

Interactions électrons/matière

I_ Transfert d'énergie

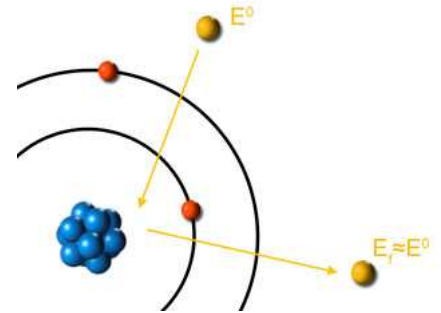
A. Interaction élastique

1) Principe

Lors d'une **interaction élastique**, l'**électron primaire** interagit avec un noyau des atomes du matériau. Il ne perd pas, ou peu d'énergie mais il subit une **diffusion élastique**, c'est-à-dire que sa direction est modifiée, sans perte d'énergie.

La **section efficace d'interaction** est, pour une interaction donnée, la portion d'électrons subissant ce type d'interaction dans le matériau. Pour l'interaction élastique, elle est de :

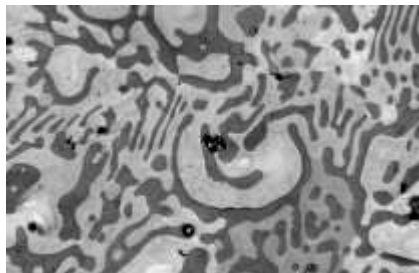
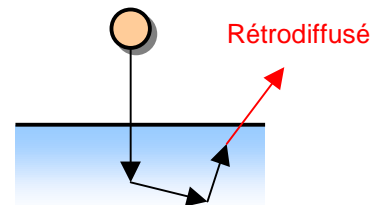
$$\sigma_{\text{élastique}} = \frac{Z^2}{E^2}$$



2) Électrons rétrodiffusés

Après un certain nombre de diffusions élastiques, un électron incident peut ressortir de la cible ; on dit qu'il est **rétrodiffusé**. Plus le matériau a des atomes lourds, plus le nombre d'électrons rétrodiffusés augmente.

Ces électrons permettent d'observer le **contraste de composition chimique**, c'est-à-dire une coupe de la surface du matériau où on voit la position des différents éléments. Les surfaces blanches représentent les atomes les plus lourds.



Contraste de composition
d'un alliage Au/Sn
(Au en blanc)

3) Effets sur le matériau

L'interaction élastique produit tout de même certains effets sur le matériau car une toute petite partie de l'énergie de l'électron est transférée :

- ➡ **Effets thermiques** (0,01 à 0,1 eV) : l'atome oscille légèrement par rapport à sa position d'origine. Cela crée des vibrations dans le solide (**phonons**) qui génèrent de la chaleur. C'est un effet parasite en microscopie, mais on se sert de cette propriété dans des fours électroniques industriels.
- ➡ **Effets chimiques** (3 à 5 eV) : une liaison faible se rompt à cause de l'apport d'énergie. Cet effet a peu de conséquence.
- ➡ **Effet de déplacement atomique** (10 à 30 eV) : l'atome reçoit une énergie suffisante pour être déplacé ; la structure du matériau s'en trouve modifiée. C'est un problème en microscopie.

B. Interaction inélastique

1) Principe

Lors d'une **interaction inélastique**, l'électron primaire interagit avec les électrons des atomes du matériau. Celui-ci transfère alors une grande partie de son énergie. Plus le transfert est important, plus l'angle de diffusion est important.

Cette interaction a une section efficace :

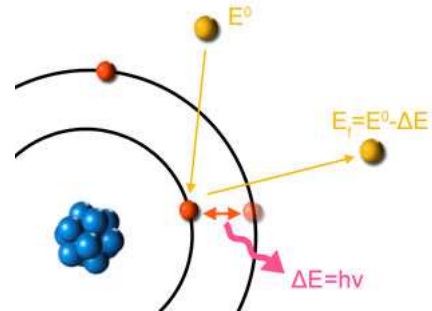
$$\sigma_{\text{inélastique}} = \frac{Z}{E^2}$$

2) Effets sur le matériau

► Excitation d'un électron

L'électron acquiert une énergie suffisante pour aller dans une orbitale plus haute en énergie. Pour revenir à sa position d'origine, l'électron émet un photon, le plus souvent un **photon X**.

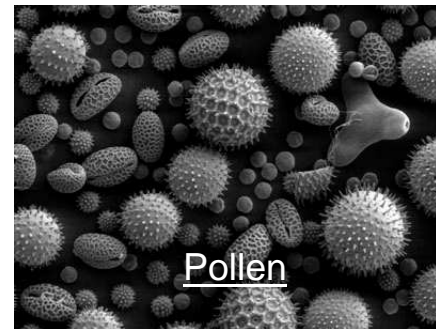
L'énergie de ce photon ne prend alors que des valeurs précises, caractéristiques de l'élément des atomes du matériau. On peut alors faire une analyse qualitative et semi-quantitative en détectant ces photons.



► Éjection d'un électron secondaire

Lorsqu'un électron est peu lié, celui-ci peut acquérir une énergie cinétique suffisante pour être éjecté. On l'appelle alors **électron secondaire**. Il a une énergie plus faible que les électrons primaires.

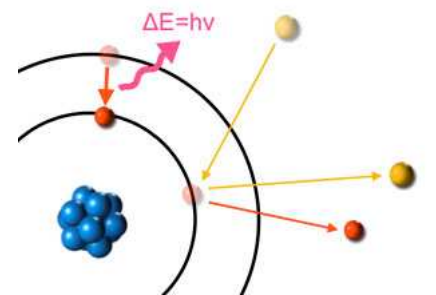
Ces électrons subissent des interactions inélastiques dans le matériau. Si leur énergie est suffisante, certains peuvent être éjectés de la surface du matériau. Ces électrons permettent d'observer le relief en microscopie électronique à balayage.



► Ionisation

Lorsqu'un électron est éjecté de son cortège, l'atome est sous forme ionisée. Pour revenir à son état normal, un électron peut récupérer sa place par émission d'un photon X. Celui-ci peut aussi être utilisé à des fins analytiques.

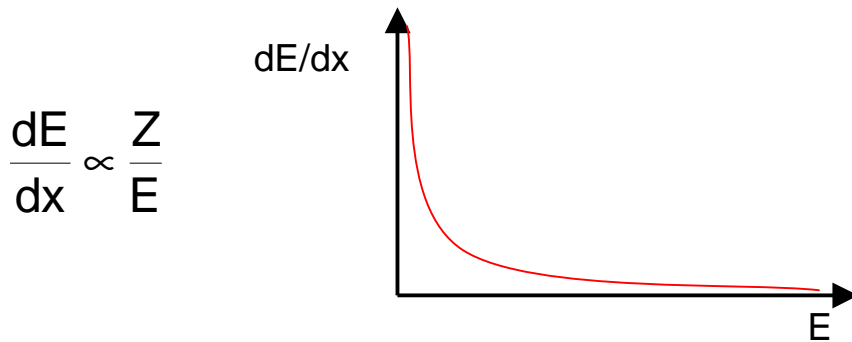
L'atome peut aussi récupérer son état en éjectant un électron peu lié, appelé **électron Auger**. Dans certaines spectroscopies, on détecte ces électrons pour identifier les éléments du matériau.



3) Loi de ralentissement

Lorsqu'un électron subit une diffusion inélastique, son changement de direction se fait avec une certaine perte d'énergie (l'électron ralentit). Cette énergie est transmise sous forme de photons. Elle est responsable du spectre continu des rayons X.

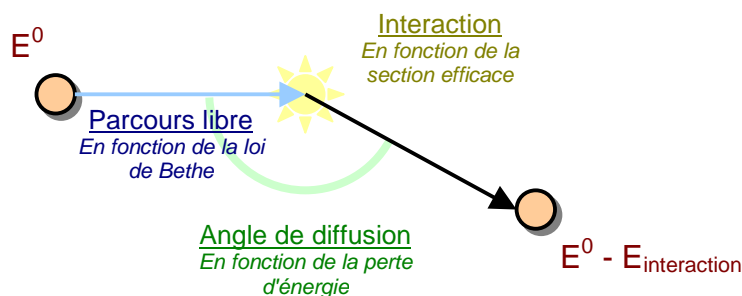
Un électron ne transmet pas son énergie de manière constante, selon l'énergie qu'il possède déjà. La **loi de Bethe** donne l'énergie moyenne perdue par un électron sur une certaine distance, en fonction de son énergie.



Ainsi plus l'énergie de l'électron est élevée, plus il a le temps de parcourir une grande distance avant d'être ralenti. De même, un atome plus lourd aura plus de chance d'arrêter un électron.

C. Trajectoire électronique

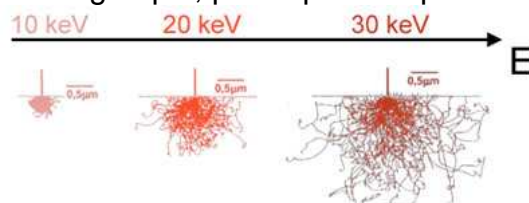
La trajectoire d'un électron peut être décrite comme une succession de libres parcours rectilignes, formant des angles de diffusion dépendant des interactions de cet électron avec la matière (élastique ou inélastique).



Il faut donc connaître la probabilité (ou section efficace) pour qu'un type d'interaction se produise et l'énergie initiale de l'électron pour connaître le chemin parcouru entre chaque interaction, d'après la loi de Bethe. On obtient alors des **poires d'interaction**.

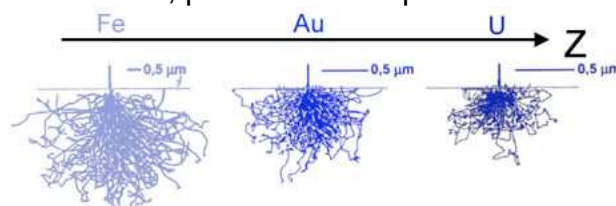
► Influence de l'énergie de l'électron

Plus l'électron est énergétique, plus il pénètre profondément dans le matériau.



► Influence du numéro atomique

Plus le matériau est lourd, plus il arrête le parcours de l'électron.



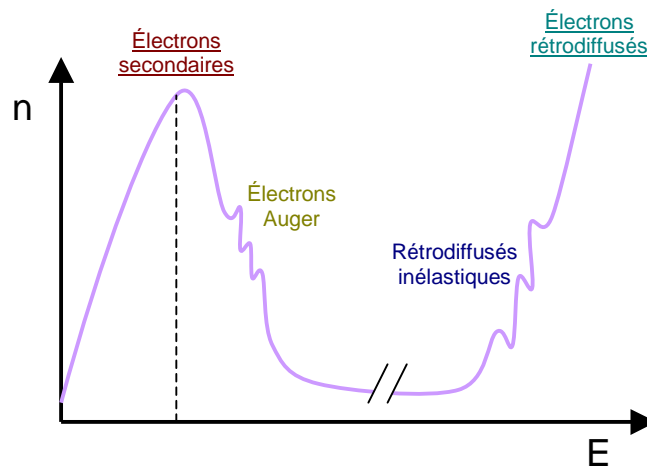
II_ Émissions électroniques

A. Distribution énergétique et spatiale

1) Distribution énergétique

Les électrons primaires rétrodiffusés ont l'énergie la plus élevée. On retrouve certains pics un peu moins énergétiques qui correspondent aux électrons primaires ayant subi quelques diffusions inélastiques.

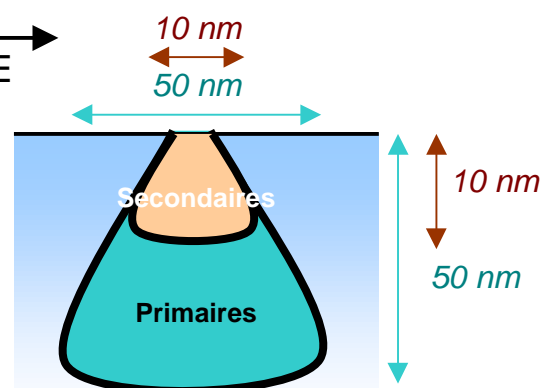
On retrouve ensuite à une énergie beaucoup plus basse les électrons secondaires. On observe certains pics qui sont caractéristiques des électrons Auger.



2) Distribution spatiale

On observe qu'un certain volume est balayé par un certain type d'électron.

Ainsi les électrons primaires balaient une surface plus grande que les électrons secondaires (meilleure résolution pour les électrons secondaires mais moins d'informations recueillies).



B. Émission rétrodiffusée

Les électrons primaires rétrodiffusés ont perdu pas ou peu d'énergie. On les considère ainsi si leur énergie est comprise entre E^0 et $E^0/2$.

On définit alors un **coefficient de rétrodiffusion η** , qui est la fraction d'électrons rétrodiffusés.

$$\eta = \frac{n_{\text{rétrodiffusés}}}{n_{\text{envoyés}}}$$

η varie avec Z , c'est-à-dire qu'un matériau lourd renvoie plus d'électrons. Cette particularité permet d'observer le **contraste de composition chimique** au niveau de la surface.

η ne varie pas avec E^0 , l'énergie des électrons primaires n'a pas d'influence sur leur capacité à sortir du matériau.

C. Émission secondaire

1) Coefficient d'émission

Les électrons secondaires ont une énergie beaucoup plus faible que les électrons primaires rétrodiffusés. On considère qu'ils sont secondaires lorsque leur énergie est inférieure à 50 eV, bien que presque tous les électrons secondaires ont une énergie autour de 2 à 5 eV.

De la même manière, on définit alors un **coefficient d'émission secondaire** δ , qui est le nombre d'électrons secondaires éjectés par rapport au nombre d'électrons primaires envoyés.

$$\delta = \frac{n_{\text{secondaires éjectés}}}{n_{\text{envoyés}}}$$

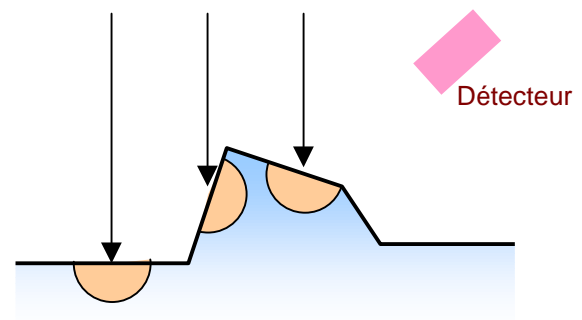
Un électron primaire peut éjecter plusieurs électrons secondaires, donc δ peut être supérieur à 1. Les matériaux isolants conservant moins bien les électrons, ceux-ci possèdent un δ plus élevé que les matériaux conducteurs.

δ ne varie pas avec Z, on ne peut pas relier le nombre d'électrons secondaires à la taille de l'atome.

2) Microscopie électronique à

balayage

La surface balayée par les électrons, et donc le nombre d'électrons secondaires renvoyés, est différente en fonction de l'angle entre le faisceau incident et la surface du matériau.



On peut alors observer le relief du matériau grâce à ces électrons. De plus, en fonction de l'angle du détecteur, on repère plus ou moins bien les électrons selon qu'ils sont masqués ou pas. Cela crée une impression d'éclairage qui fait de très jolies images !

3) Distribution spatiale

Les électrons secondaires s'échappant du matériau possèdent une énergie cinétique faible, qui leur permet d'être facilement attirés vers le détecteur.

Ils ont une faible profondeur d'échappement, sur une zone correspondant à la zone d'impact du faisceau d'électrons primaires.



Oeil d'une mouche

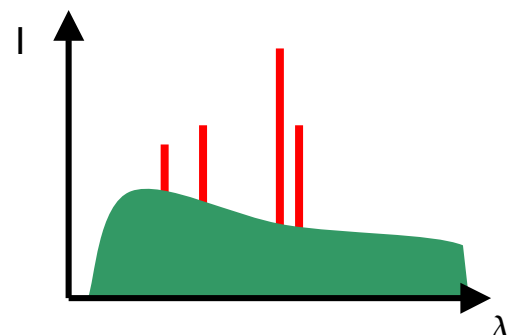
III Émission de photons X

A. Spectre d'émission

1) Types de spectres

Le spectre d'émission de rayons X est composé de deux spectres superposés : un **spectre de raies** et un **spectre continu**.

Le spectre continu est dû aux pertes d'énergie des électrons primaires lorsqu'ils changent de direction ("effet de freinage" par interactions électrostatiques). Ce spectre est plus important si le matériau possède des atomes lourds ou si l'énergie des électrons primaires est plus forte.

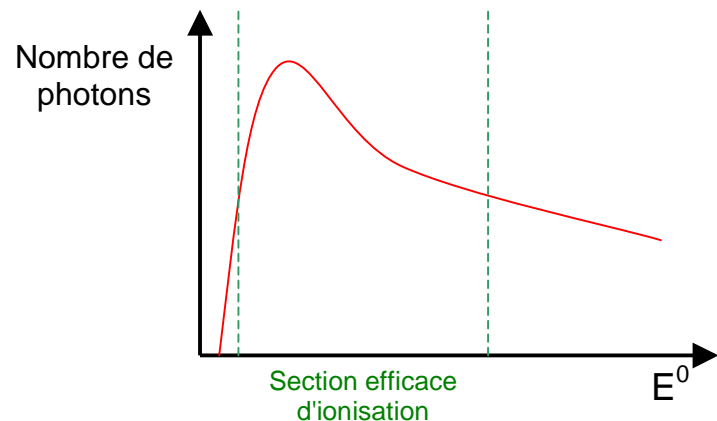


Le spectre de raies correspond aux transitions électroniques lorsqu'un atome du matériau est excité ou ionisé. En effet, pour revenir à sa position d'origine il émet un photon X. Ce photon a une énergie égale à la transition électronique. Elle est donc caractéristique des atomes du matériau.

2) Analyse du spectre

Pour qu'une transition électronique ait lieu, l'énergie de l'électron incident doit avoir une énergie supérieure à celle de la transition. La **section efficace d'ionisation** est maximale pour une énergie comprise entre :

$$\frac{E^0}{2} > EI > \frac{E^0}{8}$$



Les transitions étant caractéristiques des atomes du matériau, on peut faire une analyse qualitative et quantitative précise de la surface à un certain endroit du matériau. C'est le principe de la **microsonde de Castaing**.

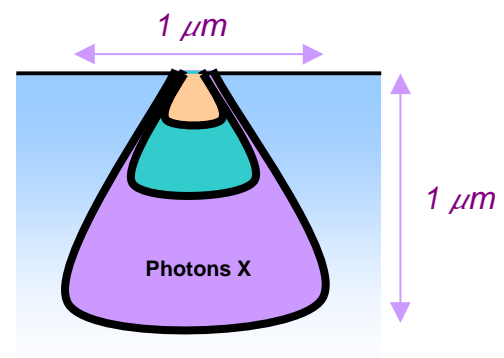
Les raies respectent certaines conditions, notamment le **poids des raies** ; cette propriété donne pour une raie donnée, l'intensité relative d'autres raies.

B. Distribution spatiale

Les photons X proviennent d'un volume beaucoup plus large que pour les électrons. La précision des mesures est alors de l'ordre du micromètre.

Cela peut devenir un problème en analyse car on peut analyser un défaut des couches profondes du matériau, indécélable en microscopie électronique.

Heureusement, la plupart des photons X détectés proviennent de la surface du matériau.



C. Interaction photons X / matière

Un photon X peut être réabsorbé par les électrons de la matière (effet photoélectrique), puis réémis, avec une énergie plus faible. C'est la **fluorescence**.

Ces interactions touchent une surface beaucoup plus large que les photons X directement émis par les électrons. Heureusement, ils ne comptent que 0,05 % des photons mesurés ; néanmoins, en microanalyse, il faut tenir compte de ces interactions pour corriger l'intensité des rayonnements détectés.