

Résumé - Chapitre 2 :

Interaction rayonnement-matière

Définition :

TEM (Transmission Electron Microscopy) : Utilise les électrons et leur diffraction pour analyser les défauts et déterminer la structure atomique des matériaux.

OM (Optical Microscope) : Utilise la lumière visible pour observer des structures microscopiques. Moins résolu que l'EM.

FIB (Focused Ion Beam) : Faisceau d'ions pour usinage et analyse à l'échelle nanométrique. Utilisé pour la préparation d'échantillons TEM et tomographie (reconstruire un volume)

ESEM (Environmental SEM) : Présence d'un environnement gazeux dans un SEM, préservant les échantillons sensibles au vide (ex. cellules biologiques).

In situ : Observation en temps réel de l'évolution d'échantillons sous contraintes (par exemple : thermo-mécaniques).

HRTEM (High-Resolution TEM) : Imagerie à très haute résolution permettant de visualiser les colonnes atomiques via le contraste de phase.

EBSD (Electron Backscatter Diffraction) : Analyse des électrons rétrodiffusés et diffractés qui permet de faire des cartographies d'orientation cristallographique..

STEM (Scanning TEM) : Imagerie avec contraste Z et épaisseur (t), combinant balayage et transmission d'électrons.

EDX/EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) : Analyse chimique locale et cartographie élémentaire via détection des rayons X émis par l'échantillon.

Chapitre 2 :

Dans un microscope électronique, l'ordre de grandeur de la longueur d'onde du faisceau est de l'ordre du **picomètre (pm)**. Un rayonnement dépend de trois propriétés principales :

- La longueur d'onde
- L'énergie des particules ou du rayonnement
- Le mode d'interaction avec la matière

Les relations suivantes décrivent ces dépendances :

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

où E est l'énergie du rayonnement, $h = 6.63 \times 10^{-34}$, J·s est la constante de Planck, ν est la fréquence, c la vitesse de la lumière, et λ la longueur d'onde

La fonction d'onde d'une particule est donnée par l'expression :

$$\psi = e^{2\pi i \vec{k} \cdot \vec{r}}$$

où ψ est la fonction d'onde, et le vecteur d'onde \vec{k} a une norme $|\vec{k}| = \frac{1}{\lambda}$, avec λ la longueur d'onde. La valeur du vecteur d'onde k varie en fonction de la longueur d'onde, qui elle-même dépend de la tension d'accélération (V_{acc}). Il est essentiel de distinguer entre particules relativistes et non relativistes,

car les équations changent en fonction du régime d'énergie.

Pour une particule non relativiste (comme les neutrons), la longueur d'onde est donnée par :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV}}$$

où m_0 est la masse au repos de la particule, et V est la tension d'accélération appliquée.

Pour une particule relativiste, la longueur d'onde s'exprime par :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_0eV \left(1 + \frac{eV}{2m_0c^2}\right)}}$$

Dans le cas des électrons, on distingue deux régimes selon la tension d'accélération (V_{acc}) :

- Particules non relativistes : lorsque $V_{acc} < 100$ keV.
- Particules relativistes : lorsque $V_{acc} > 100$ keV.

Pour les électrons relativistes, la longueur d'onde peut être approximée par :

$$\lambda_e = \frac{1.33 \times 10^{-9}}{\sqrt{E} \sqrt{1 + \frac{E}{2E_0}}} \approx \frac{1.33 \times 10^{-9}}{\sqrt{V_{acc} + 10^{-6}V_{acc}^2}}$$

où E_0 est l'énergie au repos de l'électron (environ 511 keV), et V_{acc} est la tension d'accélération appliquée.

Cette valeur est cruciale dans le domaine de la microscopie électronique car lorsqu'on analyse un cliché de diffraction et aussi une image, cela nous permet d'être quantitatif. En utilisant des électrons, il est désormais possible d'observer des structures à l'échelle atomique, bien en dessous de ce qui est visible avec un microscope optique traditionnel. Les atomes, par exemple, sont de l'ordre de grandeur de l'Ångström (Å). Les différents types de microscopes électroniques utilisent des mécanismes variés pour exploiter les interactions entre les électrons et l'échantillon. Ces interactions peuvent inclure la diffusion élastique et inélastique, les rayonnements X secondaires ou la réflexion des électrons, ce qui permet de révéler des informations structurales et chimiques très fines sur les échantillons étudiés.

Interaction rayonnement-atome

Rappels des types d'interaction entre un rayonnement et un atome

- **Élastique** : Aucune perte d'énergie, pas de transfert énergétique lors de l'interaction.
- **Inélastique** : Perte d'énergie suite à une collision ou un freinage (Exemple: Bremsstrahlung).
- **Ionisation** : Le rayonnement éjecte un électron de son orbite atomique.
- **Absorption** : Toute l'énergie du rayonnement est transférée à un électron.
- **Rayonnement électromagnétique** : Lorsqu'un photon interagit avec un atome d'un matériau, il peut y avoir éjection de l'électron secondaire donnant lieu à une ionisation, cet état instable provoque ainsi la relaxation (redescende d'un électron d'une couche externe sur une couche interne) rejetant de l'énergie sous la forme de rayons X (typiquement dans les isolants ou semi-conducteurs).
- **Rayonnement électronique** : Un électron incident peut interagir avec un autre électron, entraînant l'émission de rayons X ou d'électrons Auger lors de la relaxation atomique.

Interactions avec le rayonnement électromagnétique

	Élastique	Inélastique	Ionisation	Absorption
(A) Diffusion Rayleigh	x			
(B) Diffusion Compton		x	x	
(C) Effet photoélectrique			x	x

*La diffusion Rayleigh peut se produire à grande distance de la particule.

Interactions avec le rayonnement électronique

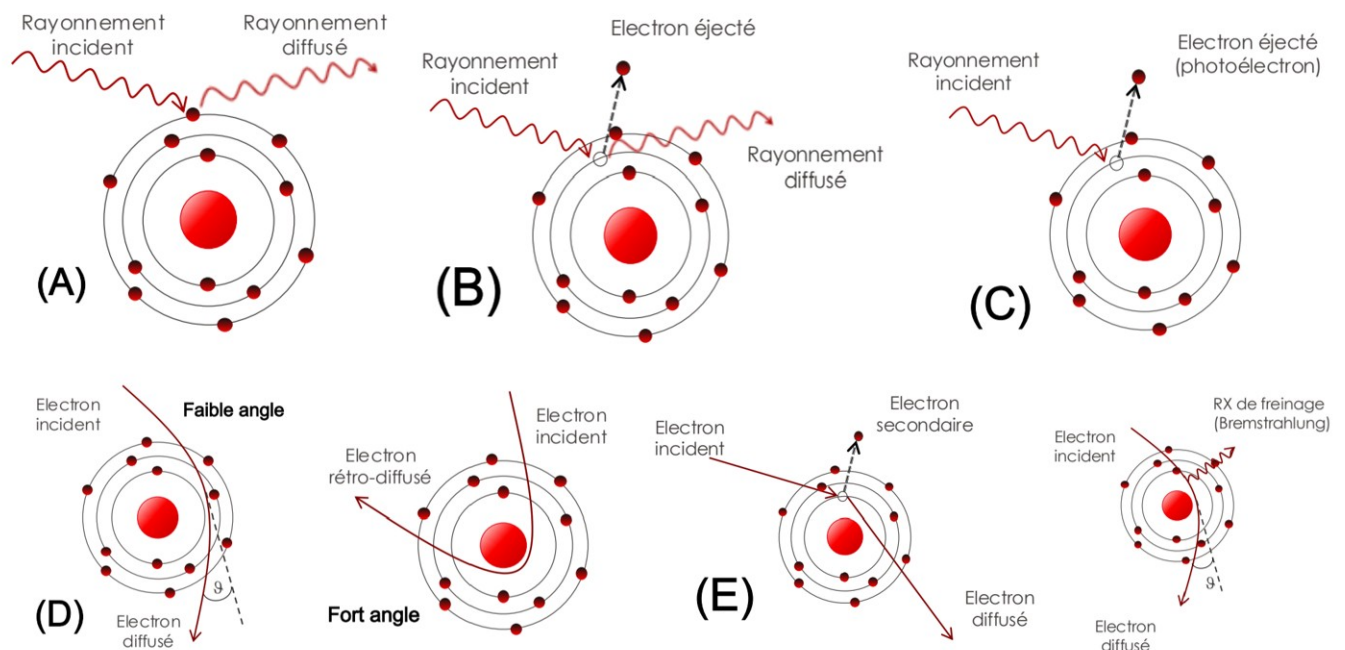
	Élastique	Inélastique	Ionisation	Absorption
(D) Diffusion élastique (Rutherford)*	x			
(E) Diffusion inélastique*		x	(x)	
(F) Interactions avec les plasmons*		x		
(G) Interaction avec les phonons *		x		

* À faible angle, l'électron interagit avec le nuage électronique ; à fort angle, avec le noyau.

* L'électron incident peut être ralenti par interaction avec le noyau.

* *Plasmons* : Oscillations collectives d'électrons libres lorsqu'un électron traverse un "gaz" d'électrons.

* *Phonons* : Oscillations atomiques autour de leur position initiale (exemple : effet ressort).



Interactions et relaxation

Lors de la relaxation atomique après une interaction, l'étude du spectre d'énergie permet de caractériser un élément :

- **Fluorescence X** : Un électron des couches externes remplit une vacance électronique, émettant des rayons X caractéristiques du matériau.
- **Fluorescence** : Un photon visible ou ultraviolet est émis par un électron excité lors de sa relaxation.

- **Emission Auger** : Un électron excité relâche son énergie en éjectant un autre électron, révélant des informations sur l'atome.
- **Cathodoluminescence** : Mesure la fluorescence visible, utile pour détecter les défauts modifiant l'énergie du gap.

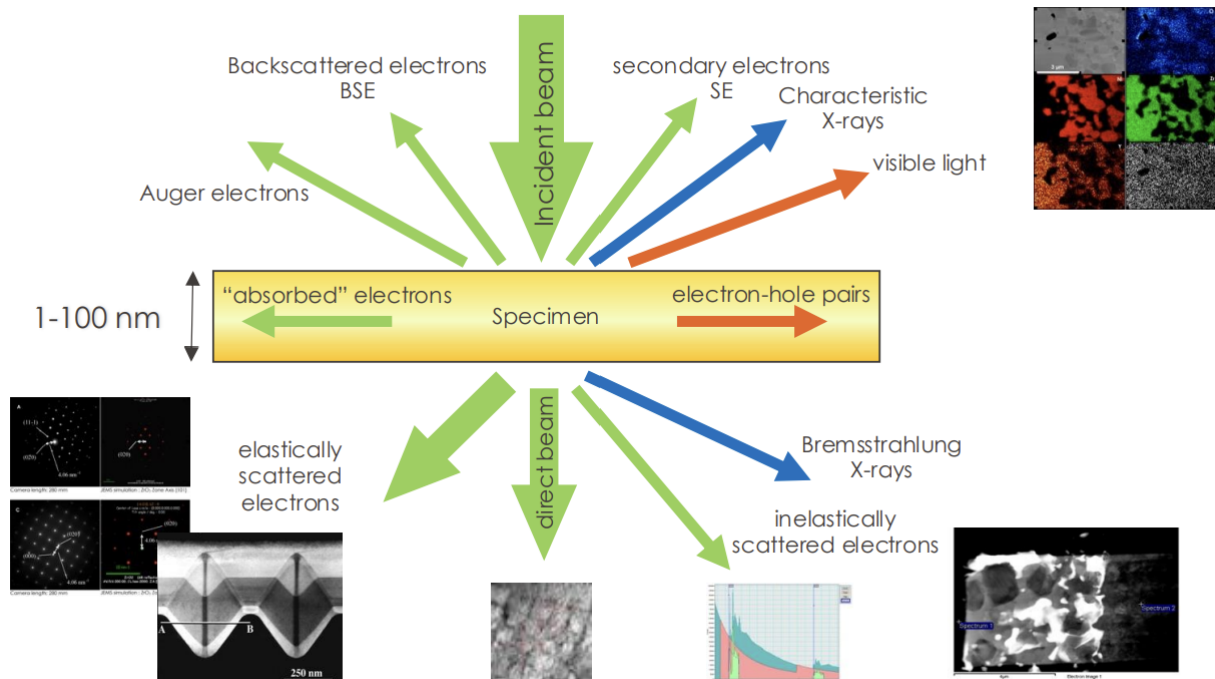
Electrons-matière

Elément massif

- Émissions électroniques (3 types d'électrons qui ressortent): électrons secondaires (faible en énergie et visible seulement si généré à la surface), électrons rétrodiffusé (proche de l'énergie incidente), électron Auger
- Émissions électromagnétiques : rayonnement X de freinage, rayonnement X caractéristique du matériau, rayonnement visible de cathodoluminescence.

Échantillon mince

Dans les échantillons minces, les électrons traversent plus facilement avec peu de pertes, permettant une observation directe des interactions, essentielle pour la microscopie électronique en transmission (TEM).



Diffusion des électrons

La **section efficace** (σ) mesure la probabilité qu'une particule incidente interagisse avec un atome. Elle se décompose en une partie élastique et inélastique :

$$\sigma_T = \sigma_{el} + \sigma_{inél}$$

Le nombre d'interactions par unité de volume est :

$$Q_T = \frac{N_0 \sigma_T \rho}{A}$$

avec N_0 (nombre d'Avogadro) et A (poids atomique).

Le **libre parcours moyen** (λ) représente la distance moyenne parcourue par un électron avant d'interagir :

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