



Fonctionnement d'un laser femtoseconde installé sur le sas d'introduction d'un MEB/FIB

GNMEBA

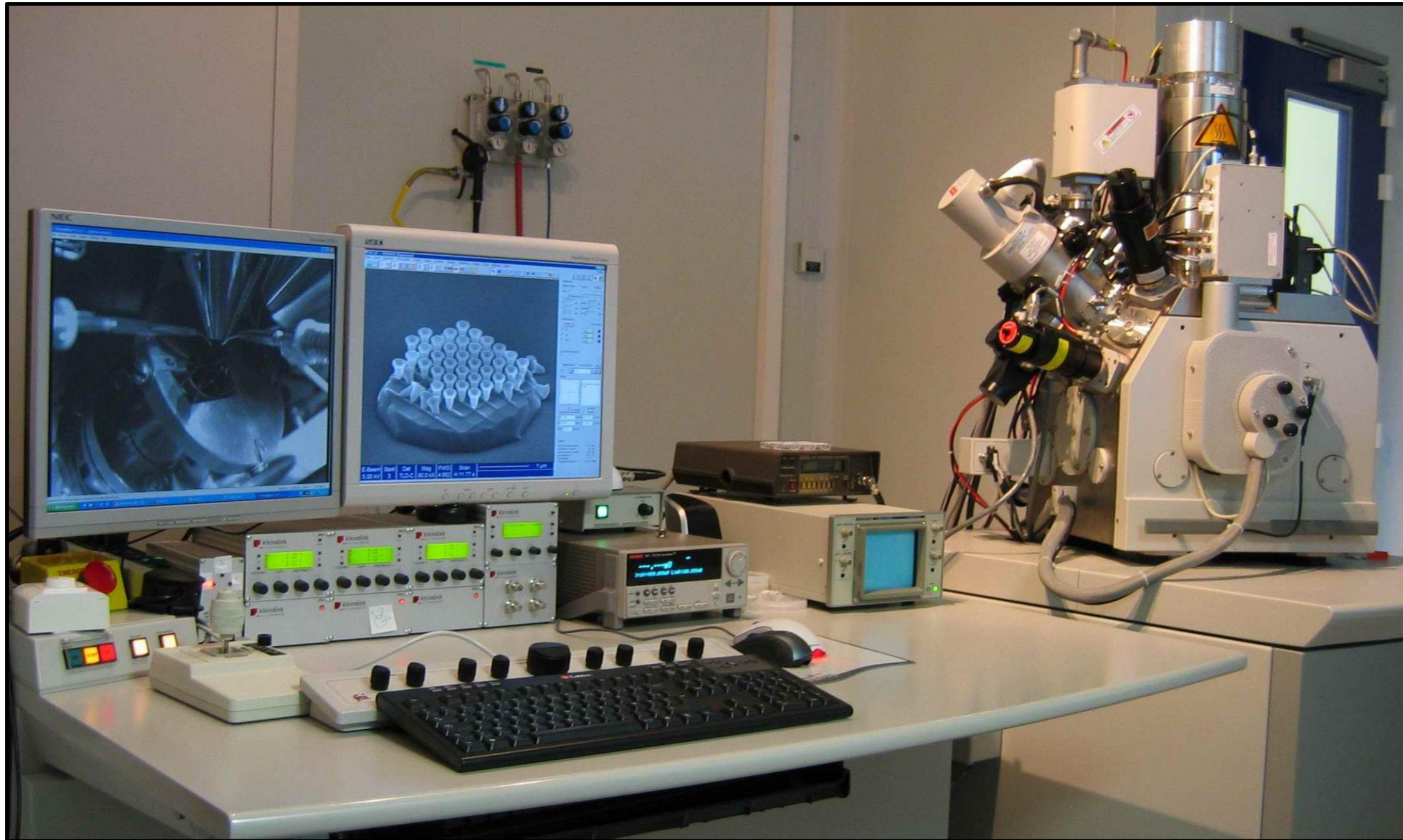
Journées pédagogiques

4 au 5 décembre 2023

David Troadec

IEMN - Université de Lille

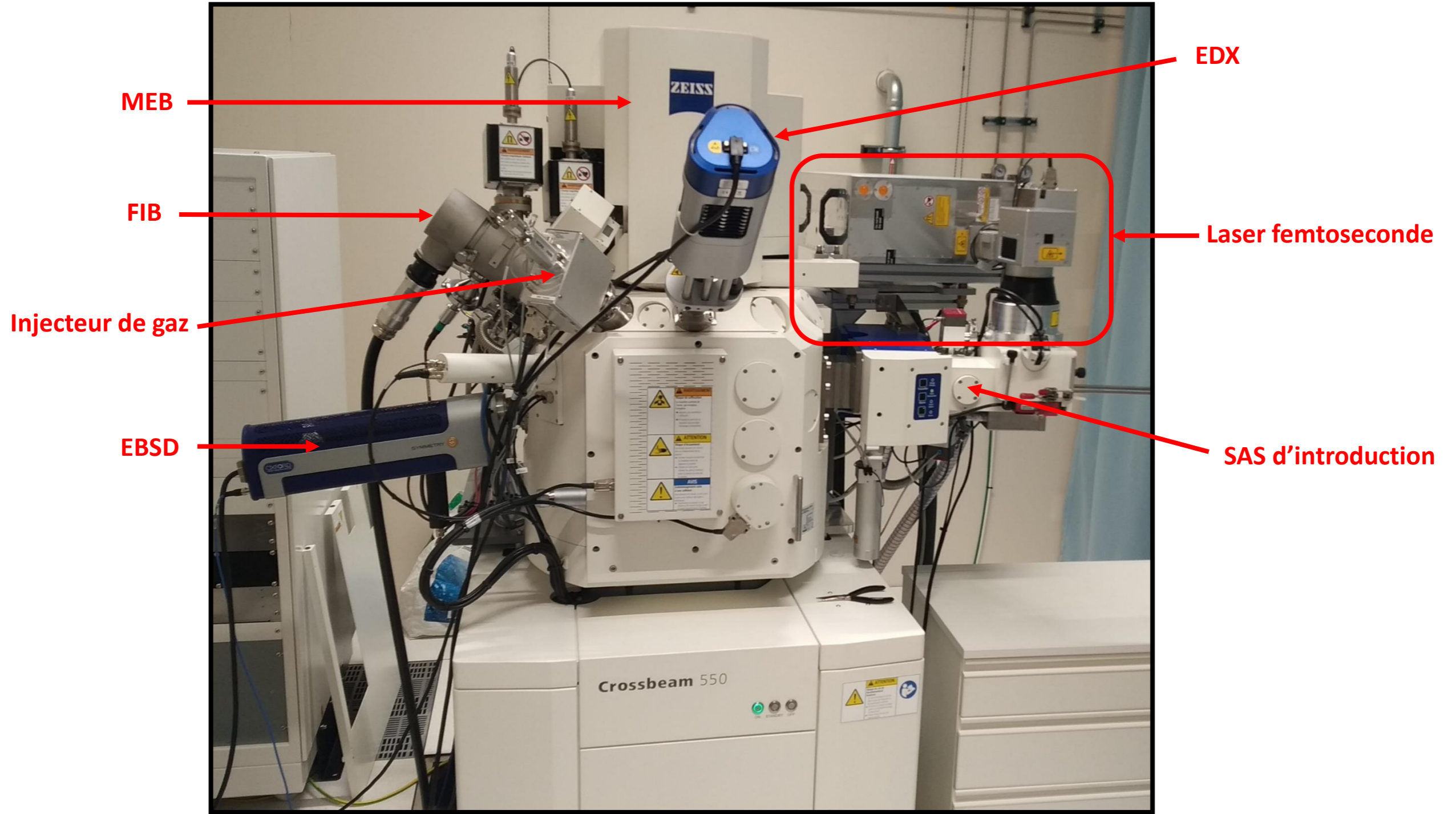
Precedent microscope : FEI - STRATA DualBeam 235 (2003-2022)



Nouveau microscope : Zeiss - Crossbeam 550L (2022-...)



Presentation du microscope

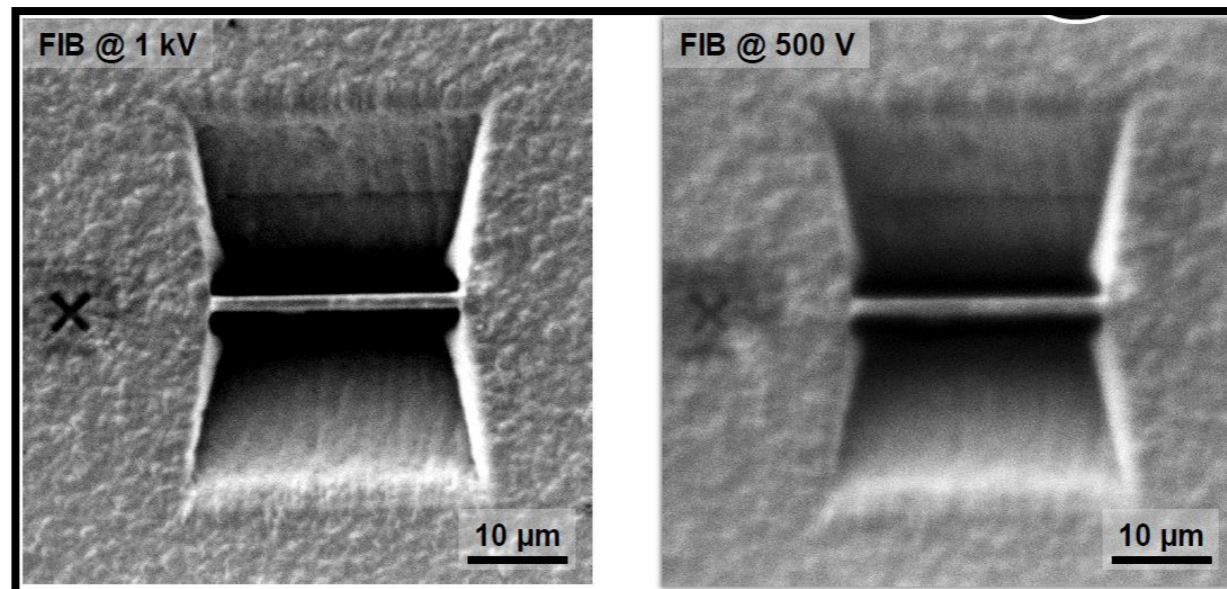
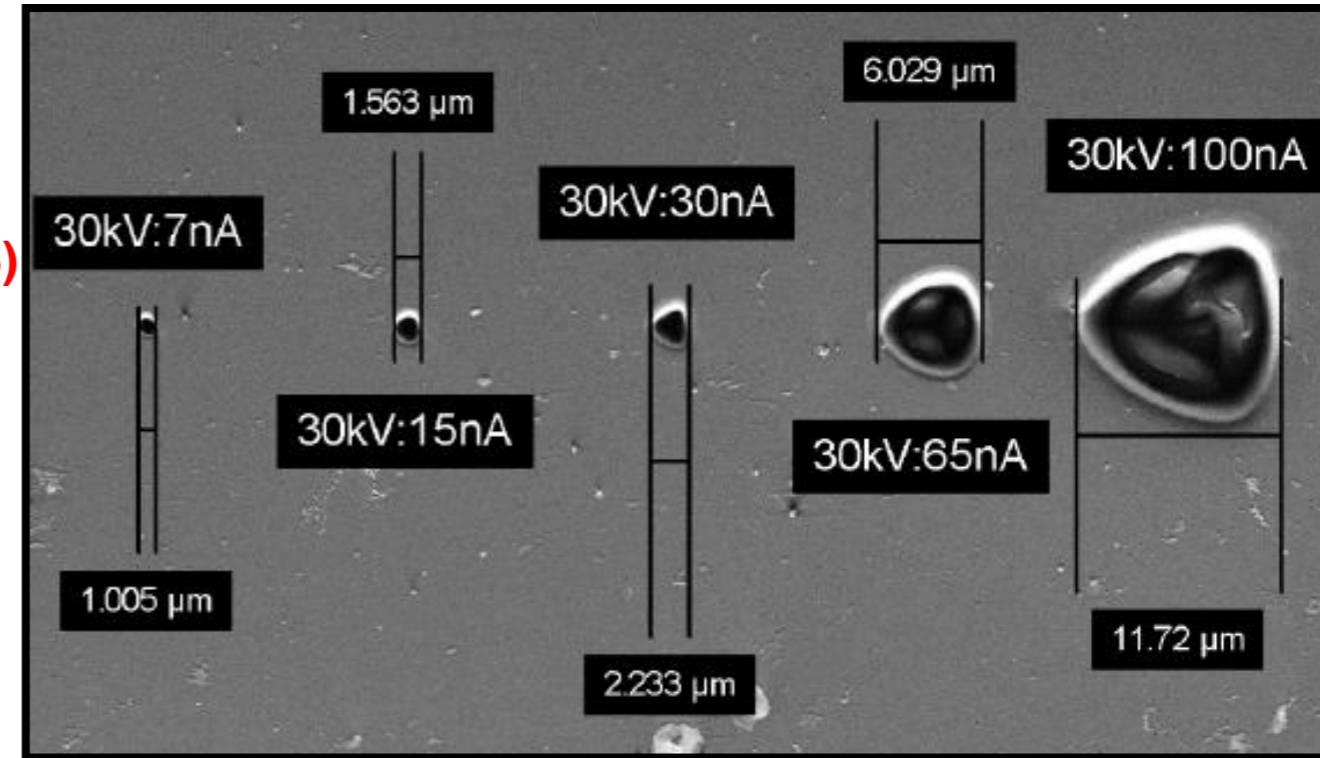


Caractéristiques FIB

- Type de source ionique : **Source Gallium liquide (Ga-LMIS)**
- Durée de vie moyenne = 3000 μ Ah à 2 μ A d'émission
- Courant de sonde : 1pA à **100nA**
- Tension d'accélération : **500V** à 30kV
- **Stabilité** : meilleure que 5% par heure

- Résolution :

- 30kV : 3 nm
- 1kV : 120 nm
- 500V : 330 nm



FIB - 1kV

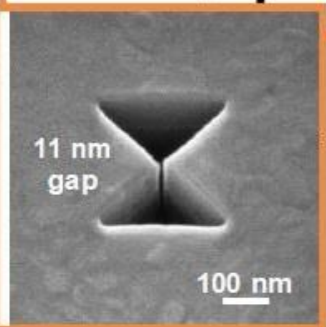
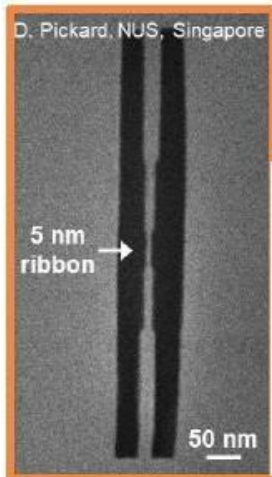
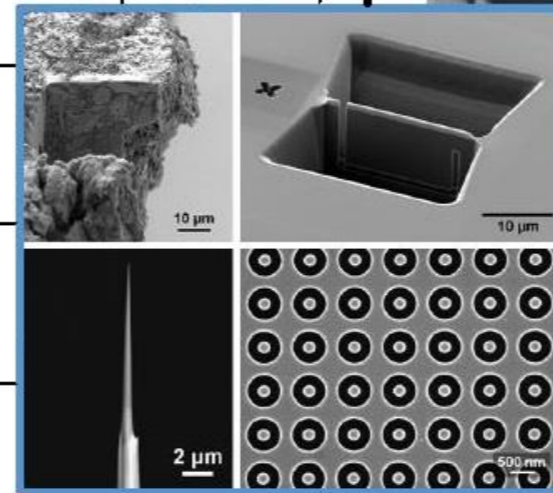
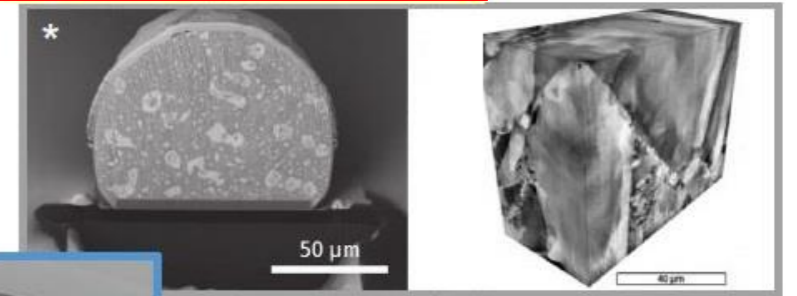
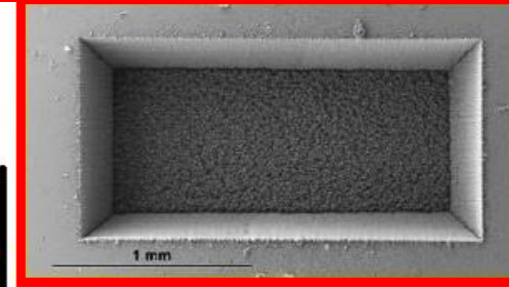
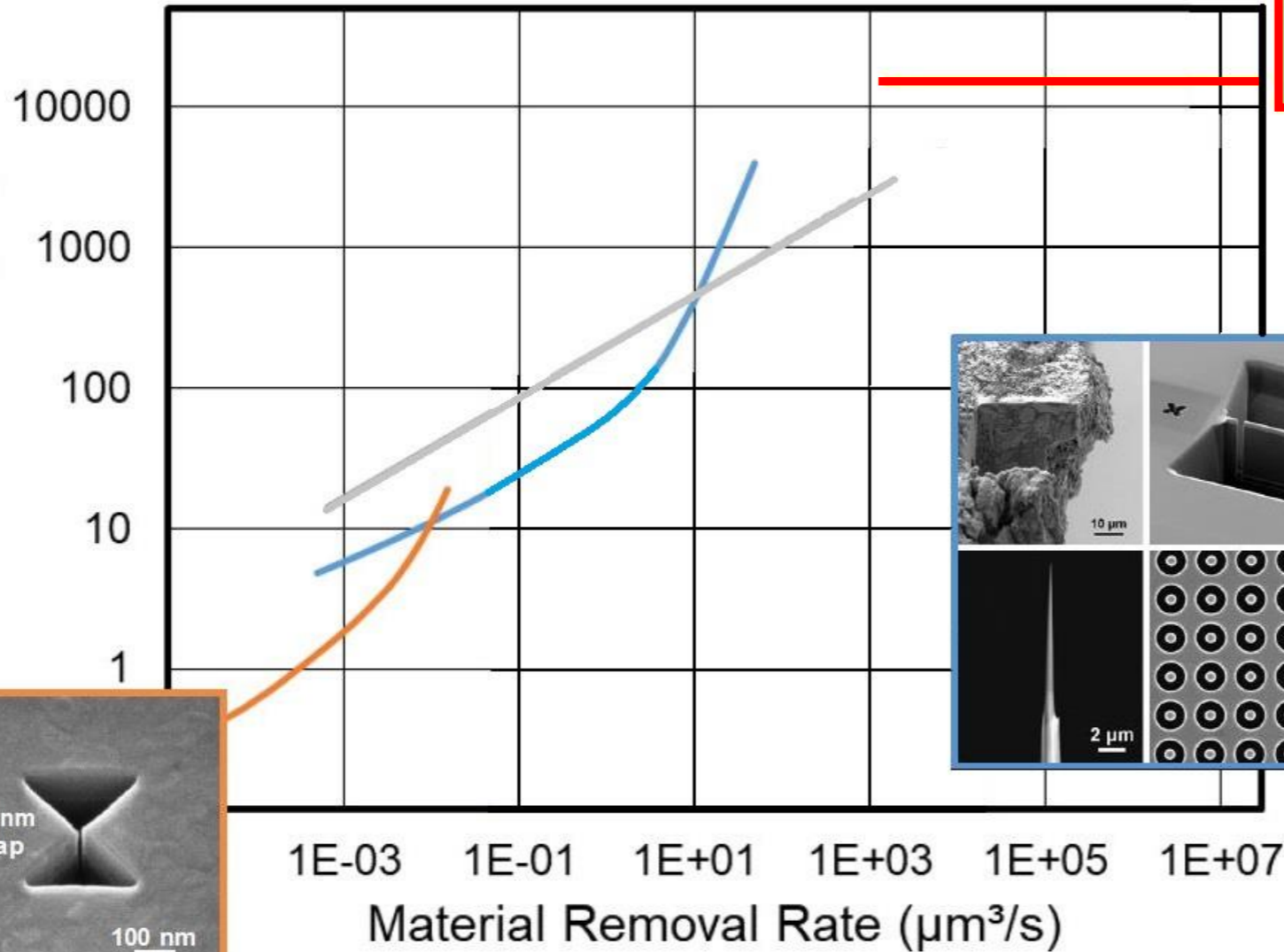
FIB - 500V

Source FIB : LMIS Ga vs Plasma Xe

Size : X = 2 mm
 Y = 1 mm
 Z = 750 μ m

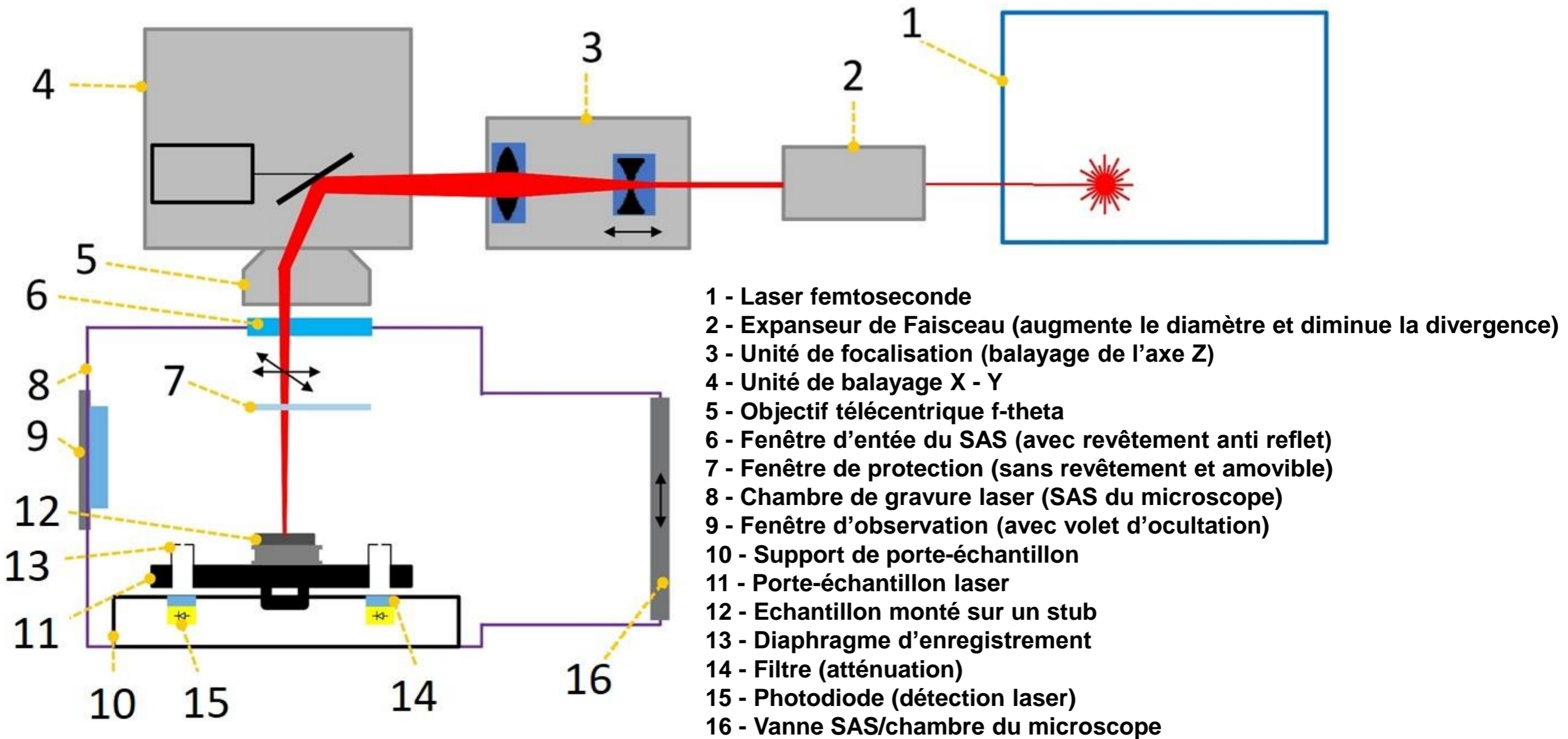
removed material = 1,5 mm³ (Si)
 Side wall slope = 12°
 Process time = 5 mn

Beam Diameter
 (nm)



- Ga LMIS 30kV
- He GFIS 30kV
- Xe Plasma 30kV
- Laser

Principe de fonctionnement du laser femtoseconde



Caractéristiques du laser femtoseconde

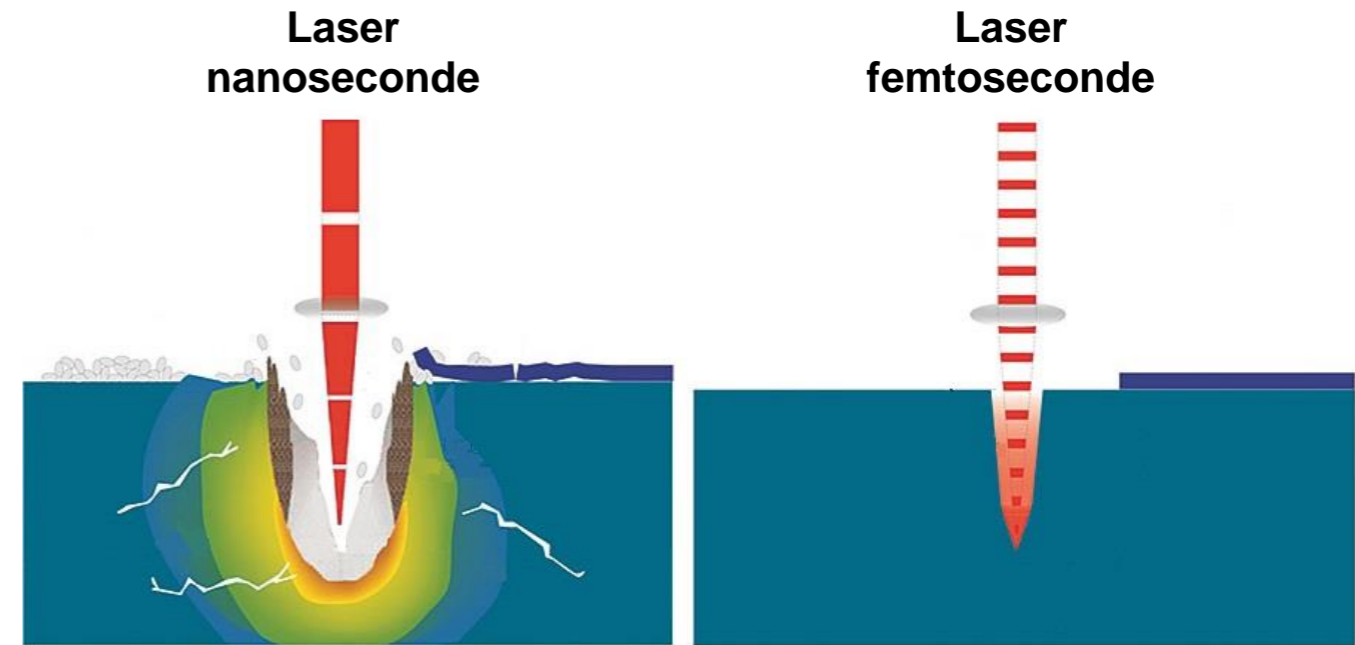
- Laser femtoseconde :

- Type : Diode Pumped Solid State (DPSS)
- Puissance moyenne à 1MHz : 10 W
- Puissance pique par pulse : < 29 MW
- Energie maximum par pulse : 10μJ à 1MHz
- Durée du pulse : **< 350 fs** ($350 \cdot 10^{-15}$ s)

limite la zone affectée thermiquement par rapport à un laser nanoseconde

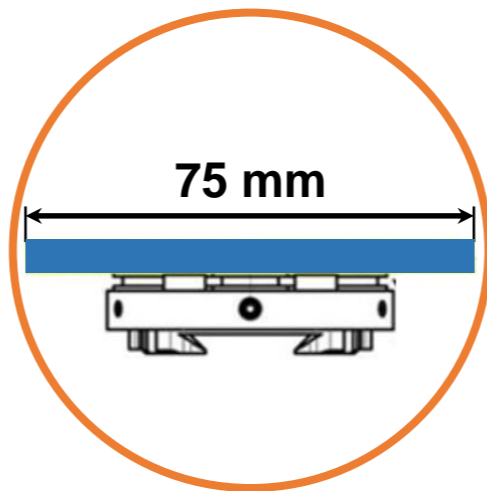
- Longueur d'onde : 515 nm (vert)
- Fréquence de pulse : 100 Hz à 1 MHz
- Vitesse de balayage : 100μm/s à 9m/s
- Diamètre du faisceau : < 15 μm

- **Longueur focal** = 100 mm (Objectif télécentrique)
- **Champ de balayage** = 40 x 40 mm
- **Précision de positionnement** = 15μm



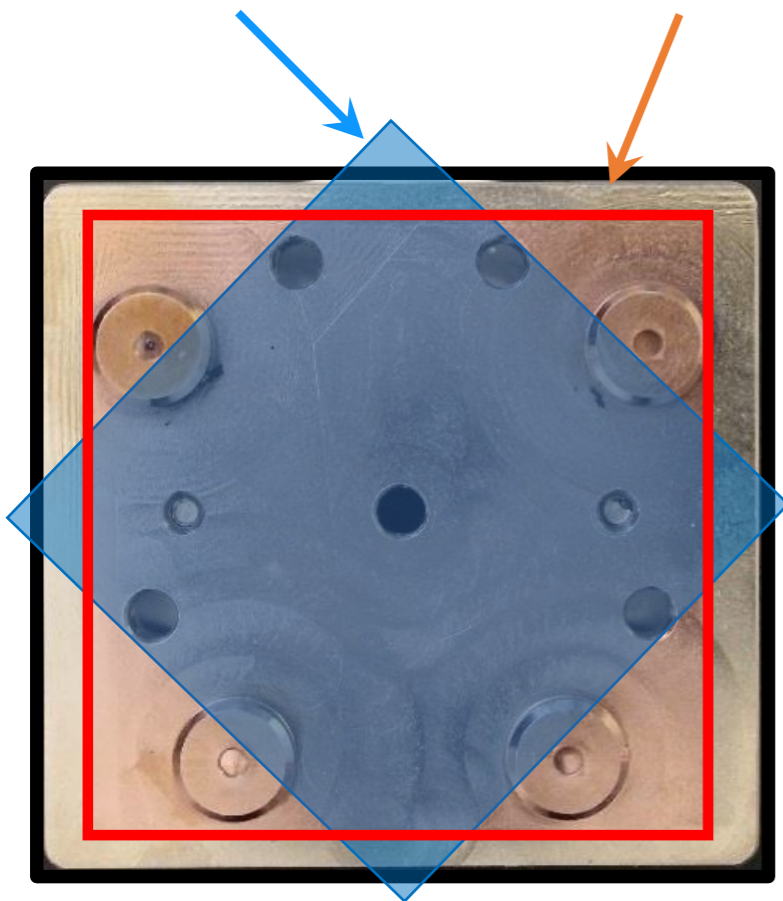
Taille d'échantillon

Passage SAS/microscope Diamètre = 80mm

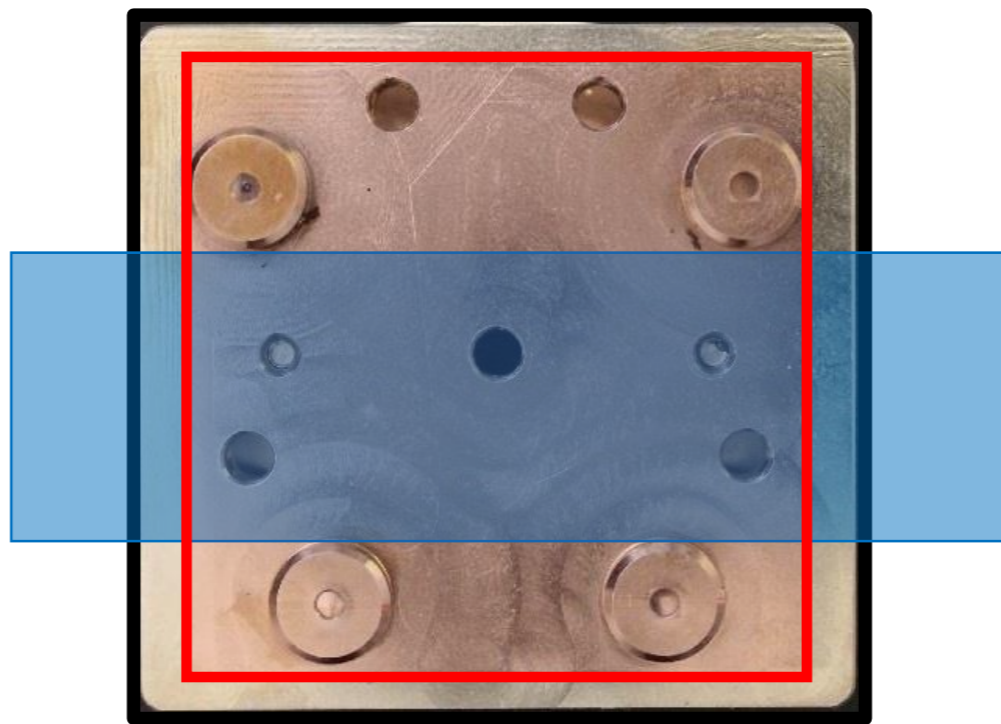


échantillon

Porte échantillon laser



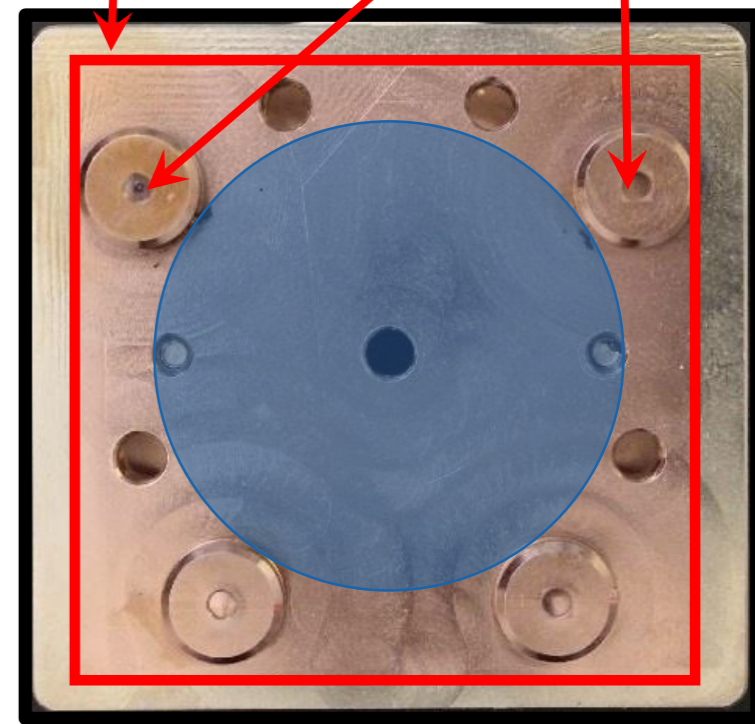
Carré = 36 x 36 mm



Rectangle = 75 x 20 mm

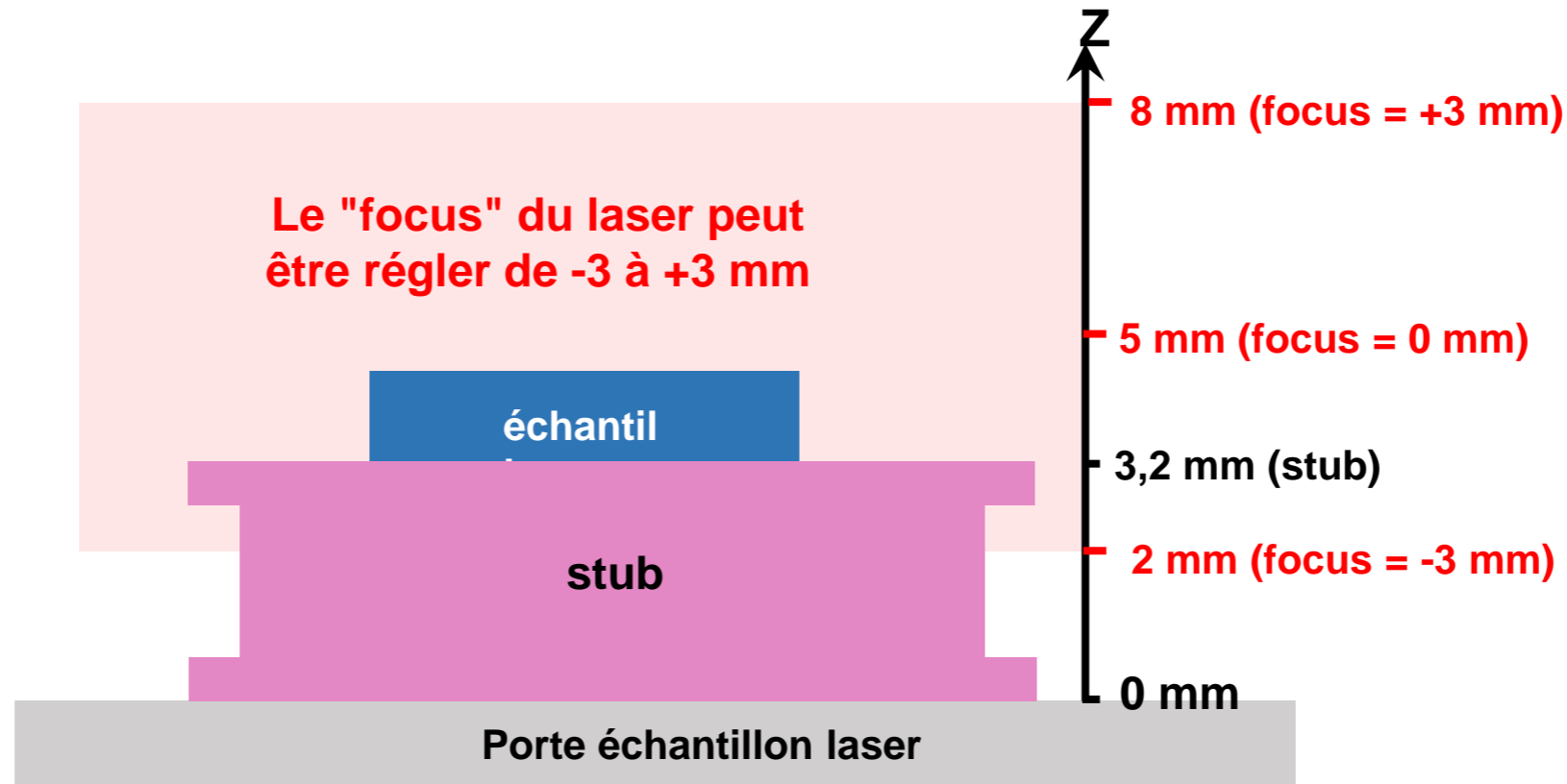
Champ de balayage laser
40 x 40 mm

Diaphragmes



Disque = 32 mm

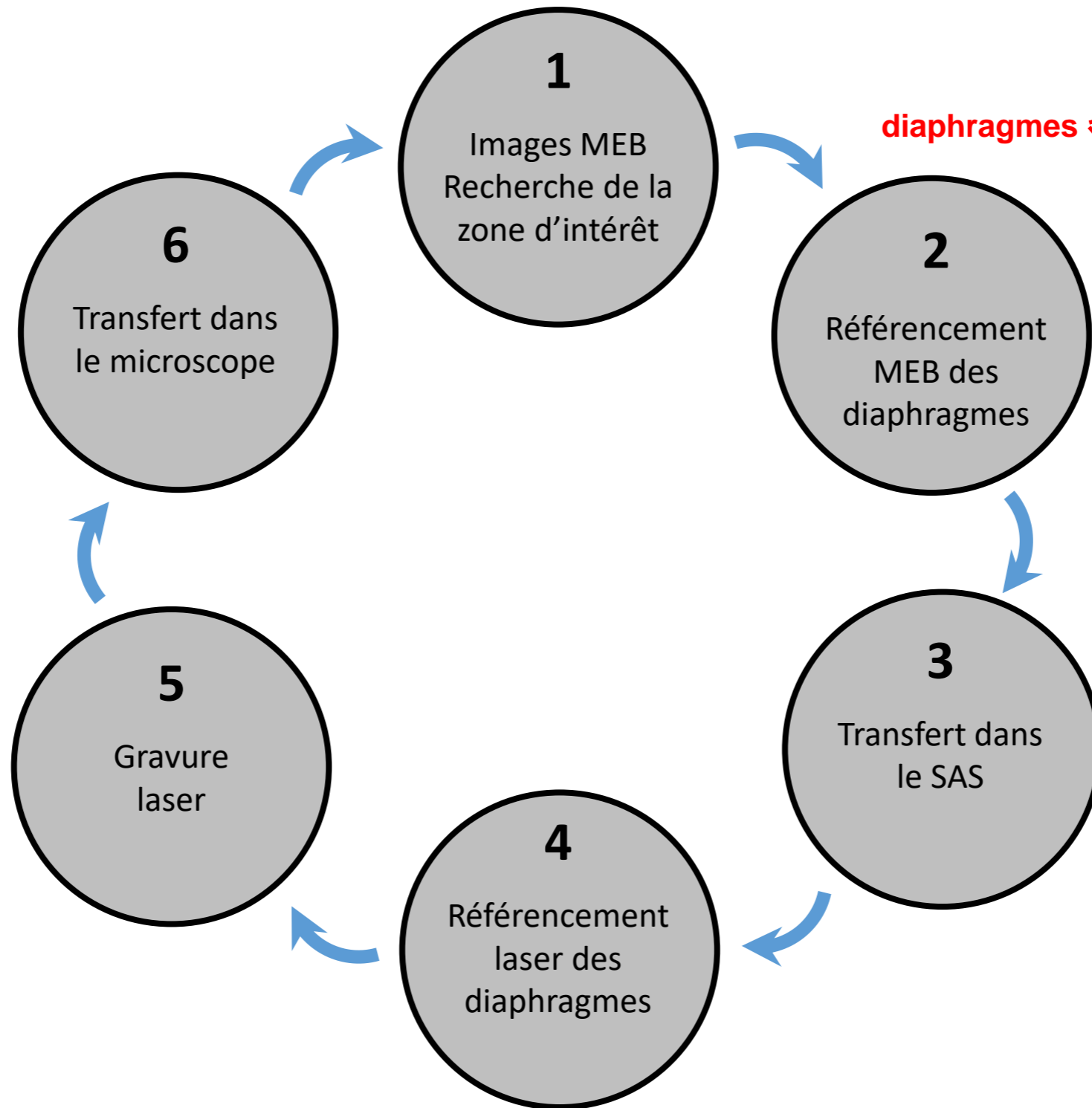
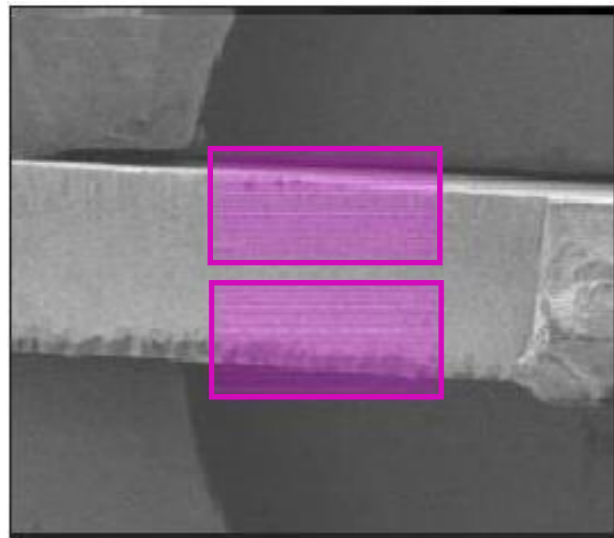
Epaisseur de l'échantillon



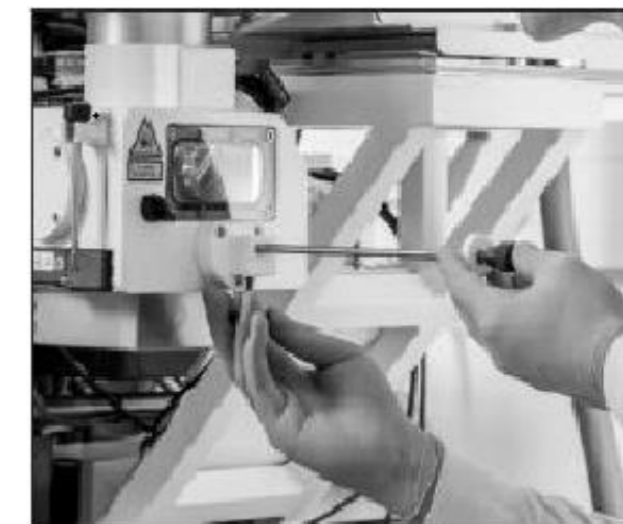
Epaisseur de l'échantillon :

- Coller sur le porte échantillon : $2 \text{ mm} < \text{épaisseur} < 8 \text{ mm}$
- Coller sur un stub : $\text{épaisseur} < 4,8 \text{ mm}$

Laser workflow



diaphragmes



Logiciel de gestion du laser : LaserMill

Logiciel
"LaserMill"

The screenshot displays the SmartSEM software interface. The main window shows a live video feed of the SEM's internal chamber, where a laser beam is focused on a sample. A red circle highlights a specific icon in the toolbar, and a red arrow points from the text "Logiciel 'LaserMill'" to it.

Control Panel Status

Mag = 1.55 K X | Focus = 7.5 mm

Crossbeam SEM Control

Control Imaging Gun Vacuum Stage

Stage Position

Delta	Stage at
X	67.390 mm
Y	81.045 mm
Z	46.563 mm
T	0.0 °
R	55.0 °
M	10.288 mm

STOP | Stage Is = Idle | Undo Stage Goto

Options

- Z move on Vent
- Track Z
- Protected Z | Safe Z = 35.000 mm
- Safe Navigation
- Stage XY+Z
- Joystick Disable
- Stage Disable
- Compu. Mode = Rotate

Image Nav.. Further Options..

Rotate / Tilt

- Dyn.Focus
- FCF Setting = 0.0 %
- Scan Rot
- Scan Rotation = 233.3 °
- Tilt Com.
- Tilt Angle = 36.0 °

10 μm | **Mag = 1.55 K X** | **WD = 7.5 mm** | **Detector = USB TV1** | **SEM : 0.000 kV 200 pA**
Tilt = 0.0 ° | **Imaging = None** | **FIB : 29.97 kV 0.2 pA**

Ready. | Left: Mag = 1.55 K X | Mid: WD = 7.5 mm | WD = 7.5 | Coarse | Vac: | Gun: | EHT: |

Logiciel de gestion du laser : LaserMill

The screenshot displays the LaserMill software interface, divided into four main sections:

- Grab SEM images:** This section includes buttons for 'Grab image', 'Navigate to ROI', 'Export ROI', and 'Remove ROI'. It shows two ROI images labeled 'SEM-ROI5' and 'SEM-ROI6'.
- Alignment mark registration in SEM:** This section features a table for registration points, with columns for 'Goto', 'Align', 'Position SEM', 'X', and 'Y'. It also includes checkboxes for 'Use presets', 'Use saved WD', and 'Show Alignment', along with buttons for 'Load positions', 'Save positions', 'Transfer SEM positions', and 'Skip all registrations'.
- Alignment mark registration in laser:** This section includes a 'Scan all' button, a status message 'All requested alignment marks scanned.', and a table for laser registration points with columns for 'Scan', 'Position Laser', 'X', and 'Y'. It also has a 'Transfer laser positions' button.
- Laser:** This section contains various control elements, including a 'Recommended Optical z-offset (in mm)' set to -1.1, a 'Number of Layers' set to 1, and a 'Remaining Layers' indicator. It also features buttons for 'Open CAD', 'Activate laser', 'Deactivate laser', 'Process', 'Vent airlock', 'Ready', 'Reset', and a large 'STOP' button. A 'Camera on' button and a 'Pump/vent cycles' dropdown are also present.

Étape 1 – Acquisition d'une ou plusieurs images de la ou des zones d'intérêt (ROI)

Étape 2 – Recherche des points de référence (diaphragmes) dans le MEB

Étape 3 – Recherche des points de référence à l'aide du laser dans le SAS

Étape 4 – Positionnement des patterns et gravure laser

Etape 1 - Acquisition d'une ou plusieurs images MEB pour positionner le/les patterns de gravure laser



- Il ne faut pas utiliser de "scan rotation", "tilt correction" ou "beam shift" = erreur de coordonnées X et Y
- Il ne faut pas Tilter l'échantillon = déformation de l'image = erreur de coordonné Y
- Il ne faut pas effectuer une rotation de l'échantillon = pas géré par le logiciel de CAO
- Pour une meilleur précision, il faut utiliser le "backlash" pour le déplacement de la platine en X et Y
- Chercher une zone d'intérêt (ROI) et utiliser un grossissement approprié pour prendre une image MEB
- Ne plus changer la hauteur de la platine : Z et M
- Il est possible de prendre plusieurs images de la même zone avec différents grossissements ou d'autres zones si nécessaire

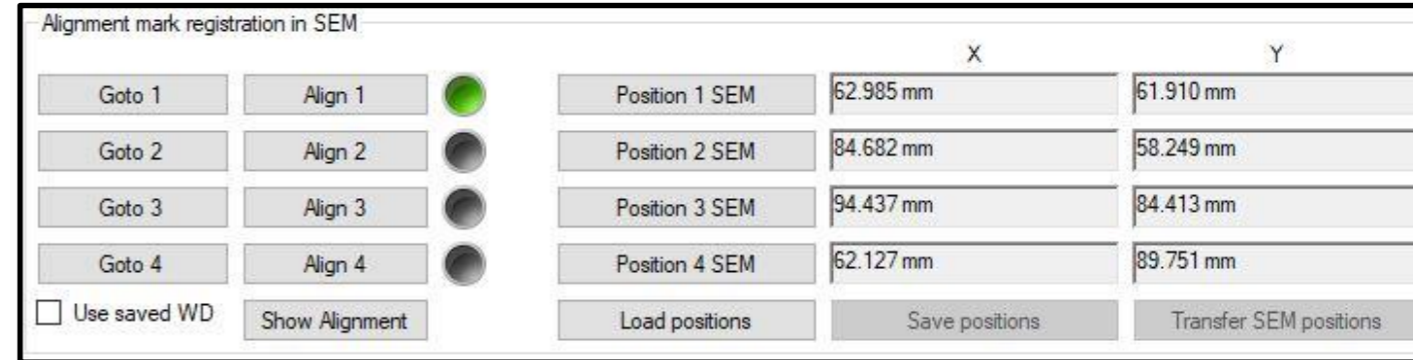
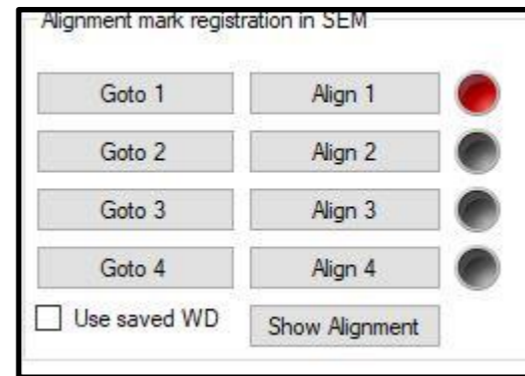
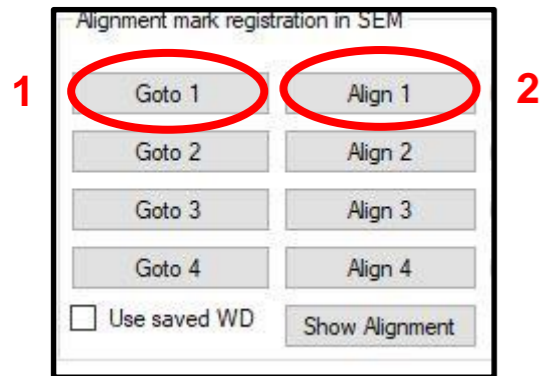
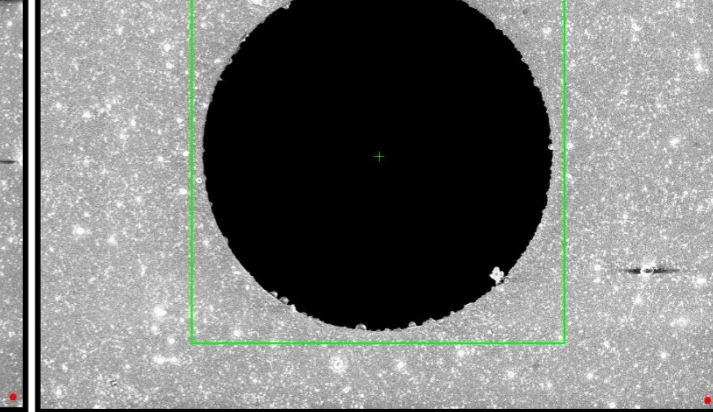
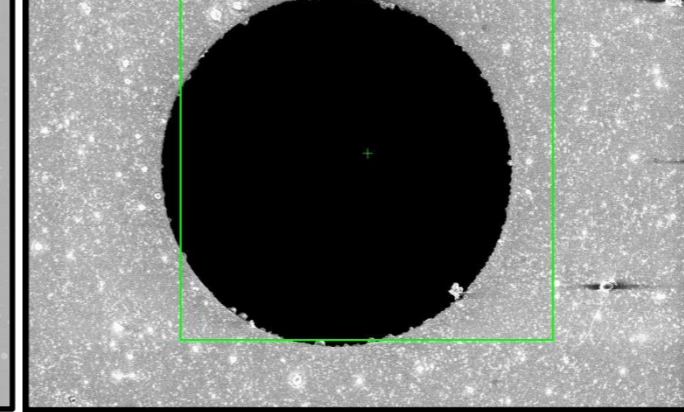
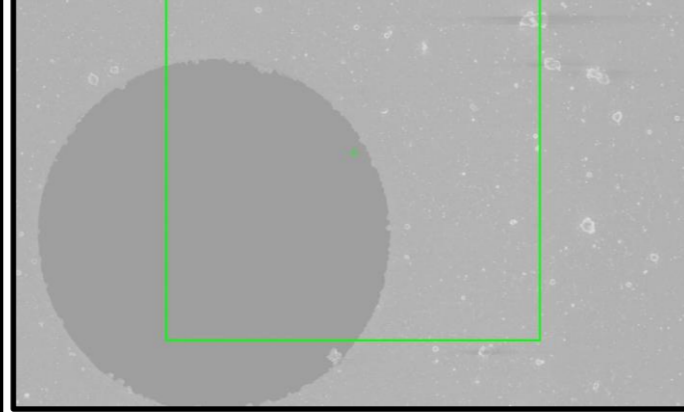
Étape 2 – Recherche des points de référence (diaphragmes) dans le MEB

Déplacement de la platine vers la position du diaphragme 1

Contraste trop faible

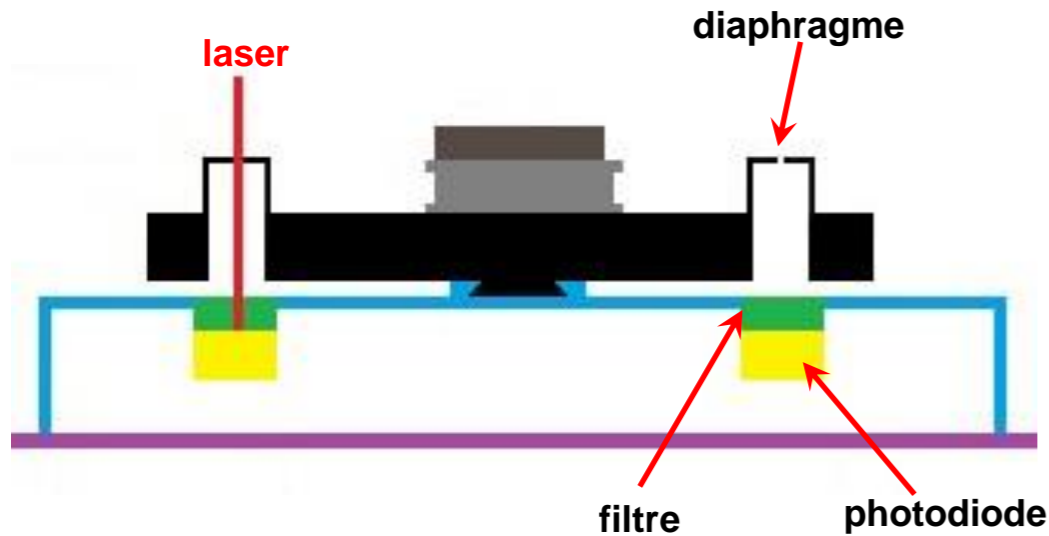
Alignement imparfait

Alignement correct



- Sélectionner " Goto 1 ", la platine se déplace vers le diaphragme 1
- Mise au point et réglage du contraste/luminosité
- Sélectionner " Align 1 ", le logiciel aligne automatiquement le diaphragme au centre de l'image et sauvegarde les coordonnées (X, Y et Z). Le voyant passe au vert.
- On passe au diaphragme suivant en cliquant sur " Goto 2 " ...

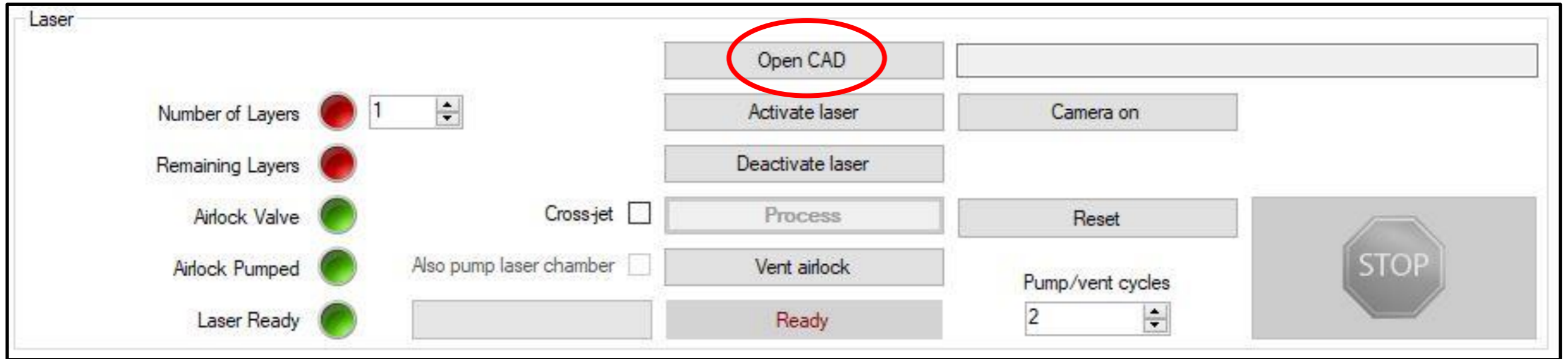
Étape 3 – Recherche des points de référence à l'aide du laser dans le SAS



Alignment mark registration in laser				
Alignment mark registration mode		Finding		
Scan all		All requested alignment marks scanned.		
		X	Y	
Scan 1	●	Position 1 Laser	31.018 mm	36.509 mm
Scan 2	●	Position 2 Laser	9.048 mm	36.554 mm
Scan 3	●	Position 3 Laser	3.674 mm	9.126 mm
Scan 4	●	Position 4 Laser	36.349 mm	9.027 mm
Transfer laser positions				

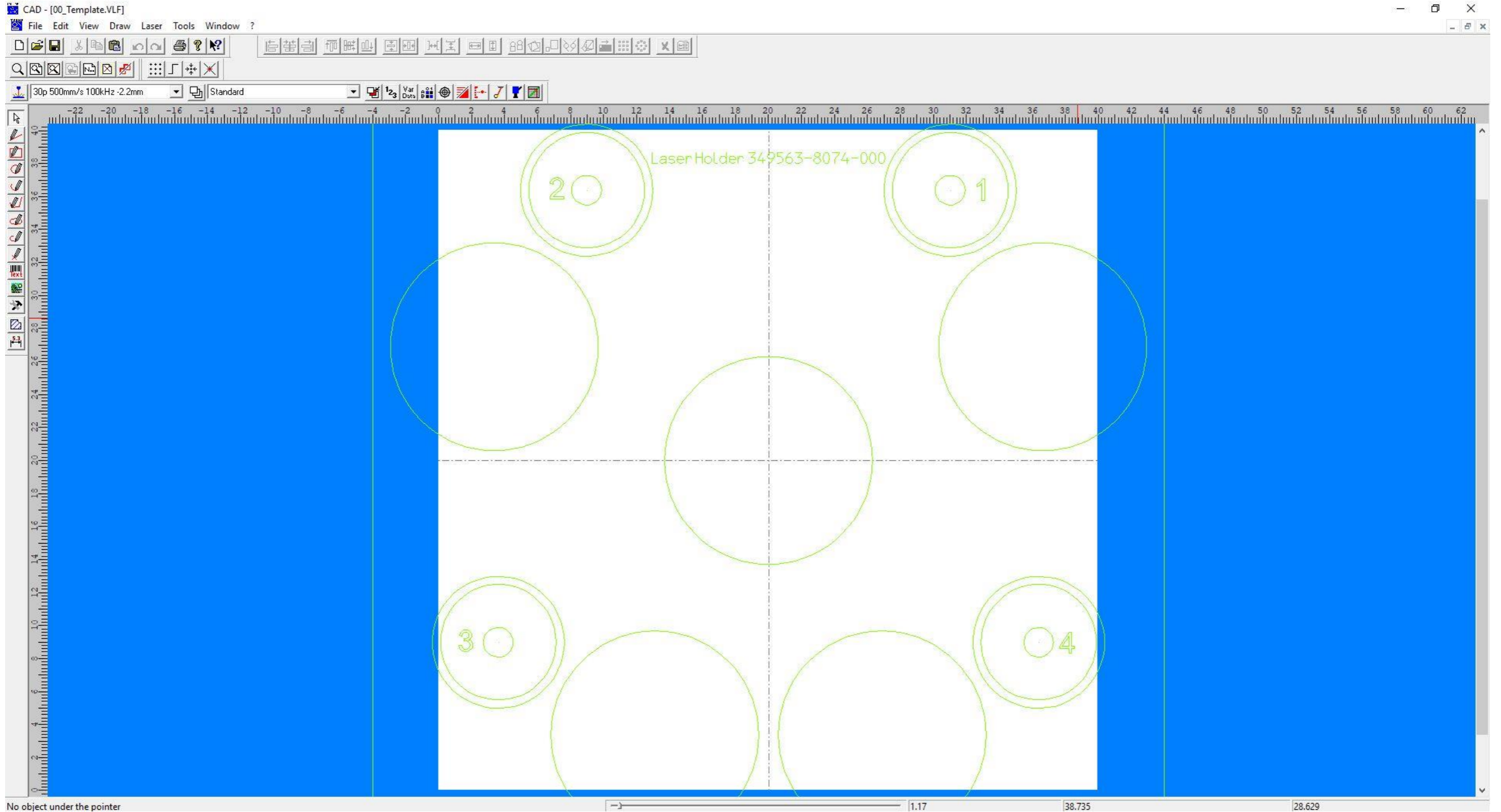
- L'échantillon est transféré dans le SAS à l'aide de la canne de transfert jusqu'à la butée du support de porte échantillon afin que les diaphragmes se situent au dessus des photodiodes.
- la canne de transfert doit être désolidarisée du porte échantillon pour éviter tout déplacement du porte échantillon.
- En cliquant sur "Scan all" le laser balaie une surface de 2x2mm au dessus de chaque diaphragme. Les coordonnées X et Y enregistrées correspondent à la position du laser pour le maximum de détection de la photodiode placé sous le diaphragme.

Étape 4 – Positionnement des patterns et gravure laser

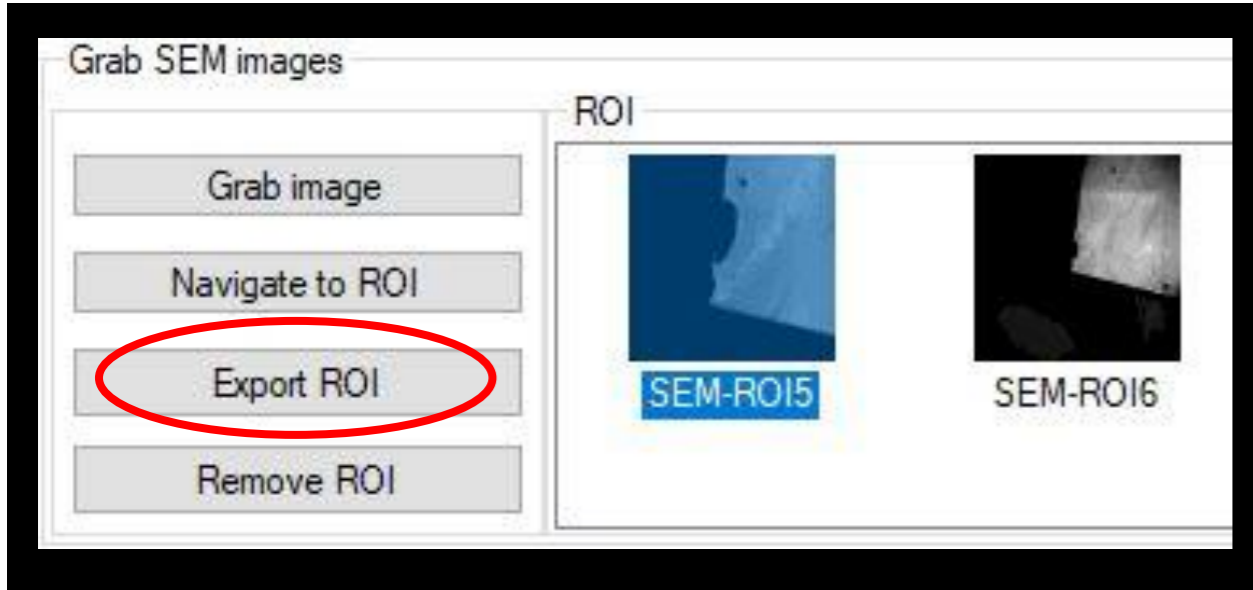


- Sélectionner "Open CAD" pour ouvrir le logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)
- Sélectionner le "Template" correspondant au support d'échantillon

Logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO)

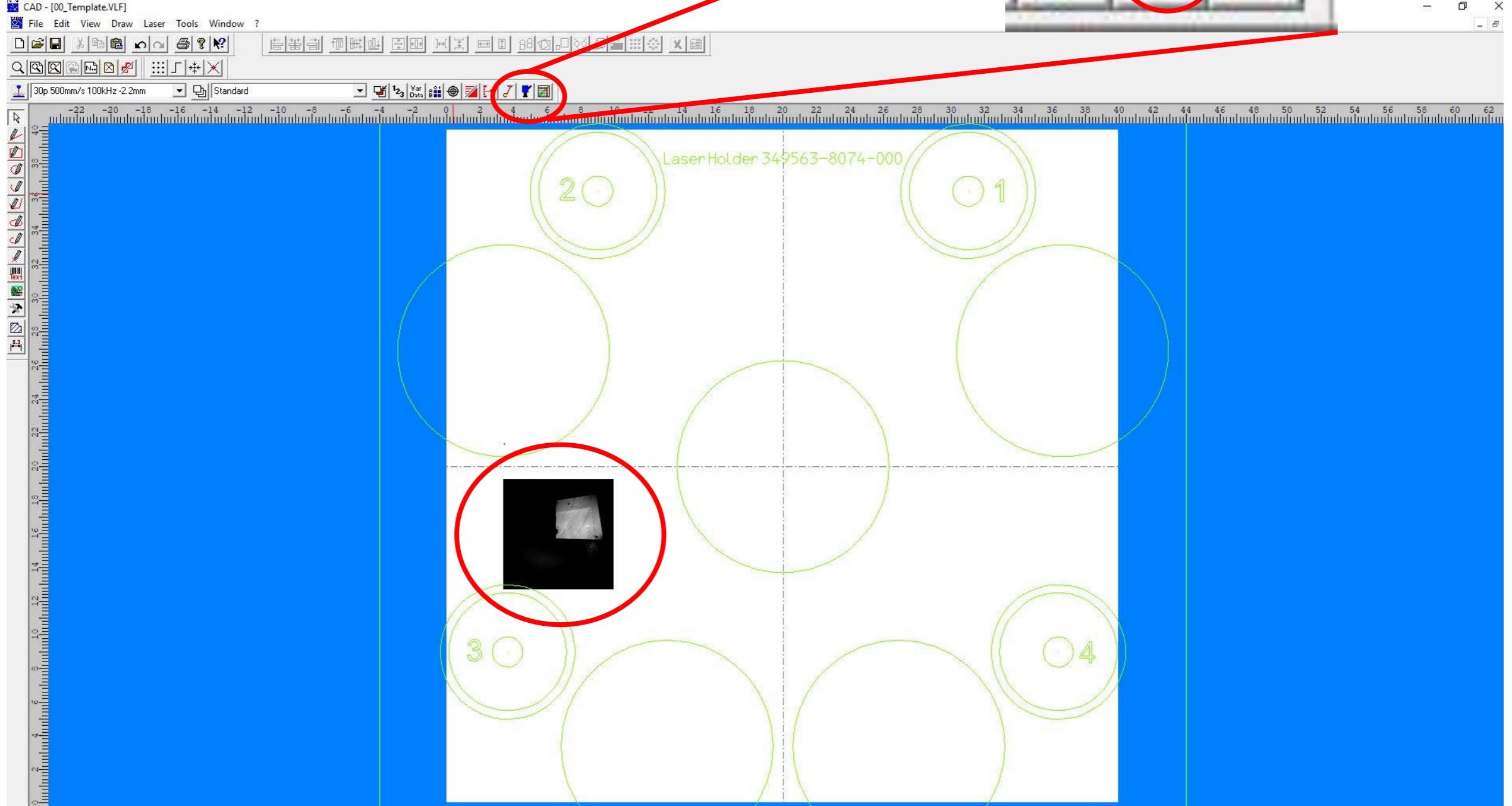


Exportation de la zone d'intérêt



- Sélectionner un " ROI " dans LaserMill
- Sélectionner " Export ROI "
- Relever la valeur de " Recommande Optical z-offset ". C'est la valeur de focalisation du laser à la surface de l'échantillon.

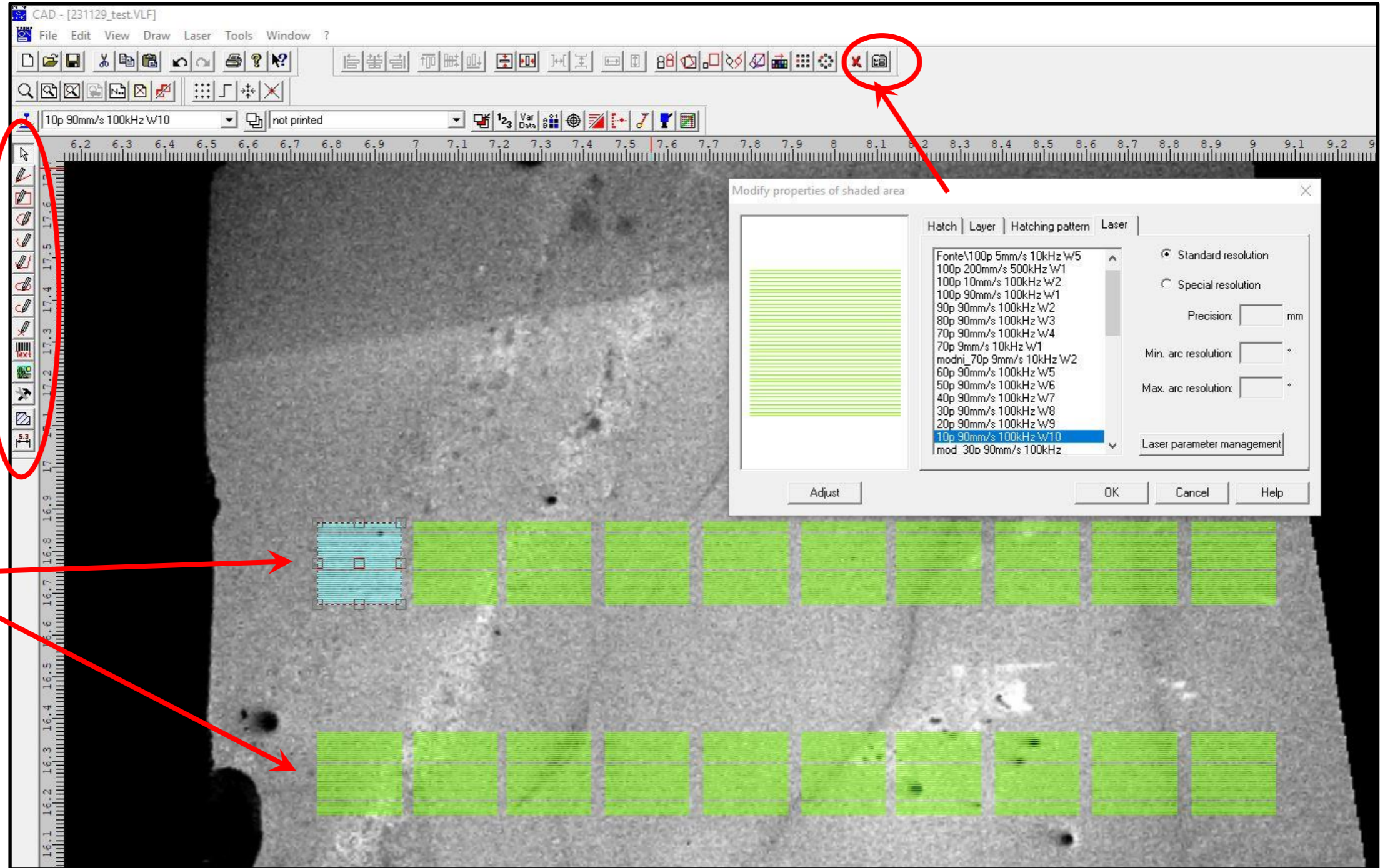
Importation de la zone d'intérêt



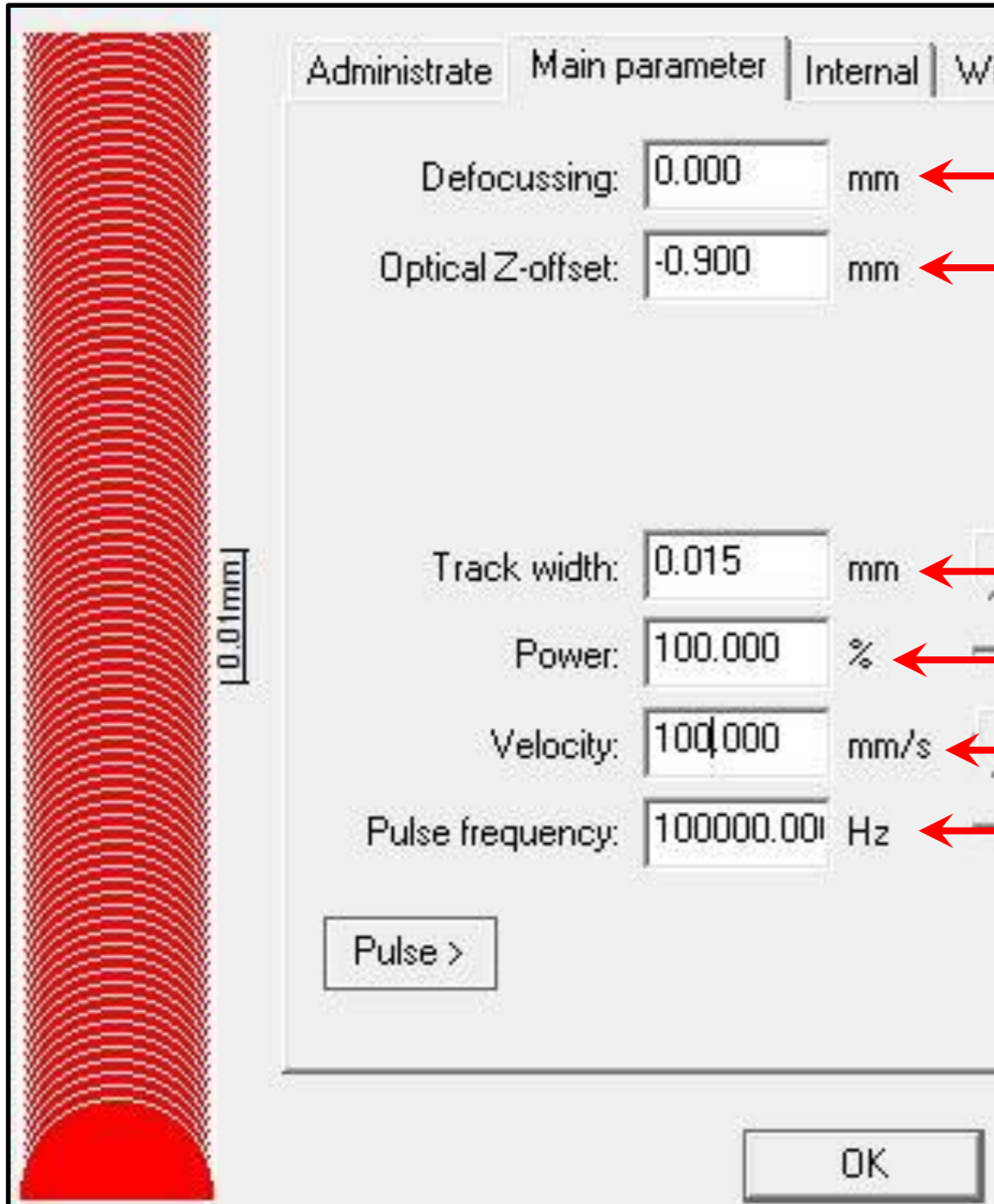
Positionnement des patterns de gravure

Sélection du type de pattern à graver

patterns



Paramètres de gravure : laser



← **Valeur de défocalisation du laser**

← **Valeur de focalisation du laser à la surface de l'échantillon
(à relever lors de l'exportation de la zone d'intérêt dans LaserMill)**

← **Diamètre du laser (15µm)**

← **Puissance du laser (2 à 100%)**

← **Vitesse de balayage du laser (100 µm/s à 9 m/s)**

← **Fréquence de répétition des impulsions laser (100Hz à 1 MHz)**

Paramètres de gravure : Pattern

Sélection du type de déplacement du laser dans le pattern

Espacement entre 2 lignes

Angle de balayage

Nombre de balayage

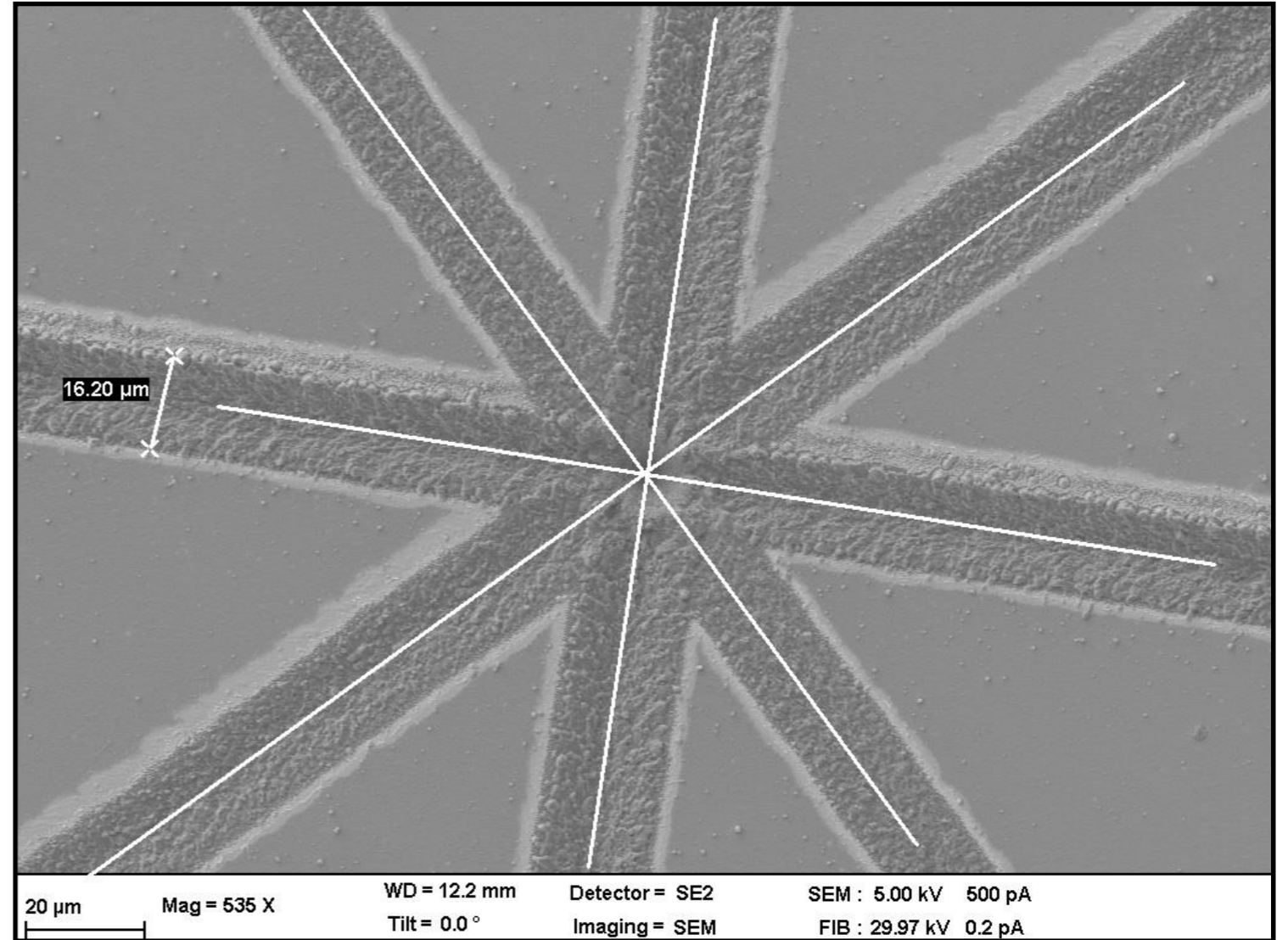
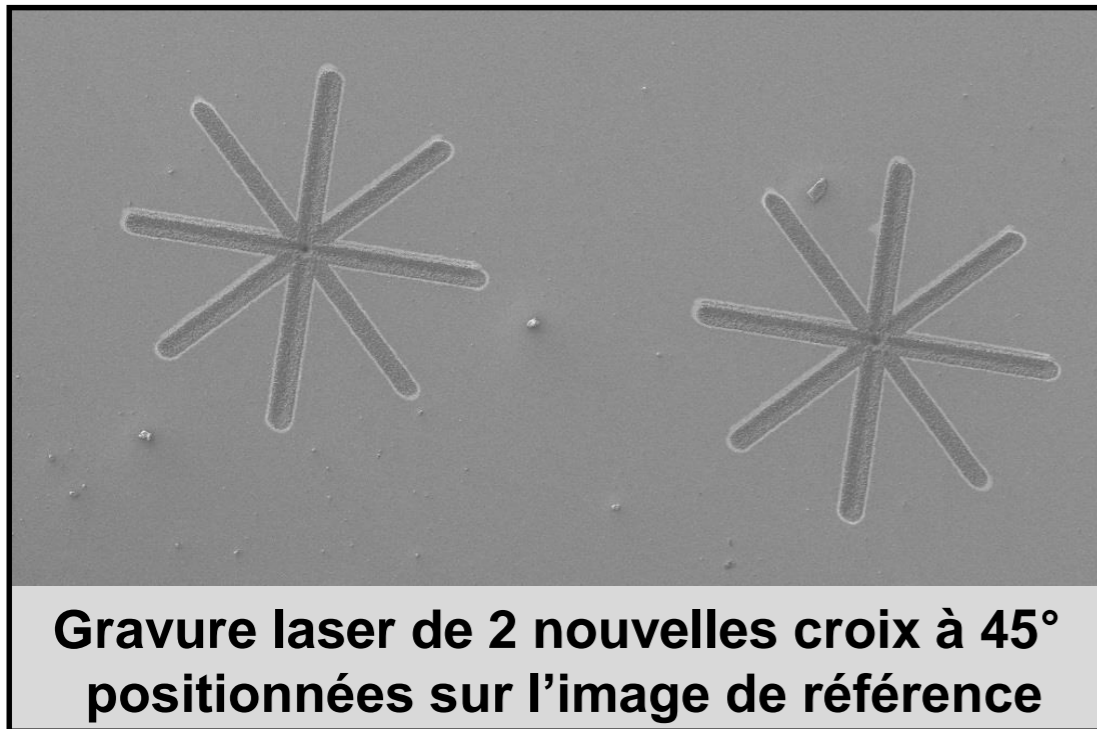
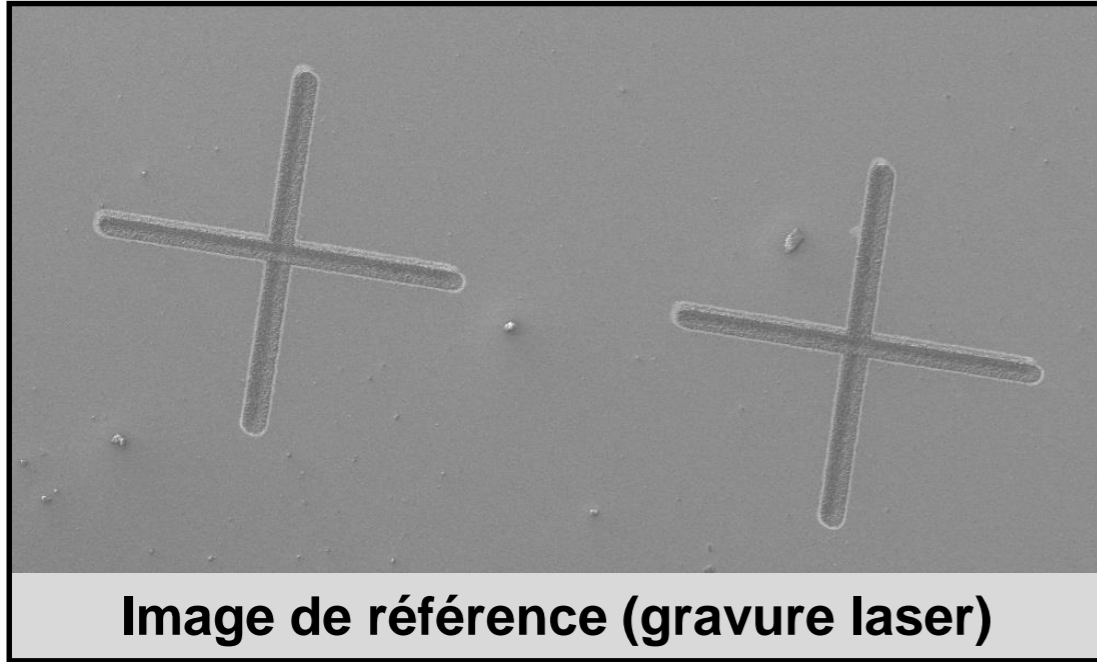
Incrément de l'angle de balayage entre 2 balayages

Épaisseur de gravure par balayage

The image shows a software dialog box for configuring laser engraving patterns. It features several radio buttons for pattern types, a 'Symbol' button, and several numerical input fields with units. Red arrows from external text labels point to specific fields in the dialog.

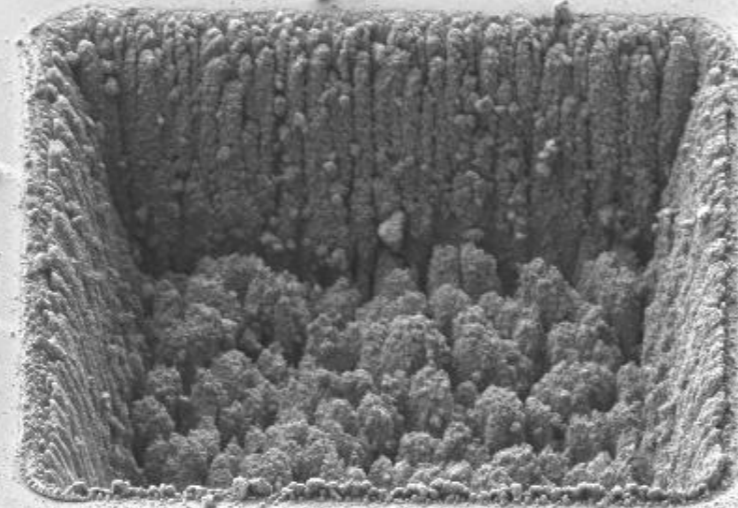
Parameter	Value	Unit
X-point distance	1.000	mm
Line spacing	0.005	mm
Margin distance	0.000	mm
Hatching angle	0.000	°
Number of hatchings	10	
Angle increment	19.000	°
Beveled angle	0.000	°
Removal rate per layer	0.0100	mm

Précision du positionnement

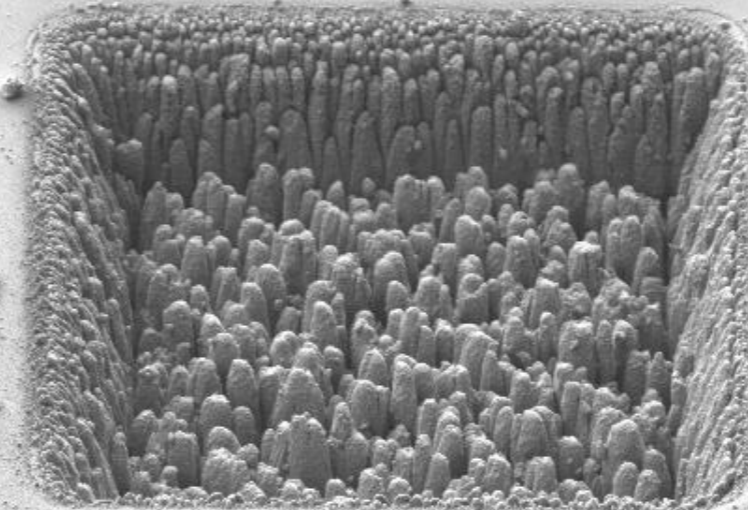


Paramètres de gravure : focalisation du laser

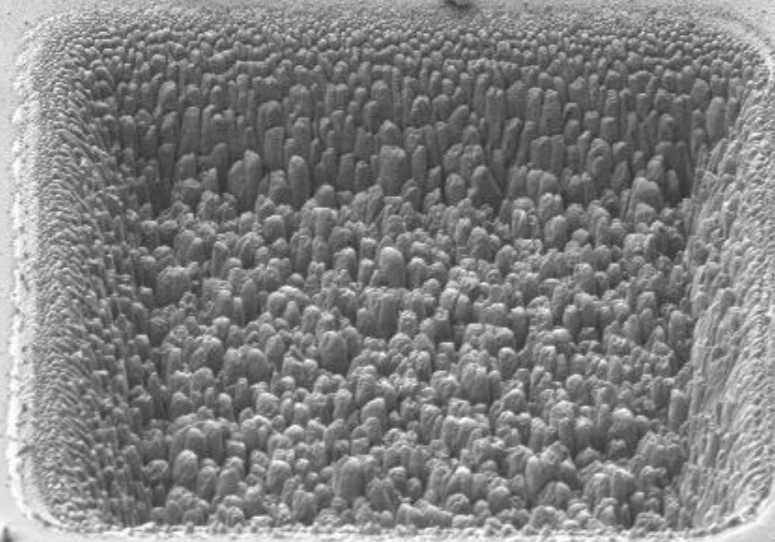
Faisceau laser focalisé à la surface de l'échantillon



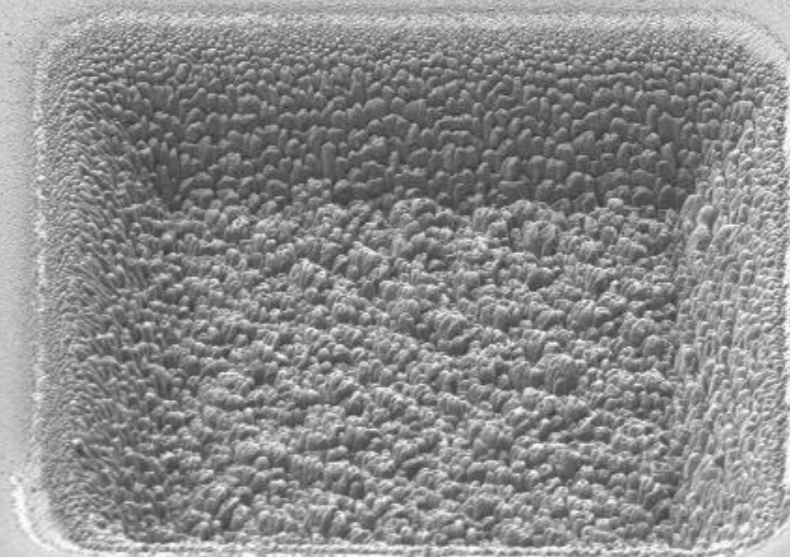
Faisceau laser focalisé 200µm au dessus de la surface



Faisceau laser focalisé 400µm au dessus de la surface



Faisceau laser focalisé 600µm au dessus de la surface



Paramètres de gravure : Puissance du faisceau

- Carré de 200 x 200 μ m
- Velocity = 90mm/s
- Pulse Feq = 100kHz
- Temps de gravure = 1 seconde par carré

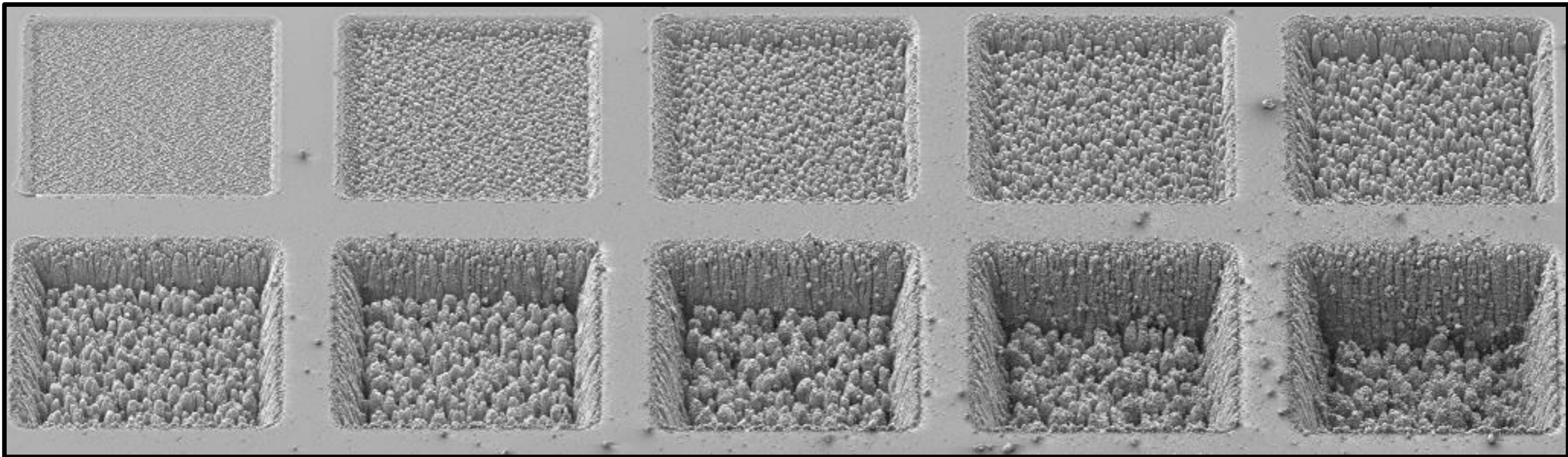
10%

20%

30%

40%

50%



60%

70%

90%

90%

100%

Paramètres de gravure : couple vitesse de balayage / fréquence de répétition

Administrate Main parameter Internal

Defocussing: 0.000 mm

Optical Z-offset: -0.900 mm

Track width: 0.015 mm

Power: 100.000 %

Velocity: 10.000 mm/s

Pulse frequency: 1000.000 Hz

Pulse >

Vitesse = 10 mm/s
Fréquence = 1kHz

Distance entre deux pulses sur la
ligne = **10 μ m**

Faible recouvrement

Administrate Main parameter Internal

Defocussing: 0.000 mm

Optical Z-offset: -0.900 mm

Track width: 0.015 mm

Power: 100.000 %

Velocity: 10.000 mm/s

Pulse frequency: 10000.000 Hz

Pulse >

Vitesse = 10 mm/s
Fréquence = 10kHz

Distance entre deux pulses sur la
ligne = **1 μ m**

Bon recouvrement

Administrate Main parameter Internal

Defocussing: 0.000 mm

Optical Z-offset: -0.900 mm

Track width: 0.015 mm

Power: 100.000 %

Velocity: 10.000 mm/s

Pulse frequency: 100000.000 Hz

Pulse >

Vitesse = 10 mm/s
Fréquence = 100kHz

Distance entre deux pulses sur la
ligne = **100nm**

Trop de recouvrement

Paramètres de gravure : vitesse de balayage et fréquence des impulsions

Rect = 400x100 μ m
Power = 100%
Hatching : Lines
Line spacing = 5 μ m
Nb hatching = 5
Angle increment = 0°

Vitesse

100 mm/s
Gravure = 0,5s

10 mm/s
Gravure = 5s

1 mm/s
Gravure = 50s

Fréquence

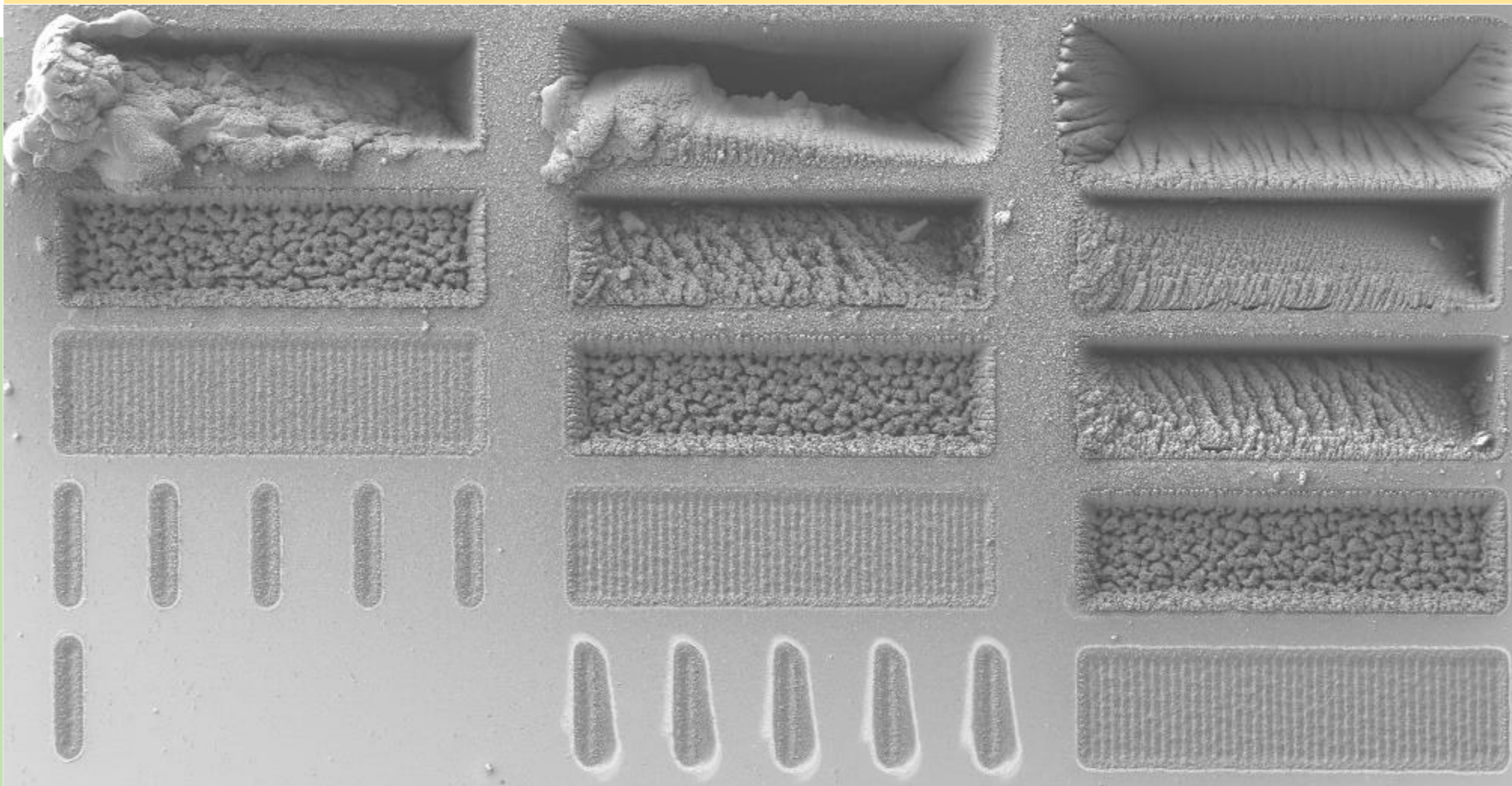
1MHz

100kHz

10kHz

1kHz

100Hz



Paramètres de gravure : vitesse de balayage et fréquence des impulsions

Rect = 400x100 μ m
Power = 100%
Hatching : Lines
Line spacing = 5 μ m
Nb hatching = 5
Angle increment = 0°

Fréquence

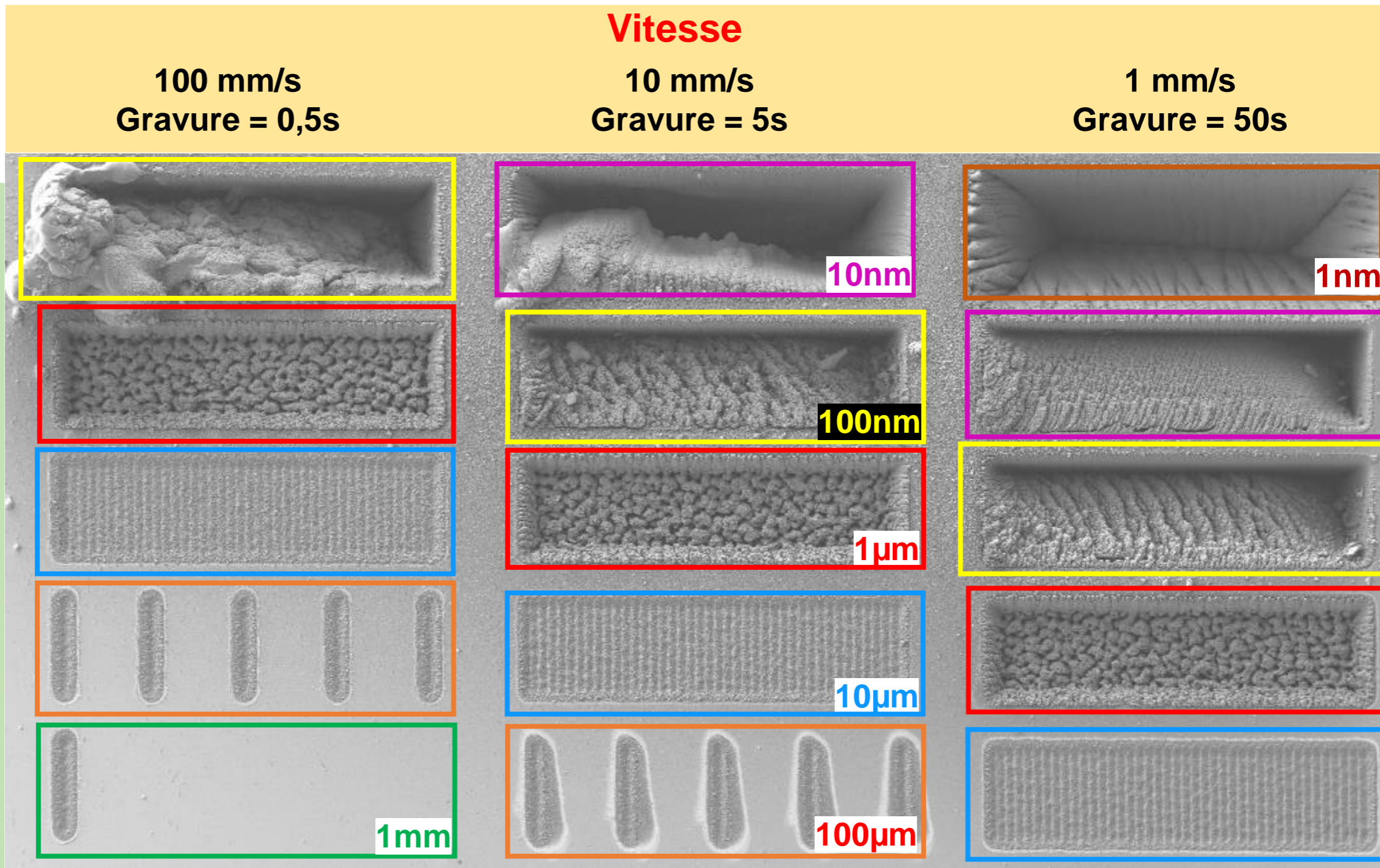
1MHz

100kHz

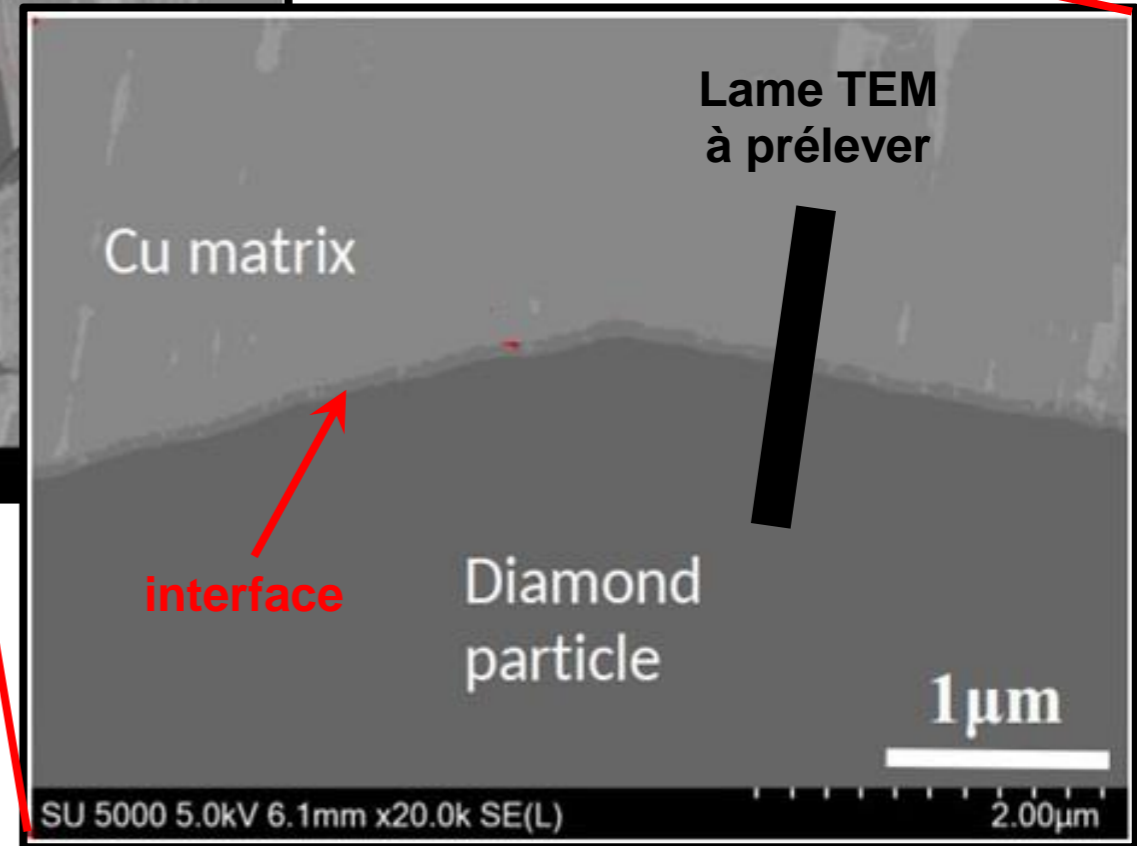
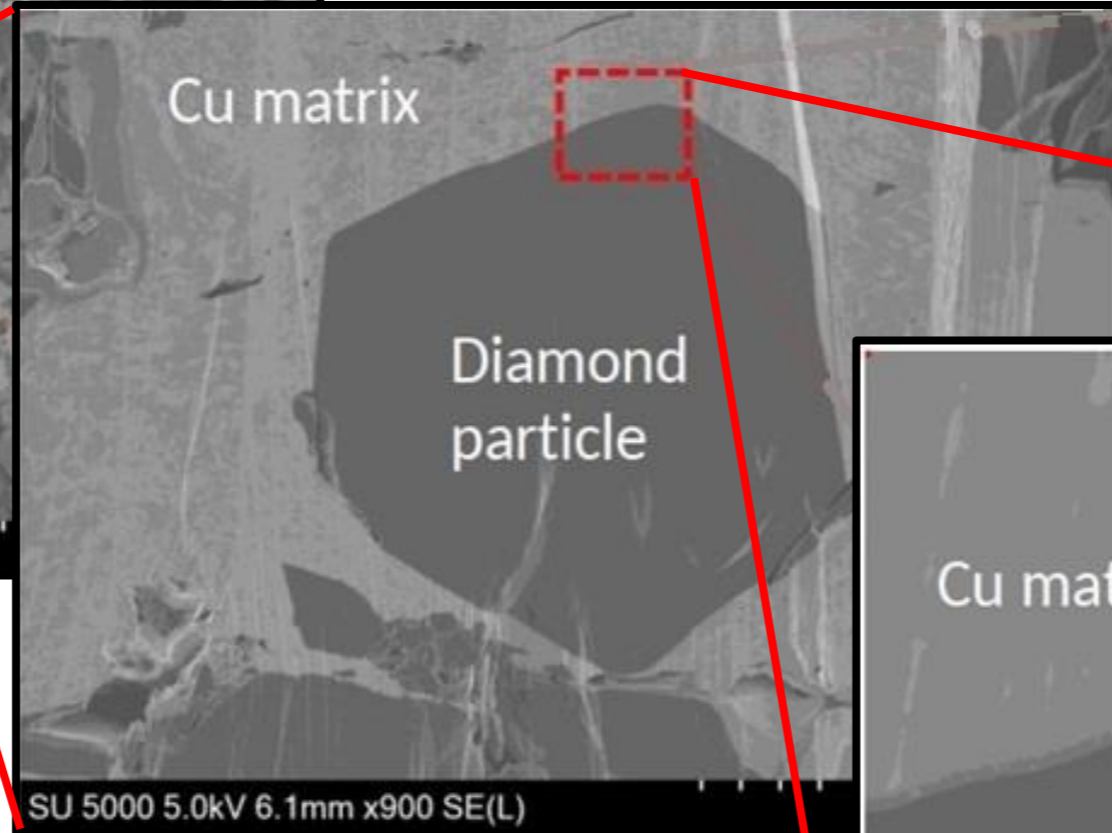
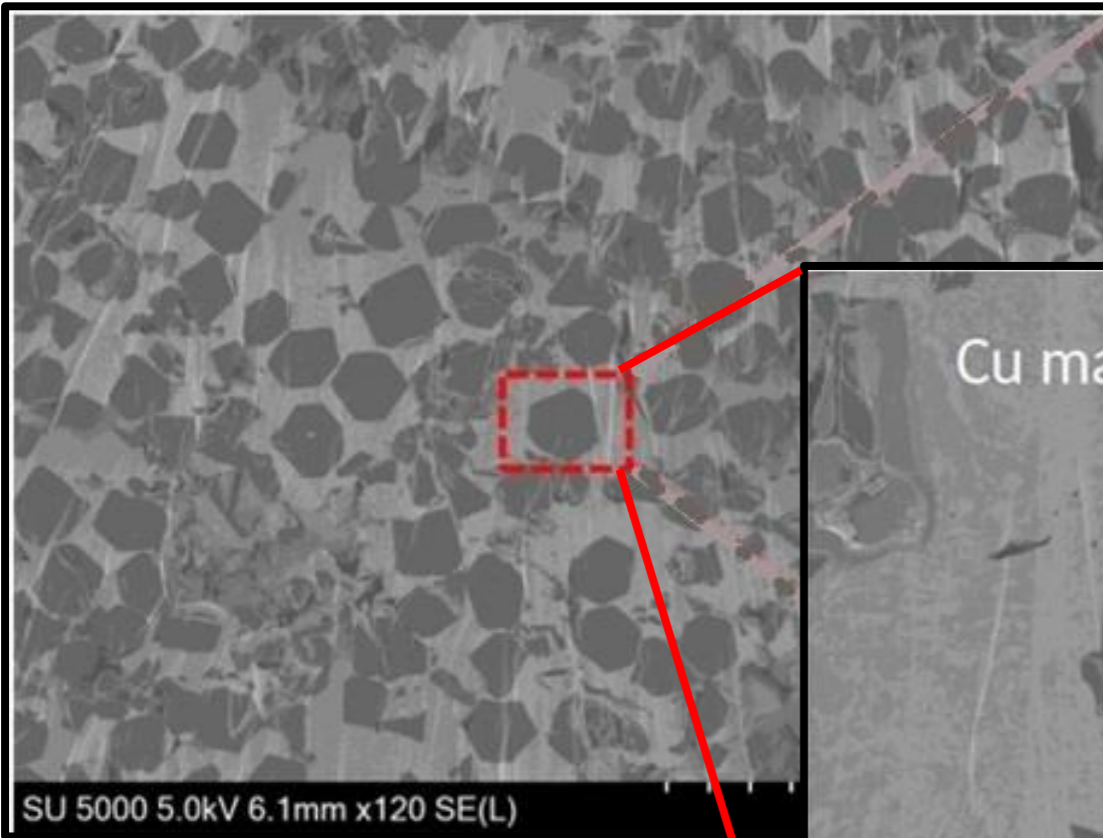
10kHz

1kHz

100Hz

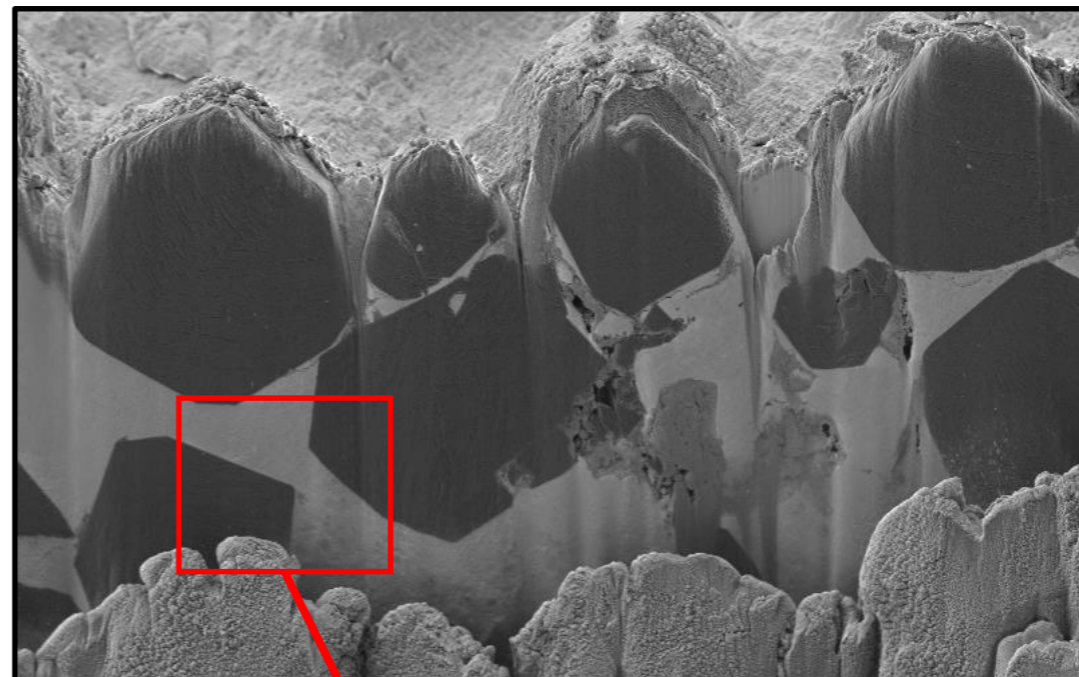
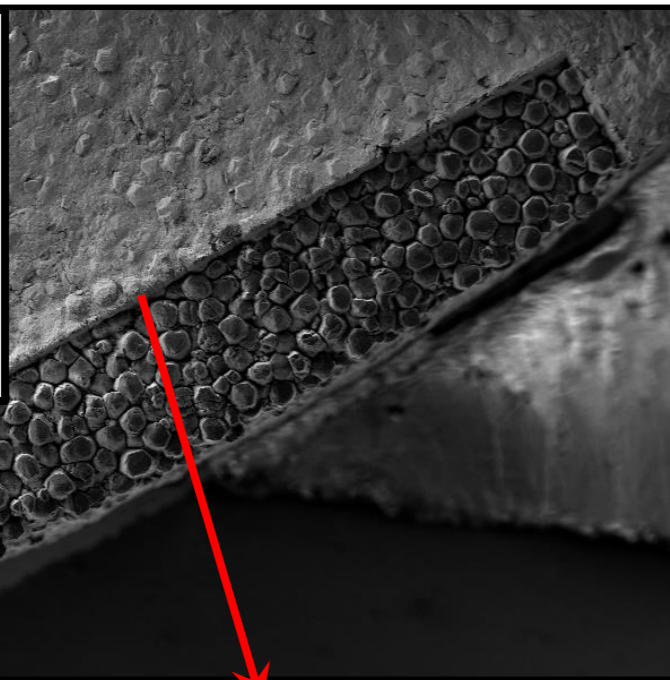


Matrice de Cuivre contenant des particules de diamant : Polissage « Ion milling » pendant 22h



Matrice de Cuivre contenant des particules de diamant : Cross section laser

Rectangle = 3 x 0.5mm
Power = 100%
Velocity = 90mm/s
Pulse Freq = 100kHz
Hatching = Lines
Line spacing = 10µm
Nb hatching = 30
durée = 62s



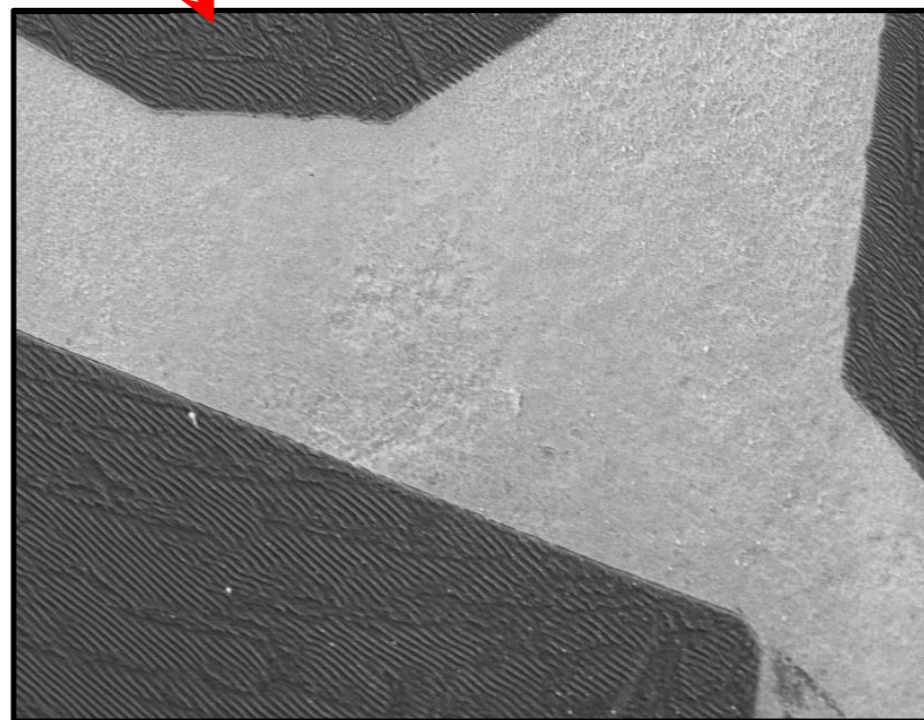
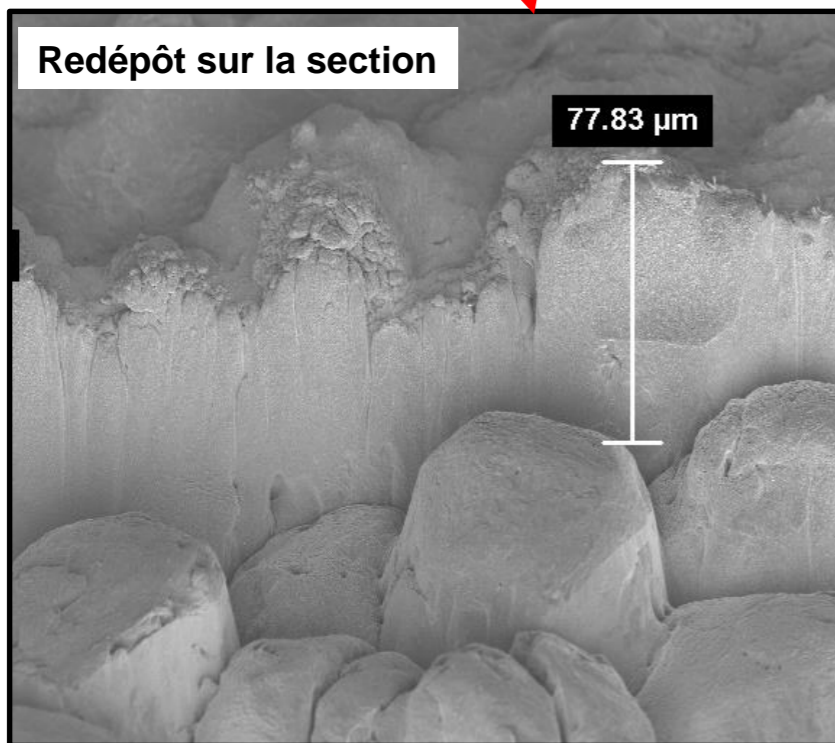
Power = 100%
Velocity = 90mm/s
Pulse Freq = 100kHz

étape 1 : gravure grossière
Rectangle = 3 mm x 500µm
Hatching = Lines
Line spacing = 10µm
Nb hatching = 100

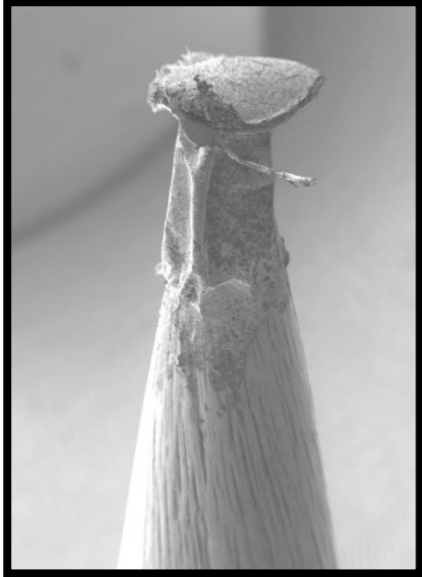
étape 2 : Polissage
Rectangle = 3 mm x 20µm
Hatching = Lines
Line spacing = 5µm
Nb hatching = 100

durée totale = 3mn46s

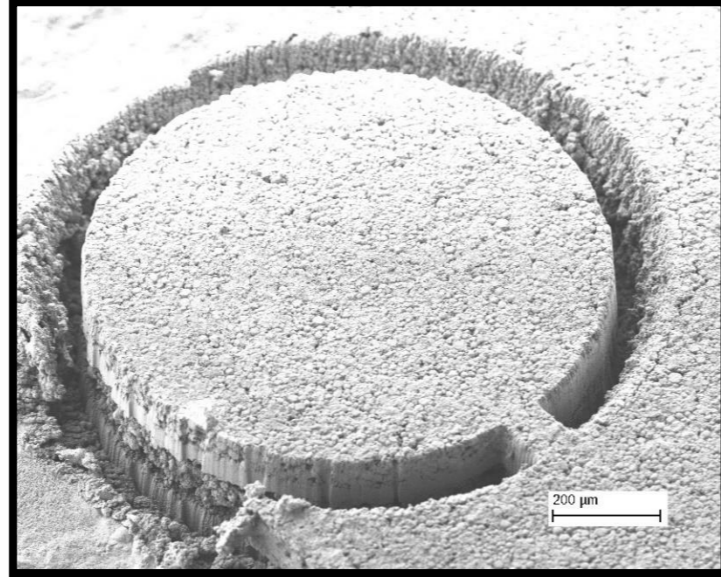
Redépôt sur la section



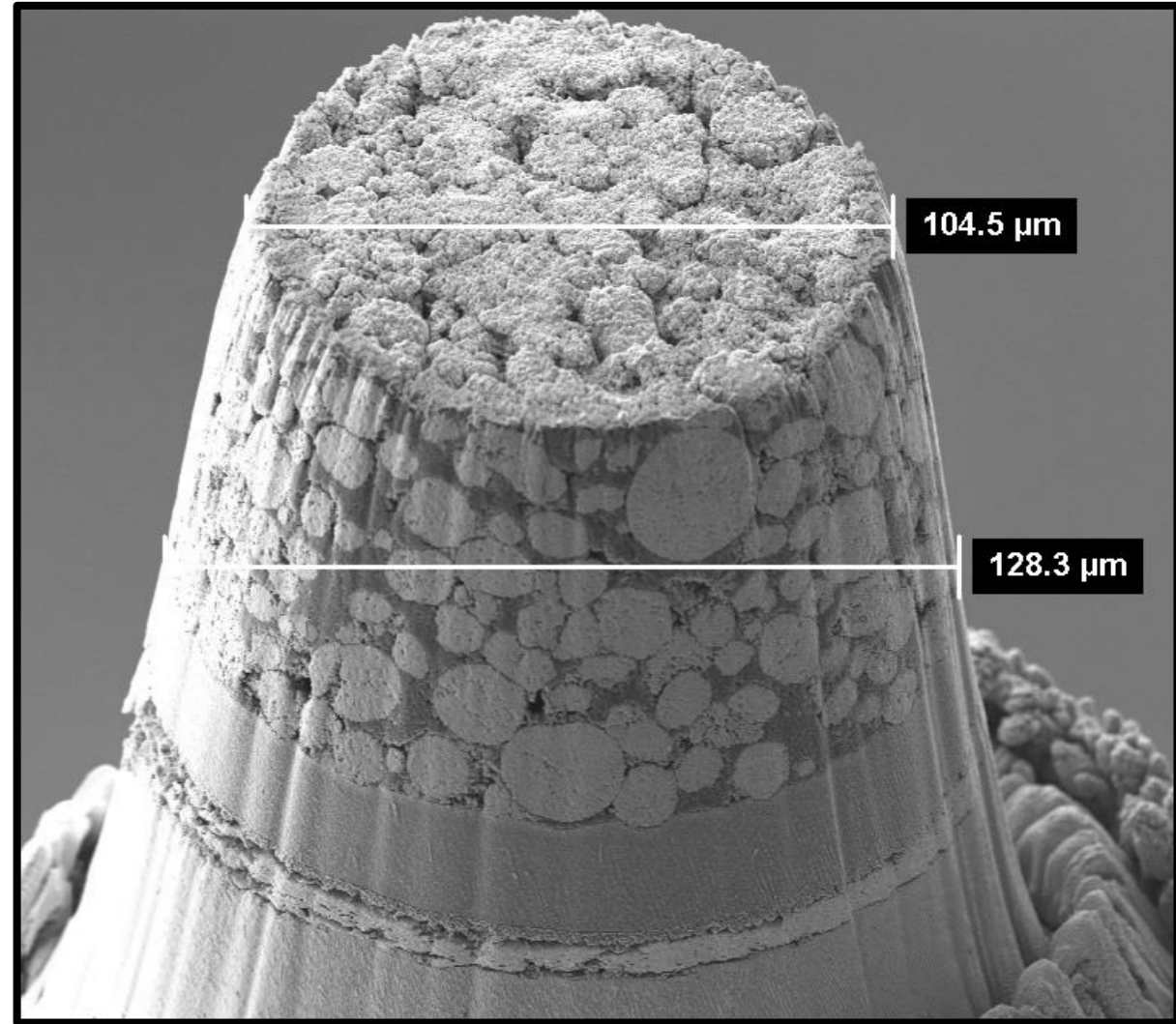
Gravure d'un pilier de 100 μ m de diamètre sur une pointe pour analyse au Synchrotron (tomographie)



Disque prélevé à l'emporte pièce
 $\varnothing = 1\text{mm}$



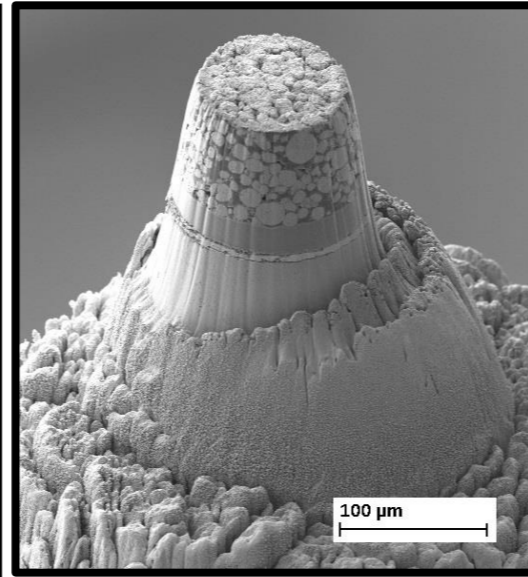
Disque découpé au laser
 $\varnothing = 1\text{mm}$



Disque collé sur la pointe
(laque à l'argent)



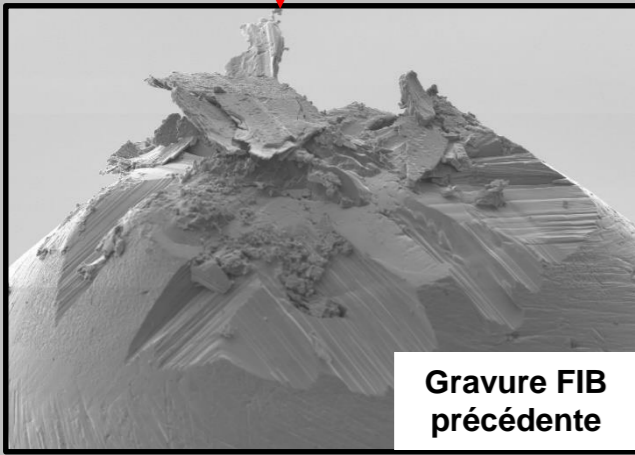
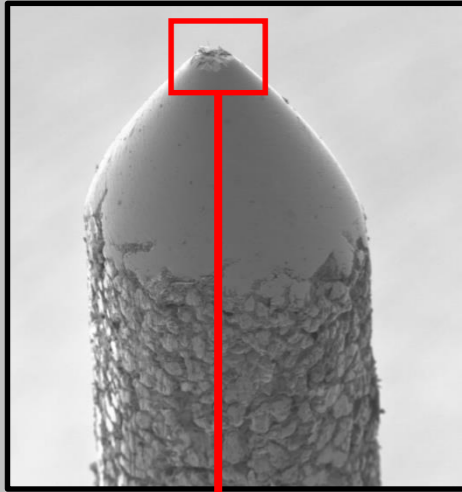
Gravure laser
 $\varnothing = 300\mu\text{m}$



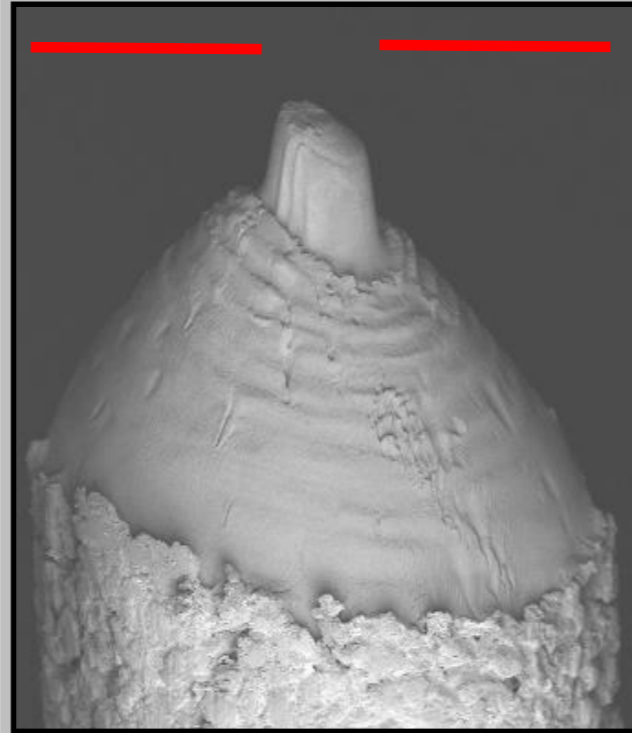
Gravure laser
 $\varnothing = 100\mu\text{m}$

Pointe STM (Scanning Tunneling Microscopy)

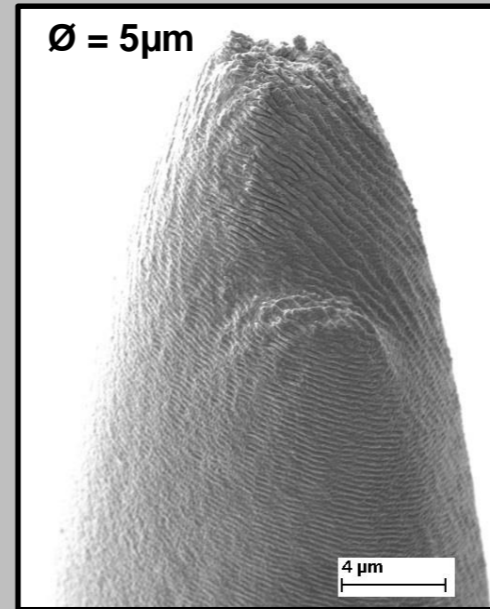
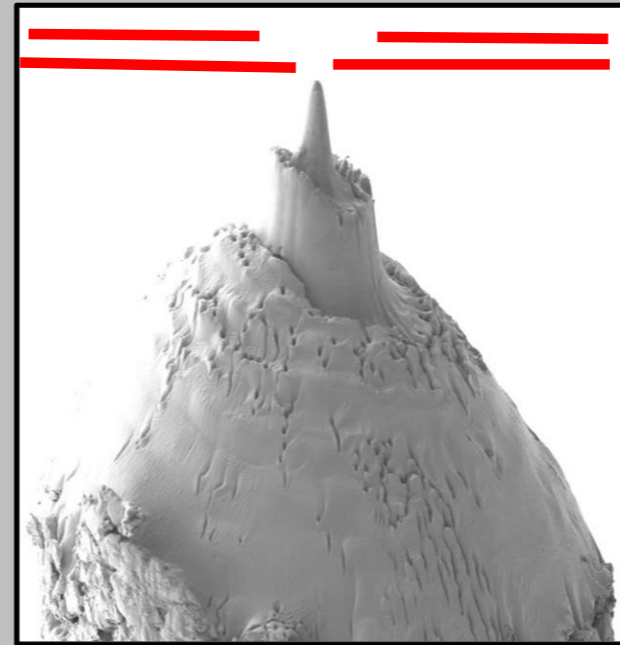
à partir d'un fil de Chrome de 500 μm de diamètre



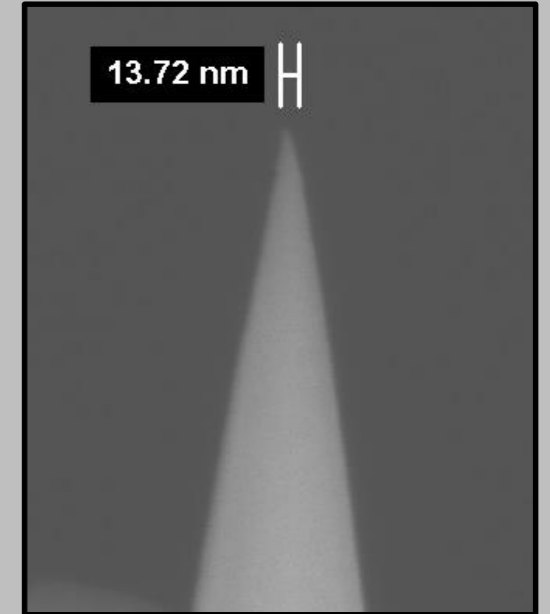
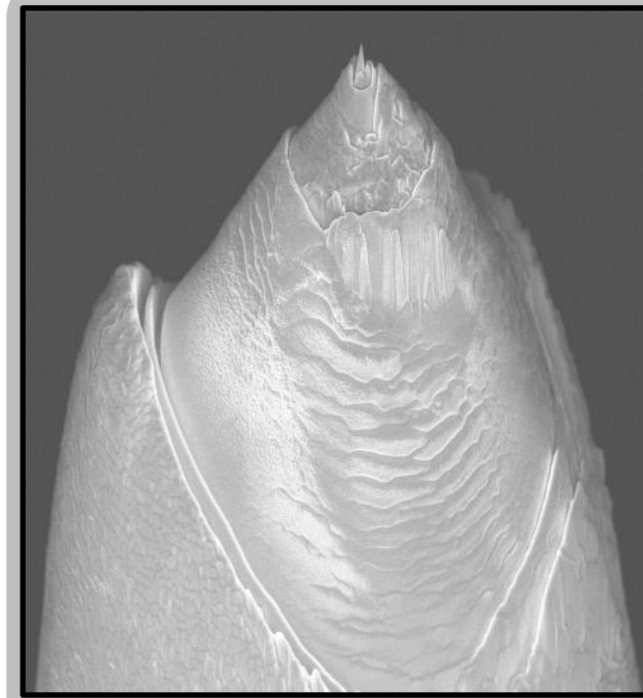
Fil de Chrome
 $\text{\O} = 500\mu\text{m}$



Etape 1 : Gravure laser
Rext = 260 μm - Rint = 50 μm
durée = 13s

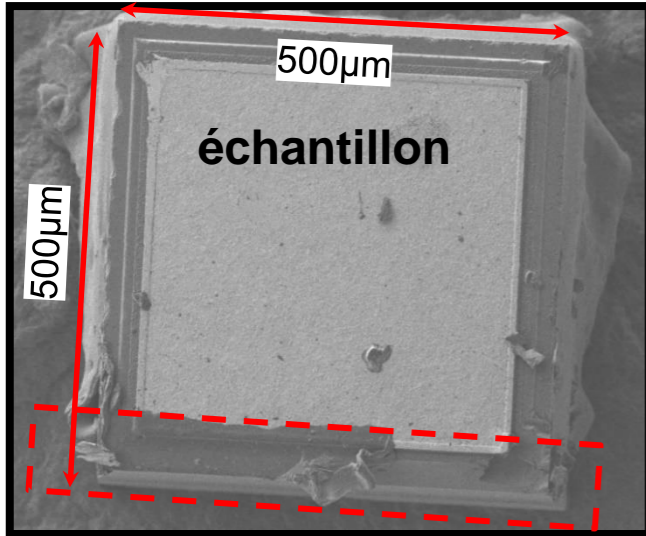


Etape 2 : Gravure laser
Rext = 260 μm - Rint = 50 μm +
Rext = 260 μm - Rint = 20 μm
durée = 13s + 13s

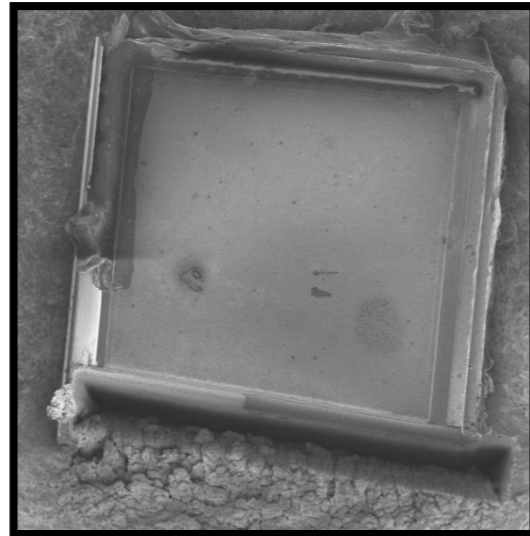


Etape 3 : Gravure FIB
durée = 1h

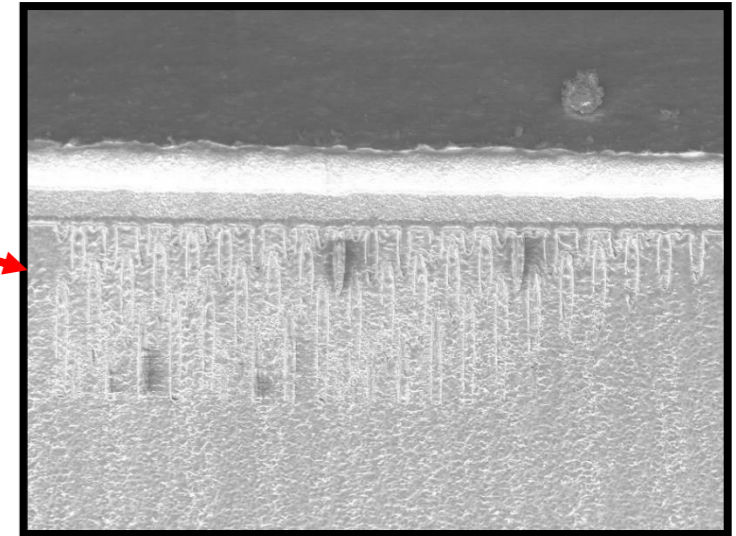
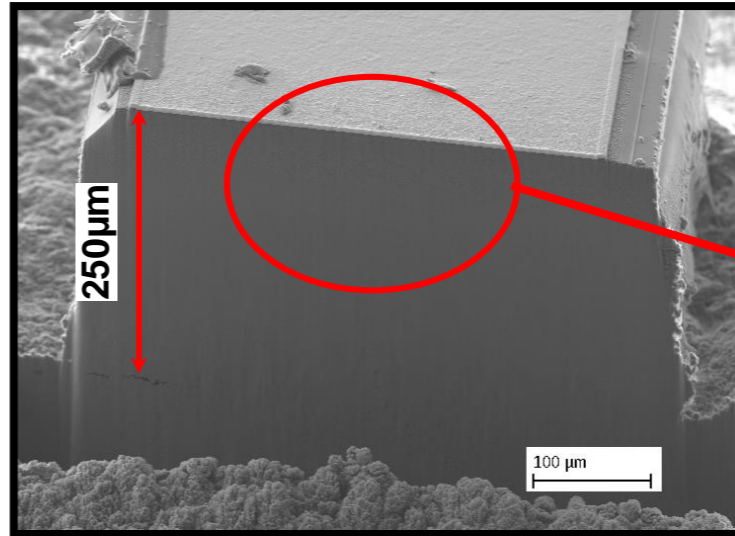
Gravure Laser + FIB



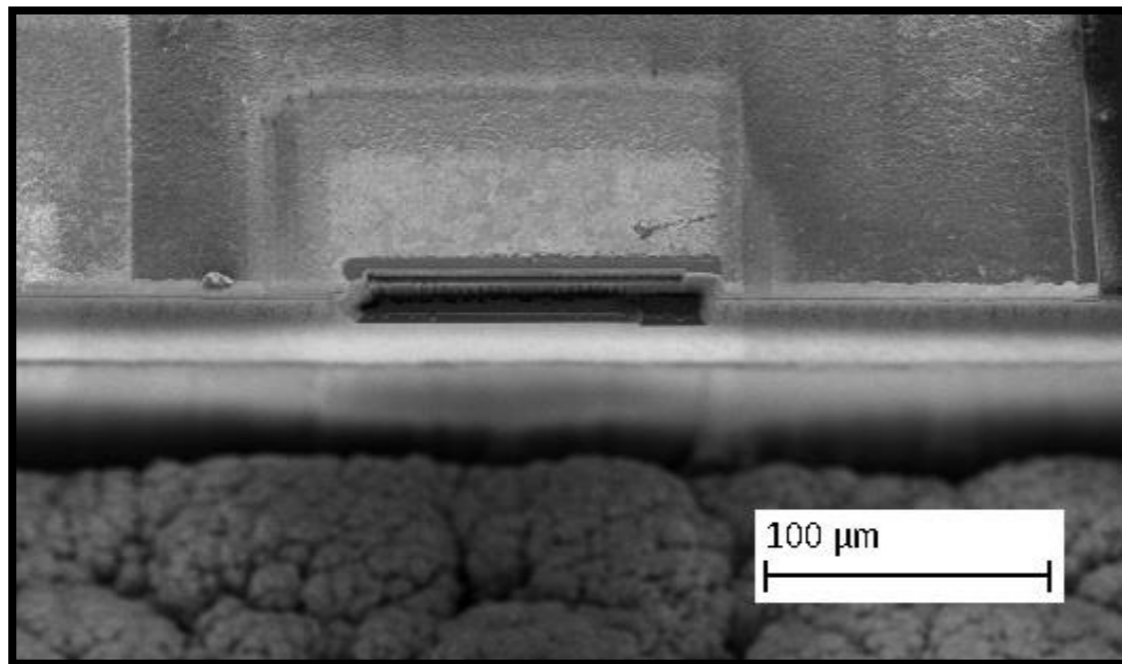
zone de gravure laser



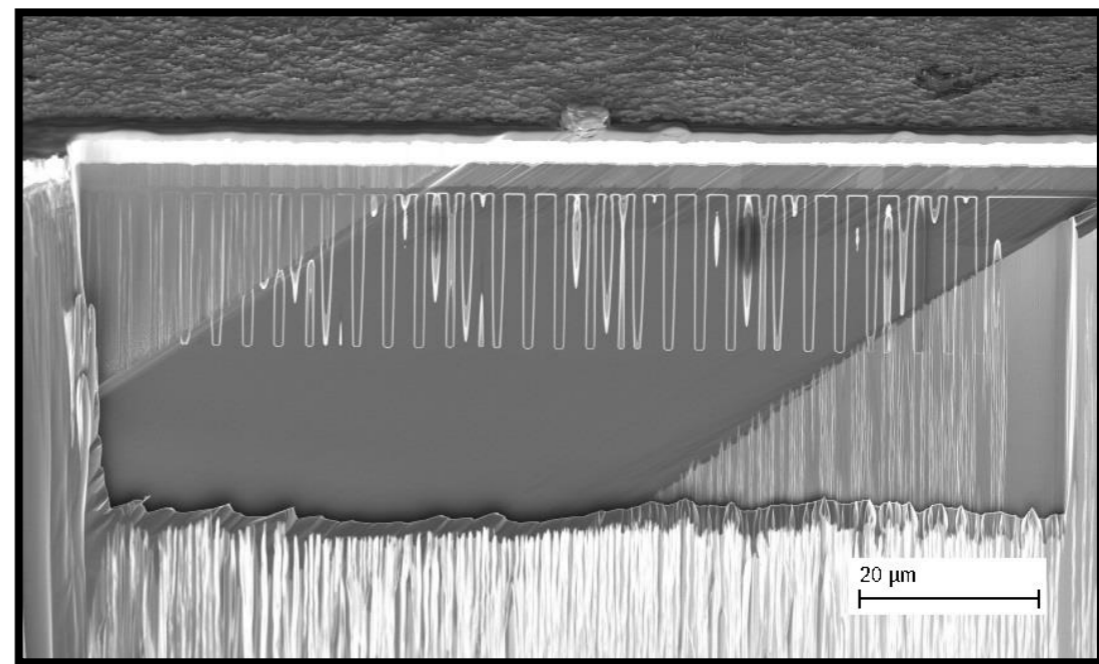
gravure laser = 60s



section après gravure laser



gravures FIB = 30mn



section après gravures FIB

Merci pour votre attention

Laser femtoseconde



Caméra

Laser femtoseconde

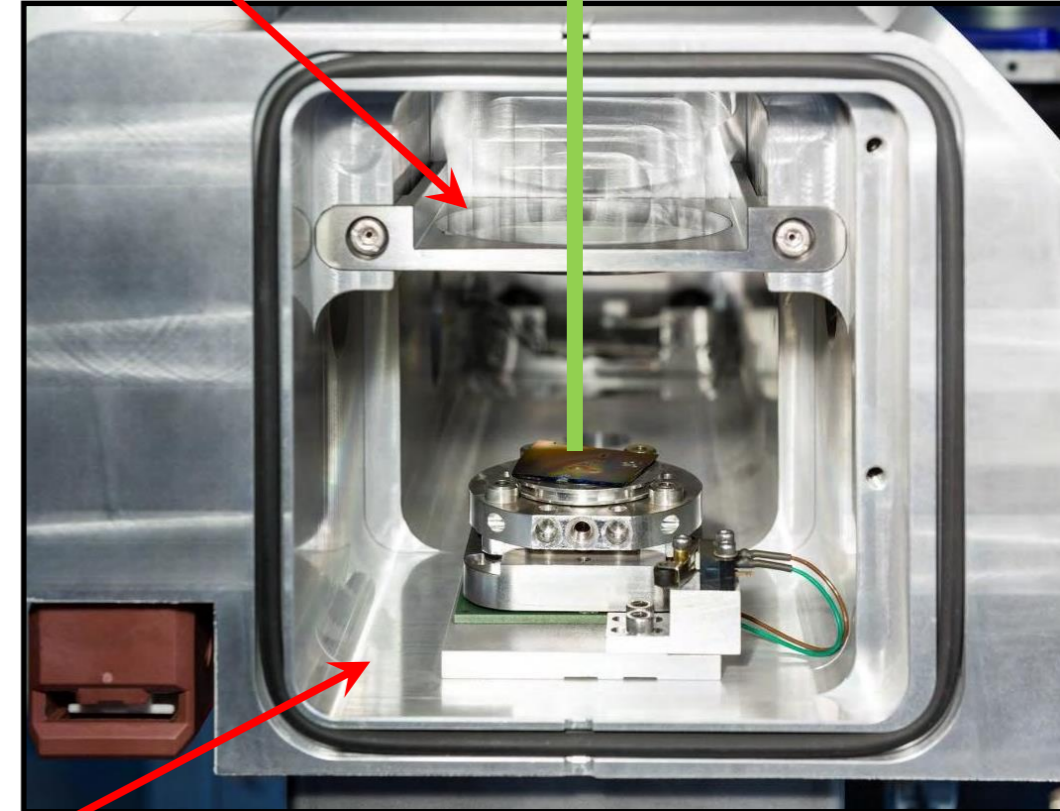
Unités de focalisation et de balayage du faisceau

Objectif télécentrique

SAS d'introduction

Fenêtre de protection amovible

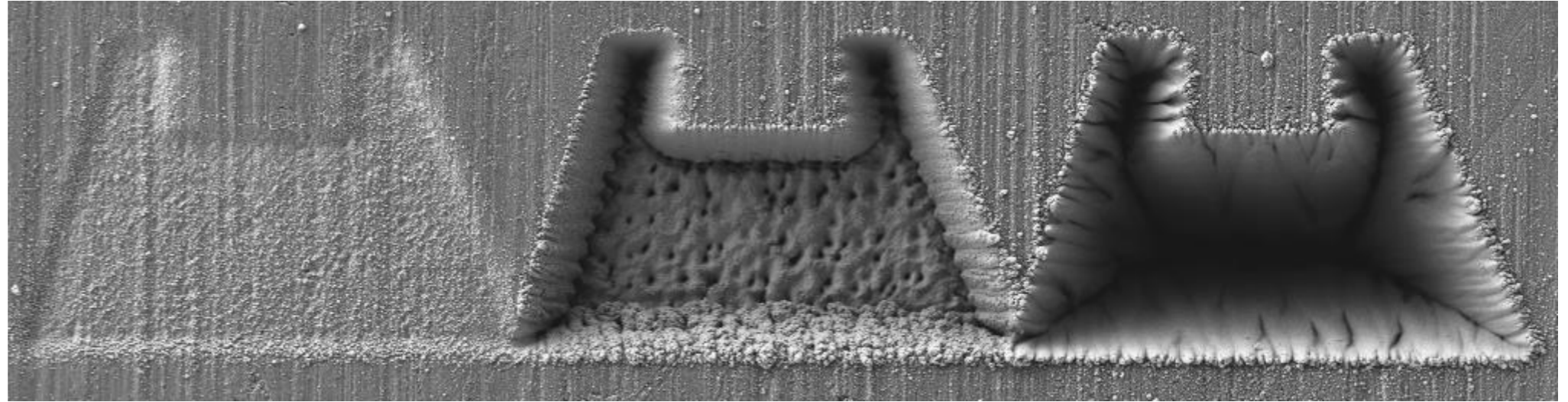
Faisceau laser -
Champ de balayage
40 mm x 40 mm



Gravure laser sous vide primaire ou à pression atmosphérique

Paramètres de gravure : Cross Jet

Sans Cross Jet



Avec Cross Jet

