DLI} \times \omega$$

énergie moyenne
par ionisation

4.1.2 Interaction avec le noyau

● passage proximité noyau: **interactions électrostatiques** → **particules déviées**

✿ **perte énergie cinétique** particule incidente

✿ **émission rayonnement** électromagnétique **de freinage** ou **Bremsstrahlung**

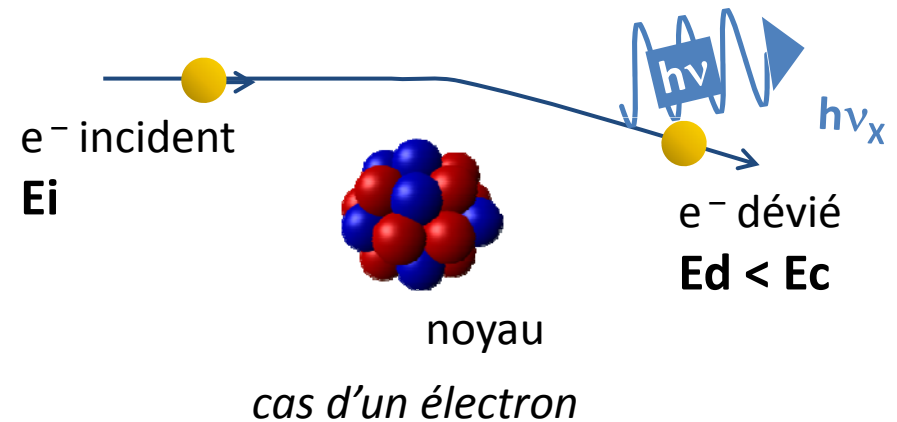
● *production des rayons X*

$$E_p = E_i - E_d$$

✿ E_p énergie $h\nu$ émis

✿ E_i énergie particule incidente

✿ E_d énergie particule déviée



● **pouvoir d'arrêt du milieu:** dissipation d'énergie par unité de temps

$$\frac{dE}{dt} \propto \left(\frac{z Z}{m} \right)^2$$

✿ z : charge de la particule

✿ Z : charge du noyau

✿ m : masse de la particule

énergie est d'autant plus faible que la particule incidente est lourde

● importance des interactions par ionisation et par rayonnement de freinage

$$TEL_{freinage} \cong \frac{ZE}{800} TEL_{ion}$$

✿ E : énergie de la particule (en MeV)

✿ Z : charge du noyau

✿ dans l'eau (Z = 8):

rayonnement 1 MeV (très énergétique) $TEL_{freinage} = 1\%$

4.2 Nature de la particule

4.2.1 Particules légères (électrons)

- pertes d'énergie par ionisation ou freinage

- ✿ $E < 100 \text{ MeV}$ essentiellement par ionisation

- trajectoires: lignes brisées → changements de direction transferts d'énergie



- portée ou longueur de pénétration → distance maximale parcourue dans la direction du flux incident

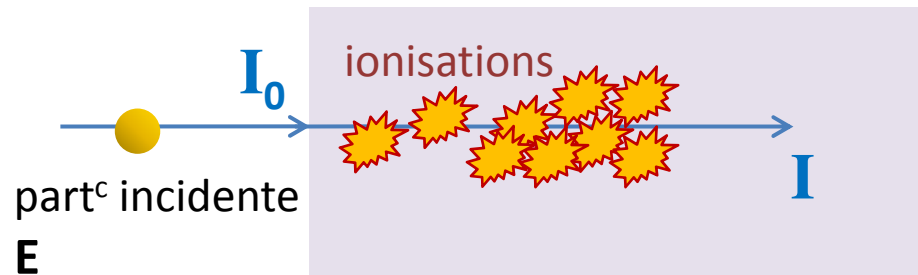
- ✿ dans l'eau, la longueur de pénétration est donnée par:

$$L(\text{en cm}) \cong \frac{E(\text{en MeV})}{2}$$

- positons → annihilation

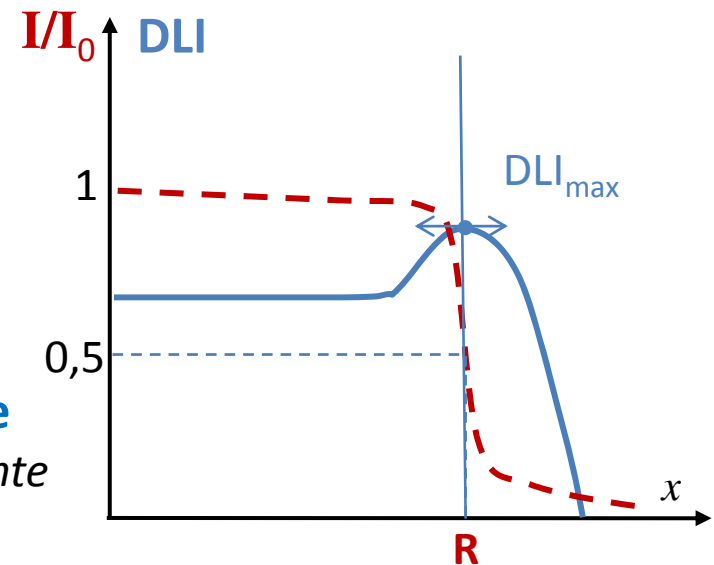
4.2.1 Particules lourdes (p, α, fragments de fission)

- interaction avec nuage électronique prépondérante (ionisation)
- **particules massives**: interactions faible impact sur trajectoire



● **courbe de Bragg**:

- parcours particule → **perte énergie cinétique**
 - *vitesse diminue – temps d'interaction augmente*
- **TEL et DLI** augmente
 - *jusqu'à perte énergie cinétique*



variation densité linéique d'ionisation

- **parcours moyen R**: épaisseur nécessaire pour atténuer de moitié le flux incident I_0

$$R \propto \frac{m}{z^2}$$

- z : charge de la particule
- m : masse de la particule

- ordre de grandeur **micromètre** (tissus biologiques)