

## Résumé microscopie semaine 3

### Principe du SEM :

- Sonde (faisceau d'électrons) balaye la surface point par point.
- A chaque point, les électrons secondaires sont collectés dans un détecteur puis mis sous forme d'une matrice de point afin d'obtenir une image où l'intensité du pixel dépend du nombre d'électrons reçus.
- Le nombre d'électrons collectés donne le contraste à l'image.
- Un changement du grossissement s'accompagne d'un changement de la surface balayée. Le faisceau a également besoin d'être plus fin sinon il se chevauchera et prendra en compte plusieurs fois un même point → image floue.

### Avantage du SEM :

- Gros échantillon, image de la surface en 3D, résolution : 10 nm à 1 nm

Brillance : 
$$\frac{\text{courrant émis}}{(\text{surface sourceure chatil}) \cdot (\text{anglesolide})} = \frac{I_e}{\pi \left(\frac{a}{2}\right)^2 \pi a^2}$$
, où  $a$  correspond à l'angle du solide.

Pour un signal de détection abondant lors d'un spot très petit, une brillance aussi grande que possible est nécessaire. L'utilisation de condenseurs permet de diminuer la taille de la source et d'augmenter la brillance. Dans le cas idéal, il suffit d'augmenter le nombre de lentilles.

Dans la vraie vie, il existe plusieurs aberrations limitant cette diminution à une taille de faisceau (ou sonde) minimale :

- Aberration sphérique : donné par fabricant,  $d_{sph} = C_s \cdot \alpha^3$
- Aberration chromatique : liés aux  $e^-$  n'ayant pas la même vitesse,  $d_{ch} = C_{ch} \left( \frac{\Delta E}{E} + 2 \frac{I}{I} \right) \alpha$
- Diffraction : si le signale passe dans une ouverture trop petite,  $d_d = 0.61 \frac{\lambda}{n \cdot \sin \theta}$
- Conservation brillance,  $d_g = \sqrt{\frac{4I}{\pi^2 \beta \alpha}}$

Une formule de combinaison est alors obtenue :  $d_{ec} = \sqrt{d_{sph}^2 + d_{ch}^2 + d_d^2 + d_g^2}$

### Améliorer la résolution :

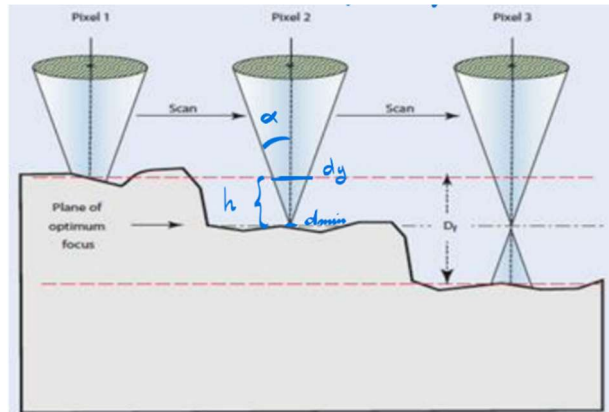
- Réduire l'intensité du courant pour un même temps d'exposition ( $\frac{S}{N} \propto \sqrt{N} = \sqrt{It} = \text{cst}$ )  
augmenter le temps d'exposition pour un même courant ( $d_g \propto \sqrt{I}$ ,  $d_g \propto 1/\sqrt{t}$ )
- Réduire le volume d'interaction (les électrons iront moins en profondeur dans l'échantillon et donc on aura moins d'électrons secondaires d'ailleurs). Cela peut être fait en réduisant la tension d'accélération (les électrons auront moins d'énergie), mais la surface de la sonde sera plus grosse.
- Réduire la taille de la sonde en augmentant la tension d'accélération (les électrons seront plus impactés par le champ magnétique des lentilles → force de Lorentz plus grande) ou à l'aide de diaphragme/spotsize et focaliser l'objectif.
- Réduire l'aberration sphérique à l'aide de lentilles à courtes focales ou d'objectifs différents comme les in-lens ou les semi in-lens. De plus, il existe des correcteurs d'aberration sphérique. Mais la profondeur de champ est réduite, ainsi qu'un fort champ

magnétique sera présent proche de l'échantillon → problème pour les échantillons ferromagnétiques.

- Augmenter la brillance avec un canon d'émission à froid ou assisté thermiquement
- Augmenter la brillance et réduire l'aberration sphérique avec des colonnes sous tension comme Gemini ou XL30. Le but est de former un triplet convergent/divergent/convergent avec l'objectif et les électrodes. Cela augmente la distance de travail et diminue les aberrations sphériques à basse tension. De plus il n'y aura pas de champ magnétique sur l'échantillon.

### Profondeur de champ :

Plus la profondeur de champ est grande, plus on voit 'loin' sur l'échantillon. Elle dépend de  $d_{sonde}$ , qui donne la surface couverte par la sonde sur l'échantillon. La netteté reste bonne si  $d_y \leq 2d_{sonde}$ . Par conséquent, la hauteur  $h$  (profondeur de champ où la netteté est conservée) augmente si l'angle  $\alpha$  diminue (Pythagore) et donc la profondeur de champ est augmentée. Pour réduire  $\alpha$ , on utilise des diaphragmes, mais une partie de l'intensité du faisceau est perdue. Une autre méthode pour diminuer  $\alpha$  est d'augmenter la distance entre la lentille faisant la focalisation et l'échantillon (distance de travail).



### Stéréoscopie :

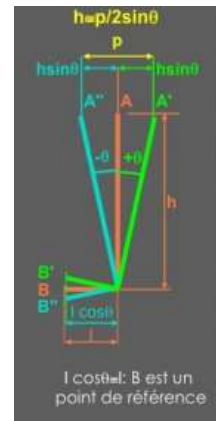
Méthode de mesure de profondeur. Plusieurs mesures du même endroit de l'échantillon selon un angle différent pour avoir une information en 3D.

### Libre parcours moyen :

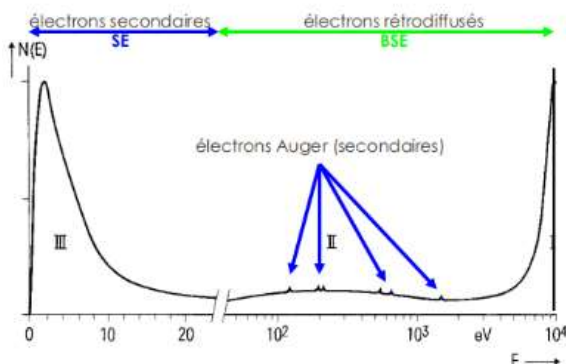
Distance moyenne parcourue par un électron dans un échantillon avant de subir une interaction

$$\lambda = \frac{A}{N_0 \sigma_T \rho} \text{ et } \frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda_{él}} + \frac{1}{\lambda_{in}}$$

$\sigma_T$  : section efficace totale d'interaction, probabilité qu'un électron interagisse avec un atome. Inversement proportionnel à l'énergie de l'électron.

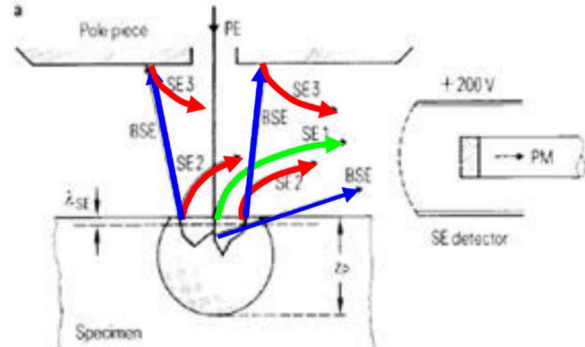
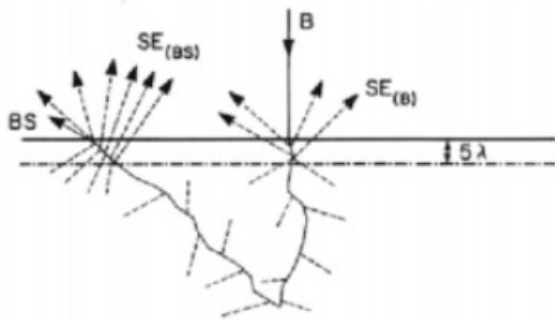


### Spectre d'énergie des électrons sortants

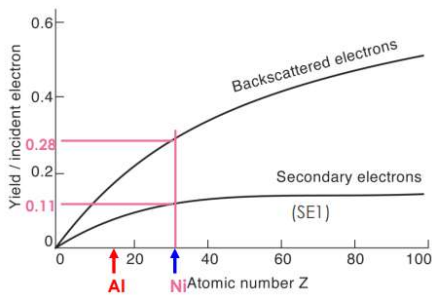


**Contraste :**

- SE1 : é secondaire émis au point d'impact, faible énergie, libre parcours moyen très faible. Parfois n'arrive pas à quitter l'échantillon car ont une interaction avant.
- SE2 : émis par BSE quittant l'échantillon.
- SE3 : émis par BSE arrivant sur l'environnement, faible energie
- SE2 et SE3 parasitent le signal
- Quantité de SE2/3 baisse avec la baisse du volume d'interaction
- Contraste entre deux points donnés :  $C = \frac{I(x_i) - I(x_j)}{I(x_i) + I(x_j)}$



**Taux de SE et BSE en fonction de Z :**



BSE : contraste « chimique » avec la proportion de BSE qui dépend de Z ainsi que topographique.

$$I_{BSE} = I_0 \eta, \text{ avec } \eta \text{ la proportion de BSE}$$

SE : contraste « chimique » jusqu'à  $Z \approx 28$  car après même nombre de SE même si Z augmente, le contraste topographique domine sur les surfaces rugueuses.

$$I_{SE} = I_0 (\delta_1 + \delta_1 \eta + \delta_3)$$

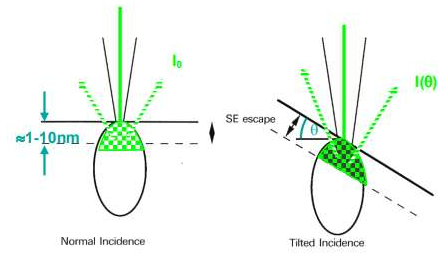
où  $\delta_1$  est le rendement des SE1 et  $\delta_3$  le rendement des SE3 dépendant des matériaux environnants.

**Volume d'interaction : ↗ ↘**

Volume ↗ quand :	Proportion de BSE ↗ quand :
Z ↘	Z ↗
Energie des électrons ↗	

### Contraste topographique :

La proportion du volume d'interaction duquel les électrons peuvent sortir augmente quand la surface est inclinée. Finalement, le rendement relatif des SE est proportionnel à l'angle d'incidence.



$$I(\theta) = I_0 \delta(\theta) \cong \frac{I(\theta)}{\cos \theta}$$

A faible énergie le volume d'interaction est si petit que presque tous les électrons sortent indépendamment de la pente => pas d'information topographique

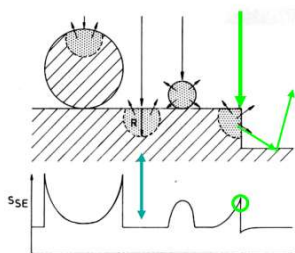
### Tension d'accélération :

Une haute tension d'accélération augmente la pénétration et le volume d'interaction. La proportion de SE2 et SE3 est donc augmentée avec la tension d'accélération. À faible tension, le taux de BSE n'est plus fonction de Z, résultat empirique.

### Comparaison SE et BSE :

L'observateur regarde en bas le long de la colonne et la "lumière" semble provenir du détecteur Everhart-Thornley. La trajectoire des BSE n'est presque pas affectée par le champ électrique.

### Effet de bord :



Si sphère < volume d'interaction, alors les électrons la traversent → effet de bord.

Si sphère > volume d'interaction, des électrons la traversent et le support contribue au signal.

Si le signal est sur un coin, les SE émis sur les côtés, les BSE déviés et les électrons diffusés sortent du volume et frappent la surface une nouvelle fois. Il y a donc une deuxième interaction avec l'objet.

### Effet de charge :

Problème : l'accumulation de charges à la surface des matériaux non conducteurs modifie le faisceau incident et les SE à détecter.

Solutions :

- Dépôt d'une couche conductrice
- Observation à faible énergie
- Pression partielle
- Taux total (SE + BSE) pour un isolant
- $E_1$  et  $E_2$  : énergies pour lesquelles le matériau reste neutre. Un  $e^-$  incident remplace un  $e^-$  sortant du matériau.
- Lorsque  $eV_{acc} = E_1$  ou  $E_2$  alors pas d'effet de charge
- $E_2$  est stable, mais pas  $E_1$
- $E_1$  et  $E_2$  dépendent du matériau et de  $\theta$

