

Département de Physique
Master International :
Physique Appliquée et Ingénierie Physique

Méthodes Spectroscopiques
Abdelhai Rahmani

Année universitaire 2019-2020

- 1. Interaction rayonnement matière**
- 2. Généralités sur la spectroscopie**
- 3. Spectroscopie Infrarouge**
- 4. Spectroscopie Raman**
- 5. Dynamique vibrationnelle dans les matériaux**
- 6. Introduction à la théorie des groupes**

1. Types de rayonnement

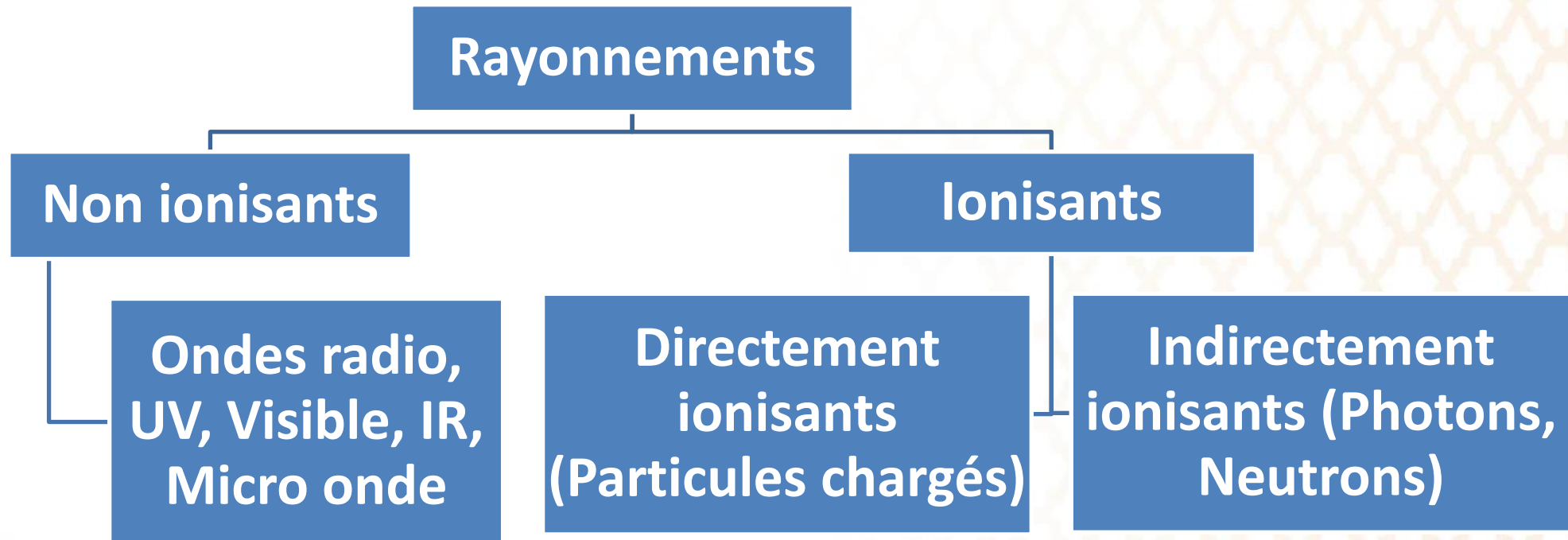
2. Types d'interactions

- ✓ Interaction des photons X et γ
- ✓ Interaction des neutrons
- ✓ Interaction des particules chargées

3. Les différents modes d'ionisation

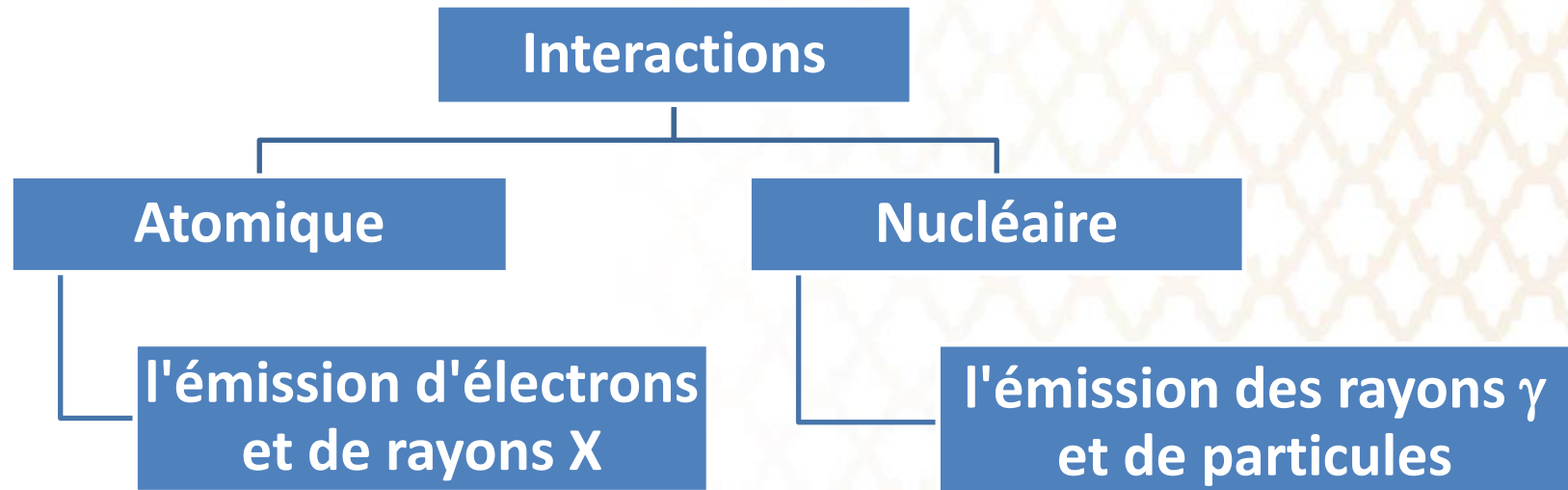
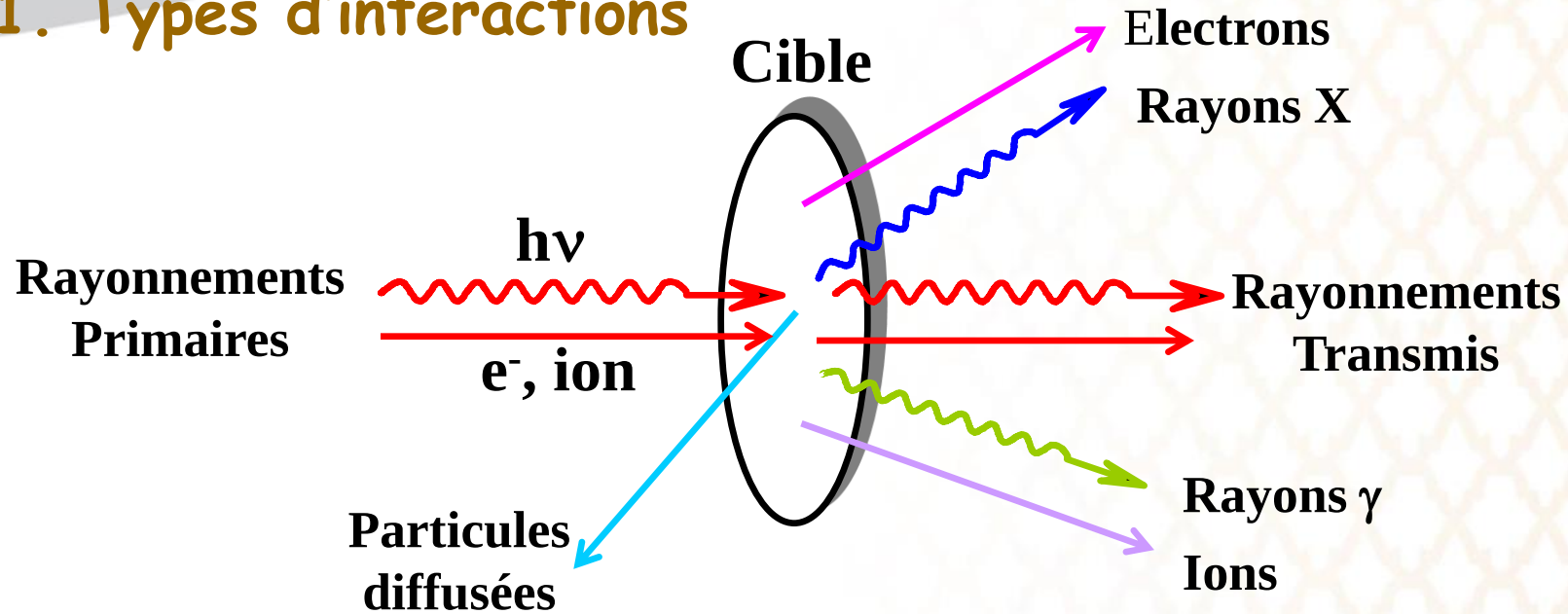
- ✓ Ionisation par des protons
- ✓ Ionisation par radiations électromagnétiques
- ✓ Comparaison entre les différents modes d'ionisation

TYPES DE RAYONNEMENT



TYPES D'INTERACTIONS

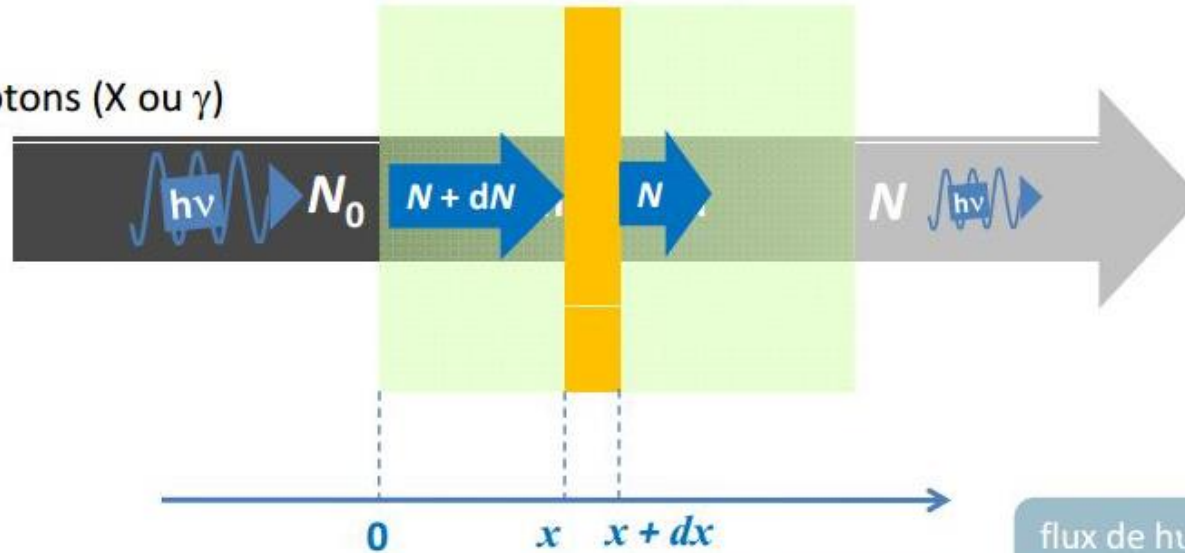
1. Types d'interactions



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

TYPES D'INTERACTIONS

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

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

- **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*)

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

- **autre expression de l'atténuation**:
$$\left. \begin{array}{l} N = N_0 e^{-\mu x} \\ CDA = \frac{\ln(2)}{\mu} \end{array} \right\} N = N_0 e^{-\ln(2) \frac{x}{CDA}}$$

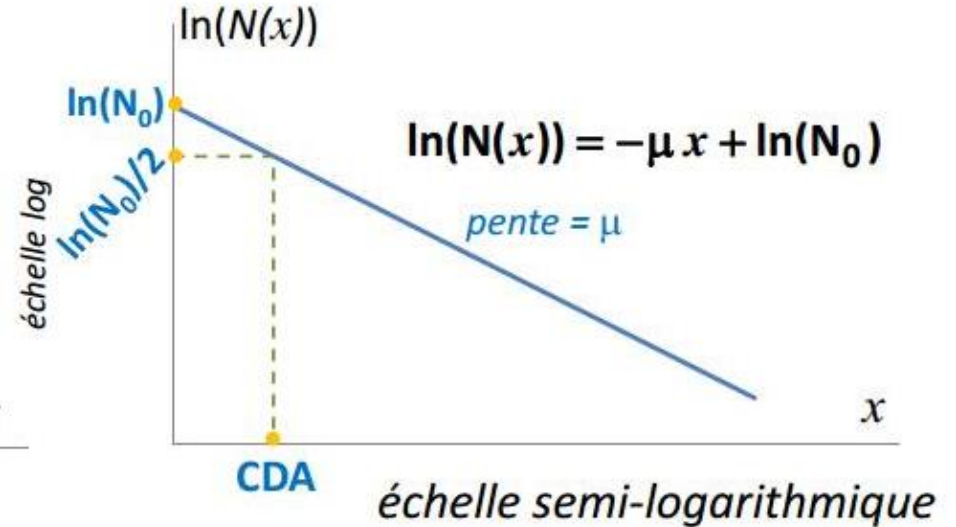
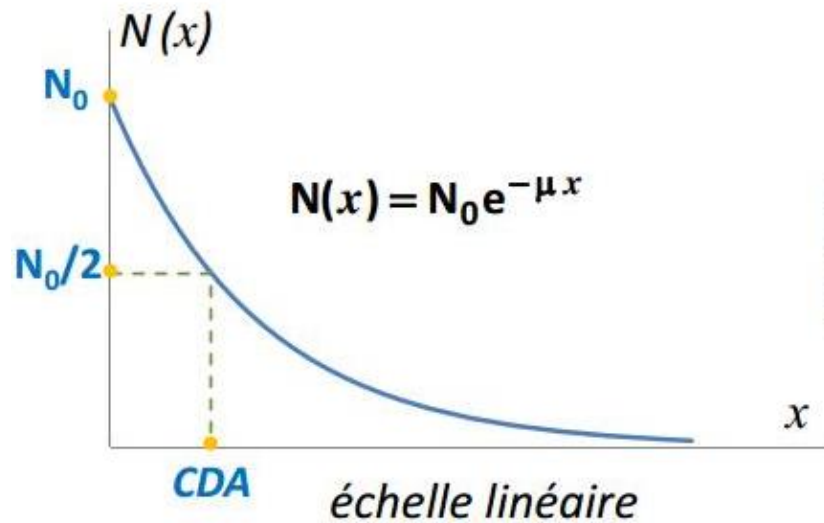
✿ atténuation facteur 1024 (#1000):

écran épaisseur $x = 10x_{CDA}$

$$\boxed{N = \frac{N_0}{2^{x/CDA}}}$$

TYPES D'INTERACTIONS

● représentation graphique

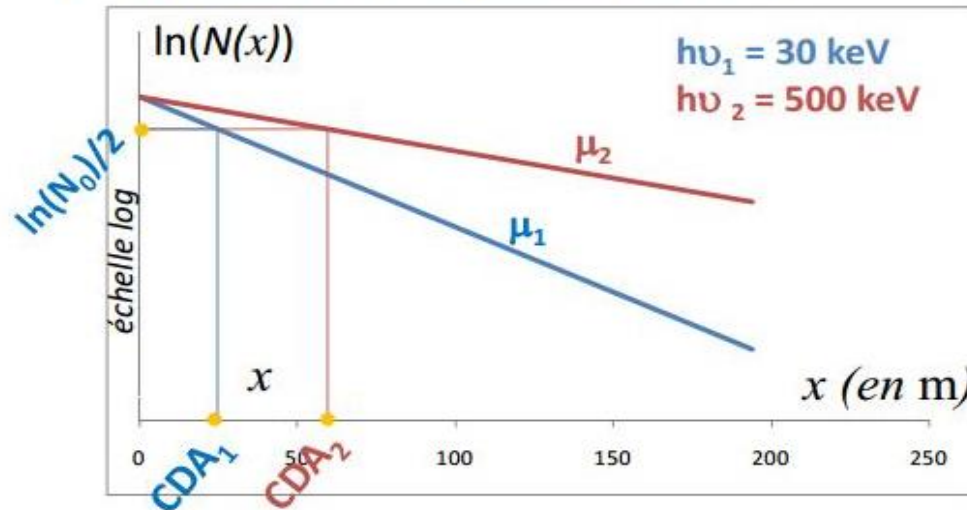


● ordre de grandeur CDA:

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

TYPES D'INTERACTIONS

• μ dépend de l'énergie des photons

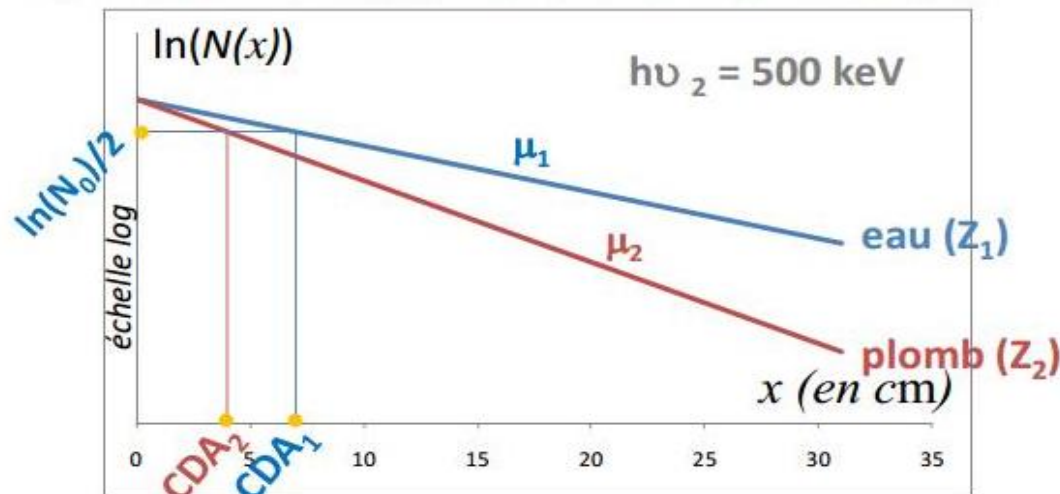


• $h\nu_2 > h\nu_1$

• $\mu_1 > \mu_2$

• $CDA_2 > CDA_1$

• 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

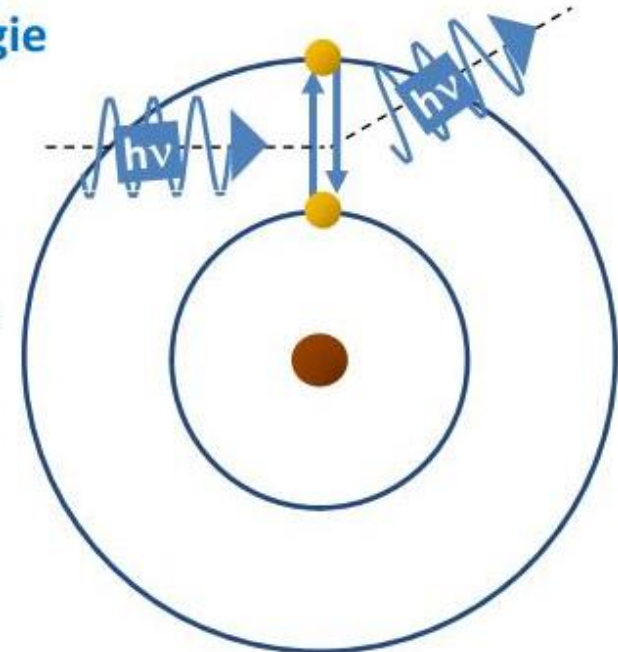
TYPES D'INTERACTIONS

2.2.1 Diffusion Thomson-Rayleigh (diffusion simple)

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

- **déviat 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 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} : $E_{c_e} = E_i - E_d - W_K$**

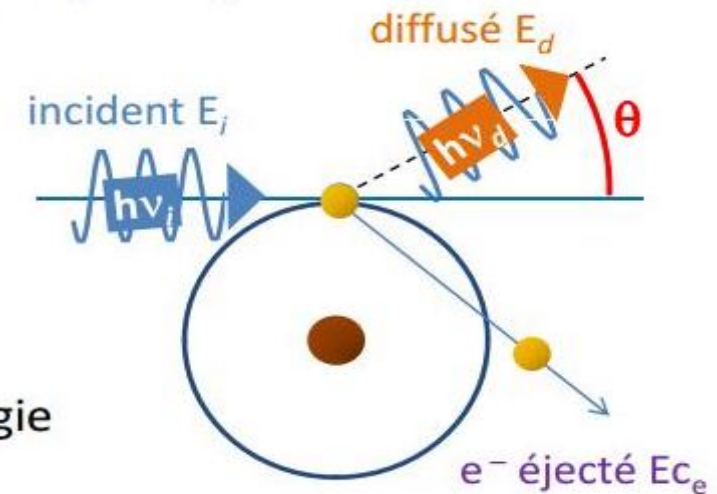
 - relation entre E_i et E_d :

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

- **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 $\rightarrow$ disparition photon

- e^- éjecté (*couche interne*)

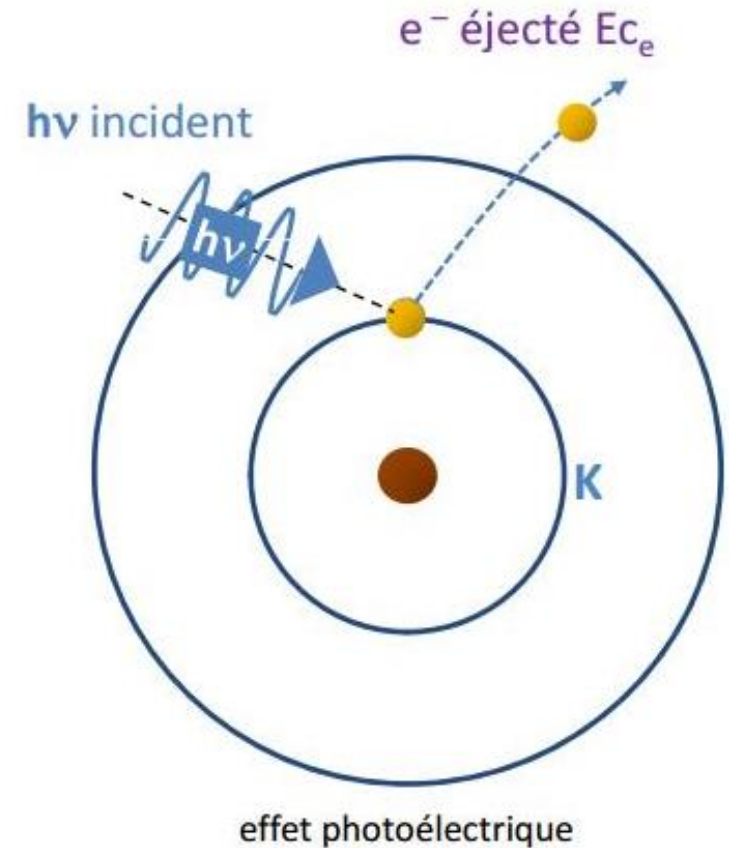
$$E_{c_e} = h\nu - W_K$$

énergie cinétique électron

énergie de liaison

- électron éjecté $\rightarrow$ source secondaire rayonnement ionisant

- réarrangement cortège électronique



TYPES DE RAYONNEMENT

● 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

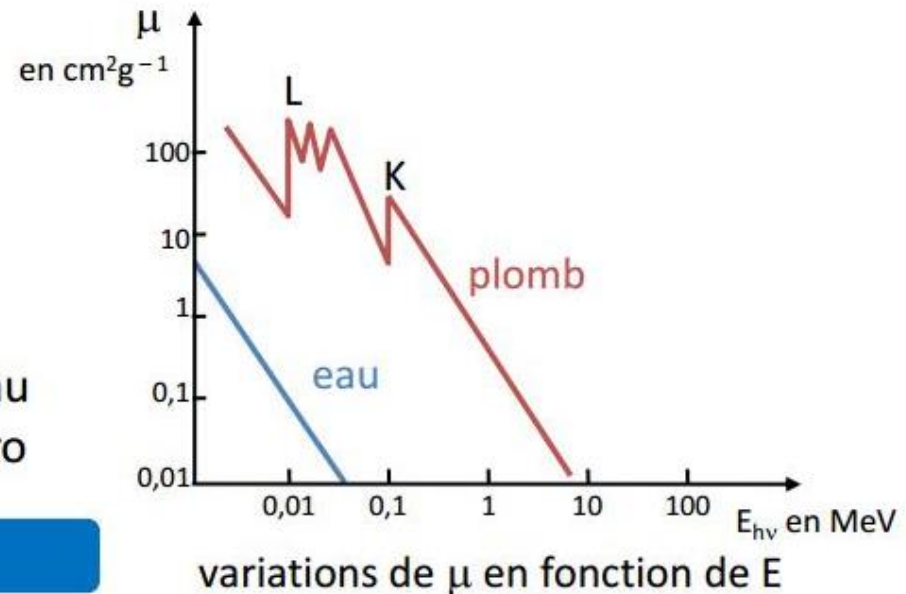
nombre d'atome par unité de volume

- **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)

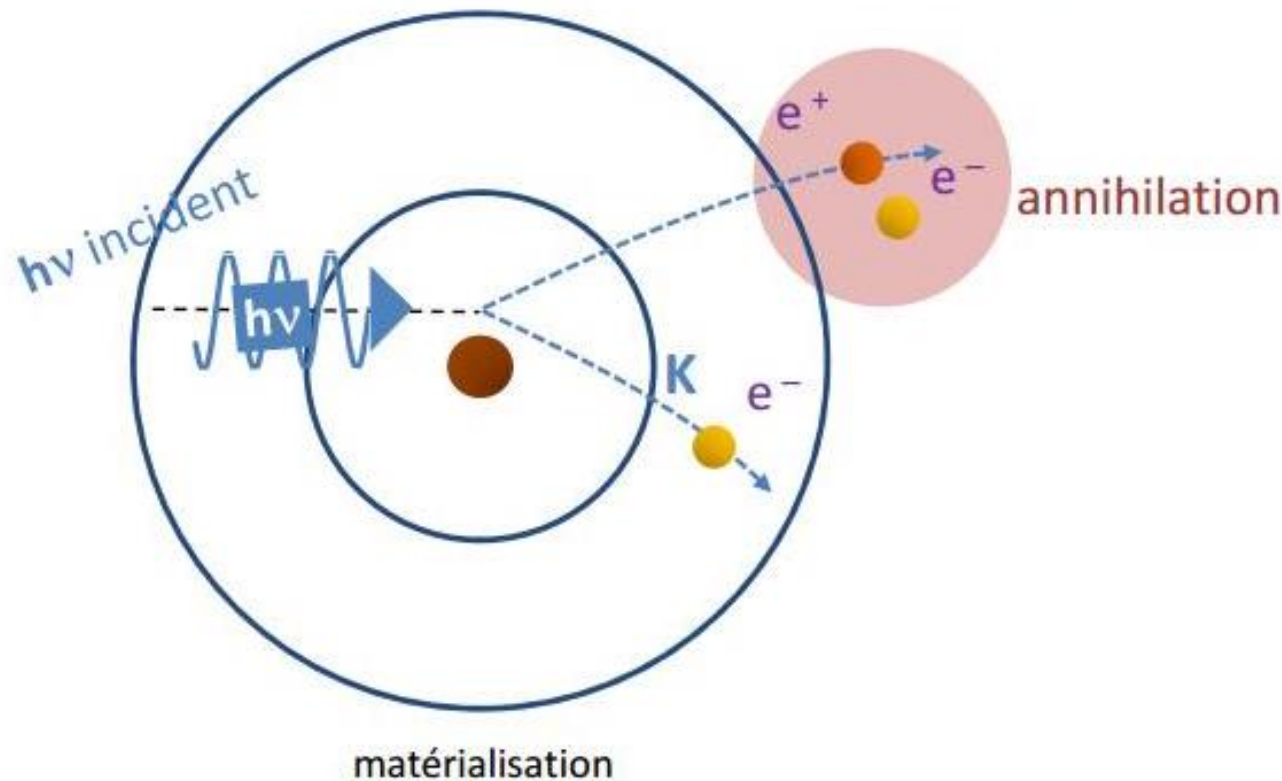


- **effet PE prépondérant milieu dense** (Z élevé) et **photon faible énergie** (10 à 50 keV)

2.2.4 Matérialisation

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

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

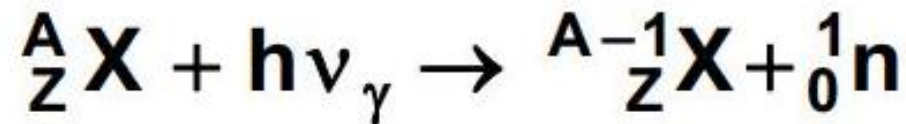


2.2.5 Réaction photonucléaire

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

● noyau état excité

● retour stabilité $\rightarrow$ désintégration (*génération neutron*)



● formation isotope radioactif noyau initial

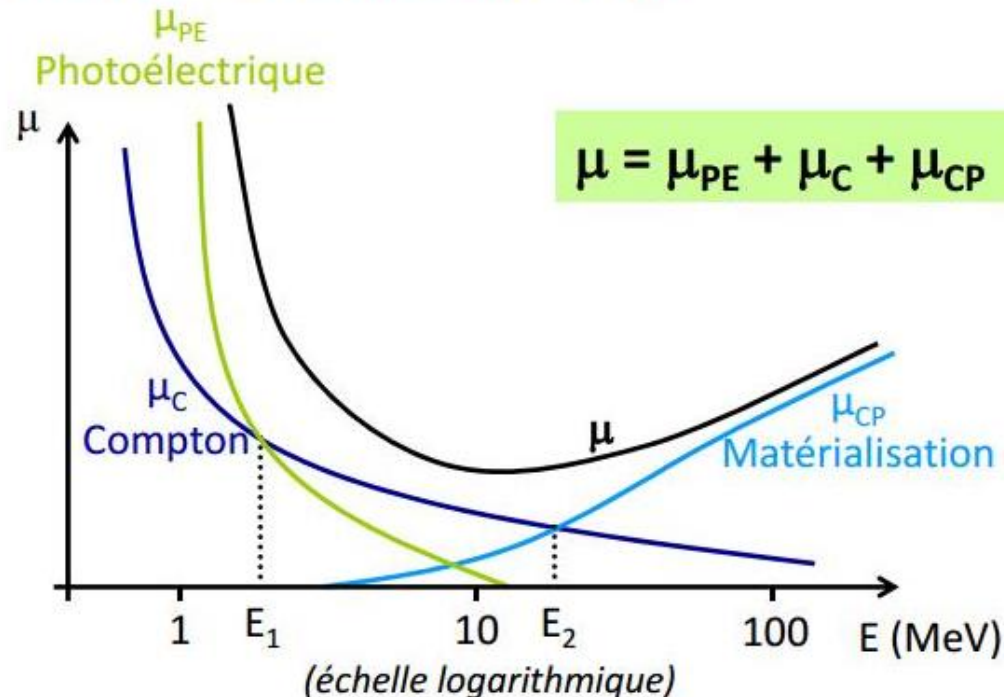


2.2.6 Domaine de prédominance

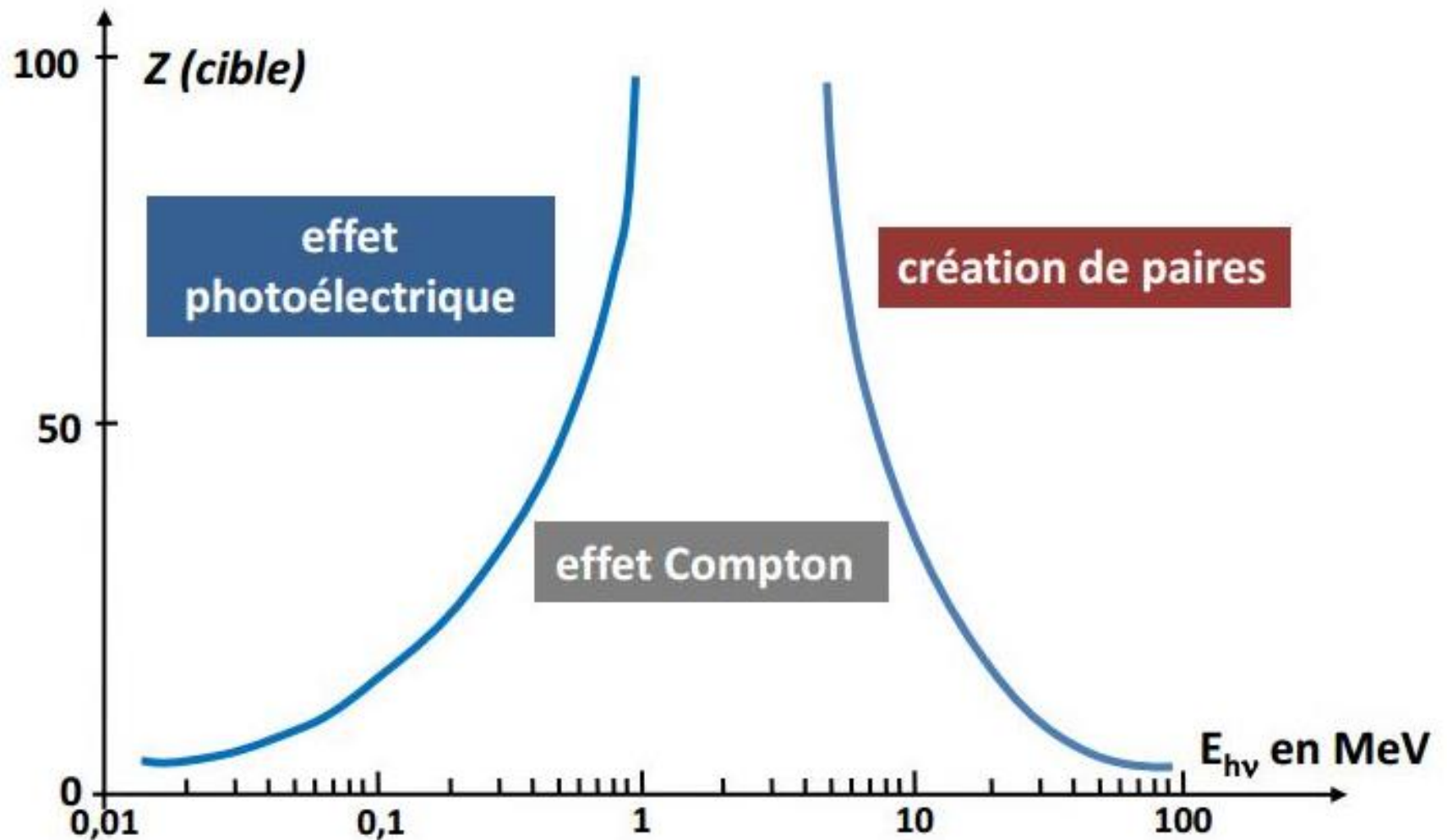
● phénomènes prépondérants

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

● coefficient d'atténuation linéique



TYPES DE RAYONNEMENT



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

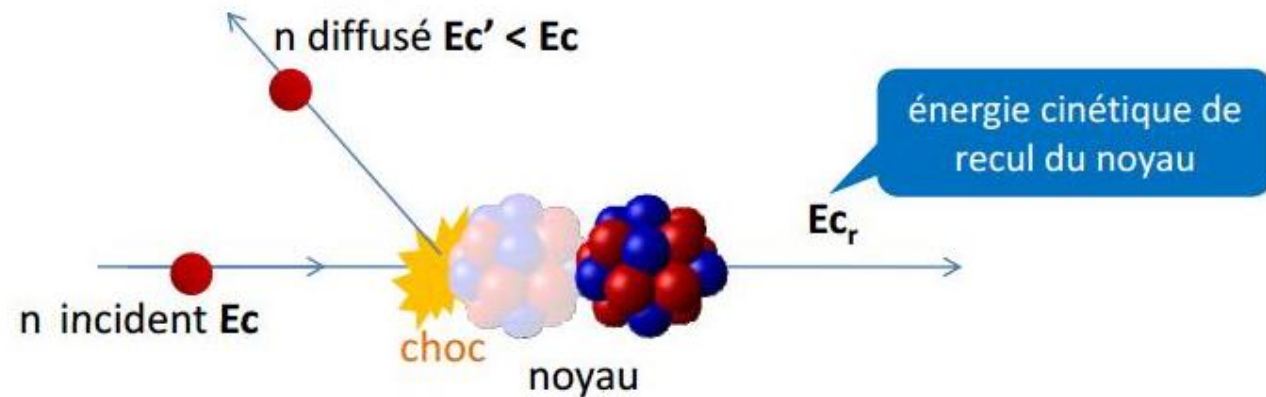
● **4 classes de neutrons**

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



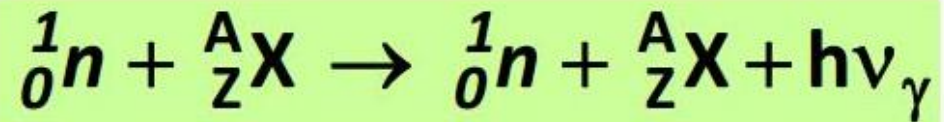
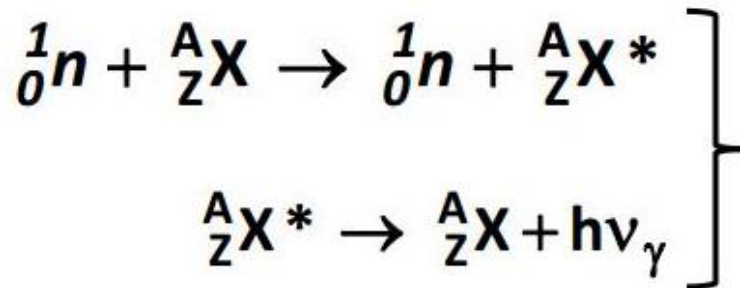
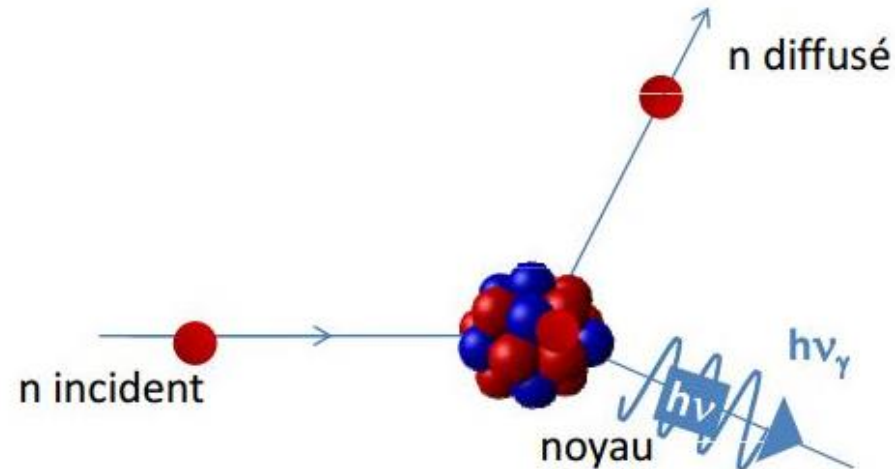
- noyau en mouvement potentiellement ionisant
 - ✱ ionisations indirectes dangereuses
- probabilité choc neutron – noyau faible
 - ✱ neutrons rapides très pénétrants

3.1.2 Diffusion inélastique

● choc neutron – noyau: capture neutron par noyau puis e^- relâché

● noyau cible **état excité**

● **émission photon γ**

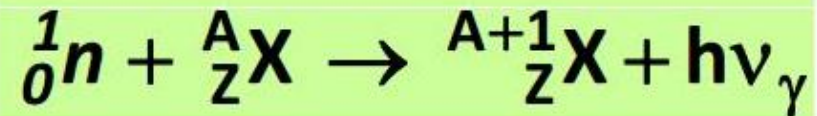
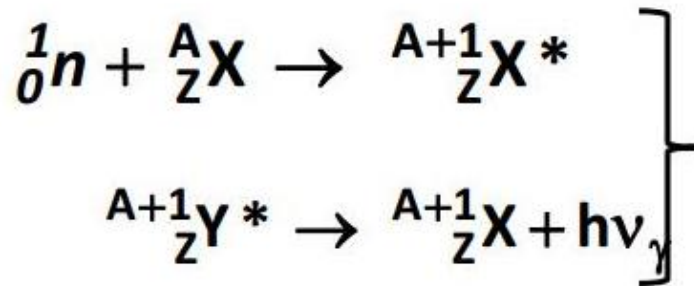
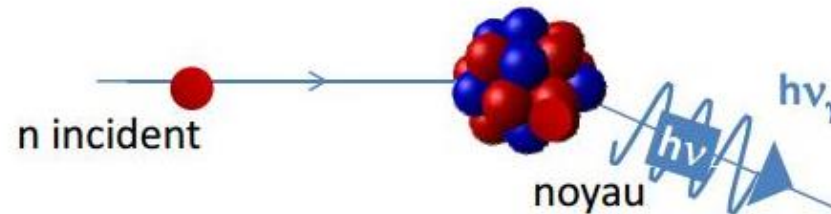


● photons γ émis ionisant

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 $h\nu$ 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

$$TEL = DLI \times \omega$$

énergie moyenne

TYPES DE RAYONNEMENT

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**

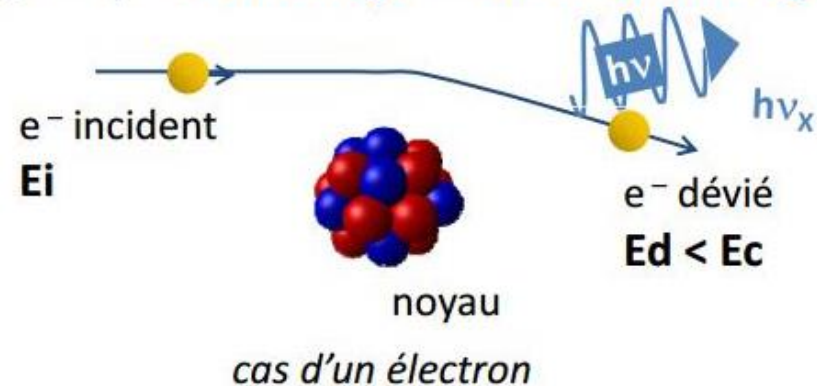
● *production des rayons X*

$$E_p = E_i - E_d$$

☼ 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

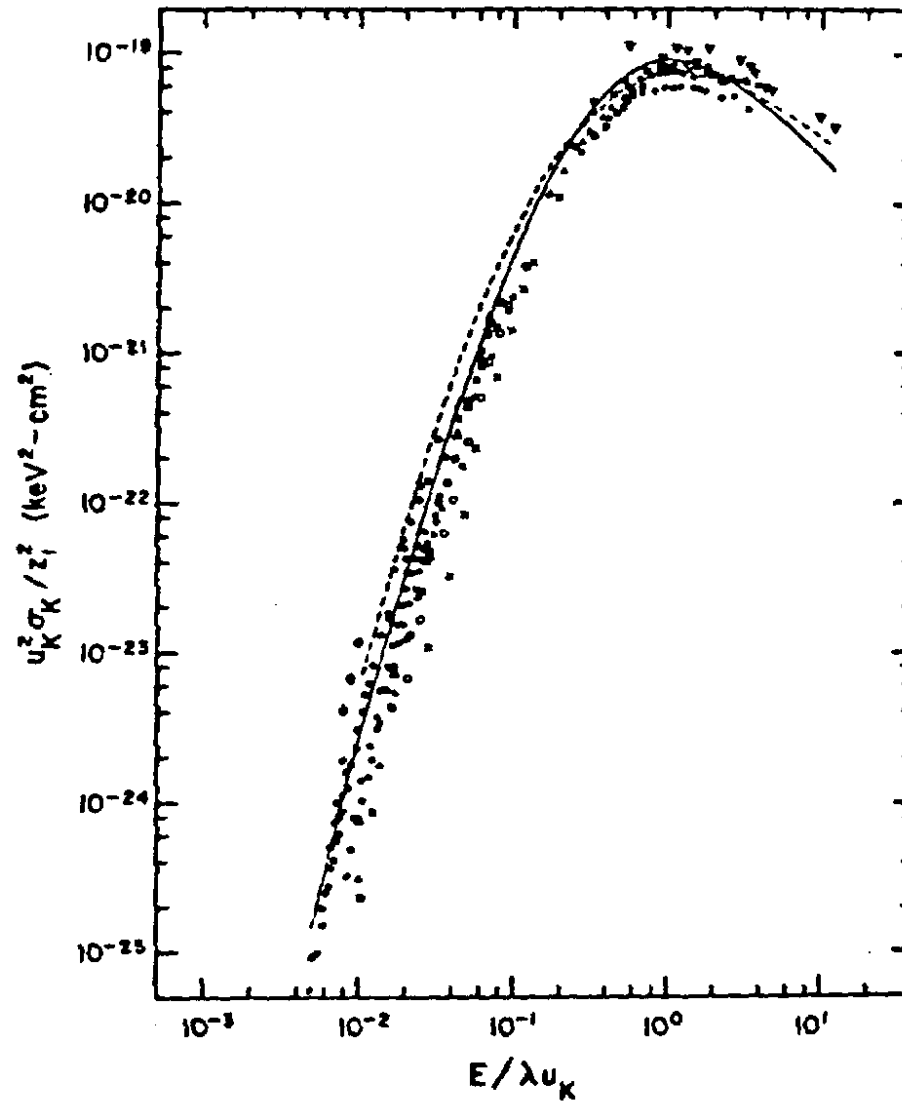
LES DIFFÉRENTS MODES D'IONISATION

L'ionisation des couches atomiques internes peut avoir lieu selon différents processus. Elle est produite en bombardant la cible par des particules chargées d'énergie suffisante (électrons, ions) ou en l'irradiant par des radiations électromagnétiques. La probabilité pour qu'un atome s'ionise s'appelle "Section efficace d'ionisation", notée σ_I , elle est exprimée en cm^2 ou en barn ($1\text{barn}=10^{-24}\text{cm}^2$). En pratique, on utilise la section efficace de production de rayons X donnée par :

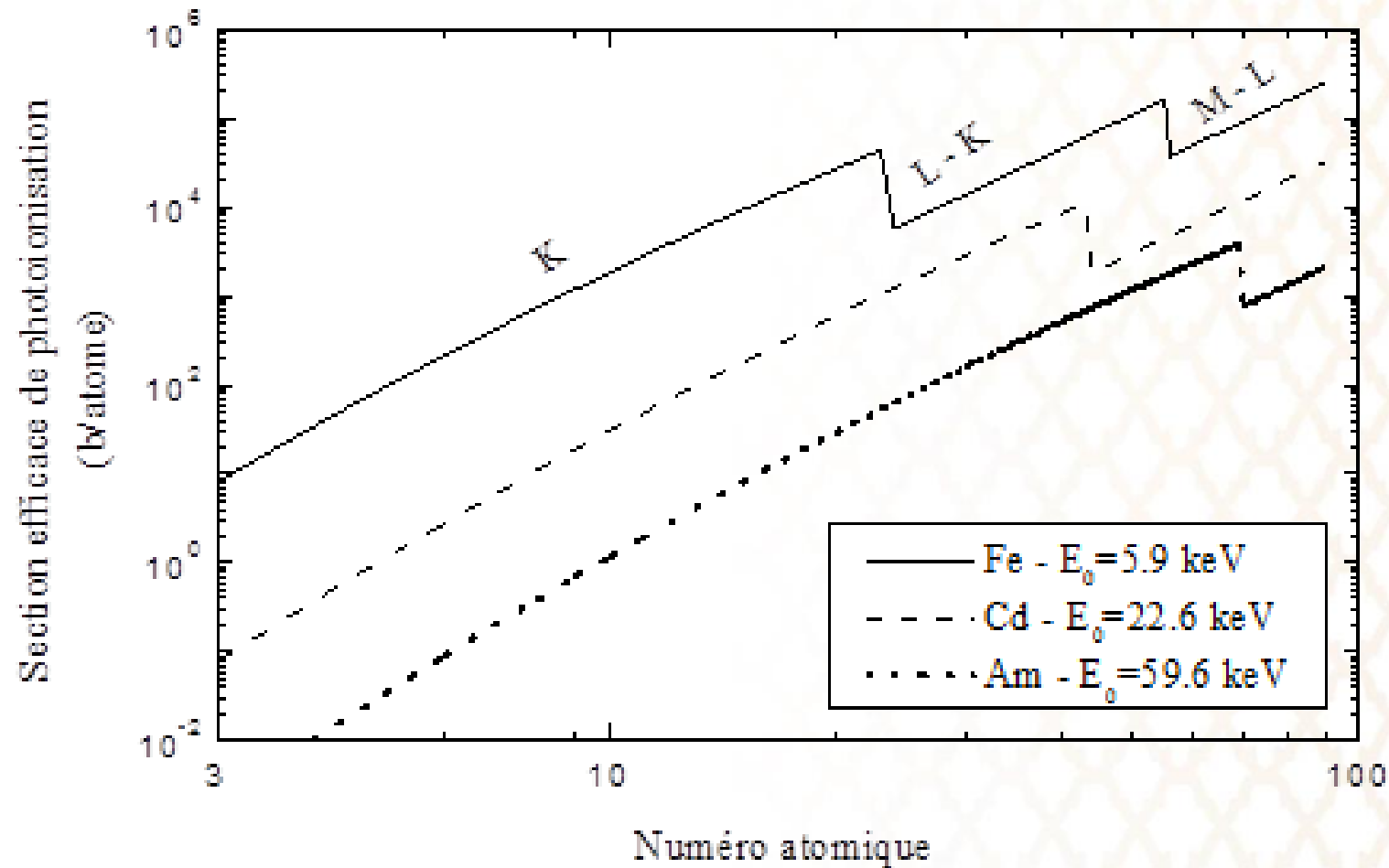
$$\sigma_{XK} = \sigma_I \omega_K$$

Où ω est le rendement de fluorescence. σ_{XK} des sections efficaces de production des rayons X par la couche K,

IONISATION PAR DES PROTONS



IONISATION PAR RADIATIONS ÉLECTROMAGNÉTIQUES



COMPARAISON ENTRE LES DIFFÉRENTS MODES D'IONISATION

