
Microscopie Electronique à Balayage

But du cours

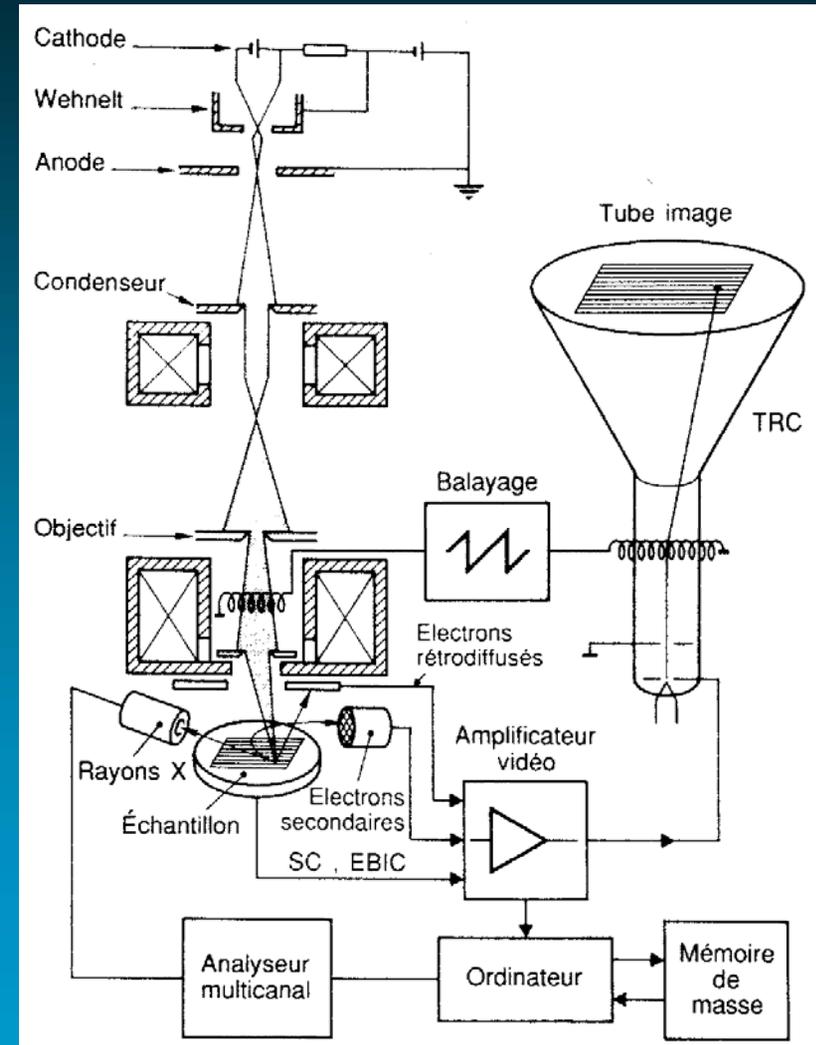
- ☞ informations de base
 - MEB : présentation
 - principe de fonctionnement
 - domaines d'utilisation
 - génération du faisceau d'électrons
 - éléments d'optique électronique
 - interactions électrons / matière
 - origine des contrastes
 - détecteurs
-
- MEB : optimisation de l'utilisation

Histoire

- **1935 Knoll**
faisabilité d'un Microscope Electronique à Balayage
- **1938 Von Ardenne**
1^{er} prototype de Microscope Electronique à Balayage
- **Depuis:**
compétition mondiale sur l'optique électronique, les sources d'électrons, la physique des interactions électron-matière, l'informatique et les systèmes de détection.

Principe de fonctionnement

- faisceau d'électrons focalisé
- image point par point
- balayage synchrone écran/échantillon
- brillance image = f (interaction)
- grandissement = f (distance entre pts)
- point invariant : centre de l'écran



Evolutions techniques récentes

- Microscopes entièrement numériques
- environnement type WINDOWS
- ergonomie moins "effrayante"
- nombreux automatismes utiles
- ne dispensent pas d'être intelligent

Aujourd'hui



Demain ...

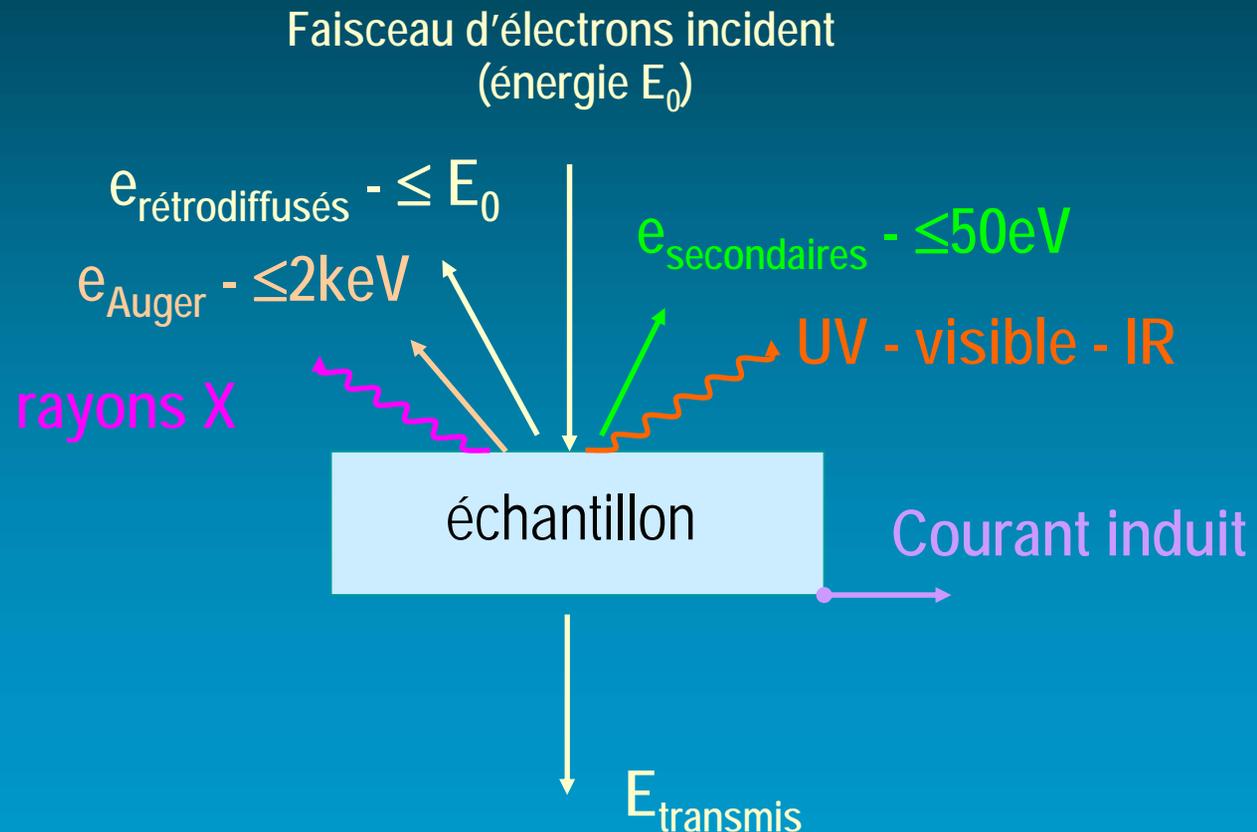


Evolutions techniques récentes

- Canon à émission de champ Schottky
- Microscopes environnementaux :
 - pression variable de l'enceinte
 - détecteurs spécialisés
- Imagerie très basse tension (200V)
- détecteurs IN-LENS (secondaires et rétrodiffusés)

Domaines d'utilisation :

Phénomènes mis en jeu



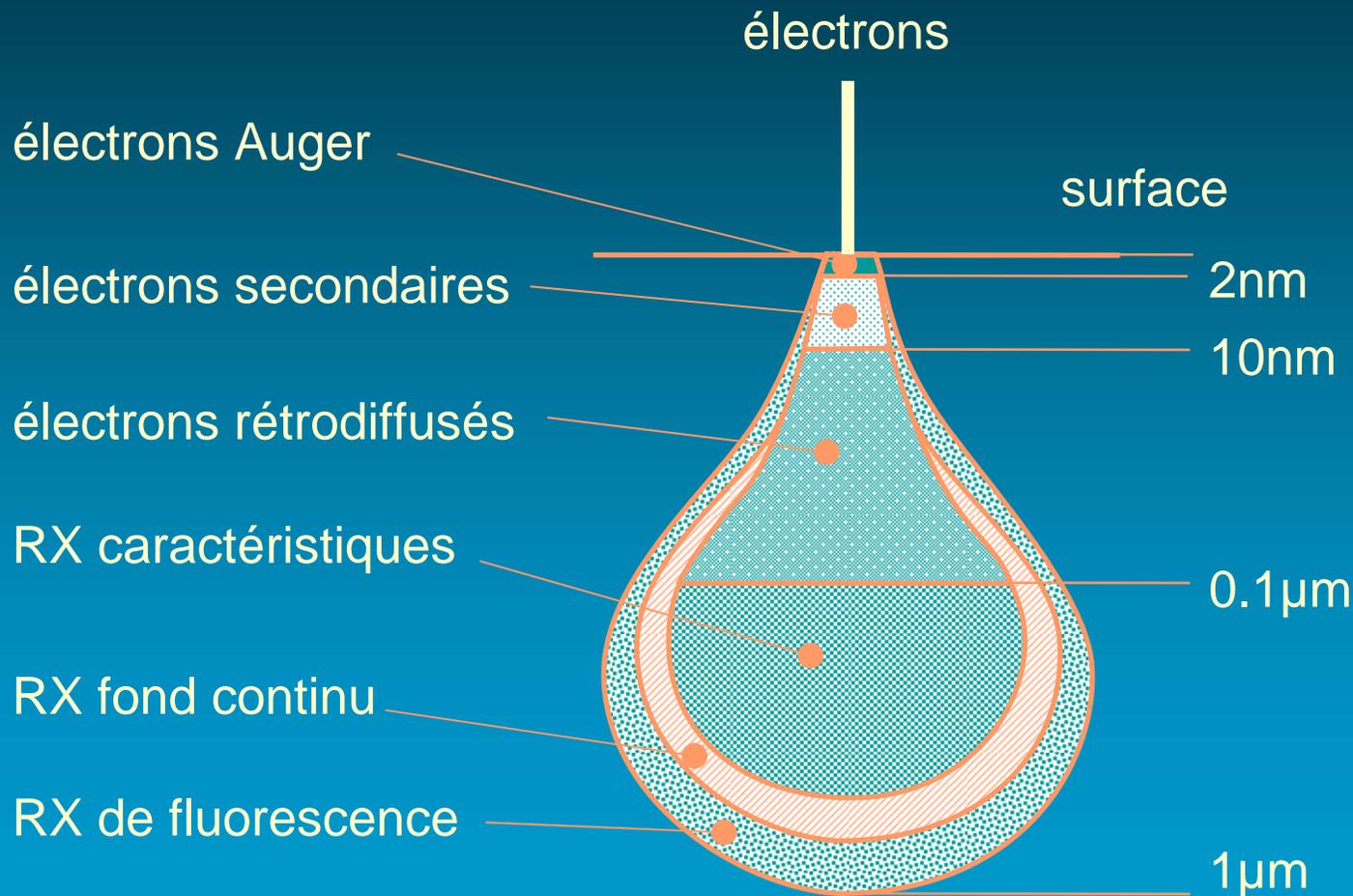
Interactions électron/matière

Trajectoires électroniques

- **électrons rétrodiffusés** (*faisceau primaire*)
- **simulation de Monte-Carlo :**
 - **diffusion élastique** (*rétrodiffusion de Rutherford : Z^2/E^2*)
 - **diffusion inélastique** (*loi de ralentissement de Bethe : Z/E*)
 - ↳ **relaxation atomique**
 - **électrons secondaires**
 - **électrons Auger**
 - **photons X, UV, visibles**
 - **courant induit**
 - ...

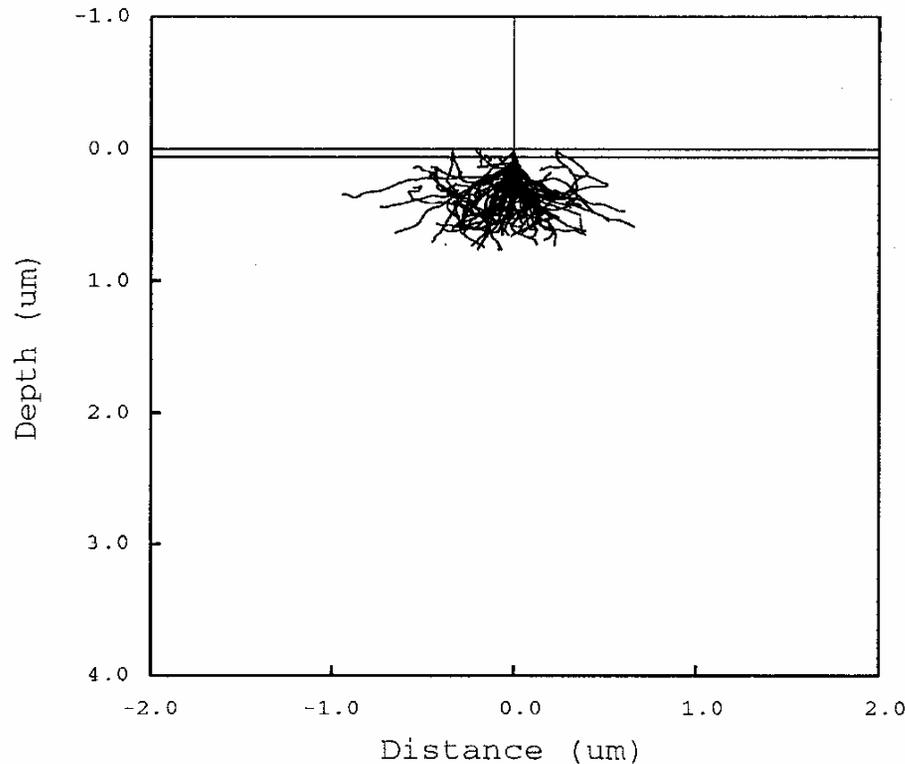
Interactions électron/matière :

profondeur d'échappement – 20 à 40keV

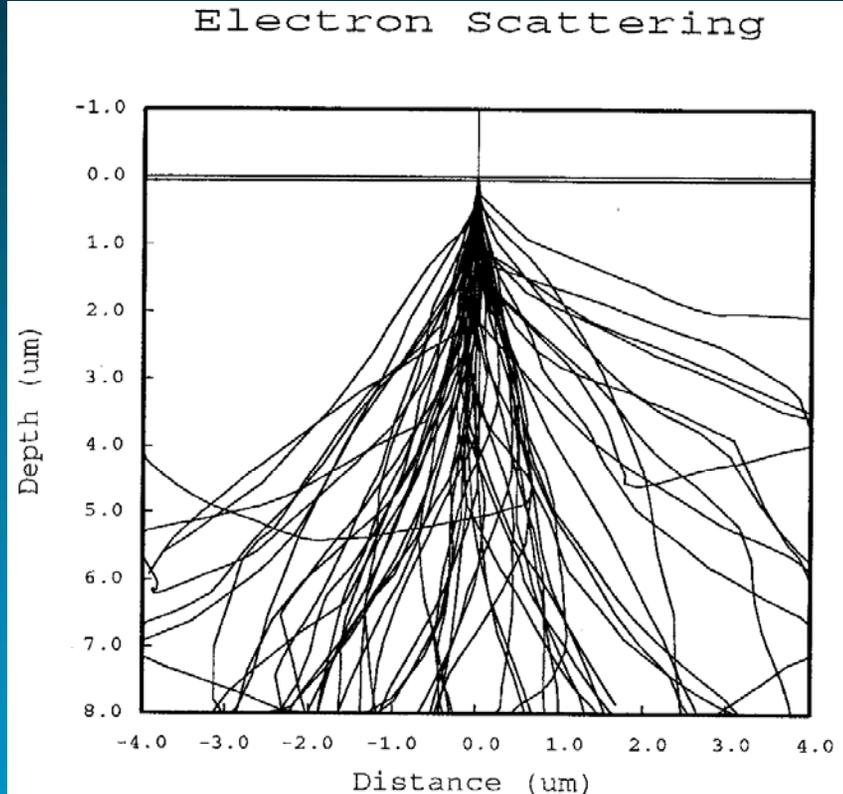


Interactions électron/matière

Trajectoires des électrons rétrodiffusés



Beam Voltage	10.0 kV
No. of Electrons	60
PMMA	0.06 um
Silicon	375.00 um



Beam Voltage	80.0 kV
No. of Electrons	60
PMMA	0.06 um
Silicon	375.00 um

Interactions électron/matière

électrons rétrodiffusés

- électrons du faisceau primaire
- $E \leq E_0$
- large zone d'émission
- forte directivité (énergie cinétique élevée)
- sensibles à la composition chimique locale (Z^2)

Interactions électron/matière

détecteur d'électrons rétrodiffusés

- Détecteur « Outlens » :
 - diodes polarisées en inverse
 - localisées en face de l'échantillon
 - création de paires électron/trou
- Détecteur « Inlens » Hitachi S4800
 - Transformation des rétrodiffusés en secondaires
 - Amplification avec détecteur secondaire classique

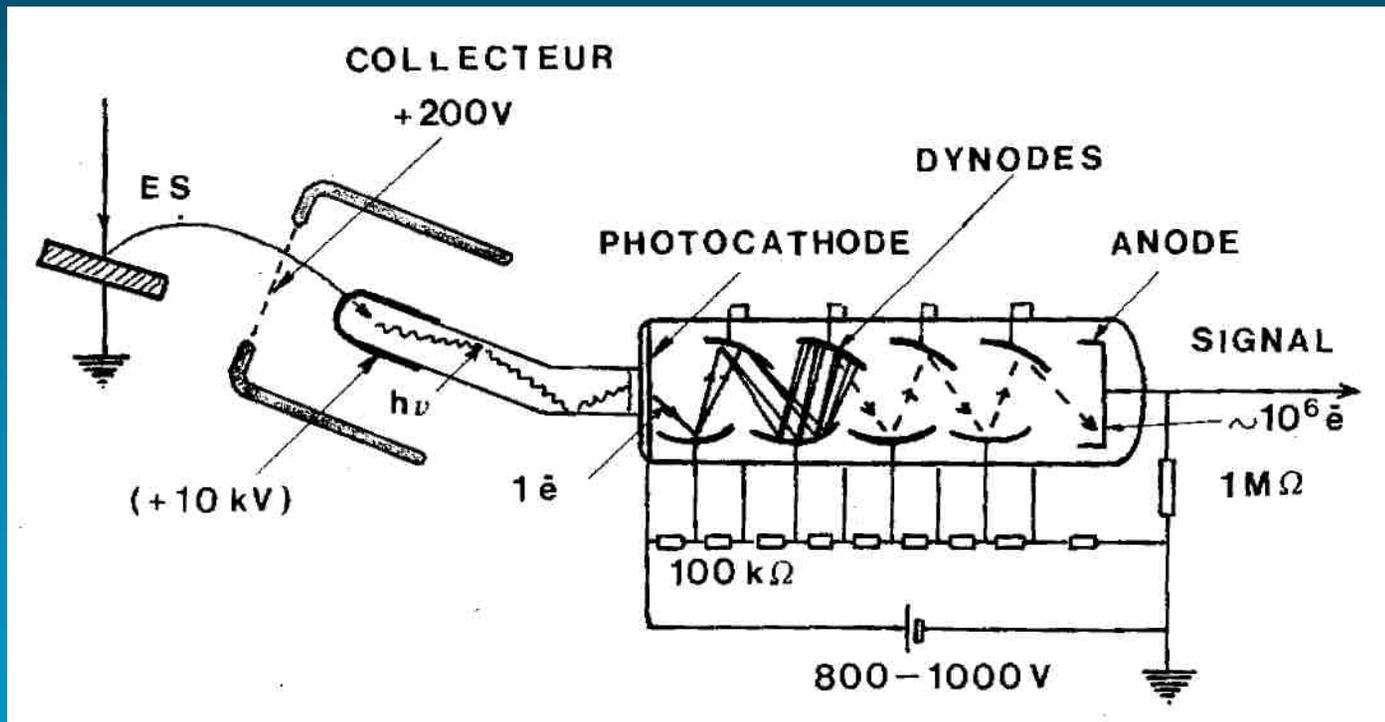
Interactions électron/matière

électrons secondaires

- électrons émis par l'échantillon
- émission : énergie $< 50\text{eV}$ dépend de W_s
- transport : libre parcours moyen $\sim 10\text{nm}$
- origine du contraste:
 - dépendance angulaire
 - matériau : travail de sortie, numéro atomique

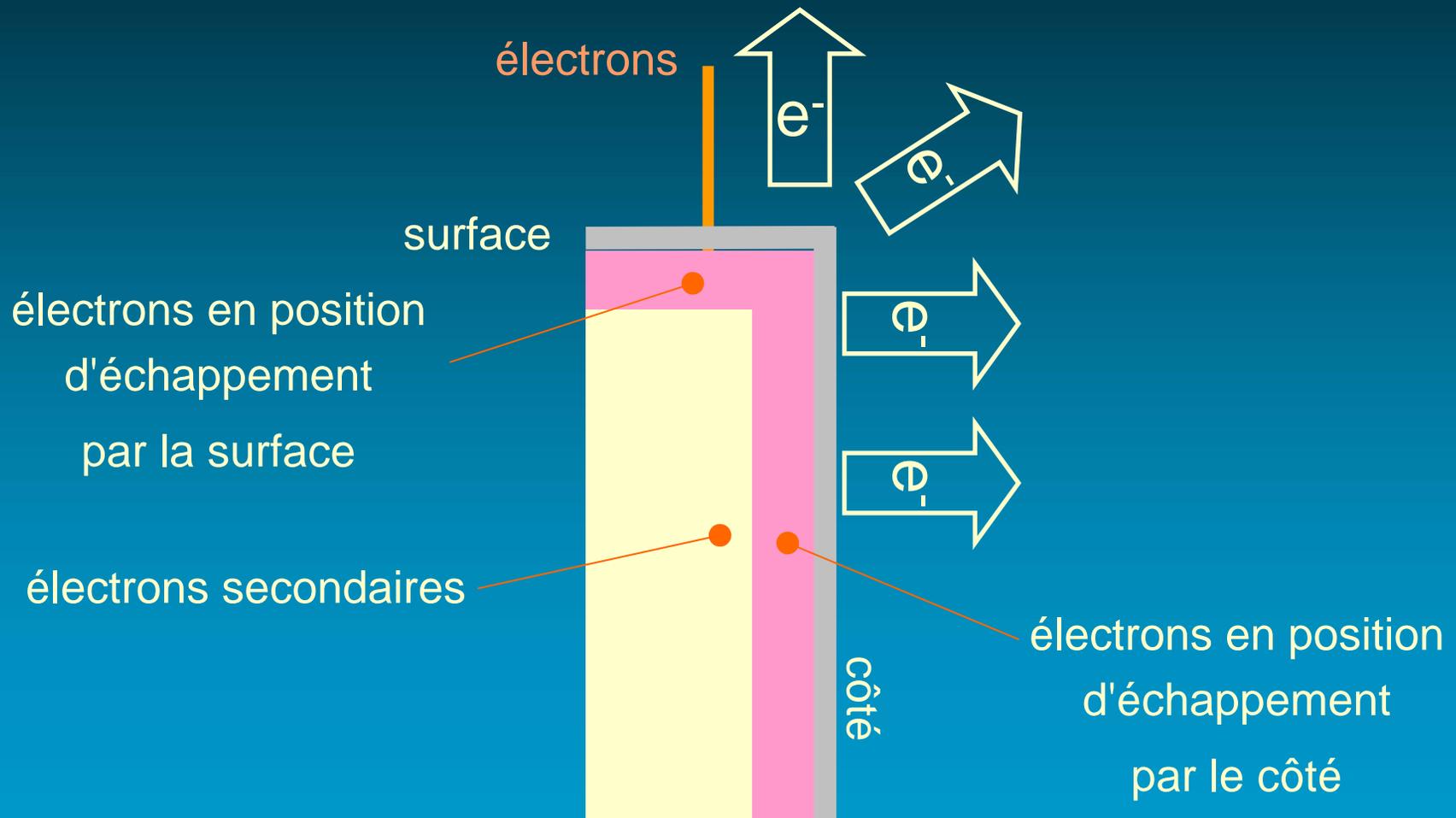
Interactions électron/matière

détecteur électrons secondaires Everhart & Thornley (1960)



Interactions électron/matière

Electrons secondaires : contraste topographique



Interactions électron/matière

Electrons secondaires : contraste chimique

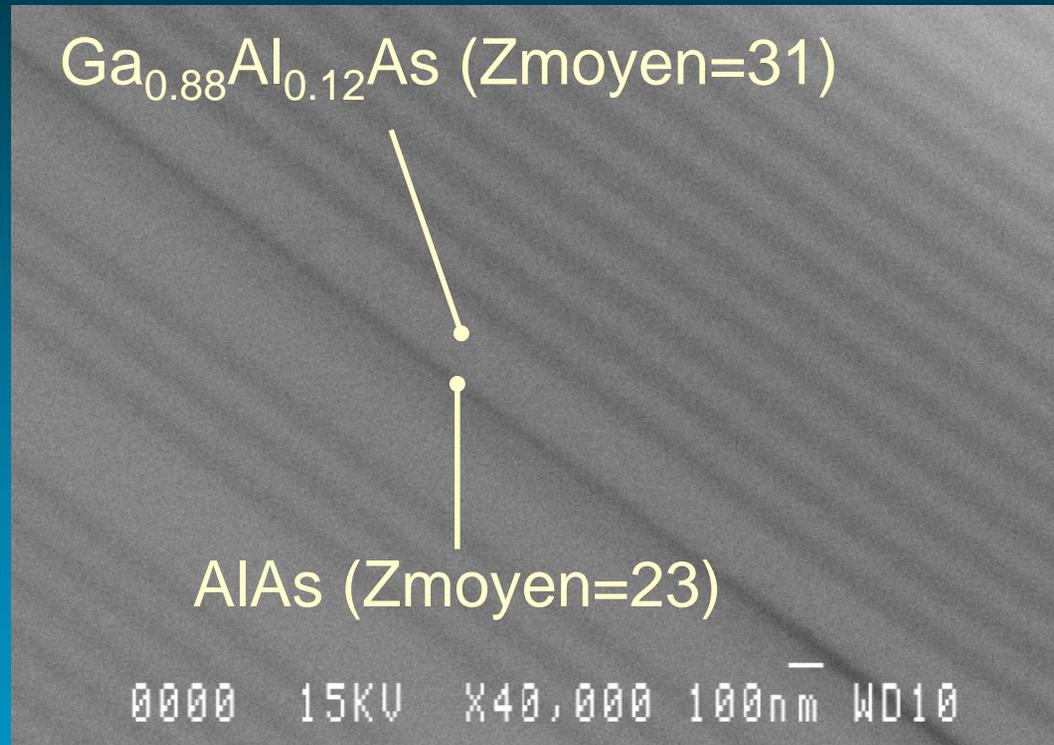
Echantillon sans relief comportant des matériaux de numéros atomiques différents :



- interaction différente
- émission de surface différente
- ☞ **contraste chimique (même sans topographie)**

Interactions électron/matière

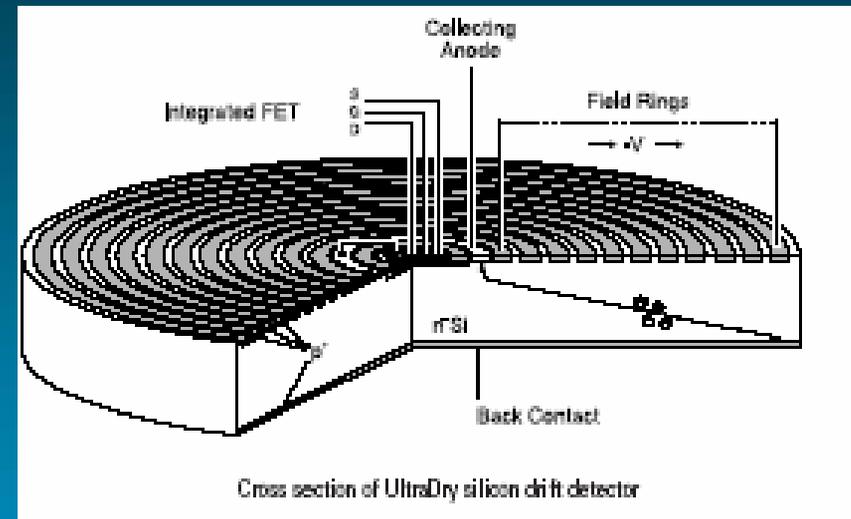
Electrons secondaires : contraste chimique



clivage échantillon EJM sans révélation

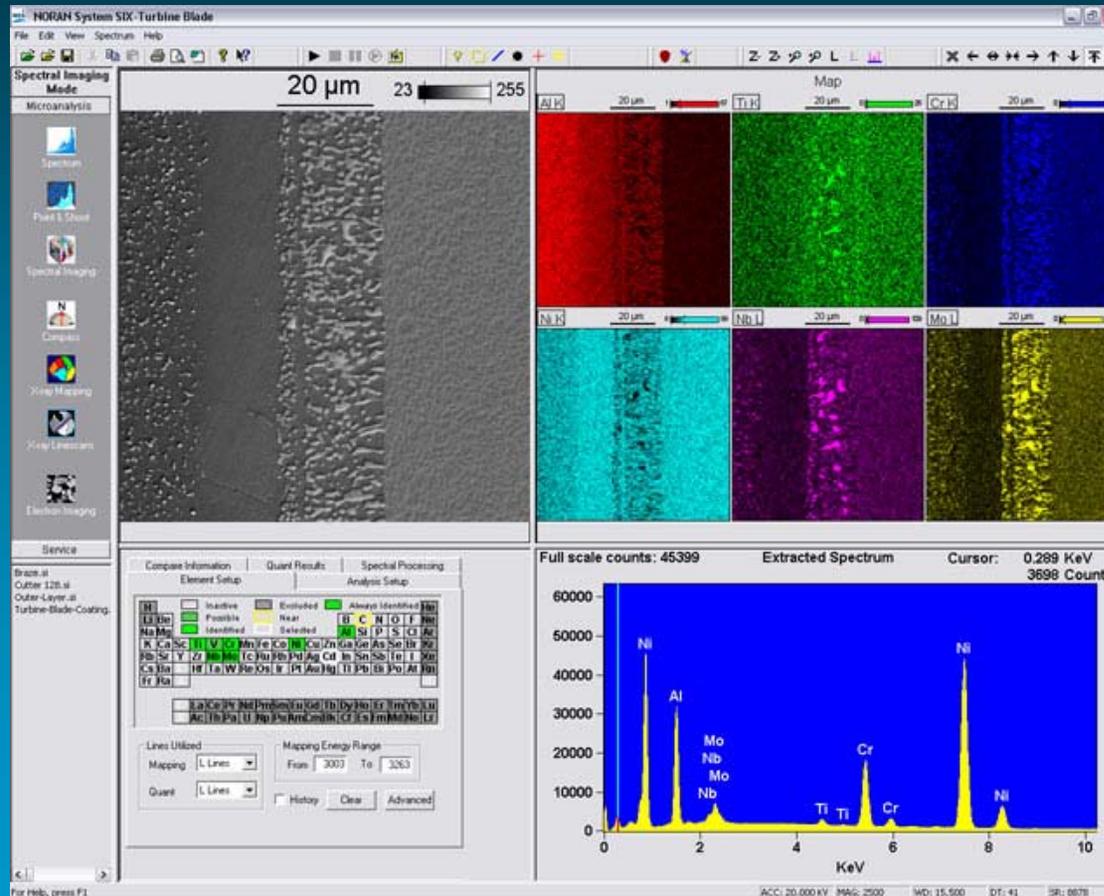
Interactions électron/matière

Analyse X : détecteur



Interactions électron/matière

Analyse X : "ponctuelle" et cartographique



Principales possibilités analytiques

comparaison

Signal/détecteur	Résolution	Tension	Information principale
Electrons secondaires	> 1nm	> 200V	Imagerie Contraste topographique
Electrons rétrodiffusés	>10nm		Imagerie contraste chimique
Rayons X	~1 μ m	> qq kV	Analyse ponctuelle et cartographique
Electrons Auger	>10nm	~1kV	Analyse chimique
Cathodoluminescence	~100nm	> qq kV	Caractérisation des semi-conducteurs

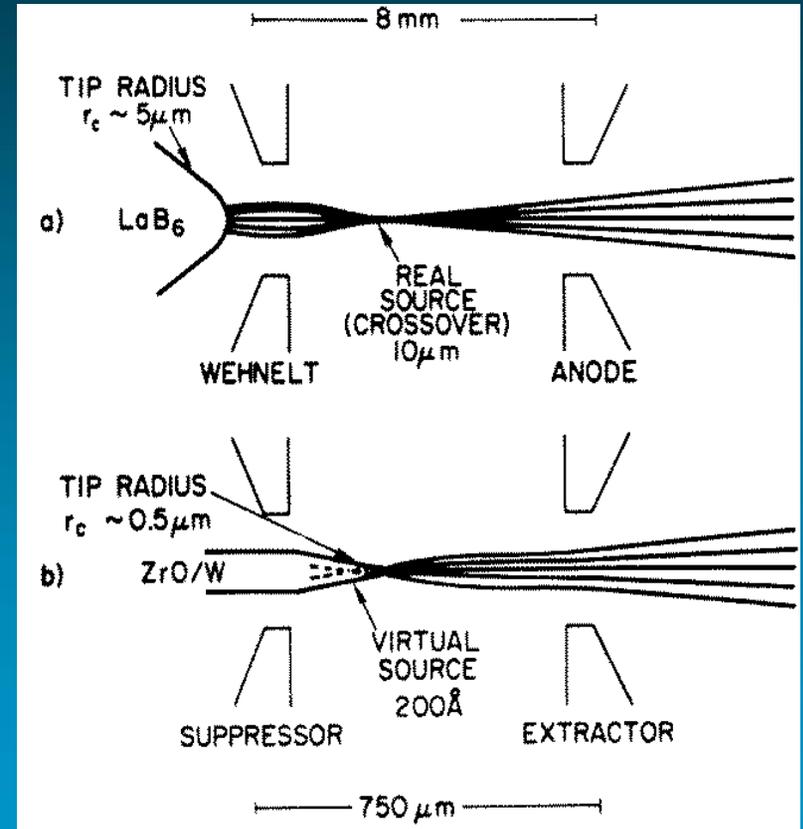
Autres possibilités analyse

- pseudo - diffraction
- contraste de potentiel (filtrage en énergie)
- courant induit ou absorbé
- charge et décharge des isolants

Optique électronique : canon à électrons

2 familles de machines

- émission thermo-électronique (W, LaB6, CeB6)
Dusham – Richardson : $f(T^2, \phi)$
- émission de champ
Fowler – Nordheim : $f(E^2, \phi)$
- Brillance = $f(i_e, d_0^{-2}, \alpha_0^{-2})$
- Lentille : électrostatique



(Gersley, J. Appl. Phys. 65 (3), 914 (1989))

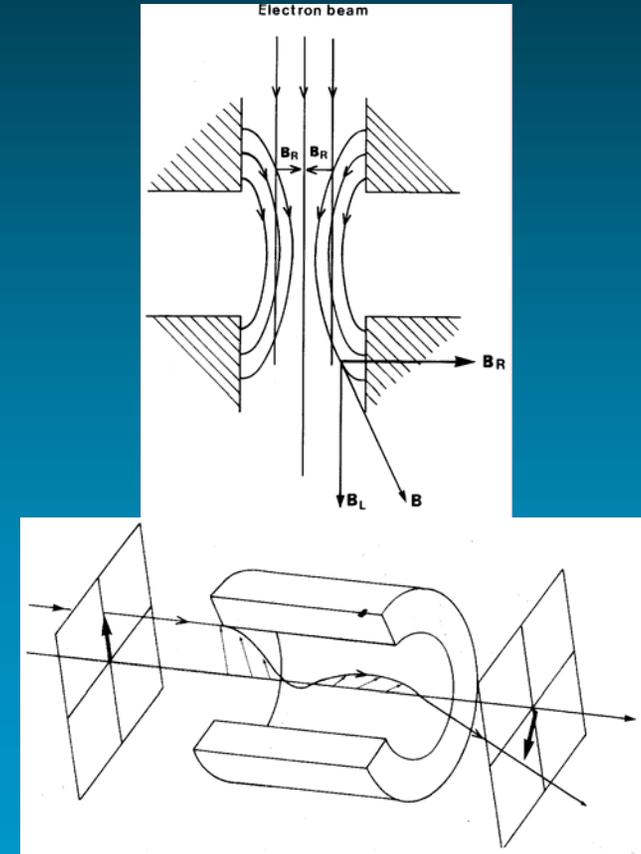
Optique électronique:

canons à électrons : comparaison

Type	Unités	W	LaB ₆	FEG Schottky	FEG froid
Température du filament	K	2700	1700	1800	300
Dispersion en énergie	eV	3 - 4	1.5 - 3	0.5 - 1.2	0.3 - 0.5
Brillance	10 ⁹ A. cm ⁻² .srad ⁻¹	1	20 - 50	100 - 500	100 - 1000
Durée de vie du filament		<100h	2-3 ans	2 ans	>5 ans
Vide nécessaire	Pa	10 ⁻³	5 10 ⁻⁵	10 ⁻⁶	10 ⁻⁷

Optique électronique: généralités

- lentilles = électro-aimants
- approximation de Gauss
- lentilles minces
- $\vec{f} = q\vec{v} \wedge \vec{B}$
- défauts de symétrie du champ
 - ⇒ aberrations
 - ⇒ axe optique = $f(\text{excitation})$



Optique électronique :

faisceau Gaussien

- Faisceau aligné = distribution Gaussienne
- Diamètre à mi-hauteur (augmente si i trop grand et dépend du type de canon):

$$d_g = \frac{2}{\pi} \left(\frac{i}{\beta} \right)^2 \frac{1}{\alpha}$$

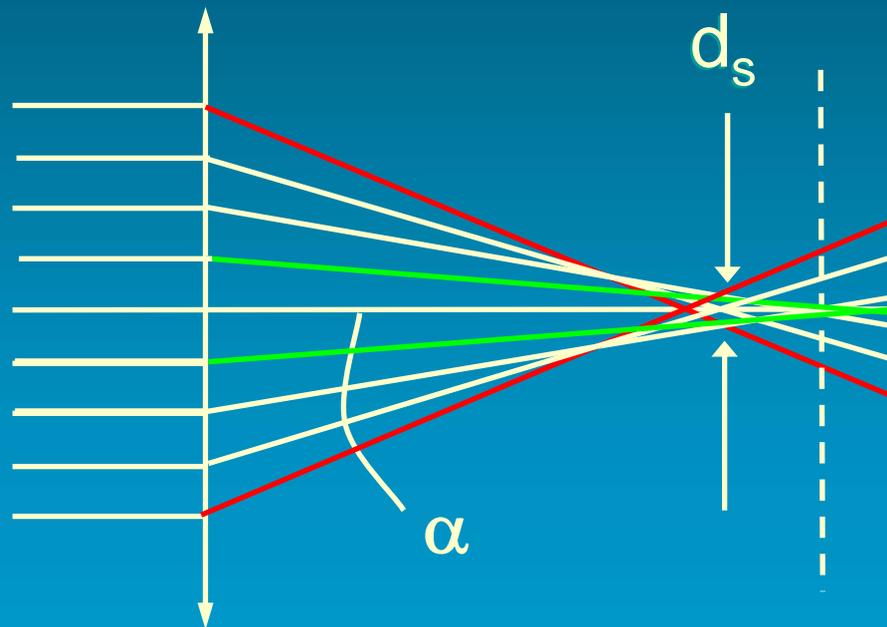
courant de sonde
brillance
demi-angle de convergence du faisceau

- Principales aberrations : lentille « objectif »

Optique électronique : aberration sphérique

$$d_s = 1/2 C_s \alpha^3$$

Important en cas de diaphragme objectif trop grand

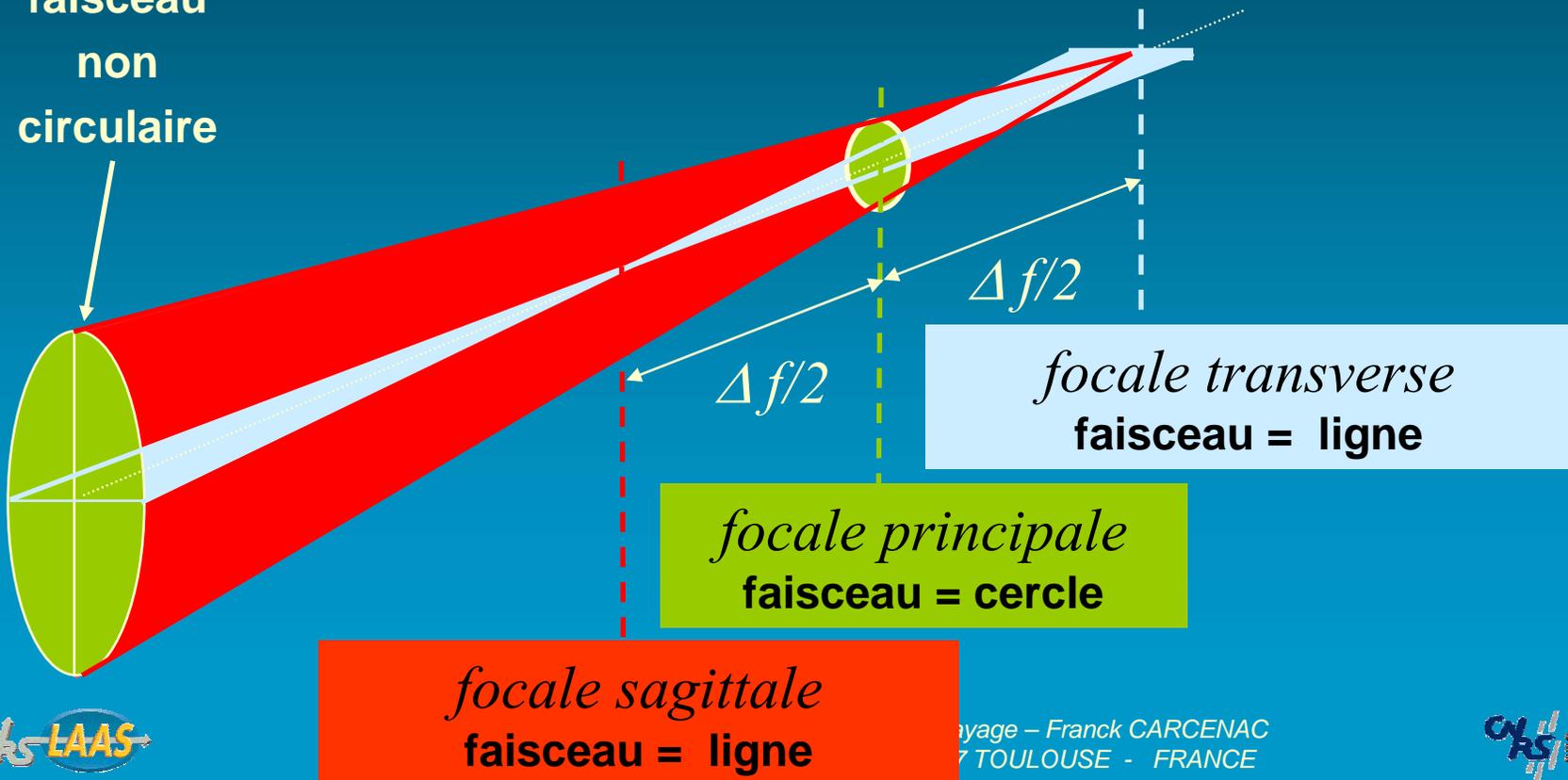


Optique électronique :

aberration d'astigmatisme - réglable

$$d_a = C_a \alpha$$

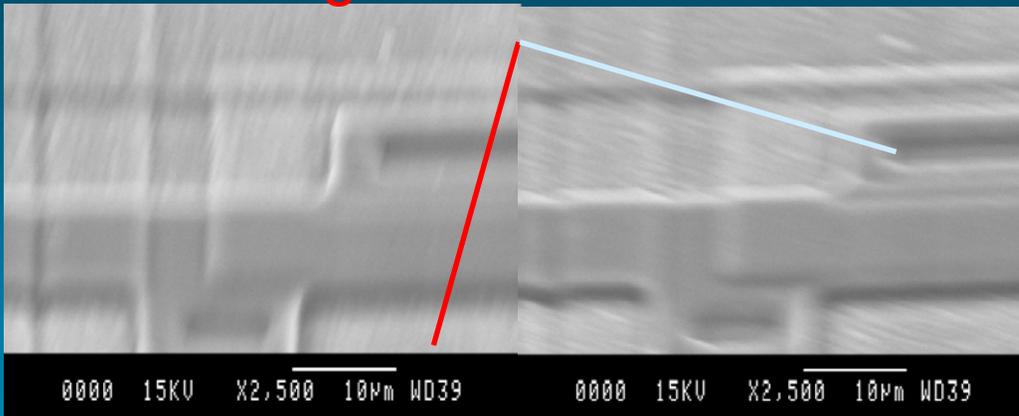
faisceau
non
circulaire



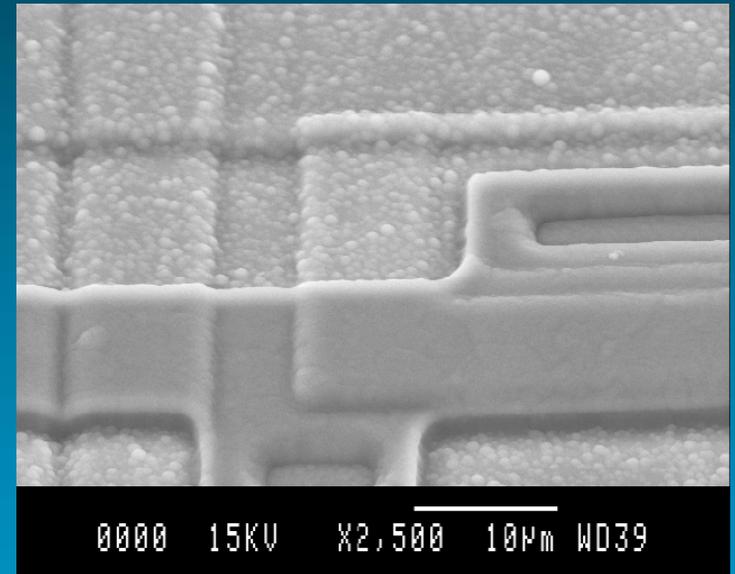
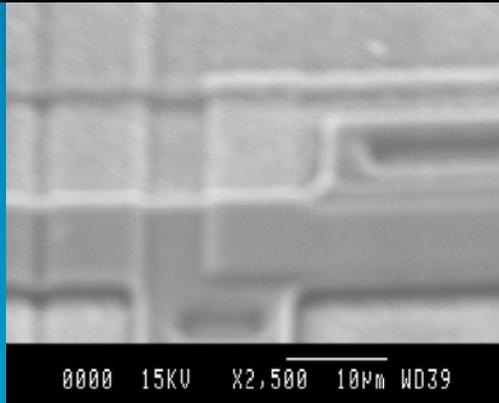
Optique électronique :

Réglage de l'astigmatisme

focale sagittale focale transverse



focale principale



astigmatisme compensé

Optique électronique :

aberration de diffraction  *NEGLIGEABLE*

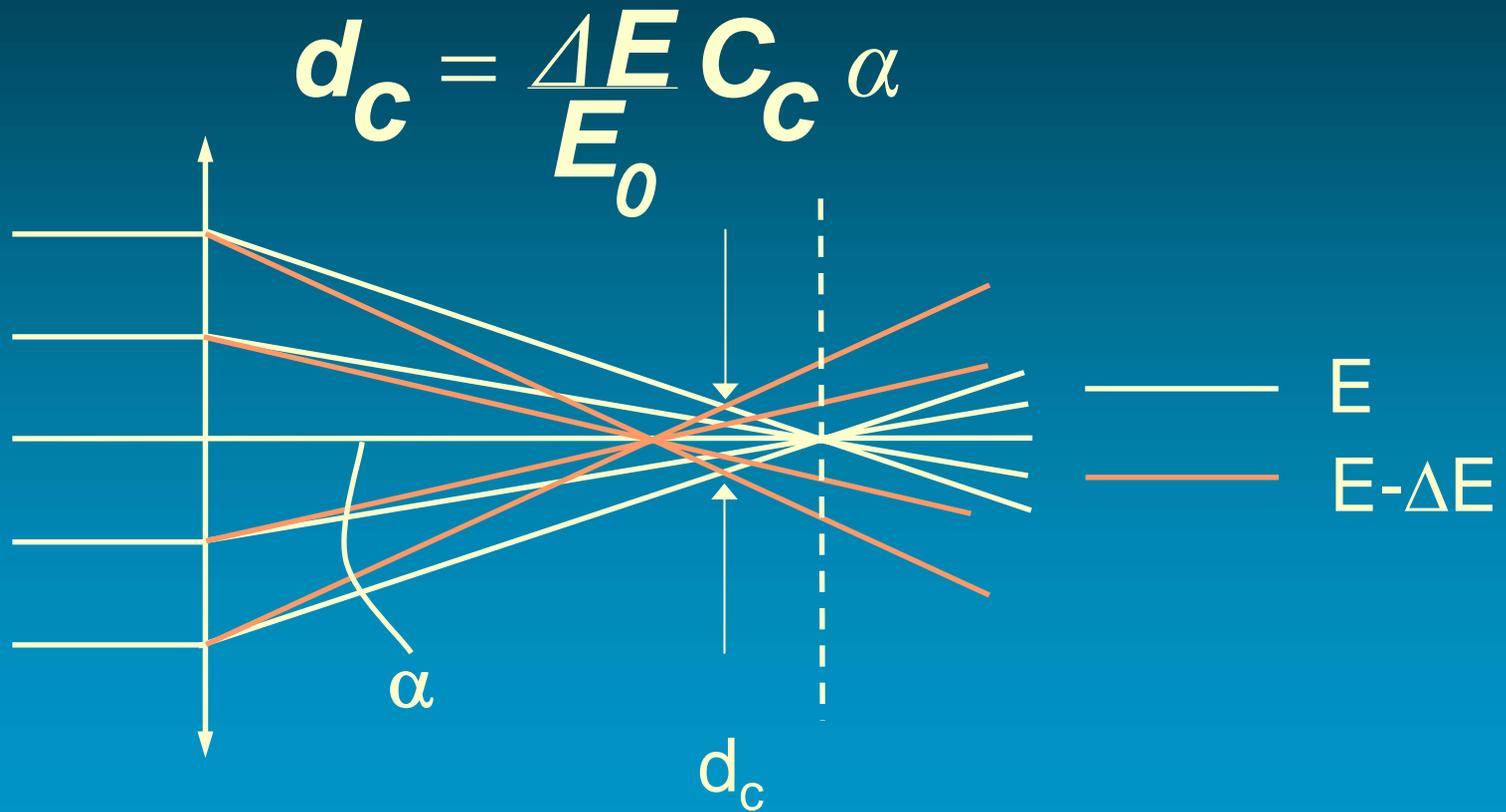
$$d_d = 1.22 \lambda \alpha^{-1}$$

les diaphragmes du système optique sont définis par le constructeur

 *NEGLIGEABLE*

Optique électronique :

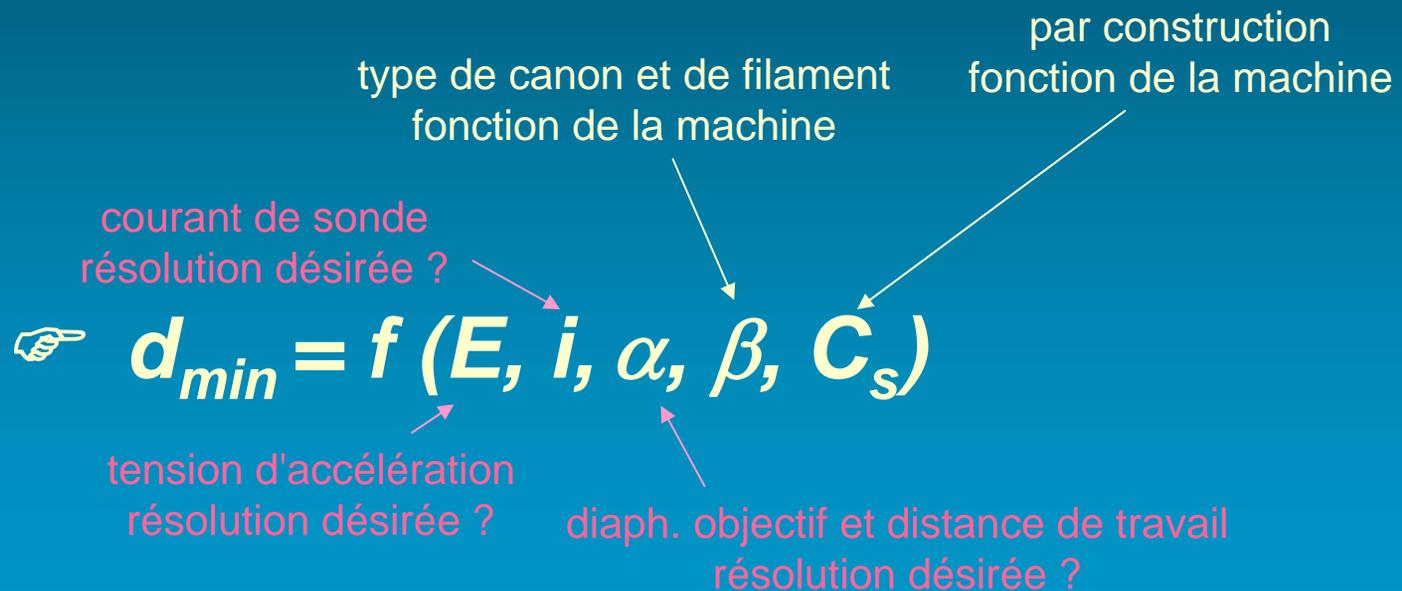
aberration chromatique \rightarrow *NEGLIGEABLE*



Optique électronique :

diamètre du faisceau

$$d^2 = d_g^2 + d_s^2 (+ d_a^2 + d_d^2 + d_c^2)$$



Optique électronique : profondeur de champ

☞ hauteur sur laquelle le faisceau garde la même taille (i.e. la résolution ne change pas)

☞ $PdC = f(WD, \text{diaph. obj.})$

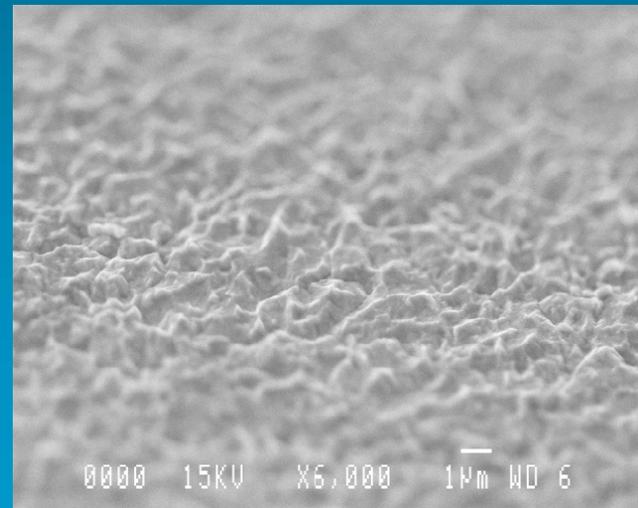
Exemple :

Au électrolytique/Si

angle d'observation (tilt): 45°

distance de travail (WD) : 6mm

profondeur de champ : $\sim 4\mu\text{m}$



ce qu'il faut retenir !...

choix et réglages

1. CHOIX :

- haute tension
- courant de sonde
- orientation de l'objet
- distance de travail

2. REGLAGES :

- diaphragme "objectif"
- focalisation / astigmatisme
- mise en page (rotation, grandissement)

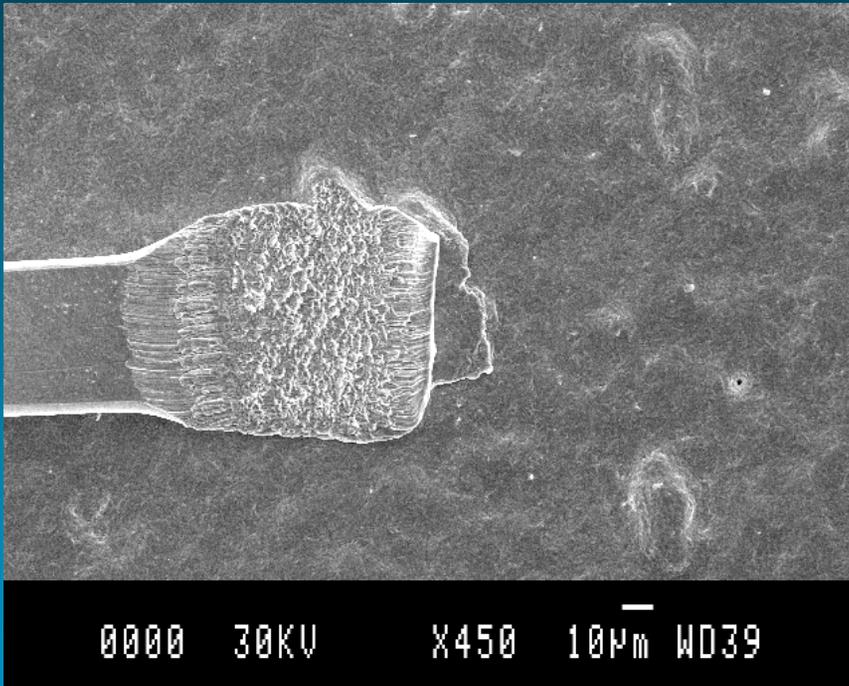
... C'est simple !

ce qu'il faut retenir !...

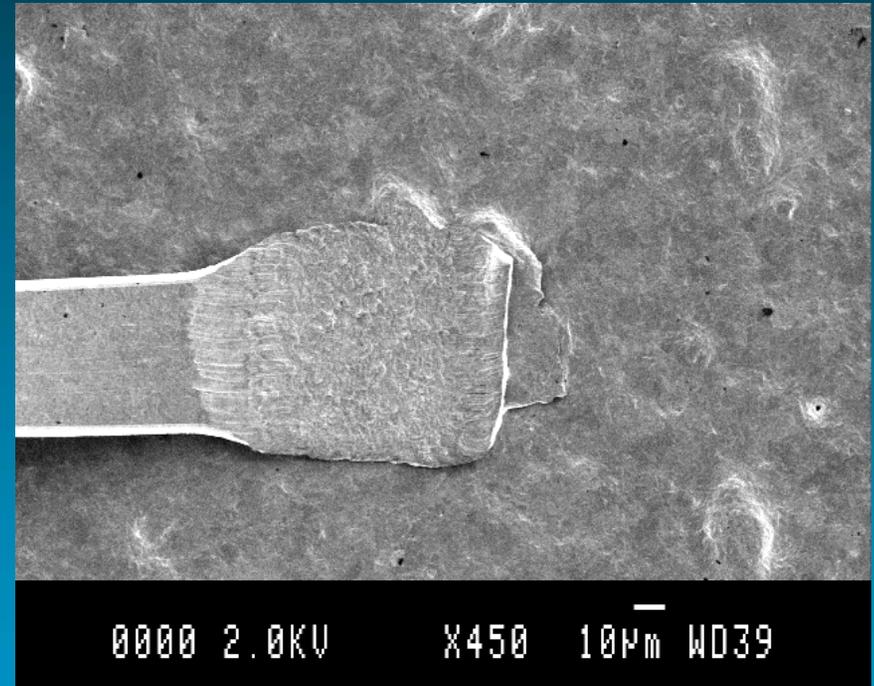
Distance de travail ↗	Tension ↗	Courant ↗	Diaphragme ↗
Résolution ↘ ↘ ↘ Prof. de champ ↗	Résolution ↗ ↗ Effets de pointe ↗ Charges ↗ ↗ Dommages ↗ ↗ Détails de surf. ↘	Résolution ↘ ↘ Charges ↗ ↗ Dommages ↗ ↗ Bruit ↘	Résolution ↘

ce qu'il faut retenir !...

haute tension



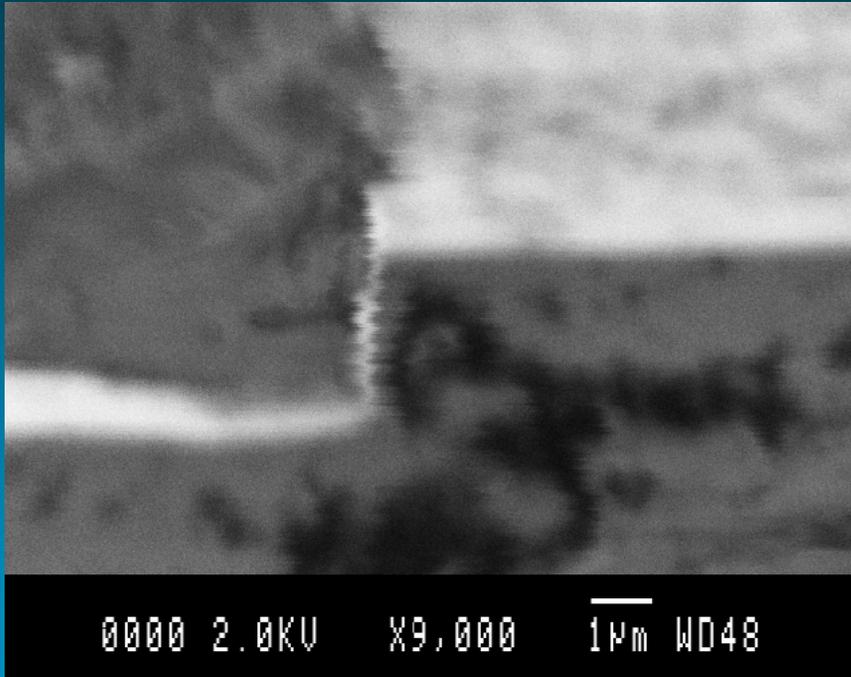
tension élevée



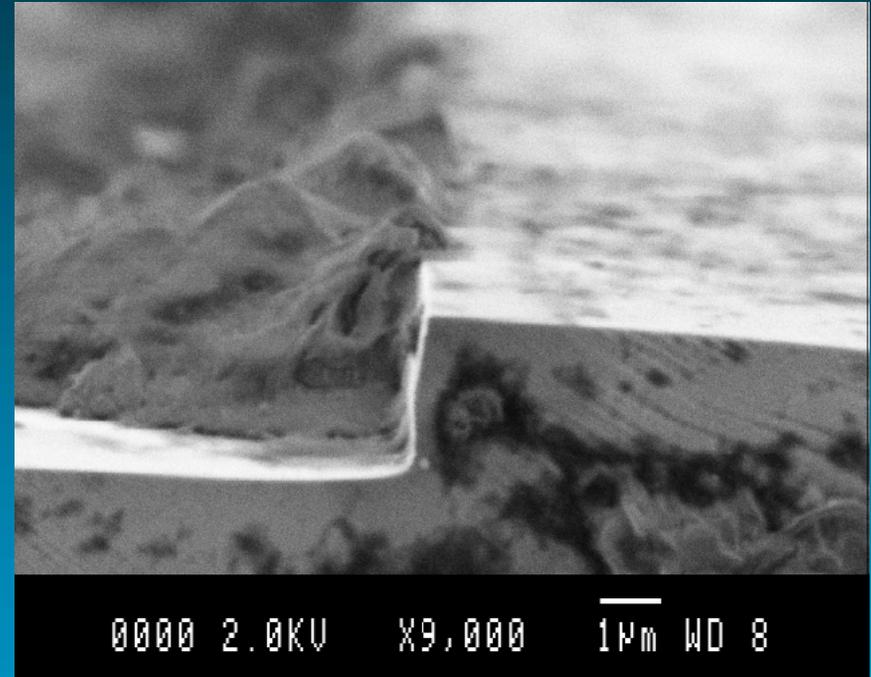
tension faible

ce qu'il faut retenir !...

choix de la distance de travail



forte distance de travail



faible distance de travail

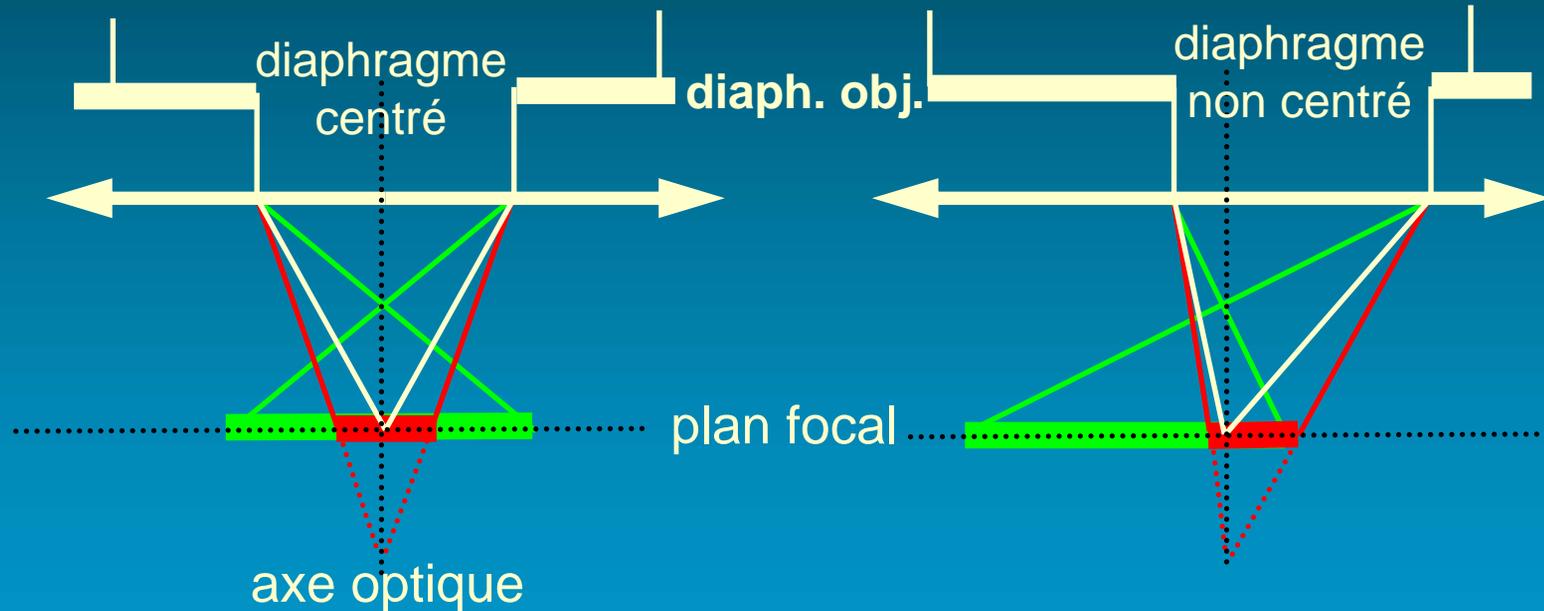
ce qu'il faut retenir !...

but du diaphragme "objectif"

- Sélectionner les électrons :
 - de même énergie
 - de même trajectoire
- Limiter les aberrations

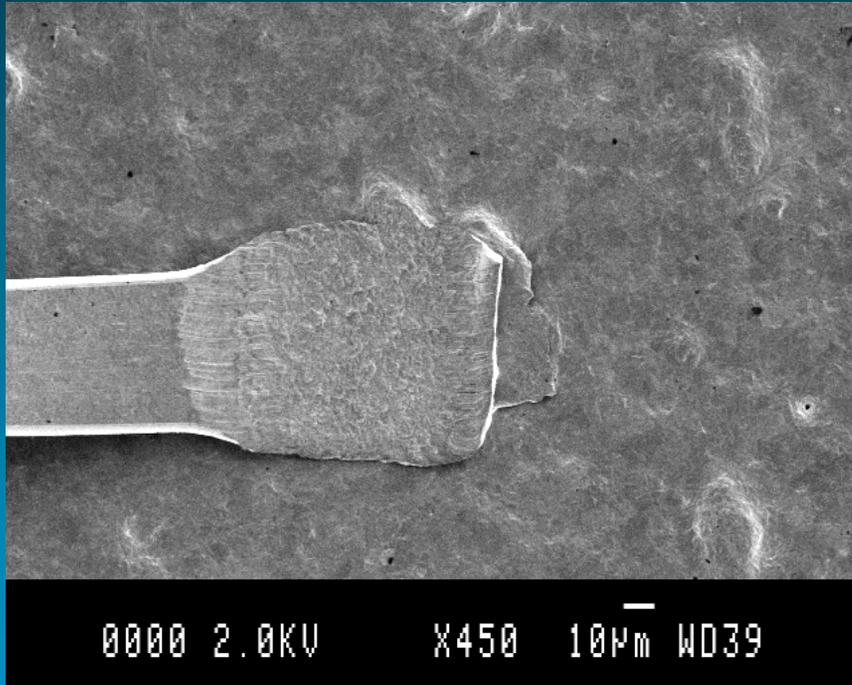
ce qu'il faut retenir !...

réglage du diaphragme "objectif"

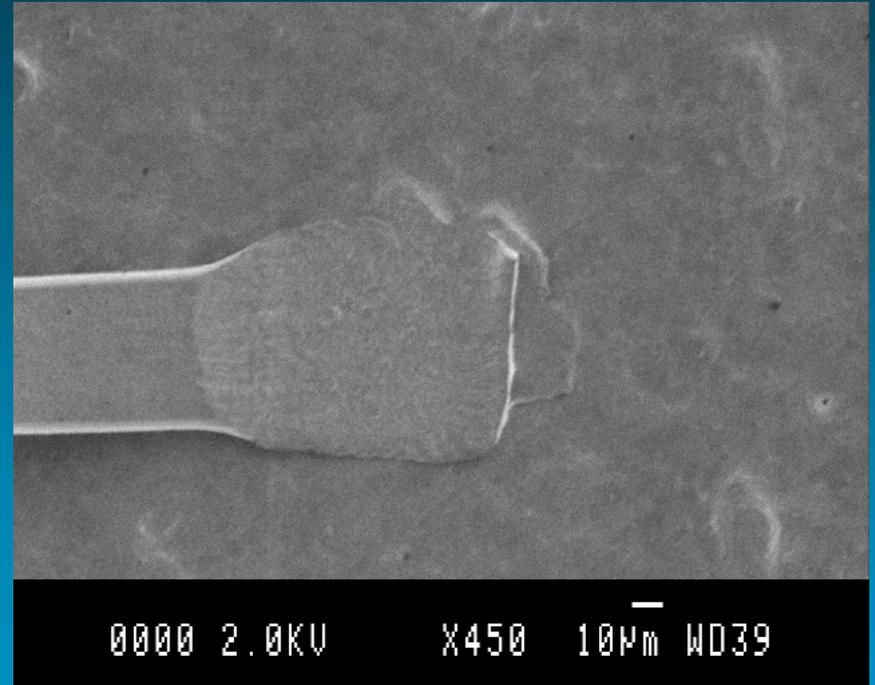


ce qu'il faut retenir !...

réglage du diaphragme "objectif"



diaphragme aligné



diaphragme désaligné

Conclusion

- caractérisation par faisceau d'électrons :
 - imagerie :
 - contraste topographique
 - contraste chimique
 - analyse :
 - EDX, WDX
 - Auger
 - cathodoluminescence
- MEB :
 - simple à mettre en œuvre (formation ~3 ½ journées)
 - caractérisation de surface
 - "non destructive" (modification de la surface par pollution)
- **principal facteur limitant : l'utilisateur(trice)**
- **50% du travail ➡ connaissance de l'échantillon**

Bibliographie

- A guide to scanning Microscope Observation (JEOL)
- Microscopie Electronique à Balayage et Micro-analyse X
Club MEB Toulouse – P. Chomel - INSA Toulouse – 1990
- Techniques de l'Ingenieur : Analyse et Caractérisation
- Micro-analyse, Microscopie Electronique à Balayage
Editions de Physique – Ecole d'été de St martin d'Hères - 1978
- Transmission Electron Microscopy
Plenum Press – D.B. Williams & C.Barry Carter - 1996