



Interactions "Ions-Matière"

GNMEBA 1 et 2 décembre 2011
UPMC,
4, Place JUSSIEU Paris 5
Amphithéâtre 15

Jean-Claude MENARD



Association SEM – FIB



source d'ions : LMIS Ga

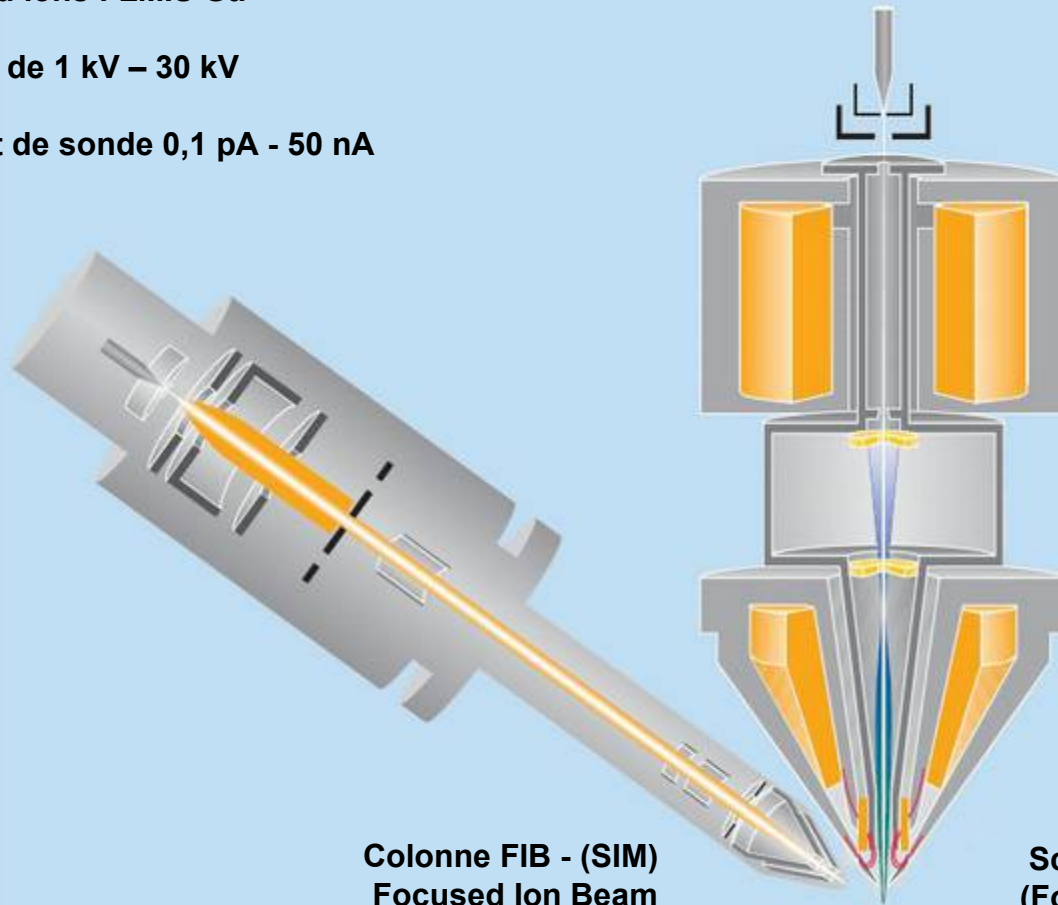
Energie de 1 kV – 30 kV

Courant de sonde 0,1 pA - 50 nA

source d'électrons : FEG

Energie de 1 kV – 30 kV

Courant de sonde 5 pA – qqs 100 nA



**Colonne FIB - (SIM)
Focused Ion Beam
Scanning Ion Microscope**

**Colonne SEM - (FEB)
Scanning Electron Microscope
(Focused Electron Microscope)**

Particules : dimensions et masses



Ion ($\text{Ga}^+ / \text{Ga}^{2+}$:)

rayon : $\sim 150 \text{ pm}$ ($1,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$)

masse : $\sim 10^{-27} \text{ kg}$

Electron e^-

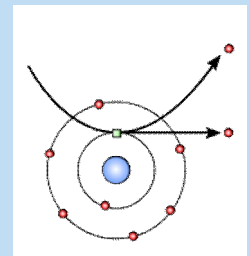
rayon : $\sim 0,003 \text{ pm}$ ($3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$)

masse : $\sim 10^{-30} \text{ kg}$

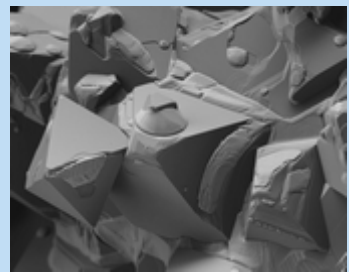
**Colonne FIB
(Focused Ion Beam)**

**Colonne SEM
(Scanning Electron Microscope)**

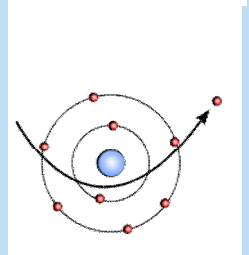
Rappel sur les principales interactions électrons / matière



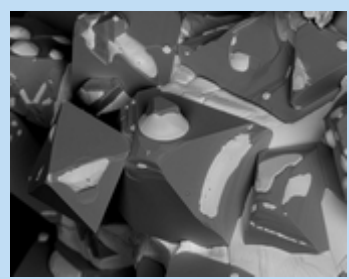
Électron secondaire



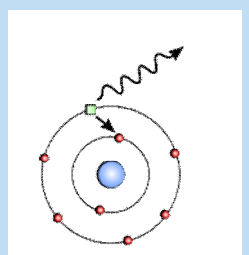
Topographie



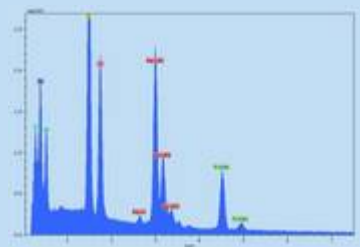
Électron rétro-diffusé



Contraste de numéro atomique



Rayonnement X



Caractérisation chimique

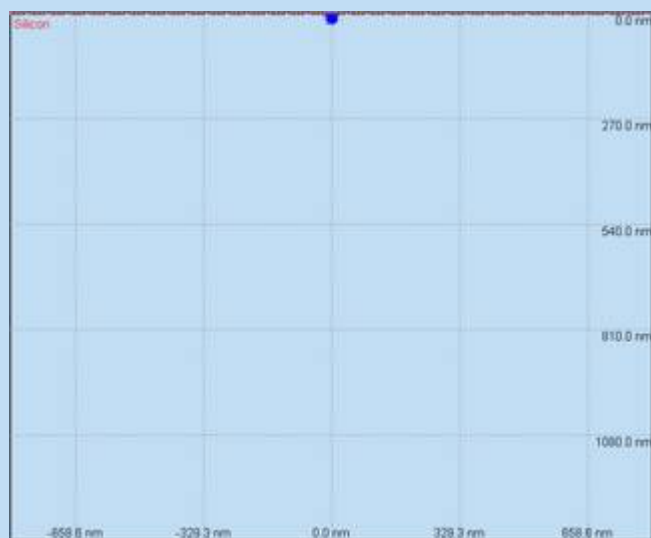
(I absorbé, e- transmis, e- Auger, Cathodo, ...)

* Composé $\text{Bi}_2\text{Ca}_2\text{Co}_{1.69}\text{O}_x$
Avec l'autorisation du Laboratoire CRISMAT -ENSICAEN

Influence de l'énergie du faisceau électronique primaire



1 kV



10 kV

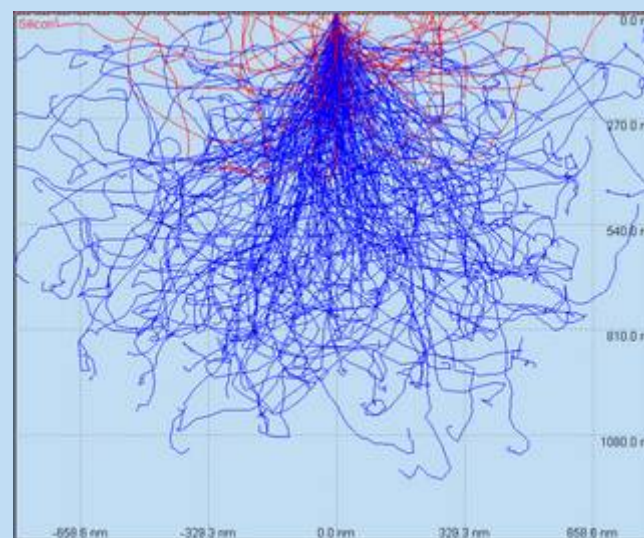
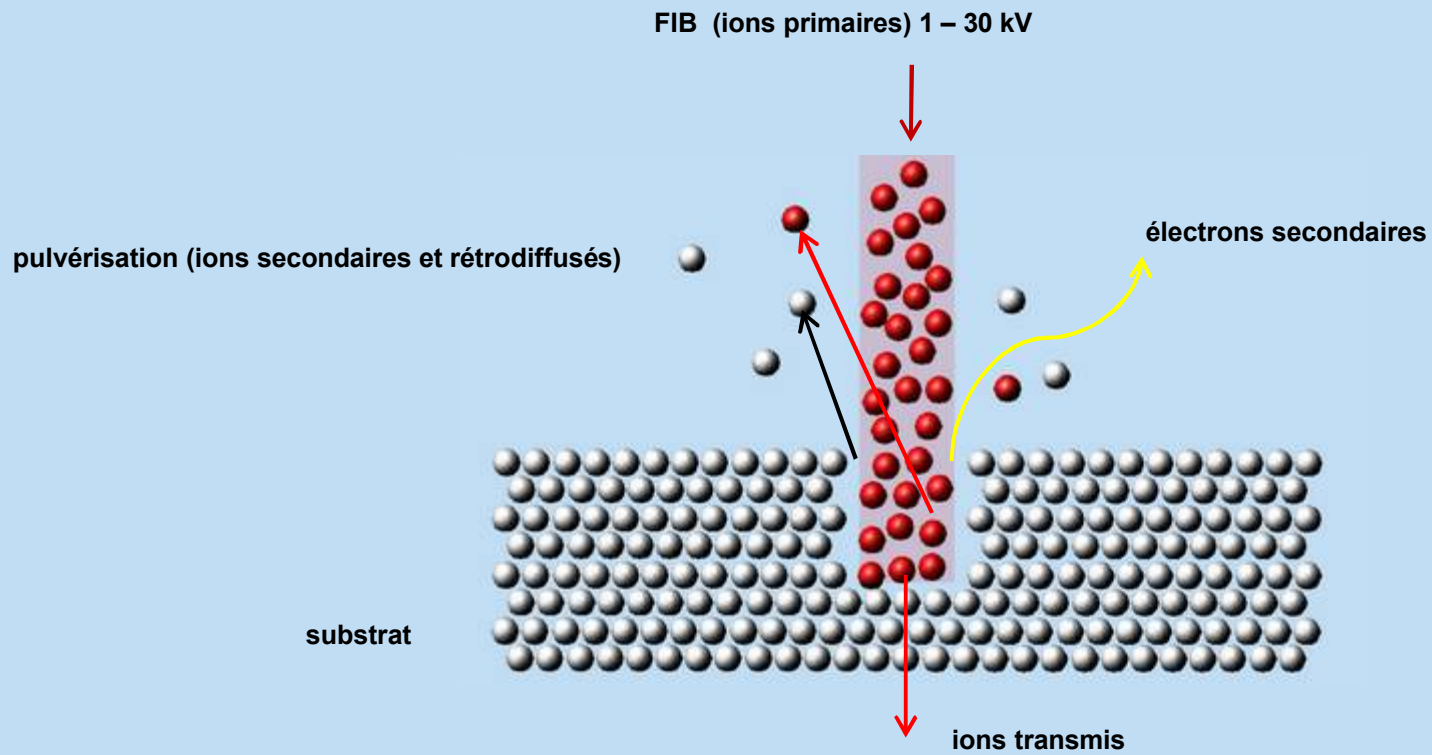


Fig. 1 : Simulations de trajectoires des électrons par méthode Monte- Carlo : volume d'interactions électronique / Si à 1 kV et 10 kV

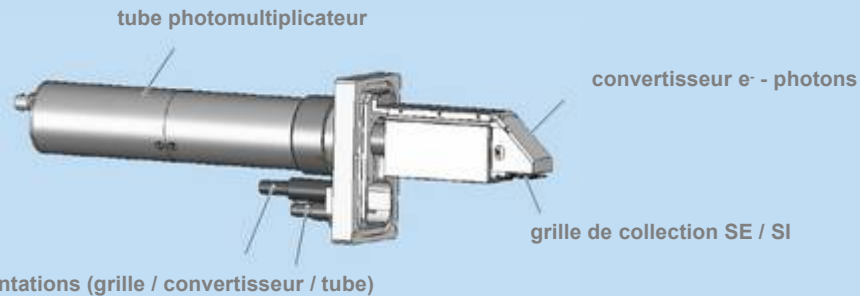
Interactions ions - matière



Pulvérisation de la matière (endommagement) :

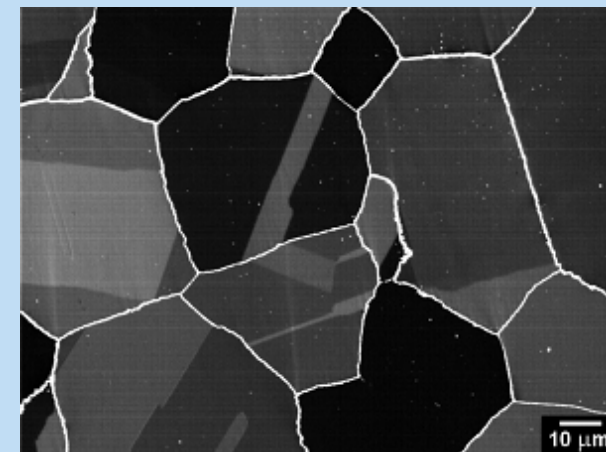
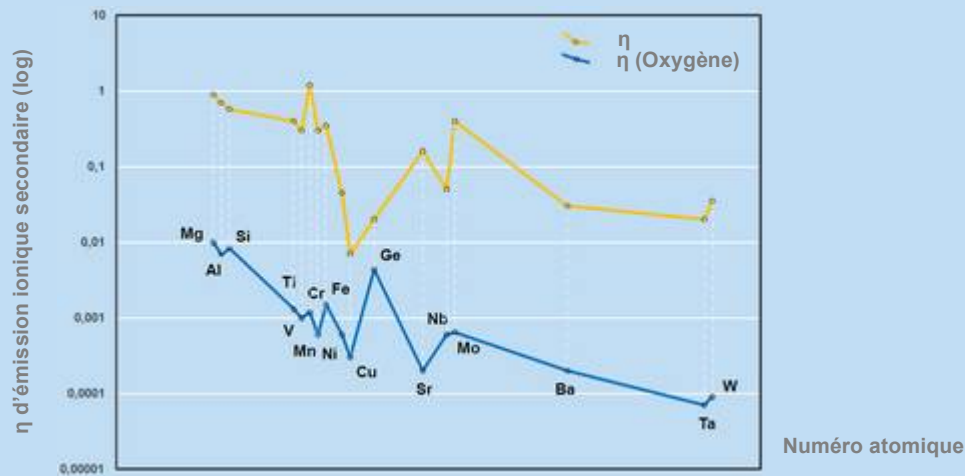


Détection des électrons / ions



▪ **Mode SE2**, les électrons secondaires sont accélérés et amplifiés par le potentiel *positif* de la grille. Les électrons secondaires (bis) sont convertis par un scintillateur puis photo-multipliés.

▪ **Mode SI**, les ions sont accélérés par le potentiel *négalif* de la grille puis convertis en électrons secondaires qui comme en détection SE2 suivent la même chaîne de conversion.



Corrosion inter granulaire dans super alliage Ni

Interactions ions - matière

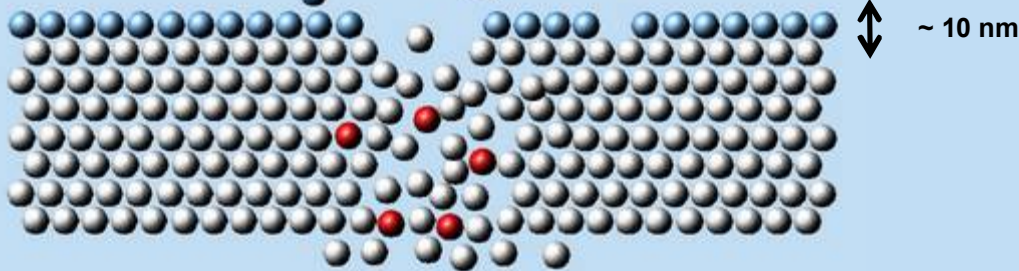


Spectrométrie de Masse (SIMS) :

FIB (ions primaires) 1 – 30 kV



ions secondaires (0 – 30 eV)



Cartographie par rayonnement X – technique EDS (WDS)

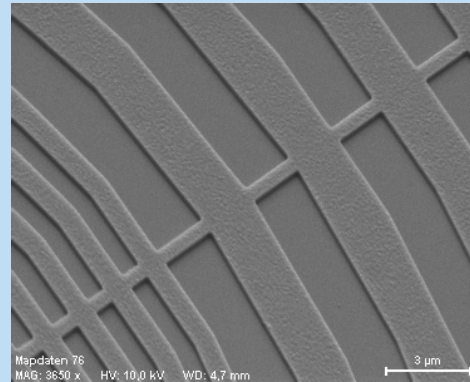
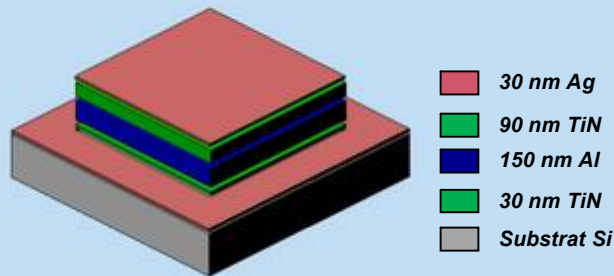
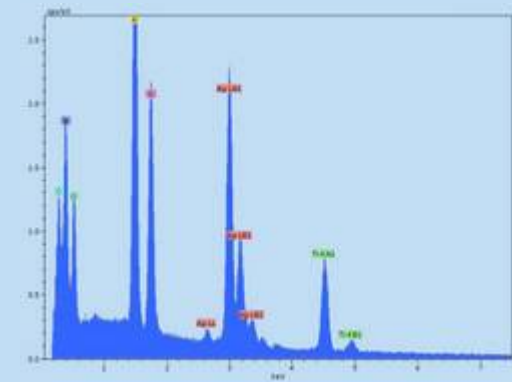
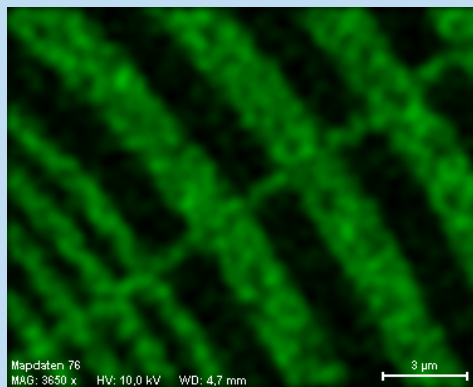


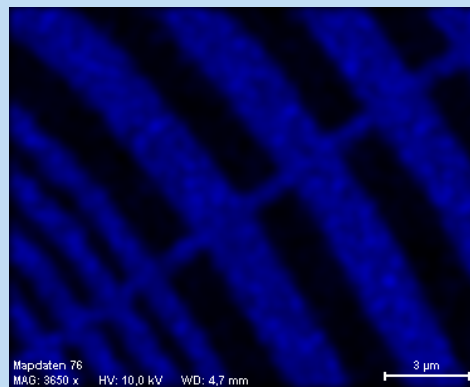
Image en **SE**



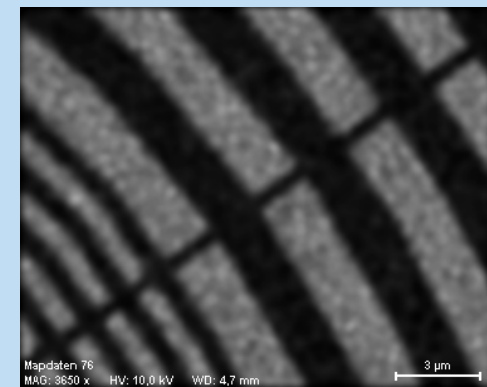
Spectre caractéristique en énergie



Cartographie **Ti**



Cartographie **Al**



Cartographie **Si**

Cartographie par rayonnement X – technique SIMS

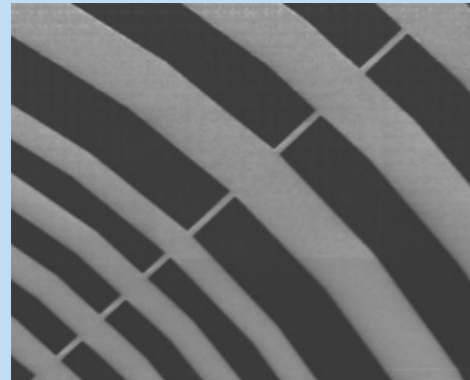
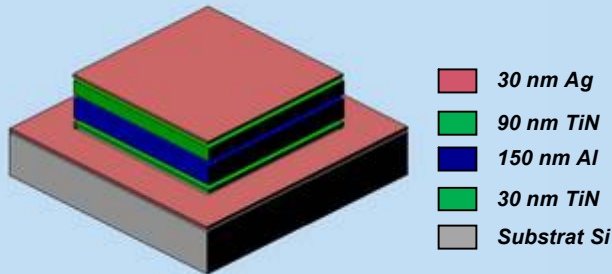
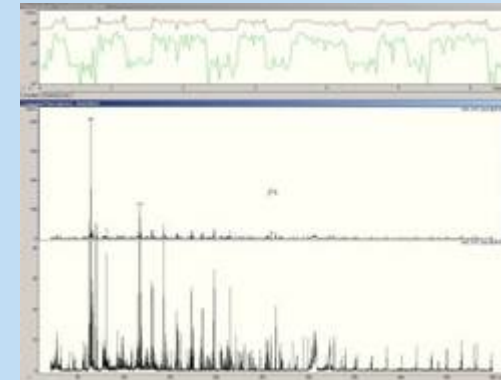
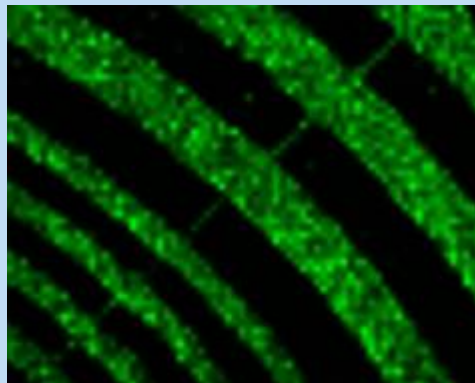


Image **SE**



Spectre caractéristique



Cartographie **Ti**

Analyse de surface, bonne résolution latérale, relative excellente résolution en profondeur.

Spectrométrie des ions (SIMS), intégration



Spectromètre de masse - Hiden EQS 1000

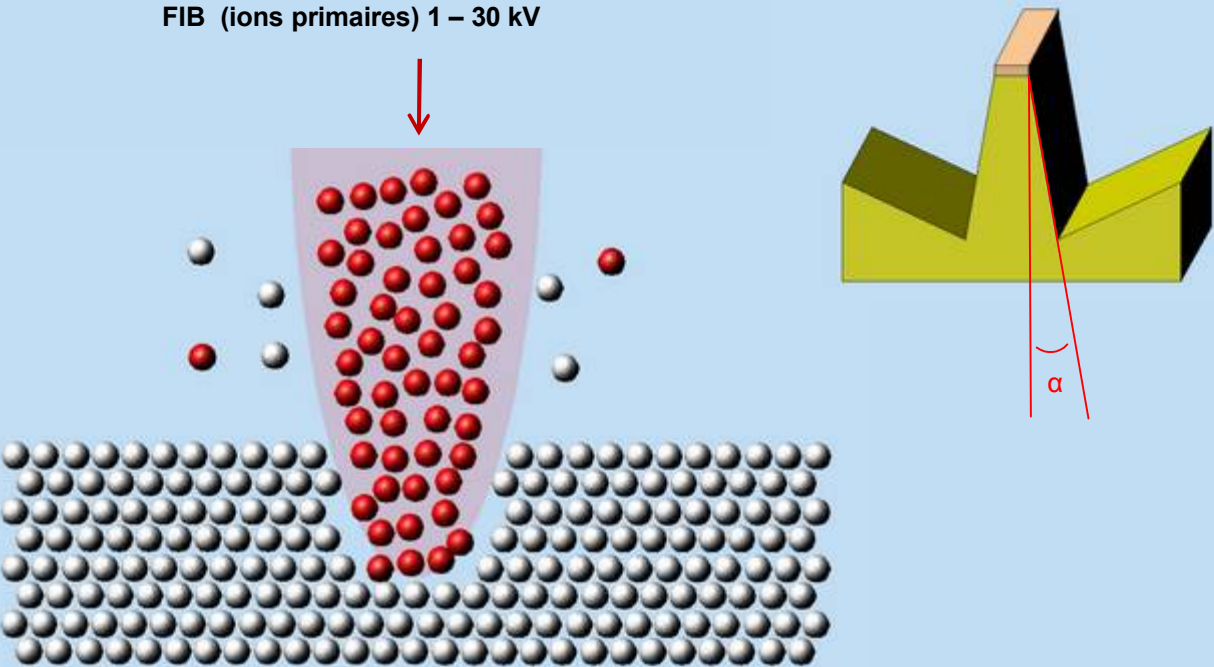


Incorporé sur instrument SEM + FIB

Interactions ions - matière



Caractéristique gaussienne de la sonde :



Transparence aux électrons :



The diagram illustrates the interaction of an electron beam with a sample. A green beam labeled **SEM** (Secondary Electron Microscopy) is directed at a yellow sample. A red beam labeled **FIB** (Focused Ion Beam) is also directed at the sample. Electrons (e^-) are emitted from the sample, with some being collected by a **détecteur In-Lens** and others by a **détecteur SE ET** (Everhart-Thornley detector).

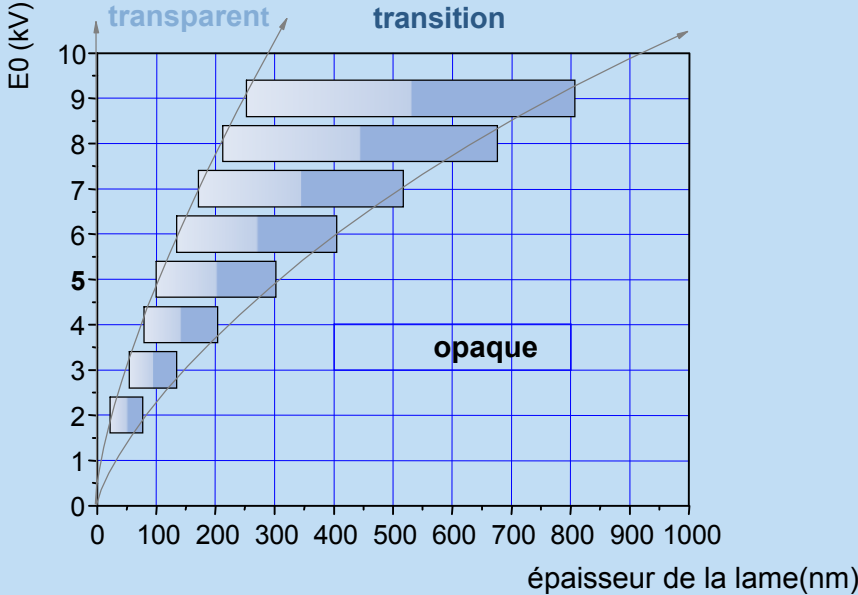
Two SEM images show the same sample structure. The left image is labeled **détection SE In-Lens : information de surface** and shows surface details. The right image is labeled **détection SE Everhart & Thornley : information d'épaisseur** and shows the thickness of the structure.

Technical data for both SEM images:

Mag	WD	EXT	Signal A	Date	Time
4.00 K X	5 mm	5.00 kV	E50	03 Sep 2006	16:29:43

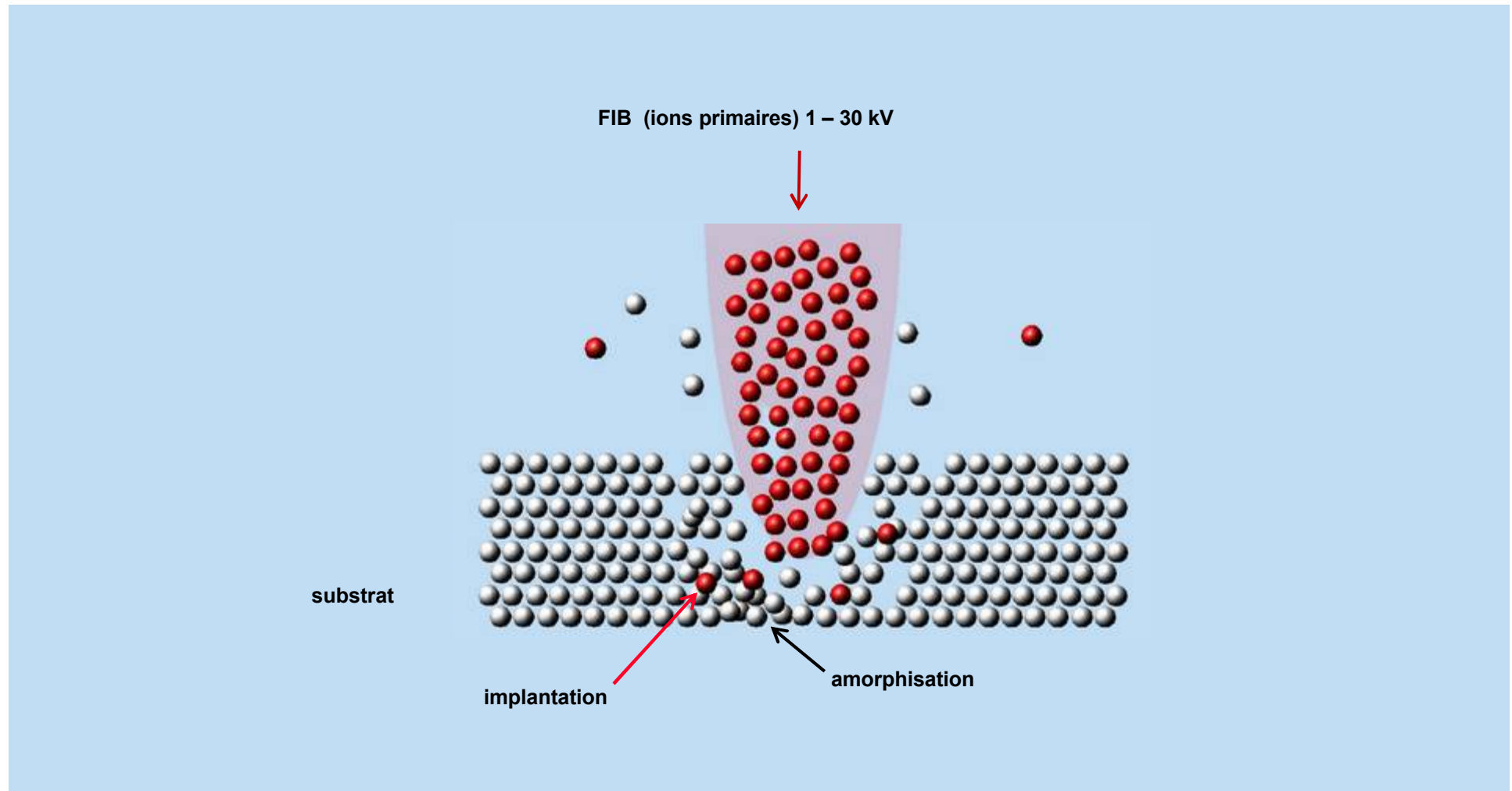
Additional parameters: NVision 40, FIB Mode - Imaging, Pixel Size = 27.9 nm, FIB Probe = 10 pA, System Vacuum = 4.9Pa 886 mBar.

Transparence aux électrons

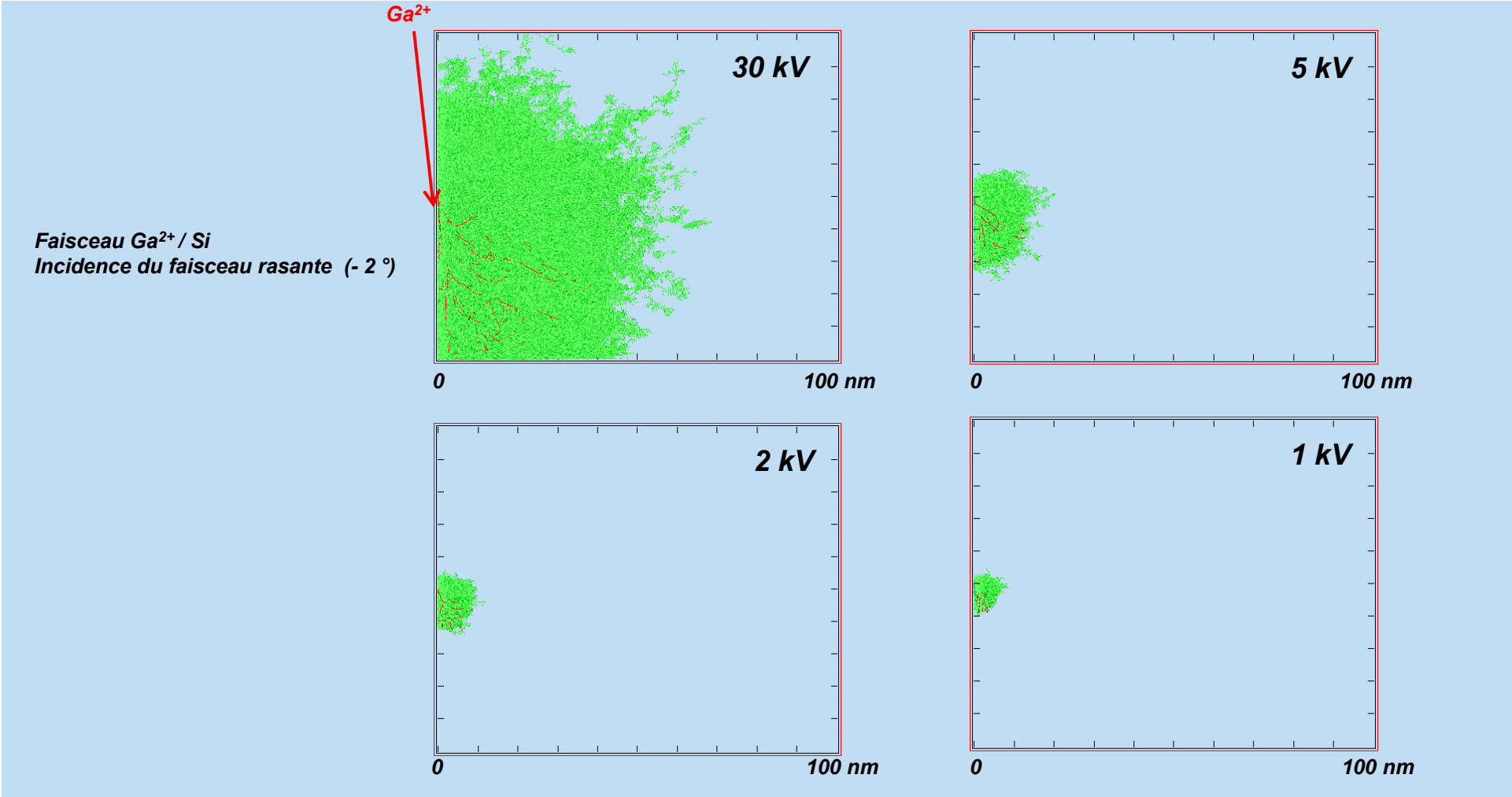


Transparence sur lame de Si = f (E0)

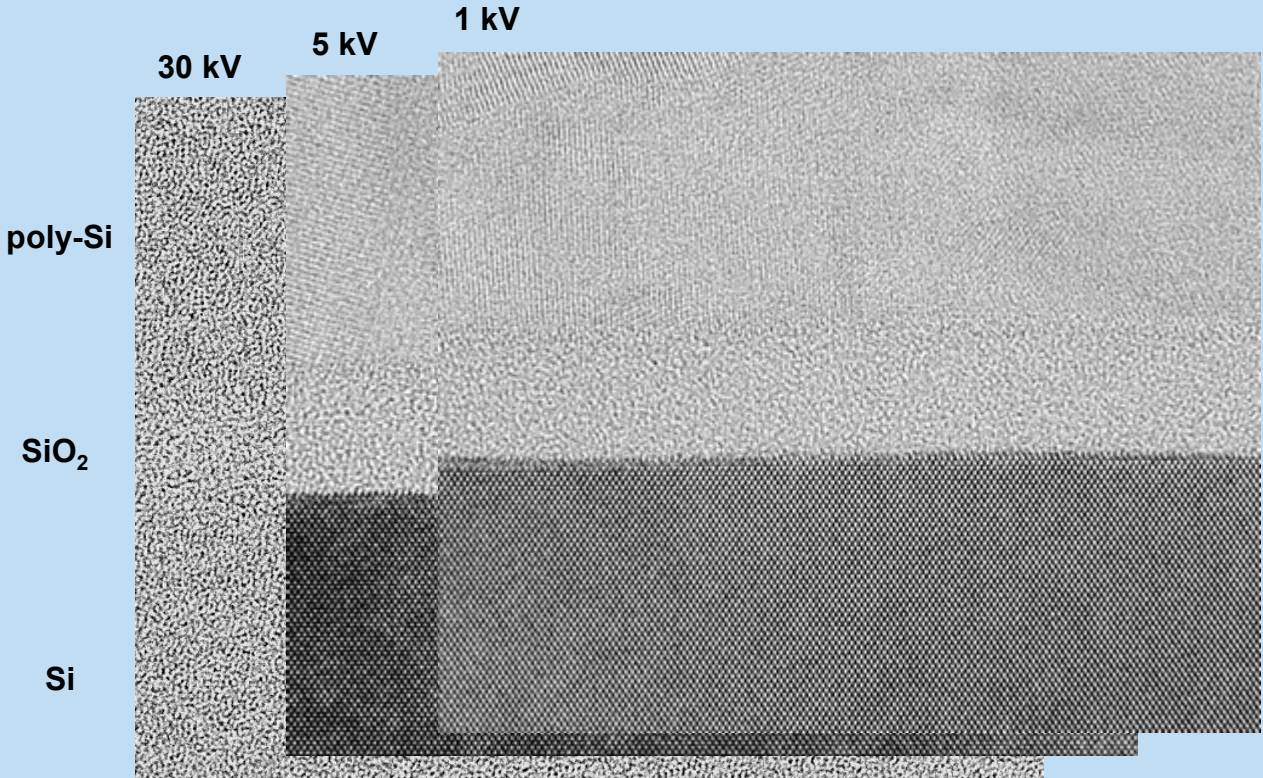
Amorphisation – Implantation d'ions



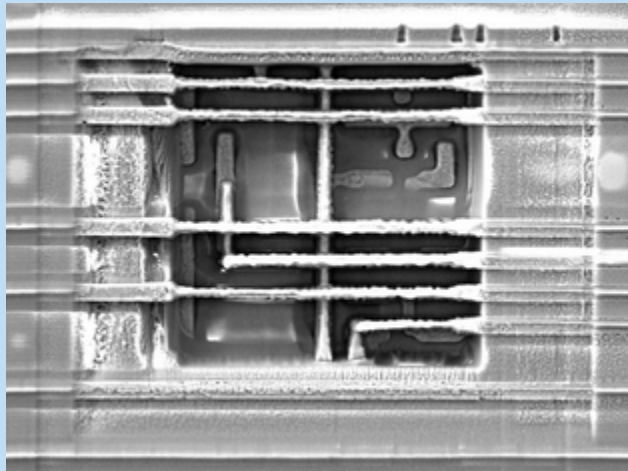
Amorphisation – Implantation d'ions



Observation en MET



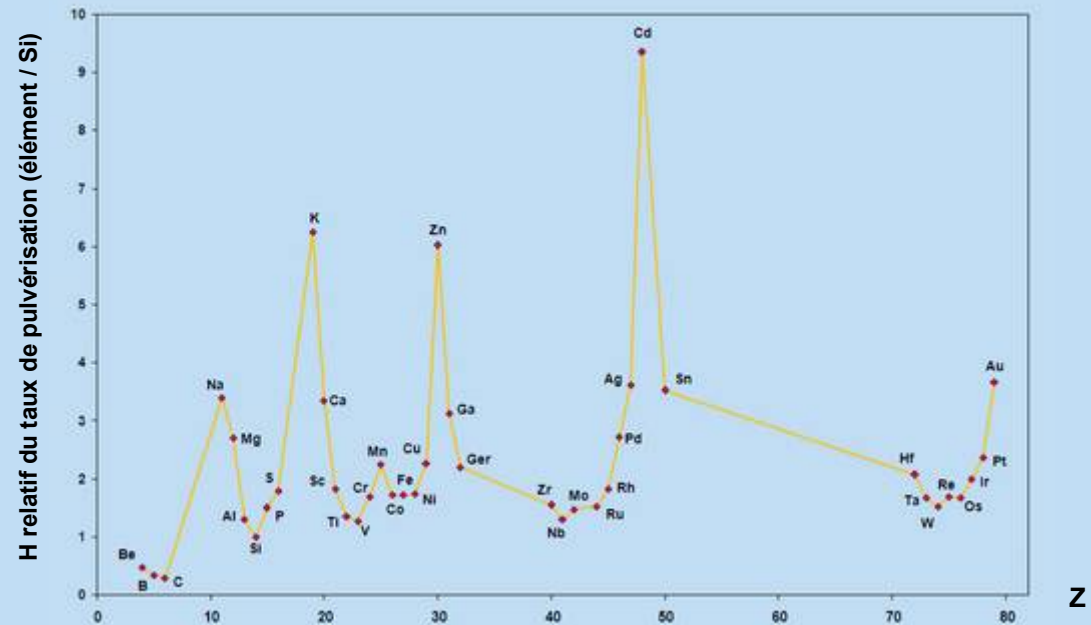
Comparaisons des taux de pulvérisation



Squelettisation d'un circuit par abrasion sélective = $f(Z)$

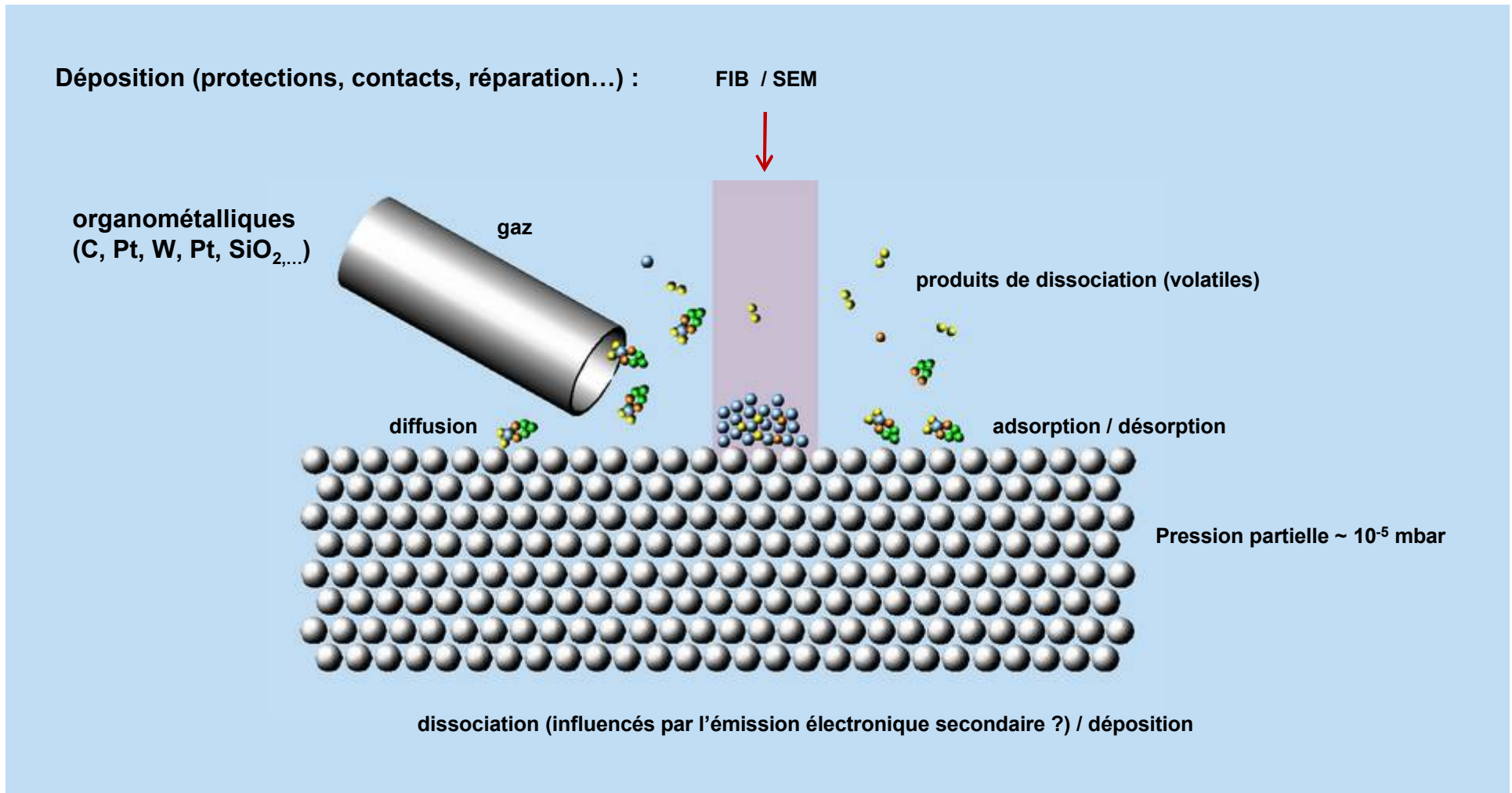
Quelques taux de pulvérisation :

- diamant: $200 \mu\text{m}^3/\mu\text{As}$
- Al_2O_3 : $270 \mu\text{m}^3/\mu\text{As}$
- Si: $1600 \mu\text{m}^3/\mu\text{As}$



majoration du courant de sonde ionique ou assistance gazeuse...

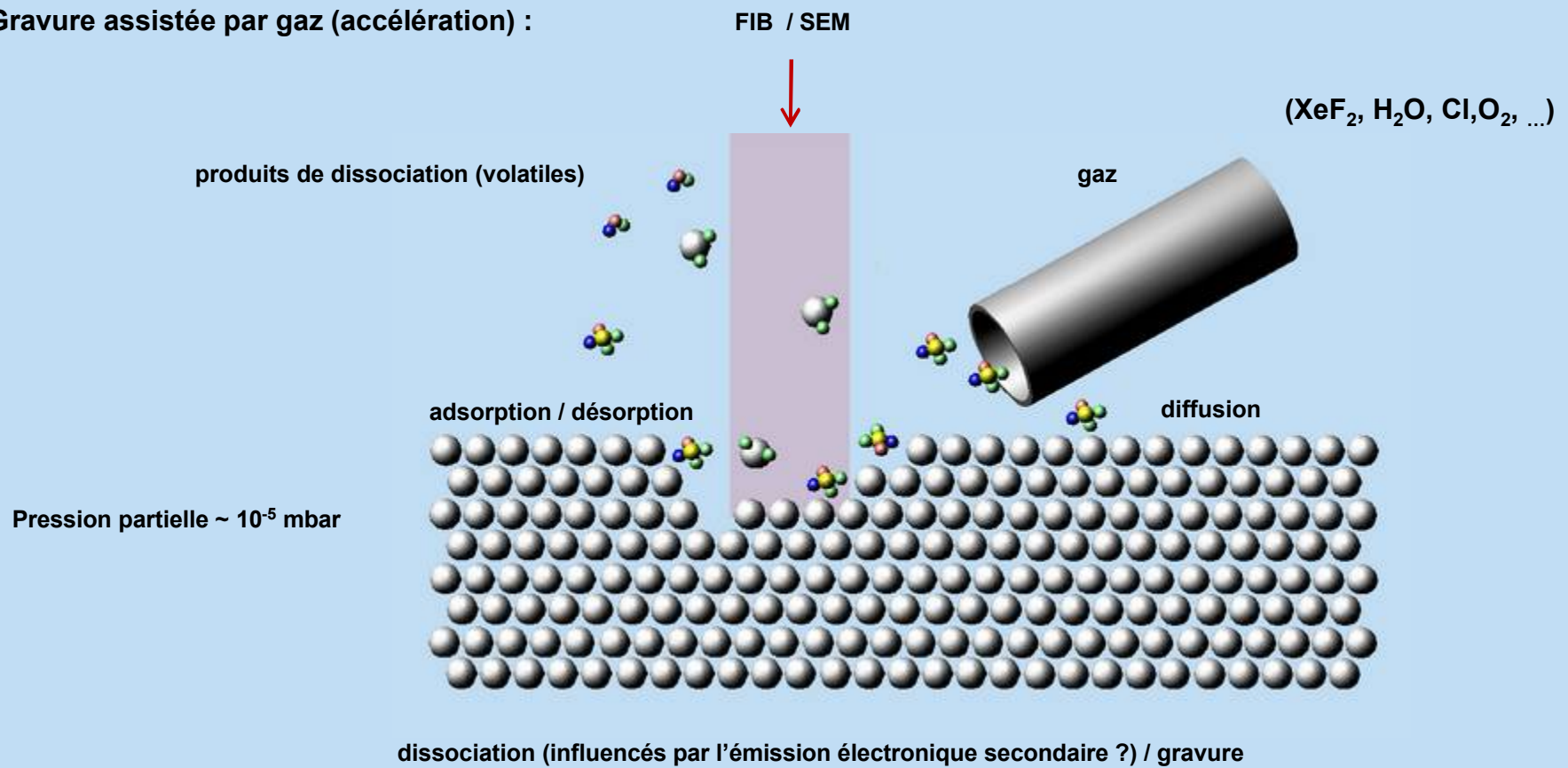
Injecteurs – gaz précurseurs



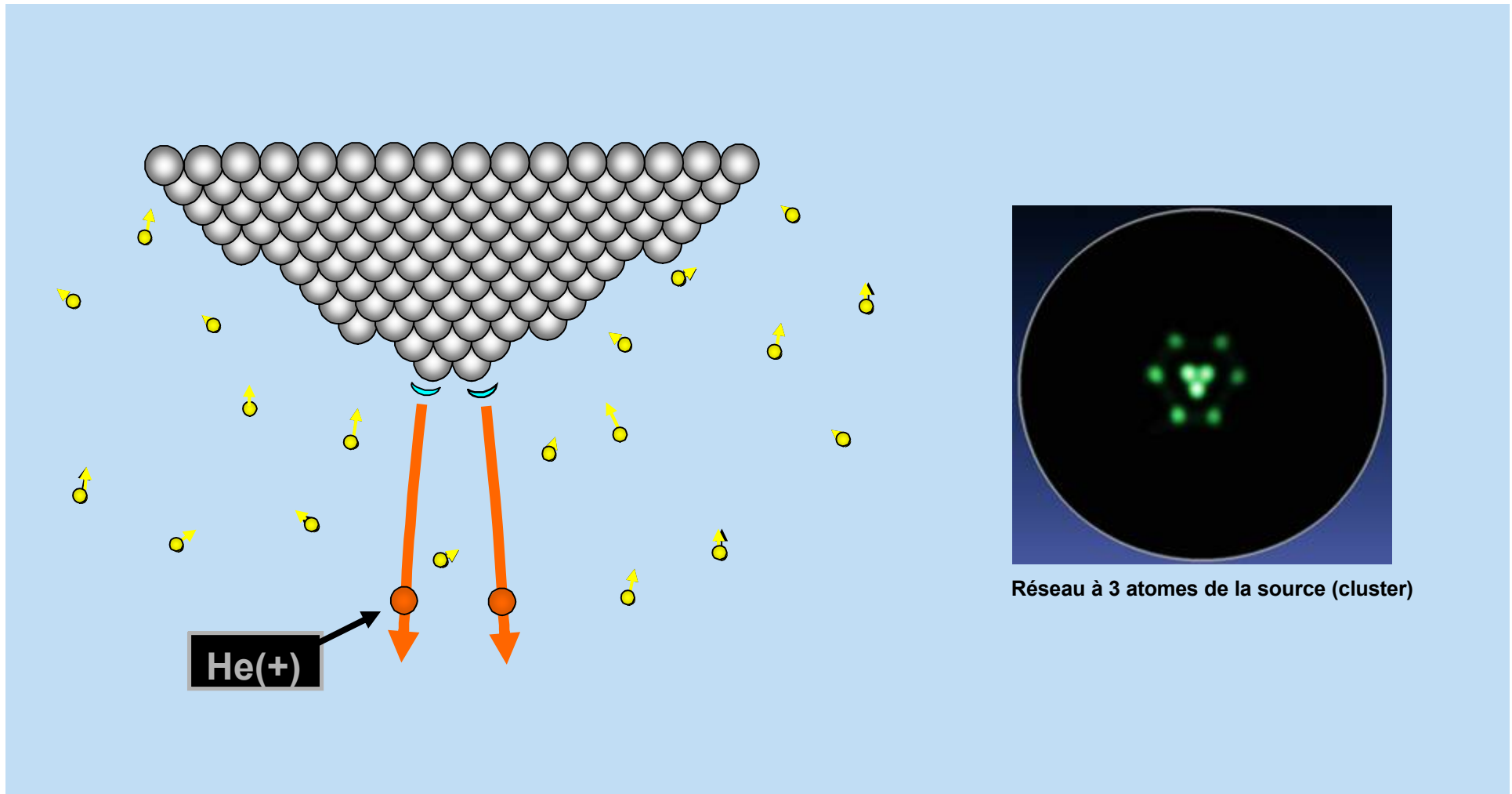
Injecteurs – gaz précurseurs



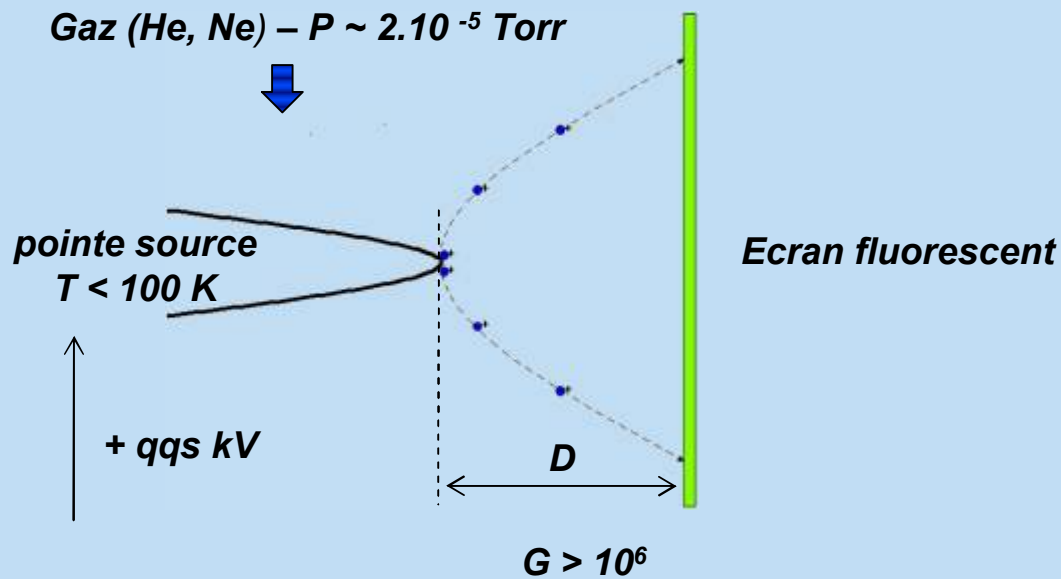
Gravure assistée par gaz (accélération) :



FIM (FIB) à Source He



Historique - 1951



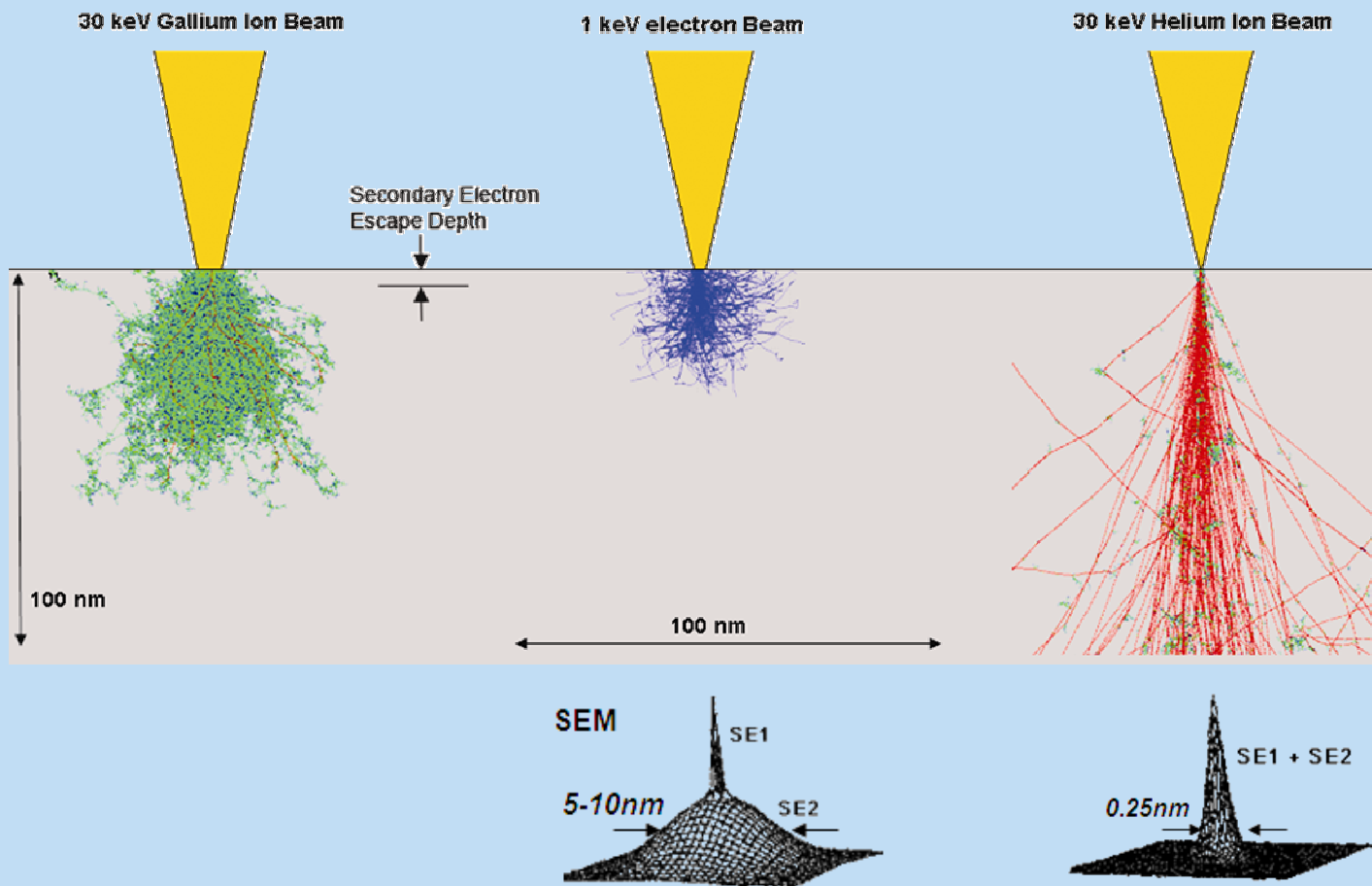
Erwin Müller – (1911 -1977)

Spectromètre de masse à temps de vol : sonde atomique

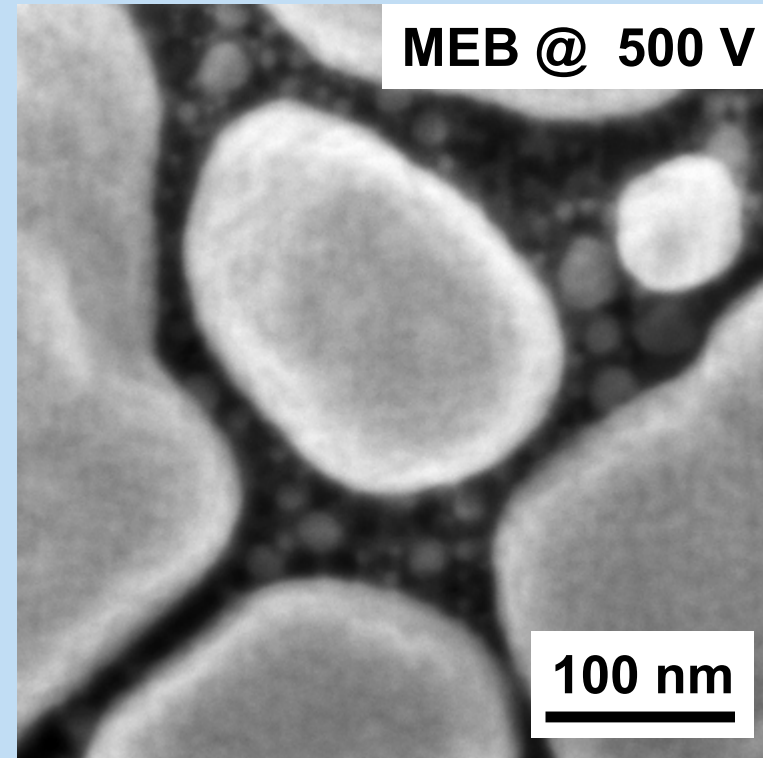
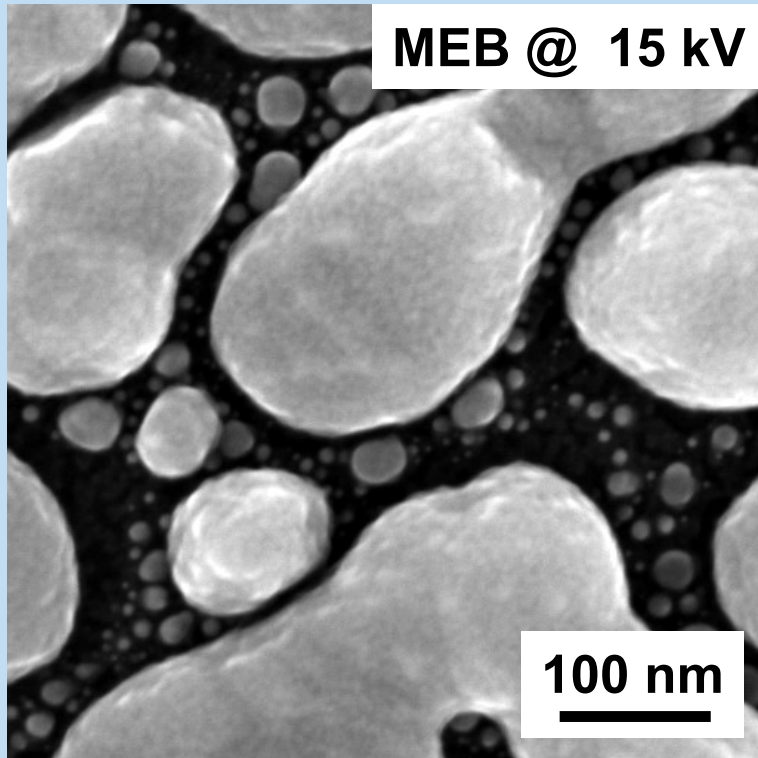
- Nature des atomes
- Détection spatiale

FIM (Field Ion Microscope) : Microscope Ionique à émission de champ...

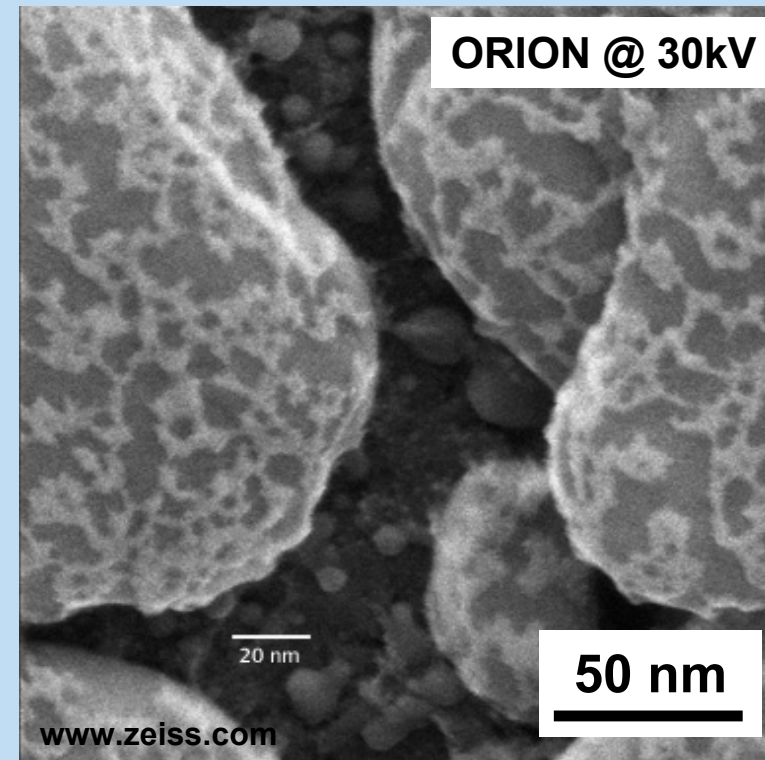
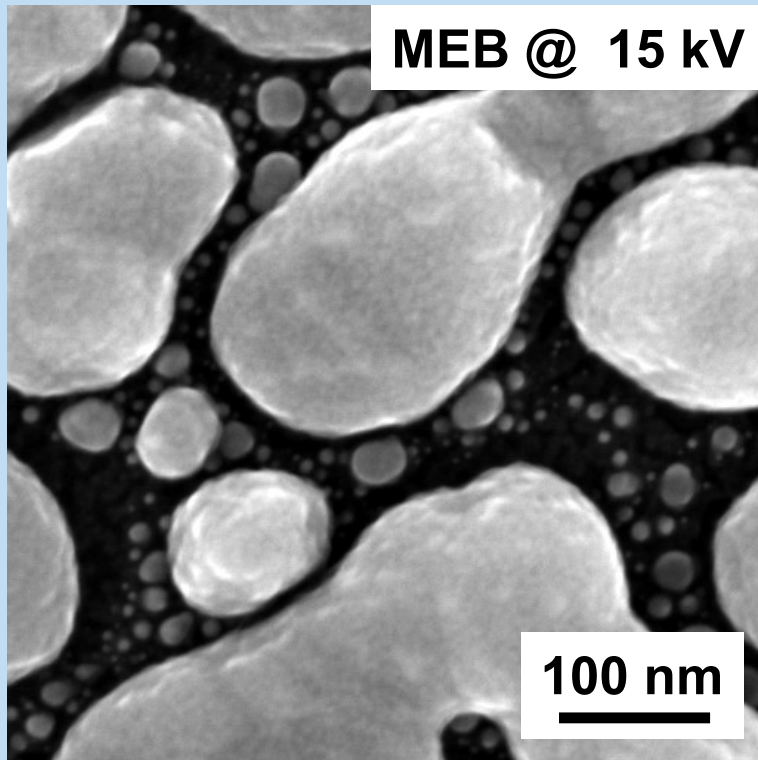
FIM (FIB) à Source He



(électrons secondaires) échantillon Au / C



(électrons secondaires) échantillon Au/ C



FIM (FIB) à Source He - imagerie



Electrons secondaires

Information de surface
Rendement d'émission SE fonction du matériau

Energie SE ~5 eV
Zone d'échappée des SE ~ nm

Ions rétrodiffusés

Information de composition
Rendement en rétrodiffusé = $f(Z^2)$ de l'échantillon
Energie RBI ~ qqk kV
Information de topographie minimisée
Pas dépendant des charges de surface

Ions transmis

Information de composition
Rendement en transmission = $\sim f(Z^2)$ du matériau traversé
Information cristallographique

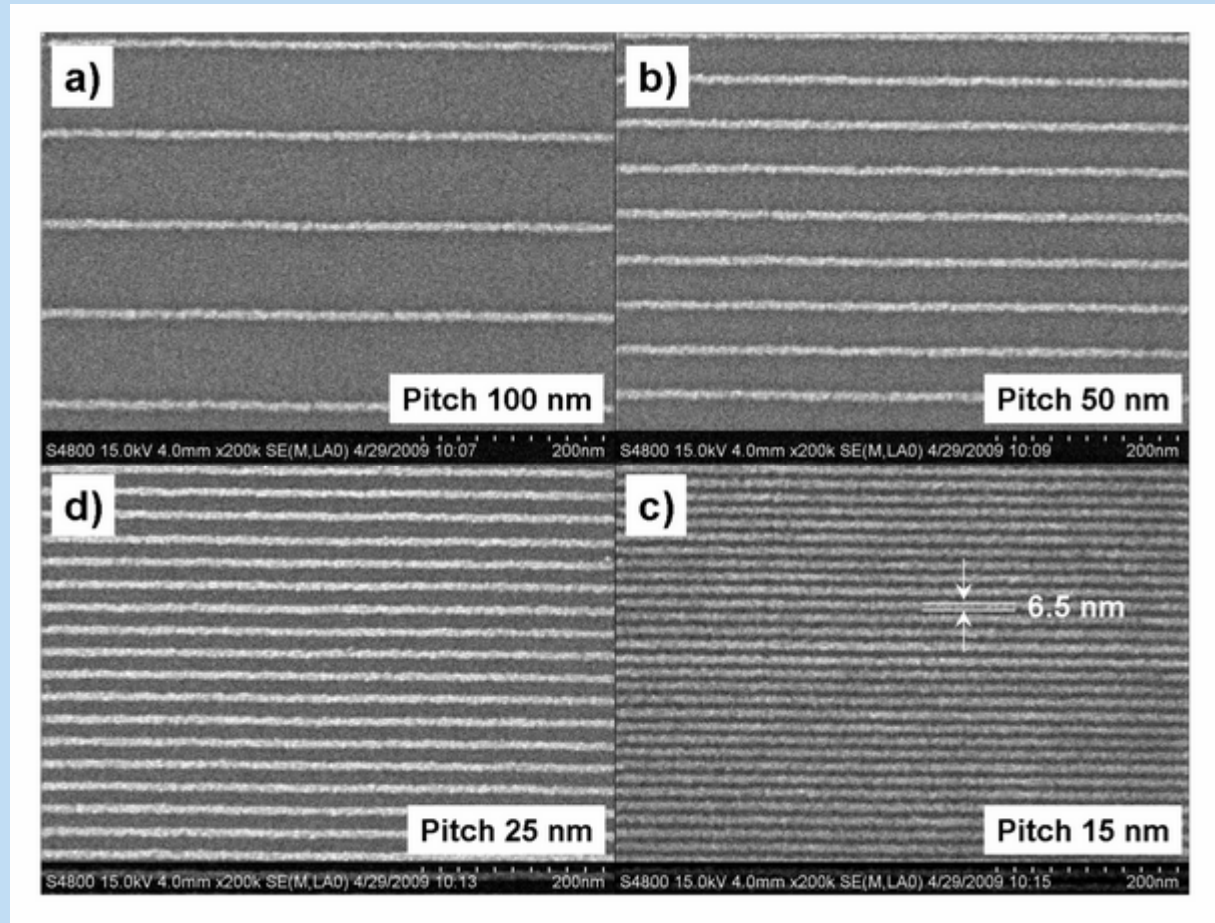
Autres contrastes

Contraste de canalisation
Contraste de potentiel
"luminescence"

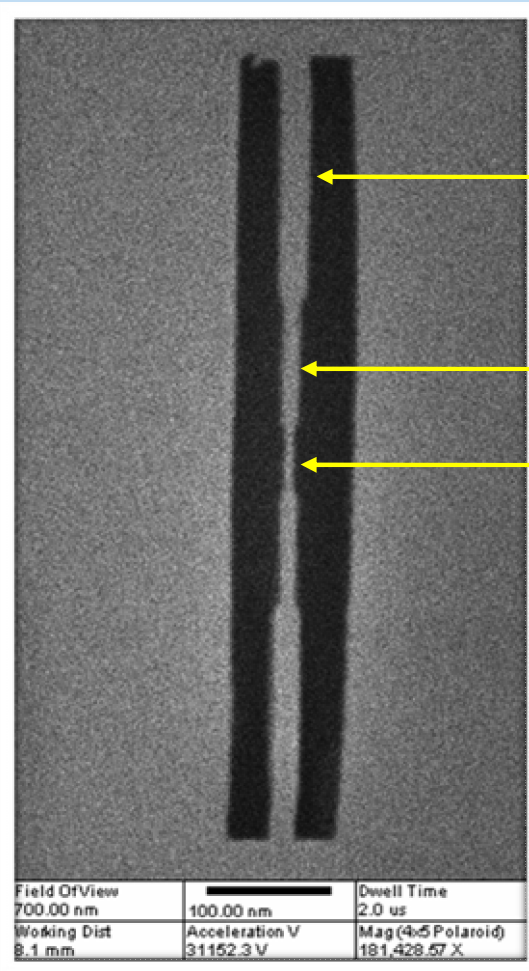
FIM – FIB He – lithographie ionique



Substrat HSQ
Taille des lignes : 6,5 nm...



FIM – FIB He – nano patterning



20nm

10nm

5nm

Field OfView	100.00 nm	Dwell Time
700.00 nm		2.0 us
Working Dist	Acceleration V	Mag (4x5 Polaroid)
8.1 mm	31152.3 V	181,428.57 X

Film de Graphène



SIMS : Secondary Ion Mass Spectrometry

MEMS : Micro Electro Mechanical Systems

TEM : Transmission Electron Microscope

FIM : Focused Ion Microscope

FEB : Focused Electron Beam

CVD : Chemical Vapor Deposition

GAE : Gas Assisted Etching

HSQ : Hydrogen SilsesQuioxane



Références :

***High Resolution Focused Ion Beams – FIB and Its Applications (Jon Orloff, Mark Utlaut and Lynwood Swanson)
ISBN 0-306-47350-X***

***Microscopie électronique à balayage et Microanalyses (François BRISSET, Monique REPOUX, Jacky RUSTE, François GRILLON et
Florence ROBAUT)***

***Gas-assisted focused electron beam and ion beam processing and fabrication (Ivo UTKE, Patrick HOFFMANN, John MELNGAILIS) Review
article 11 August 2008***

Le microscope à ions Hélium ORION™, réunion GNMEBA (2 et 3 décembre 2010 Les Cordeliers, PARIS, Jean-Claude MENARD)

Remerciements :

Peter GNAUCK Carl ZEISS NTS

Merci de votre attention...