



GROUPEMENT NATIONAL DE
MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE
ET DE MICROANALYSES

En convention de coopération avec la Société Française de Physique



Université Lille Nord de France
Pôle de Recherche
et d'Enseignement Supérieur

**Ecole d'été de microscopie électronique à balayage et de microanalyses
Cité scientifique de Lille, du 2 au 6 juillet 2012**

STAGE Niveau 2 Perfectionnement - TD MEB-FIB (durée 1^h30)

Moniteurs : David Troadec, Florence Robaut

david.troadec@iemn.univ-lille1.fr, Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, Avenue Poincaré, BP 60069, 59652 Villeneuve d'Ascq cedex

florence.robaut@cmtc.grenoble-inp.fr, Consortium des Moyens Technologiques Communs, GrenobleINP, BP 75, 38402 Saint Martin d'Hères cedex

1. Le microscope à double colonne MEB-FIB : introduction

Le microscope à double colonne MEB-FIB (*Focused Ion Beam*) combine un faisceau d'électrons, le plus souvent hautement résolu, et un faisceau d'ions focalisé (FIB) à haute brillance qui utilise une source d'ions à métal liquide de gallium. Le faisceau d'ions permet d'usiner un matériau ; la zone d'usinage est localisée avec précision grâce à l'imagerie électronique et l'usinage est ainsi contrôlé en temps réel. Le MEB-FIB est souvent équipé de micromanipulateurs, permettant la manipulation d'objets, et d'un système d'injection de gaz de natures différentes pour effectuer des dépôts. Le MEB-FIB est une véritable plate-forme expérimentale permettant, à une échelle micro- voire nanométrique, des dépôts localisés sous faisceau d'ions et d'électrons (dépôt CVD), des usinages et gravures ioniques, la succession d'abrasions ioniques et d'acquisitions d'image ou cartographie X ou EBSD permettant la reconstruction 3D du volume de matière abrasé.

Commercialisés dans les années 1980 pour répondre aux besoins de l'industrie des semi-conducteurs (analyse de défauts et modification des circuits intégrés), les MEB-FIB sont actuellement utilisés dans différents domaines des matériaux, en recherche et développement.

Afin de découvrir les différentes potentialités du MEB-FIB, nous présenterons dans ce TD les différentes étapes de préparation d'une lame pour la microscopie en transmission.

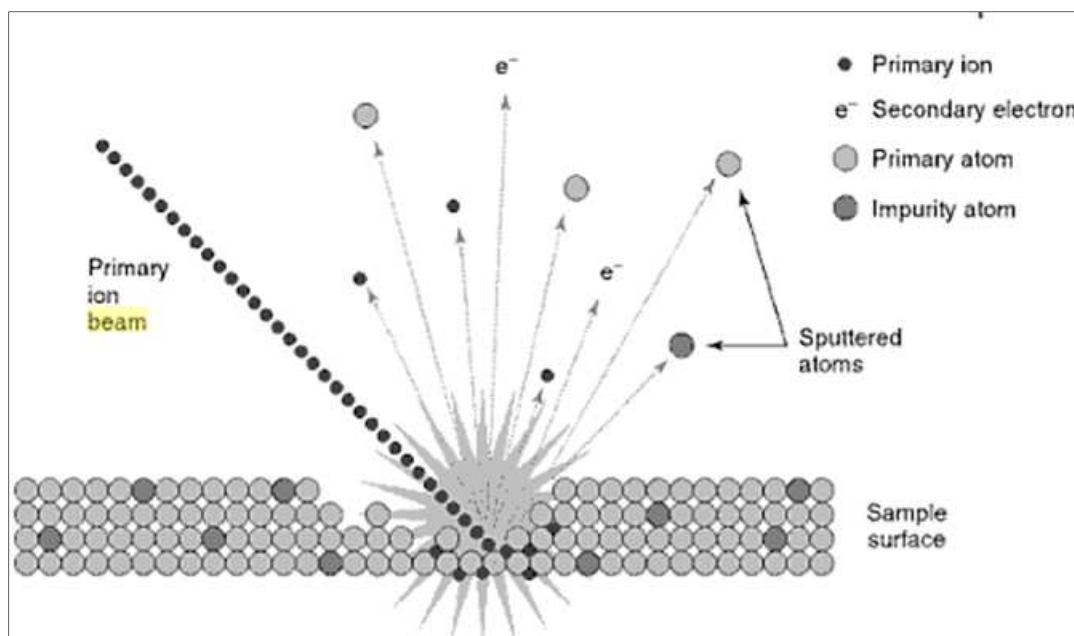
2. Interactions ions-matière

La figure ci-dessous représente les principales interactions ions-matière lors de l'impact du faisceau d'ions à la surface du matériau : certains ions incidents sont rétrodiffusés et d'autres sont ralentis en pénétrant le solide. Contrairement aux électrons, la taille des ions rend difficile leur pénétration dans

le solide ; la taille des ions augmente la probabilité d'interaction ions incidents-atomes du solide, entraînant leur ralentissement rapide.

- interactions ions incident-noyau de l'atome du solide (*collision élastique ou nucléaire*) : la masse des ions, plus importante que celle des électrons, explique que l'ion Ga^+ possède une quantité de mouvement 370 plus élevée que celle d'un électron ; le transfert de quantité de mouvement de l'ion incident vers l'atome du solide conduit au déplacement de l'atome dans l'édifice cristallin et à l'éjection des atomes hors de la matière (*pulvérisation*) ; une fraction de ces atomes éjectés est ionisée -ions secondaires-; ils peuvent être collectés pour former une image ou leur masse peut être analysée (*SIMS*). Certains ions incidents sont rétrodiffusés par la matière, d'autres sont implantés dans le solide.

- interactions ions incident-électrons de l'atome du solide (*collision inélastique ou électronique*) : il en résulte la production de phonons, de plasmons (dans les métaux) et d'électrons secondaires dont la détection est couramment utilisée en imagerie avec source d'ions.



Représentation des interactions ions-matière lors de l'impact du faisceau d'ions

3. Présentation générale de l'équipement

Repérer les différents éléments de l'équipement, visibles de l'extérieur (canons et colonnes MEB-FEG et FIB, chambre, sas, détecteurs, caméra infra-rouge, moteurs de la platine, système de pompage, système d'injection des gaz, boîtiers de contrôle des micro-manipulateurs, autres accessoires...) en précisant leurs spécificités. Situer ces éléments par rapport à la vue intérieure de la chambre.

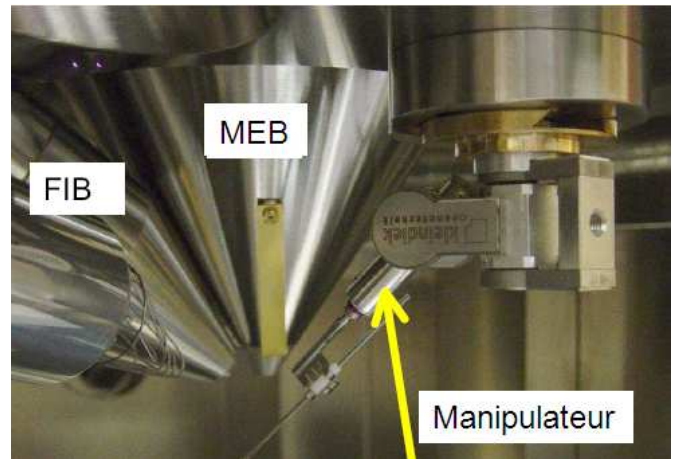
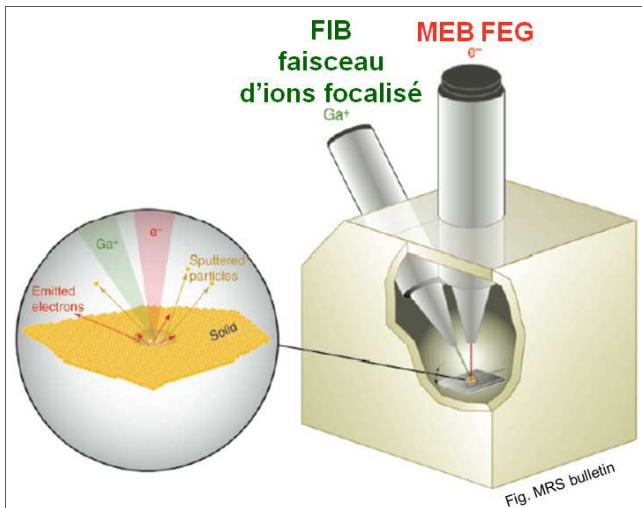


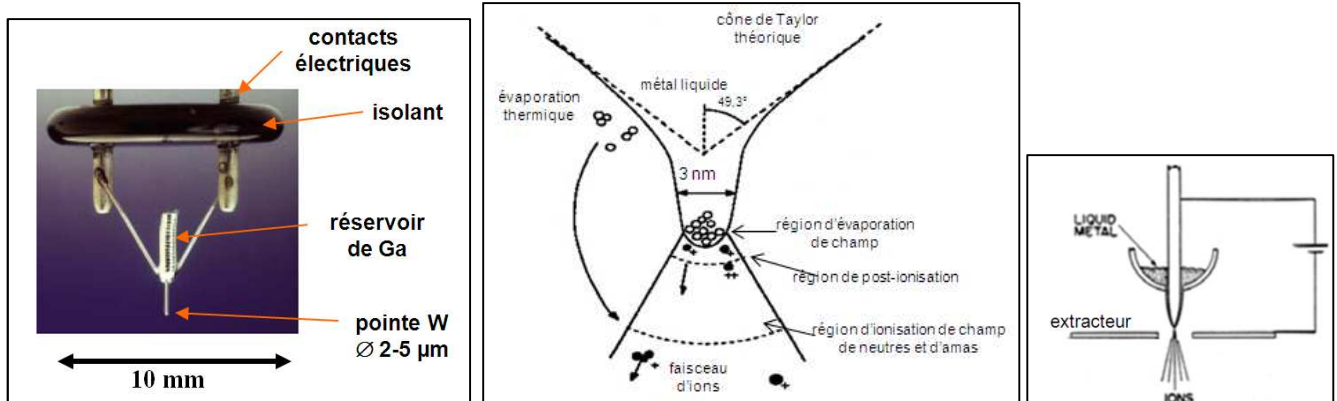
Schéma d'un MEB-FIB et vue de l'intérieur de la chambre (Photo Kleindiek)

4. Description du canon et de la colonne ioniques et des détecteurs associés

4.1 Canon ionique et source d'ions métal liquide (Liquid Metal Ion Source - LMIS)

Principe de fonctionnement :

La source d'ions est une source à émission de champ comparable à celle des canons à électrons FEG. Le gallium, dans son réservoir, est chauffé au démarrage de la source; il reste liquide à T_{ambiante} . Le gallium mouille la pointe de W. Un champ électrique est appliqué ($E_{\text{extrémité pointe}} \sim 10^8 \text{ V/cm}$) permettant l'obtention d'un diamètre de la source $\text{Ga}_{\text{liquide}}$ de l'ordre de 2 à 5 nm (formation d'un cône de Taylor fin et d'une protrusion à l'extrémité du cône). La tension d'extraction appliquée ($V_c < -10 \text{ kV}$) conduit à l'extraction des atomes de Ga de la pointe et à leur ionisation (évaporation de champ). Une seconde électrode, le supprimeur, permet la régulation du courant d'émission. En raison des effets de charges importants (répulsion entre les ions), le diamètre de la source est d'environ 50 nm et la densité de courant de 10^6 A/cm^2 .



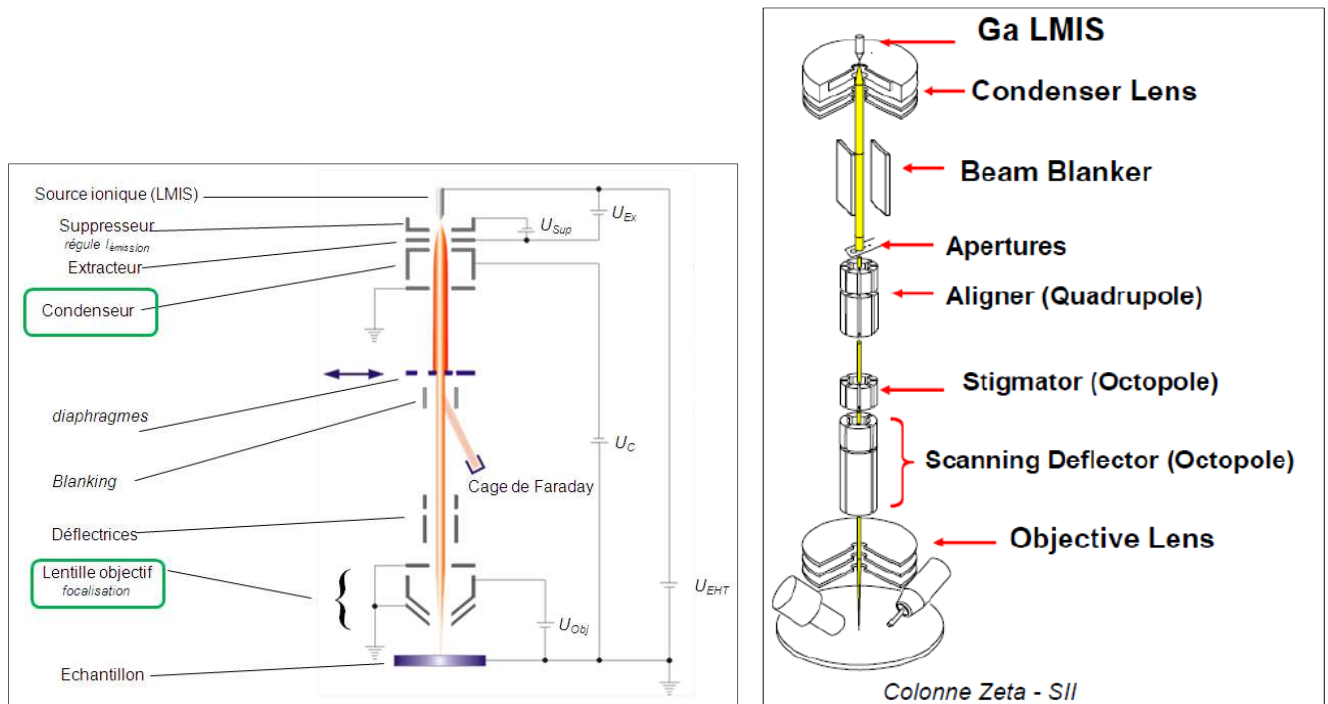
Schémas du canon à ions et de son principe d'émission

Intérêt de la source Ga :

- faible point de fusion (30°C) \rightarrow minimise la réaction, l'inter-diffusion entre $\text{Ga}_{\text{liquide}}$ et pointe W

- faible volatilité au point de fusion → la durée de vie de la source est typiquement de 1500 h
- très bonne stabilité de l'émission
- faible énergie libre de surface → bonne mouillabilité de la pointe W
- productions d'ions : essentiellement des ions Ga^+ : ions lourds de masse atomique 69, permettant la pulvérisation de matière avec un rendement important

4.2 Colonne ionique



Schémas de la colonne ionique

La structure de la colonne ionique s'apparente à celle d'un MEB. Elle comprend deux lentilles électrostatiques (condenseur et objectif), des diaphragmes pour ajuster la valeur du courant ionique, un 'masqueur' du faisceau (*beam blanker*), un correcteur d'astigmatisme, des déflectrices pour assurer le balayage du faisceau. La gamme de tension d'accélération des ions est typiquement : 0,5-30 kV. Le courant de sonde ionique varie typiquement entre 1 pA et 50 nA (jusqu'à 65 nA).

Les colonnes ioniques actuellement commercialisées offrent une haute résolution spatiale à haute tension (résolution en imagerie : ~2-3 nm. à 30 kV) et sont également optimisées pour travailler à basse tension (pour la préparation de lames TEM : $E_{\text{ions}} < 2\text{ kV}$ afin de limiter la zone amorphe).

4.3 Détecteur d'ions secondaires

Décrire le principe du détecteur d'ions secondaires spécifique au MEB-FIB du TD.

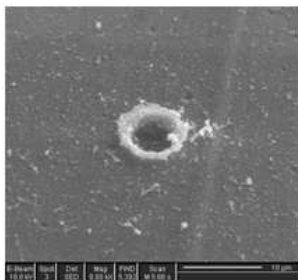
Les détecteurs utilisés dans un FIB sont des scintillateurs ou des détecteurs à micro-canaux. Dans le premier cas, les ions secondaires sont attirés vers l'entrée du détecteur et focalisés sur un convertisseur ions-électrons (dynode de conversion). Le flux d'électrons secondaires ainsi généré est proportionnel au flux d'ions ; il est détecté par un scintillateur couplé à un photomultiplicateur.

Le détecteur à micro-canaux collecte les ions ou les électrons selon la polarisation de la surface du détecteur ($\sim +$ ou $- 100$ V.) (tension de grille > 0 : détection des électrons ; tension de grille < 0 : détection des ions). Les multiples fibres (> 1 million) qui constituent ce détecteur, possèdent une surface interne à fort coefficient d'émission secondaire qui assure l'amplification du signal.

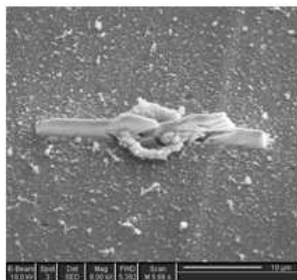
5. Déroulement du TD : les différentes étapes de préparation d'une lame pour la microscopie en transmission

Les étapes de préparation d'une lame TEM, abordées dans ce TD, permettront de présenter les différentes potentialités du MEB-FIB (dépôt, abrasion ionique grossière et rapide, abrasion fine, manipulation d'objets).

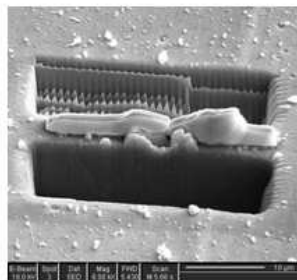
Les étapes de la préparation (transfert In Situ)



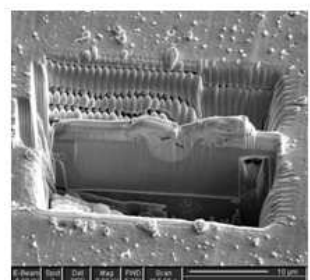
étape 1 :
localisation de la zone
d'intérêt



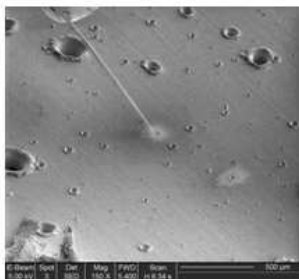
étape 2 :
dépôt d'une couche de
protection



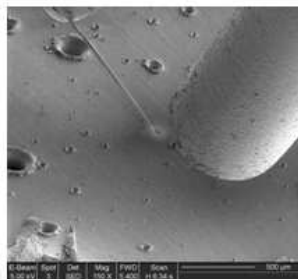
étape 3 :
gravure grossière -
courant fort



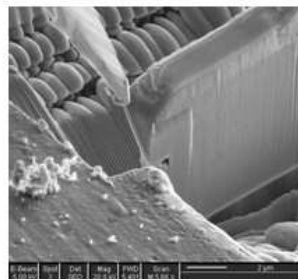
étape 4 :
pré-découpe de la lame



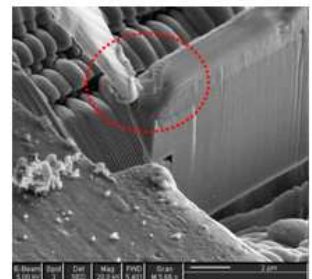
étape 5 :
Approche du micro-
manipulateur



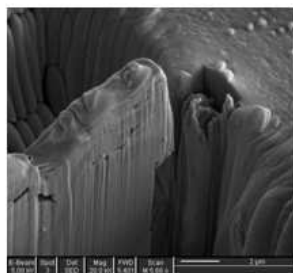
étape 6 :
Insertion canule
d'injection de gaz



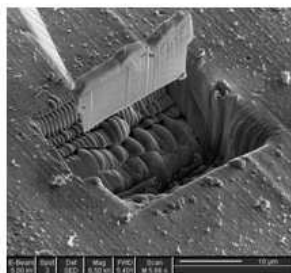
étape 7 :
contact pointe - lame



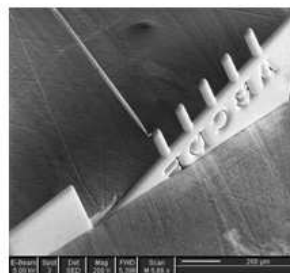
étape 8 :
dépôt de platine entre
la pointe et la lame



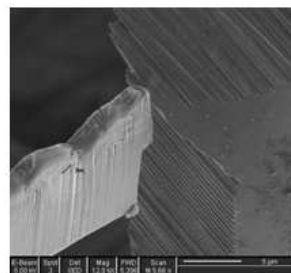
étape 9 :
désolidarisation
Lame - échantillon



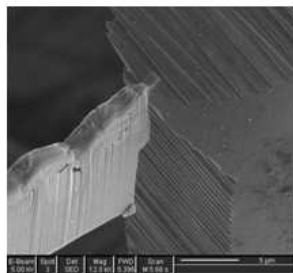
étape 10 :
extraction de la lame



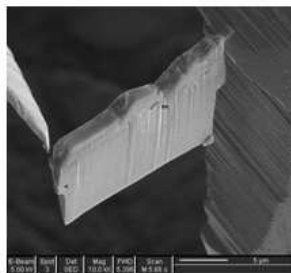
étape 11 :
transfert de la lame vers
la grille TEM



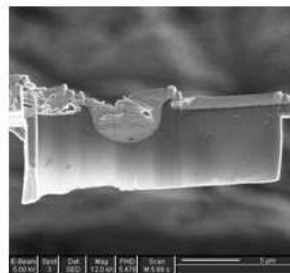
étape 12 :
contact lame - grille TEM



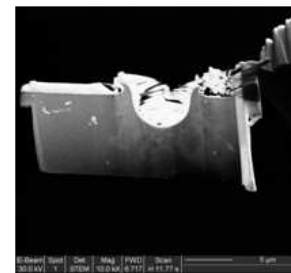
étape 13 :
dépôt de platine entre
la lame et la grille



étape 14 :
désolidarisation lame -
pointe



étape 15 :
Amincissement jusqu'à la
transparence électronique



étape 16 :
Image en transmission
(détecteur STEM)

6. Mise en œuvre de l'équipement

6.1 Mise en route du canon à électrons

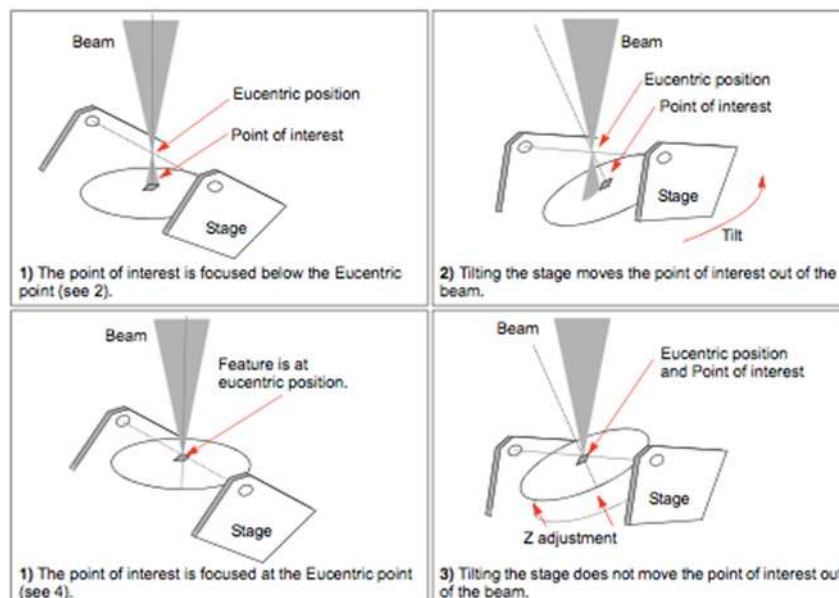
Décrire rapidement l'émission spécifique liée à ce type de canon à émission de champ (évoquer le courant de filament, la tension d'extraction, le courant d'émission...). Ces notions seront abordées en détail dans le TD 'MEB-FEG'.

6.2 Réglage d'eucentricité

Effectuer le réglage d'eucentricité de l'échantillon avec Z' -platine eucentrique- ou par calcul trigonométrique de logiciel (ainsi, l'axe d'inclinaison de la platine est situé dans le plan de la surface de l'échantillon et la zone d'intérêt visualisée en image MEB est conservée quelque soit l'angle de tilt).

6.3 Réglage de la coïncidence des faisceaux d'électrons et d'ions

Positionner l'échantillon à l'angle d'inclinaison et à la distance de travail spécifiques au MEB-FIB utilisé pour le TD en vue de la mise en œuvre simultanée des faisceaux d'électrons et d'ions (le réglage fin sera effectué au §6.4).

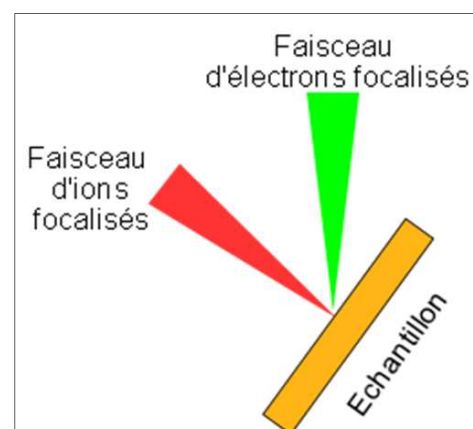
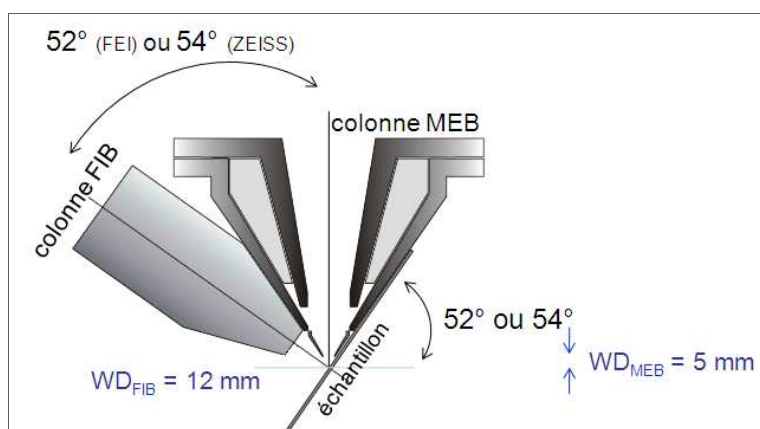


Réglage de la surface de l'échantillon à la position eucentrique

6.4 Mise en route du canon à ions

Evoquer la tension d'extraction, la tension du supprimeur et le courant d'émission ionique et sa stabilité ($\sim 2 \mu\text{A} \pm 0,1 \mu\text{A}$), la nécessité de régénérer parfois la source d'ions par chauffage (pour éliminer la couche d'oxyde de gallium et de contamination qui a pour conséquence de diminuer $I_{\text{émission}}$).

Préciser que le faisceau d'ions usine le matériau avec une incidence normale. Montrer sur l'image MEB la direction du faisceau d'ions. Effectuer le réglage du point de coïncidence des faisceaux MEB et FIB afin que la zone d'intérêt soit visualisée simultanément en images MEB et FIB (tilt échantillon : 52° -FEI Strata-, 55° -Tescan Lyra- ; WD SEM : 5,3 mm. -FEI Strata-, 9 mm. -Tescan Lyra-).



Représentations du point de coïncidence des faisceaux MEB et FIB

Réaliser des images avec la source ionique en collectant les électrons secondaires et en collectant les ions secondaires (expliquer le contraste de canalisation observé et les spécificités du détecteur). Mentionner les variations de diamètre du faisceau d'ions en fonction des conditions opératoires et la

résolution optimale en image ionique qui en découle.

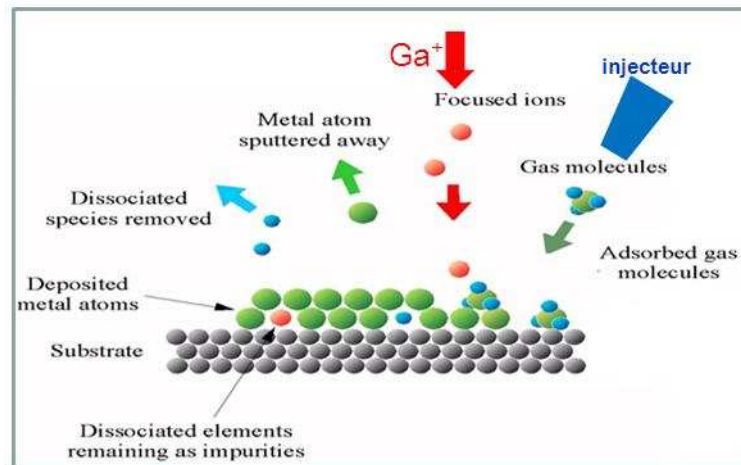
FIB Probe Table					
Label	KV	Aperture No.	Condenser (Volts)	Probe Current (pA)	Probe Width (nm)
30KV:<0.15 pA	30.00	14	26740	0.1	4
30KV:<0.3 pA	30.00	7	26550	0.3	5
30KV:1 pA	30.00	6	25480	1.0	7
30KV:10 pA	30.00	13	6640	10.0	13
30KV:40 pA	30.00	5	6360	40.0	19
30KV:80 pA	30.00	5	3520	80.0	22
30KV:150 pA	30.00	11	2992	150.0	29
30KV:300 pA	30.00	11	1240	300.0	38
30KV:700 pA	30.00	4	1180	700.0	59
30KV:1.5 nA	30.00	3	1760	1500.0	107
30KV:3 nA	30.00	3	402	3000.0	170
30KV:6.5 nA	30.00	9	285	6500.0	360
30KV:13 nA	30.00	2	323	13000.0	900
30KV:27 nA	30.00	8	328	27000.0	2500
30KV:45 nA	30.00	1	421	45000.0	5100

Valeurs de diamètre de sonde ionique à 30 kV en fonction du courant – données Zeiss

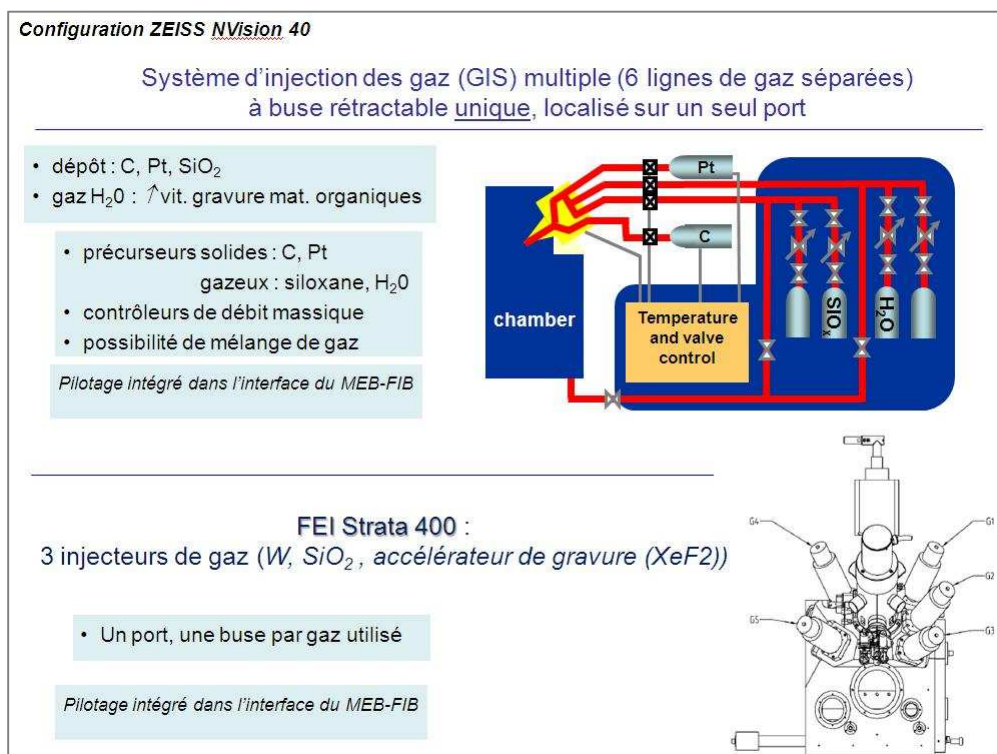
7. Couche de protection de la zone d'intérêt : dépôt assisté par faisceau d'électrons et faisceau d'ions

7.1 Principe physique du dépôt assisté par faisceau d'ions

Le précurseur chimique est obtenu à partir d'une source gazeuse, liquide ou solide chauffée pour obtenir la pression de vapeur désirée. Les molécules organométalliques ainsi obtenues [$W(CO)_6$ par exemple pour le dépôt de W] sont guidées par l'injecteur de gaz vers la surface de l'échantillon où elles sont adsorbées. Les molécules se décomposent sous l'effet direct du faisceau d'ions, mais aussi sous l'effet des électrons secondaires dus à l'interaction ions-matière et de l'échauffement local qui active la réaction chimique. La partie métallique non volatile reste à la surface et forme un dépôt, la partie volatile légère est rapidement désorbée. Le processus de dépôt par faisceau d'ions est en compétition avec le phénomène de gravure (nombre d'atomes déposés par rapport au nombre d'atomes pulvérisés).

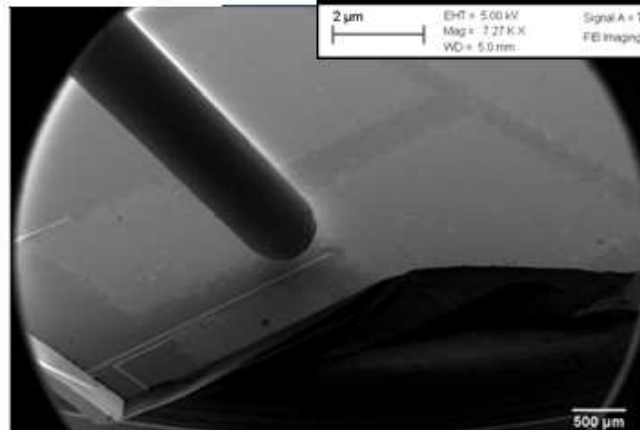
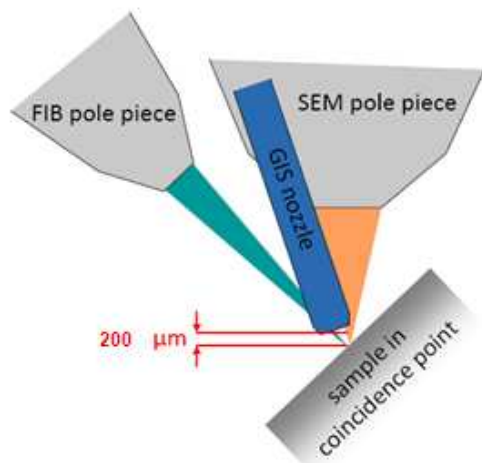


Principe physique du dépôt CVD assisté par faisceau d'électrons et d'ions



Représentation du système d'injection des gaz

Après avoir décrit le principe physique du dépôt CVD assisté par faisceau d'électrons et faisceau d'ions, présenter l'équipement utilisé -buse unique ou multiple, configuration des gaz,..., puis introduire la buse d'injection et effectuer un dépôt de protection (par exemple : dépôt C assisté par les électrons et dépôt Pt ou W par faisceau d'ions) sur la zone d'intérêt de l'échantillon. Le dépôt initial assisté par électrons permet de limiter l'endommagement de la surface du matériau.



Capillaire d'injection au-dessus d'un échantillon

Localisation et images de la buse d'injection des gaz

7.2 Paramètres opératoires

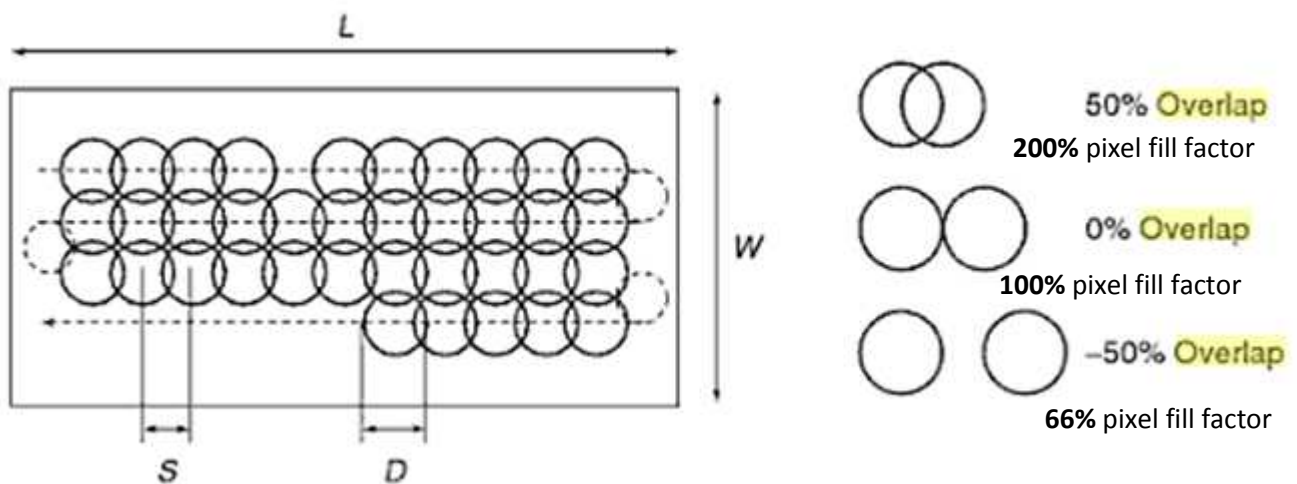
Expliquer le choix du courant de sonde ionique (Dépôt C et Pt : $I_{\text{ionique}} \sim \text{Surface de dépôt} \times 5 \text{ pA}/\mu\text{m}^2$), les notions de dwell time, de Pixel Fill Factor et Beam Overlap (il varie en fonction de la résolution de l'usinage ionique et du grandissement de l'image FIB).

	Courant ionique par unité de surface (pA/ μm^2)	Dwell time (μs)	Overlap (%)	Pixel Fill Factor (%)
Carbone	~ 5	0,2	-50	
	~ 5	0,4		70-90
Platine	~ 5	0,2	-150	
	~ 5	0,2		70-90
Tungstène	100 à 150	0,2	-50	

La tension d'accélération et le courant du faisceau d'ions, la focalisation et les réglages d'astigmatisme déterminent le diamètre **D** du faisceau. L'opérateur définit la surface (LxW) balayée par le faisceau d'ions pour le dépôt avec une certaine résolution -nbre. de pixels x nbre. de pixels-. Chaque pixel de cette surface est exposé au faisceau d'ions pendant une certaine durée (*dwell time*) après laquelle le faisceau est masqué et se déplace au pixel suivant avec un pas **S**.

Le recouvrement du faisceau d'ions ($beam\ overlap=(D-S)/D$ et $pixel\ fill\ factor=D/S$) est un paramètre déterminant pour la réalisation d'une gravure ou d'un dépôt assisté par faisceau d'ions ($beam\ overlap>0$ quand le diamètre du faisceau est plus grand que le pas entre chaque pixel). Le $beam\ overlap$ ou $pixel\ fill\ factor$ est modifié en faisant varier la résolution de la zone à usiner par FIB et/ou le grandissement de l'image FIB. En général, on utilise : $beam\ overlap>0$ pour l'abrasion grossière, $beam\ overlap=0$ pour l'abrasion plus fine, $beam\ overlap<0$ pour le dépôt.

Si la dose d'ions par pixel est trop faible pendant la durée d'exposition ($dwell\ time$), toutes les molécules de précurseur qui recouvrent le pixel ne réagissent pas pour former le dépôt. Si, au contraire, la dose d'ions par pixel est trop forte, le précurseur qui recouvre le pixel est consommé avant la fin de la durée d'exposition et la gravure du substrat se produit.



Représentation des paramètres définissant les facteurs : Pixel Fill Factor et Beam Overlap



Exemple de dépôts (ligne et plots)

8. Dégagement de matière de part et d'autre de la zone d'intérêt : gravure ionique grossière

Commencer l'abrasion de matière devant la zone d'intérêt en vue de l'extraction de la lame. Montrer dans d'autres régions de l'échantillon préalablement usinées, le résultat de cette étape.

Justifier la direction de l'abrasion ionique et le choix du courant ionique. La résolution spatiale de l'abrasion est meilleure à faible courant mais la vitesse d'abrasion est plus élevée pour les forts courants. L'endommagement de la face abrasée est limité pour les faibles courants. Préciser les paramètres de dwell time (plus élevé pour les matériaux comme les céramiques), pixel fill factor (> 100% convient), résolution, trame, et mentionner les effets de re-déposition.

9. Prélèvement de la lame TEM et collage sur une grille : utilisation du micro-manipulateur

Les micro-manipulateurs présentent un faible encombrement. Ils peuvent être fixés sur le haut de la chambre ou sur la platine. Ils sont actionnés par des moteurs piézo-électriques, disposent de 3 degrés de liberté (2 mouvements de rotation et un de translation -coordonnées polaires- pour le micro-manipulateur Kleindiek du MEB-FIB FEI Strata du TD ; 3 translations -coordonnées cartésiennes- pour le micro-manipulateur Smartact du MEB-FIB Tescan Lyra3 du TD) et offrent une précision en positionnement nanométrique. A leur extrémité sont fixés différents accessoires (pointe, pince, contacteurs électriques..).

Montrer les différents degrés de liberté du micro-manipulateur lors de l'approche vers l'ébauche de la lame. Montrer une lame prélevée, collée sur une grille TEM.

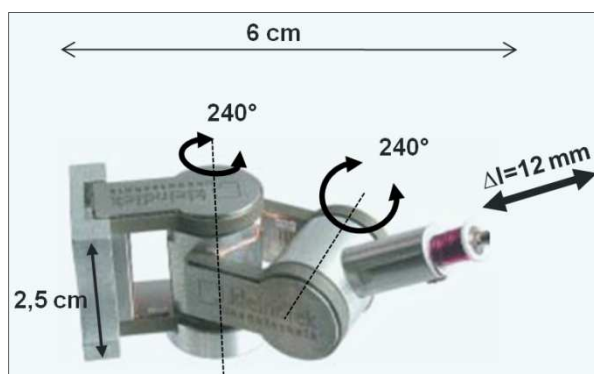


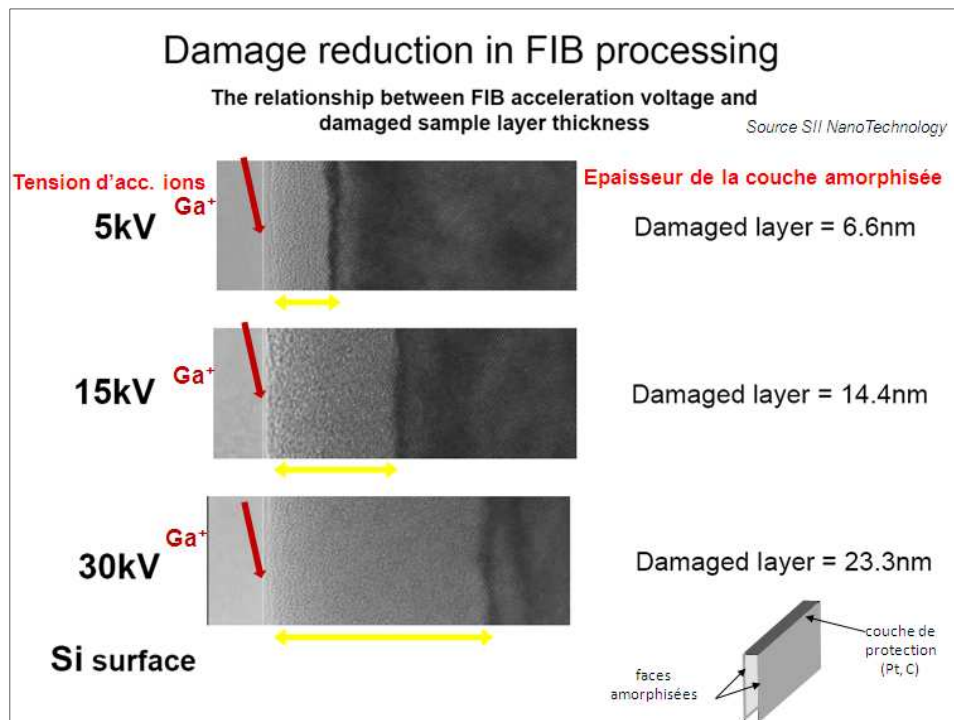
Photo d'un micro-manipulateur Kleindiek

10. Amincissement de la lame TEM

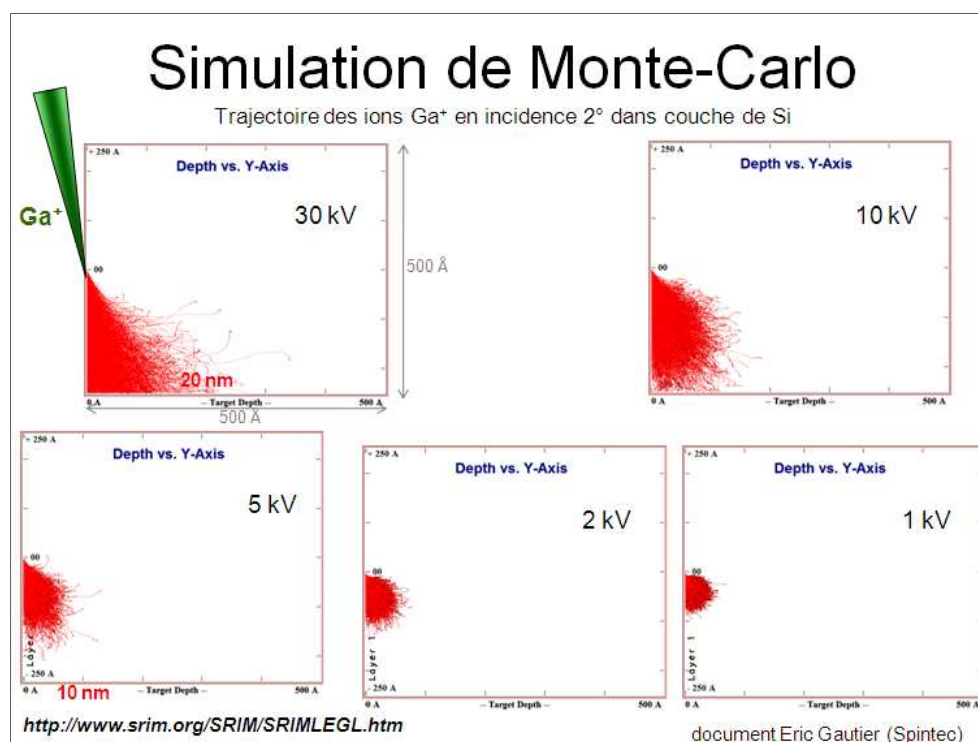
La lame est ensuite amincie en l'attaquant sur les deux faces avec des ions accélérés à 30 kV, à différentes valeurs de courant de sonde, puis si possible, à plus faible tension d'accélération des ions, jusqu'à une épaisseur qui peut atteindre 50 nm.

L'étape ultime de la préparation de la lame consiste à abraser chacune de ses faces avec des ions Ga de faible énergie (entre 5 kV et 1 kV) (*plus faible quantité de mouvement $p=mv$*) afin de limiter l'endommagement de l'édifice cristallin (*moins d'amorphisation*).

Effectuer une partie de l'aminçissement de la lame.



Images des zones d'endommagement de la surface de Si générées par des ions Ga^+ d'énergie variable (5, 15, 30 kV)



Simulations de Monte-Carlo des profondeurs de pénétration des ions Ga^+ dans Si en fonction de l'énergie des ions.

11. Autre exemple d'application du MEB-FIB : la reconstruction 3D (*slice and view*)

Le faisceau d'ions permet de réaliser une succession de tranches dans la matière. Chaque tranche est

imaginée grâce au MEB. Le volume de la matière est reconstruit à l'aide de logiciels de traitement d'image à partir de la pile d'images obtenue.

Exemple de volume abrasé : cube de 10 μm de côté, pas entre deux images : 20 nm., pile de 500 images, durée de réalisation ~10h.

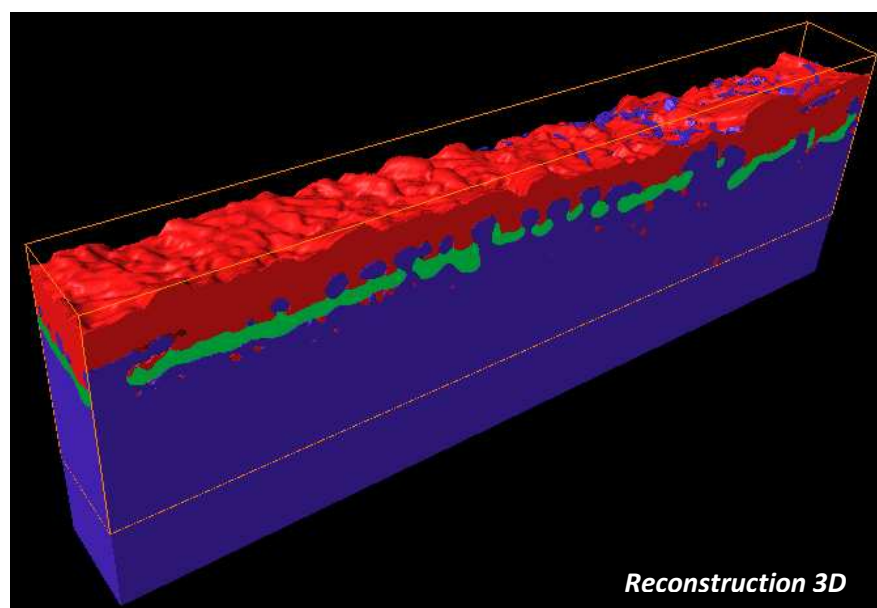
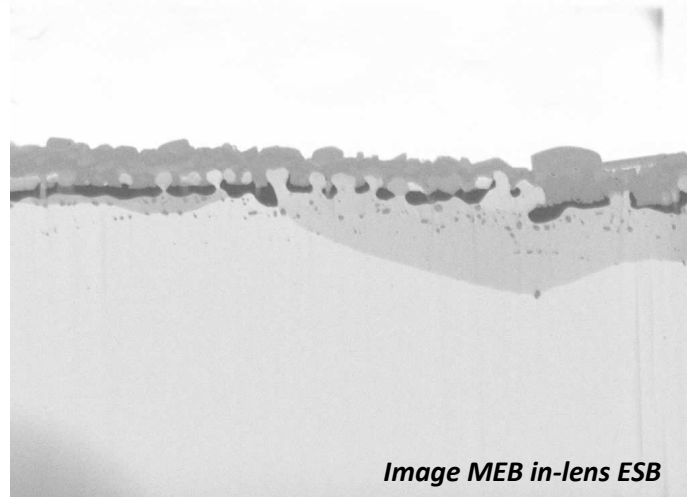
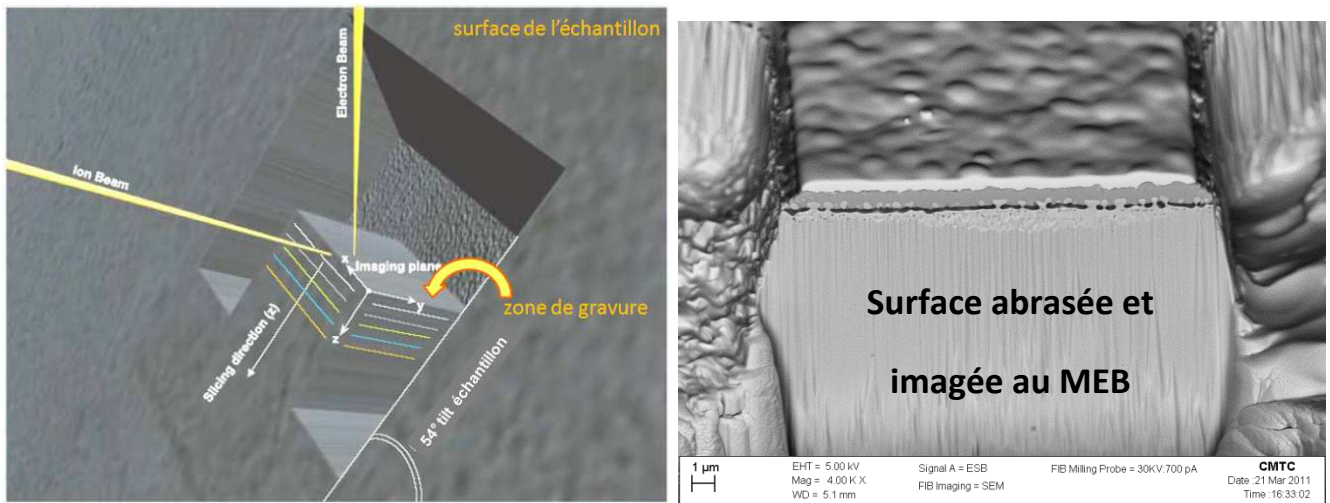


Schéma de principe et de mise en œuvre de l'acquisition 3D des images MEB (images F. Charlot)

ANNEXES

Notions de vide dans les équipements MEB et MEB-FIB

(Extrait du doc^t de TD MEB Instrument Ecole d'été 2006 - F. Roussel-Dherbey, F. Charlot -CMTC-)

Les niveaux de vide au canon sont de l'ordre de 10^{-4} Pa pour un MEB-W, de 10^{-6} Pa pour un MEB LaB₆ et de 10^{-8} Pa pour un MEB-FEG.


Dans tous les cas, le vide dans la colonne est inférieur à 10^{-4} Pa. Le niveau de vide dans la chambre peut varier entre 10^{-3} à 10^{-5} Pa pour un MEB en mode haut vide et entre 10 à 2000 Pa pour un MEB en pression contrôlée.

- vide primaire de 10^2 à 10^{-1} Pa (1 à 10^{-3} mbar ou 1 à 10^{-3} torr)
- vide secondaire de 10^{-1} à 10^{-5} Pa (10^{-3} à 10^{-7} mbar ou 10^{-3} à 10^{-7} torr)

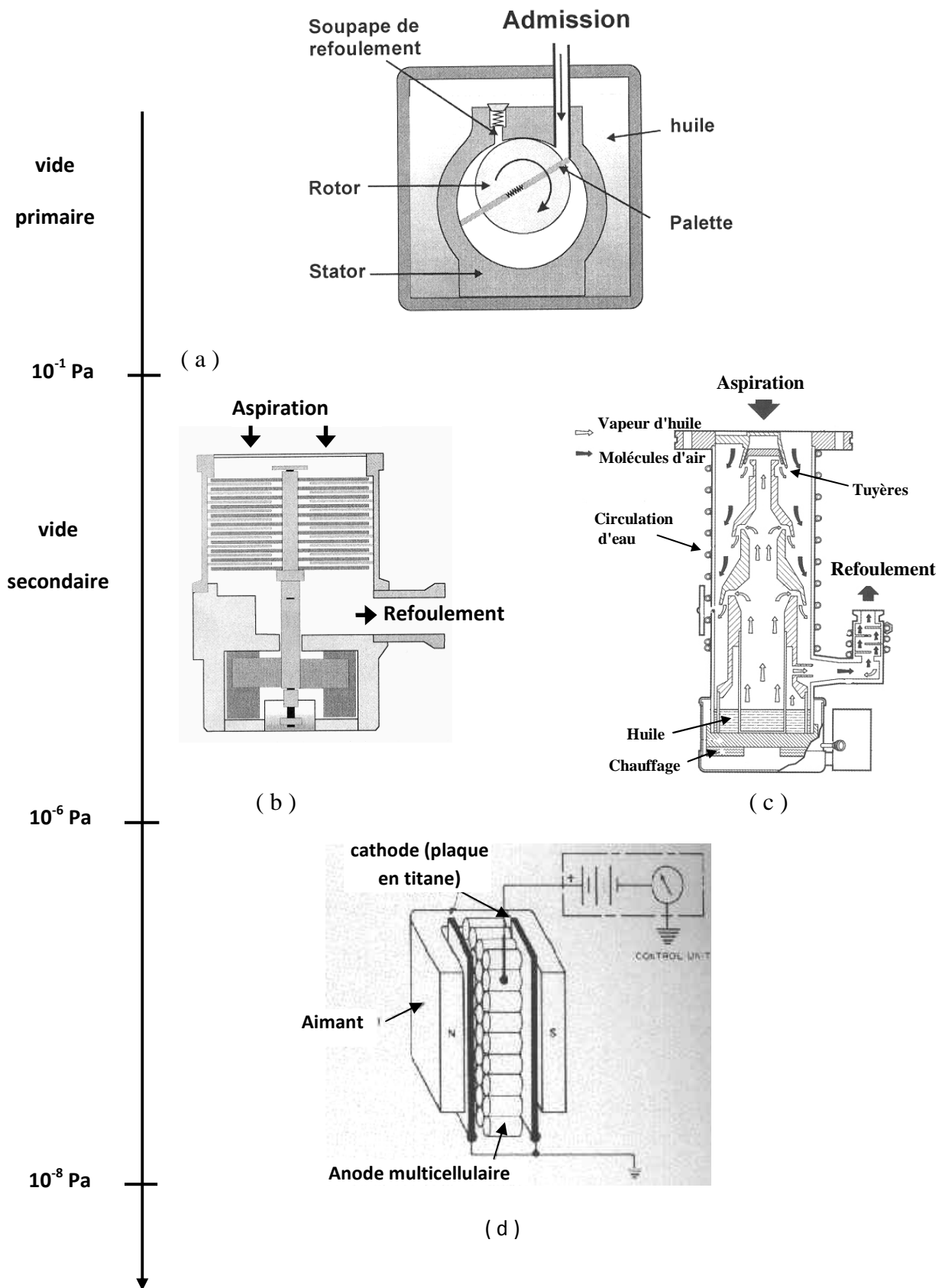
La qualité du vide est un élément essentiel dans la qualité des images ou des analyses obtenues. Cette qualité nécessite d'une part un entretien régulier de l'installation (niveaux et qualité de l'huile, régénération ou changements des éléments consommables...), mais également la prise en compte du dégazage des parois du microscope et des échantillons.

On peut réduire l'adsorption et donc le dégazage ultérieur, en utilisant un sas d'introduction ou de l'azote pur sous pression lors d'un changement d'échantillon.

Un grand soin doit être apporté également à la préparation et à la manipulation des échantillons (étuvage, usage des gants...).

	Pa	bar	mbar	torr	atm	mmHg
Pa	1	10^{-5}	10^{-2}	$7.5 \cdot 10^{-3}$	$9.869 \cdot 10^{-6}$	$7.5 \cdot 10^{-3}$
bar	10^5	1	10^3	750	0.9869	750
mbar	10^2	10^{-3}	1	0.75	$9.869 \cdot 10^{-4}$	0.75
torr	133.3224	$1.333 \cdot 10^{-3}$	1.33322	1	$1.3158 \cdot 10^{-3}$	1
atm	$1.013 \cdot 10^5$	1.013	1013	760	1	760
mmHg	133.3	$1.333 \cdot 10^{-3}$	1.33322	1	$1.3158 \cdot 10^{-3}$	1

Conversions entre les différentes unités de pression



Schémas de différentes pompes utilisées dans les MEB.
 (a) pompe primaire à palette, (b) pompe turbomoléculaire,
 (c) pompe à diffusion d'huile, (d) pompe ionique

(document F. Roussel-Dherbey, F. Charlot -CMT-)

Comparaison des sources ioniques (Ga⁺) et électroniques

Particle	type	Ga ⁺ ion	electron	
	elementary charge	+1	-1	
	particle size	0.2 nm	0.00001 nm	20'000
	mass	1.2 .10 ⁻²⁵ kg	9.1.10 ⁻³¹ kg	130'000
	velocity at 30 kV	2.8.10 ⁵ m/s	1.0 10 ⁸ m/s	0.0028
	velocity at 2 kV	7.3.10 ⁴ m/s	2.6.10 ⁷ m/s	0.0028
	momentum at 30 kV	3.4.10 ⁻²⁰ kgm/s	9.1.10 ⁻²³ kgm/s	370
	momentum at 2 kV	8.8.10 ⁻²¹ kgm/s	2.4.10 ⁻²³ kgm/s	370
Beam	size	nm range	nm range	
	energy	up to 30 kV	up to 30 kV	
	current	pA to nA range	pA to uA range	
Penetration depth	In polymer at 30 kV	60 nm	12000 nm	
	In polymer at 2 kV	12 nm	100 nm	
	In iron at 30 kV	20 nm	1800 nm	
	In iron at 2 kV	4 nm	25 nm	
Average electrons signal per 100 particles at 20 kV	secondary electrons	100 - 200	50 - 75	
	back scattered electron	0	30 - 50	
	substrate atom	500	0	
	secondary ion	30	0	
	x-ray	0	0.7	

Source Marco Cantoni (EPFL)

BIBLIOGRAPHIE et crédits photos

- Focused Ion Beam Systems: Basics and Applications**, Nan Yao (Editor), Cambridge,

- Introduction to Focused Ion Beams : Instrumentation, Theory, Techniques and Practice**
Lucille A. Giannuzzi (Editor), North Carolina State University (Editor)

- High Resolution Focused Ion Beams : FIB and Applications** by Jon Orloff, Lynwood Swanson and Mark Utlaut, Kluwer Academic/plenum Publishers

- Exposés de la réunion GN MEBA de décembre 2011**, de Frédéric Charlot (CMTC) et de Guillaume Audoit (LETI)