

ECOLE D'ETE GN-MEBA

Microscopie Electronique à Balayage et Microanalyses

LES CANONS A ELECTRONS

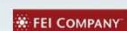
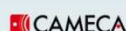
Jacky RUSTE

Organisation :



GEOSYSTEMES

Supports techniques :



SYNERGIE⁴



Autres supports :



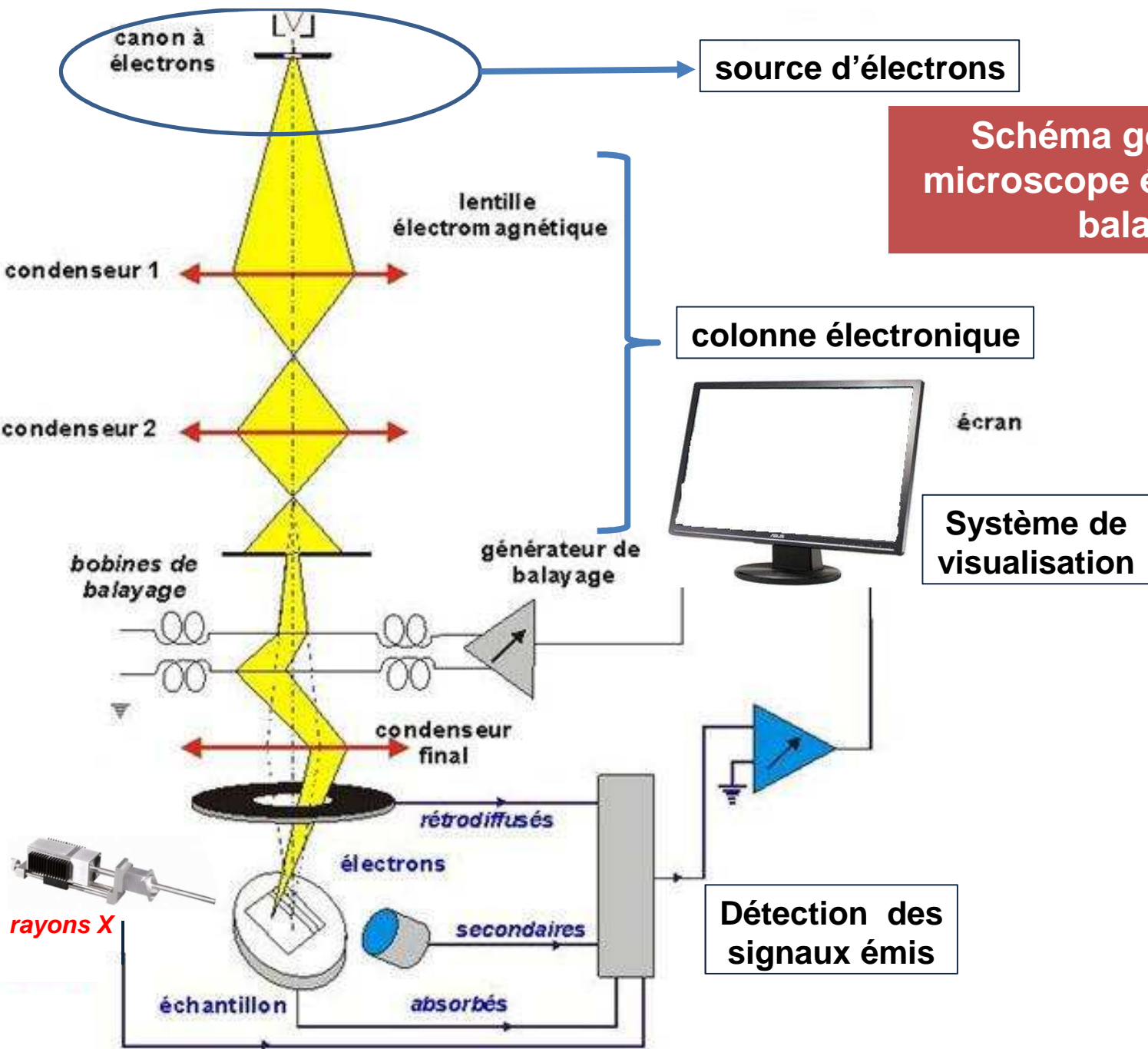
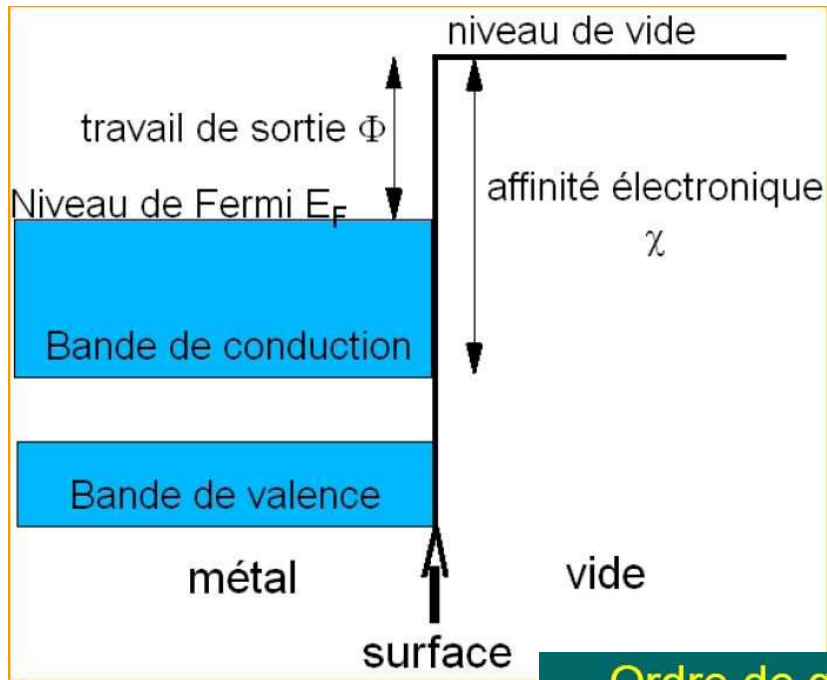


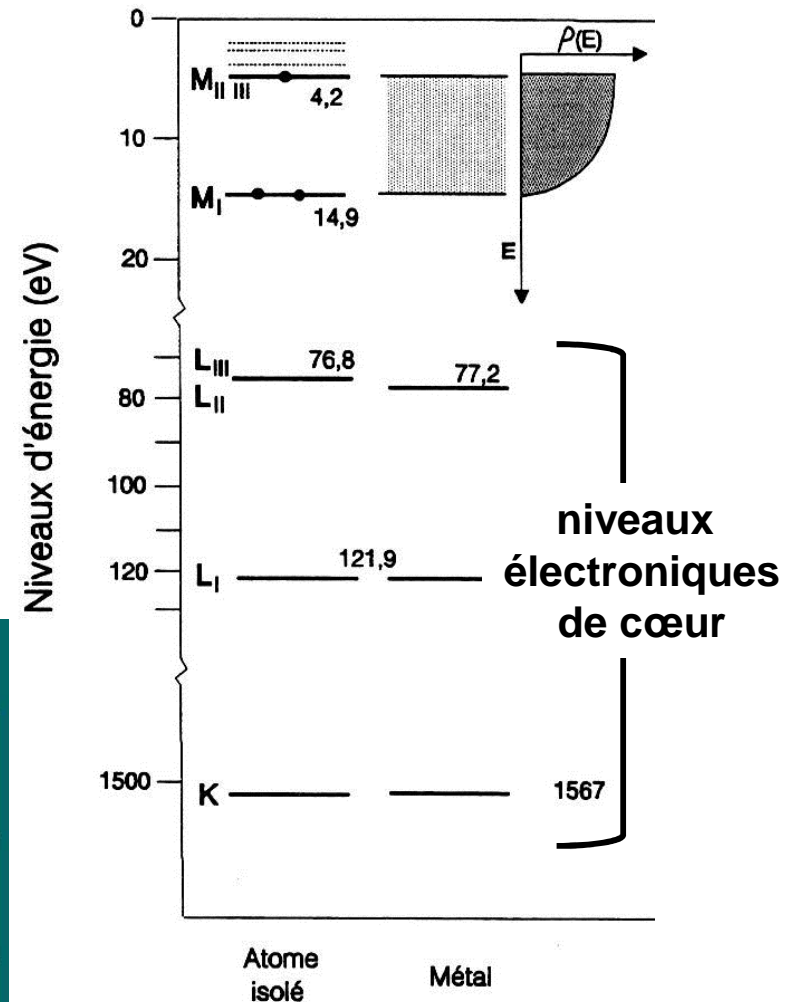
Schéma général d'un microscope électronique à balayage

Rappels : la structure électronique d'un métal



Ordre de grandeur:

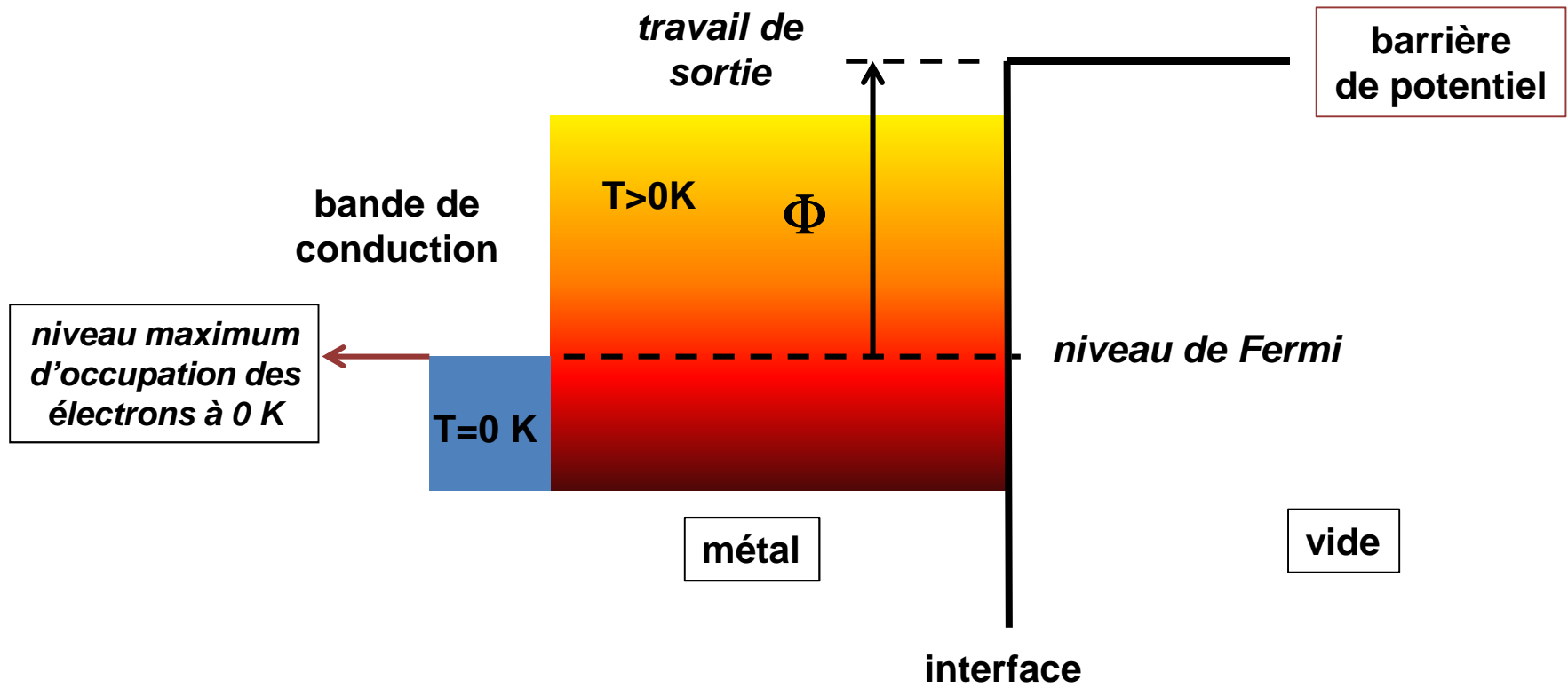
	E_F (eV)	Φ (eV)	χ (eV)
Ta	5,29	4,0 / 4,8	9,3 / 10,1
W	5,78	4,2 / 5,2	10 / 11



Structure électronique de l'aluminium

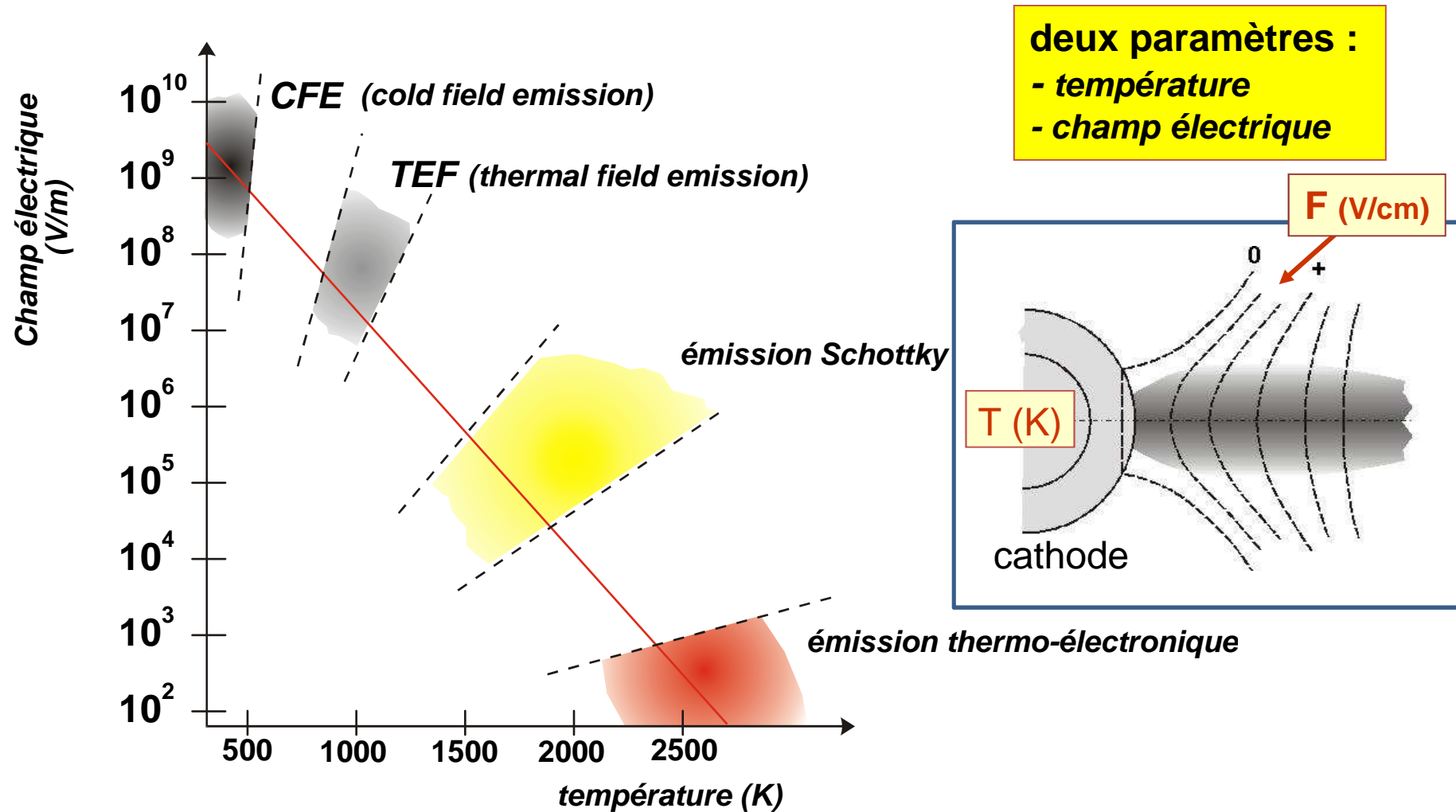
Les sources d'électrons (« canons »)

La structure électronique d'une interface métal-vide



Comment extraire des électrons du métal (en leur faisant franchir la barrière de potentiel) et leur communiquer une certaine énergie ?

Pour extraire un faisceau d'électrons d'une surface métallique (« cathode ») :



Les différents domaines d'émission électronique (en fonction de la température et du champ électrique)

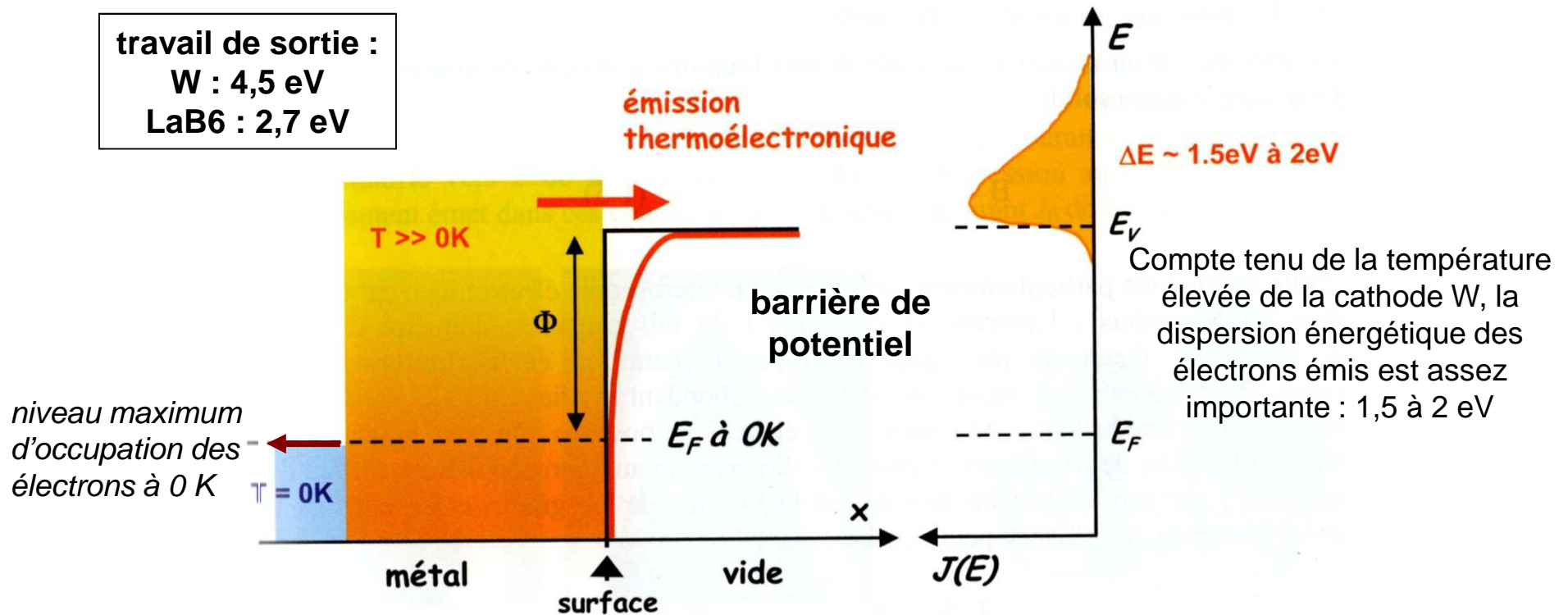
I - Émission thermoélectronique : filament de W ou cathode LaB_6

Porter la cathode à très haute température (1500 à 2500 K) pour donner aux électrons de la bande de conduction assez d'énergie pour franchir la barrière de potentiel. Un champ électrique appliquée entre la cathode et une anode permet leur extraction.

travail de sortie :

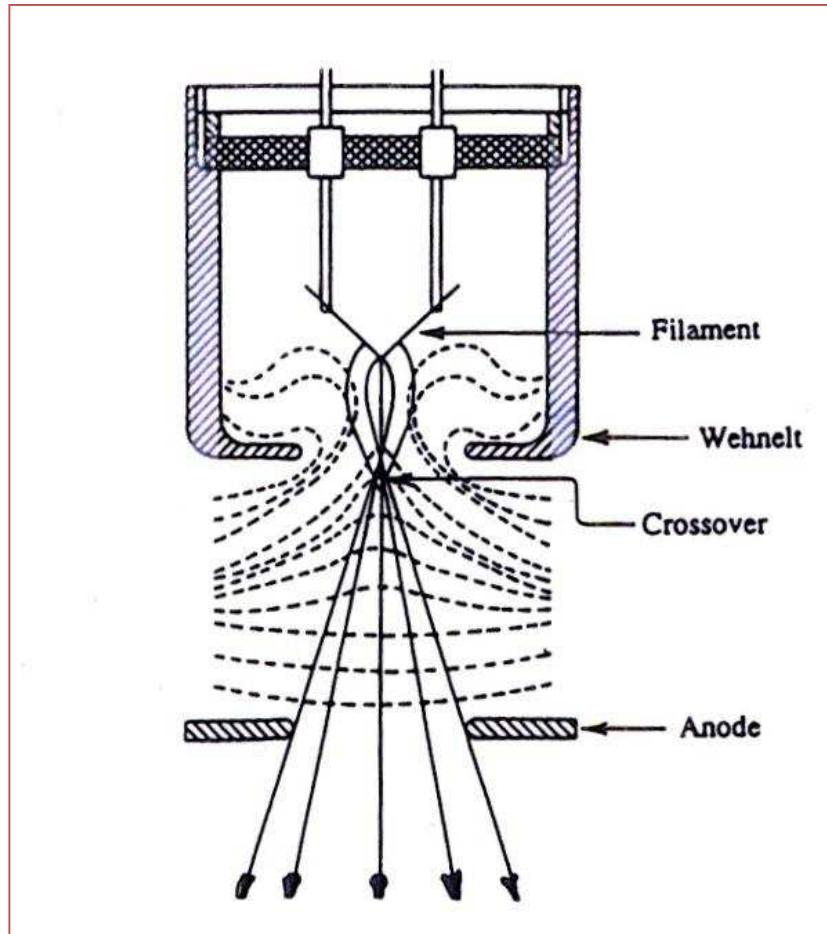
W : 4,5 eV

LaB6 : 2,7 eV

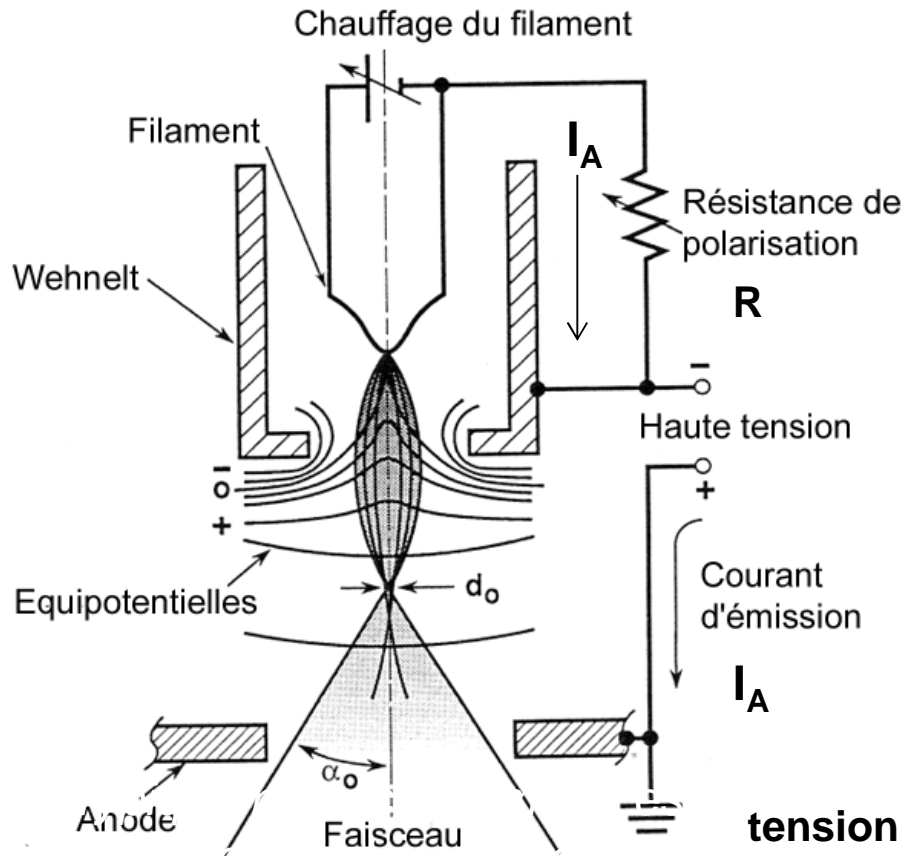


Principe du canon à émission thermoélectronique

canon à résistance d'autopolarisation

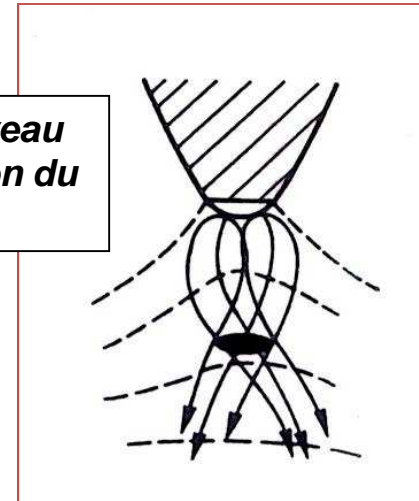


- La source d'électron est constituée par un fil de W (filament),
- Ce filament est polarisée négativement (cathode)(~« tension d'accélération »)
- L'anode est polarisée positivement (à la masse)
- Entre les 2, on intercale une électrode (« wehnelt ») polarisée plus négativement que la cathode (par la chute ohmique dans une résistance de polarisation).



Le but du wehnelt est de focaliser le faisceau électronique pour réduire l'angle d'émission et obtenir une source apparente de petit diamètre d_0 (« cross-over »).

zone émissive au niveau de la pointe ; apparition du cross-over

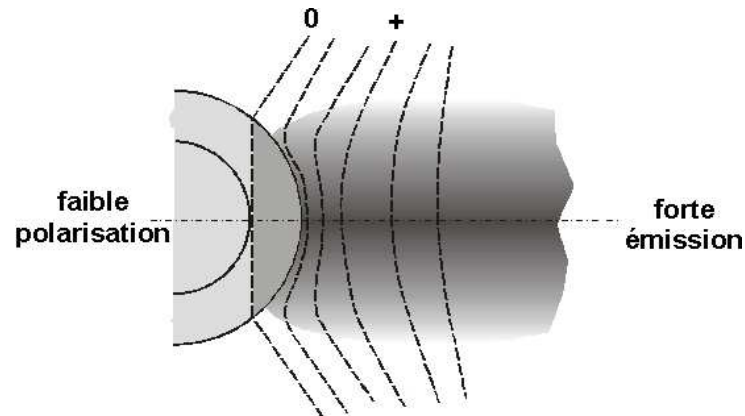


tension du wehnelt : V_0

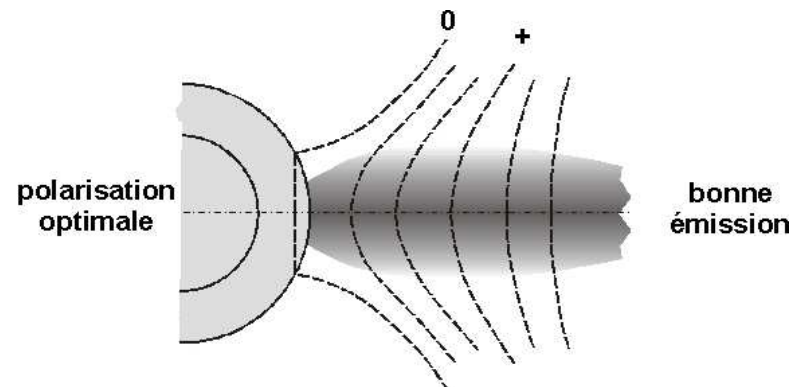
chute de tension dans la résistance : $V_W = RI_A$

tension appliquée à la cathode : $V_K = V_0 - V_W = V_0 - RI_A$

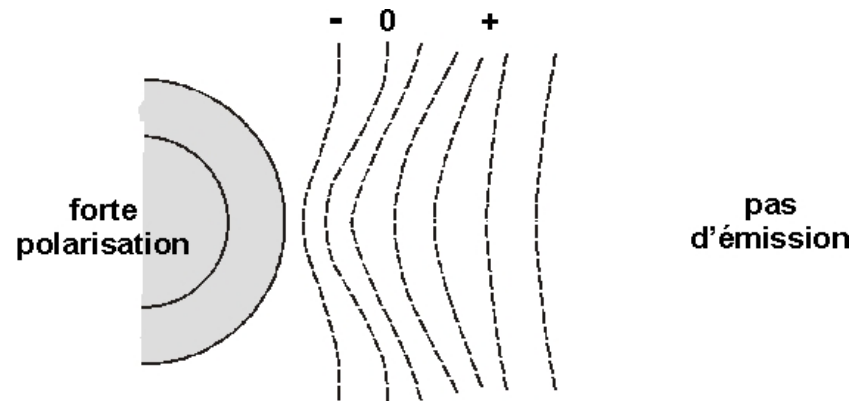
la différence de potentiel entre le wehnelt et la cathode est fonction du courant électronique (ou d'anode)

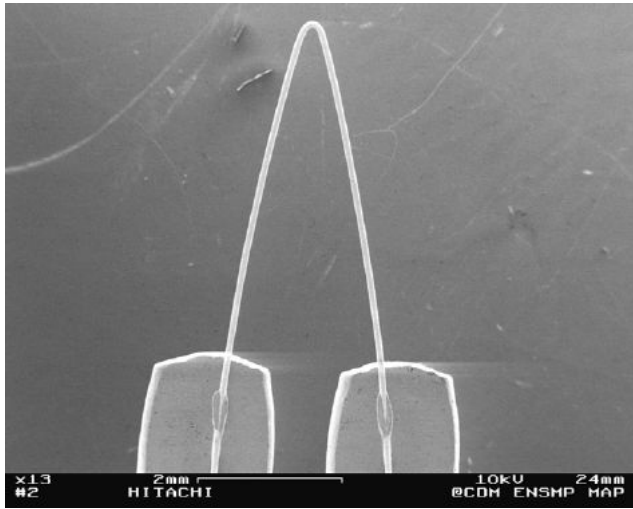


**Influence de la polarisation
du wehnelt sur l'intensité
d'émission et le diamètre du
cross-over...**

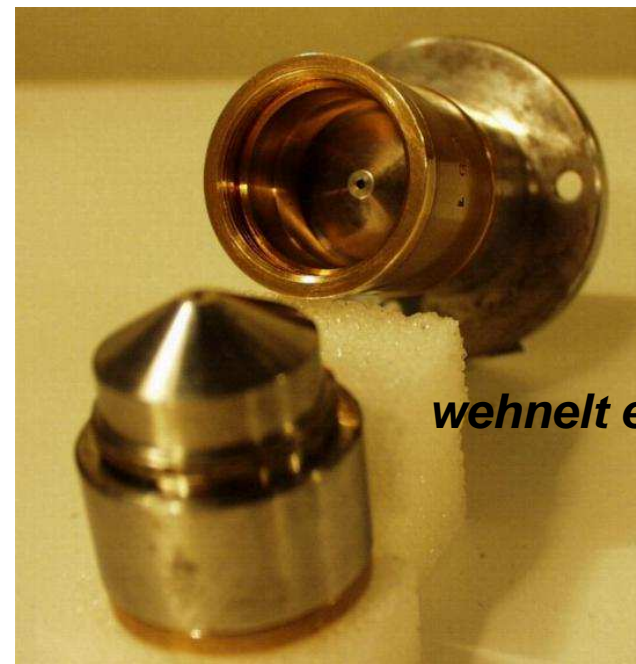
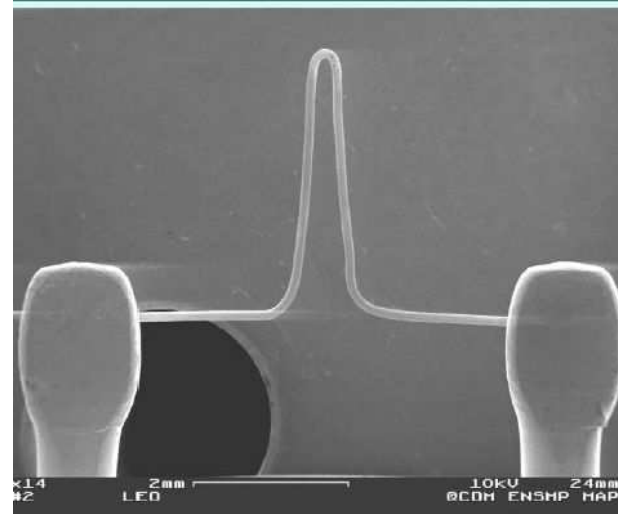


**Le wehnelt agit comme une porte
qui laisse plus ou moins passer
les électrons...
Comme la grille des anciens tubes
électroniques, d'où le nom de
« canon de type triode »**



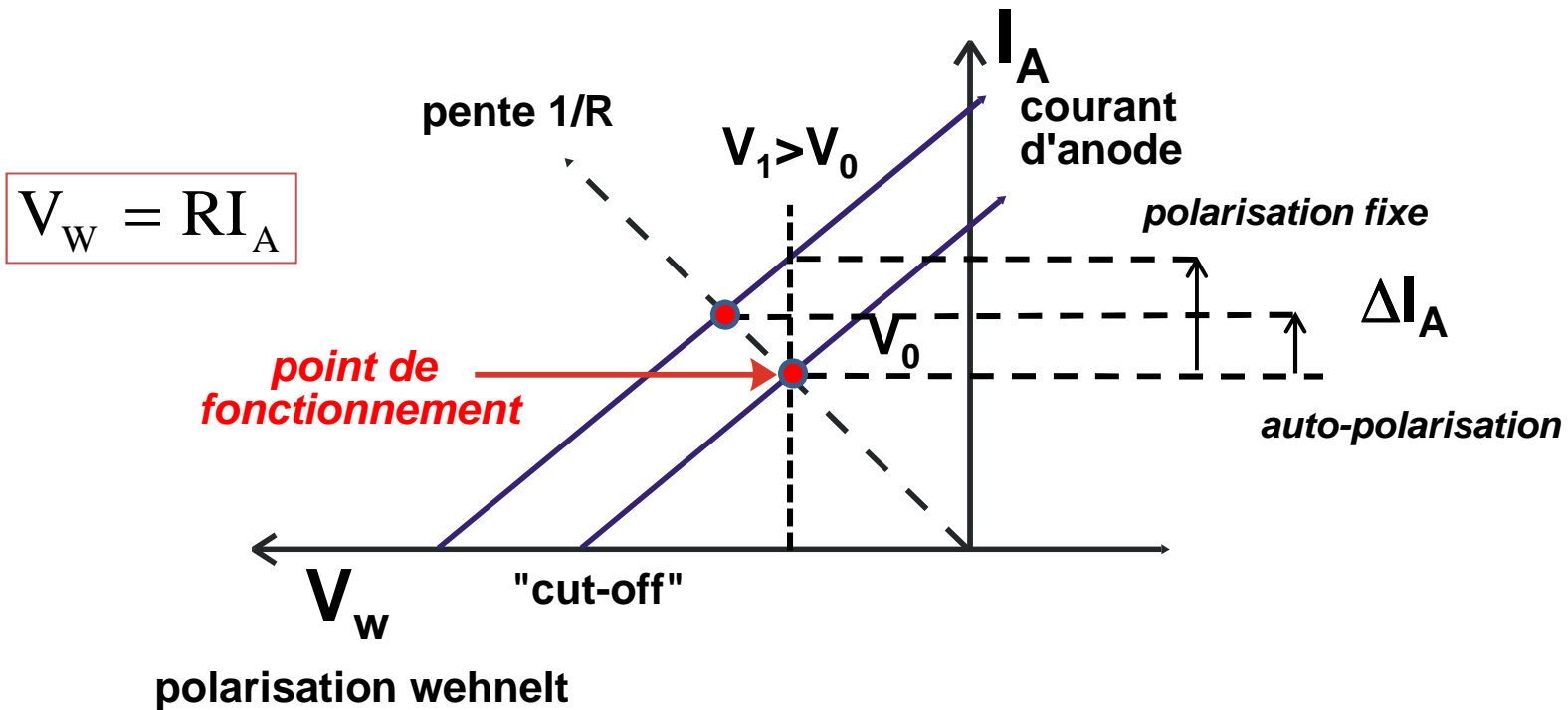


exemples de filament en W



wehnel et anode

Intérêt du canon à wehnelt auto polarisé

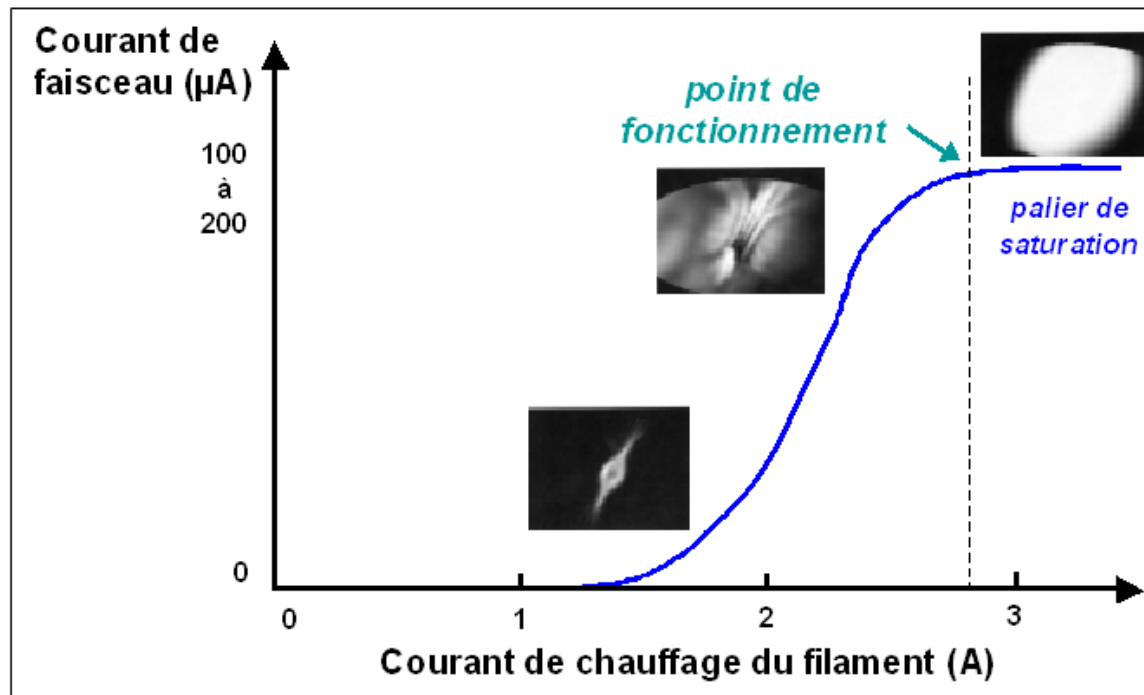


Courbe caractéristique du canon triode :

- variation du courant d'anode en fonction de la polarisation du wehnelt
- point de fonctionnement en mode « auto-polarisé »
(*polarisation automatique du wehnelt par chute ohmique aux bornes de la résistance R d'autopolarisation*)

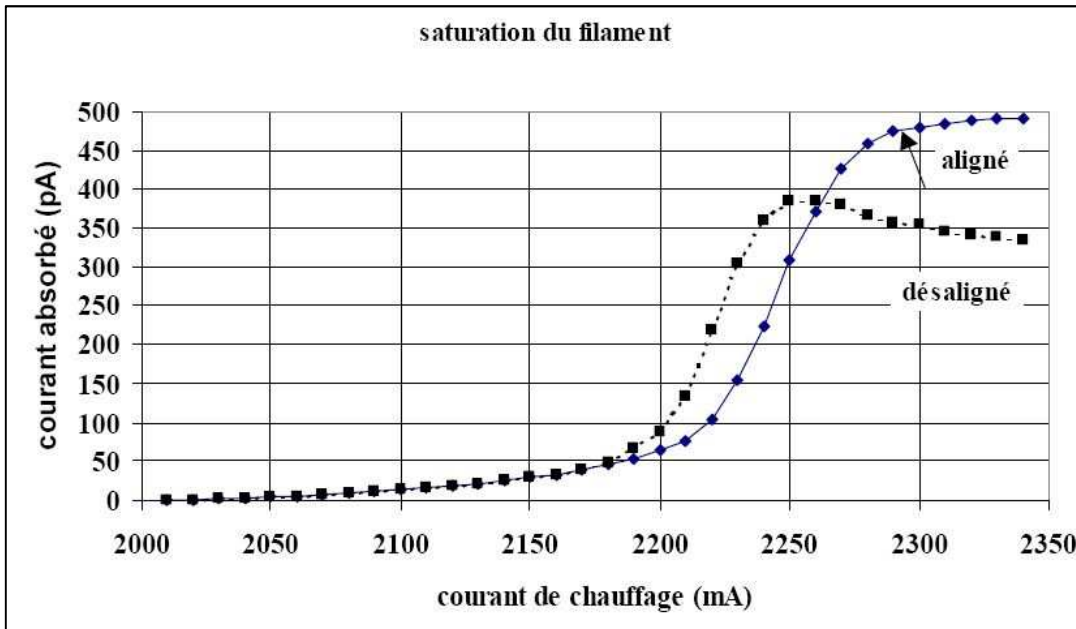
⇒ meilleure stabilité d'émission

Caractéristique du canon à auto-polarisation : le palier de saturation



La polarisation du wehnelt augmentant avec l'intensité électronique, on va tendre vers un équilibre : le palier de saturation qui détermine le point de fonctionnement du canon.

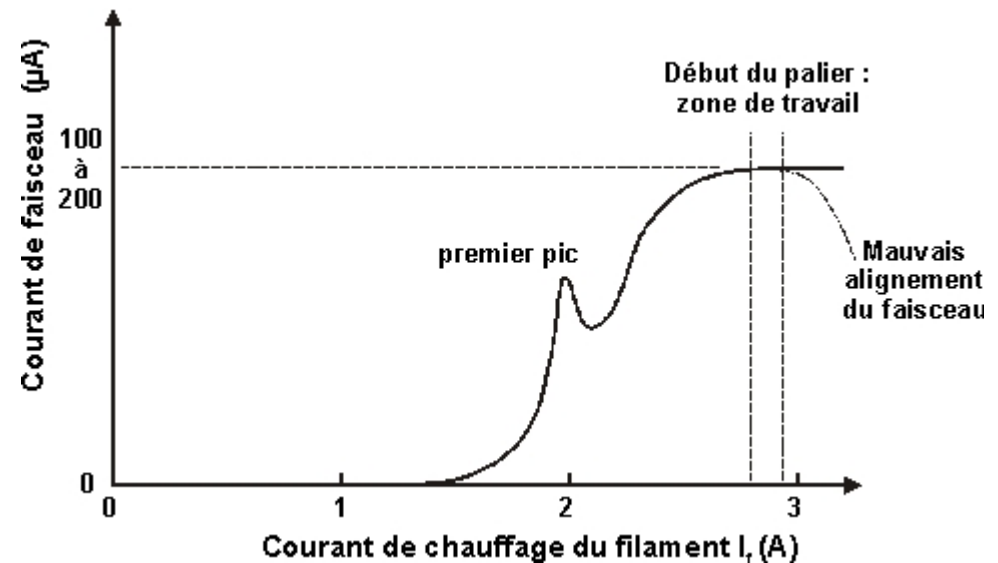
- en deçà du palier : risques d'instabilité et moins bonne performances
- au-delà du début du palier, pas d'augmentation de l'émission mais durée de vie abrégée...

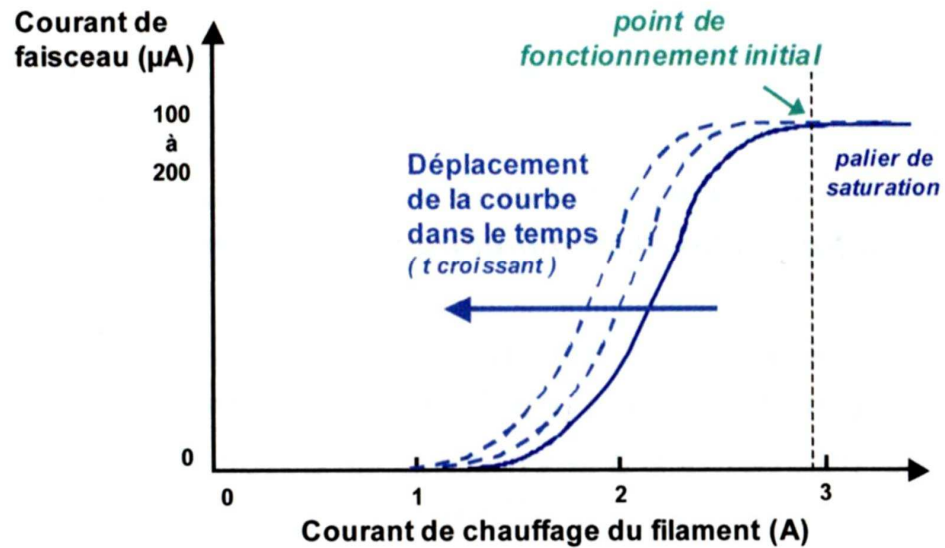


Le centrage du filament par rapport au wehnelt est primordial

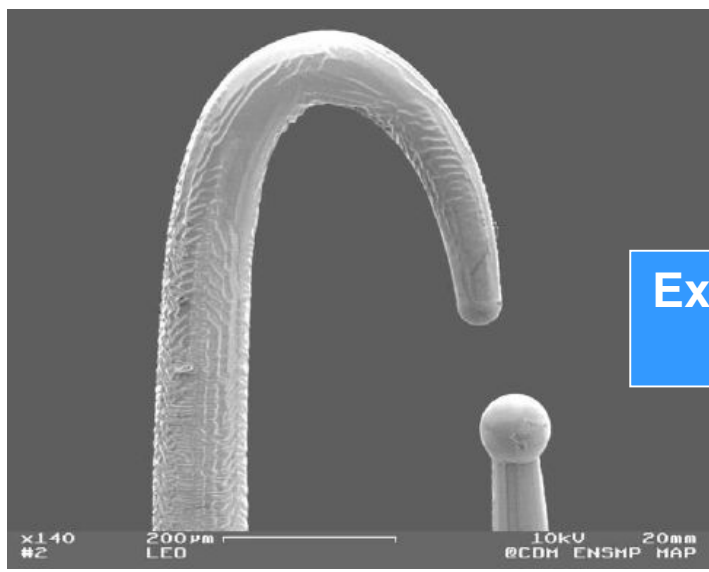
Pour certaine géométrie de canon il apparait un « 1^{er} pic » d'émission :

Même si l'émission peut être supérieure à celle du palier, ne jamais utiliser ce réglage car émission très diffuse et peu focalisée....

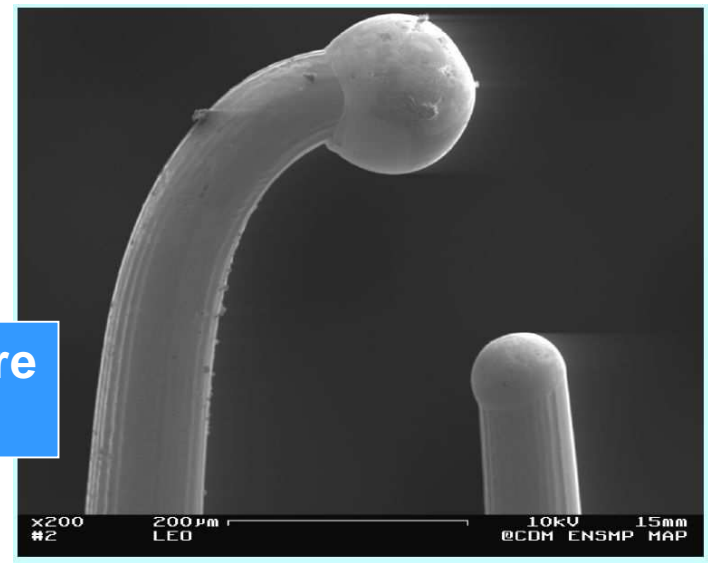




Au cours de la vie du filament, le palier de saturation se déplace vers des intensités de chauffage plus faibles, nécessitant un réajustement régulier (sous peine de rupture prématurée).



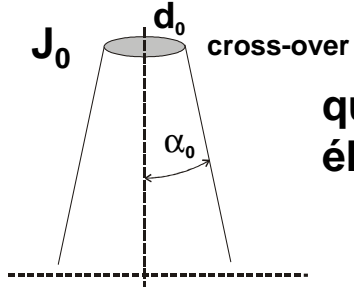
Exemples de rupture de filament



Grandeurs caractéristiques d'un canon à émission thermo-ionique

densité de courant d'émission : $J_0 = \frac{A}{T} \frac{e}{x} \left[-\frac{\Phi - \Delta\Phi}{k} \right]$ A/cm²

(Loi de Dushman-Richardson)

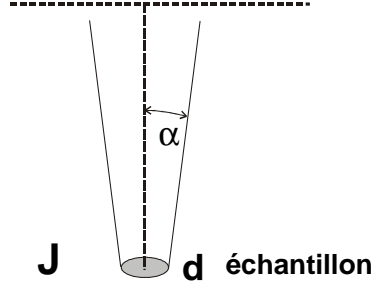


qui peut aussi s'exprimer en fonction de l'intensité électronique et le diamètre du cross-over :

$$J_0 = \frac{4I_0}{\pi d_0^2}$$

Densité angulaire : $J_\Omega = \frac{I_0}{\Omega}$ A/sr

Une caractéristique essentielle du canon : la brillance



$$B = \frac{J_0}{\Omega} = \frac{4I_0}{\pi d_0^2 \Omega} = \frac{4I_0}{\pi^2 \alpha_0^2 d_0^2}$$
 A/cm²/sr

$$\Omega = 2\pi(1 - \cos \alpha_0) = \pi \alpha_0^2$$

La densité d'émission au niveau de la sonde peut être calculée par rapport à la densité d'émission du canon par la loi de Langmuir :

$$J = J_0 \frac{eV}{kT} \alpha^2$$

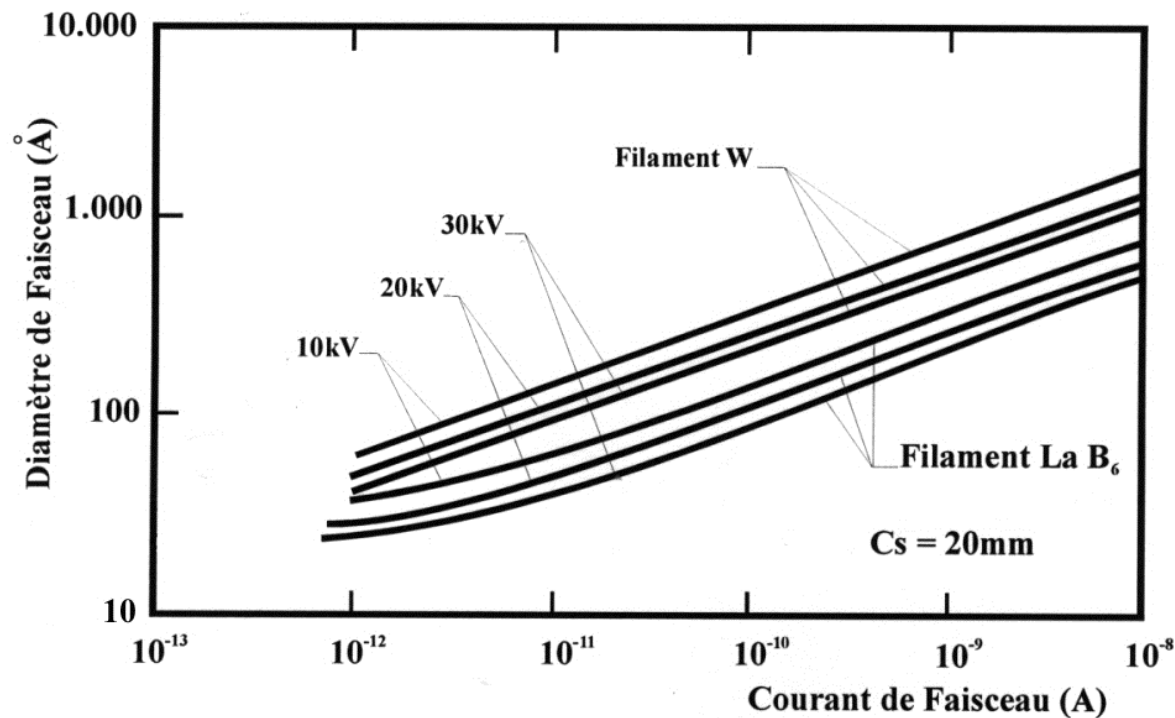
D'où la brillance au niveau de la sonde :

$$B = \frac{J_0 eV}{\pi kT} = C^{te} VT \exp\left[-\frac{\Phi - \Delta\Phi}{kT}\right]$$

Conséquences pratiques :

a) La brillance croît avec la tension d'accélération, la température et décroît avec la valeur du travail de sortie,

b) le diamètre de la sonde et l'intensité électronique sont liés par la brillance :
à courant identique, plus la brillance sera élevée, plus la tension sera élevée et moins le diamètre de sonde sera important...



pour augmenter la brillance :

augmenter
la tension V

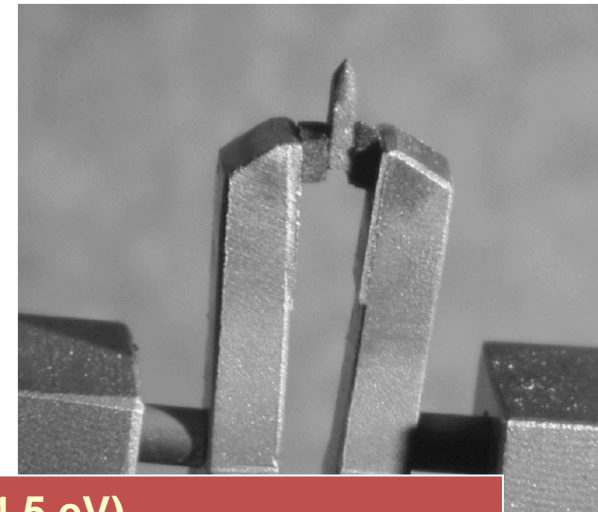
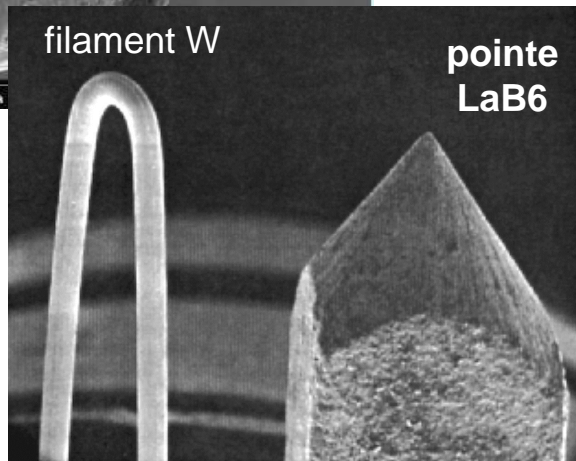
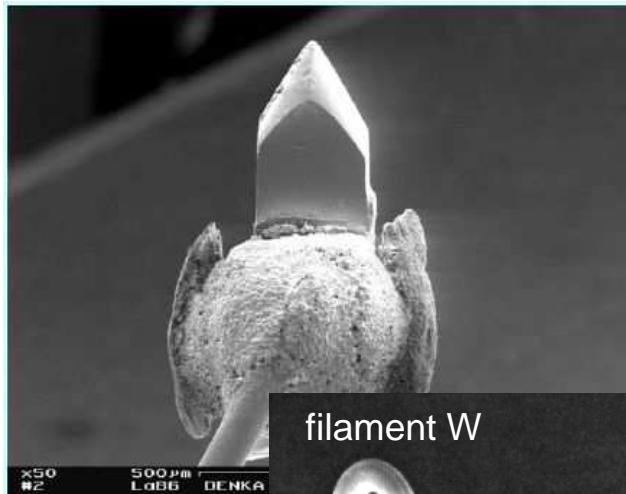
augmente la pénétration
électronique

augmenter
la température

abrège la durée de vie
du filament

diminuer le travail de sortie

changement de matériau
(remplacement du W
par une pointe LaB_6
ou CeB_6)



Φ : 2,7 eV (W : 4,5 eV)
T : 1900 K (W : 2700 K)
Cross-over : 10 μm (W : 30 μm)
rayon : 1 à 5 μm (champ : 10^5 V.cm^{-1})
 J_0 : 30 A.cm^{-2} (W : 3 A.cm^{-2})
B : $10^6 \text{ A.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$ (W : 10^5)
durée de vie : 1000 h (W : 100 h)

Complément : Deux grandeurs géométriques ont leur importance :

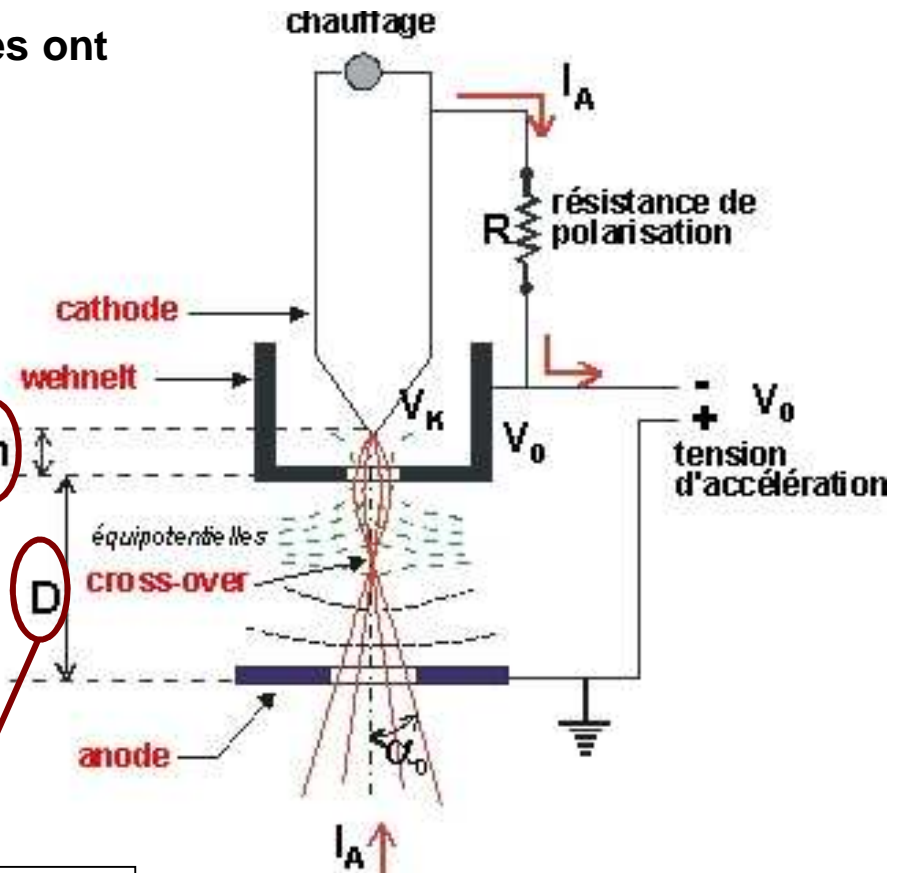
1 - La distance h « cathode-wehnelt »

La distance préconisée par le constructeur permet un bon compromis entre « brillance » et « durée de vie ».

- En la diminuant, on peut augmenter la brillance mais au détriment de la durée de vie...

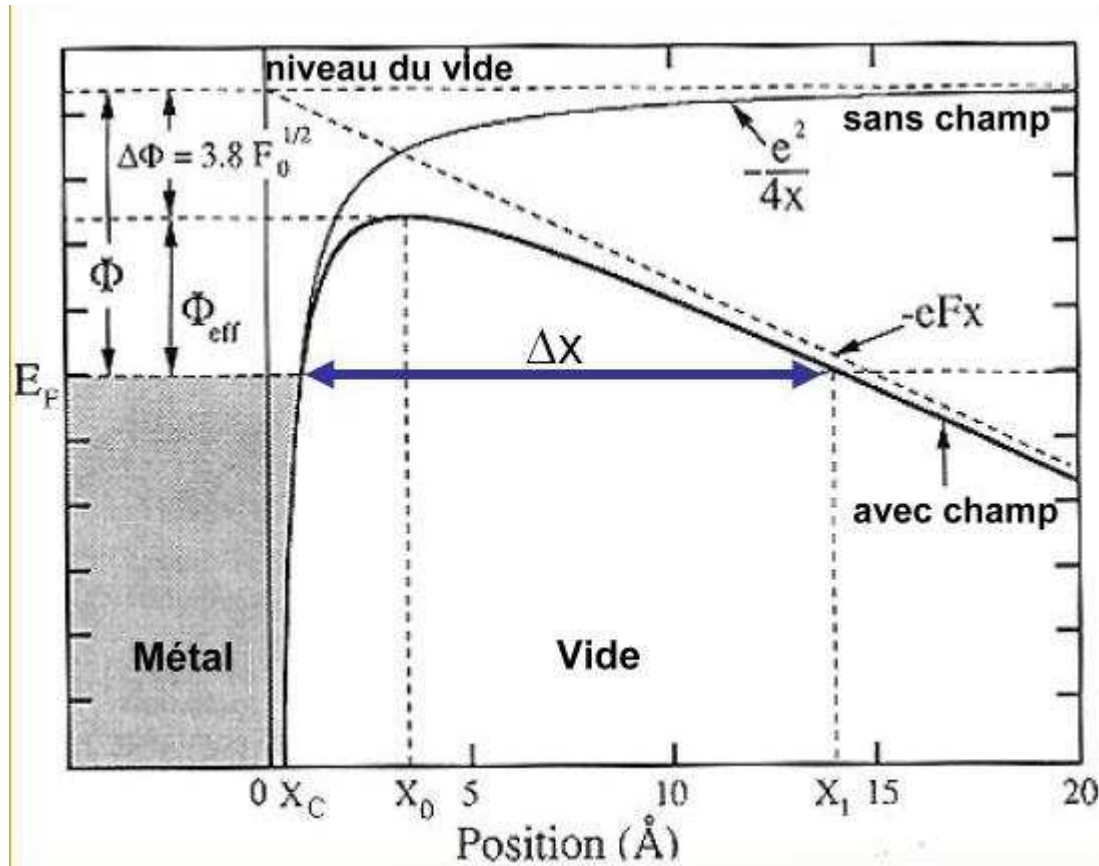
- En l'augmentant, on augmentera la durée de vie mais cette fois au détriment de la brillance (utile par exemple en microanalyse)

2 - La distance D « anode-wehnelt »



Devrait pouvoir être adaptée en fonction de la tension d'accélération pour conserver une charge d'espace constante (important surtout à basse tension)
Malheureusement, très rarement ajustable !

**Autre solution pour améliorer la brillance :
abaissement du travail de sortie par application
d'un champ électrique important**



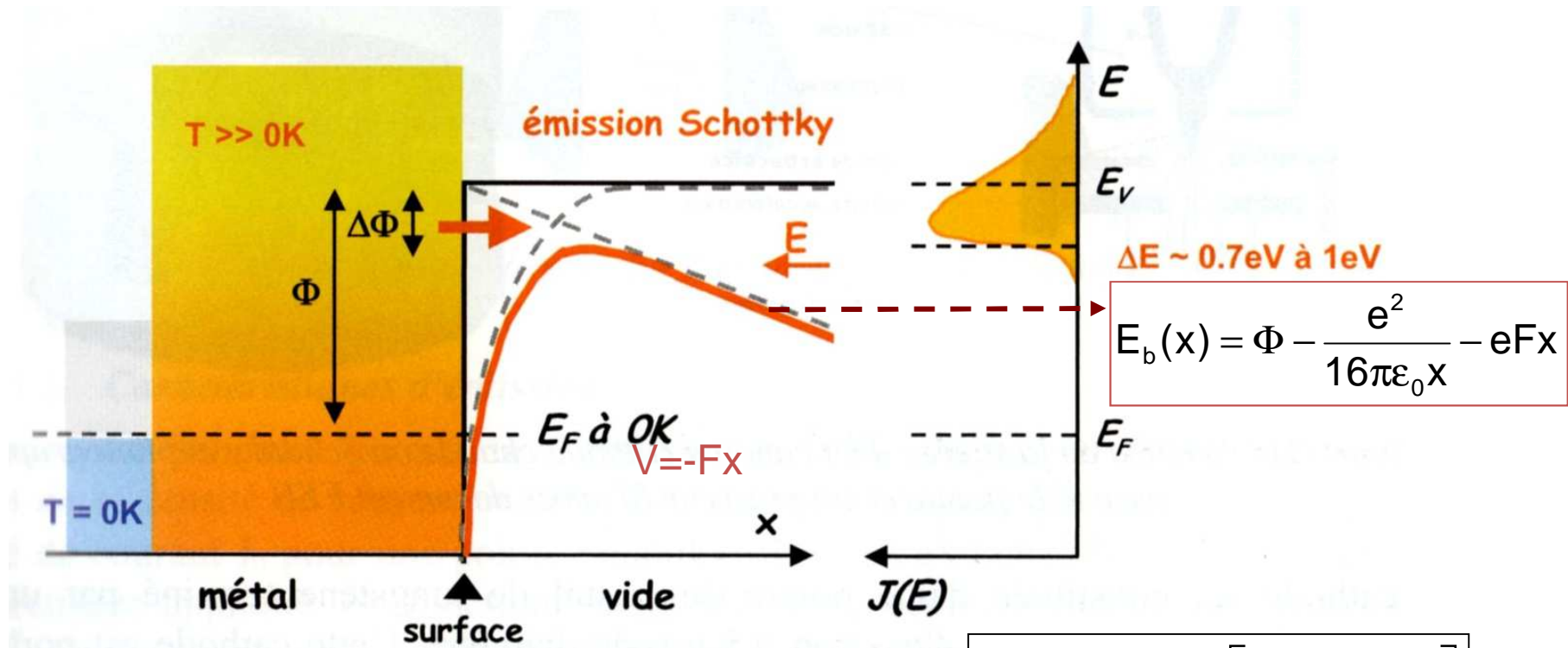
$$\Delta\phi = 3,8 \cdot 10^{-4} \sqrt{F}$$

$\Delta\phi$ en eV, F en V/cm

F (V/cm)	10 ⁵	10 ⁶	10 ⁷	3x10 ⁷	10 ⁸
F (V/Å)	0.001	0.01	0.1	0.3	1
x ₀ (Å)	60	20	7	3.5	2
Δx (Å)	4500	450	45	15	4.5
ΔΦ (eV)	0.12	0.38	1.2	2.1	3.8

2 - Émission par effet Schottky

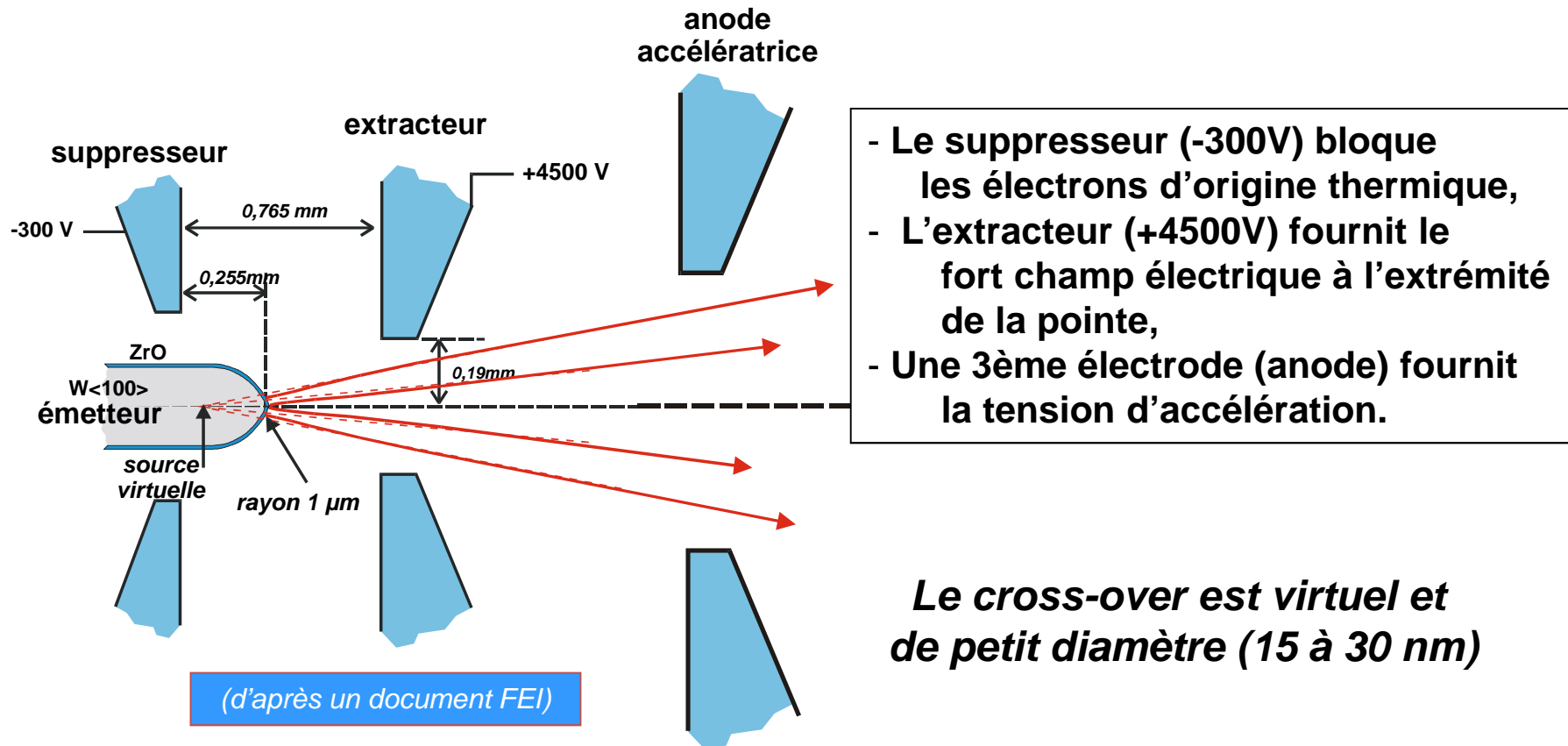
Extraction par effet thermoélectrique amplifié par une diminution $\Delta\Phi$ du travail de sortie par un fort champ électrique



pointe W revêtue d'un film de ZrO liquide (par capillarité) :
 - faible travail de sortie (2,7 eV)
 - fort champ électrique ($\Delta\Phi$ important)

$$J_0 = \frac{A}{T} \frac{e^2}{x} \left[-\frac{\Phi - \Delta\Phi}{k} \right]$$

Brillance : 10^7 à $5 \cdot 10^8 \text{ A.cm}^{-2}.\text{sr}^{-1}$

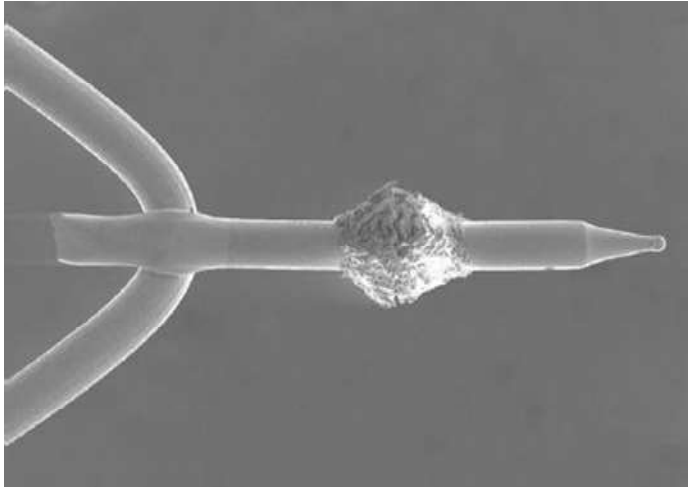


Réglages :

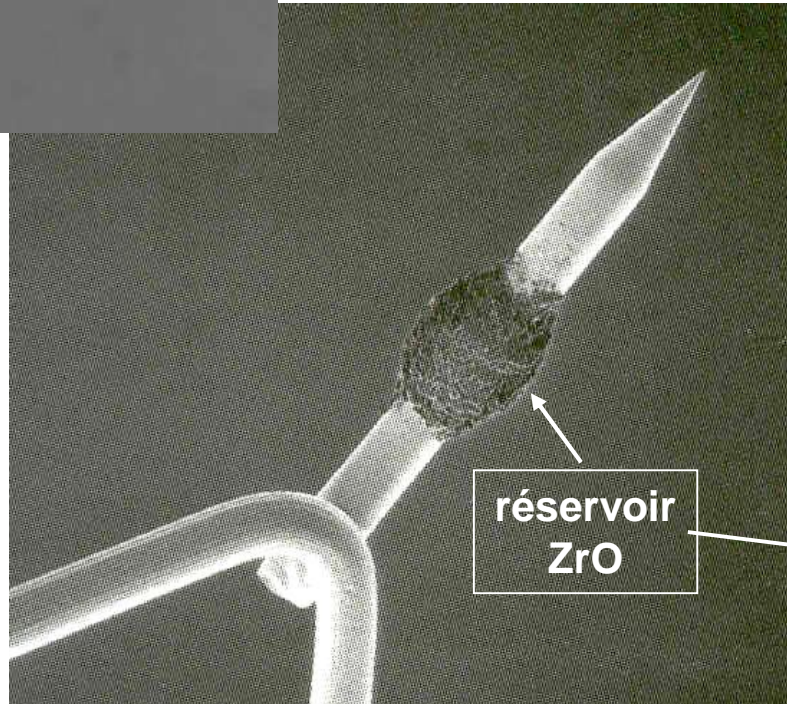
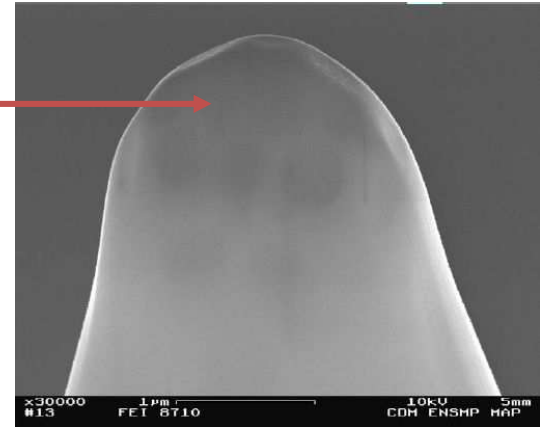
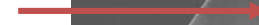
Les paramètres (tension d'extraction, température ...) sont imposés par le constructeur.

Il faut éviter toute surchauffe qui augmenterait le diamètre de la pointe avec perte de résolution. Le champ électrique doit rester au dessus d'une certaine valeur sous peine d'arrondir les facettes de la pointe.

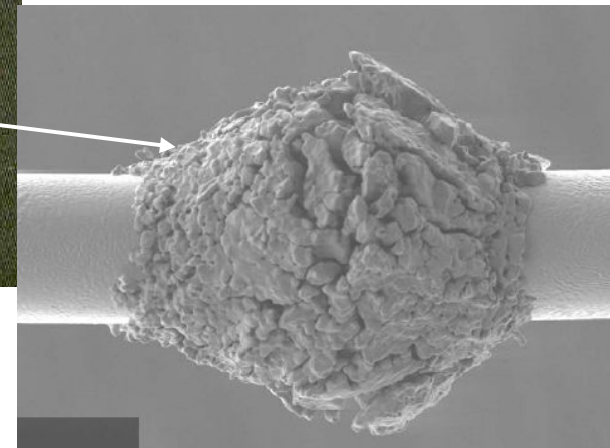
La qualité du vide est essentielle.



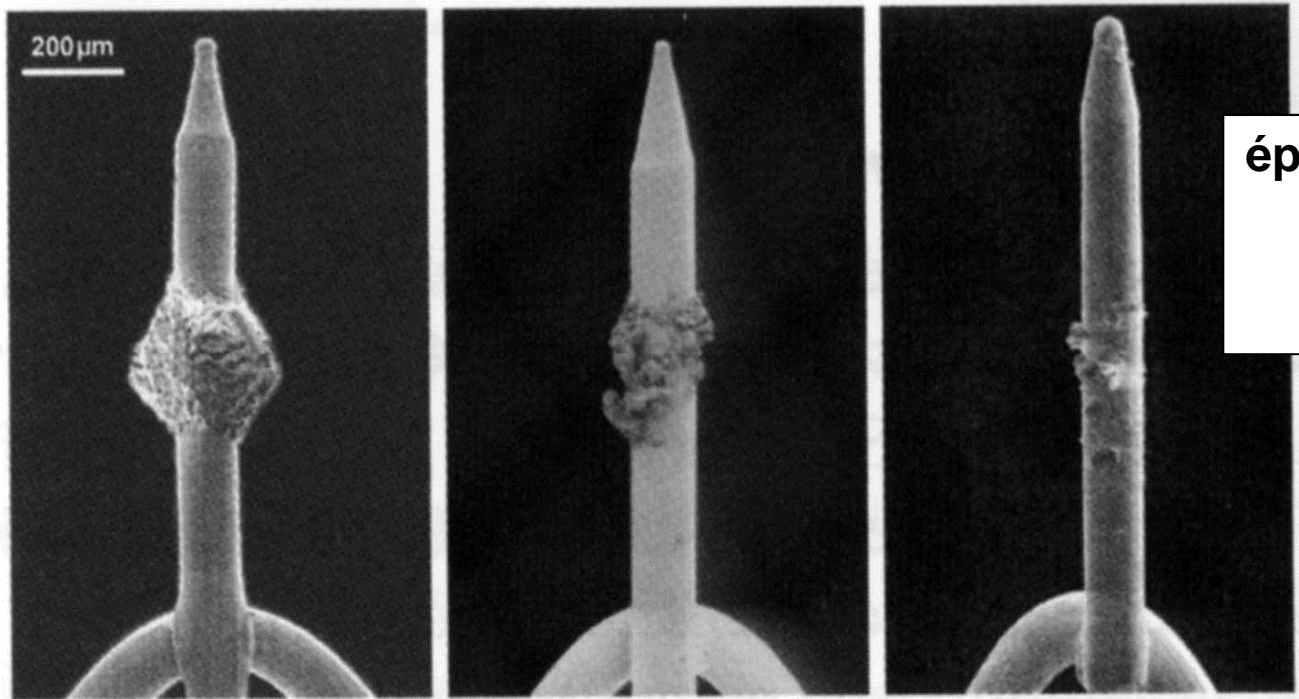
facette



réservoir
ZrO



La durée de vie (12 à 15 mois) est conditionnée par la réserve de ZrO



épuisement progressif
d'un
réservoir de ZrO
(document F. Grillon)

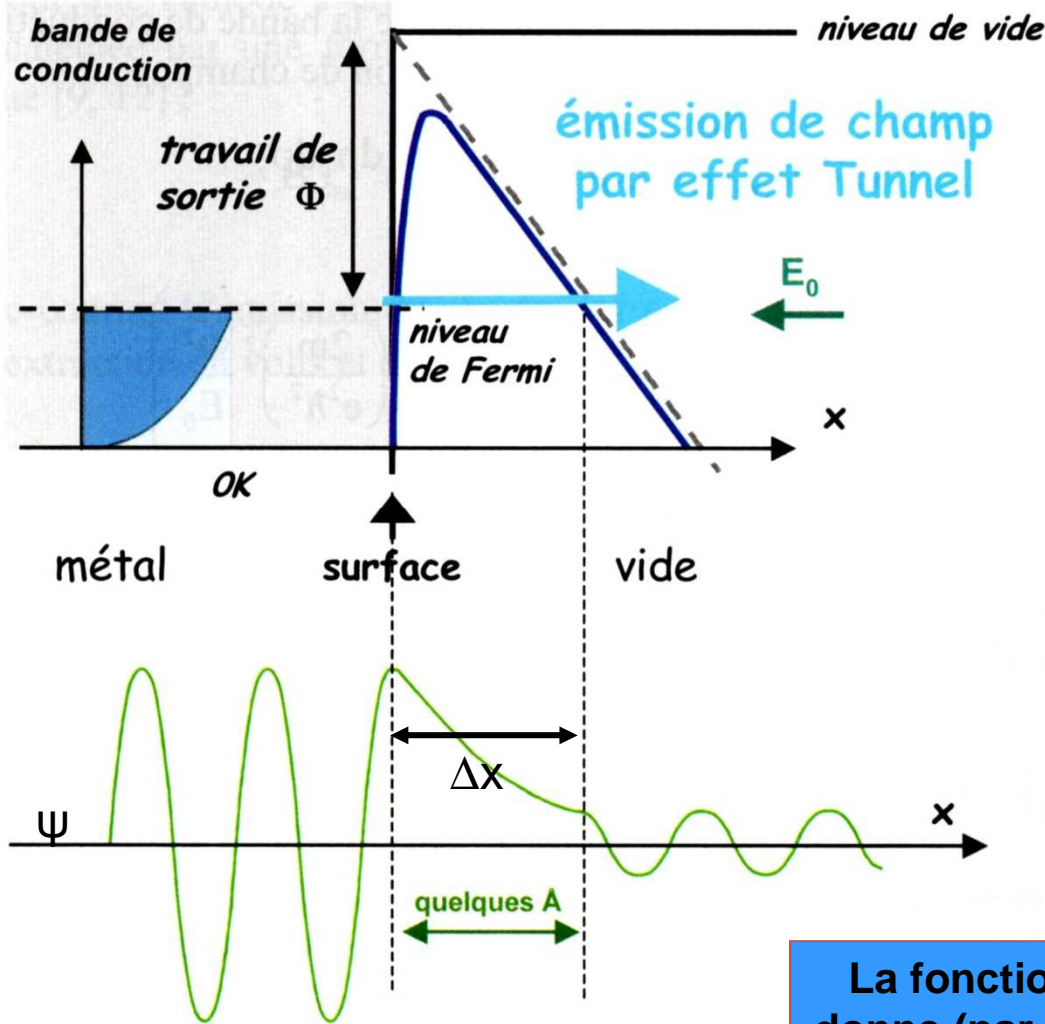
Avantages :

- Très forte brillance
- Emission électronique maximale élevée (qq 10^2 nA)
- Bonne stabilité d'émission
- Bonne durée de vie (>1000 h)

→ MEB haute résolution
→ microanalyse, EBSD

3 - Émission par effet de champ (FEG)

(FEG : Field Emission Gun)



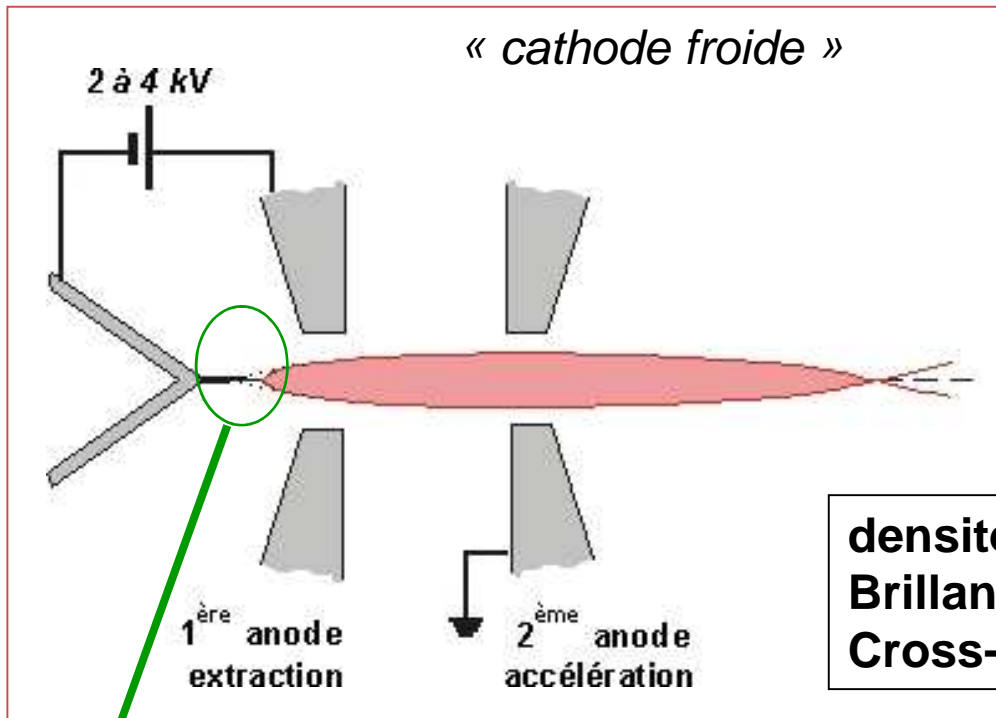
L'application d'un champ électrique très important (10^9 V/cm) permet de réduire la distance Δx à moins d'un nanomètre...



L'extraction d'électron par effet tunnel est alors possible.

La fonction d'onde ψ de l'électron donne (par le carré de son amplitude) la probabilité de présence





densité de courant :

Loi de Fowler - Nordheim

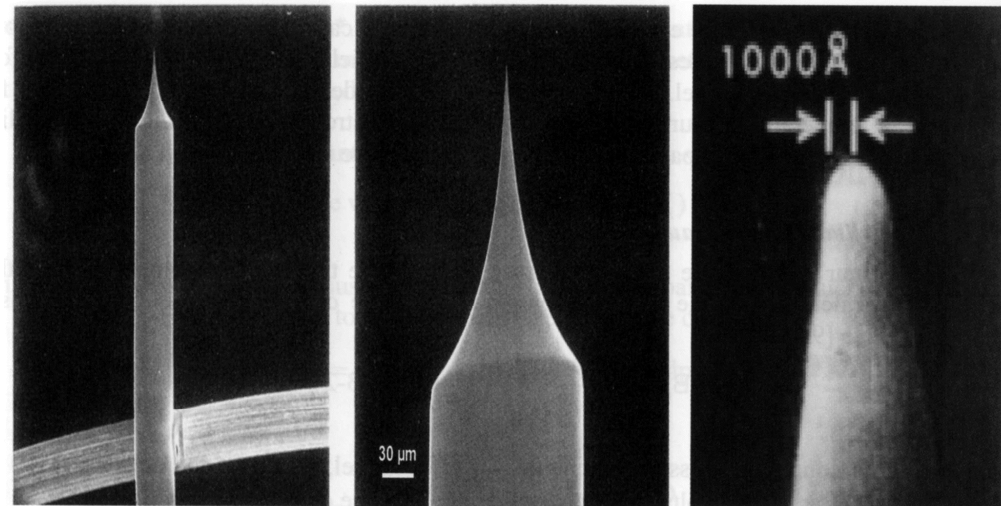
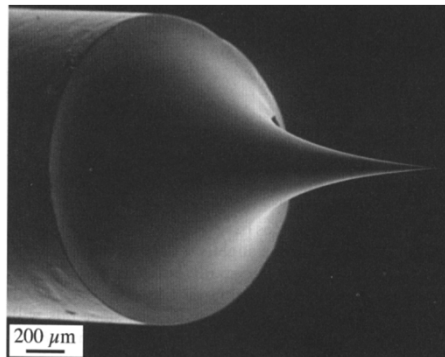
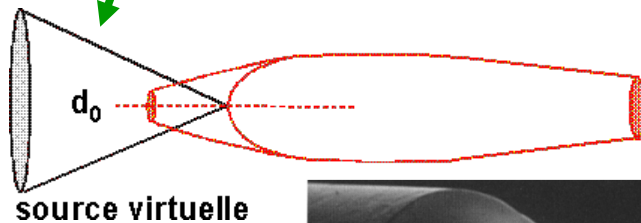
$$J_0 = A \frac{F^2}{\Phi} \exp \left[- \frac{B\Phi^{3/2}}{F} \right]$$

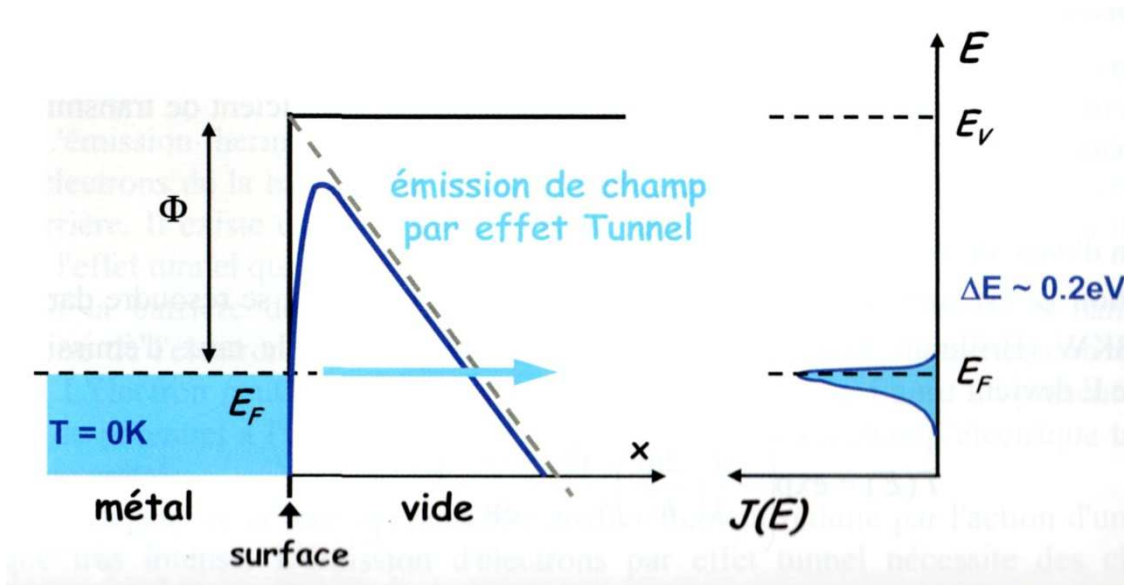
F : champ électrique

densité de courant : 10^4 à 10^6 A.cm⁻²

Brillance : $> 10^9$ A.cm⁻².sr⁻¹

Cross-over : 3 à 10 nm de diamètre





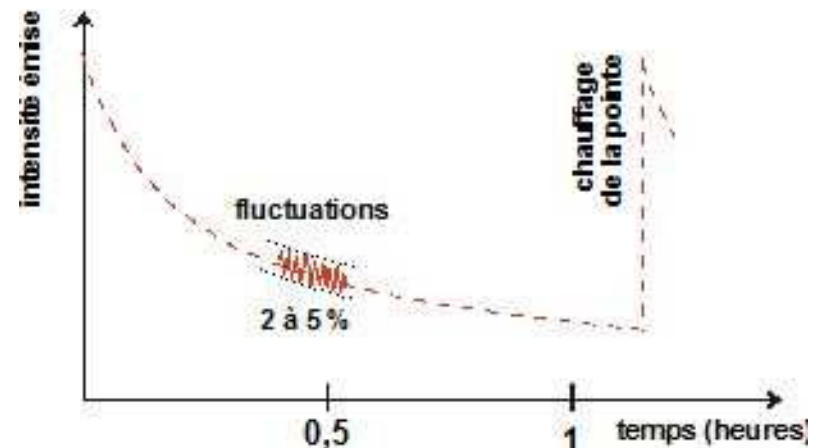
La dispersion énergétique des électrons émis est beaucoup plus faible (0,2 eV) que dans le cas d'une émission thermique.

Les canons à émission de champ nécessite un vide très poussée au niveau de la pointe

Malgré cela, une contamination régulière de la pointe entraîne de fortes instabilités d'émission

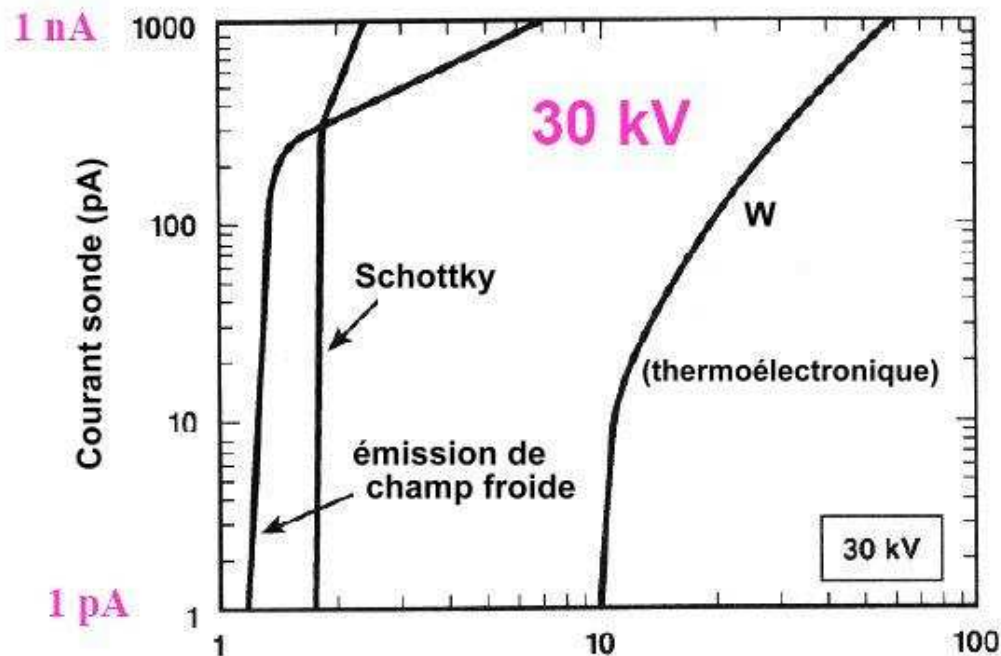
Pour y remédier :

- application de flashes thermiques réguliers
- température de fonctionnement → 1500 K (« cathode assistée thermiquement »)



Les sources à émission Schottky et FEG offrent les meilleures brillances, en particulier à basse tension.

Si le canon Schottky permet d'obtenir des intensités d'émission électronique importante (bien que légèrement plus faible que l'émission thermoélectronique), les canons FEG sont limités en émission et au-delà d'une certaine intensité perdent leur performances en terme de résolution spatiale :



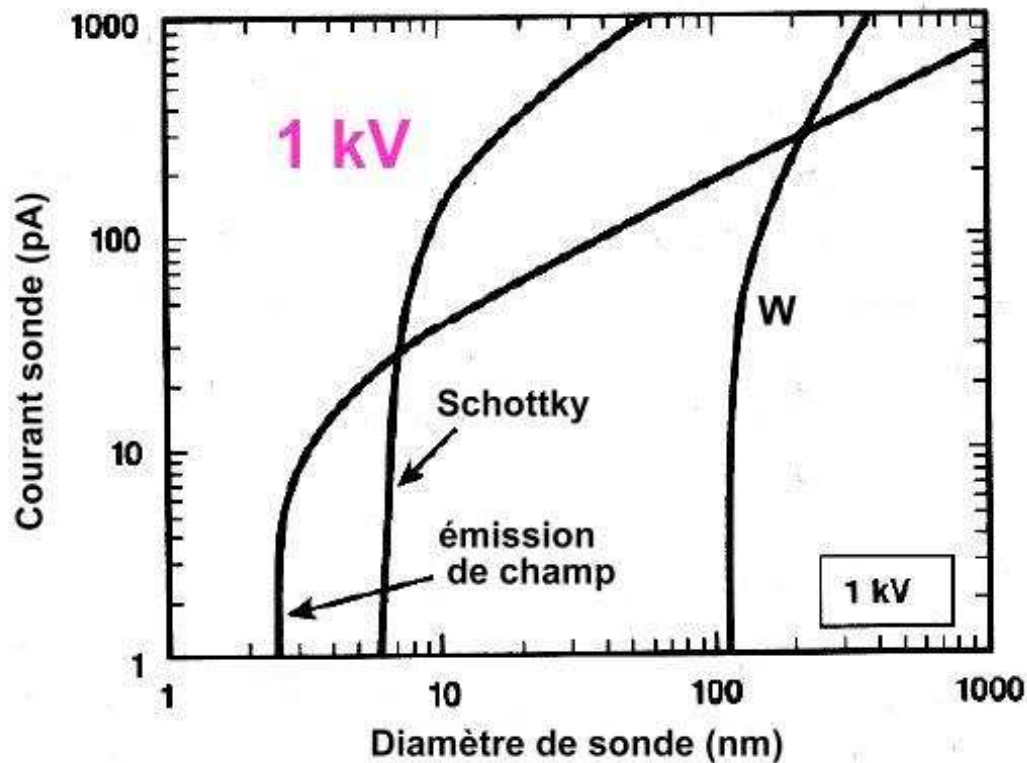
Comparaison à 30 kV de la variation du diamètre de sonde en fonction de l'intensité électronique.

Au-delà de 200pA, le diamètre de sonde en FEG croît brutalement.

3 configurations :

Filament de W + lentille conique :	Cs = 20 mm, Cc = 10 mm
Cathode Schottky + lentille Snorkel :	Cs = 3,2 mm, Cc = 2,7 mm
Cathode froide + lentille à immersion :	Cs = 2 mm, Cc = 1,8 mm

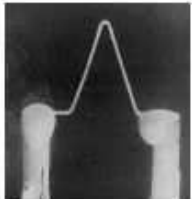



Méthode Kenray et Cliff (1984)



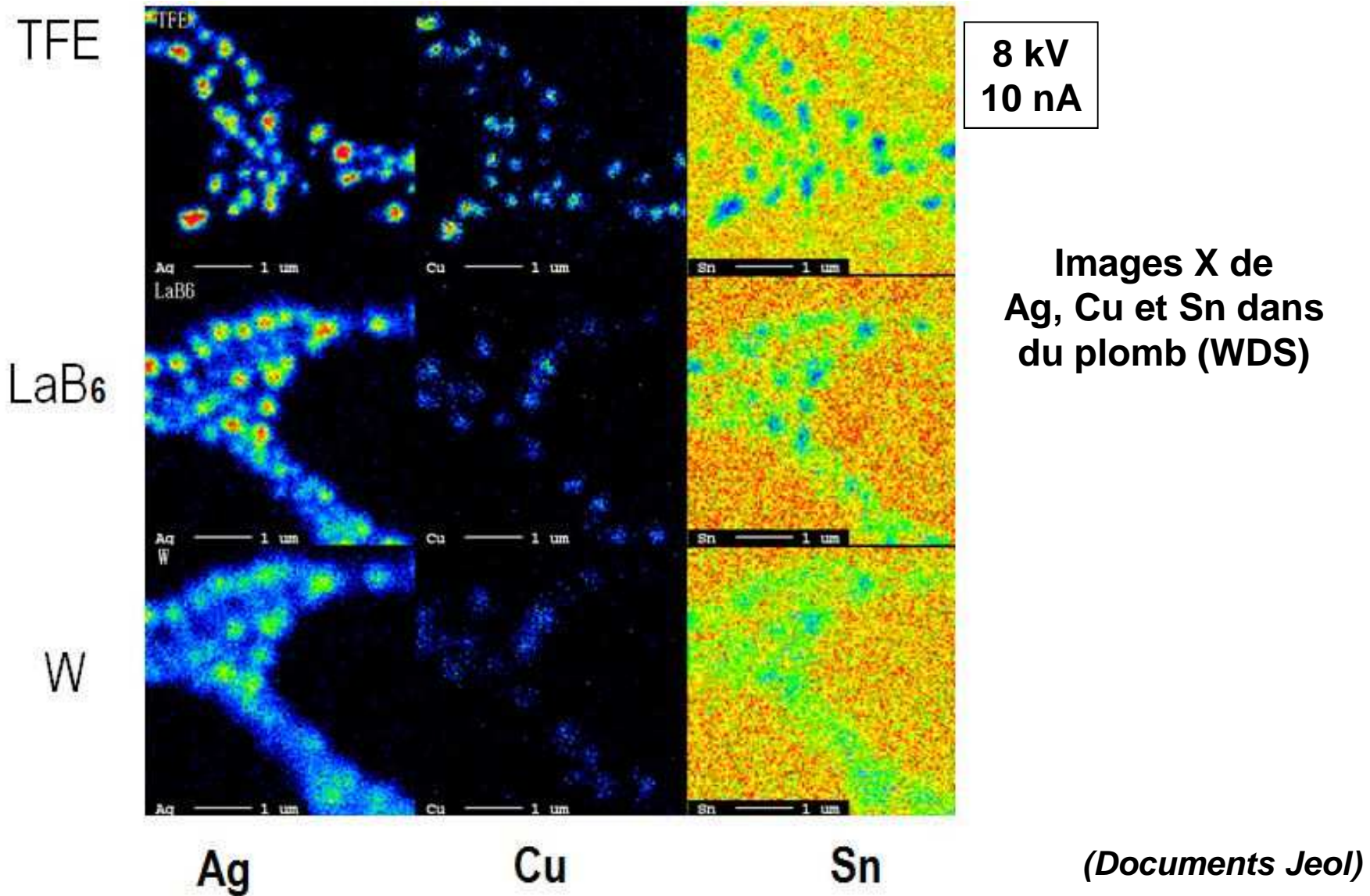
A basse tension, le canon W devient extrêmement médiocre alors que les émissions Schottky et FEG restent à un niveau acceptable à faible courant.

A partir de quelques dizaines de pA, le canon FEG voit ses performances diminuer rapidement et devient au-delà de quelques centaines de pA plus médiocre que le W !

Caractéristiques des canons à électrons

Type de canon	W	LaB6	W-ZrO (Schottky)	W (Tunnel)
Géométrie de la cathode				
Pression au canon (Pa)	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-5} - 10^{-6}$	10^{-8}	$< 10^{-8}$
Température de travail T(K)	2700	1900	1800	300
Travail de sortie Φ (eV)	4,5	2,7	2,8	4,5
Durée de vie émetteur (h)	100	1000	$\gg 1000$	$\gg 1000$
Diamètre de la source	50 μm	20 μm	15 nm	5 – 10 nm
Dispersion en énergie (eV)	1,5 - 2	1 - 2	0,7 - 1	0,2 - 0,4
Densité de courant d'émission J_0 (A.cm^{-2})	3	30	$10^4 - 10^5$	$10^4 - 10^6$
Brillance de la sonde à 20 kV ($\text{A.cm}^{-2} \cdot \text{Sr}^{-1}$)	10^5	10^6	$10^7 - 5 \cdot 10^8$	$> 10^9$
Gamme typique de courant de sonde	1 pA à 5 μA	1 pA à 5 μA	1 pA à 20 nA Voire 200 nA	1 pA à 2 nA Voire 15 nA
Stabilité (% par heure)	1	1	2	5
	MEB conventionnel (SEM) Canon thermoélectronique		MEB - FEG (FESEM) Canon à effet de champ	

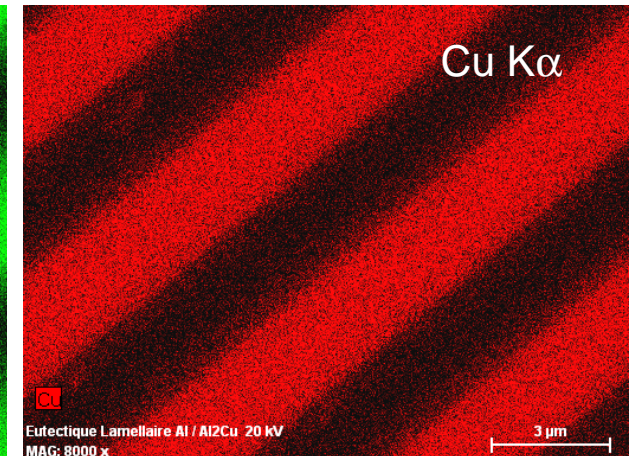
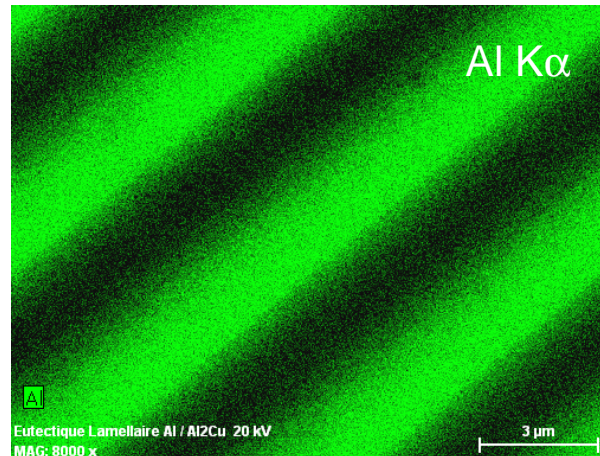
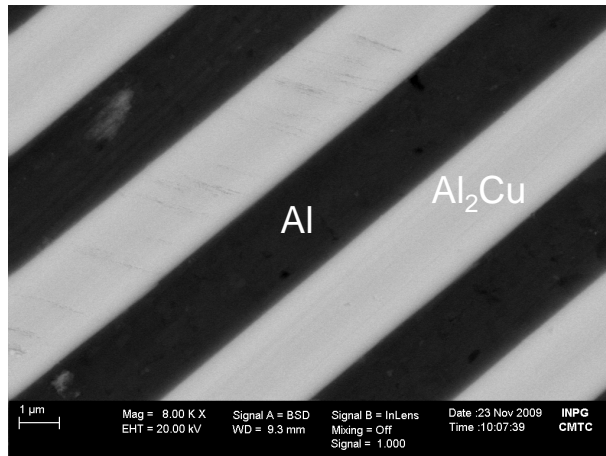
En offrant de très bonnes performances à basse tension, le canon Schottky permet une excellente résolution spatiale, en particulier en imagerie X.



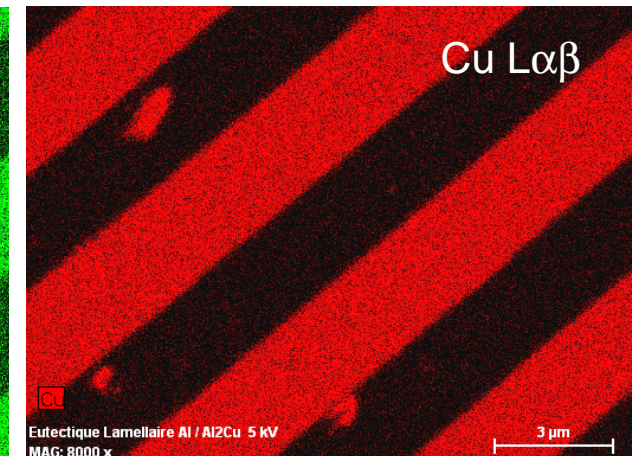
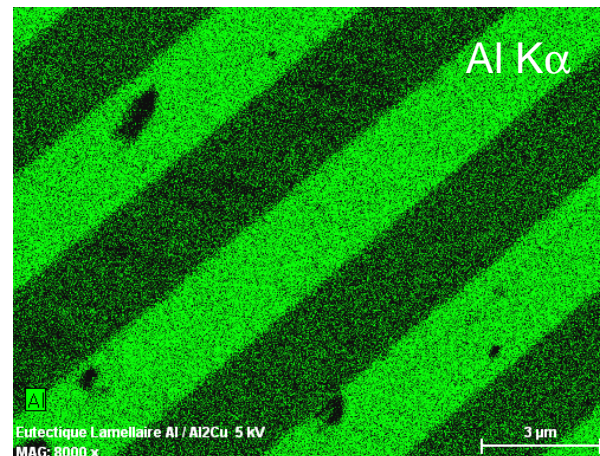
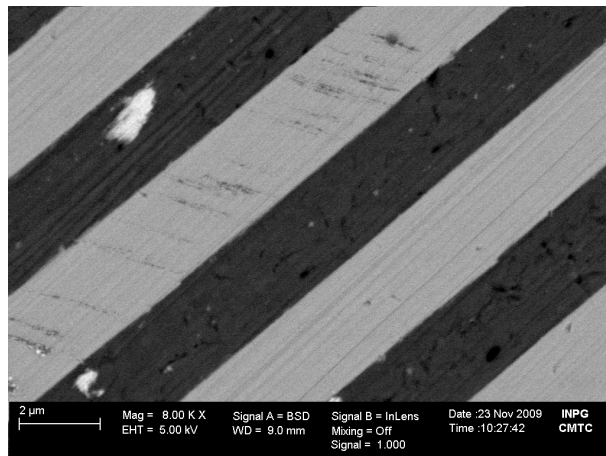
Exemple de cartographie X en MEB-FEG-EDS à basse tension

Eutectique lamellaire Al / Al₂Cu - Cartographies X à 20kV et 5kV

20kV



5kV



Zeiss Ultra55 + SDD

(Documents CMTC – Grenoble)

Conclusions

1 – Les canons à émission thermoélectronique à cathode W ont des performances (brillance, densité d'émission) médiocres, une durée de vie faible mais permettent d'obtenir des intensités électroniques importantes , présentent une bonne stabilité d'émission et sont relativement bon marchés :

Application : MEB classique, MEB VP, Microanalyse, EBSD

2 – Les canons à émission thermoélectronique à cathode LaB6 ont une brillance légèrement supérieure au W, une durée de vie beaucoup plus importante mais un coût plus élevé et une moins bonne stabilité :

Application : MEB classique, MEB VP

3 – Les canons à émission Schottky ont une brillance très supérieure au W, une durée de vie importante, une bonne stabilité, une intensité d'émission élevée mais un coût important :

Application : MEB haute résolution, MEB VP, microanalyse, EBSD

4 – Les canons à émission de champ ont une brillance très élevée , une durée de vie importante, mais une stabilité et une intensité d'émission faibles pour un coût important :

Application : MEB très haute résolution