

# Composants d'un microscope électronique

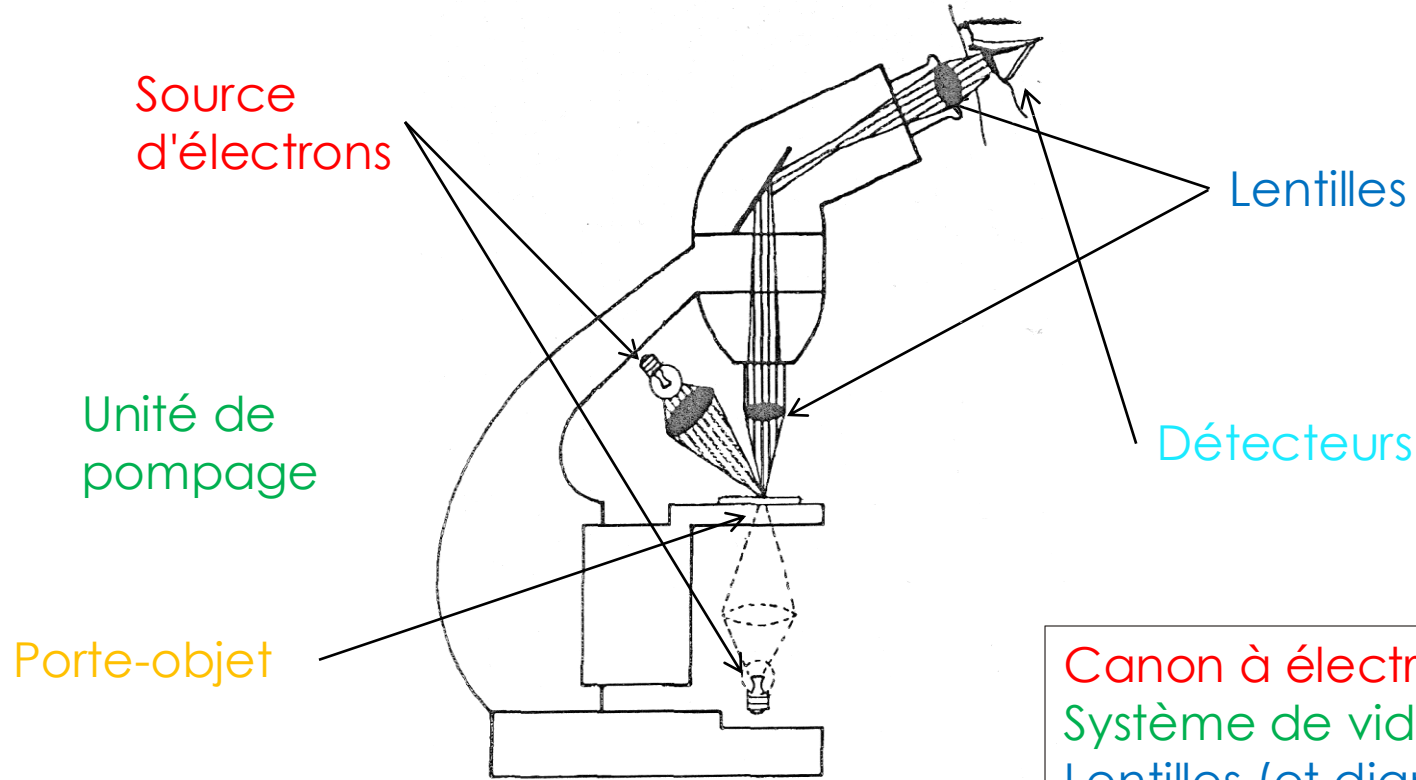
Aïcha Hessler-Wyser

(Marco Cantoni, Emad  
Oveisi)

- Des électrons, quelles conséquences?
- Systèmes de vide
- Canons à électrons
- Lentilles
- Détecteurs
- Porte-objets

*Correspond aux chapitres 5 à 8 du Carter et Williams*

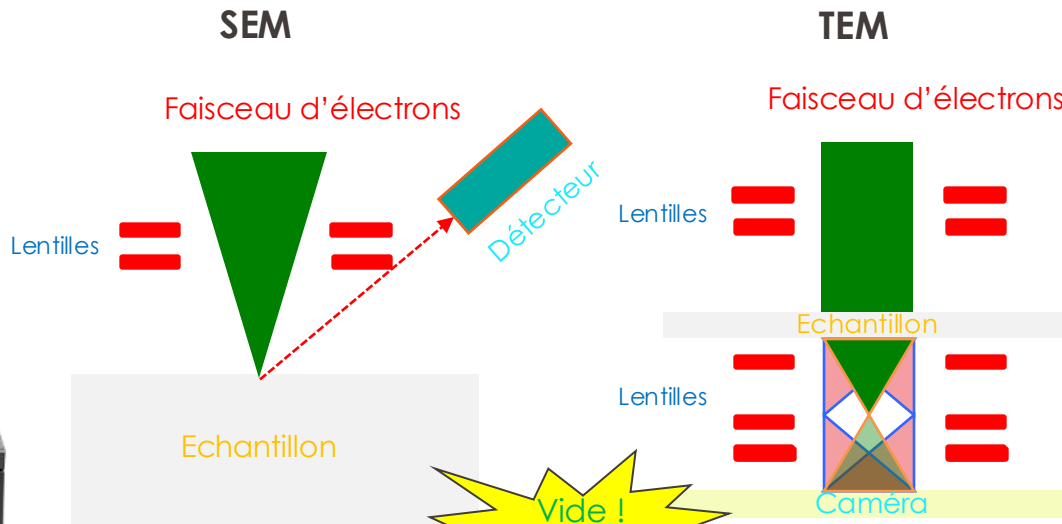
# Un microscope, c'est...



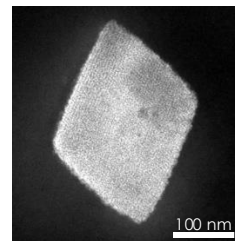
Canon à électrons  
Système de vide  
Lentilles (et diaphragmes)  
DéTECTEURS  
Porte-objet

# Un microscope, c'est...

■ Microscopie électronique: Composants d'un microscope électronique



Contient une information topographique



Projection 2D d'un objet 3D



# Des électrons: quelle conséquence?

- Les électrons sont des particules chargées
  - L'échantillon doit être **conducteur** et connecté à la terre pour évacuer les charges accumulées
  - Un échantillon non-conducteur peut-il être observé? Cf chapitres suivants!
- Tout le système doit être très propre
  - Il faut des échantillons nettoyés, sans solvants, poussières ou autres contaminants
  - Nos mains sont source de contamination: porter toujours des gants!
- Les électrons sont très légers ( $\approx 2000x$  plus que les plus petits atomes) et interagissent fortement avec la matière
  - Ils peuvent causer des **dégâts** à l'échantillon
  - Ils interagissent avec les particules de l'atmosphère: **besoin d'un haut vide!**

# Des électrons: quelle conséquence?

- La propagation des électrons est meilleure dans le vide
- Un bon vide est crucial pour réduire la diffusion du faisceau
- C'est également important pour éviter la contamination et les modifications de surface de l'échantillon
- Les vides ne sont pas du même ordre de grandeur selon les compartiments du microscope
- Il faut différents types de pompes pour assurer un vide optimal

# Système de pompage

Pour nettoyer la salle  
du microscope!

Vide primaire

Vide secondaire

Haut vide

Ultra-haut  
vide

$10^{-1}$

$10^{-3}$

$10^{-6}$

$10^{-9}$

mbar



Aspirateur!



Pompe à palette



Pompe à  
diffusion d'huile



Pompe  
turbomoléculaire



Pompe ionique

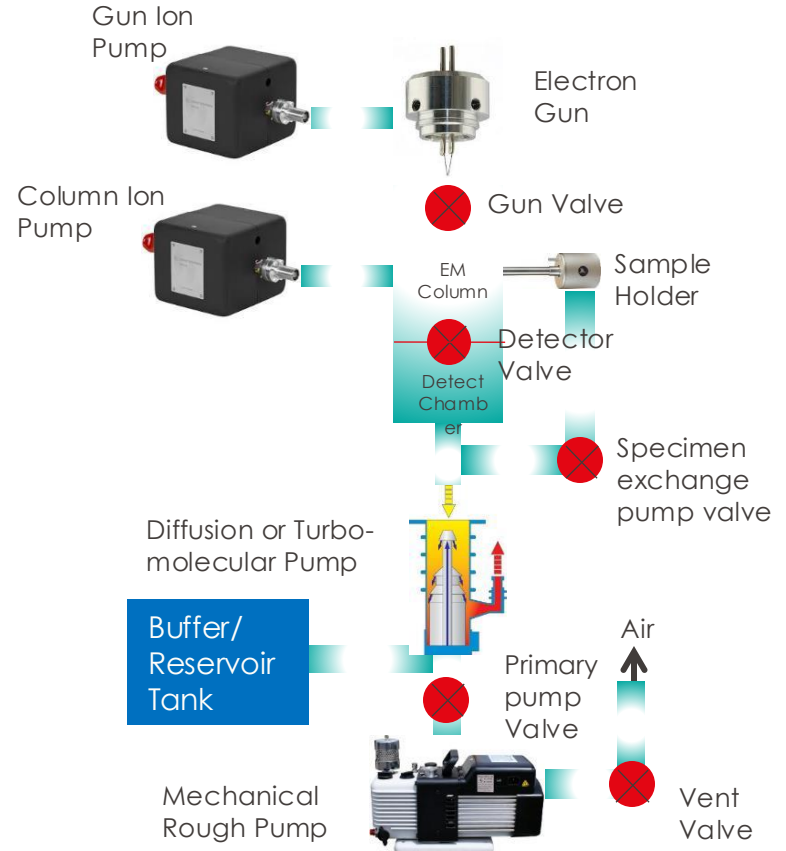
Les différentes pompes ont une game de vide pour lesquelles elles sont efficaces!

# Système de pompage

- Vide primaire ( $>0.1$  Pa)
  - Pompe à palettes
  
- Vide secondaire ( $<10^{-4}$  Pa)
  - Pompe à diffusion d'huile
  - Pompe turbo-moléculaire
  
- Haut vide et Ultra-vide ( $<10^{-6}$  Pa)
  - Pompe ionique
  - Pièges à azote liquide

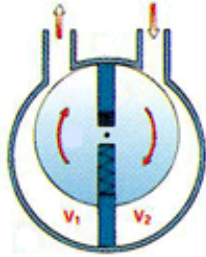
$$1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ Pa} = 0.01 \text{ mbar}$$

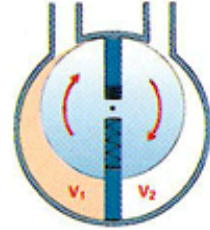


# Système de pompage: pompe à palette

Lors de sa rotation, le rotor crée deux volumes variables  $V_1$  et  $V_2$



Refoulement / admission



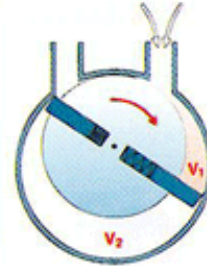
Les volumes  $V_1$  et  $V_2$  sont remplis d'air

Diminution du volume  $V_1$



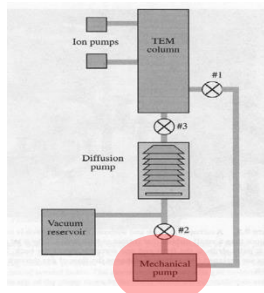
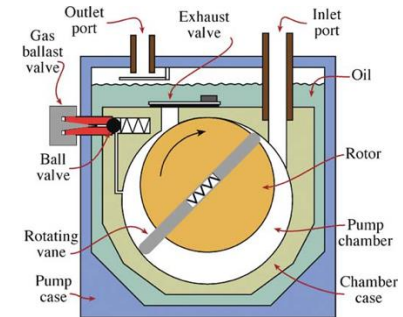
L'air est chassé vers l'extérieur

Restitution et augmentation du volume  $V_1$



L'air se répand dans le volume libéré

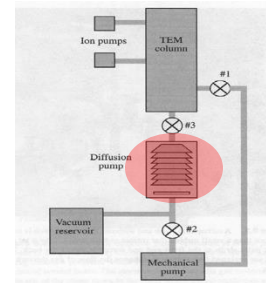
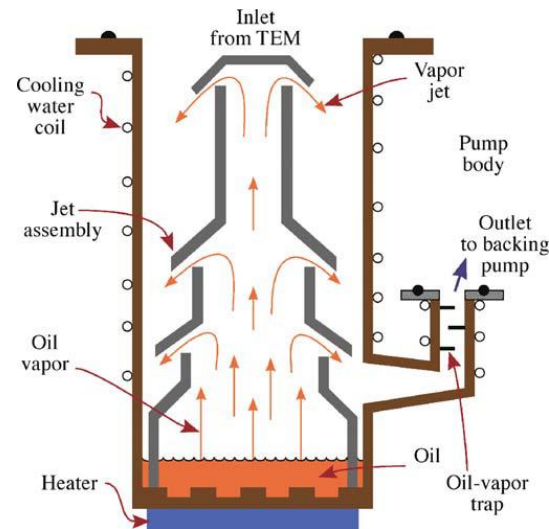
- Pompe mécanique
- Huile
- Bruyante
- S'utilise à l'arrière des autres pompes



# Système de pompage: pompe à diffusion d'huile

## ■ Pompe à huile

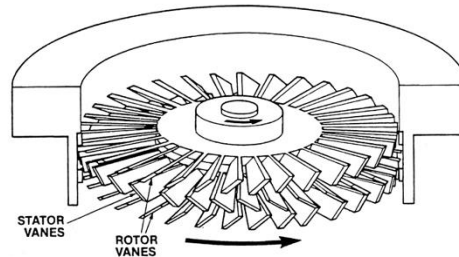
- Particules d'huile piègent les particules de gaz
- Ne vibre pas
- Haute capacité de pompage
- Possible contamination par les vapeurs d'huile
- Refroidissement nécessaire
- Les gaz évacués doivent être éliminés par une pompe primaire

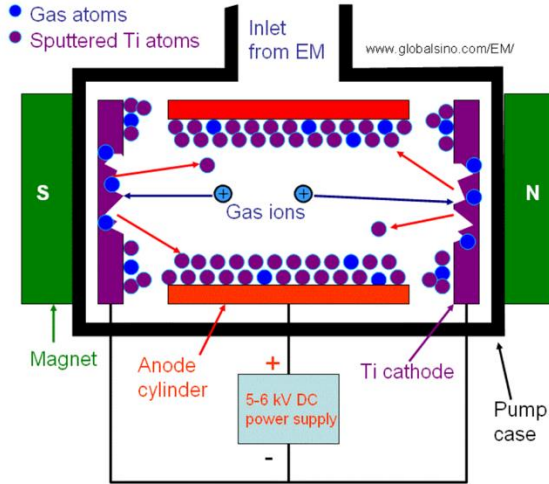


# Système de pompage: pompe turbomoléculaire

## Pompe turbomoléculaire

- Une turbine entraîne le gaz à l'extérieur du microscope
- Rotation de 20'000-50'000 tpm
- Paliers magnétiques
- Capacité de pompage 50-500 l/s
- Est aussi utilisée pour faire le vide primaire dans la chambre du goniometer dans un TEM
- Peut démarrer (lentement) à pression ambiante, la vitesse de rotation augmente lorsque la pression diminue
- A vitesse élevée, fournit un ultra-haut vide (UHV)





## Ionisation du gaz résiduel :

- Un champ électrique intense est appliqué entre les électrodes (anode et cathode).
- Les électrons émis par la cathode (effet secondaire ou thermionique selon le type) ionisent les molécules de gaz présentes dans la chambre à vide.

## Accélération des ions :

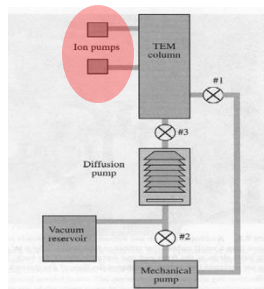
- Les ions positifs créés sont accélérés vers la cathode (en titane dans ton cas) par le champ électrique.

## Implantation ou réaction chimique :

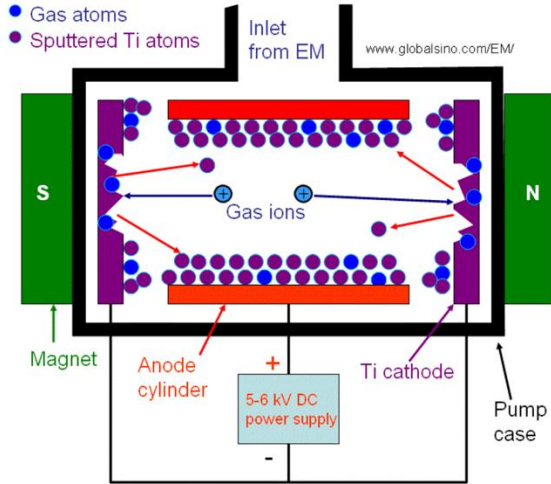
- Les ions frappent la cathode avec suffisamment d'énergie pour:
  - **S'y implanter** (surtout pour les gaz nobles comme l'argon).
  - **Réagir chimiquement** avec le matériau de la cathode (Ti) pour former des **composés stables** (par exemple, TiN avec l'azote,  $\text{TiO}_2$  avec l'oxygène).

## Piégeage permanent :

- Ces réactions ou implantations empêchent les gaz de retourner dans la chambre, assurant leur évacuation efficace.



# Système de pompage: pompe ionique



## Ionisation du gaz résiduel :

- Un champ électrique intense est appliqué entre les électrodes (anode et cathode).
- Les électrons émis par la cathode (effet secondaire ou thermionique selon le type) ionisent les molécules de gaz présentes dans la chambre à vide.

## Accélération des ions :

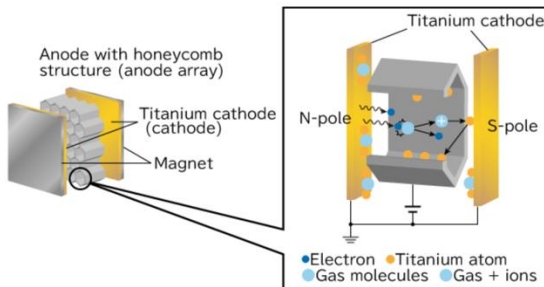
- Les ions positifs créés sont accélérés vers la cathode (en titane dans ton cas) par le champ électrique.

## Implantation ou réaction chimique :

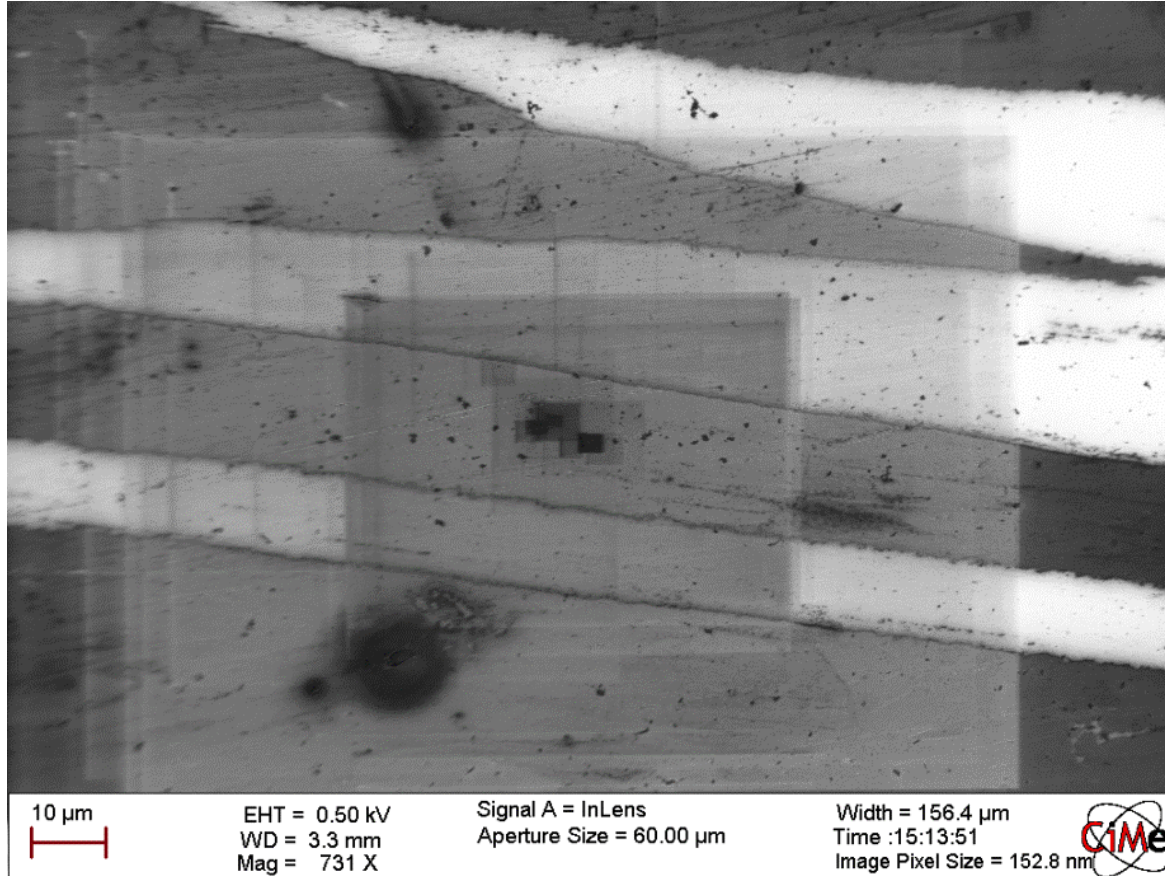
- Les ions frappent la cathode avec suffisamment d'énergie pour:
  - **S'y implanter** (surtout pour les gaz nobles comme l'argon).
  - **Réagir chimiquement** avec le matériau de la cathode (Ti) pour former des **composés stables** (par exemple, TiN avec l'azote,  $TiO_2$  avec l'oxygène).

## Piégeage permanent :

- Ces réactions ou implantations empêchent les gaz de retourner dans la chambre, assurant leur évacuation efficace.



# Systeme de pompage: Contamination



Contamination:

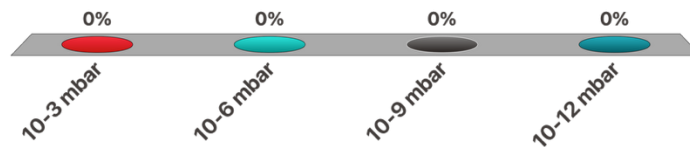
dépôts de carbone  
par l'effet de  
décomposition  
d'hydrocarbures

# Systeme de pompage: Contamination

- Résidus d'huile de pompe à diffusion
- Ne pas toucher les échantillons, porte-objets (avec ou sans gants): Hydrocarbures!
- Faire un plasma etching avant l'observation

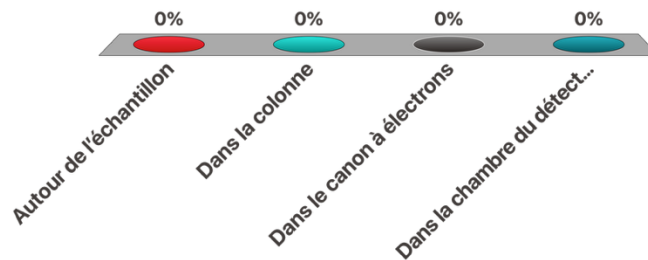
# Quel ordre de grandeur de vide souhaite-t-on dans un canon à émission de champ?

- A.  $10^{-3}$  mbar
- B.  $10^{-6}$  mbar
- C.  $10^{-9}$  mbar
- D.  $10^{-12}$  mbar



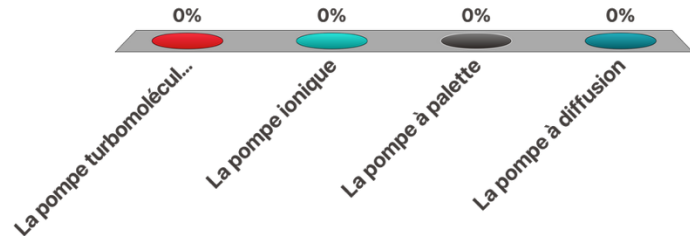
# Où doit-on avoir le meilleur vide?

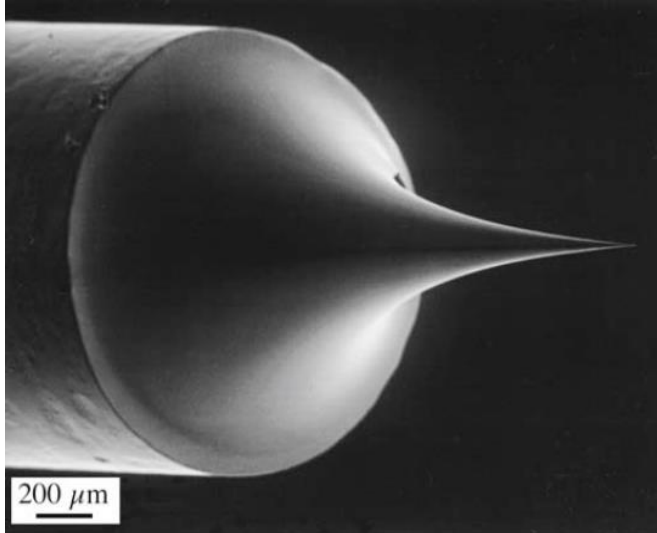
- A. Autour de l'échantillon
- B. Dans la colonne
- C. Dans le canon à électrons
- D. Dans la chambre du détecteur



# Quelle est la pompe qui donne le meilleur vide?

- A. La pompe turbomoléculaire
- B. La pompe ionique
- C. La pompe à palette
- D. La pompe à diffusion





Pointe en W



Cathode LaB<sub>6</sub>

# Sources d'électrons: plusieurs types de canons

Le but est de créer un faisceau étroit et intense d'électrons

Les électrons peuvent être « libérés » par la chaleur et/ou un champ électrique

Canons thermioniques:

- Seulement la chaleur

Emission Schottky

- Chaleur + champ électrique: diminution du travail de sortie

Régime Schottky étendu

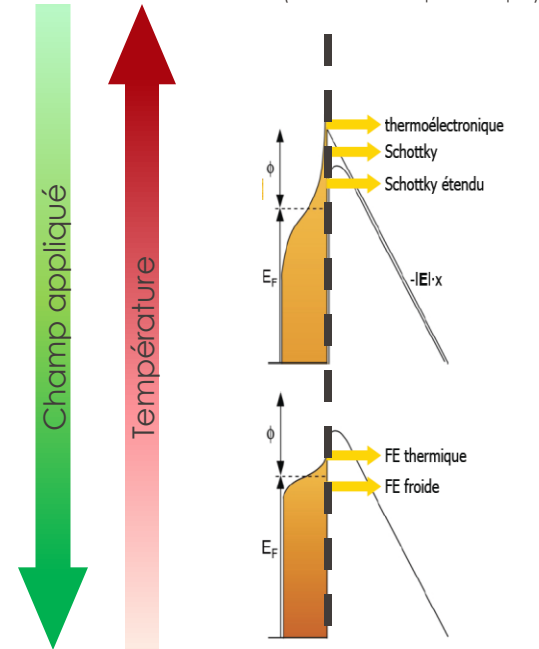
- Augmentation du champ: induit émission par effet tunnel

Emission de champs thermique

- Chaleur + champ électrique + effet tunnel

Emission de champ froide

- Champ électrique + effet tunnel



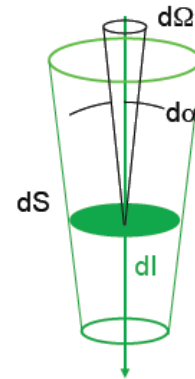
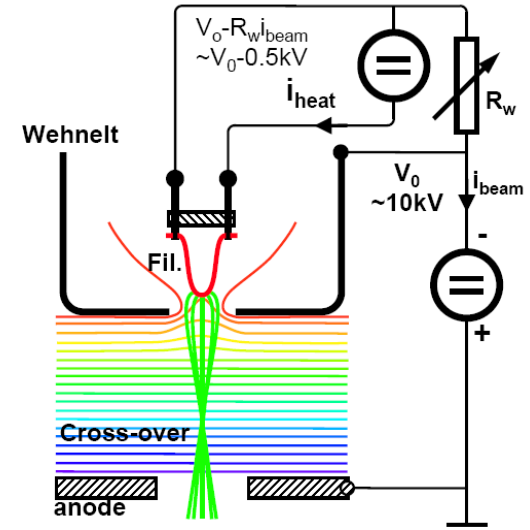
# Sources d'électrons: Canons

Les paramètres importants sont:

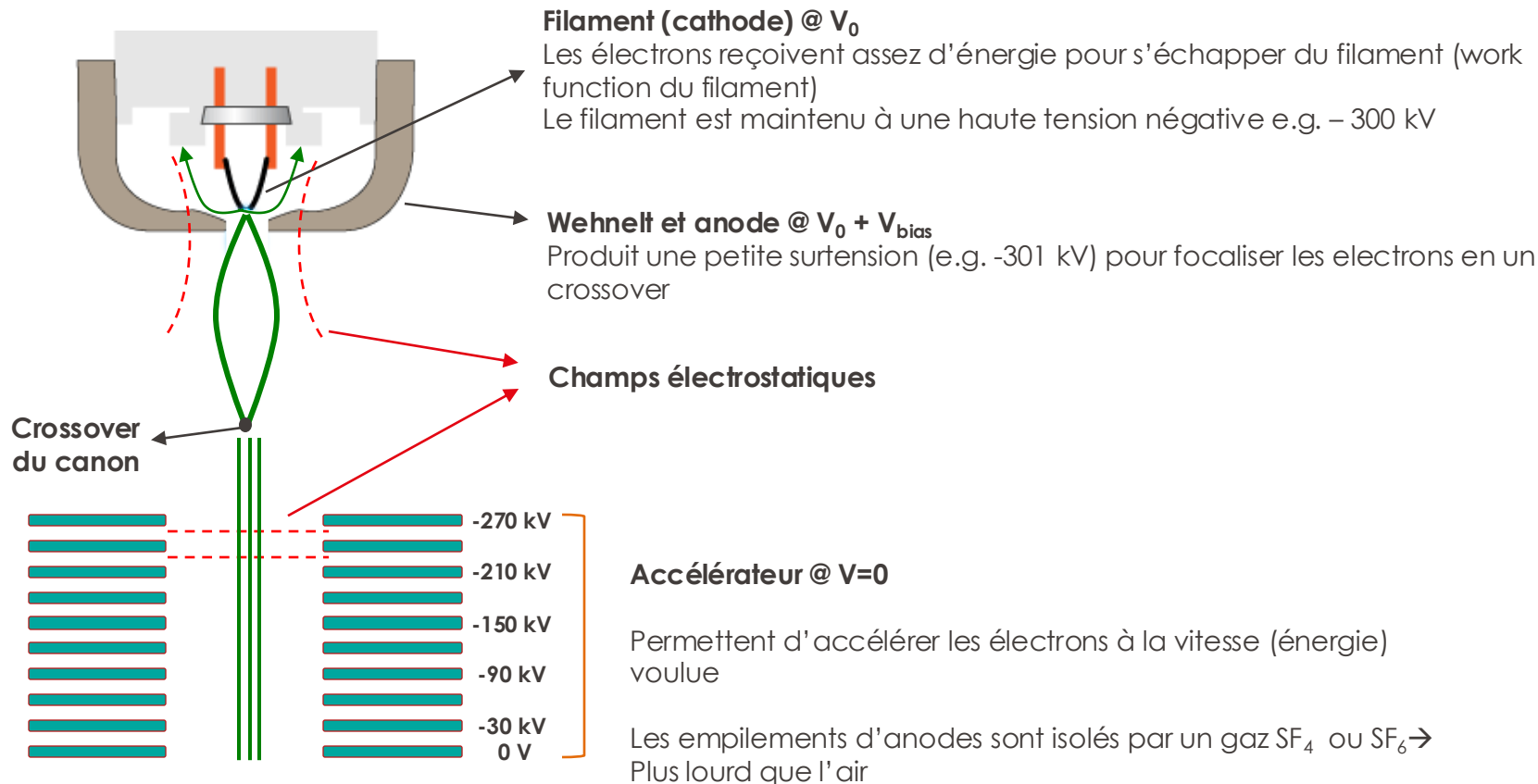
- Courant émis, énergie
- Dispersion en énergie
- Brilliance
  - Courant par unité de surface et d'angle solide

Couplage avec la colonne (optique électronique)

Le canon incorpore souvent une première lentille électrostatique (Wenhelt)



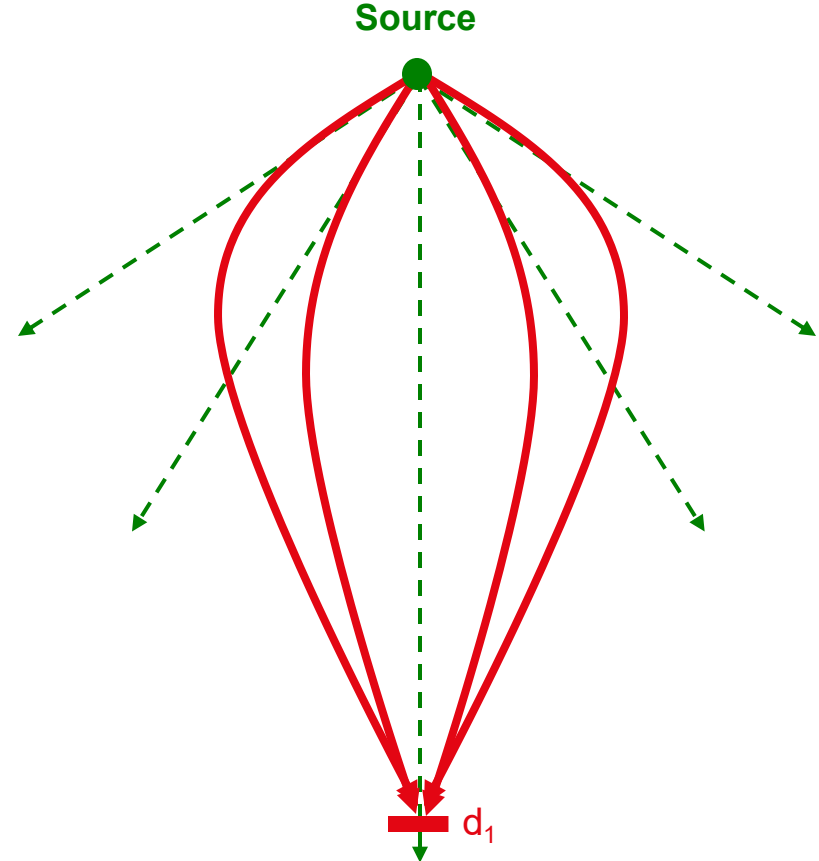
# Sources d'électrons: canons



# Sources d'électrons: canons

## Biais léger

- Grand angle de collection
- Grand cross-over
- Grande taille de sonde ( $d_1$ )



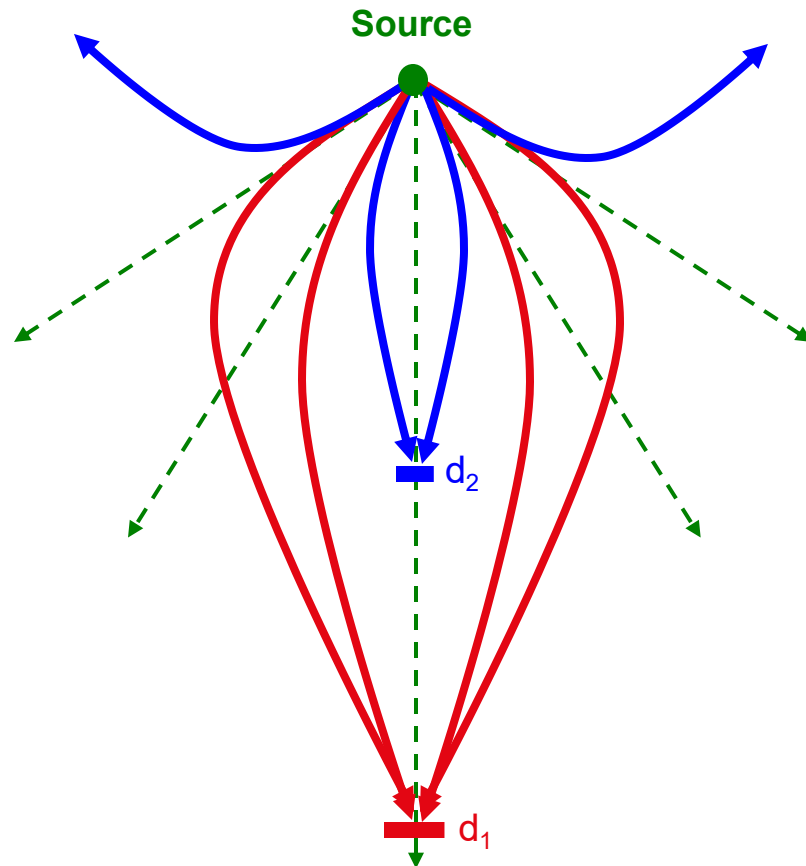
# Sources d'électrons: canons

## Biais léger

- Grand angle de collection
- Grand cross-over
- Grande taille de sonde ( $d_1$ )

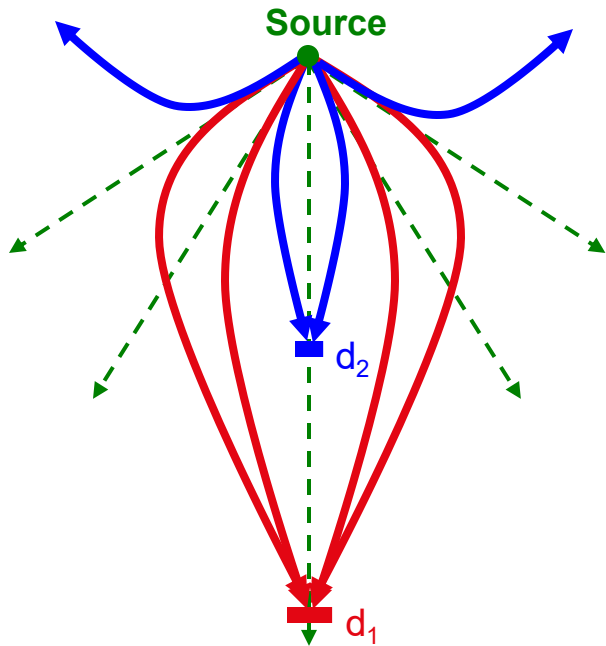
## Biais fort

- Angle de collection plus fin
- Cross-over plus petit
- Taille de sonde plus petite ( $d_2$ )



# Sources d'électrons: canons

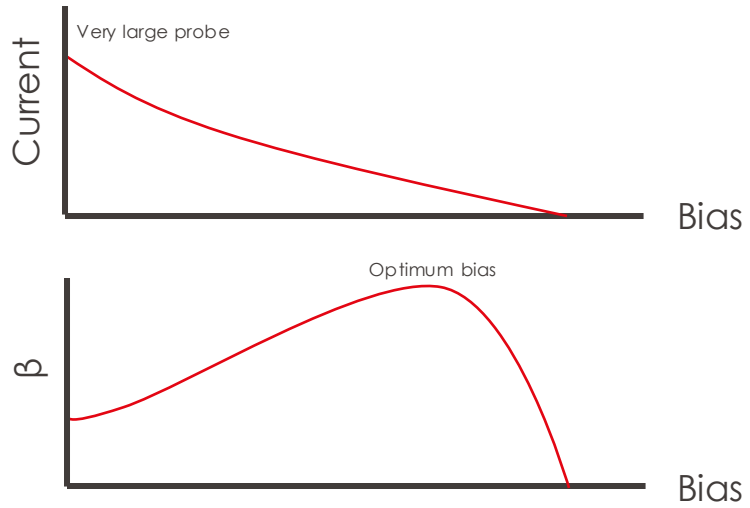
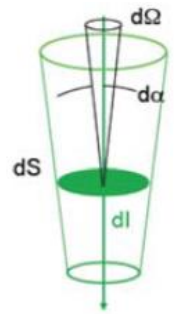
Microscopie électronique: Composants d'un microscope électronique



Current density

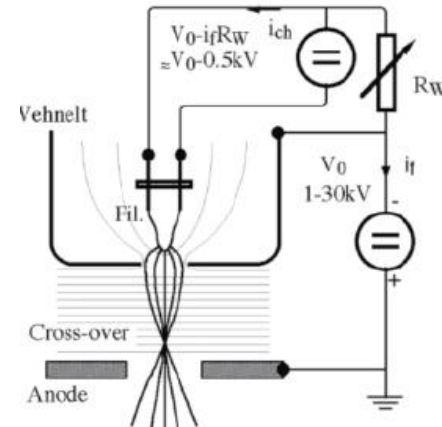
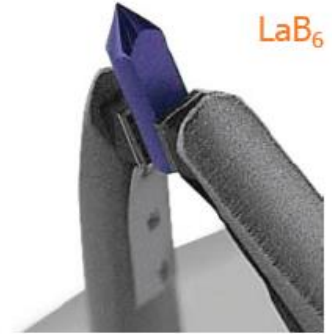
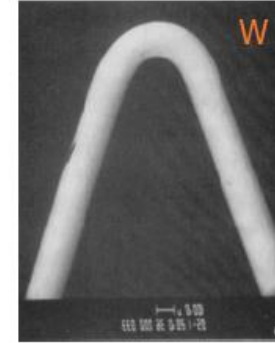
$$\beta \mid \text{brilliance} = \frac{\text{Beam current}}{(\text{Area}) (\text{Solid angle})}$$

Crossover size      Collection angle



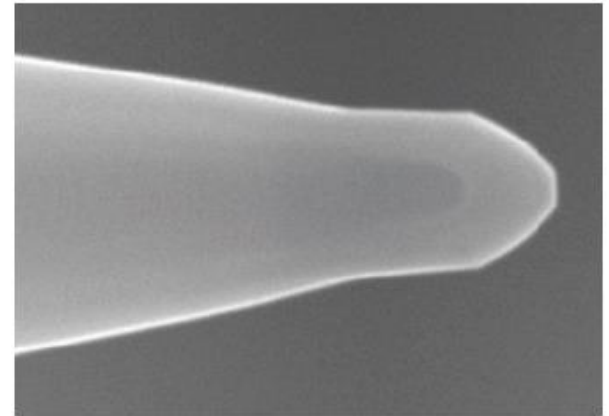
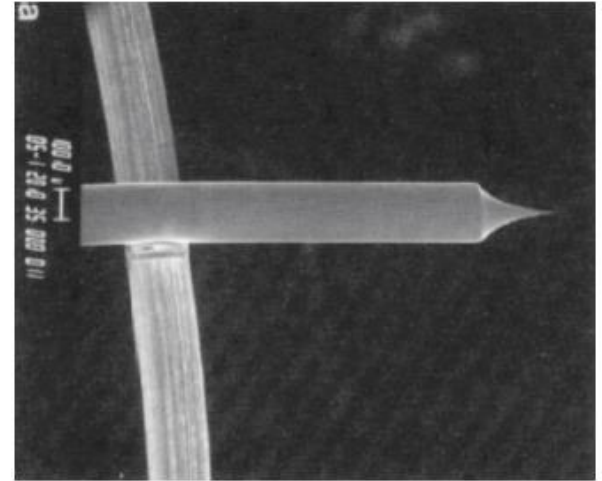
# Sources thermioniques

- Filament de tungstène
  - Chauffé à 2800 K
- Cristal de  $\text{LaB}_6$ 
  - Chauffé à 1900 K
- Avantages
  - Sources « classiques »
  - Simples, bon marché (W)
  - Niveau de vide modéré
- Inconvénients
  - Faible brillance
  - Forte dispersion en énergie (1.5 eV)
  - $\varnothing$  source: 10-30  $\mu\text{m}$



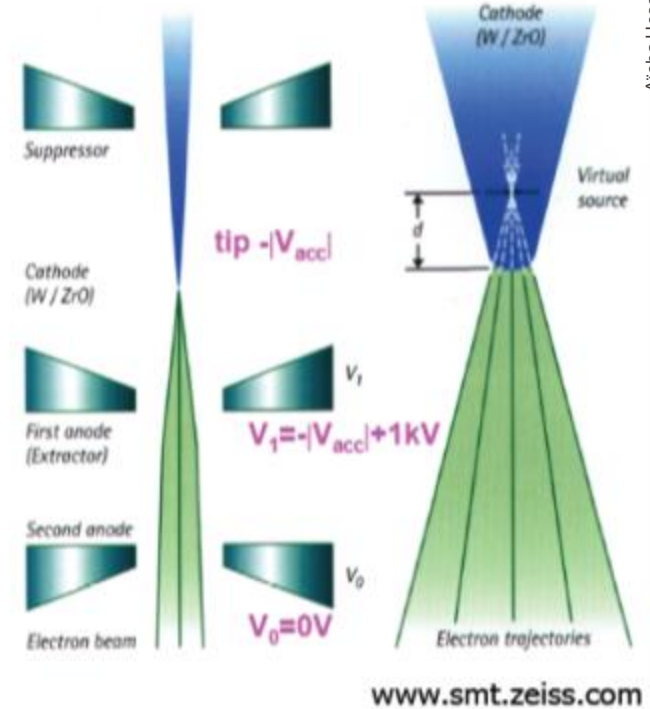
# Sources à émission de champ

- Emission par effet tunnel à froid
  - Monocristal de W taillé en pointe
  - Rayon de courbure  $\approx 100$  nm
  - $E \approx 10^9$  V/m
- Emission Schottky assistée thermiquement
  - Pointe W/Zr en régime Schottky, chauffée à 1700 – 1800 K
  - Rayon de courbure  $\approx 1$   $\mu$ m
- Avantages
  - Haute cohérence, brillance élevée
  - Faible dispersion en énergie ( $<0.4$  eV)
  - Permet d'obtenir meilleure résolution à plus basse énergie
- Inconvénients
  - Cher
  - Demande un haut niveau de vide



# Sources à émission de champ

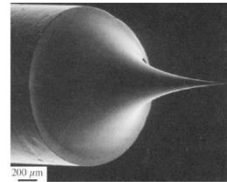
- Première anode: fournit la tension pour extraire les électrons de la pointe
- Seconde anode: accélère les électrons à tension voulue (1-300 kV)
- La pointe et les anodes forment un condensateur électrostatique
- Le cross-over (source) est virtuel ( $\varnothing \approx 5 \text{ nm}$ )



Intensity



Brightness



- Cohérence spatiale
  - Est-ce que les électrons viennent tous de la même directions?
  - Un faisceau d'électrons émis d'une plus petite source aura une plus grande cohérence spatiale
- Cohérence temporelle
  - Est-ce que tous les électrons ont exactement la même énergie?
  - Un faisceau d'électrons avec tous la même énergie aura une grande cohérence temporelle
- Intensité vs brillance
  - Les tailles de la source et du cross-over déterminent la taille du faisceau (donc la résolution!)
  - Brillance: courant par unité de surface et d'angle solide

## ■ Thermionique

- Beaucoup d'électrons provenant d'une pointe large (10-100  $\mu\text{m}$ )
- Différentes énergies
- Différentes directions
  
- Simple d'utilisation
- Bon marché
- Vide modéré
- Courant de faisceau élevé
- Faible brillance
- Grande dispersion d'énergie
- Taille de source élevée (10-100  $\mu\text{m}$ )
- Durée de vie limitée (100-1000h)

## ■ Emission de champ (FEG)

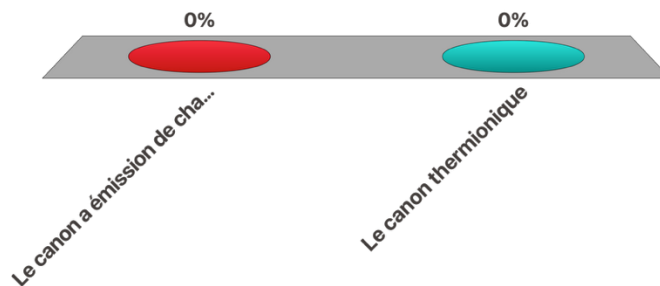
- Electrons provenant d'une très fine pointe ( $\approx 100$  nm)
- Même énergie
- Même direction
  
- Grande cohérence (spatiale et temporelle) -> meilleure résolution
- Brillance élevée
- Durée de vie plus élevée (>1000 h)
- Coûteux
- Vide poussé nécessaire
- Emission froide nécessite un flash après 8h

# Sources d'électrons: canons

	W	LaB6	FEG Schottky (ZrO/W)	FEG cold (W)
Crossover size (nm)	<b>&gt;10<sup>5</sup></b>	10 <sup>4</sup>	<b>10-100</b>	3
Emission current (μA)	<b>100</b>	50	<b>50</b>	10
Current density (A/m <sup>2</sup> )	<b>5</b>	10 <sup>2</sup>	<b>10<sup>5</sup></b>	10 <sup>6</sup>
Brightness B (A/m <sup>2</sup> sr)	<b>5x10<sup>9</sup></b>	5x10 <sup>10</sup>	<b>5x10<sup>12</sup></b>	10 <sup>13</sup>
Energy spread ΔE (eV)	2.3	1.5	0.6~0.8	0.3~0.7
Current stability (%/hr)	<1	<1	<1	<b>5</b>
Vacuum pressure (Pa)*	10 <sup>-3</sup>	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>
Temperature (K)	2800	1800	1800	300

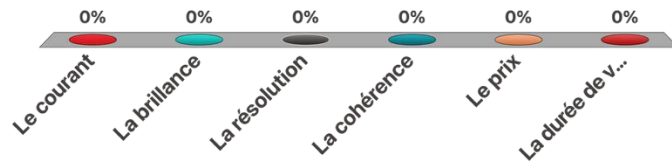
# Quel type de canon permet d'avoir un maximum de courant (= intensité)?

- A. Le canon à émission de champ
- B. Le canon thermionique



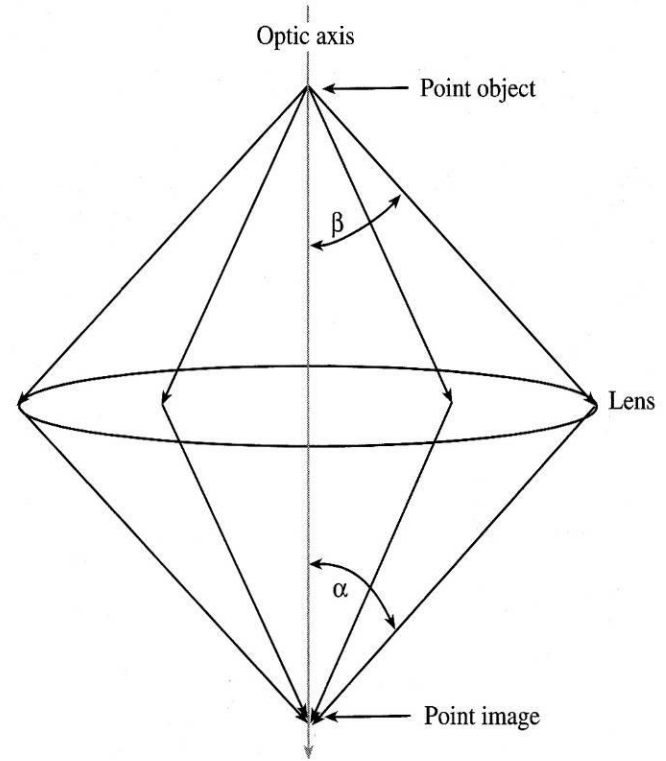
# Le canon à émission de champ est mieux pour...

- A. Le courant
- B. La brillance
- C. La résolution
- D. La cohérence
- E. Le prix
- F. La durée de vie



# Lentilles: rappel optique

Une lentille a un point objet  
et un point image

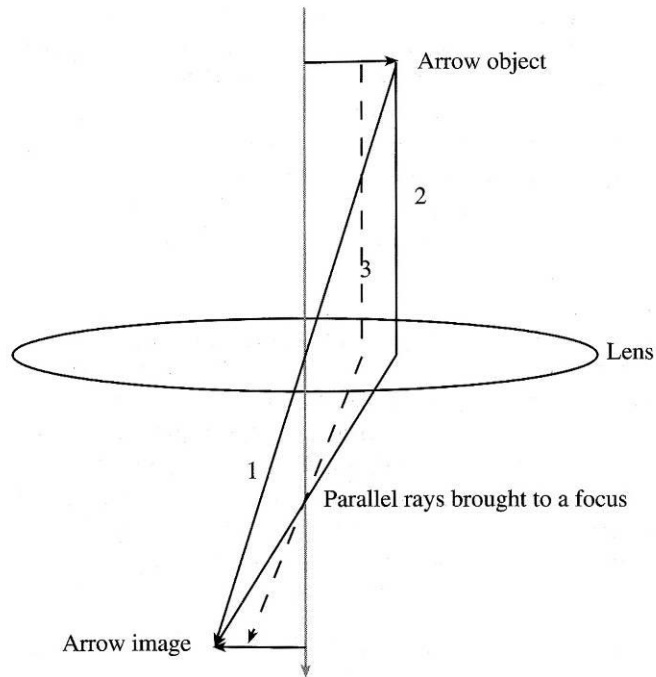


**Figure 6.1.** Image formation by a convex lens. A point object is imaged as a point and the collection semiangle of the lens is defined relative to the object ( $\beta$ ) or the image ( $\alpha$ ).

# Lentilles: rappel optique

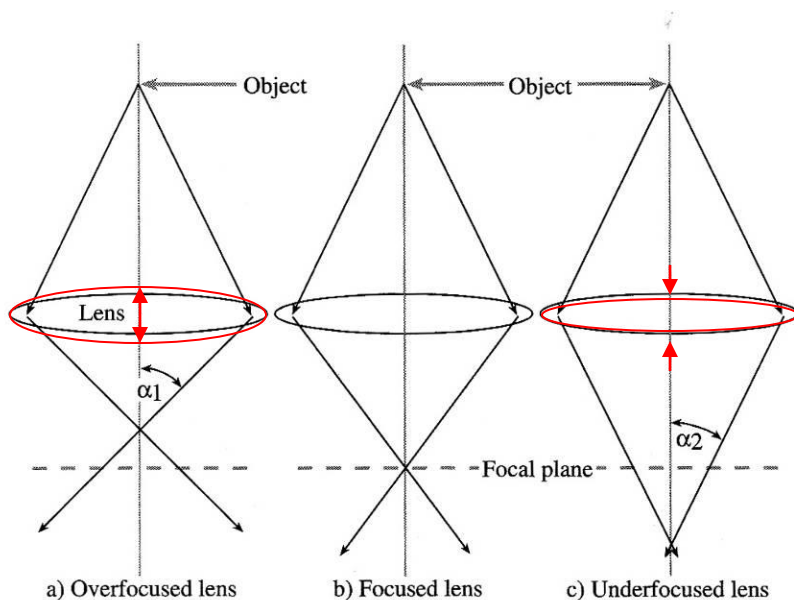
Une lentille a un point objet  
et un point image

Mais également un point  
focal!



**Figure 6.2.** How to draw a ray diagram: first construct ray 1 through the middle of the lens, then ray 2, parallel to the optic axis, to determine the lens strength. Finally, draw line 3 parallel to 2 to define the focal plane where the parallel rays are focused. Thus an asymmetric object is imaged off axis and rotated through  $180^\circ$ .

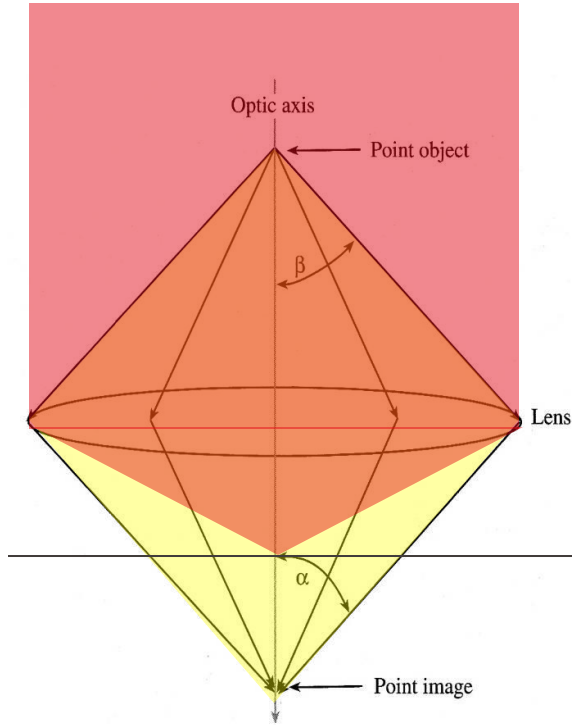
# Lentilles: rappel optique



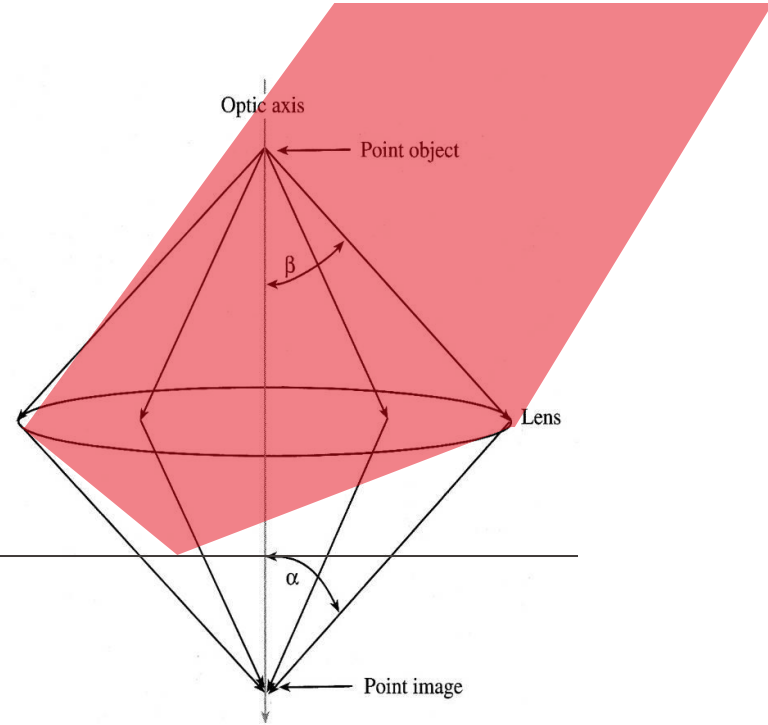
- Mise au point
- Sur-focalisation
- Sous-focalisation

**Figure 6.5.** (a) Ray diagram illustrating the concepts of overfocus, in which a strong lens focuses the rays before the image plane, and (c) underfocus, where a weaker lens focuses after the image plane. It is clear from (c) that at a given underfocus the convergent rays are more parallel than the equivalent divergent rays at overfocus ( $\alpha_2 < \alpha_1$ ).

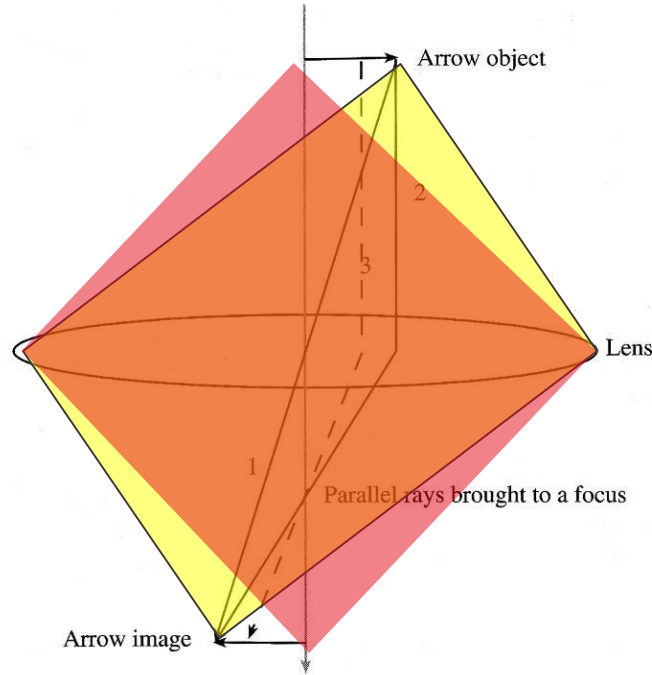
# Lentilles: rappel optique



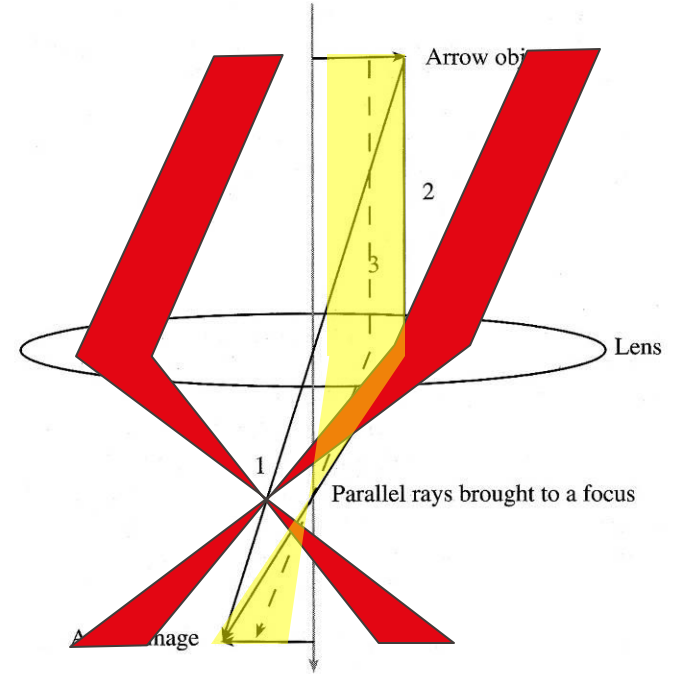
**Figure 6.1.** Image formation by a convex lens. A point object is imaged as a point and the collection semiangle of the lens is defined relative to the object ( $\beta$ ) or the image ( $\alpha$ ).



**Figure 6.1.** Image formation by a convex lens. A point object is imaged as a point and the collection semiangle of the lens is defined relative to the object ( $\beta$ ) or the image ( $\alpha$ ).

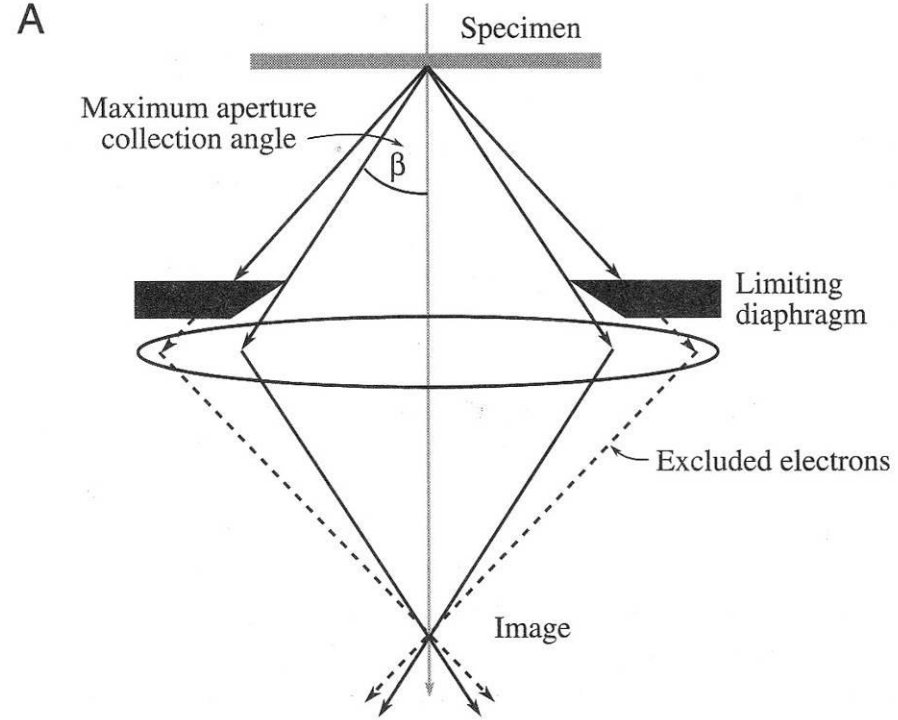


**Figure 6.2.** How to draw a ray diagram: first construct ray 1 through the middle of the lens, then ray 2, parallel to the optic axis, to determine the lens strength. Finally, draw line 3 parallel to 2 to define the focal plane where the parallel rays are focused. Thus an asymmetric object is imaged off axis and rotated through  $180^\circ$ .



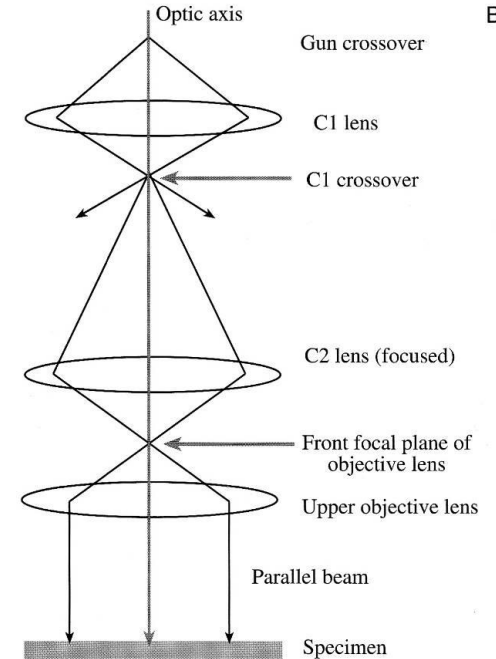
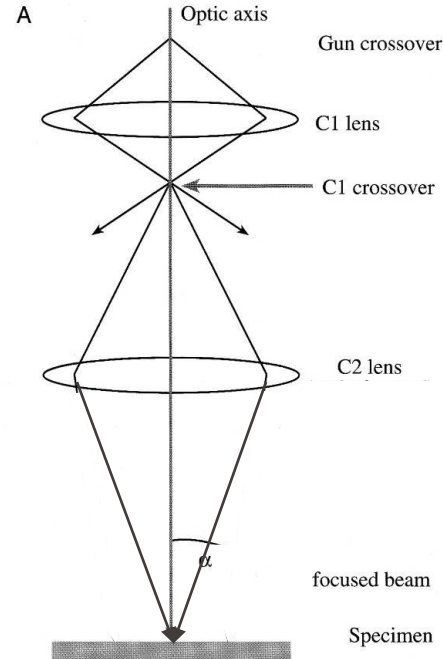
**Figure 6.2.** How to draw a ray diagram: first construct ray 1 through the middle of the lens, then ray 2, parallel to the optic axis, to determine the lens strength. Finally, draw line 3 parallel to 2 to define the focal plane where the parallel rays are focused. Thus an asymmetric object is imaged off axis and rotated through  $180^\circ$ .

- Ouverture d'une lentille
- Angle de collection



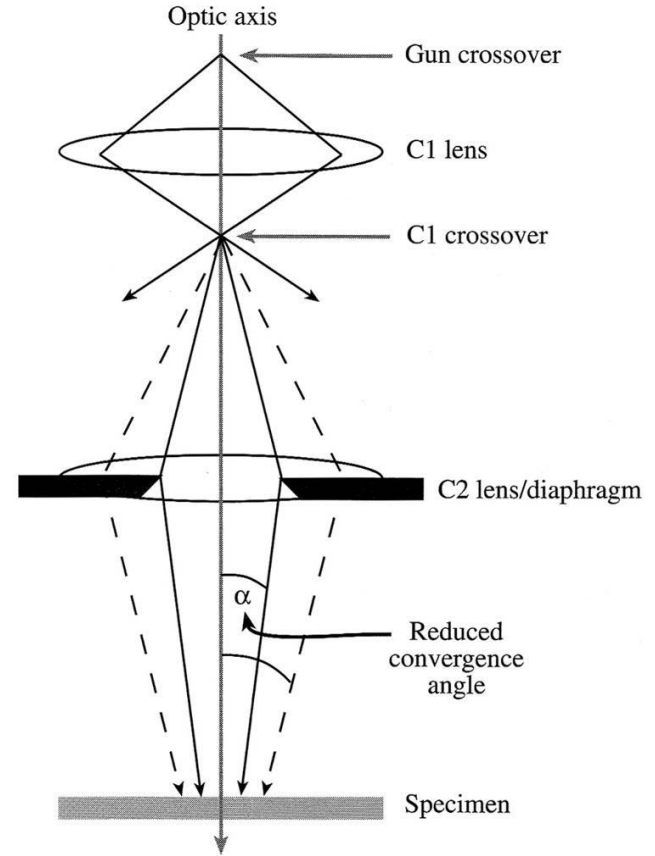
**Figure 6.10.** (A) Ray diagram illustrating how a diaphragm restricts the angular spread of electrons entering the lens. Only electron paths less than a semiangle  $\beta$  subtended by the aperture at the object are allowed through the lens (full ray paths). Electrons from the object scattered at angles  $>\beta$  are stopped by the diaphragm (dashed ray paths).

- Illumination convergente
- Illumination parallèle



# Lentilles: rappel optique

- Diaphragme de condenseur
  - Angle de convergence
  - Intensité du courant



# Lentilles pour électrons

- Lumière: Lentilles optiques  
Déflexion de la lumière par changement de l'indice de réfraction
- Particules chargées:  
Lentilles électrostatiques  
Lentilles magnétiques
- Force de Lorentz!
- Particularités:  
Focale variable  
Possibilité de réaliser des correcteurs d'aberration (astigmatisme, sphérique)  
Possibilité de réaliser un filtre en énergie

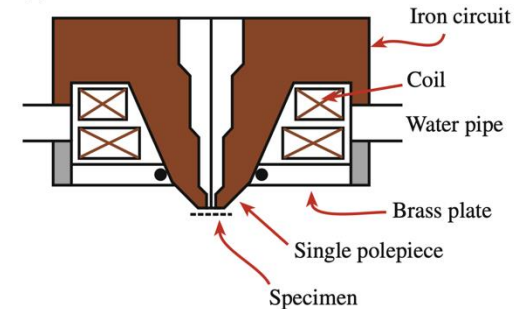
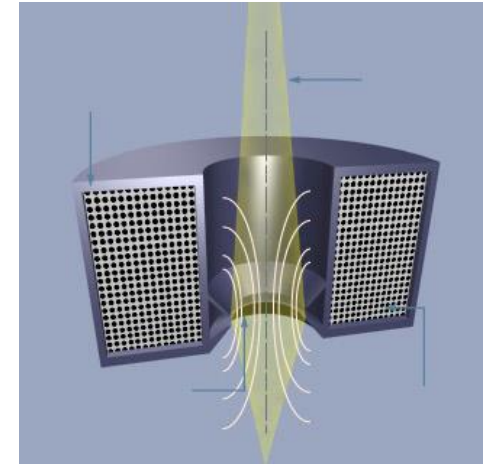


Figure 1



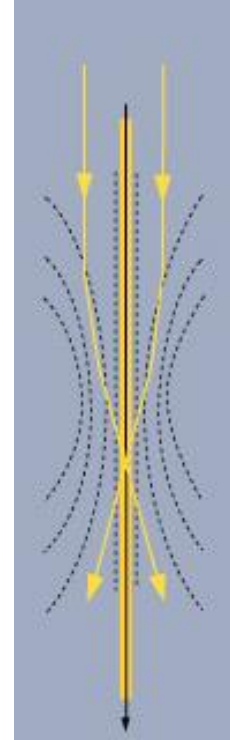
# Lentilles pour électrons

- Optique électronique: Pas d'interface nette entre milieu "réfractant" et le vide
  - Optique: lentilles en verre solide, différence d'indice
- Faisceau d'électrons diverge même dans le vide
  - Répulsion électrostatique
- Lentilles magnétiques
  - En général: lentilles à symétrie de révolution (solénoïdes)
- Lentilles convergentes uniquement
- "Pièce polaire"  
Rétrécissement à l'intérieur de la lentille, afin de confiner le champ magnétique
- Lentilles "multi-pôles"
  - Correction des aberrations



# Lentilles pour électrons

- Champ à symétrie de révolution
- Charge dans un champ magnétique → Force de Lorentz
- $\mathbf{F} = -e \mathbf{v} \wedge \mathbf{B}$
- Électrons sur axe optique:  $\mathbf{F} = 0$
- Electrons en dehors de l'axe optique:  $\mathbf{F} \neq 0$ , déviation



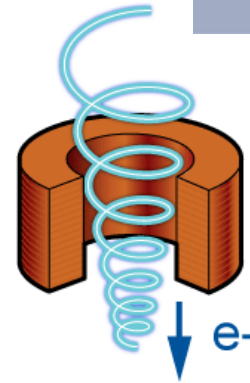
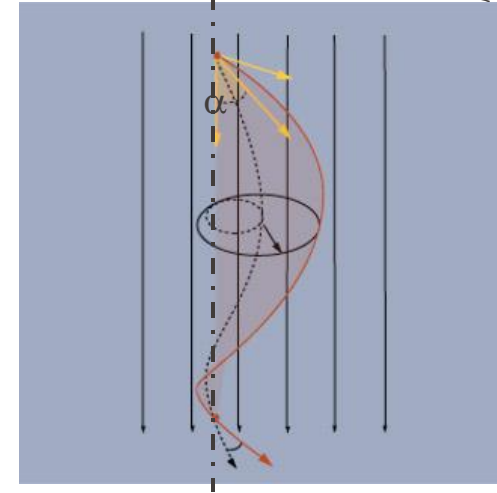
# Lentilles pour électrons

- Champ homogène,  $\alpha$  est petit
- Composante de  $\mathbf{v} // \mathbf{B}$  n'est pas modifiée
- Composante de  $\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$ :  $v_r \ll |\mathbf{v}|$
- Spirale de rayon  $r = m v_r / eB$
- Tous les électrons du faisceau qui croisent l'axe optique en un point le recroisent en un même point,  $\alpha$  et  $v_r$
- Longueur focale  $f$  ajustée par  $B$ , et donc par le courant qui traverse la bobine
  - Quand  $B$  augmente,  $f$  diminue

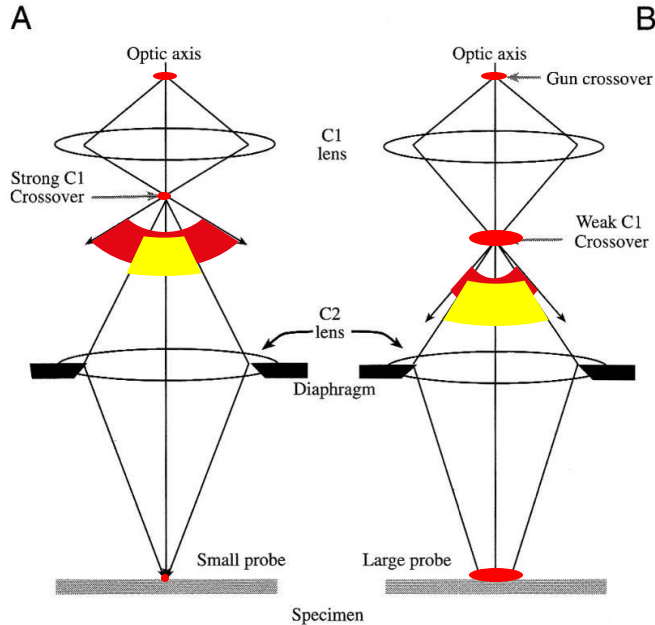
axe optique

48

yser

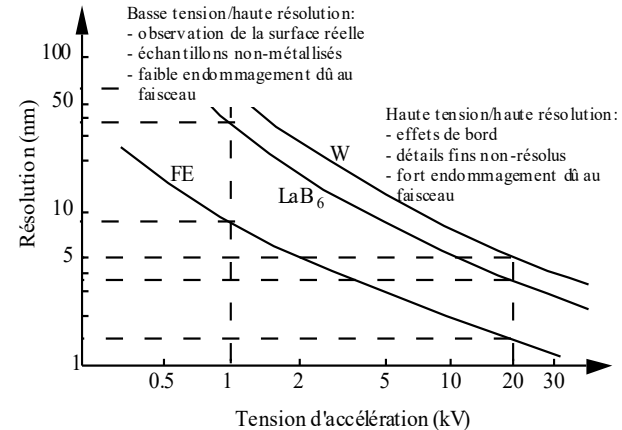


# Lentilles pour électrons



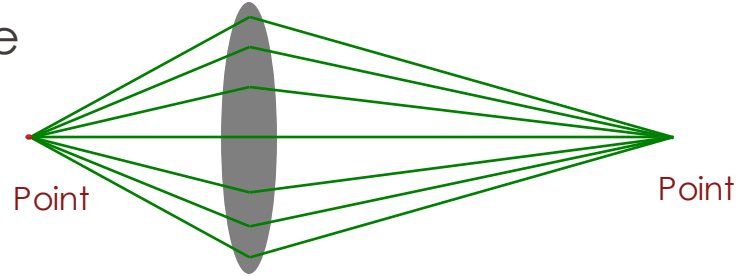
**Figure 9.5.** Effect of the C1 lens strength on probe size: a stronger C1 lens (A) results in greater demagnification by any subsequent lens (C2 or C3), giving a smaller electron beam at the specimen. A weaker lens (B) gives a broader probe.

- La lentille condenseur définit:
  - La taille de la sonde
  - Le courant de la sonde
  
- Courant faible => sonde fine
- Courant élevé => sonde large
  
- L'énergie joue aussi sur la taille de sonde (Force de Lorentz!)



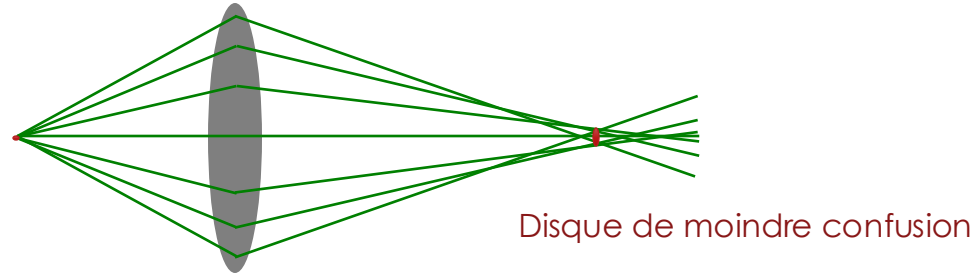
# Lentilles pour électrons: défauts

Lentille idéale



Un point source est focalisé en un point sur le plan focal

Lentille réelle



Un point source est focalisé en un disque sur le plan focal

Les aberrations des lentilles limitent la résolution!

# Lentilles pour électrons: défauts

## ■ Aberrations des lentilles

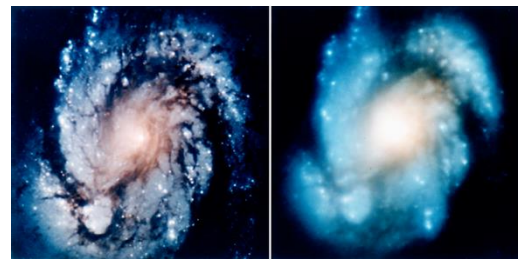
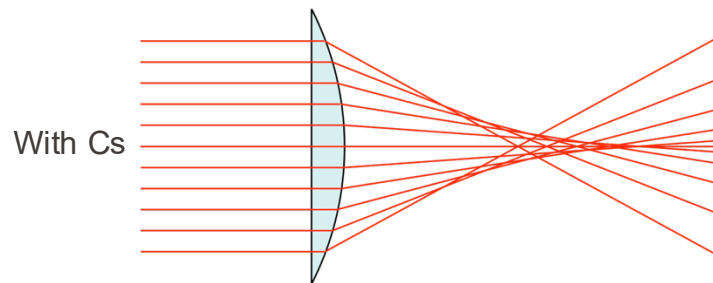
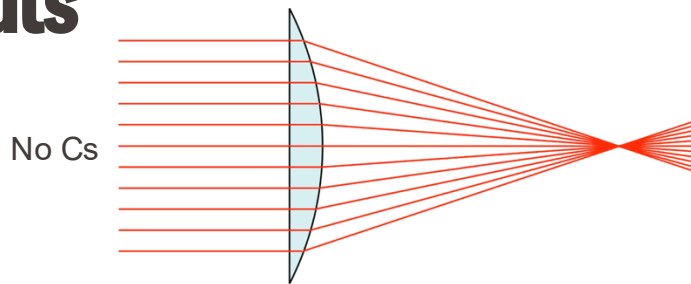
- Aberration sphérique
- Aberration chromatique
- Astigmatisme
- Effet de diffraction



# Lentilles pour électrons: défauts

## ■ Aberrations sphérique

- Des rayons parallèles à l'axe optique devraient tous être focalisés en un point
- En cas d'aberration sphérique, les rayons éloignés du centre de la lentille convergent plus loin du plan focal que ceux qui sont proches de l'axe optique
- Il en résulte de multiples points focaux, et donc un disque sur le plan focal
- Cela induit une sonde plus large et une moins bonne résolution



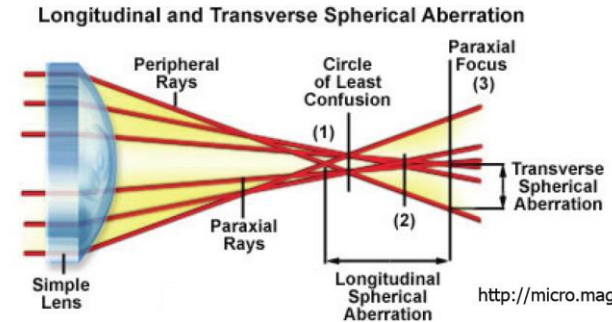
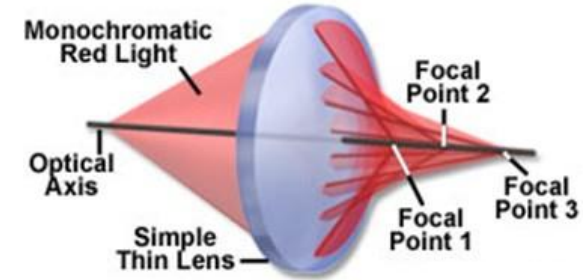
Core of the galaxy M100 ©NASA

## ■ Aberrations sphérique

- La longueur focale dépend de la distance à l'axe optique
- L'image de l'objet est dispersée le long de l'axe optique
- Disque de moindre confusion:

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

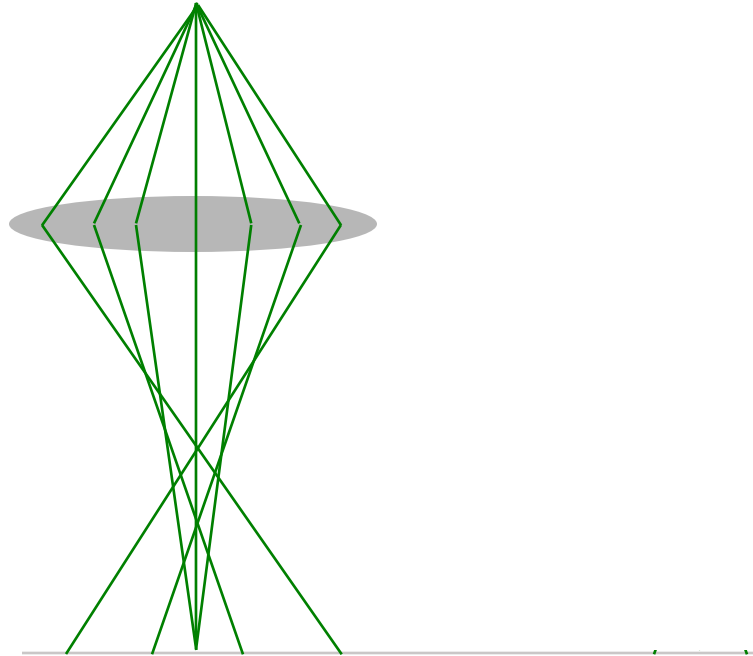
- $d_s$ : taille du disque
- $C_s$ : coefficient d'aberration sphérique
- $\alpha$ : angle d'ouverture du faisceau



<http://micro.magnet.fsu.edu/>

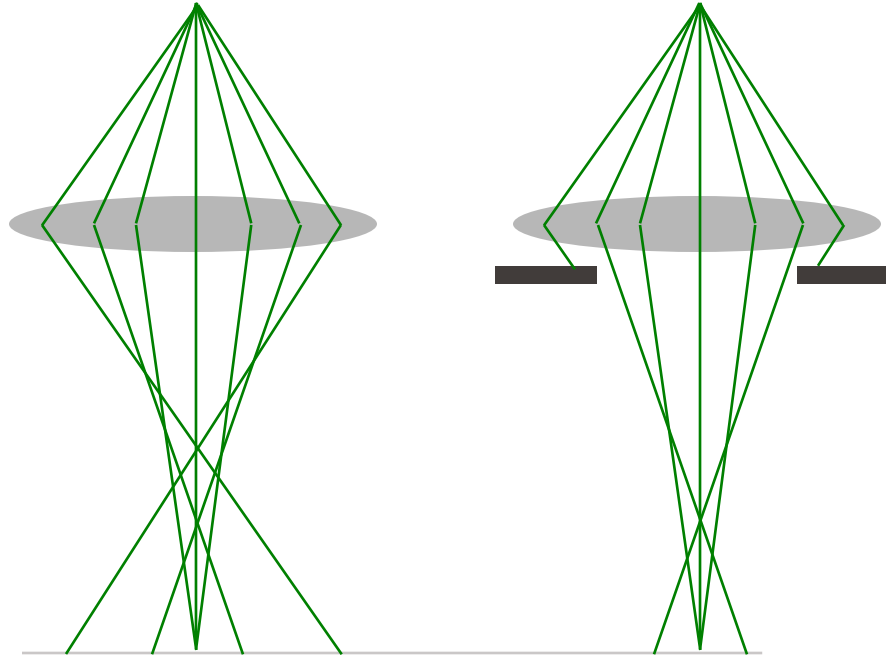
# Lentilles pour électrons: défauts

- Comment minimiser l'effet de l'aberration sphérique?



# Lentilles pour électrons: défauts

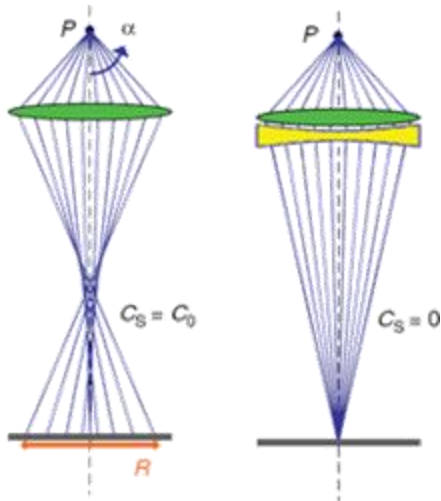
- Comment minimiser l'effet de l'aberration sphérique?



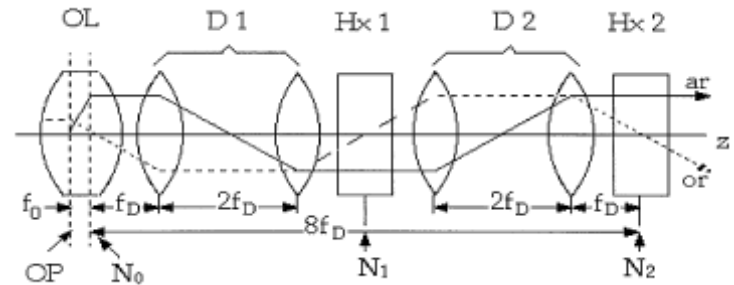
Introduction d'un diaphragme => moins de courant, risque d'effet de diffraction

## ■ Correcteur d'aberration sphérique

La correction  $C_s$  pour les lentille optiques se fait par une combinaison de lentilles convexes et concaves



La correction  $C_s$  pour les lentilles magnétiques se fait par une combinaison d'octupoles et quadrupoles.

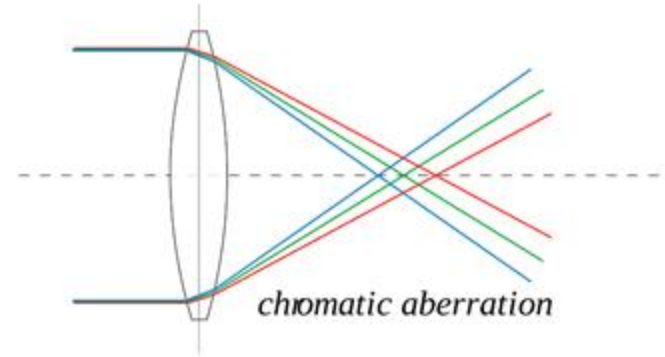


## ■ Aberrations chromatique

- La longueur focale dépend de l'énergie du rayonnement
- Les électrons à plus forte énergie vont être focalisés plus fortement (force de Lorentz!)
- L'image de l'objet est dispersée le long de l'axe optique
- Disque de moindre confusion:

$$d_c = C_c \alpha (\Delta E/E + 2\Delta i/i)$$

- $d_c$ : taille du disque
- $C_c$ : coefficient d'aberration chromatique
- $E$ : énergie des électrons
- $i$ : courant dans la lentille
- $\alpha$ : angle d'ouverture du faisceau

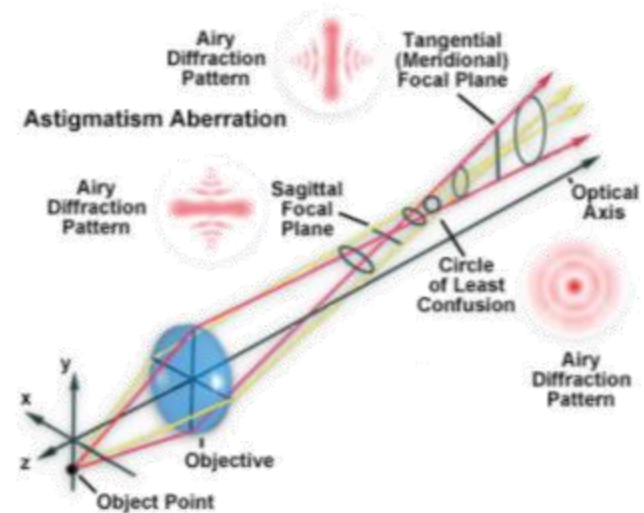


## ■ Astigmatisme

- La longueur focale dépend des axes de la lentille
- L'image semble "étirée" lorsque l'on défocalise
- Disque de moindre confusion:

$$d_A = \Delta f_A \alpha$$

- $d_A$ : taille du disque
- $\alpha$ : angle d'ouverture du faisceau
- $\Delta f_A$ : défocalisation



## ■ Astigmatisme

- La longueur focale depend des axes de la lentille
- L'image semble "étirée" lorsque l'on défocalise
- Disque de moindre confusion:

$$d_A = \Delta f_A \alpha$$

- $d_A$ : taille du disque
- $\alpha$ : angle d'ouverture du faisceau
- $\Delta f_A$ : défocalisation

Under focus image

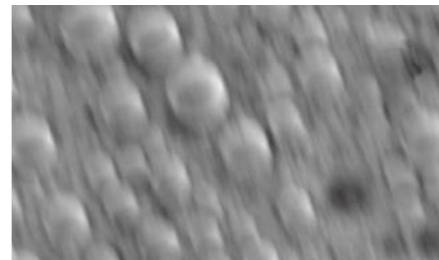
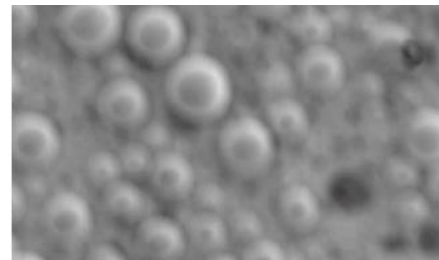
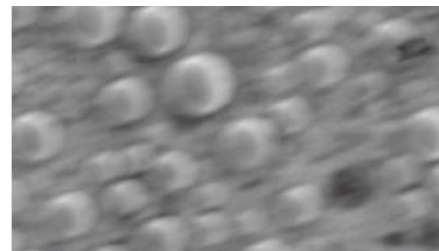


Image in focus

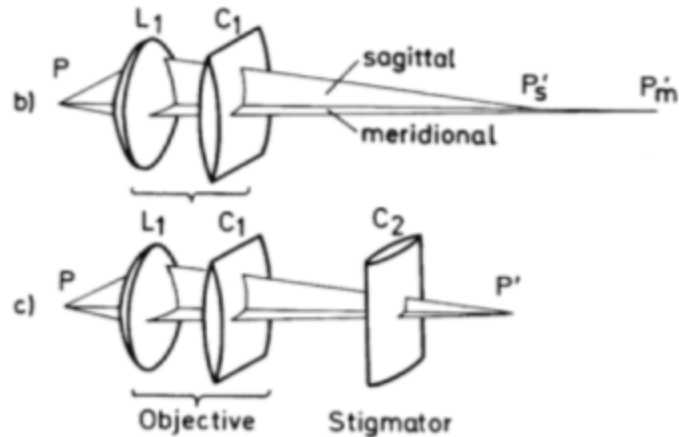


Over focus image

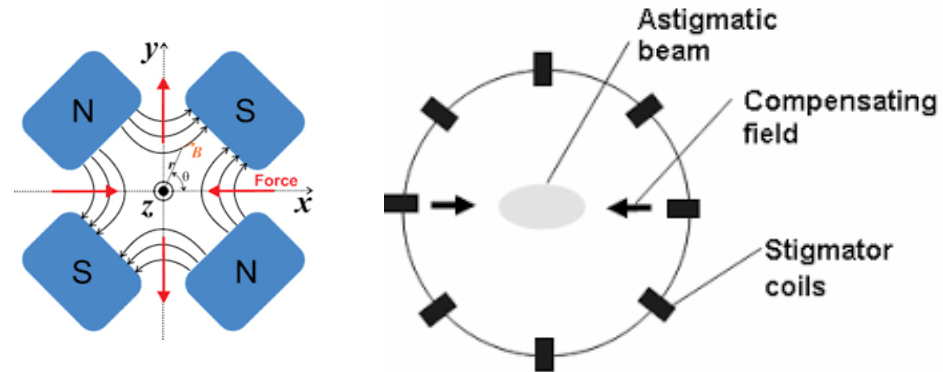


## ■ Correcteur d'astigmatisme: stigmatiseurs

La correction de l'astigmatisme pour les lentilles optiques se fait par des lentilles cylindriques

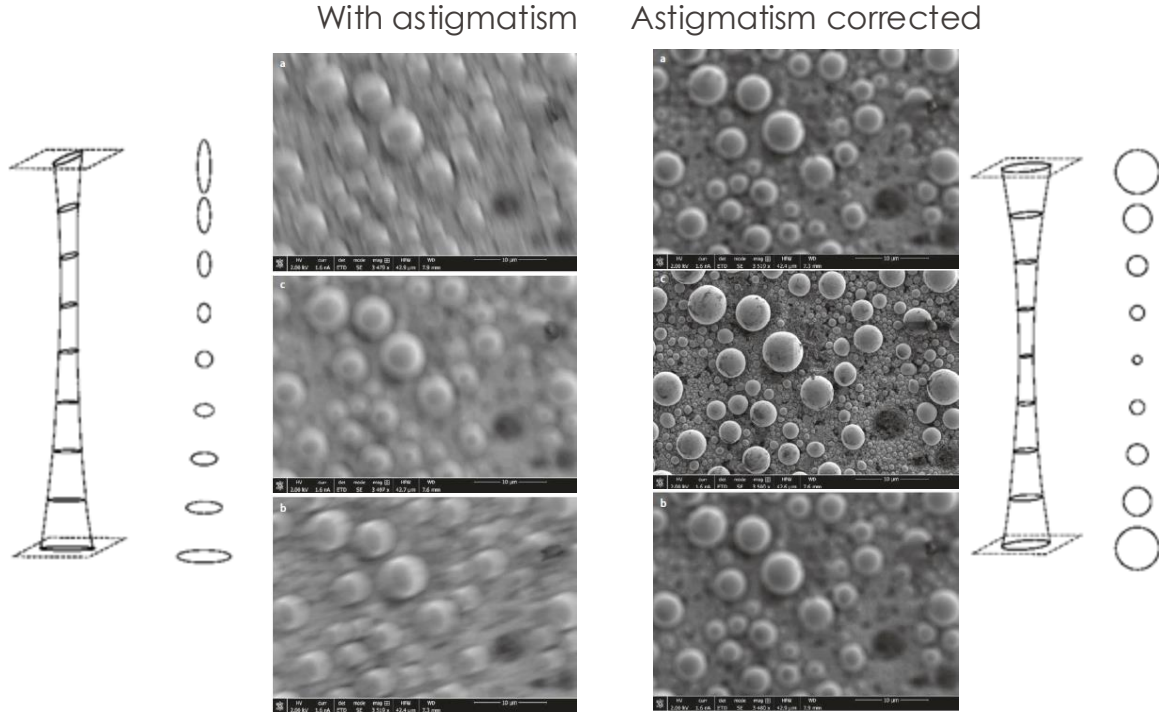


La correction de l'astigmatisme pour les lentilles magnétiques se fait par deux quadropoles à 45° permettant de contrôler la force et la direction de la correction



# Lentilles pour électrons: défauts

- Correcteur d'astigmatisme: stigmatiseurs

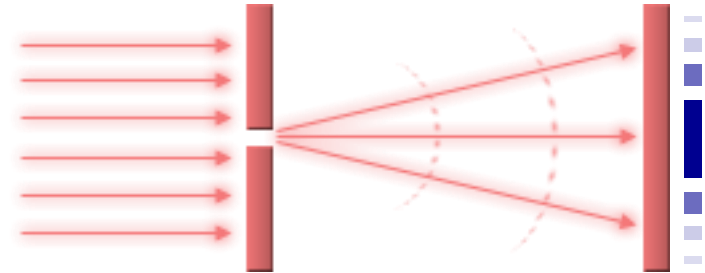


## ■ Effet de diffraction

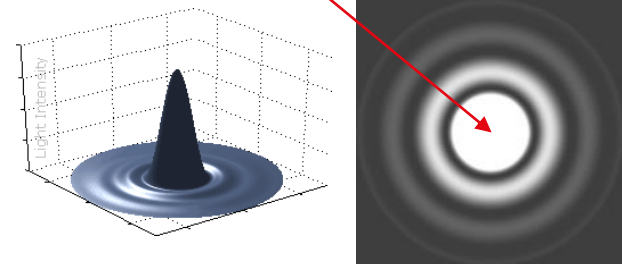
- Onde cohérente sur une ouverture circulaire => tache dite d'Airy produite sur un écran situé à une large distance  $L$  (par rapport à la longueur d'onde  $\lambda$  et au diamètre  $2R$  de l'ouverture)
- L'onde s'étend autour de l'axe à une distance radiale  $r$  avec une intensité:
- $I(x) \approx (J_1(x)/x)^2$
- Largeur à mi-hauteur de la tache centrale:

$$d_d = 0.61 \lambda/\alpha \approx 1/\alpha$$

- $J_1$ : fonction de Bessel de premier ordre
- $x=2\pi Rr/\lambda L$
- $\alpha$ : angle d'ouverture du faisceau

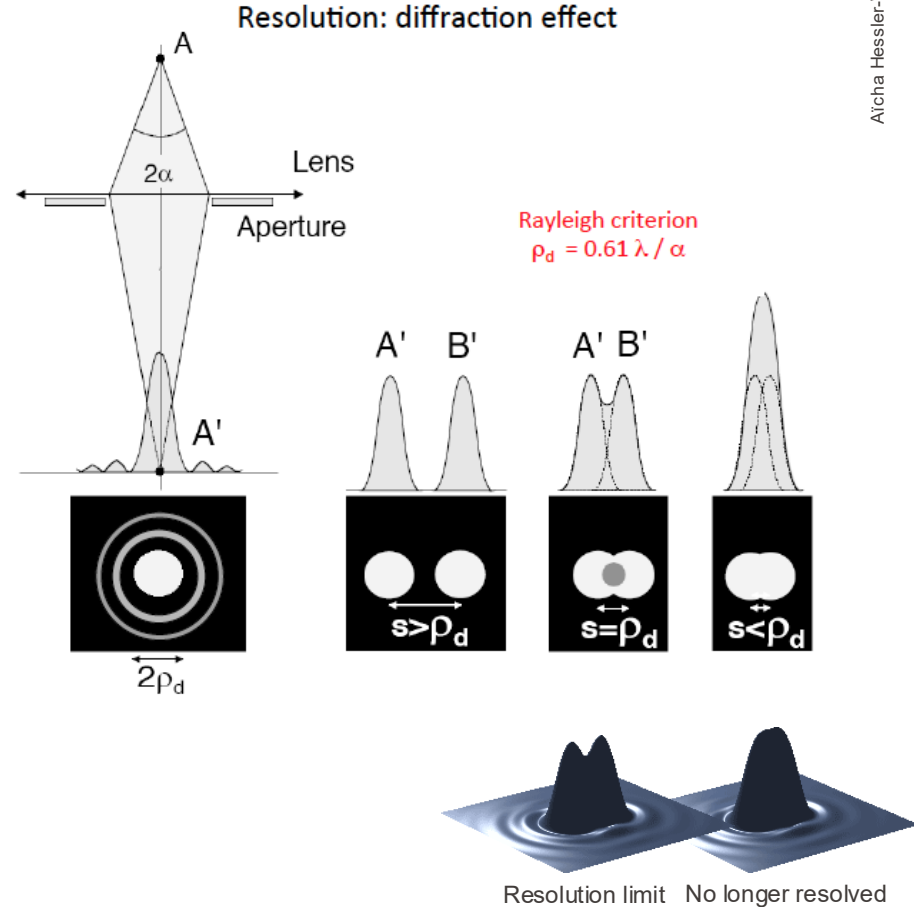
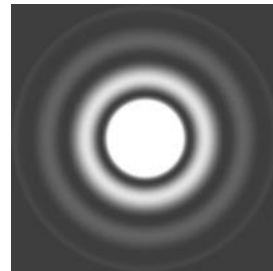
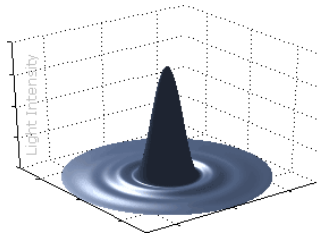


Disk/circle of confusion



## ■ Effet de diffraction: peut-on le limiter?

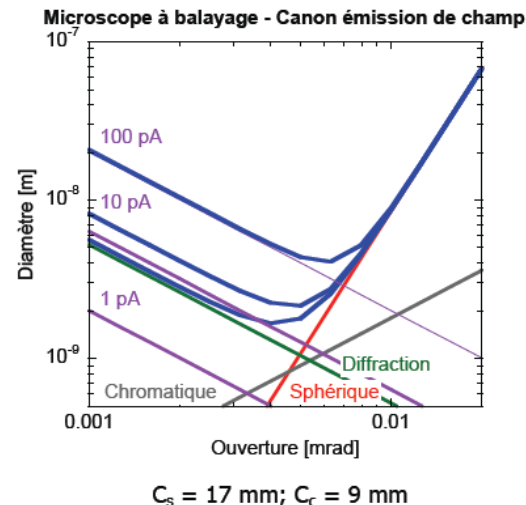
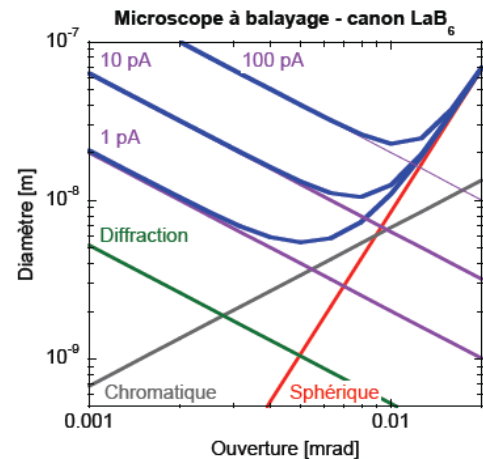
- Avec une ouverture plus grande par rapport à la longueur d'onde
- Attention à l'aberration sphérique!



# Lentilles pour électrons: défauts

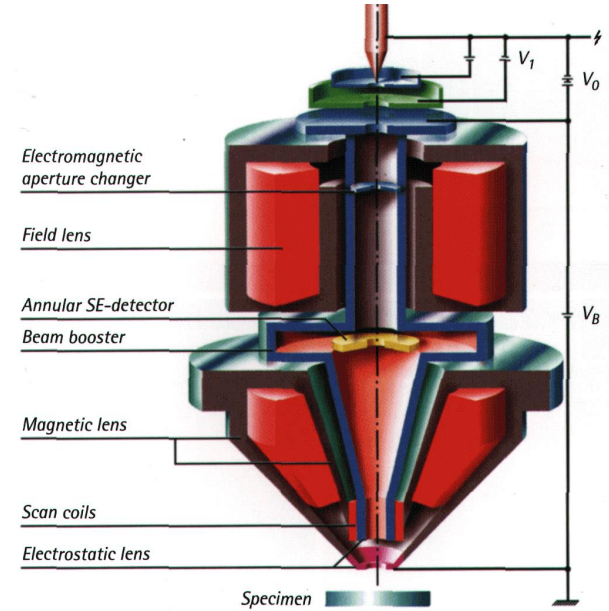
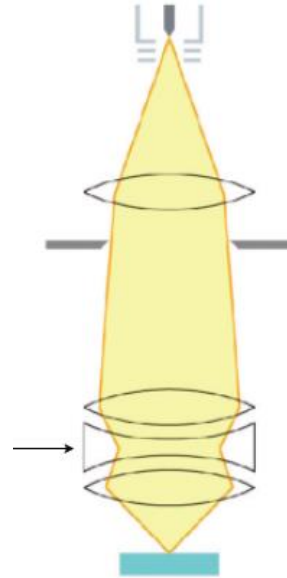
- Chaque type d'aberration induit des limitations
- Pour une résolution optimale, on veut une taille de sonde minimale

Il faut trouver un compromis entre les différentes limitations, selon les conditions d'utilisation



# Lentilles modernes

- Pour éviter la perte de brillance à basse tension, le canon travaille toujours à tension élevée
- Pour amener l'énergie des électrons à la valeur souhaitée par l'opérateur, ceux-ci sont ralentis en sortie de colonne (Leo 1500 Gemini)



Operating principle of the LEO 1500 series with GEMINI column.  
 $V_1$  - extractor voltage at first anode  
 $V_0$  - accelerator voltage at second anode  
 $V_B$  - booster voltage.

Permet de bonnes résolutions à basse énergie!



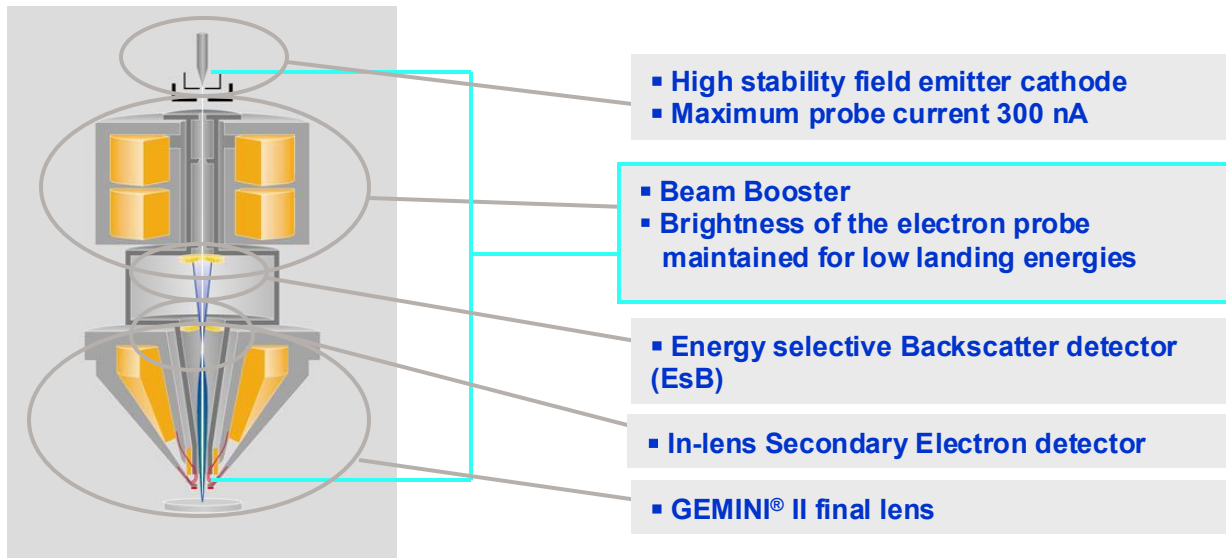
## Gemini® II column

**Low current configuration (Max. probe current 40 nA):**

For high resolution investigations:

- 0.6 nm at 30 kV (STEM mode)
- 0.8 nm at 15 kV at optimal WD
- 1.4 nm at 1 kV at optimal WD
- 2.4 nm at 0.2 kV at optimal WD
- 3.0 nm at 20 kV at 10 nA @ WD = 8,5 mm

Permet de bonnes résolutions à basse énergie!

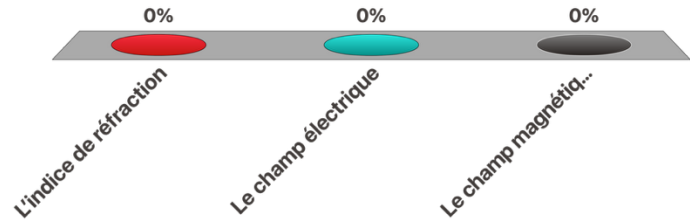


► **GEMINI® II design**  
**Complete detection system**

- Proven GEMINI® final lens design
- New double condenser lens for highest probe current possibilities (300 nA)
- Beam booster technology maintains brightness of all electron probes including low landing energies
- True on-axis in-lens SE and BSE detectors

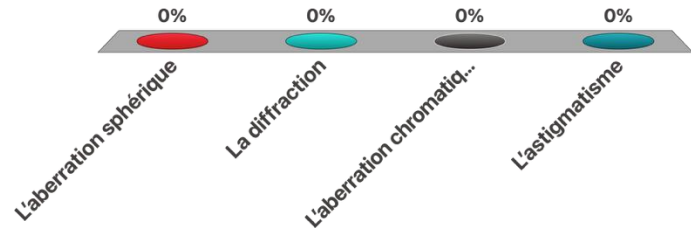
# Qu'est-ce qui permet de focaliser les électrons?

- A. L'indice de réfraction
- B. Le champ électrique
- C. Le champ magnétique



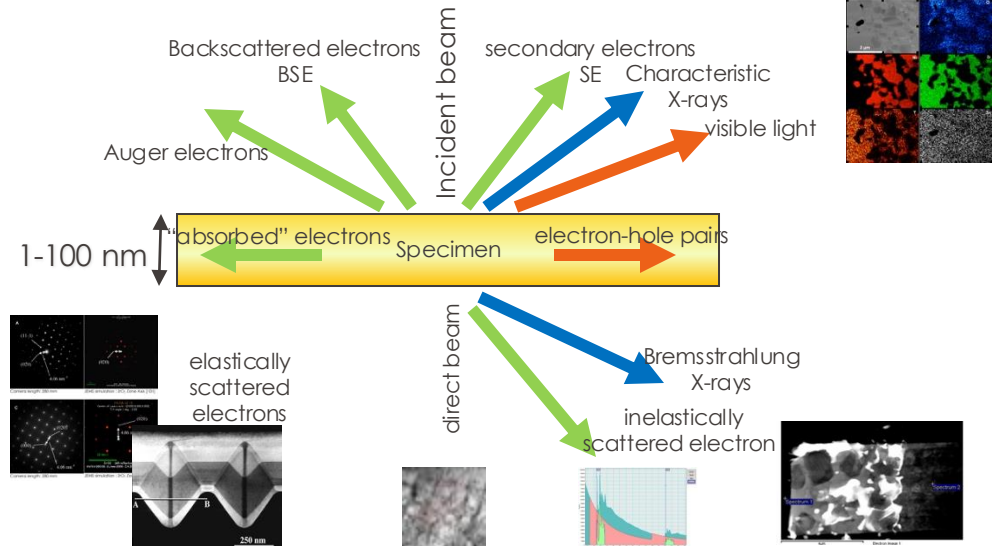
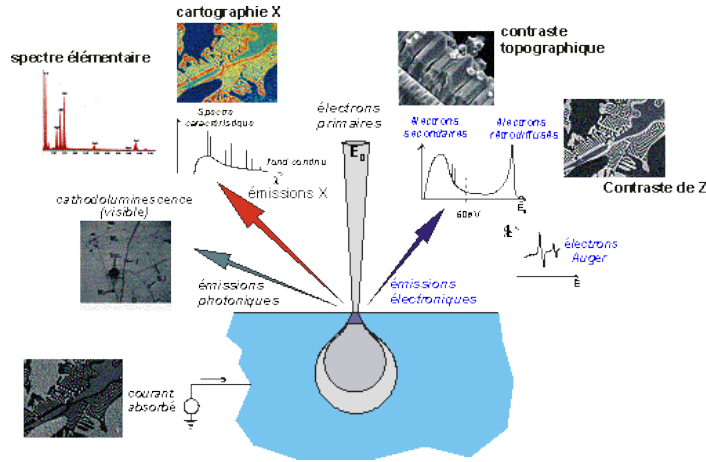
# Quelle aberration peut-on corriger le plus facilement?

- A. L'aberration sphérique
- B. La diffraction
- C. L'aberration chromatique
- D. L'astigmatisme



# Comment voir les électrons? Détecteurs

- Différents types de signaux électroniques

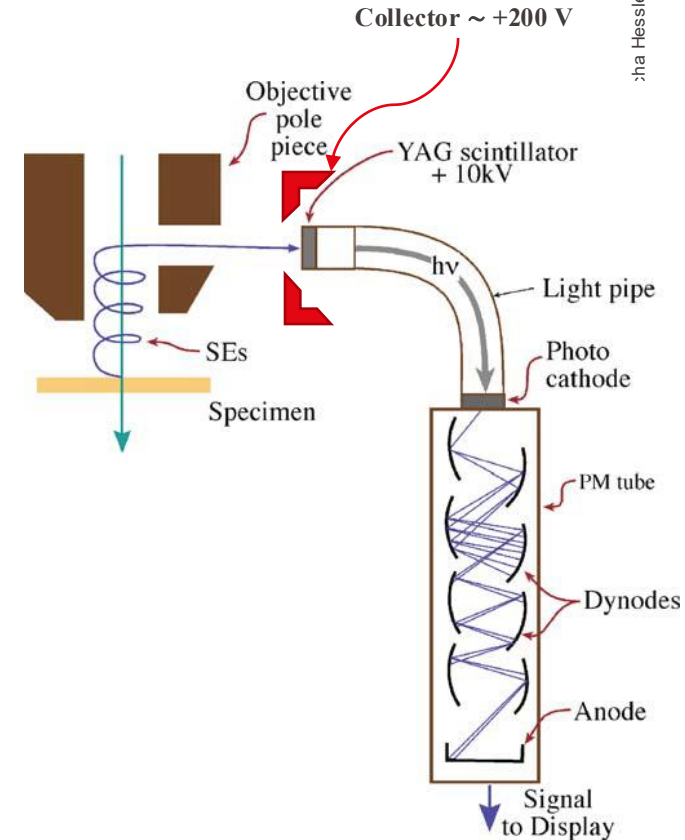


# Comment voir les électrons? Détecteurs

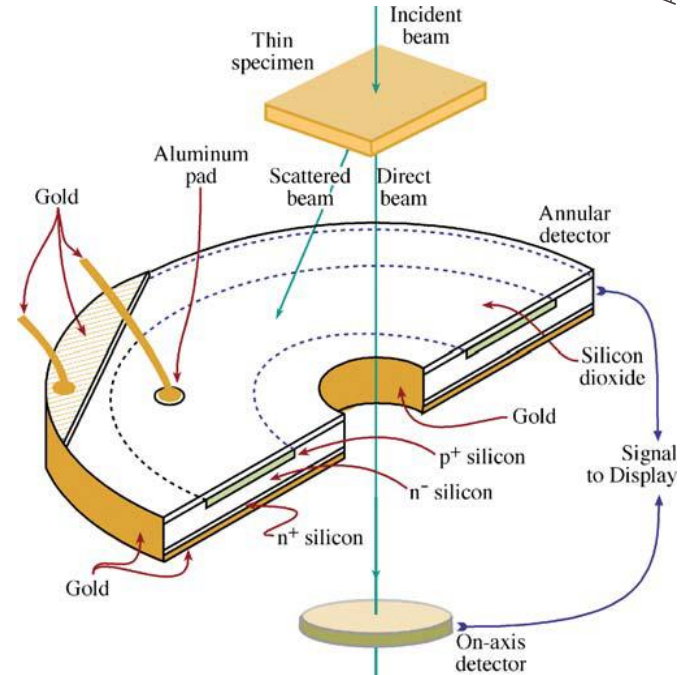
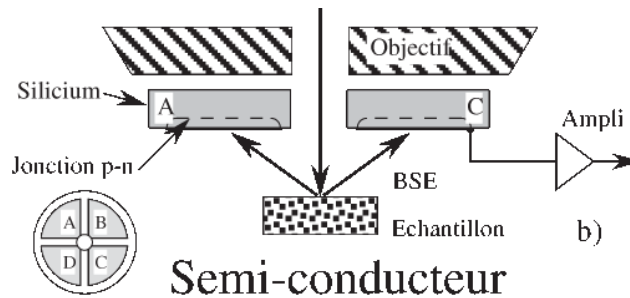
- SEM
  - Détecteur Everhart-Thornley: scintillateur/photomultiplicateur
  - Détecteur d'électrons rétrodiffusés: diode silicium avec une jonction p-n
  
- TEM
  - Ecran phosphorescent
  - Films négatifs
  - Imaging plates
  - Caméra CCD (semiconductor charge-coupled devices)
  - Caméra CMOS (complementary metal-oxide-semiconductor)
  - Caméra à détection directe des électrons
  
- STEM
  - Détecteur disque ou annulaire à semiconducteur
  - Détecteur pixelisé

## ▪ Détecteur Everhart-Thornley

- Composé d'un scintillateur à l'intérieur d'un collecteur (cage de Faraday) et d'un photomultiplicateur (PM) relié au scintillateur.
- La cage de Faraday est mise à un potentiel légèrement positif
- Elle attire les électrons secondaires de faible énergie
- Le scintillateur, à haut potentiel (10 kV) accélère les électrons détectés et émet de la lumière visible lorsque touché par les électrons
- Le signal visible est amplifié dans le PM et envoyé à l'écran pour reconstruire l'image



- Détecteur d'électrons rétrodiffusés (BSE)
  - Composé d'une diode avec une jonction p-n près de la surface de collection
  - Forme annulaire, placé à la sortie de la lentille objectif dans un SEM
  - 3.6 eV pour créer une paire électrons-trous
  - Le nombre de paires é-h génère un courant proportionnel au nombre d'électrons détectés
  - Certains détecteurs sont séparés en 2 ou en 4, permettant une information spatiale



# Comment voir les électrons? Détecteurs (SEM!)

## ▪ Détecteur E-T

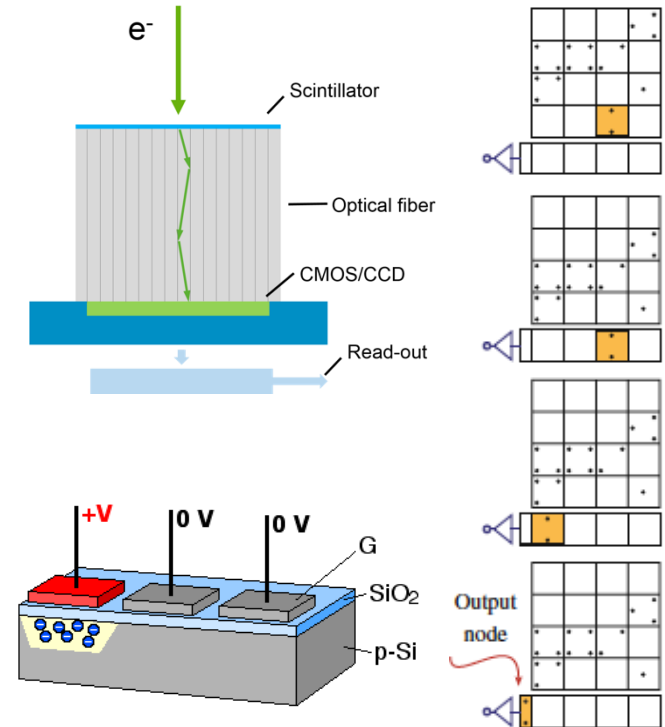
- Rapide avec un rapport signal/bruit (S/N) faible en comparaison au détecteur à silicium
- On peut facilement faire des images avec une faible intensité ou avec un scan très rapide
- Moins robuste que le détecteur à semi-conducteur, sujet aux dégâts d'irradiation en cas d'exposition au faisceau
- Coûteux

## ▪ Détecteur BSE

- Collection et amplification efficace
- Grand angle de collection
- Bon marché et facile à fabriquer
- Diodes coupées en 2 ou 4 permet l'information spatiale
- Lent: ne permet pas de suivre des phénomènes dynamiques rapides

## ▪ Caméra CCD (charge-couple device)

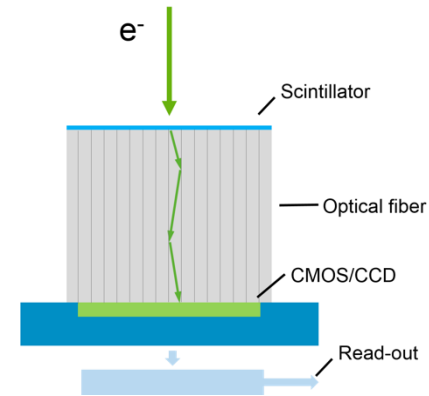
- Les électrons à « voir » sont transformés en lumière par un scintillateur
- Les photons sont amenés sur la CCD par des fibres optiques
- Les capteurs, disposés en matrice, sont en matériau semi-conducteurs et retransforment les photons en paires électrons-trous.
- Les capteurs captent les électrons dans des puits de potentiel
- Le nombre d'électrons collectés est proportionnel au signal collecté
- Les charges sont transférées de photosite en photosite jusqu'à la sortie, et lues par un transistor
- Les matrices sont constituées de plusieurs millions de pixels qui sont isolés les uns des autres, et de taille  $\approx 10 \mu\text{m}$
- Le processus de lecture est lent
- Mais la gamme dynamique est très bonne



# Comment voir les électrons? Détecteurs

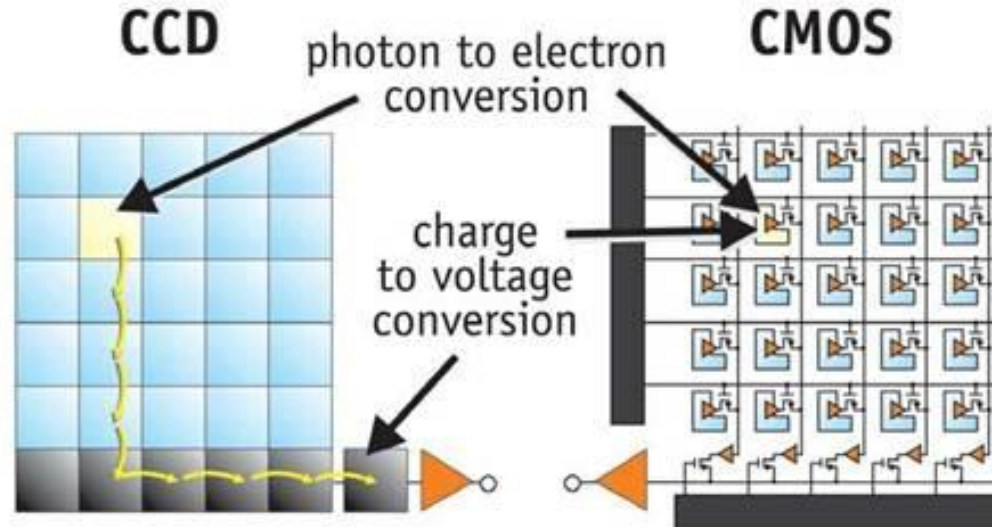
## ■ Caméra CMOS (Complementary metal-oxide-semiconductor)

- Les électrons à « voir » sont transformés en lumière par un scintillateur
- Les photons sont amenés sur la CMOS par des fibres optiques
- Les capteurs, disposés en matrice, sont en matériau semi-conducteurs et retransforment les photons en paires électrons-trous.
- Le nombre d'électrons collectés est proportionnel au signal collecté
- La lecture du signal se fait directement pour chaque pixel
- Chaque pixel a un amplificateur
- Les matrices sont constituées de plusieurs millions de pixels qui sont isolés les uns des autres, et de taille  $\approx 10\mu\text{m}$
- Le processus de lecture est très rapide
- Mais la gamme dynamique est mauvaise



# Comment voir les électrons? Détecteurs

- Caméra CCD
  - Bonne gamme dynamique
  - Lent
  - Haute sensibilité
- Caméra CMOS
  - Gamme dynamique moyenne
  - Très rapide
  - Moins sensible



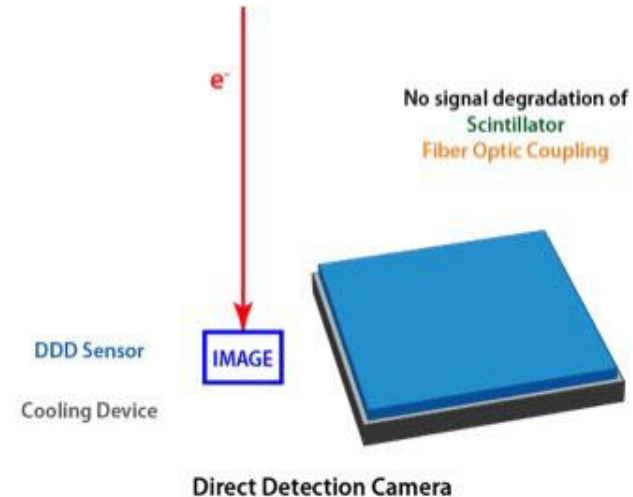
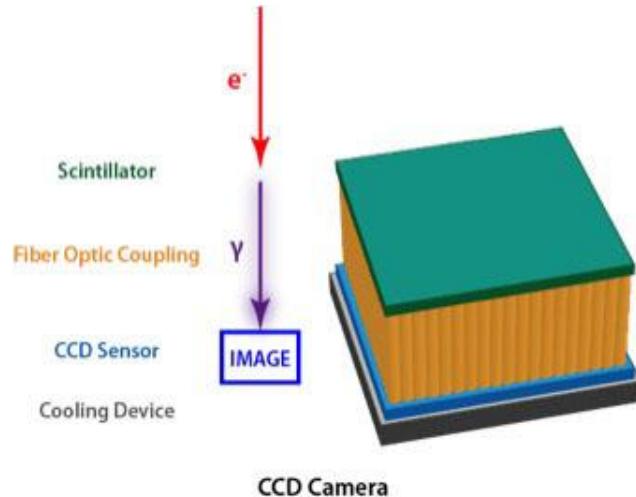
# Comment voir les électrons? Détecteurs (TEM)

## ▪ Caméra CCD/CMOS

- Conversion électrons/lumière/électrons
- Lente
- Gamme dynamique moyenne à élevée
- Chère

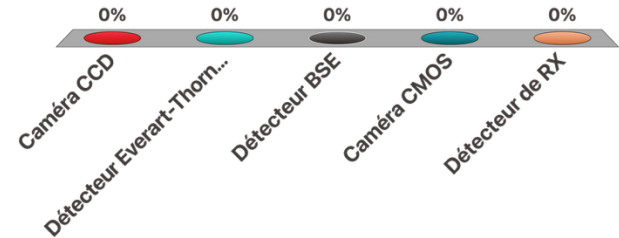
## ▪ Caméra à détection directe

- Détection directe d'électrons isolés
- Extrêmement sensible
- Très rapide
- Gamme dynamique faible
- Sensible aux trop fortes intensités (dégâts d'irradiation)
- Très très chère

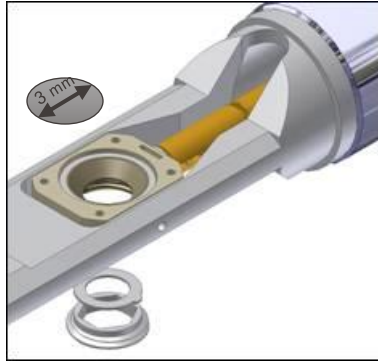


# Quels sont les détecteurs que l'on trouve dans un SEM?

- A. Caméra CCD
- B. Détecteur Everart-Thornley
- C. Détecteur BSE
- D. Caméra CMOS
- E. Détecteur de RX



# Porte-échantillons pour TEM

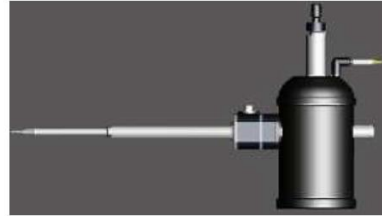


Specimen should be electron transparent:  
several nanometers thick



Double tilt

Simple tilt



Helium cooling Holder

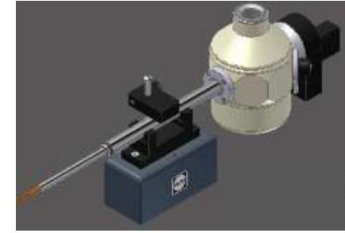


Heating Holder

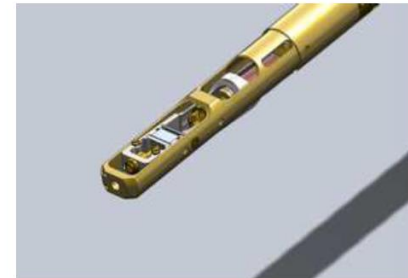
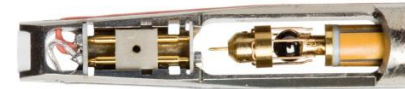


Straining Holder

Straining cooling holder as an example



New in-situ holders:  
- indentation  
- STM  
- ...



# Porte-échantillons pour TEM

## Stimuli

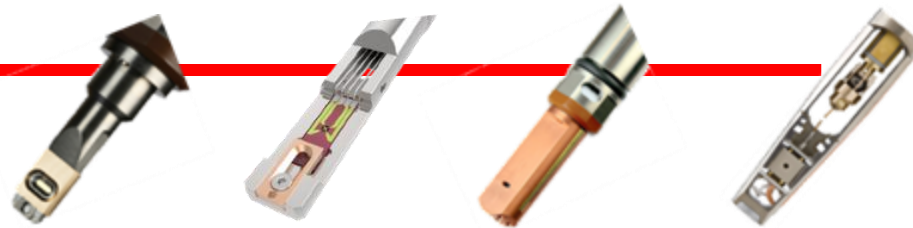
- gaz
- liquide
- température
- champ magnétique
- courant/tension
- charge mécanique
- lumière
- ...

## Possible techniques

- imagerie (S)TEM
- diffraction
- electron energy-loss spectroscopy
- energy-filtered TEM
- energy-dispersive X-ray spectroscopy
- microscopie de Lorentz
- holographie
- ...

## Information

- microstructure
- cristallographie
- chimie
- diffusion/migration
- propriétés optiques
- champ électrique
- champ magnétique
- ...



Different dedicated holders

# Ce qu'il faut retenir...

- Quels composants dans quel microscope?
- Comment fonctionne chaque composant et quelles sont ses propriétés et ordres de grandeur importants? (canon, lentille, diaphragmes, détecteur, système de vide)
- Les aberrations
- Les détecteurs (ET, BSE, CCD)

