

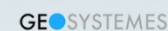
ECOLE D'ETE GN-MEBA

Microscopie Electronique à Balayage et Microanalyses

Les colonnes électroniques

Francine Roussel, Laurent Maniguet, Frédéric Charlot
Grenoble INP - CMTC

Organisation :



Supports techniques :



Autres supports :



Une colonne électronique permet de :

Former une image réduite du cross-over (virtuel ou non) à la surface de l'échantillon

Balayer la sonde électronique afin de former une image de l'échantillon à un grandissement donné

Elle est équipée d'un ensemble de dispositifs d'optique électronique permettant de répondre à ces fonctions

Pour avoir une sonde électronique à la surface de l'échantillon

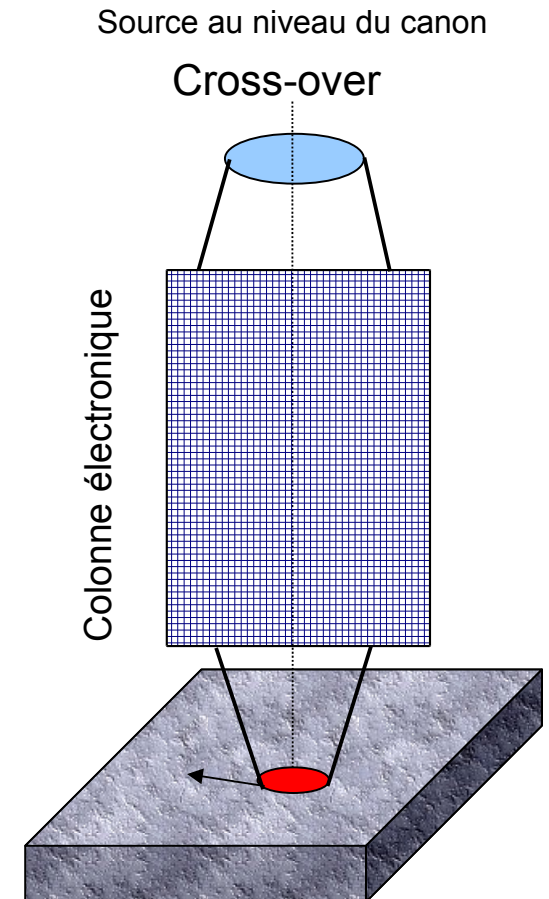
D'une dimension la plus petite possible (Résolution)

Sans aberration (Résolution)

La plus brillante possible (Signal)

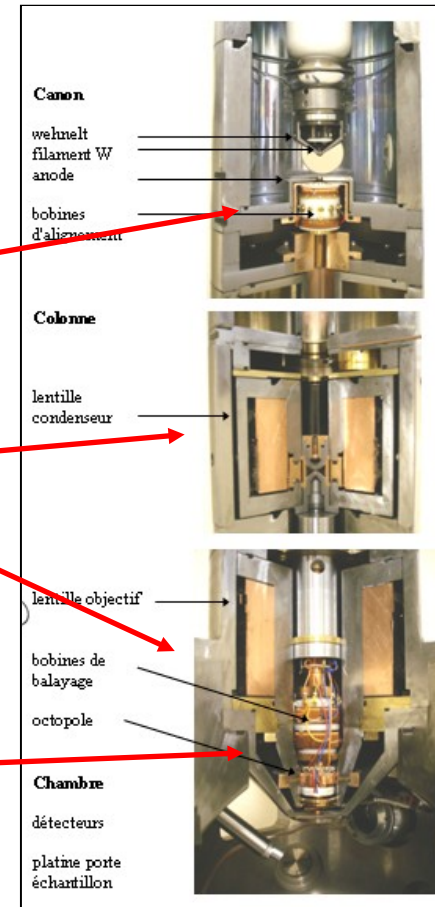
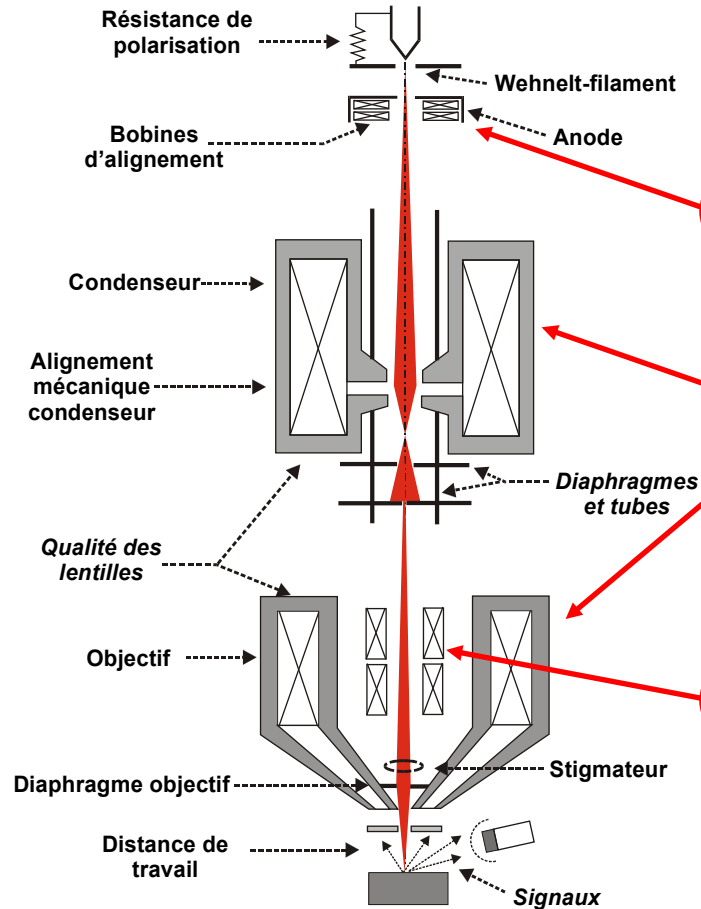
Dans une large gamme de tension d'accélération

Afin d'avoir la meilleure image



Éléments constituant une colonne électronique

Cas d'une colonne « classique »



Bobines d'alignement

Lentilles Électro magnétiques

Bobines de balayage

Colonne sous vide secondaire (10^{-4} mbar)

Les dispositifs permettant de maîtriser la géométrie du faisceau d'électrons

utilisent majoritairement un champ magnétique (lentilles électromagnétiques, bobines d'alignement, déflections, ...)

Les microscopes à effet de champ utilisent des colonnes dédiées permettant

Une imagerie à basse tension avec une résolution optimale

Une détection des signaux « dans la colonne »

Une lentille pour les électrons : la lentille électromagnétique

Constat :

En optique photonique , la lentille en verre permet de focaliser la lumière grâce aux lois de la réfraction de la lumière (Loi de Descartes)

En optique électronique, les électrons sont absorbés par la matière

Déflexions de la trajectoire des électrons :

Soit par l'utilisation d'un champ électrique

$$\vec{F} = -e \vec{\varepsilon}$$

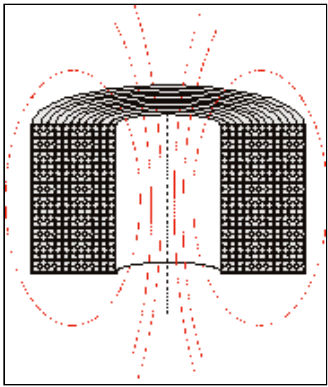
Soit par l'utilisation d'un champ magnétique

$$\vec{F} = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$$

Pour des raisons d'aberrations optiques
et d'isolation électrique à haute tension

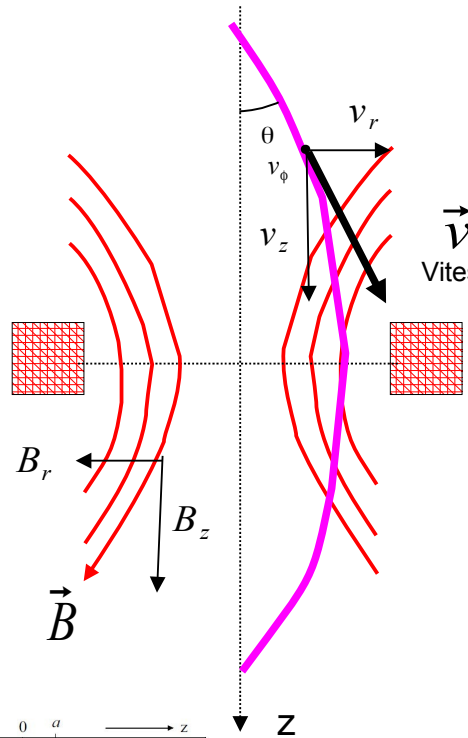
L'utilisation de lentille utilisant un champ magnétique est privilégiée en MEB

→ Lentille électromagnétique



Lignes de champ

Un courant électrique I circulant dans des spires de cuivre (bobine torique) produit une induction magnétique



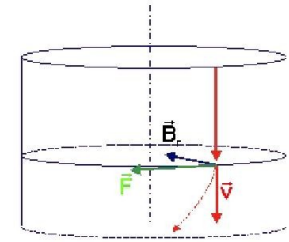
Symétrie axiale
du champ magnétique
pour avoir un effet de « focalisation »

En coordonnée cylindrique (r , z et ϕ)

$$\vec{F} = -e \vec{v} \wedge \vec{B}$$

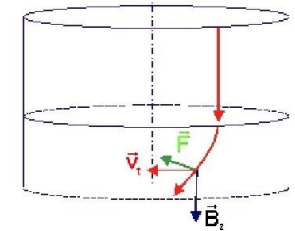
■ $F_z = ev_\phi B_r$

→ Trajectoire circulaire → Hélicoïdale



■ $F_r = -ev_\phi B_z$

→ Convergence vers l'axe



■ $F_\phi = -ev_z B_r + ev_r B_z$

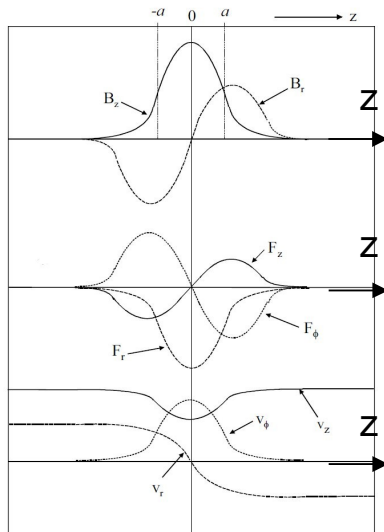
→ Rotation du plan de trajectoire des électrons

Variation dans la bobine de :

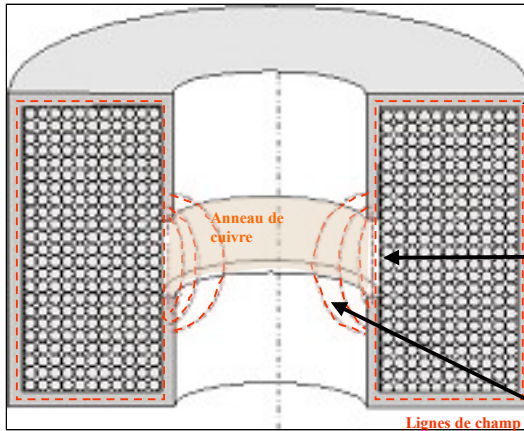
Champ magnétique
 B_z et B_r

Force appliquée
 F_r , F_z et F_ϕ

Vitesse de l'électron
 V_r , V_z et V_ϕ



Un champ magnétique **Non** homogène permet la propriété de focalisation



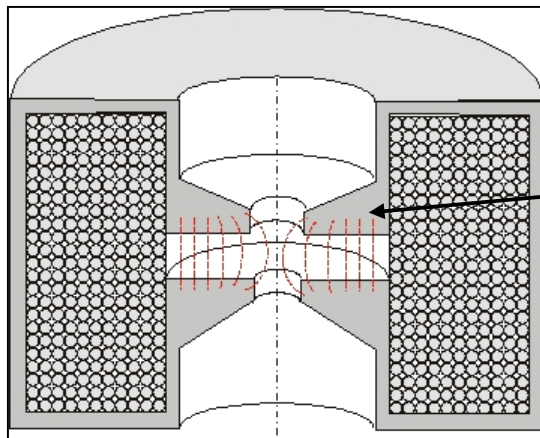
Une armature ferromagnétique autour de la bobine canalise le champ magnétique produit.

En fer doux par exemple

Ouverture magnétique de l'armature = entrefer

En matériau diamagnétique (cuivre, laiton)

Emergence d'un champ magnétique dans cette zone



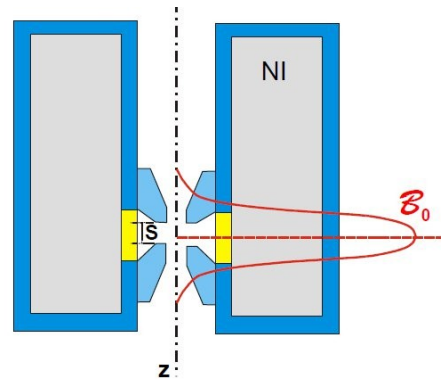
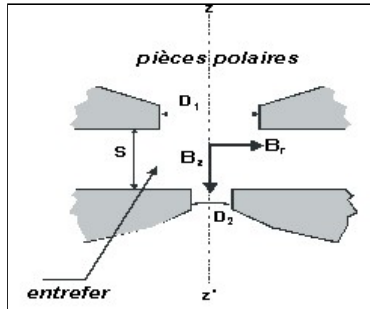
Afin de concentrer les lignes de champ magnétique
Modification de l'armature à proximité de l'entrefer :

Pièces Polaires

La géométrie de cette pièce polaire conditionne les propriétés optiques de la lentille

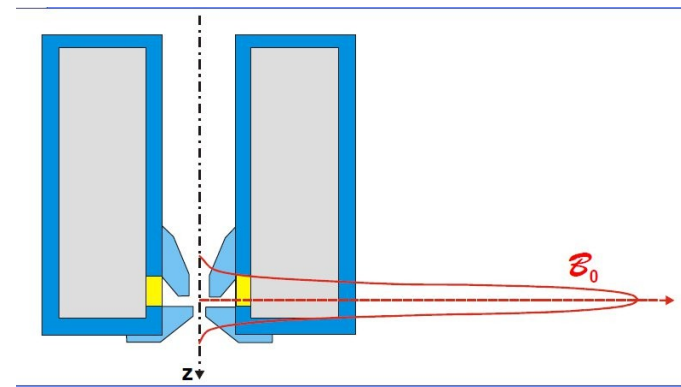
Pouvoir de focalisation d'une lentille

Le champ magnétique est confiné dans un espace réduit



Champ symétrique

$$D_1 = D_2$$



Champ asymétrique

$$D_1 \neq D_2$$

$$B_0 = \mu_0 \frac{NI}{L}$$

$$L = \sqrt{S^2 + 0,45 D^2}$$

$$D = \frac{D_1 + D_2}{2}$$

L Facteur géométrique
Nombre d'Ampère-tours NI

Si le champ magnétique est décrit par une courbe en forme de cloche

Fonction Lorentzienne

→ 2a est la largeur à mi-hauteur de B_z

= Zone spatiale de forte intensité du champ magnétique

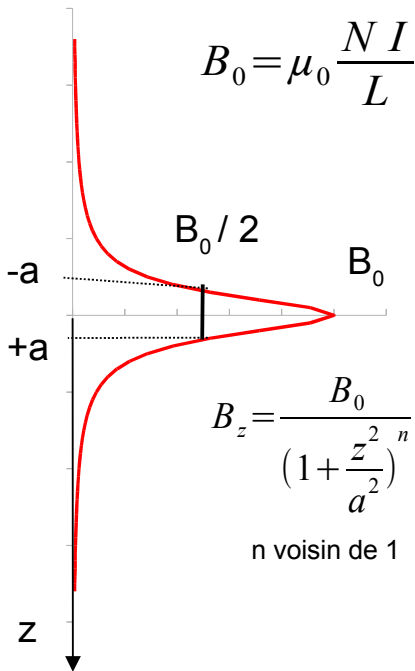
Suivant cette largeur, la lentille peut être considérée comme une **lentille mince**

Critère : $a \ll f$ f focale de la lentille

→ La déflexion des électrons s'effectue dans un seul plan

C'est le plan principal de la lentille

→ **Cela permet d'utiliser les lois d'optique des lentilles minces**



Pouvoir de focalisation d'une lentille

La distance focale dans une lentille électromagnétique mince est exprimée par :

$$\frac{1}{f} = \frac{e}{8mU} \int B_z^2 dz$$

U tension d'accélération des électrons
m masse des électrons

f est toujours positif ce qui implique que la lentille est convergente $B_z^2 > 0$

→ L'image est réelle

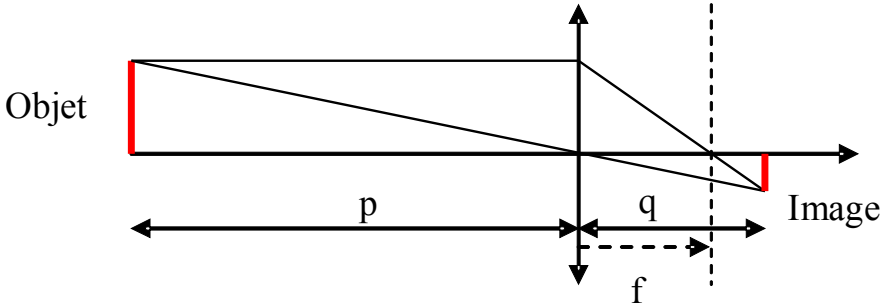
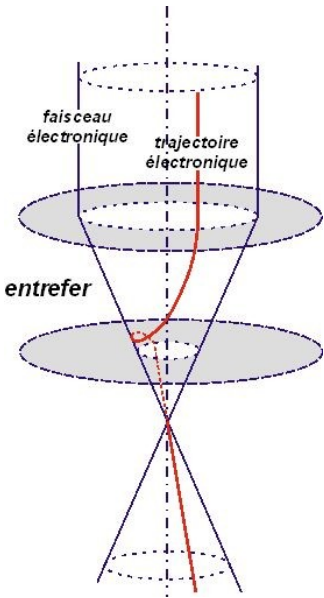
f est proportionnelle à U

f est inversement proportionnelle à B, donc à NI

→ Plus le courant I est élevé (forte excitation de la lentille), plus la focale est courte

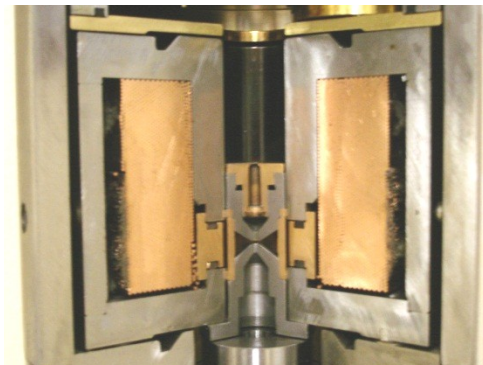
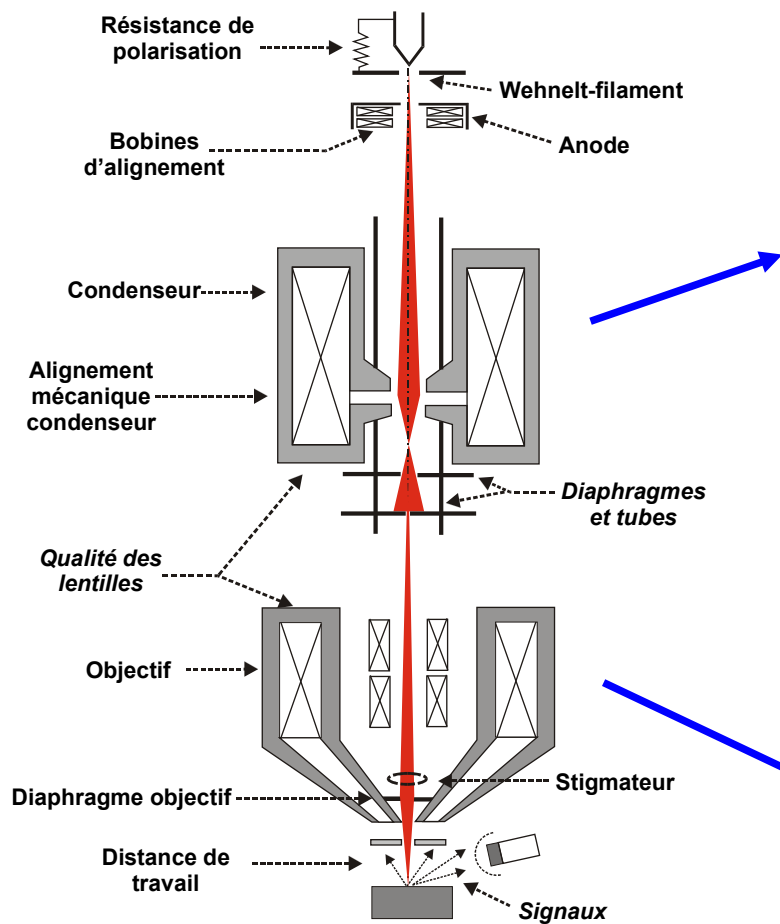
Dans le cas d'un champ magnétique « lorentzien »

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{\pi}{16}\right) \frac{e}{mU} aB_0^2$$



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

Fonctionnement d'une colonne électronique

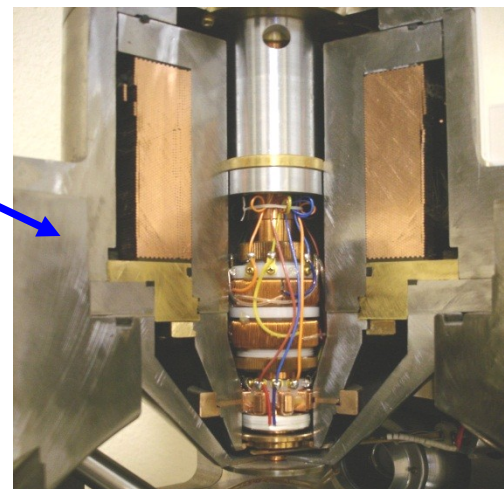


Condenseur

Pièce polaire symétrique

Rôle

Faire varier la taille et l'intensité du faisceau d'électrons



Objectif

Lentille finale

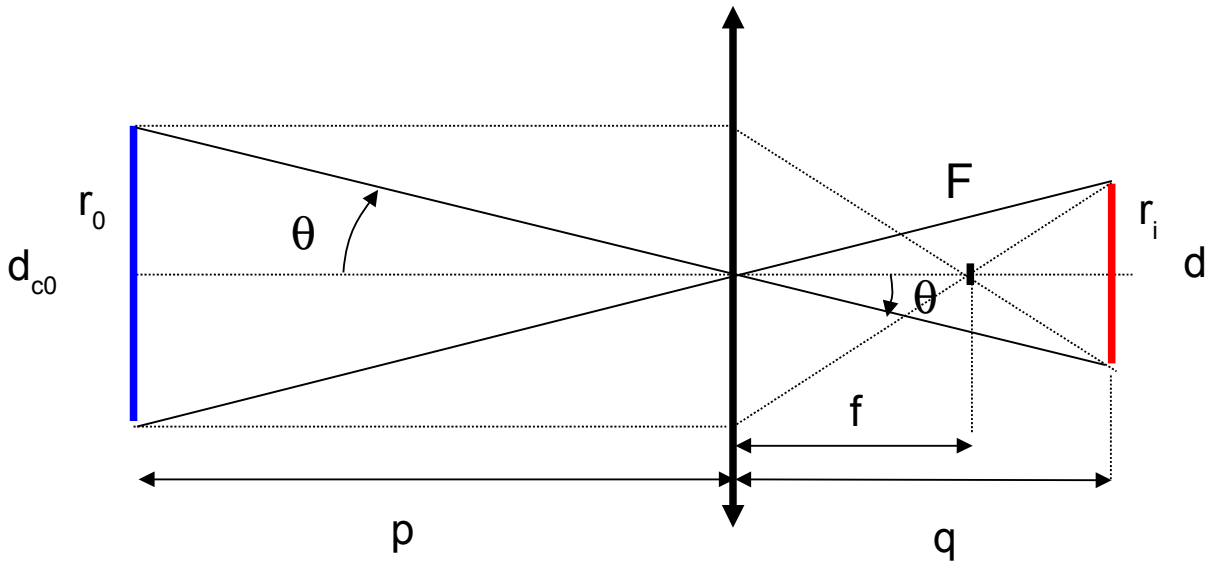
Pièce polaire dissymétrique

Avec présence des systèmes de balayage

Rôle

Faire converger le faisceau d'électrons à la surface de l'échantillon

Les lentilles électromagnétiques sont considérées comme des lentilles minces



$$\frac{1}{f} = \frac{1}{p} + \frac{1}{q}$$

Facteur de « grandissement »

$$M = \frac{q}{p}$$

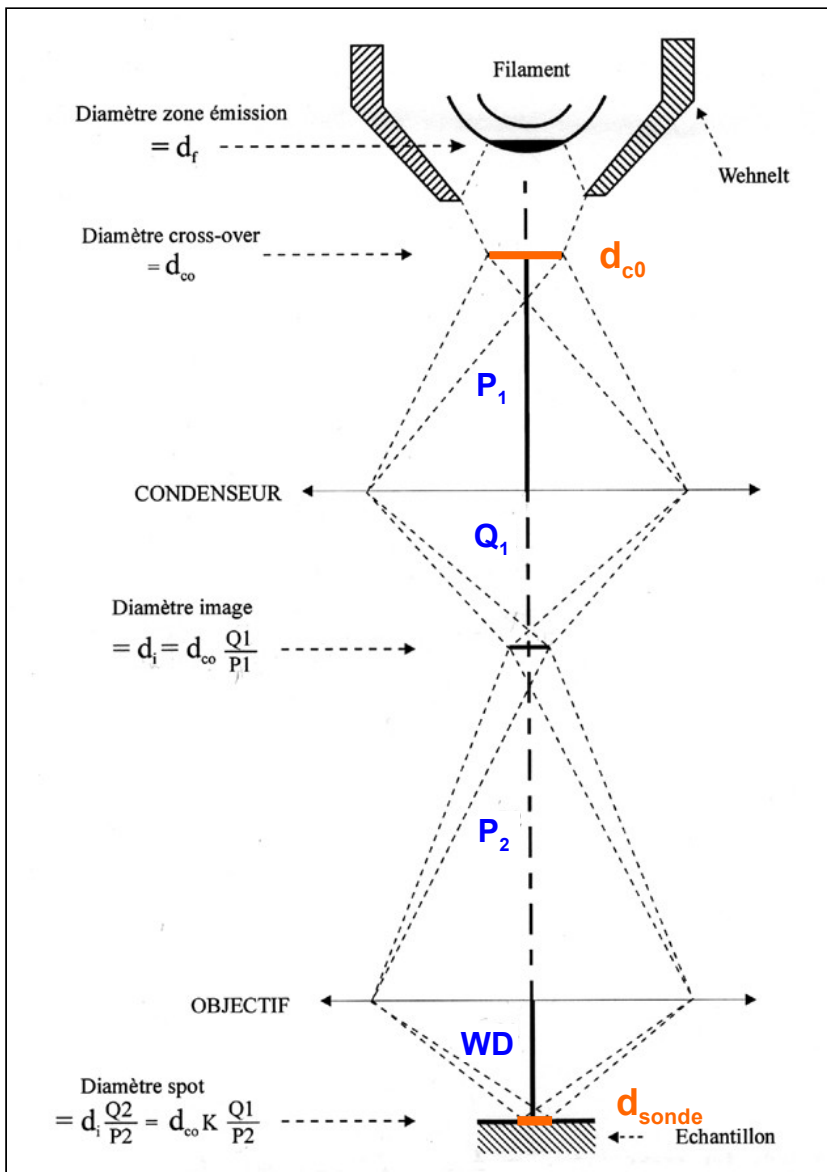
Si $M > 1$ Grandissement

Si $M < 1$ Réduction

$$\left. \begin{array}{l} \tan \theta = \frac{r_{co}}{p} \\ \tan \theta = \frac{r_i}{q} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{r_i}{r_{co}} = \frac{d_i}{d_{co}} = \frac{q}{p} = M$$

Attention à ne pas mélanger avec le grandissement d'une image MEB

Cas d'une colonne sans aberration



Relation reliant la taille du cross-over à la taille de sonde

$$d_s = d_{co} \frac{Q1}{P1} \frac{WD}{P2} = d_{co} M$$

M : facteur total

Pour diminuer la taille de sonde

■ Complémentarité WD et Condenseur

Faible $Q1$ = Condenseur excité

Faible WD = Echantillon proche de la lentille Objectif

■ Le facteur M dans un MEB

Dans un MEB conventionnel :

Diamètre de la source (~50 μm), diamètre du spot (~5 nm)

Rôle réducteur important

M voisin de 1/10000

Dans un MEB équipé d'un canon à effet de champ :

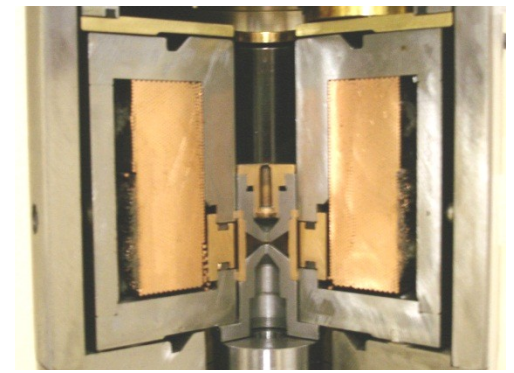
Diamètre de la source (~10 nm), diamètre du spot (~1 nm)

Rôle réducteur moins important

M voisin de 1/10

Rôle du condenseur

Réduction du diamètre du faisceau – Amélioration de la résolution

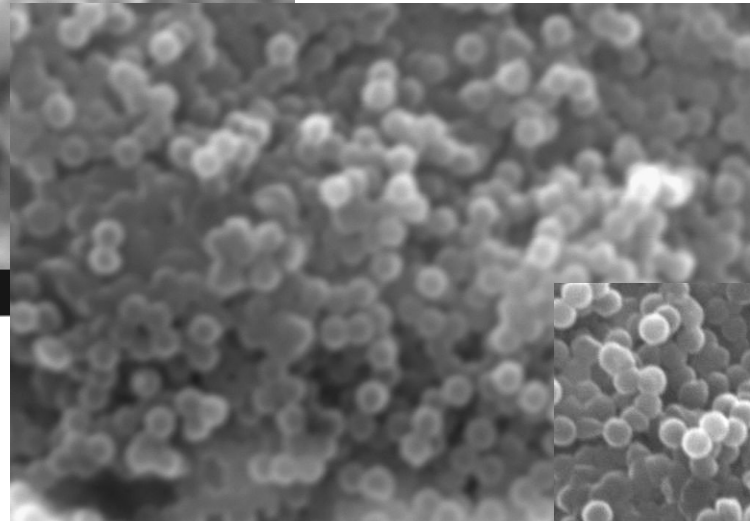


Diamètre du faisceau
d'électrons de plus
en plus fin



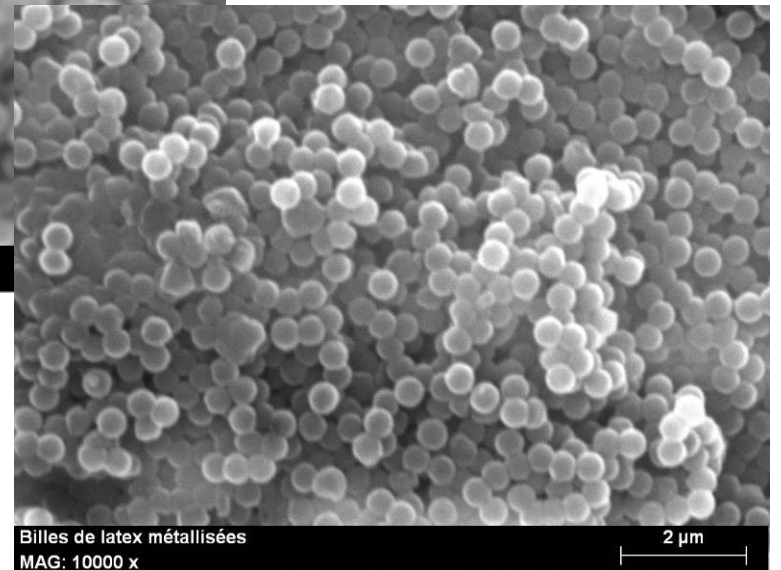
Billes de latex métallisées
MAG: 10000 x

Condenseur faiblement excité



Billes de latex métallisées
MAG: 10000 x

Condenseur moyennement excité



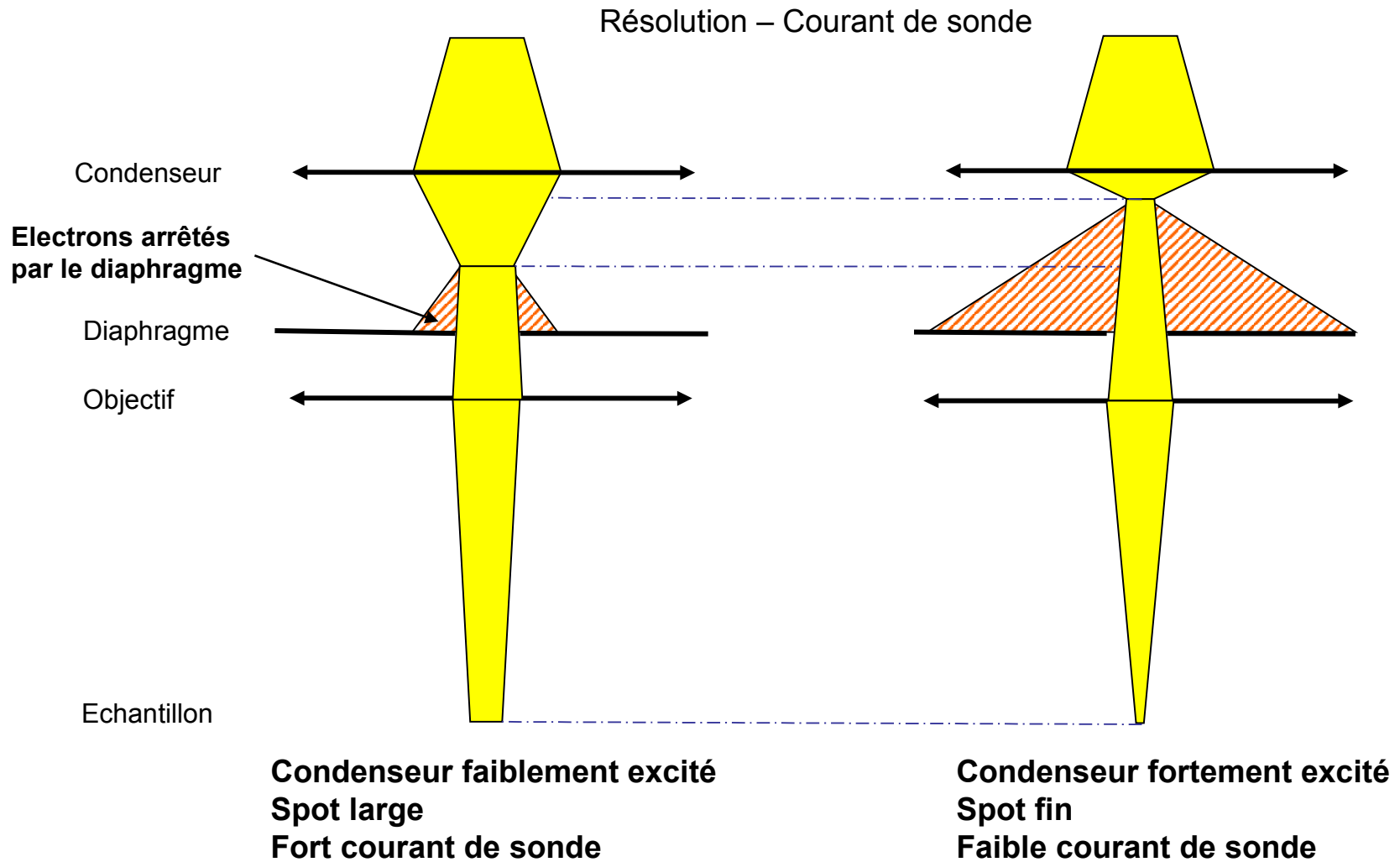
Billes de latex métallisées
MAG: 10000 x

Condenseur fortement excité

Image F Roussel

Exemple : Billes de latex métallisées à 20kV
G x10 000 (fort grandissement)

Rôle du condenseur : une double action

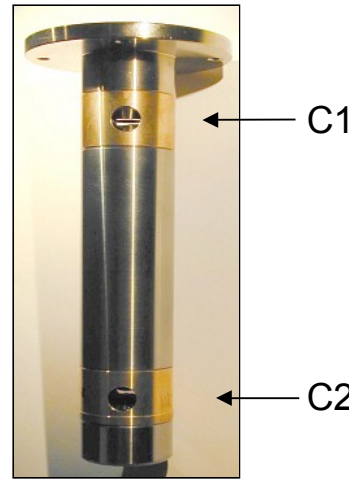
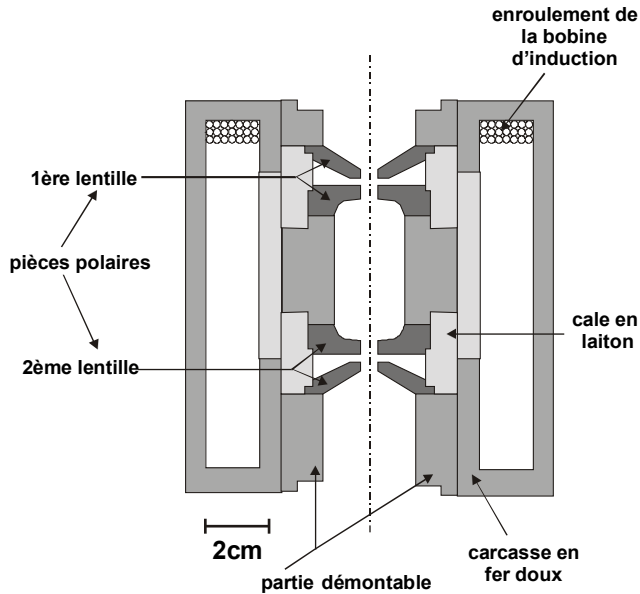


Les images à fort grandissement doivent être réalisées avec un condenseur excité.

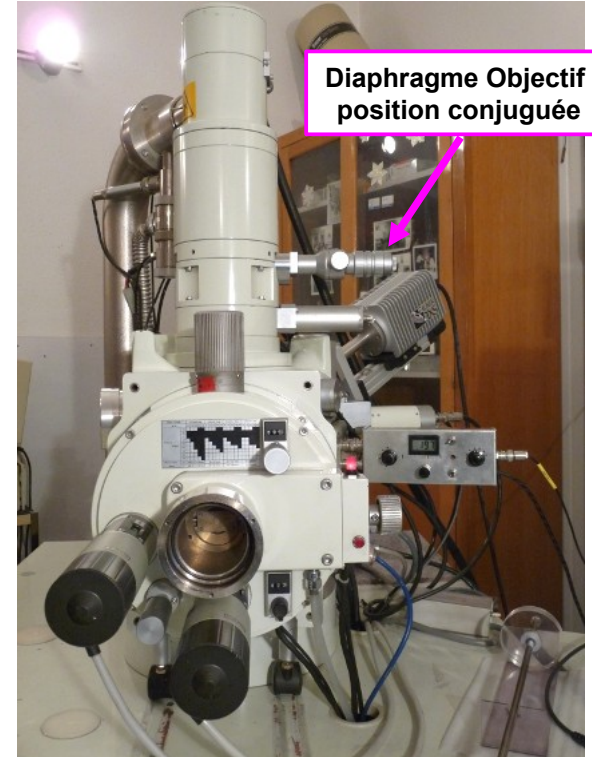
Mais un compromis doit être trouvé entre Résolution et Courant de sonde (Rapport signal sur bruit de l'image)

Remarque sur le double condenseur

Dans les colonnes, il est commun d'avoir deux condenseurs participant à ajuster la taille de sonde.
Ces condenseurs sont actuellement couplés .
Ils utilisent un seul enroulement et deux systèmes de pièces polaires



Pièces polaires d'un double condenseur



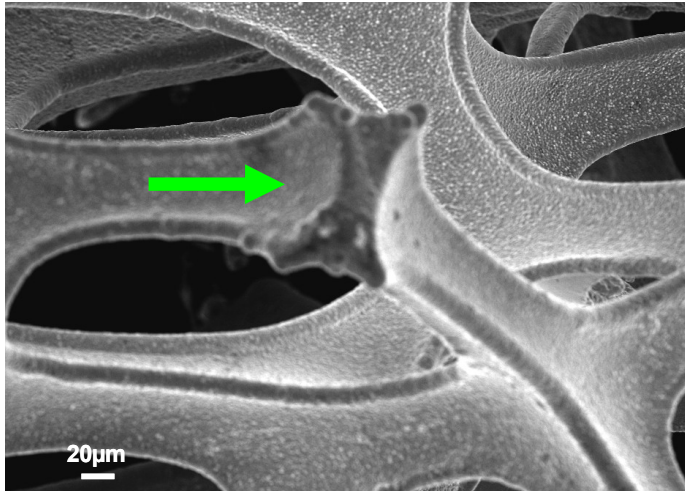
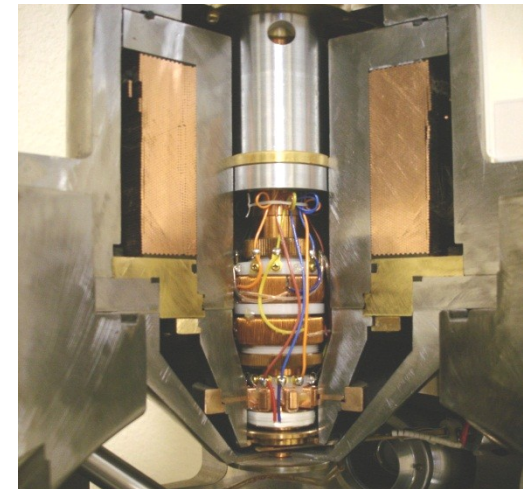
Doc CMTC

➡ Plus ou peu de perte de focalisation

➡ Permet au diaphragme objectif d'être en position conjuguée au cœur de la colonne (moins sensible à la contamination).

Rôle de la lentille Objectif

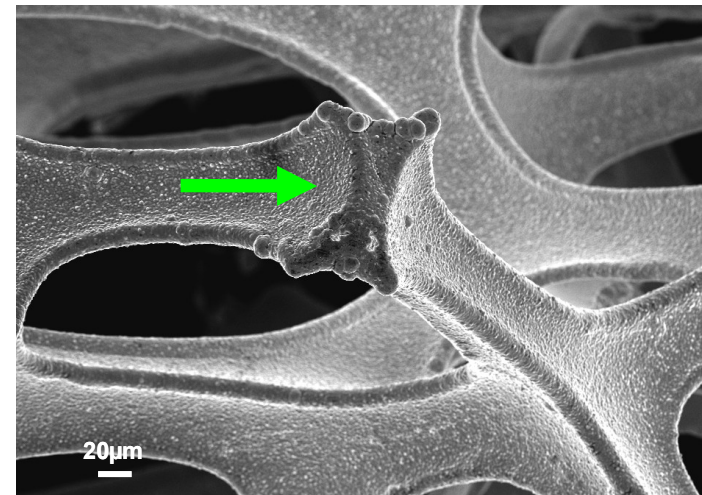
Faire converger le faisceau d'électrons à la surface de l'échantillon
Ou focaliser le faisceau d'électrons



Focalisation 19.8 mm

Premier plan flou

Exemple : Mousse de Ni à 20kV

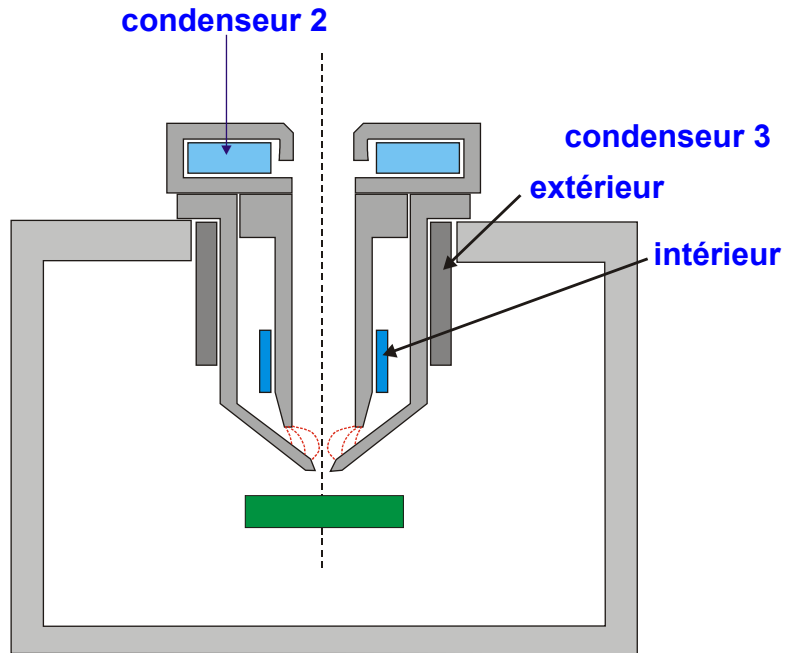


Focalisation 19 mm

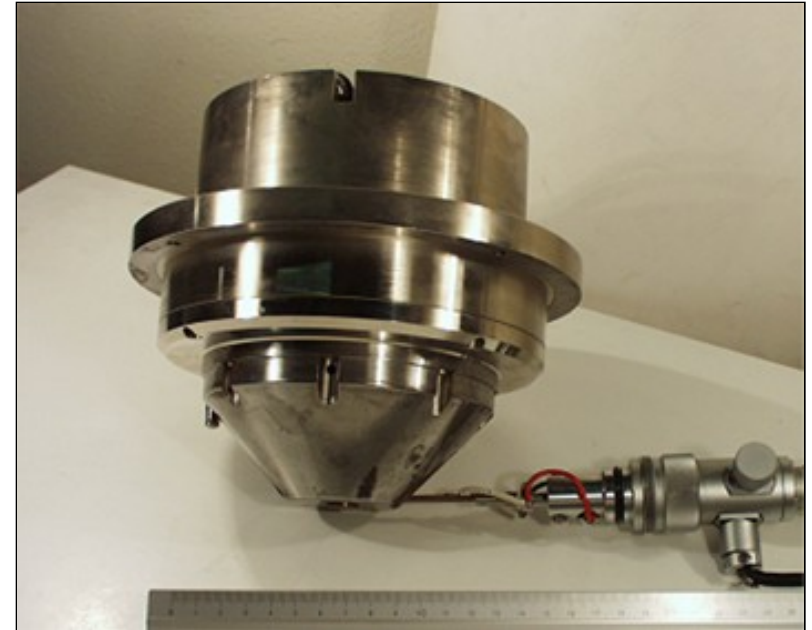
Il existe différents types de lentille objectif

Différentes types de lentilles objectif

■ Lentille objectif conique classique (pour MEB-W et MEB-FEG)



Doc. FEI



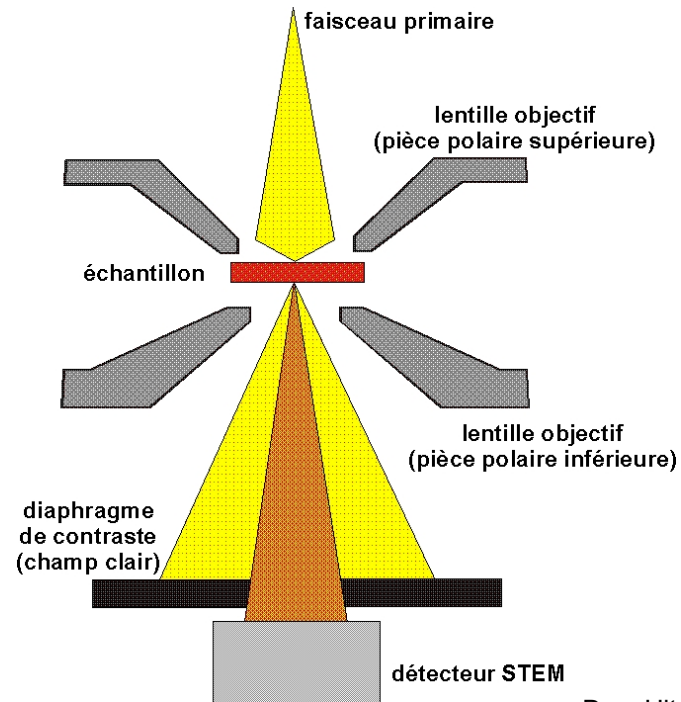
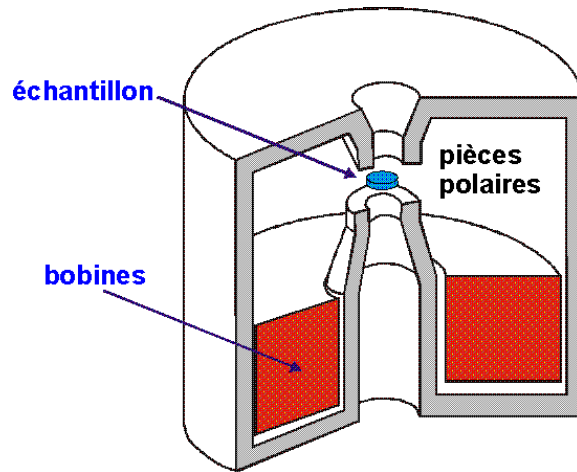
Doc. CMTC

Le champ magnétique reste confiné dans la lentille.

L'échantillon est placé en dessous de la lentille

- compatible avec des échantillons de grande taille
- possibilité de travailler à fort distance de travail (profondeur de champ)
- ne perturbe pas le détecteur d'Everhart et Thornley

■ Lentille objectif à immersion totale (pour MEB-FEG)

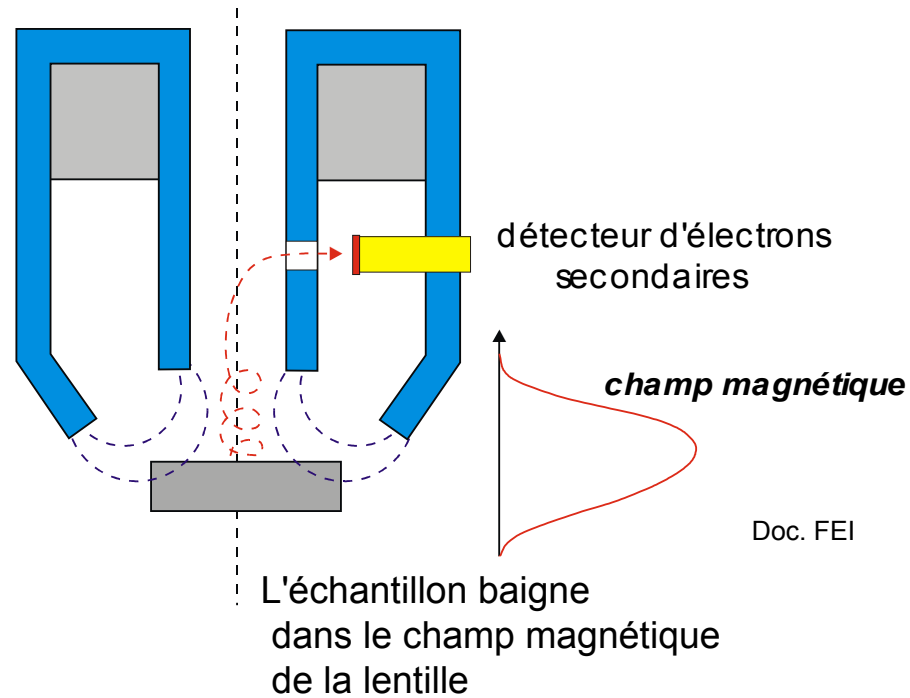


Doc. Hitachi

L'échantillon est placé à l'intérieur des pièces polaires de la lentille objectif comme dans un TEM :
l'échantillon baigne dans le champ magnétique de la lentille objectif.

- *très haute résolution (0,5 nm à 30 kV)*
- *dimensions d'échantillon réduites (quelques mm)*
- *détection dans la colonne*

■ Lentille objectif à immersion de type Snorkel (pour MEB-FEG)



L'échantillon est placé à l'extérieur de la lentille.

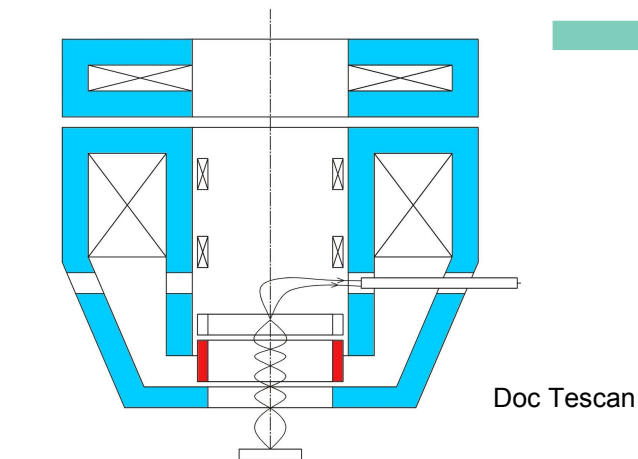
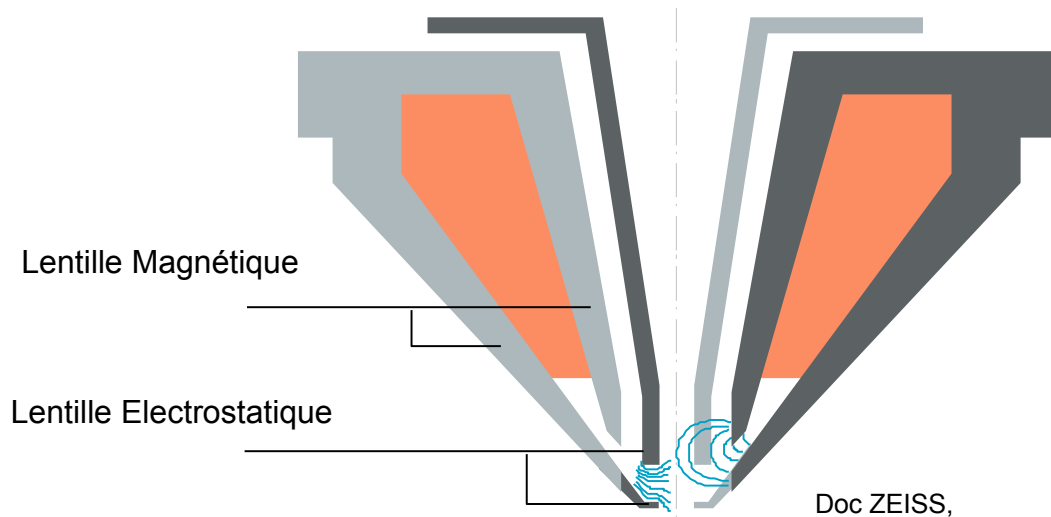
Le champ magnétique sort de la lentille.

L'échantillon baigne dans le champ magnétique à faible distance de travail :

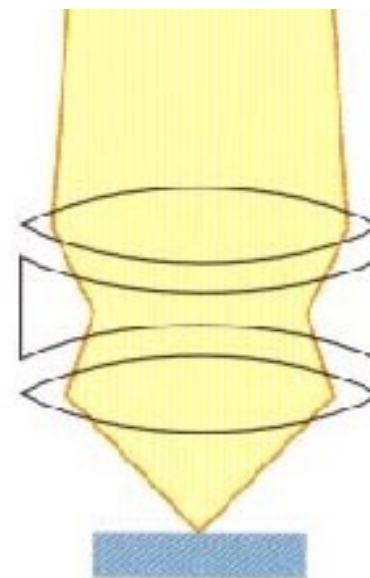
- *très haute résolution à faible distance de travail*
- *compatible avec la détection dans la colonne*
- *compétition avec le détecteur d'Everhart et Thornley*

■ Lentille objectif mixte

Couplage entre une lentille électromagnétique et une lentille électrostatique



Equivalent optique



Lentille convergente

Lentille divergente

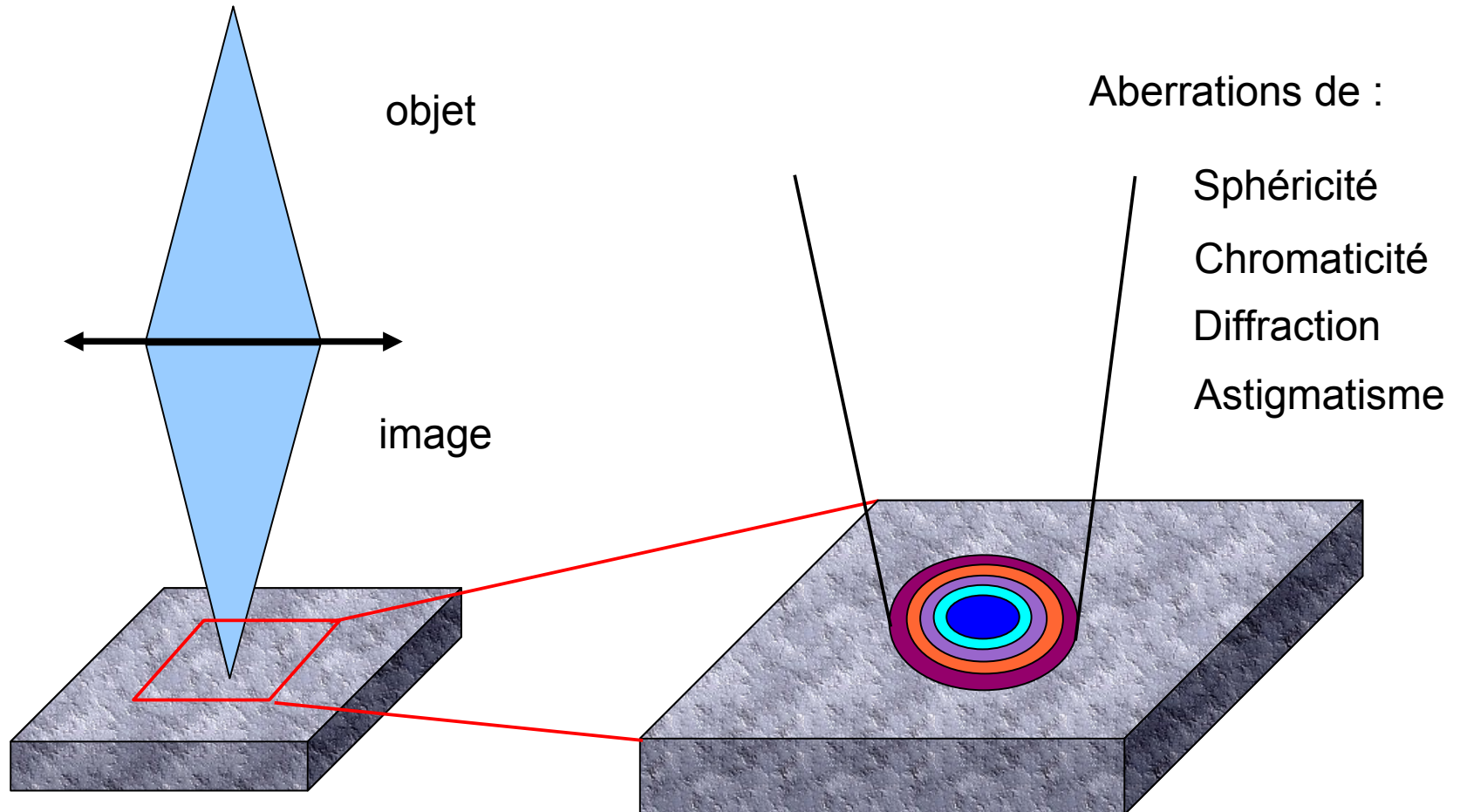
Lentille convergente

Intérêt : Obtention d'une lentille Achromatique

Cas d'une colonne réelle

Les systèmes optiques équipant la colonne ne sont pas parfaits => Aberrations optiques

Existence de cercles de confusion dus aux aberrations



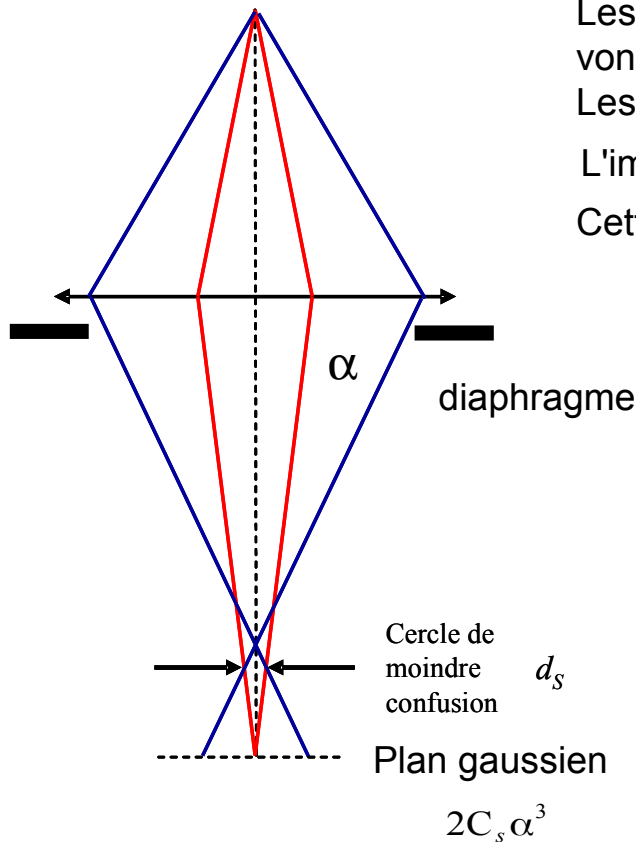
→ Elargissement de la taille de sonde à la surface de l'échantillon

Aberration de sphéricité

Dans une lentille électromagnétique, les électrons sont d'autant plus déviés qu'ils ont une trajectoire éloignée de l'axe optique

Car B est plus faible proche de l'axe optique

→ La distance focale n'est pas la même pour des trajectoires proches ou éloignées de l'axe optique



Les électrons ayant une trajectoire paraxiale (proche de l'axe optique) vont converger dans le plan de Gauss.

Les autres convergent avant.

L'image dans le plan de Gauss est alors une tache de diamètre $2C_s\alpha^3$

Cette tache représente le cercle de confusion

C_s = coefficient d'aberration sphérique

Unité de C_s : une longueur (mètre en SI)

Il existe un diamètre minimum pour cercle de confusion

→ Cercle de moindre confusion

$$d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3$$

Variation de d_s en fonction de α^3

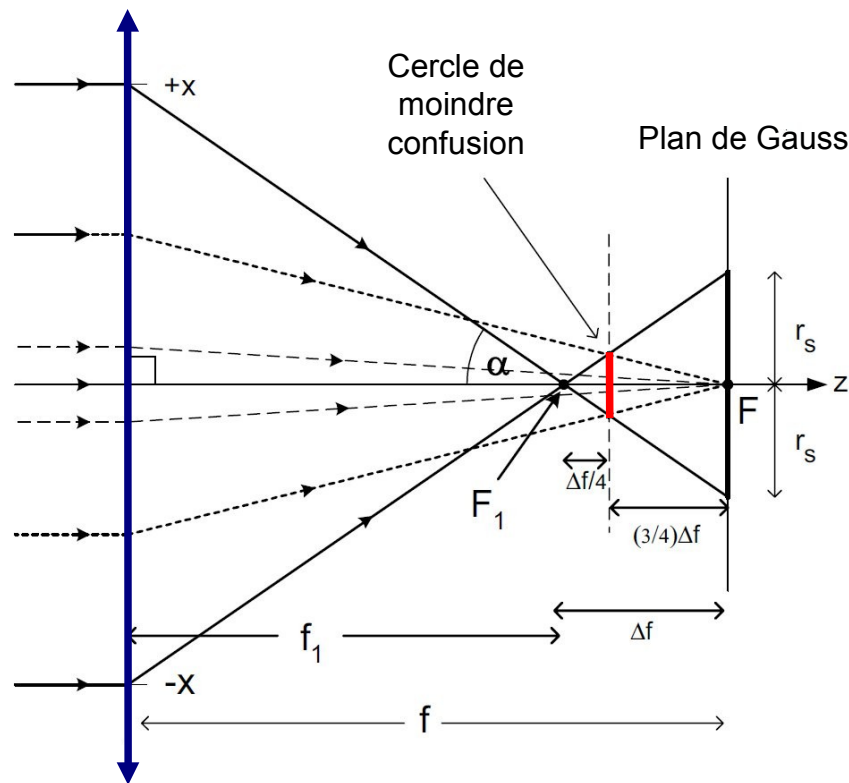
Limitation de d_s avec une faible ouverture du faisceau

10^{-2} rd (soit environ $0,6^\circ$)

α = demi-angle d'ouverture du faisceau

→ Le faisceau est diaphragmé pour rester dans une optique de Gauss

Estimation de l'aberration de sphéricité



Lentille
Plan principale

α = demi-angle d'ouverture du faisceau

La défocalisation Δf est définie par

$$\Delta f = f - f_1 = c_2 x^2 + c_4 x^4 + \dots$$

Paramètre avec une puissance paire en raison de la symétrie axiale du système

Même résultat pour x et -x

$$x = f_1 \tan \alpha \approx f \tan \alpha$$

$$x = f \alpha \quad \text{Car } \alpha \text{ est petit}$$

$$r_s = \Delta f \tan \alpha = \Delta f \alpha$$

$$r_s = \Delta f \alpha = c_2 x^2 \alpha = c_2 (f \alpha)^2 \alpha$$

$$r_s = c_2 f^2 \alpha^3$$

avec $C_s = c_2 f^2$ C_s = coefficient d'aberration sphérique

$$r_{\text{moindre confusion}} = r_s / 4 = \frac{1}{4} C_s \alpha^3$$

Quelques valeurs en fonction du type de lentille :

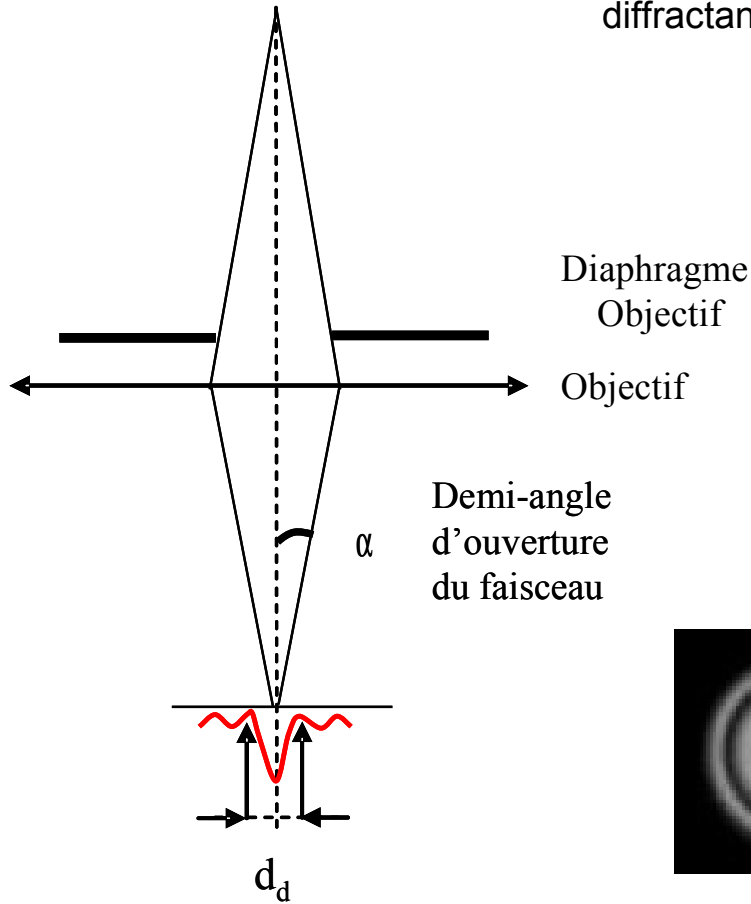
Lentille classique, $C_s = 10 \text{ mm}$ et $\alpha = 10^{-2} \text{ rd}$, $d_s = 5 \text{ nm}$

Lentille à immersion, $C_s = 2 \text{ mm}$ et $\alpha = 10^{-2} \text{ rd}$, $d_s = 1 \text{ nm}$

Aberration de diffraction

Le diaphragme objectif joue le rôle d'une ouverture diffractante pour l'onde associée à l'électron

$$d_d = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha}$$



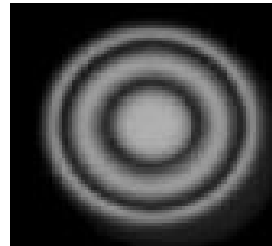
λ longueur d'onde associée à l'électron



Louis de Broglie
1892 - 1987

Relation onde-particule

$$\lambda = \frac{h}{mV}$$



Disque d'Airy

Estimation :

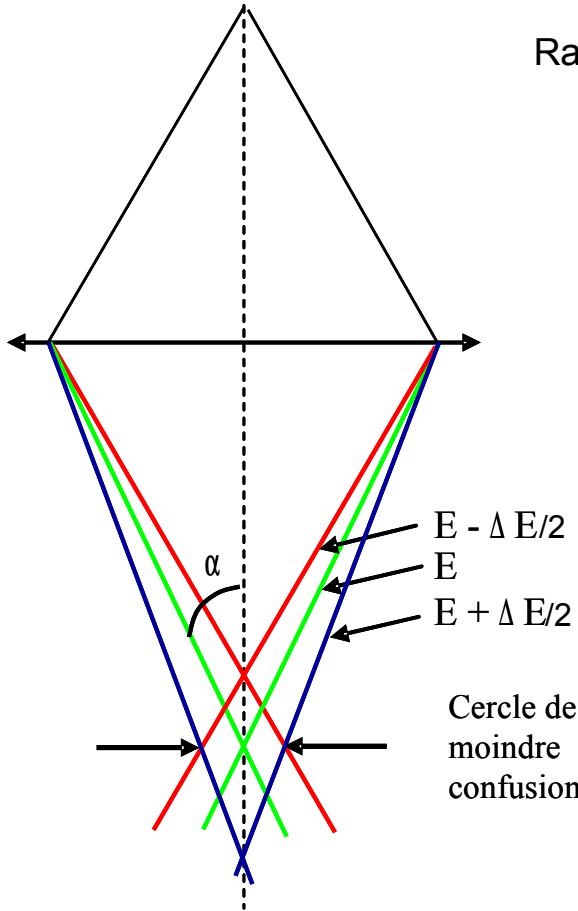
A $V = 30$ kV, $\lambda = 0,0068$ nm et $\alpha = 10^{-2}$ rd, $d_d = 0,8$ nm

Aberration de Chromaticité

Due à la dispersion énergétique du faisceau électronique ΔE

Raisons :

- Distribution énergétique des électrons à la source
Proportionnelle à kT pour une source activée thermiquement (W, cathode chaude)
- Fluctuation de la tension d'accélération



Rappel $\frac{1}{f} = \frac{e}{8mU} \int B_z^2 dz \rightarrow f = A E$ $\Delta f = A \Delta E = f \frac{\Delta E}{E}$
 $E \Leftrightarrow U$ $\Delta f = C_c \frac{\Delta E}{E}$

avec C_c Coefficient d'aberration chromatique

En première approximation $C_c = f$ mais pour des lentilles puissantes $C_c = f/2$

or $r_c = \Delta f \alpha$ et $d_c = 2 r_c$

$$d_c = C_c \frac{\Delta E}{E} \alpha$$

$0,2 \text{ eV} < \Delta E < 2 \text{ eV}$

MEB FEG

MEB W

Estimation :

$C_c = 10 \text{ mm}, \Delta E = 1 \text{ eV}, E = 30 \text{ keV}$ et $\alpha = 10^{-2} \text{ rd}, d_c = 3 \text{ nm}$

Aberration d'astigmatisme

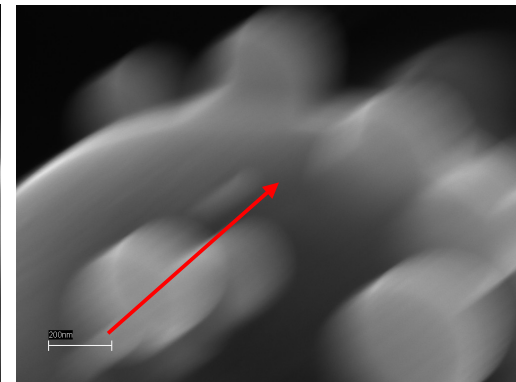
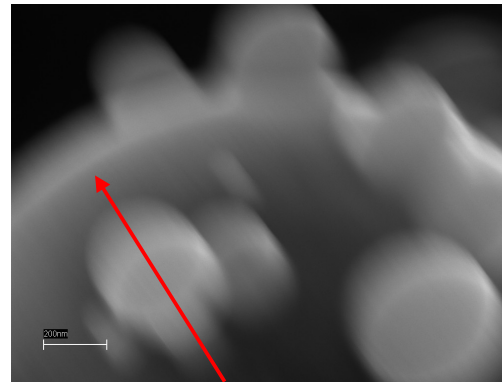
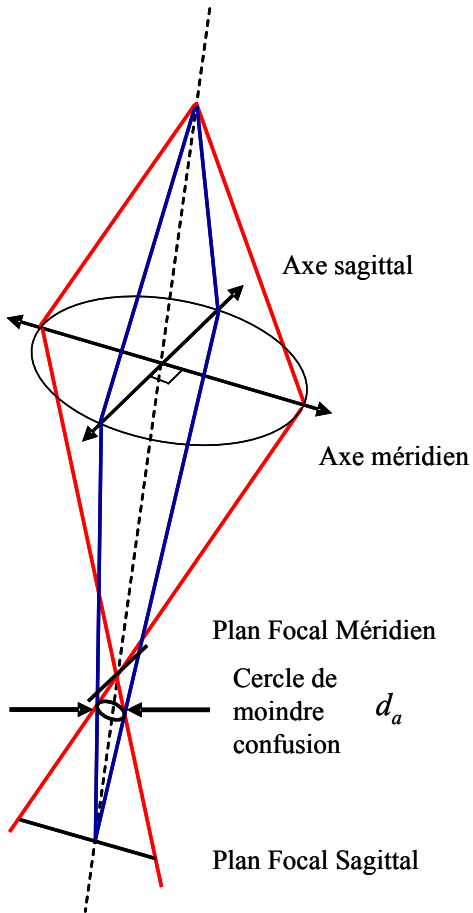
La distance focale selon 2 plans perpendiculaires est différente.

$$d_a = C_a \alpha \quad \text{avec} \quad C_a = \Delta f_a$$

C_a : Coefficient d'aberration d'astigmatisme

Perte de la symétrie axiale du faisceau

Raisons :
Imperfections des pièces polaires
Contamination des diaphragmes intérieurs
Echantillon magnétique, ...



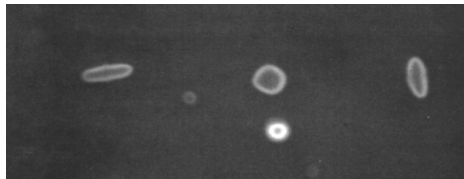
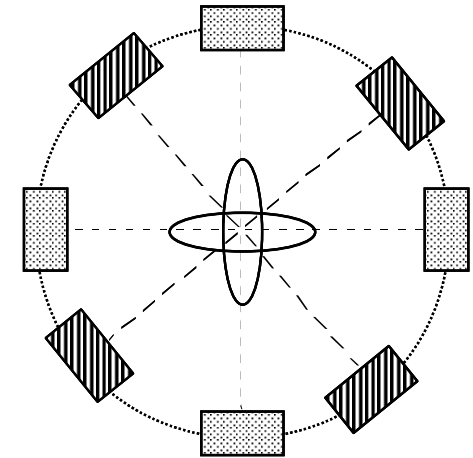
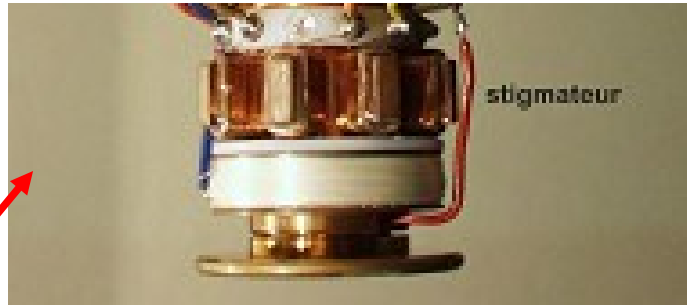
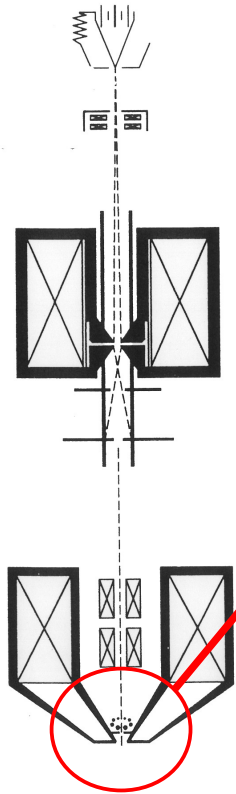
Déformation orientée à 90° l'une de l'autre de part et d'autre de la focalisation

Cette aberration peut être corrigée

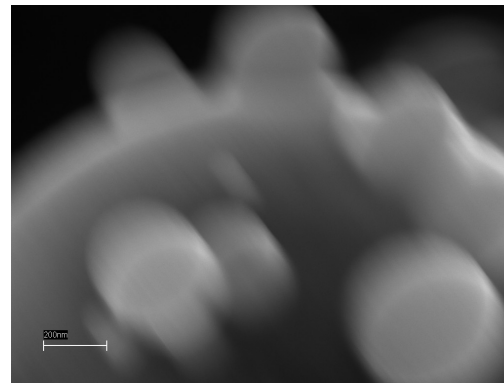
Grâce à un dispositif constitué d'un ensemble de 8 bobines

Octopôle

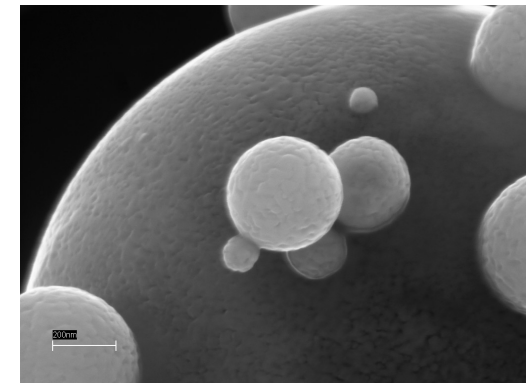
Couplées 4 par 4



Taches de contamination montrant le faisceau avant et après correction



Avant Correction



Après Correction

Aberration de charge d'espace

Lorsque la densité électronique devient importante

Un effet répulsif entre les électrons apparaît

C'est l'effet Boersh

→ Elargissement du faisceau d'électrons

$$d_B = C_B \frac{I^{\frac{2}{3}} L^{\frac{2}{3}}}{V^{\frac{4}{3}} \alpha^{\frac{4}{3}}}$$

I Intensité du faisceau électronique
L Longueur de la colonne électronique
V Tension d'accélération

Cette aberration intervient préférentiellement avec un faisceau d'électrons issu d'un canon FEG car la densité de courant est suffisamment importante.

Taille de sonde dans une colonne réelle

Les lentilles ont des aberrations → La taille de sonde est la résultante de toutes les aberrations

Une approche : La taille vraie est la somme quadratique des différentes contributions

$$d_s = d_g^2 + d_s^2 + d_d^2 + d_c^2 + d_B^2$$

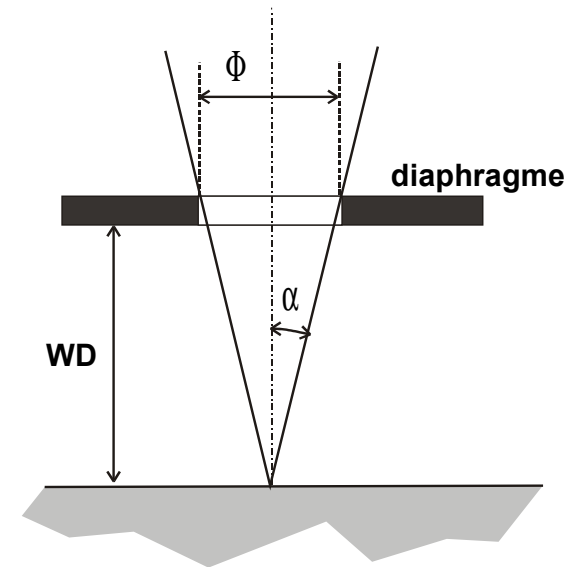
diamètre gaussien $d_g^2 = \frac{4I}{B\pi^2\alpha^2}$

aberration sphérique $d_s = \frac{1}{2} C_s \alpha^3$

aberration de diffraction $d_d = 1,22 \frac{\lambda}{\alpha}$

aberration chromatique $d_c = C_c \frac{\Delta E}{E} \alpha$

effet répulsif (MEB FEG) $d_B = C_B \frac{I^{\frac{2}{4}} L^{\frac{2}{4}}}{V^{\frac{3}{4}} \alpha^{\frac{3}{4}}}$



α = demi-angle d'ouverture du faisceau

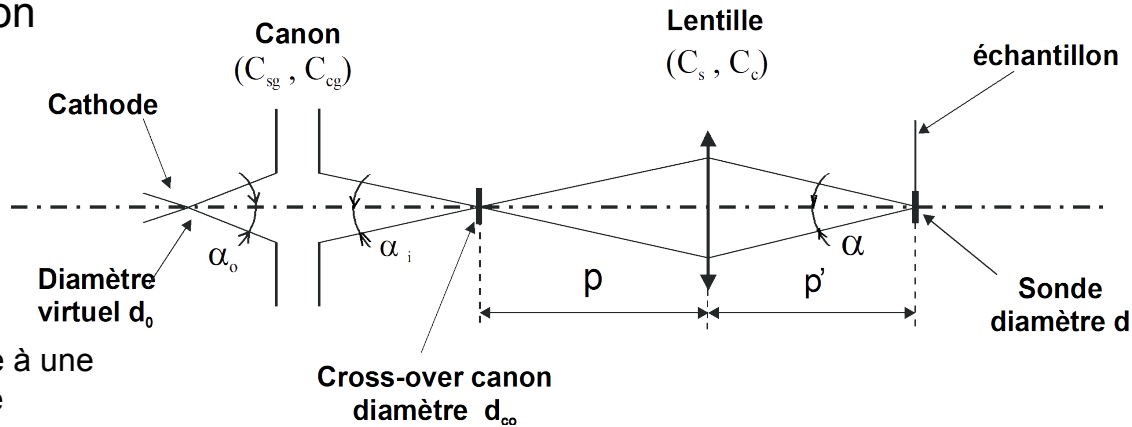
$$\alpha \approx \tan \alpha = \Phi / 2 \text{ WD}$$

WD : distance de travail
"Working Distance"

Φ : diamètre du diaphragme final

Cas simplifié d'un canon et d'une lentille

Modèle de Troyon



Le canon est assimilé à une lentille électrostatique

Les électrons sont accélérés de V_0 à V

$$d_{CO} = d_0 \frac{\alpha_0}{\alpha_i} \sqrt{\frac{V_0}{V}} = d_0 \frac{\alpha_0}{\alpha_i} k^{-\frac{1}{2}}$$

$$d_s^2 = d_g^2 + d_s^2 + d_c^2 + d_d^2$$

$$d_s^2 = M^2 d_0^2 + \frac{1}{4} \left(C_{sg} M^4 k^{\frac{3}{2}} + C_s \right)^2 \alpha^6 + \left(C_{cg} M^2 k^{\frac{3}{2}} + C_c \right)^2 \left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 \alpha^2 + \left(1,22 \frac{\lambda}{\alpha} \right)^2$$

diamètre gaussien
aberration sphérique
aberration chromatique
aberration de diffraction

M : facteur de grandissement

MEB - Canon thermoélectronique :

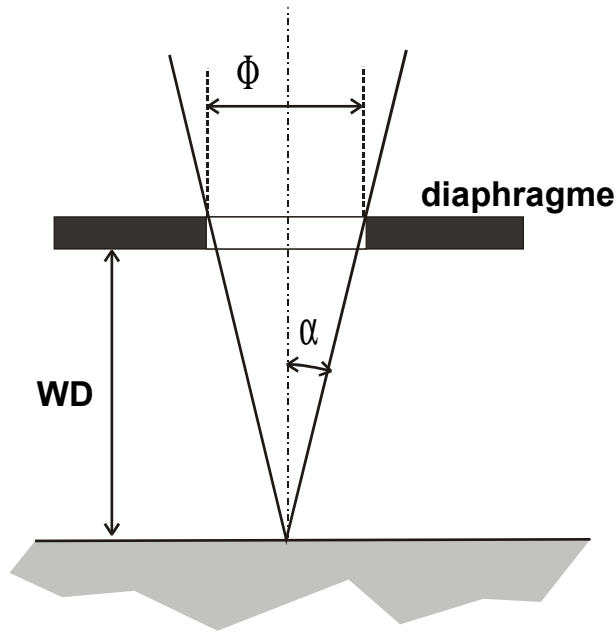
- système très réducteur (M peut atteindre 1/10000)
- les aberrations du canon et du condenseur sont négligeables devant celles de l'objectif

MEB FEG - Canon à effet de champ :

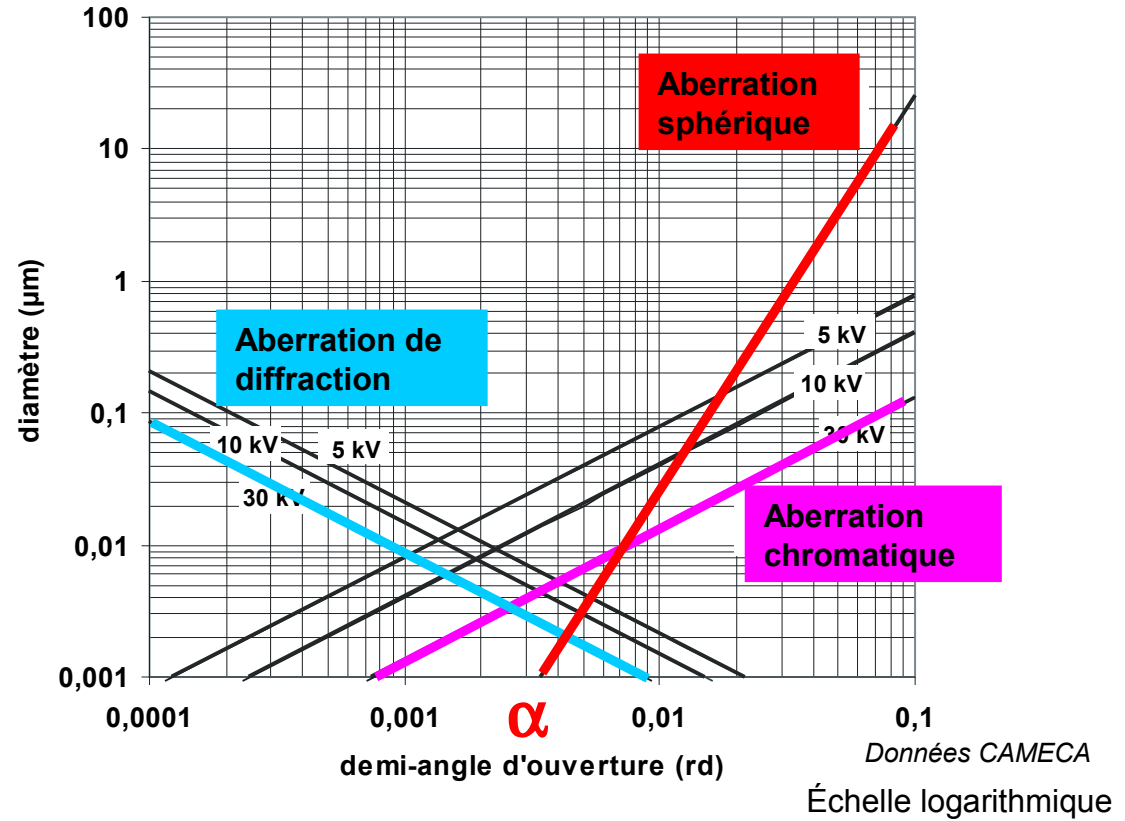
- les aberrations du canon ne sont plus négligeables devant celles de l'objectif (diamètre de la source virtuelle d_{∞} de l'ordre de 10 nanomètres).
- Dans le cas des MEB FEG, la densité de courant est suffisamment élevée pour introduire des **effets répulsifs (effet Boersh)** entre les électrons (charge d'espace) d_B

Rôle des aberrations sur la taille de sonde dans une colonne classique.

MEB avec canon à filament de W



$C_s = 5 \text{ cm}$
 $C_c = 2 \text{ cm}$
 $\Delta E = 2 \text{ eV}$



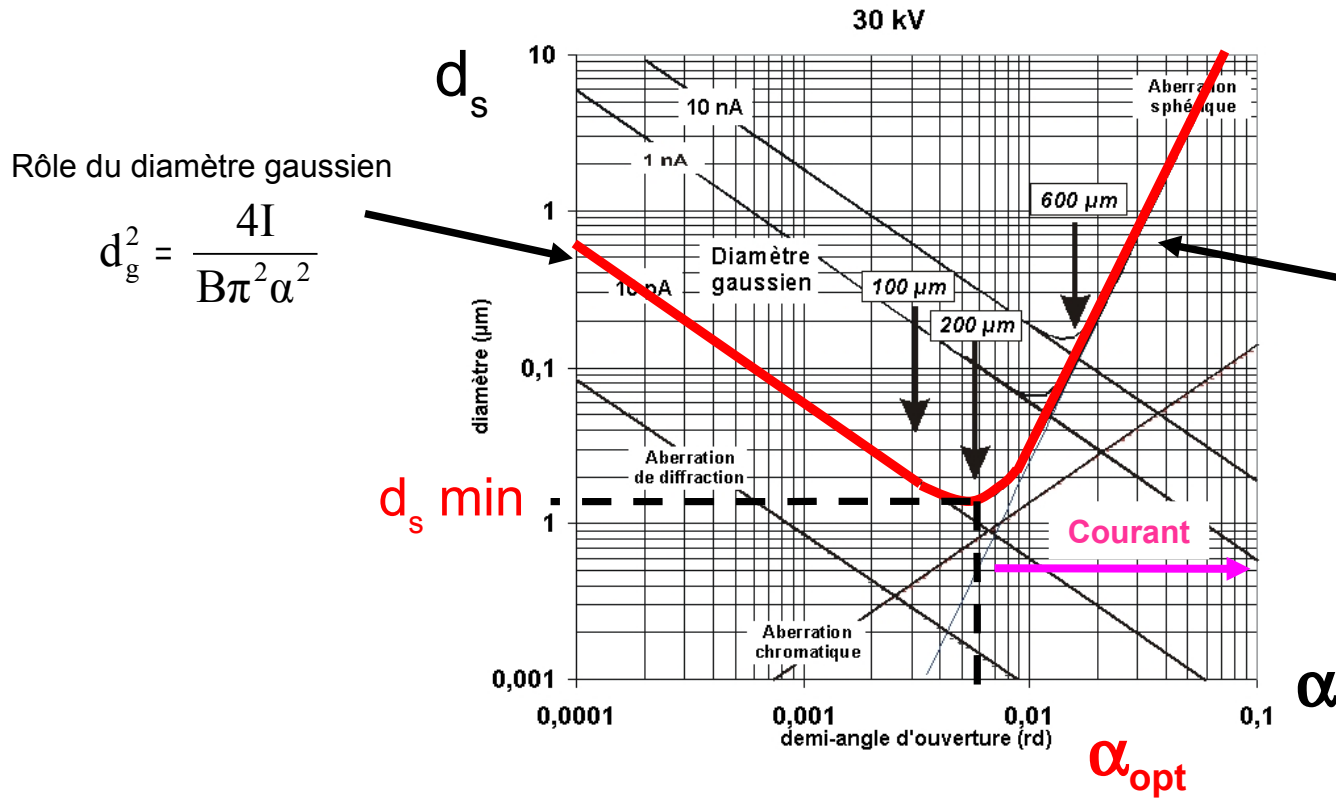
Variation du diamètre des différentes aberrations en fonction du demi-angle d'ouverture α , pour différentes tensions d'accélération ($> 5 \text{ kV}$) d'un canon classique à filament de W

Les contributions des aberrations sont très différentes selon la valeur de α .

Si $10^{-3} < \alpha < 10^{-2} \text{ rd}$ Optimum pour réduire au minimum l'influence des aberrations.

Variation de la taille de sonde dans une colonne classique.

Cas d'une Microsonde de Castaing – Canon W



Existence d'une taille de sonde minimale

Remarque : A basse tension (< 5kV), il y a une dégradation des performances de la colonne.

→ Perte de la résolution $d_s \text{ min } 5\text{kV} > d_s \text{ min } 30 \text{ kV}$

Obtenir la meilleure image

En terme de résolution : La plus fine taille de sonde possible

En terme de signal : Il est nécessaire d'avoir au moins un courant de sonde de **1 pA**

Limitation du rapport Signal/Bruit

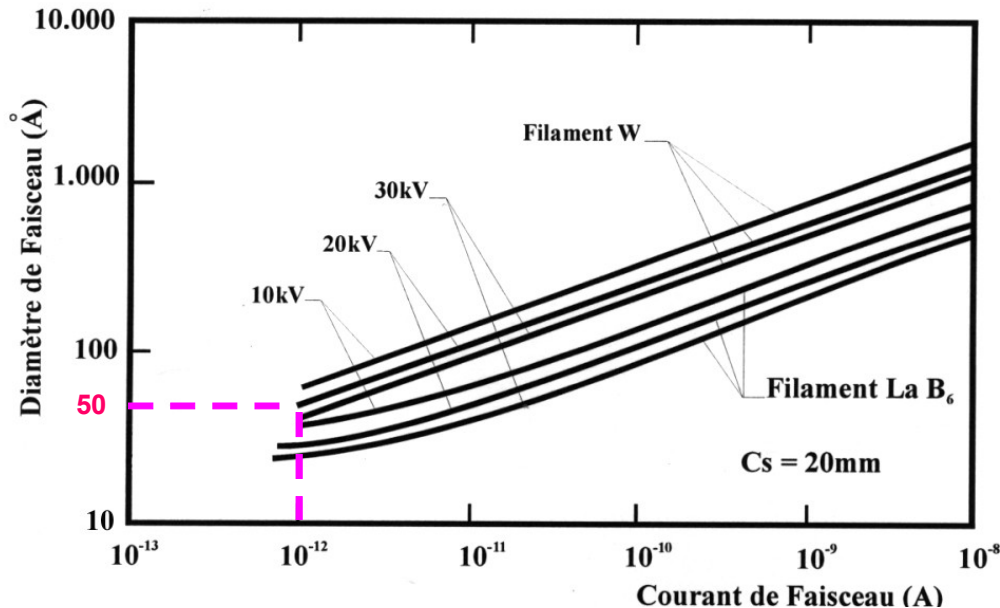
Sur un domaine de tension d'accélération définie

Dépend du canon

Rappel sur les canons :

Emission thermoélectronique (W - LaB6)	d co env. 50 μm	B 10^5 - 10^6 $\text{Acm}^2\text{sr}^{-1}$	Courant max gamme μA
Emission de champ (Schottky – cathode froide)	d co env. 10 nm	B 10^7 - 10^9 $\text{Acm}^2\text{sr}^{-1}$	Courant max <200 nA

■ Pour un canon thermoélectronique



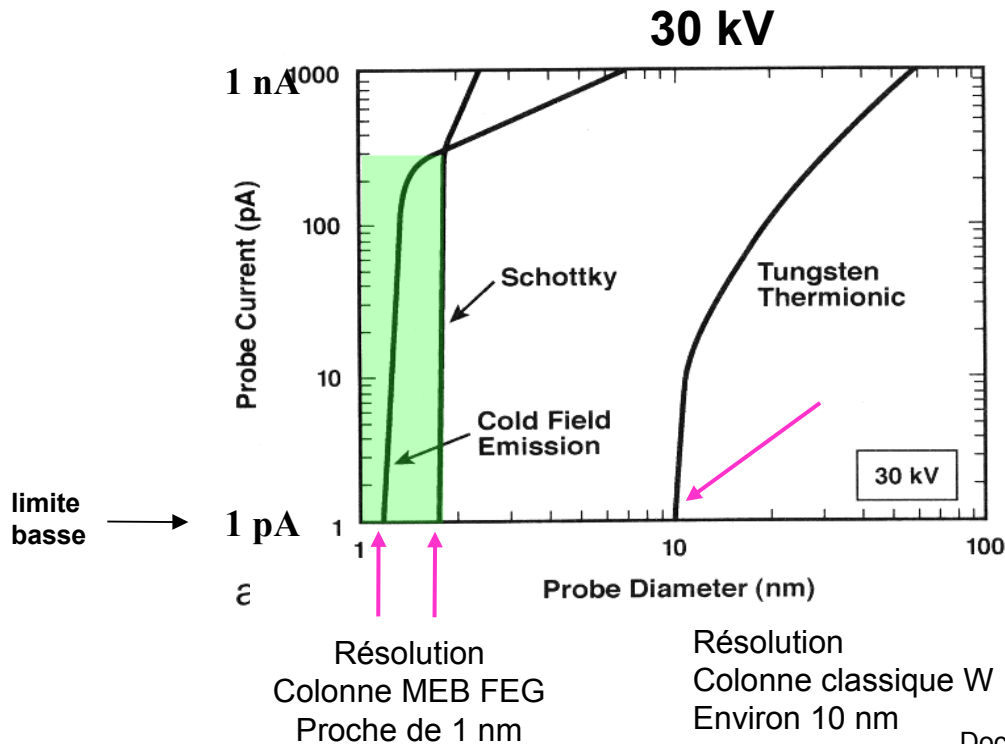
À Haute tension
Limite de la taille de sonde
Environ 5 nm

■ Pour les émissions de champ

Comparaison avec W

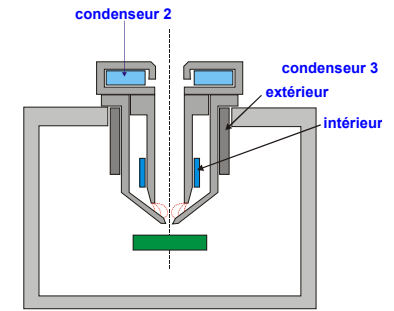
3 configurations :

Filament de W + lentille Conique : $C_s = 20 \text{ mm}$, $C_c = 10 \text{ mm}$
 Cathode Schottky + lentille Snorkel : $C_s = 3,2 \text{ mm}$, $C_c = 2,7 \text{ mm}$
 Cathode froide + lentille à Immersion : $C_s = 2 \text{ mm}$, $C_c = 1,8 \text{ mm}$
 Méthode Kenray et Cliff (1984)

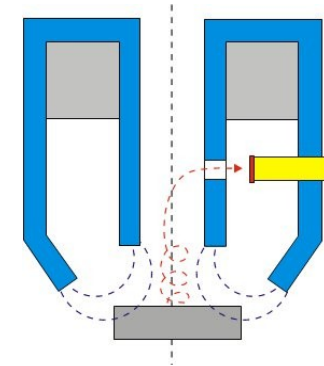


Doc Goldstein

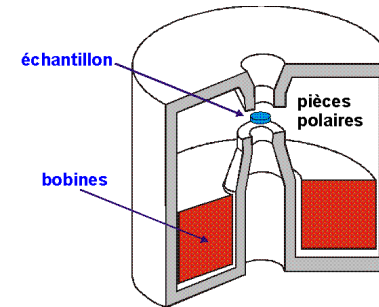
Lentille Conique



Lentille Snorkel



Lentille à immersion



Résolution « constante » pour des courants < 200 nA car les aberrations du canon FEG sont négligeables

Zone verte = zone optimale de fonctionnement d'un MEB FEG

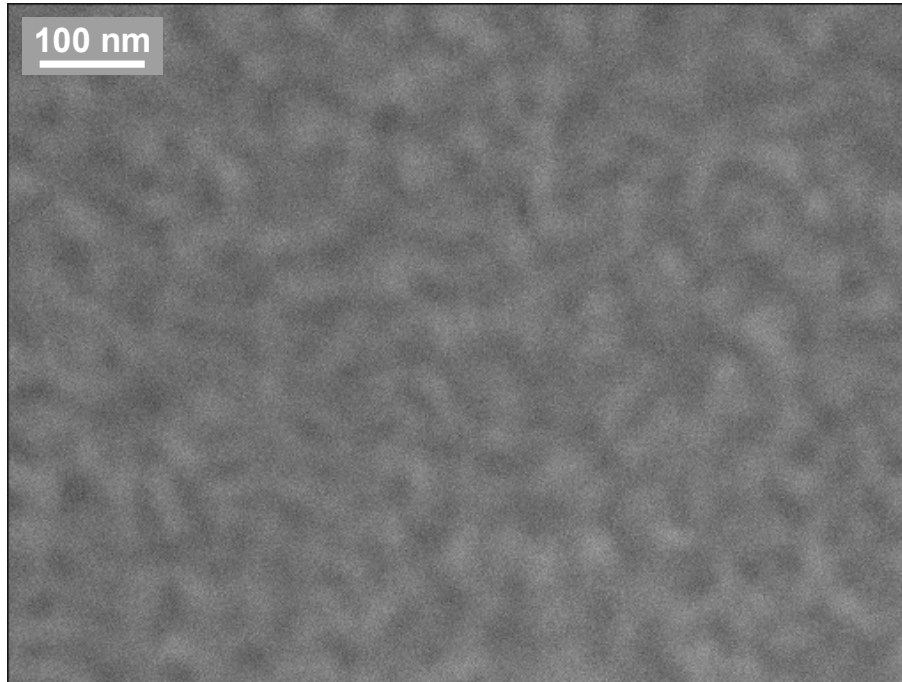
Apport sur l'image d'un MEB FEG

Mise en évidence du gain en résolution

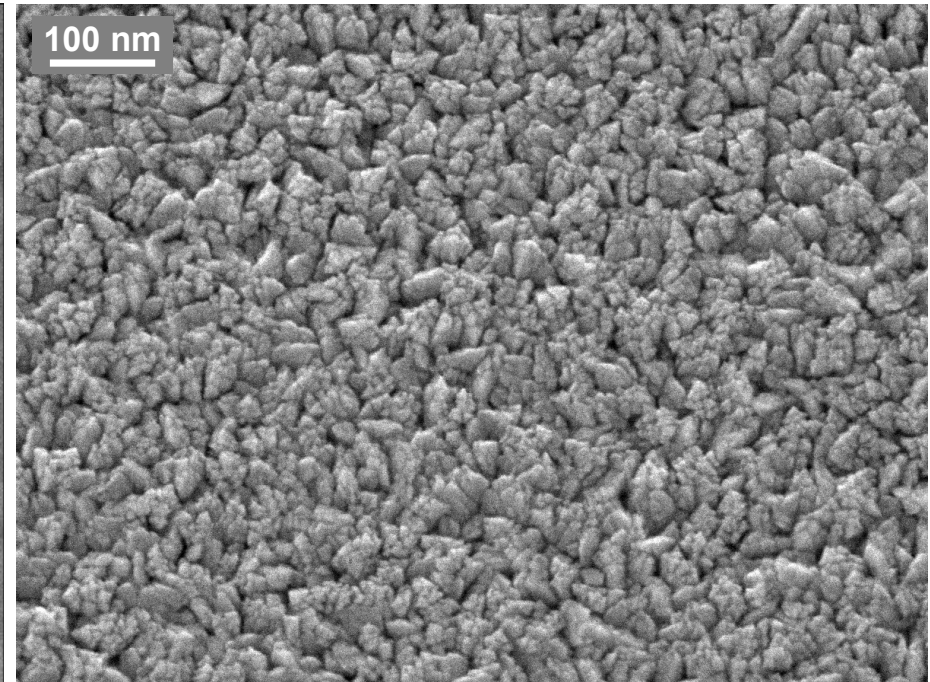
Film mince de HfO_2 sur silicium

Tension d'accélération : 20 kV

Grandissement MEB : 100 kX (référence Polaroid)



MEB conventionnel à filament de W

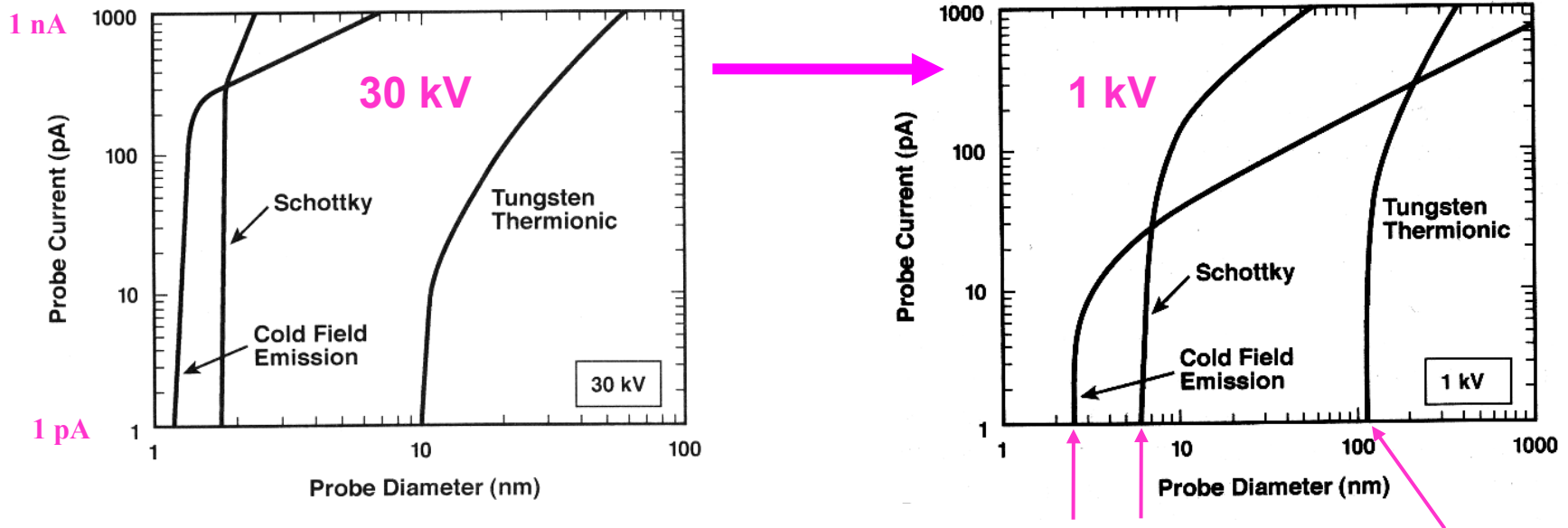


MEB FEG à cathode chaude

Images F. Roussel

Image optimale sur un large domaine de tension

Doc Goldstein



Détérioration des performances :

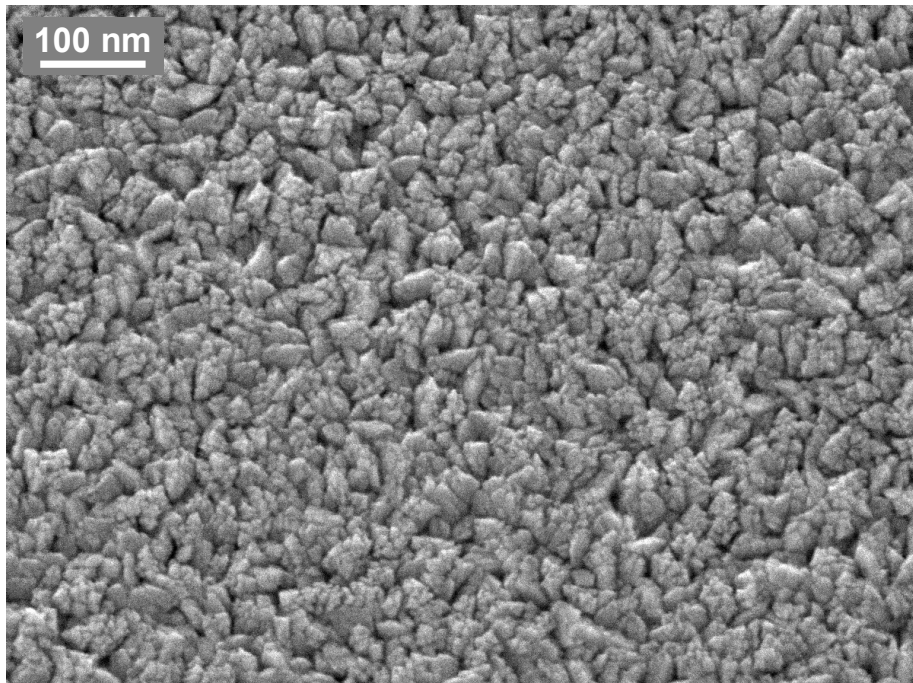
- Aberration chromatique ($\Delta E/E$) ↗
($\Delta E/E=10^{-4}$ à 30keV et 10^{-3} à 3keV)
- Effet Boersh (notamment FEG schottky)

La résolution d'un MEB FEG à basse tension reste supérieure à celle d'un MEB conventionnel à haute tension

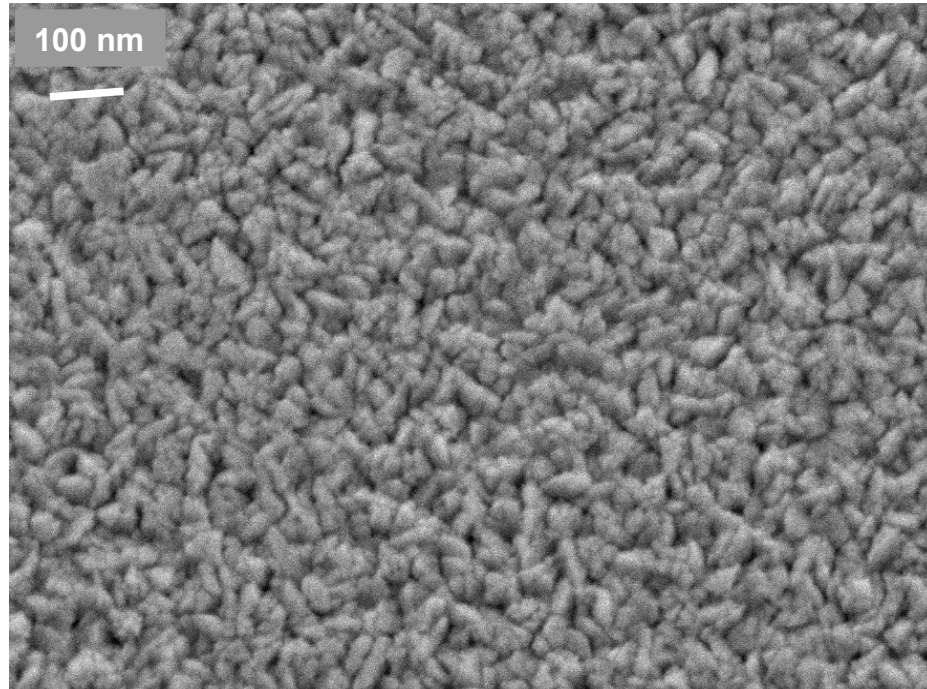
Images à haute et basse tension obtenues dans un MEB FEG

Film mince de HfO_2 sur silicium

G = 100 kX (référence Polaroid)



20 kV



3 kV

Images F. Roussel

L'apport de la basse tension

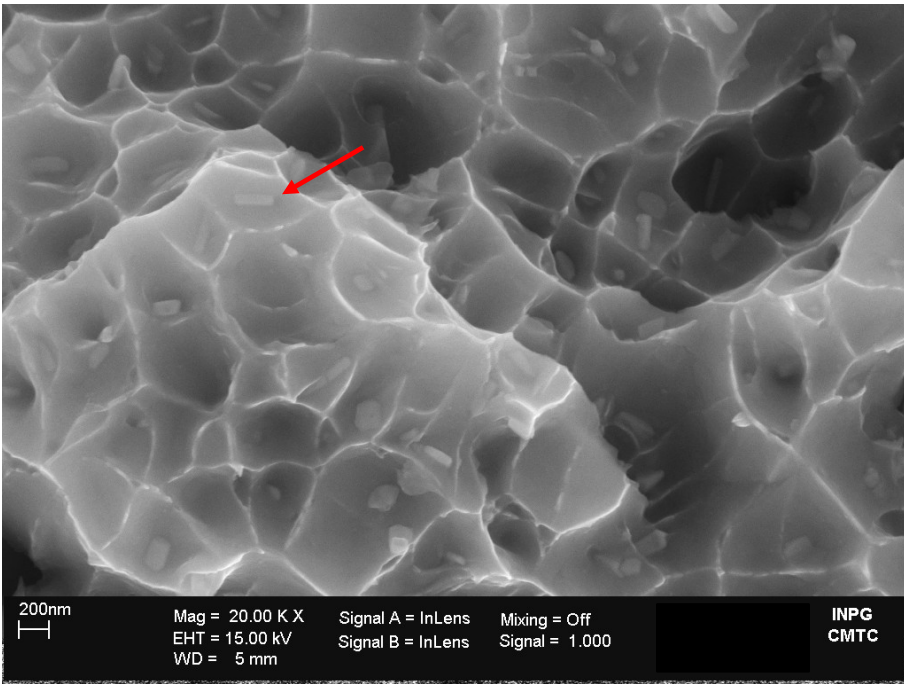
■ Éviter les effets de charge sans métalliser l'échantillon → Gamme entre 1 kV et 3 kV

■ Amélioration du contraste de surface - information plus de topographie de surface

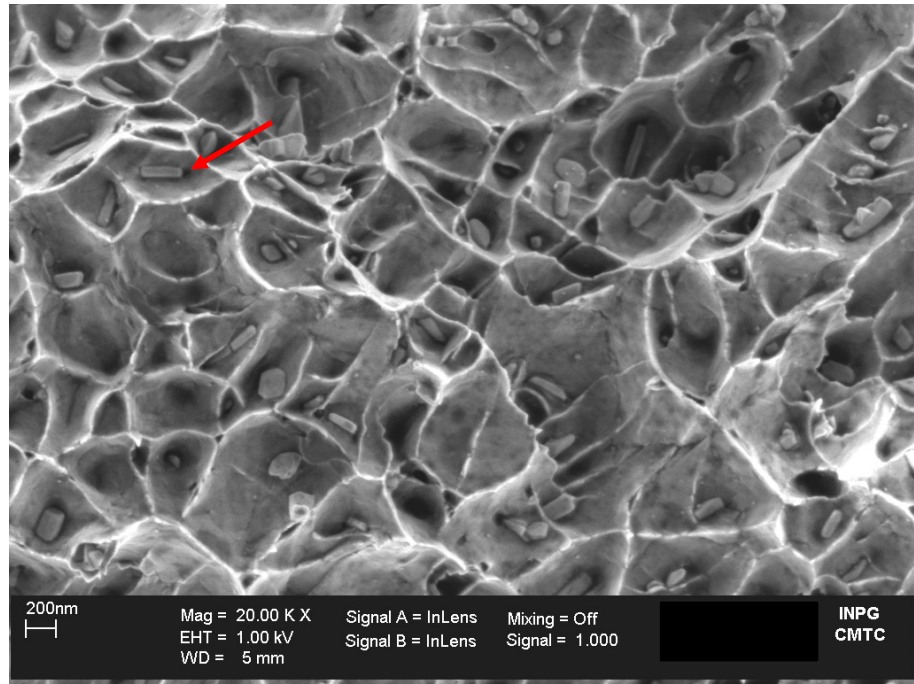
Or une image à 1 kV ne peut pas être réalisée avec un MEB conventionnel !!!

Faciès de rupture d'un alliage d'Aluminium

G = 20 kX (référence Polaroid)



15 kV



1 kV

Images F. Roussel

Développement des colonnes dédiées au MEB FEG

L'émission à effet de champ permet d'avoir une zone d'émission des électrons très petite.

Les colonnes MEB FEG doit permettre de mettre à profit les qualités du canon.

- Limiter au maximum les aberrations
- Apporter des améliorations vers les forts courants tout en conservant la résolution
- Permettre une imagerie à basse tension avec une bonne résolution
- Optimiser la détection des signaux

Chaque constructeur va apporter des solutions technologiques particulières

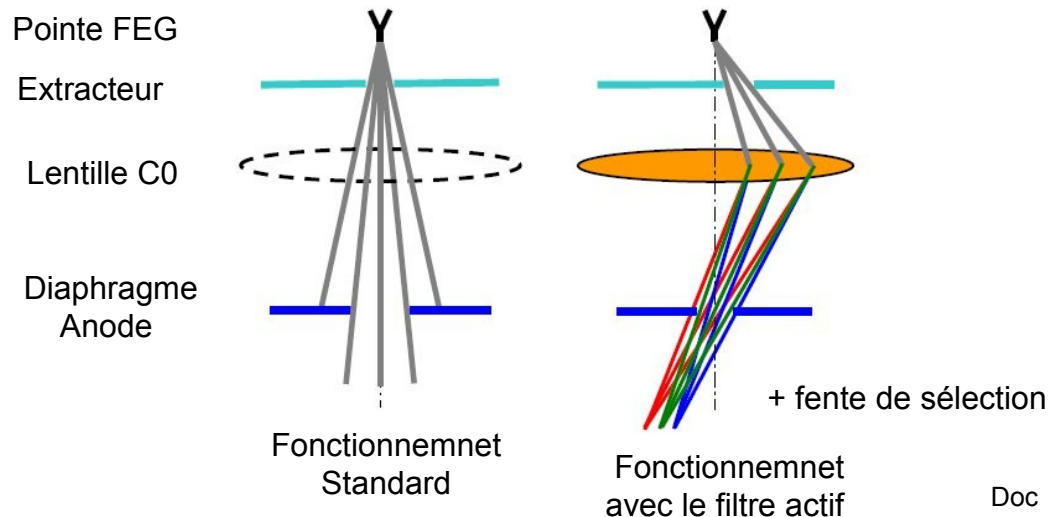
→ Autant les colonnes W se ressemblent , autant chaque colonne FEG a ses particularités

Mais les éléments déjà décrits se retrouvent.

Limiter l'aberration de chromaticité

Pour corriger cette aberration, il faut diminuer le $\Delta E/E$

- Très bonne stabilité de la tension d'accélération.
- Filtrer en énergie les électrons émis par le canon



Filtre UC (United color)™ - FEI

Type de canon FEG	Dispersion énergétique ΔE
Schottky	0,5 – 1 eV
Cathode froide	0,2 – 0,4 eV
Schottky + monochromateur	0,15 eV

Doc L Roussel - FEI

L'utilisation de ce filtre

- Augmente la résolution
Résolution subnanométrique
- Faible courant de sonde < 100 pA

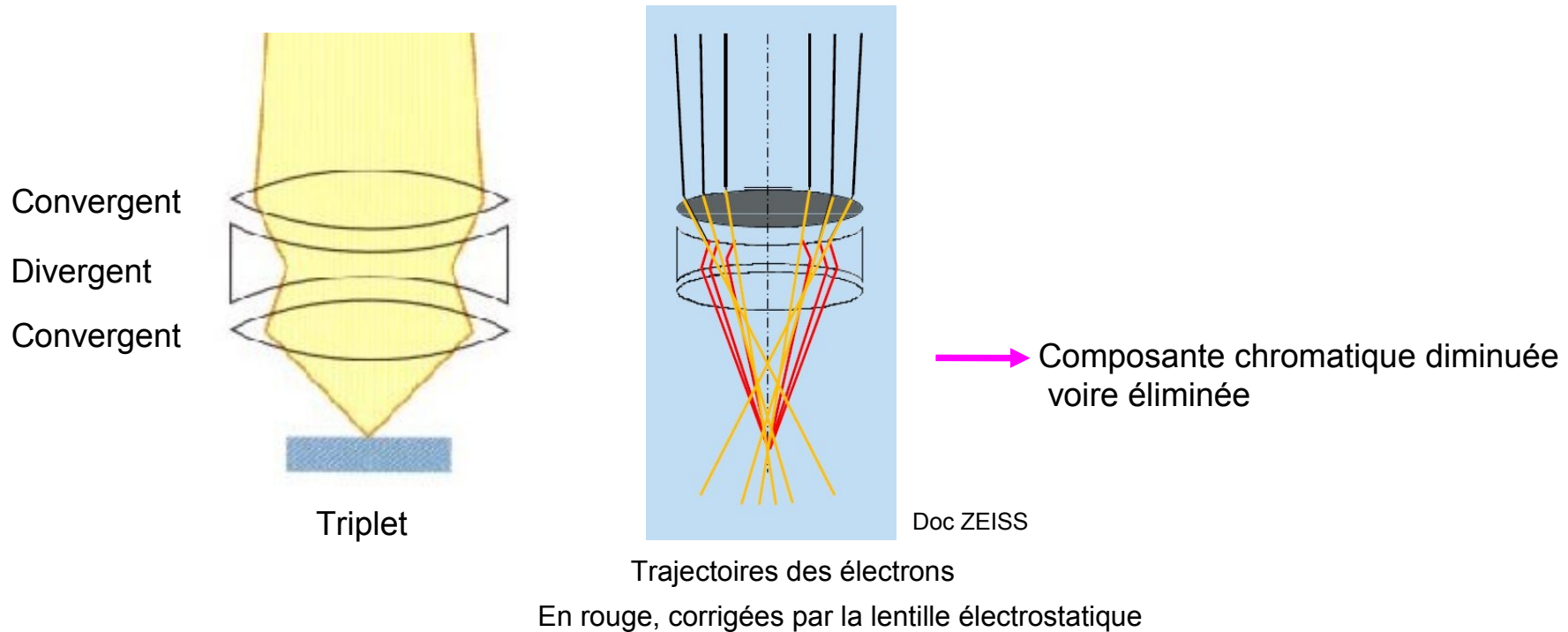
■ Utilisation d'une lentille « divergente » pour compenser

En optique , il est connu que l'association à une lentille convergente d'une lentille faiblement divergente permet d'avoir un ensemble Achromatique dans une certaine gamme de longueur d'onde

Les lentilles électromagnétiques sont Convergentes

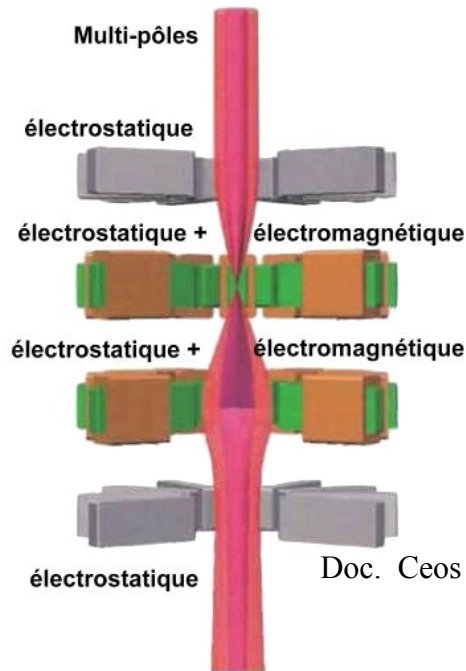
Par contre

Les lentilles électrostatiques suivant les potentiels peuvent être Convergentes ou Divergentes



Limiter l'aberration de sphéricité

Utilisation d'un correcteur d'aberration sphérique – correcteur de Cs



Correcteur CEOS
(ensemble de multi-pôles)

Utilise une technologie complexe avec des multi-pôles

Combinant des champs magnétiques et électriques

Pour une bonne correction, l'alignement de chaque élément est indispensable.

Cela suppose :

Une fabrication précise

Une gestion de la correction par logiciel

→ Solution coûteuse et délicate à mettre en œuvre

Ce type de correcteur est proposé en Microscopie à Transmission

Des essais ont été réalisés dans le domaine des MEBs

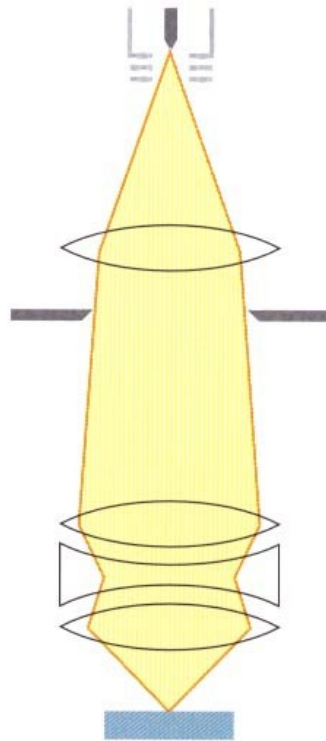
Limiter l'aberration de charge d'espace

Limiter l'effet Boersh

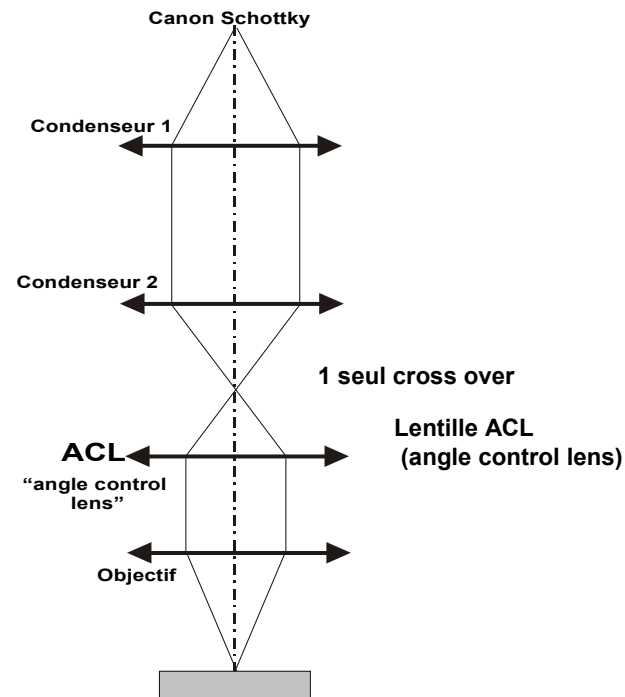
Important effet répulsif des électrons dans un faisceau de très faible diamètre dans les colonnes de MEB FEG

L'effet Boersh est particulièrement marqué au niveau des cross-over,

→ Limitation du nombre de cross-over dans la colonne.



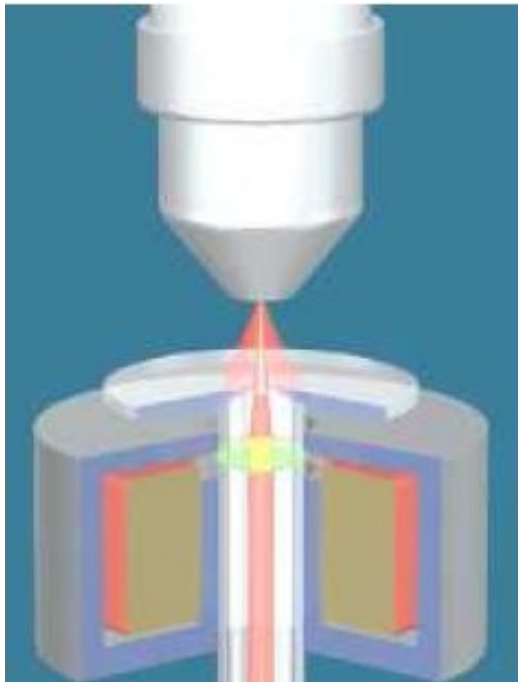
Pas de cross-over



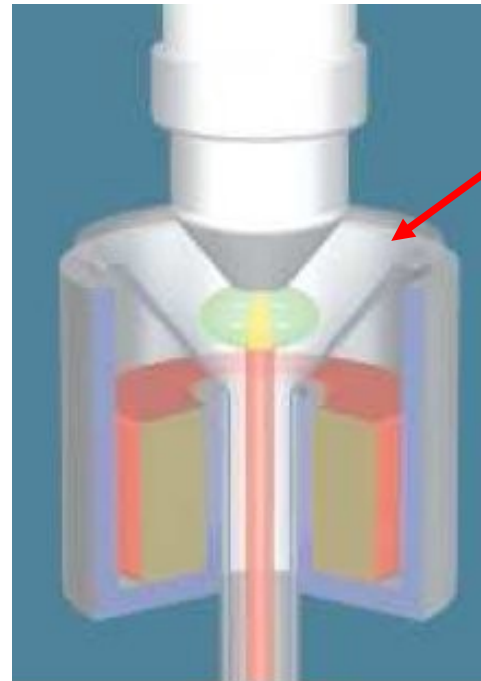
1 seul cross-over

Obtenir un fort courant avec une colonne FEG

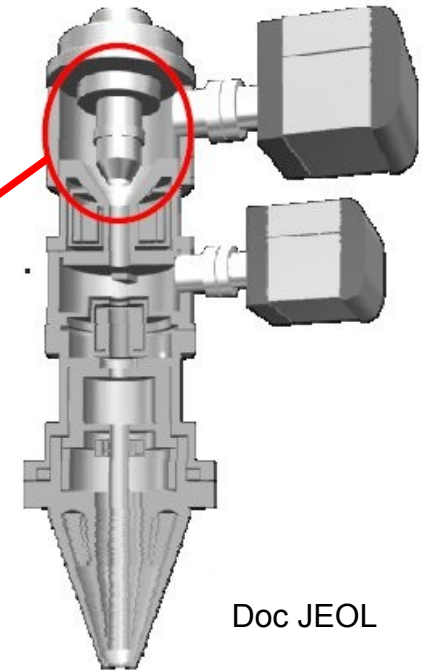
Les colonnes classiques permettent d'avoir des courants de quelques μA alors que les colonnes FEG ont des courants limités ($<200 \text{ nA}$)



Canon FEG Conventionnel



Canon FEG « In-Lens »



Brevet JEOL

La cathode FEG est en immersion dans le condenseur

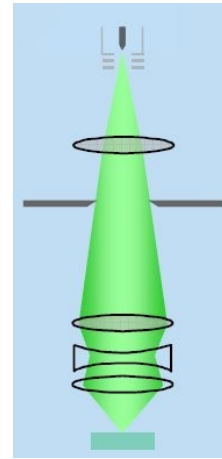
500 nA @ 10 kV annoncé

Obtenir un fort courant avec une colonne FEG

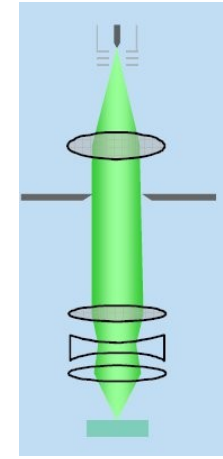
Autres développements

■ Activation d'une lentille

La lentille « Condenseur » permet de limiter la divergence des électrons



Configuration Faible Courant

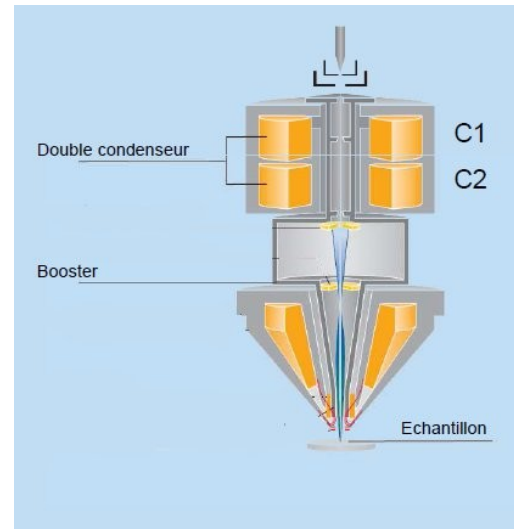


Configuration Fort Courant

Jusqu'à 100 nA
annoncé

■ Colonne Mixte fort courant et résolution

Utilisation de deux condenseurs avec un diaphragme unique

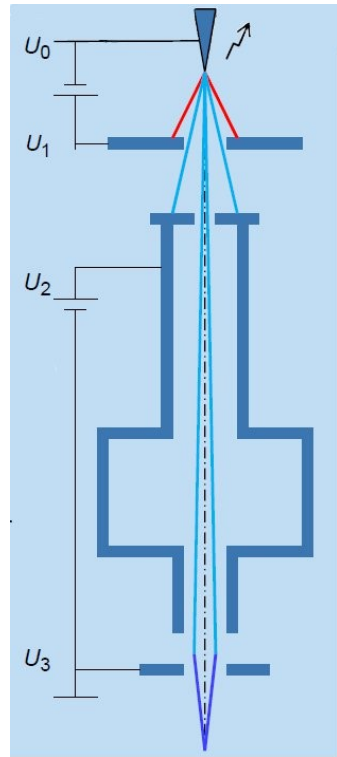
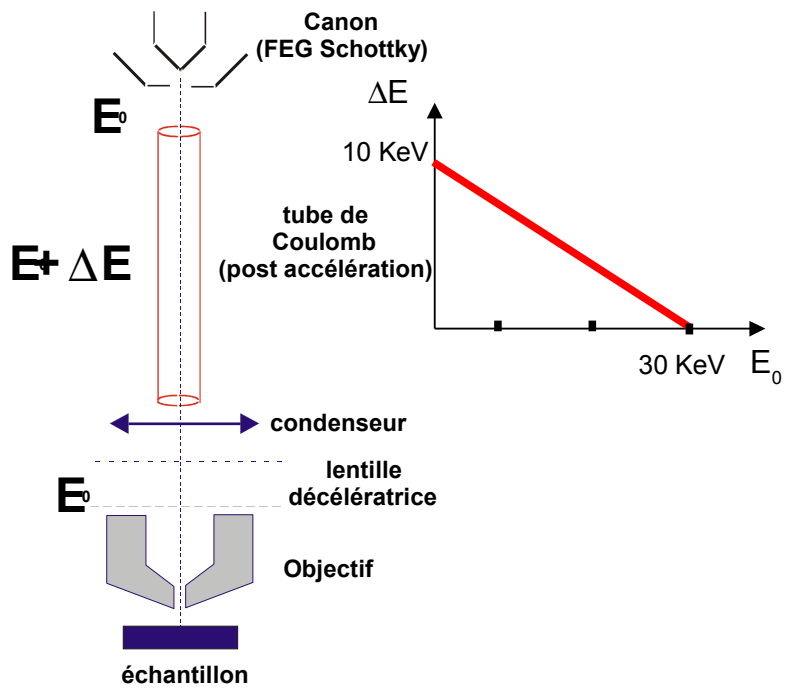


Doc Zeiss

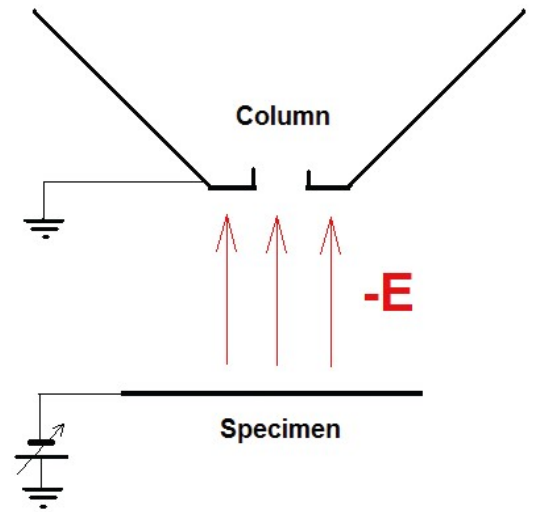
Le travail à basse tension

Une solution : Avoir des électrons énergétiques dans la colonne puis les freiner avant l'impact sur l'échantillon

Permet de limiter les aberration avec des électrons « lents »



$U_2 = 8 \text{ kV}$



Décélération du faisceau

Au niveau de l'échantillon

Ce n'est pas une solution dans la colonne

Tube de coulomb

Booster

Ré-accelération dans la colonne

→ Possibilité d'imager à quelques dizaines de volt

Tendance actuelle

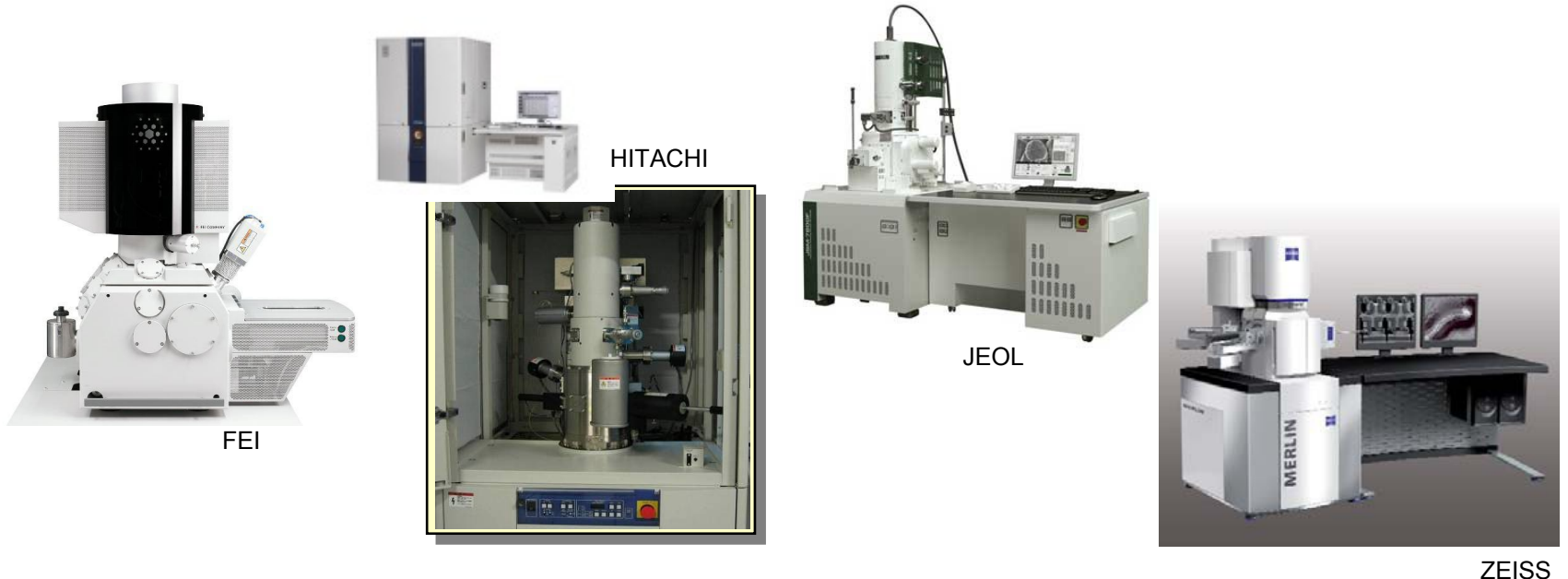
Optimisation des colonnes MEB FEG pour aller vers des résolutions sub-nanométriques

Canon à cathode chaude Schottky avec le correcteur (dispersion énergétique $< 0.2\text{eV}$)

Optimisation de l'optique électronique (lentilles objectif à immersion, système de décélération, correcteur Cs, lentille mixte, ...)

Ultrahaute stabilité mécanique et thermique (Protection phonique, champ électromagnétique,)

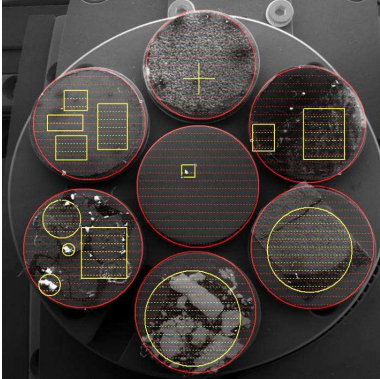
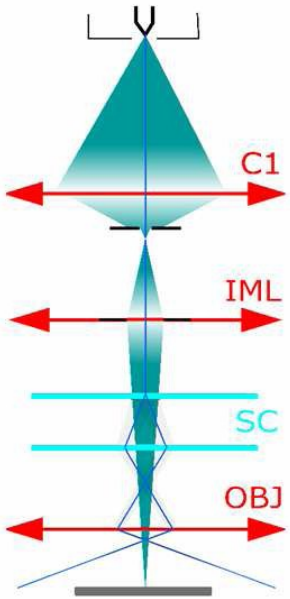
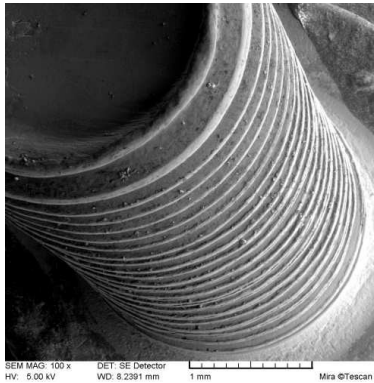
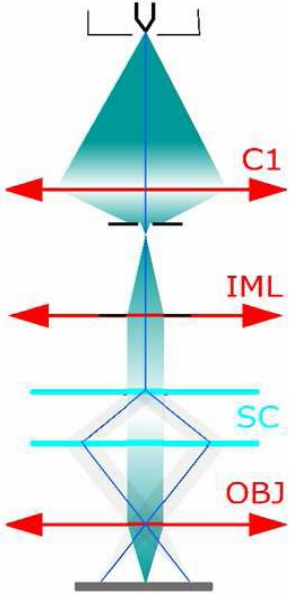
Ultra haute propreté (plasma cleaner)



Autres types de colonne Permettant des fonctionnalités particulières

Présence d'une lentille intermédiaire (IML) :

Diaphragme à géométrie variable
Possibilité d'avoir des modes de balayage étendu (large champ, ECP, image stéréoscopique directe)



Mode Champ large

Mode Profondeur de champ

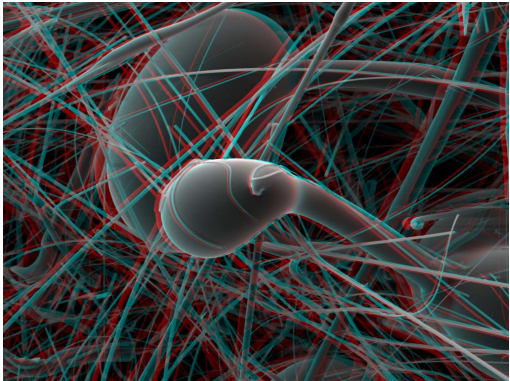


Image stereoscopique en directe

Doc TESCAN

MERCI de votre attention

- Références Microscopie électronique à balayage et Microanalyses, EDP Sciences
Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis, 3nd Edition,
J.Goldstein, Kluwer Acad. / Plenum Publishers
Optique électronique, J Ruste, Gn-MEBA, décembre 2004
- Crédit image F. Roussel, J Ruste, J Garden
- Schéma colonne Fournisseurs de microscope FEI, HITACHI, JEOL, TESCAN, ZEISS
- Pour aller plus loin Handbook of charged particle optics, 2nd Edition, J. Orloff, CRC Press