

Prises de contact et caractérisations électriques de nano-composants dans un MEB

F. BAYLE



Journées Pédagogiques GN-MEBA 2015



UNIVERSITÉ
PARIS
SUD
Comprendre le monde,
construire l'avenir®

Fil conducteur de la présentation

- Situer Problématique et intérêt de développer contacts in-situ
- **Ingrédients** pour contacter nanofil:
 - * 1 CFEG UHR pour bien le voir
 - * Des positionneurs très précis:
Nanomanipulateurs: positionneurs piézo pour déplacer des pointes avec une résolution à \leq qq nm: principes et pilotage
 - * Pointes fines pour le contacter in-situ (dans le MEB): fabrication/préparation
- Applications à travers/avec 2 dispositifs:
caractéristiques I-V et imagerie EBIC de micro et nano-structures: μ -cristaux et nanofils
 - * Obstacles rencontrés: barrière Schottky pointe-dispositif Semi-Conducteur
 - * Comment les surmonter
 - * Conditions d'observation MEB
 - * Résolution SE/EBIC

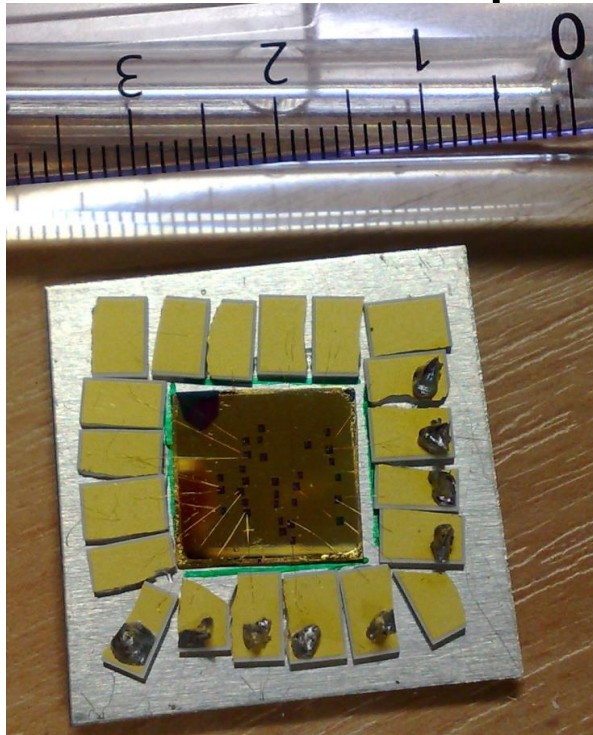


PLAN

- **Introduction: problématique**
- Ingrédient 1: CFEG UHR
- Ingrédient 2: Nanomanipulateurs
- Ingrédient 3: pointes fines
- Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN
- Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC
- Conclusion
- Perspectives

Intérêt de prise de contacts in situ dans le MEB

- Eviter « wire bonding » des composants à caractériser (taille micro à nanométrique) vers pads pour station sous pointes couplée à Microscope Optique ou Binoculaire



Pads de contact (litho é)
Reprise par wire bonding
Vers pads plus gros pour contact station sous pointe
À micro-manipulateurs Couplée à MO

PLAN

- Introduction: problématique
- **Ingrédient 1: CFEG UHR**
- Ingrédient 2: Nanomanipulateurs
- Ingrédient 3: pointes fines
- Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN
- Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC
- Conclusion
- Perspectives

CFEG UHR Hitachi SU-8000



Cryo-transfer Gatan Alto 2500



PLAN

- Introduction: problématique
- Ingrédient 1: CFEG UHR
- **Ingrédient 2: Nanomanipulateurs**
- Ingrédient 3: pointes fines
- Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN
- Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC
- Conclusion
- Perspectives

Principe du Moteur piezo: les ingrédients



« inchworm motor »

- 1 partie fixe=« stator », constituée de pastille ou cylindre en céramique cristal PZT
- 1 partie mobile=« slider », parois rugueuses (en céramique)
- La friction au cœur/à la base du mécanisme de déplacement:

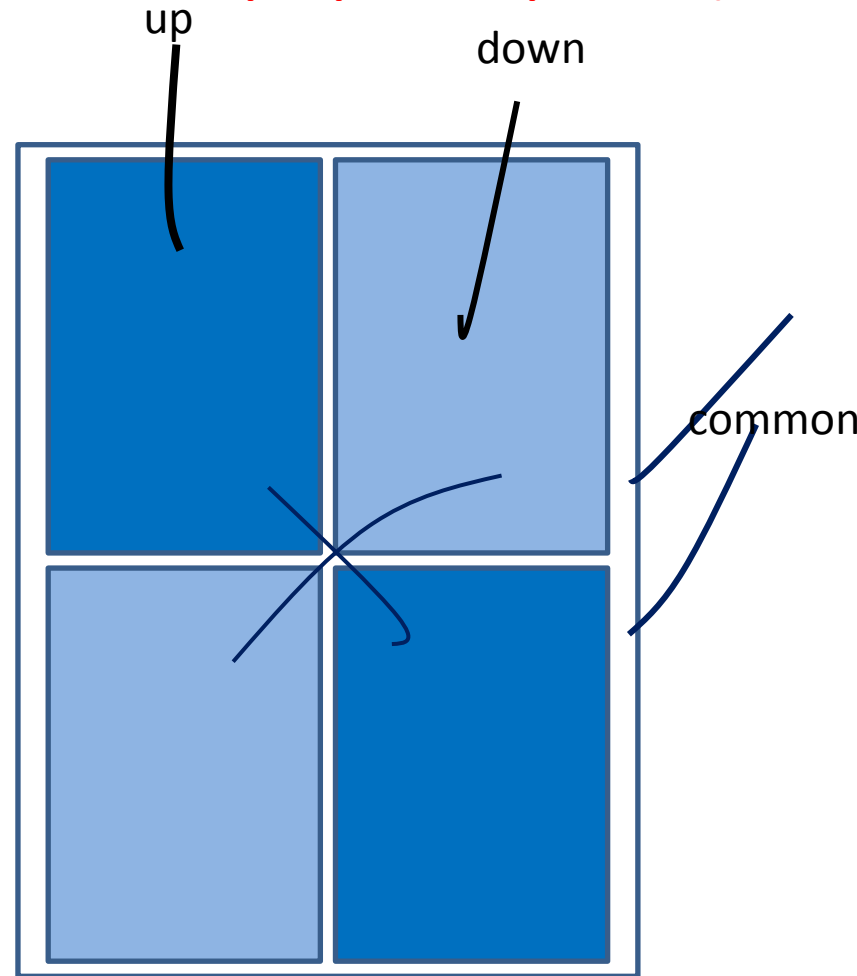
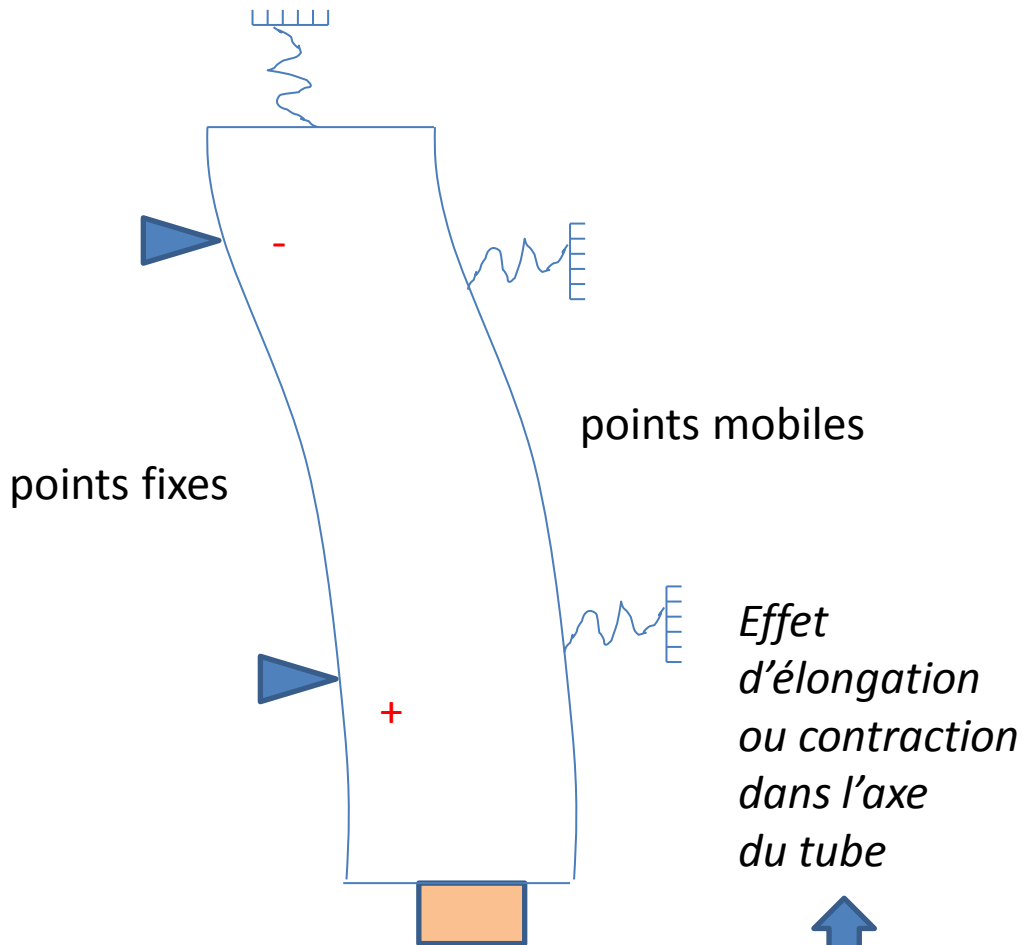


coeff de friction
statique > dynamique
⇒ Mouvement saccadé
(à-coups)

Le tube « contorsionniste »

Déformation d'un cylindre (PZT)

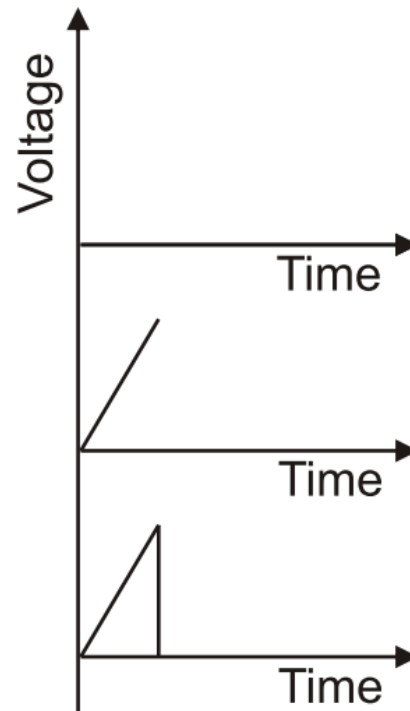
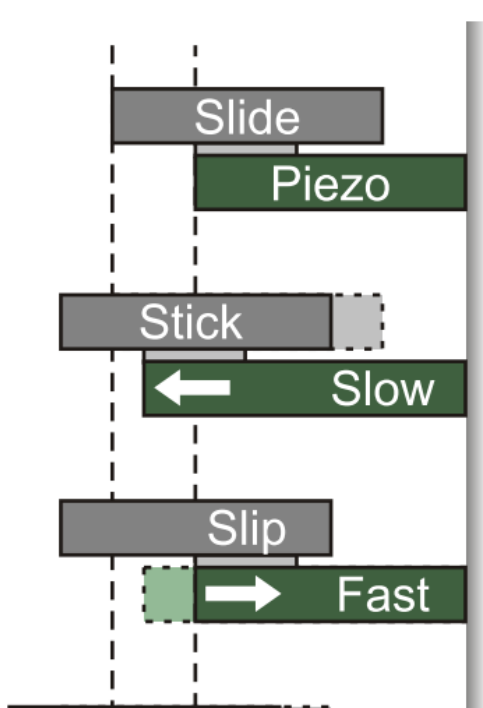
Polarisé
(électrodes disposées
en quinconce 4 quadrants)



Doigt piezo pouvant
Ramper le long d'une
Paroi rugueuse
(Pour déplacer le « slider »)

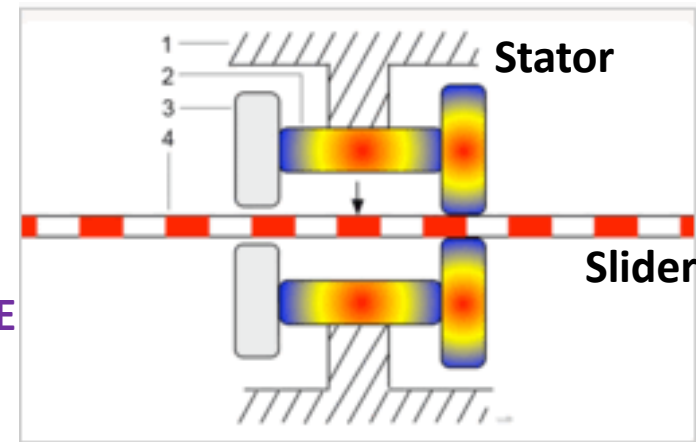
Principe du Moteur piezo: grands déplacements

- Amplitude max de déplacement par élongation du tube piézo : qq μm
- Itérations: « stick-slip effect » pour avancer sur de grandes distances, en rampant comme la chenille

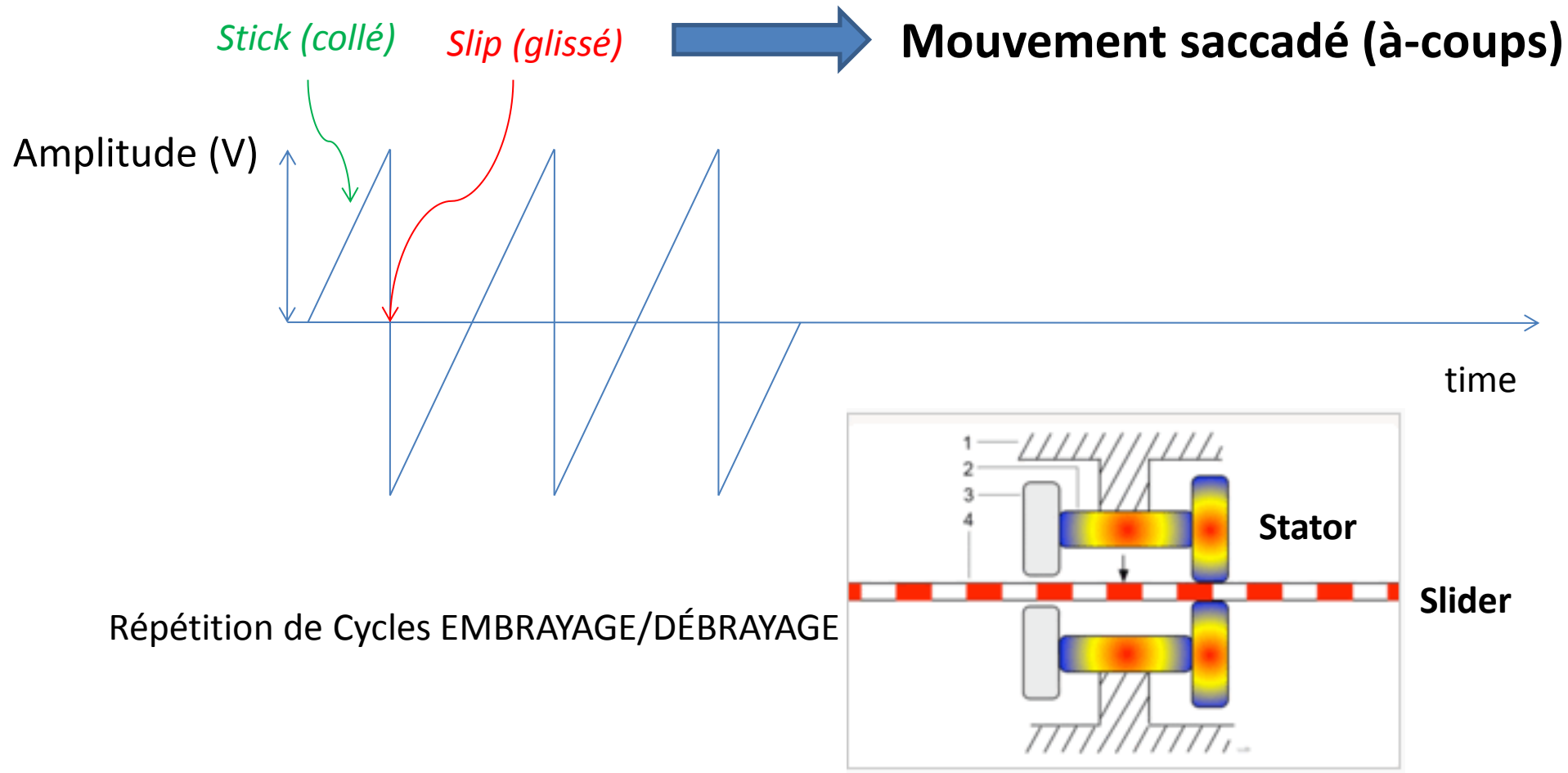


EMBRAYAGE

DÉBRAYAGE

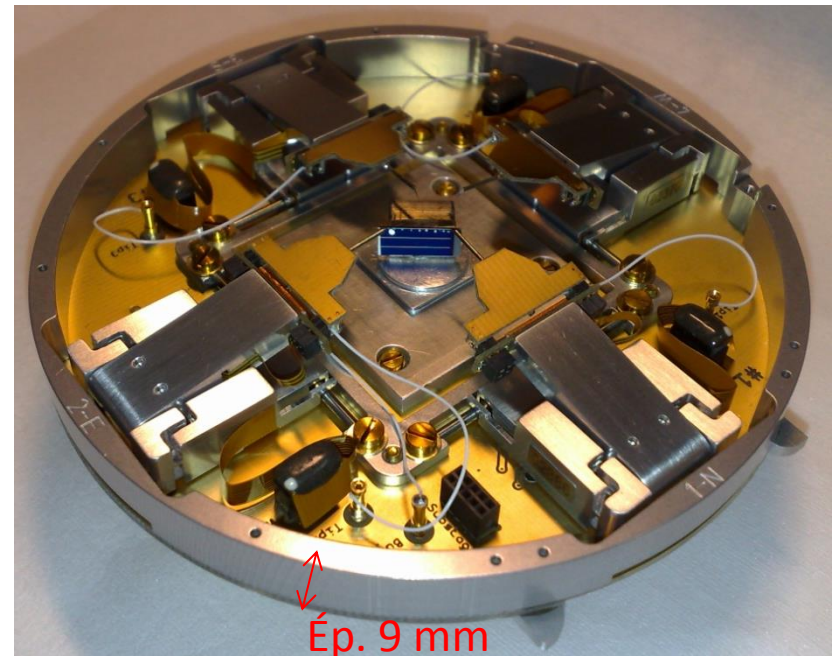
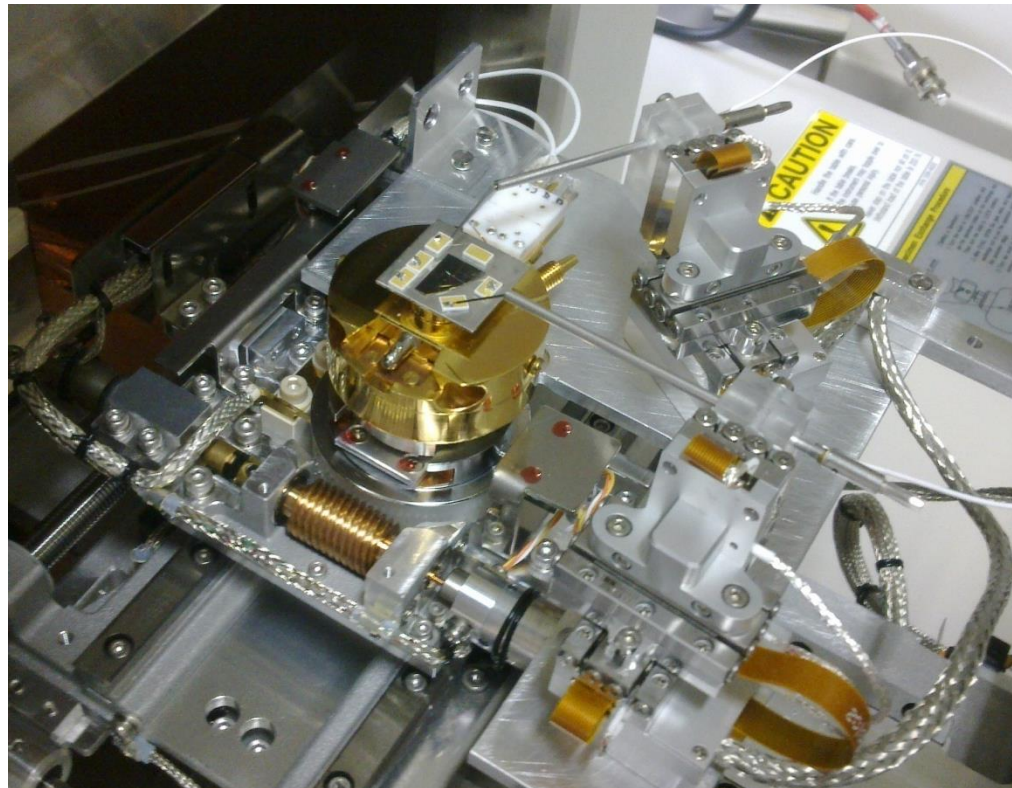


Itération par rampes de tension



Aperçu « macroscopique »

- Montage à partir de platines **SMARACT**, compatible avec Cryo-transfert Gatan dans CFEG Hitachi SU8000
- ProberShuttle **KLEINDIEK** PS4, version miniaturisée insérable par le SAS du MEB



Performances de qq positionneurs piezo utilisés

SMARACT (coord. Cartésiennes)

- *SCAN MODE*: slow elongation of the piezo element, sub-nm resolution, amplitude de déplacement $\approx 1.4 \mu\text{m}$
- *STEP MODE*: steps down to 50 nm, driven by sawtooth ramps à fréq de qq kHz, resolution qq nm (**closed loop control**)
- Courses: +/- 10mm en X,Y (horizontal)
+/-5 mm en Z (vertical)
- Polar max 200V

KLEINDIEK (coord. « Polaires »)

- « Fine mode »
- A (left/right), C (in/out): $1.7 \mu\text{m}$ range; B (up/down): $30 \mu\text{m}$ range*
- Resolution $\approx 0.4\text{nm}$ (codage 12 bits \Rightarrow range/4096 steps) on linear axes
- $\approx 7\text{nm}$ on rotational axis*
- « Coarse mode »: amplitude « sawtooth » à ajuster pour obtenir mouvement (approche par apprentissage)
- « *Fine with Coarse* », retract option
- Courses: 7 et 5mm selon A et C
0 à 90° selon B
- Polar max 80V (tout est miniaturisé)

* sont des valeurs mesurées

2 approches du mouvement itératif par friction (gestion des à-coups)

Smaract

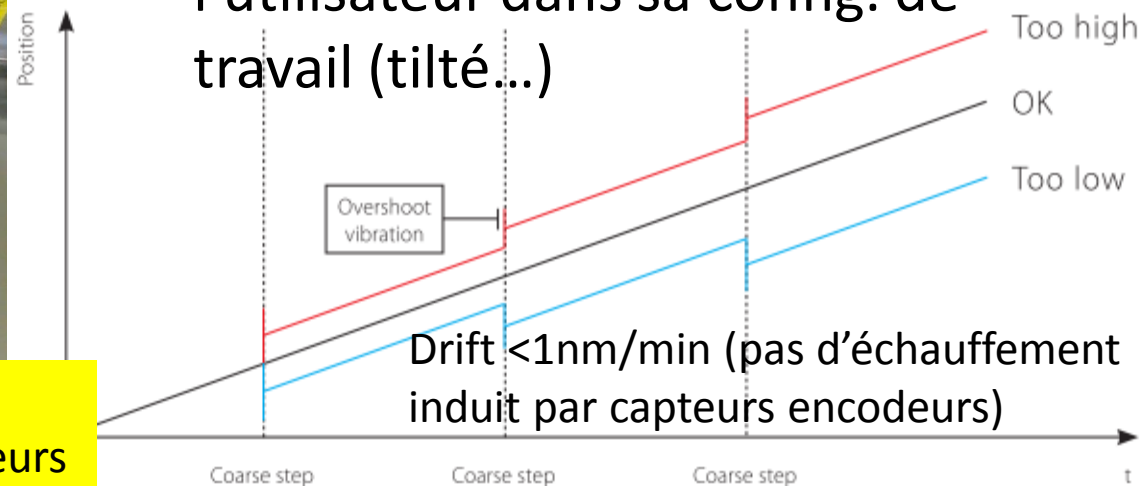
- « Control loop » (asservi sur consigne de position) → lui demander de se déplacer de telle distance en nm (correspondant à un certain nombre de pas)



Peut être désactivée pour limiter l'échauffement induit par alim. Encodeurs à de brèves périodes (dès que pas besoin)

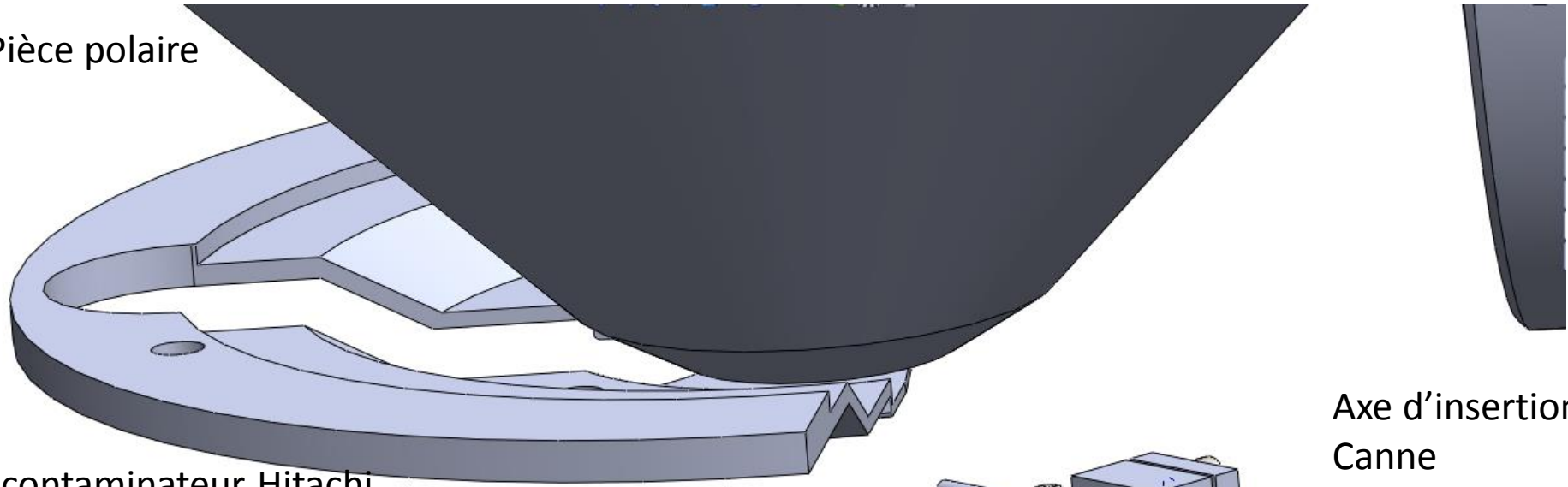
Kleindiek

- « Amplitude wizard » pour éviter les à-coups (sauts de position générant vibrations) lorsque « coarse step » initié après déflexion max du « fine step », à ajuster par l'utilisateur dans sa config. de travail (tilté...)

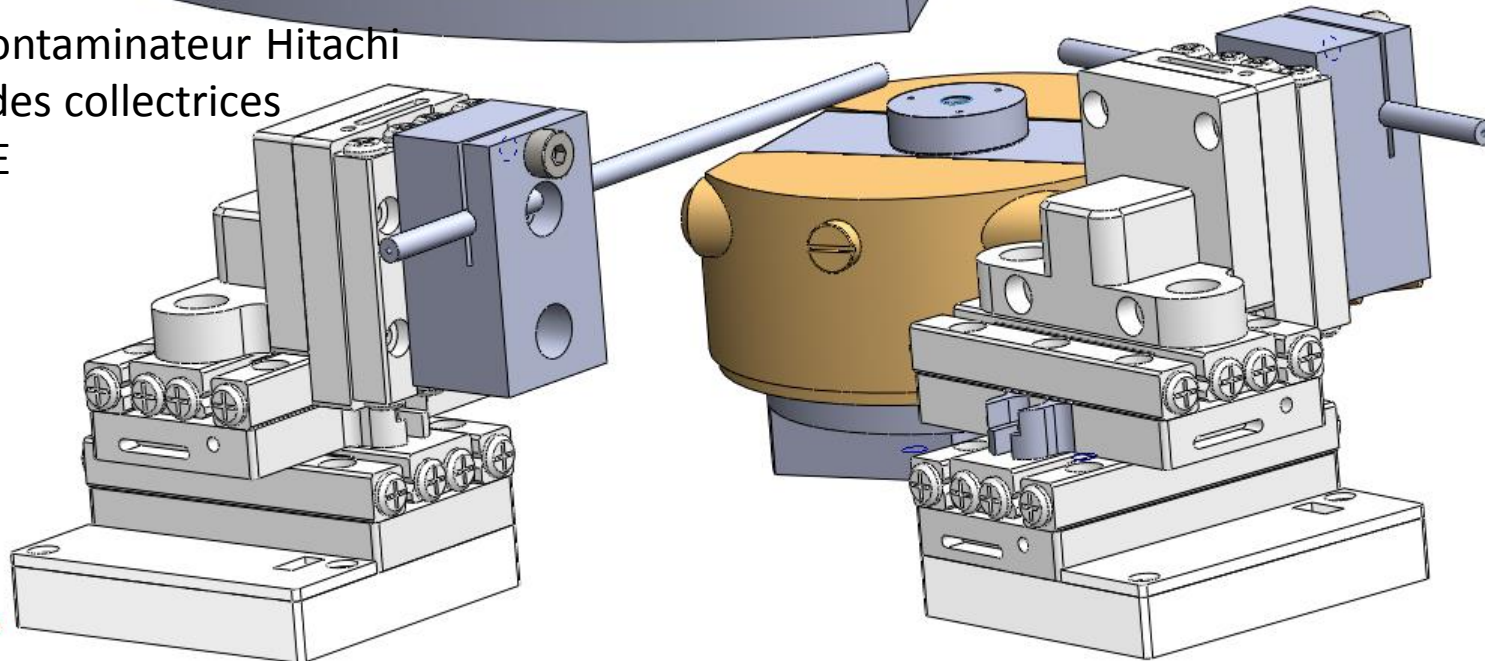


CAO du schéma d'implantation

Pièce polaire



Anticontamineur Hitachi
+ anodes collectrices
des SE



Axe d'insertion
Canne
Cryo-transfert



Logiciel de pilotage « maison »

Fabien72.vi

Echier Édition Affichage Projet Exécution Outils Fenêtre Aide

0 0 0 0 0 0 0 0

Initialization Configuration Movement Exit

INPUTS for SEM: 1) Set size 8", Height +35mm 2) To match selected Manipulator command axes (Joystick and Slider) on SEM image, ROTATE SEM scan by 180deg

Manipulator Left

Joystick X-Y

Slider Z

Joystick virtuel

palonnier

X Left manipulator (mm) 1E-6

X Middle manipulator (mm)

X Right manipulator (mm) 1E-6

Y Left manipulator (mm) 0

Y Middle manipulator (mm)

Y Right manipulator (mm) -3E-6

Vitesse X-Y

Vitesse Z

Z Left manipulator (mm) 2E-6

Z Middle manipulator (mm)

Z Right manipulator (mm) -2E-6

stop STOP STOP

Tableau de bord:

- * Ajuster sa vitesse
- * Connaître sa position

SETUP overview

COORDONNES PLATINE Hitachi S3600 (mm)

X (mm) 35

Y (mm) 55

Z (mm) 20

Tilt (deg) 0

Rotation (deg) 0

stopped

holding

movement

CALIBRATE positions (manipulators + tips) for TOP VIEW

CALIBRATE tips positions for FACE VIEW

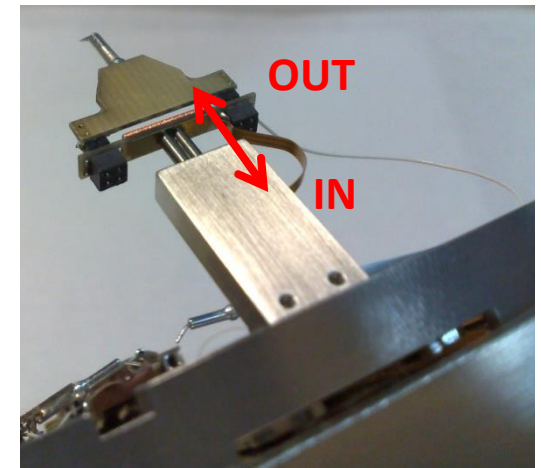
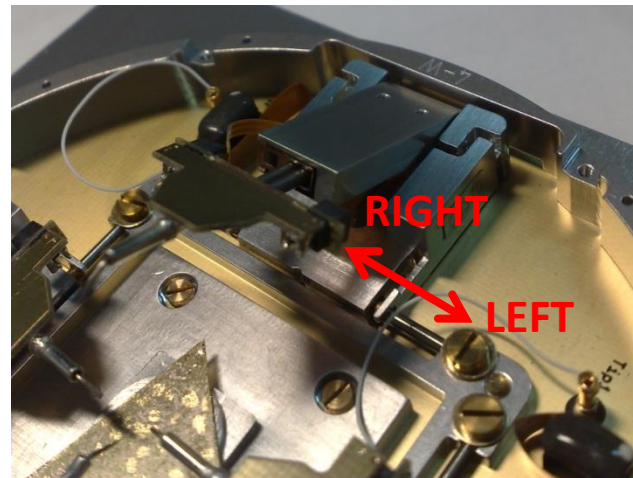
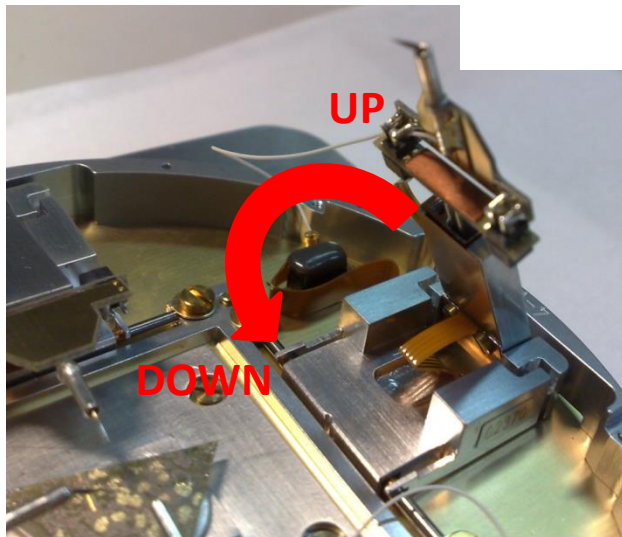
CHANGE display screen

Ou manettes de Joystick (Kleindiek)

Boutons
Pas à pas



Incrémentation Digitale versus Analogique (+ affiche nombre de pas → «feed-back» pour contrôler finement distance à l'obstacle: e.g. 500 steps \leftrightarrow 2 μ m à la verticale)

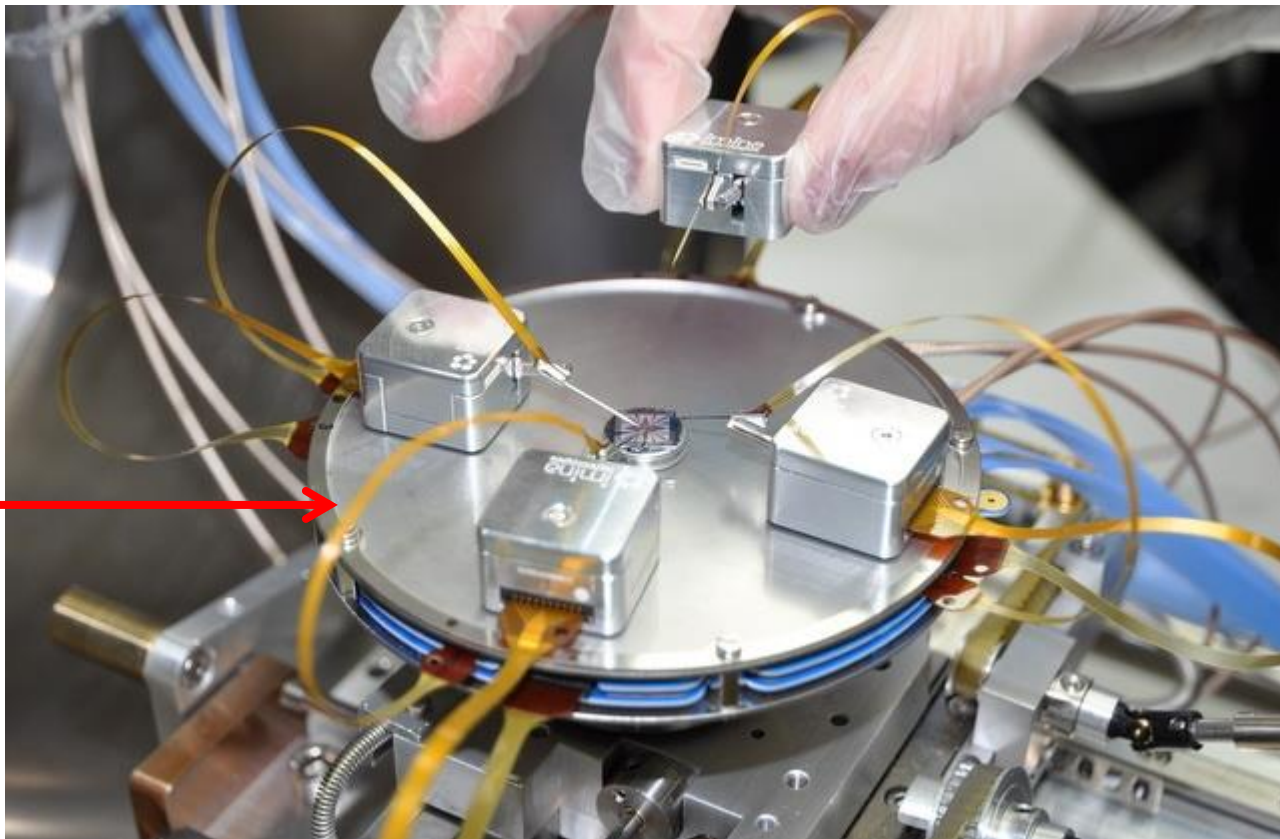


- Video de l'insertion

D'AUTRES ARCHITECTURES EXISTENT!

Exple constructeur: IMINA

Embase
magnétique

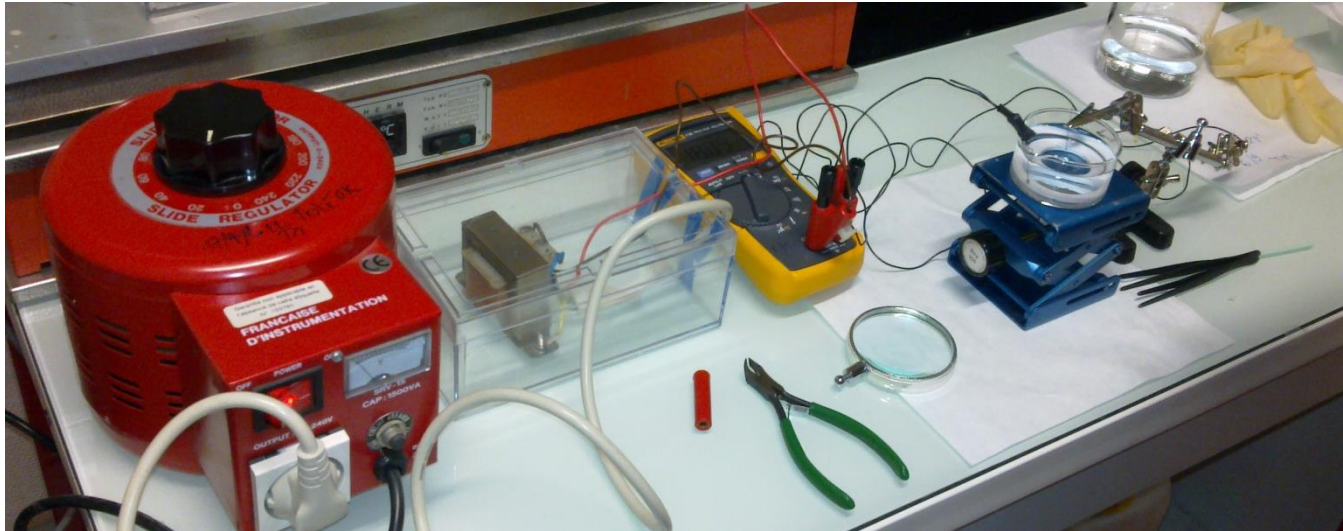


PLAN

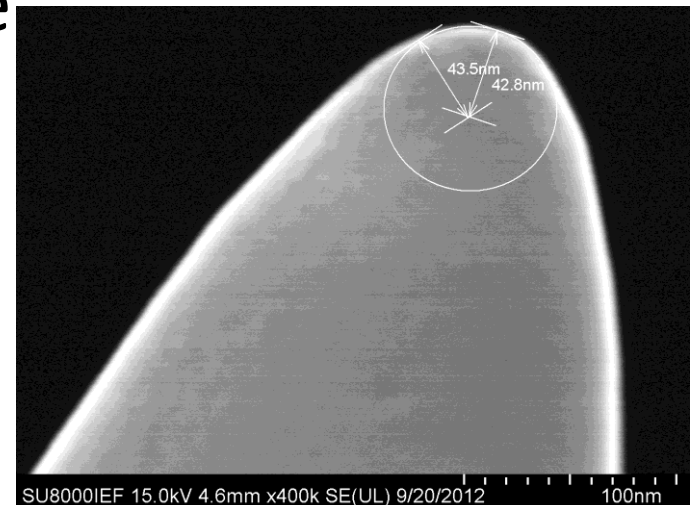
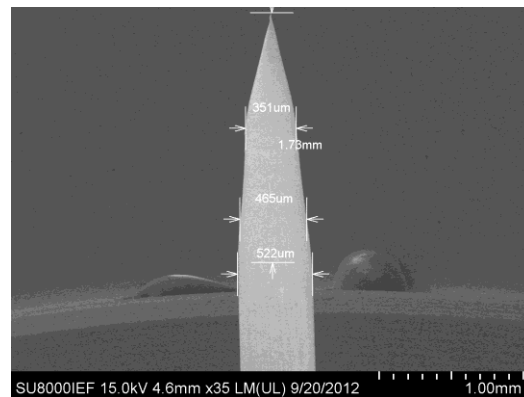
- Introduction: problématique
- Ingrédient 1: CFEG UHR
- Ingrédient 2: Nanomanipulateurs
- **Ingrédient 3: pointes fines**
- Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN
- Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC
- Conclusion
- Perspectives

Fabrication des pointes (W)

- Gravure dans NaOH en AC/DC



- Illustrer par diamètre ultime



Préparation des pointes en W

Étapes essentielles pour qu'elles soient propres et conductrices

- Désoxydation HF:H₂O 1:5 10min
Y compris après observation car se contaminent au Carbone dans la chambre MEB à fort G
- Rinçage H₂O
- Séchage N₂gaz
- CONSERVATION des pointes sous atmosphère inerte: « packing » dans sachet gonflé à l'Argon



PLAN

- Introduction: problématique
- Ingrédient 1: CFEG UHR
- Ingrédient 2: Nanomanipulateurs
- Ingrédient 3: pointes fines
- **Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN**
- Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC
- Conclusion
- Perspectives

I. Montage « maison » à partir platines Smaract, compatible cryo

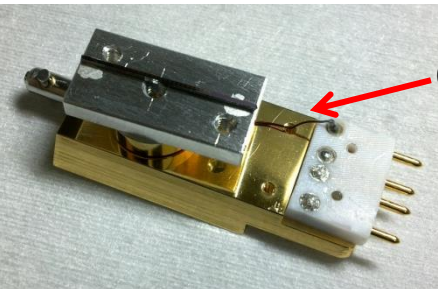
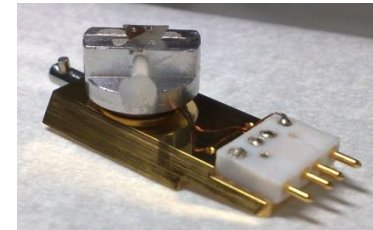
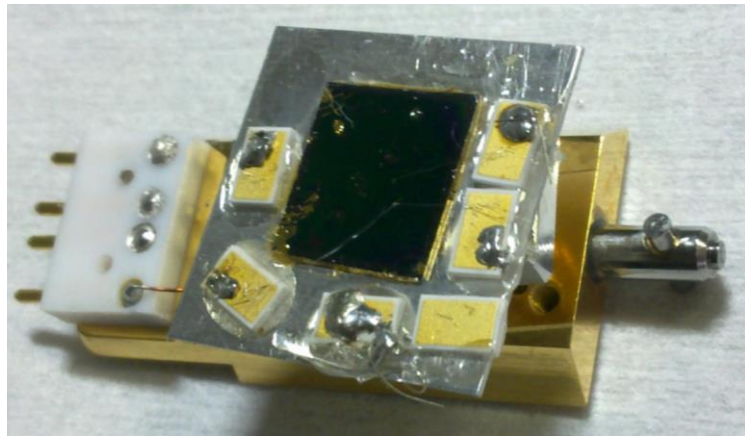
- Long à mettre en place: ventiler chambre CFEG Hitachi (pas prévu pour observation)
- Insertion des échantillons dans la chambre du MEB par SAS de Cryo-transfert Gatan
- Instrumentation autour du MEB pour mesures électriques (EBIC=Electron Beam Induced Current): photos d'ensemble de la chaîne où l'on voit les brides...

Insertion des échantillons...

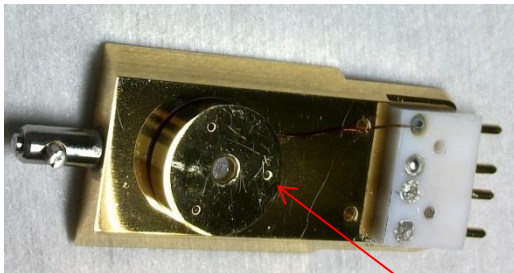
Ech. fixés sur « navette »
Porte-échantillon EBIC

Support pour observations par la tranche
(Cross-section):

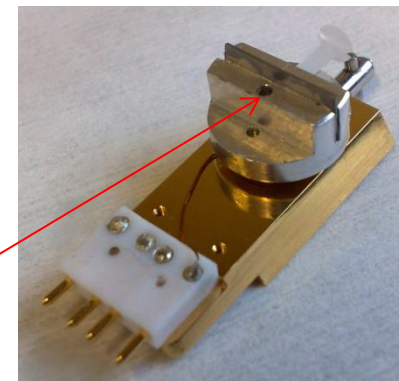
retirer vis nylon après collage laque Ag sinon charge!



Connexion au porte-éch.
Isolé électriquement
(De la navette par rondelle
Nylon)

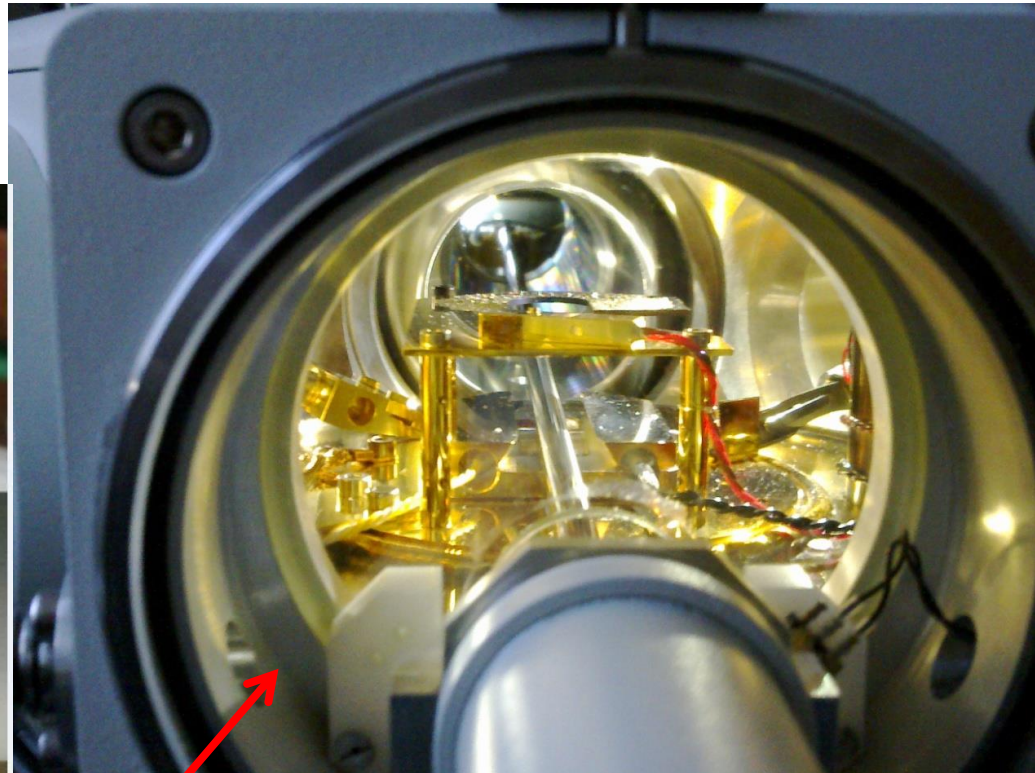
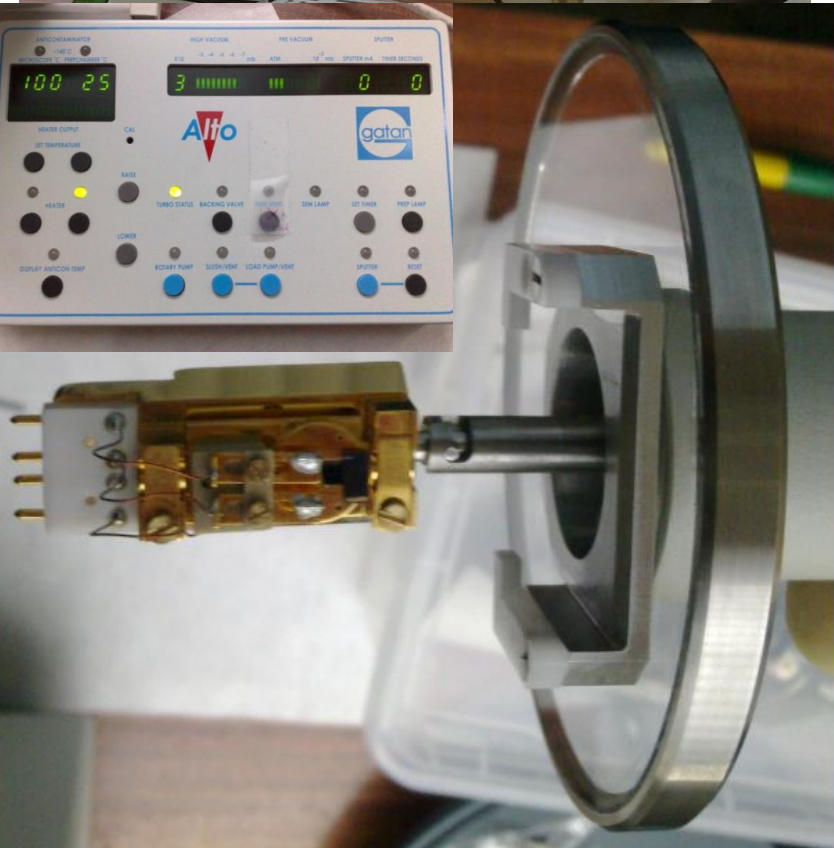
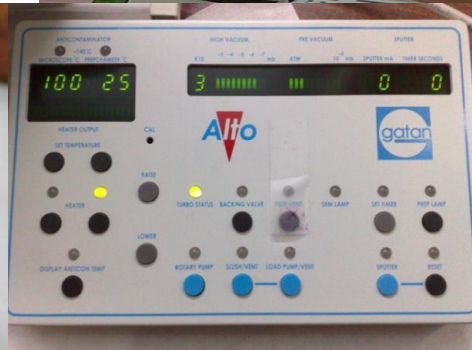


Cages de Faraday pour mesure du courant de sonde



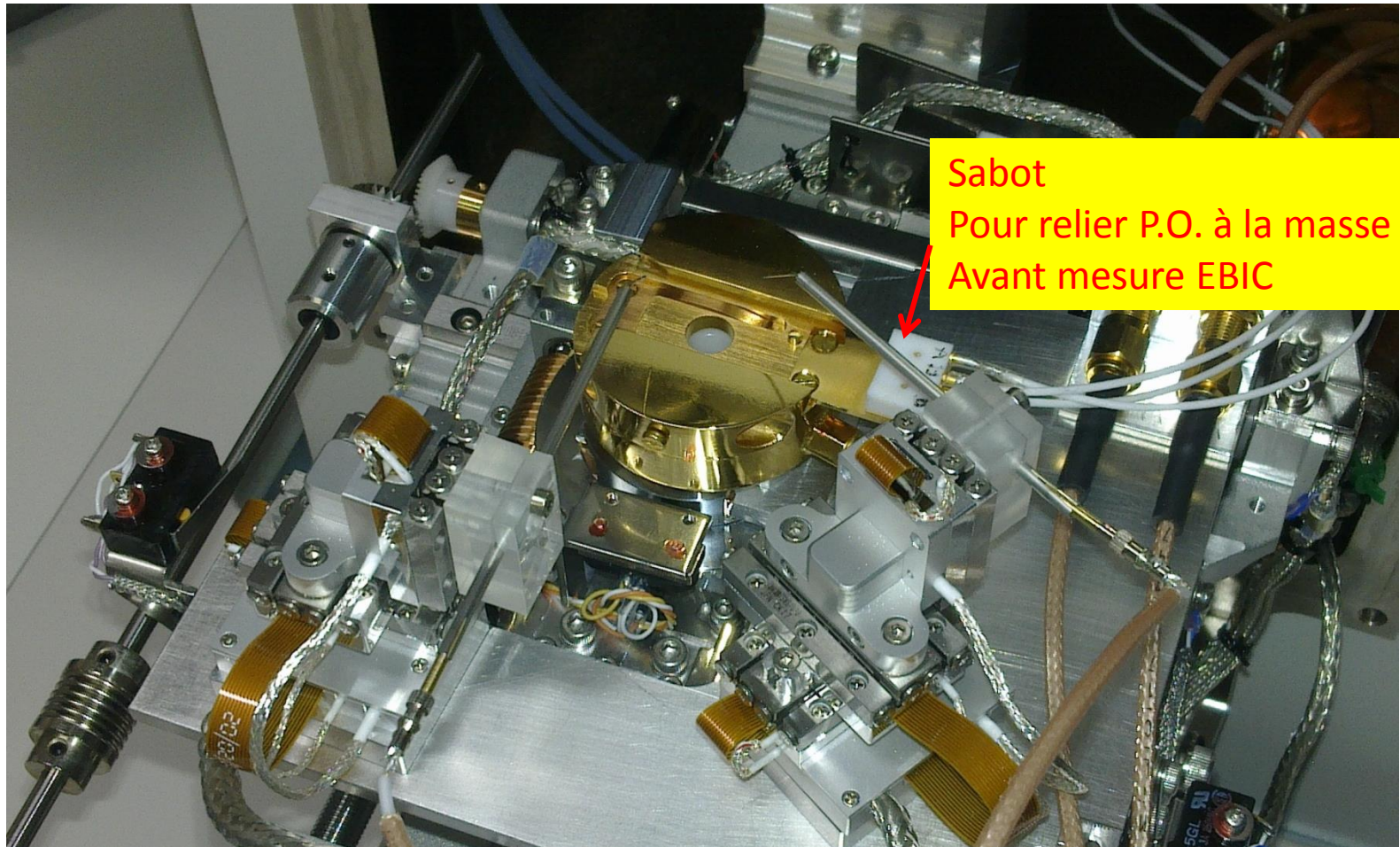


**Transfert dans la chambre du MEB par la
canne de Cryo-transfert Gatan Alto 2500**



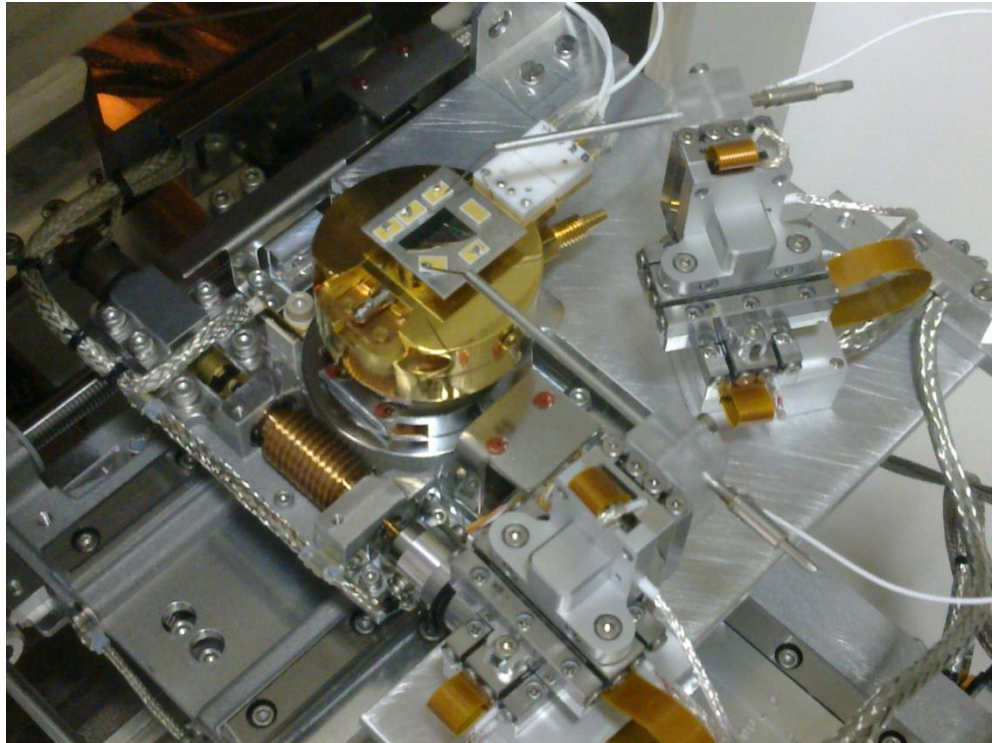
**SAS
Gatan**

...dans la chambre du MEB

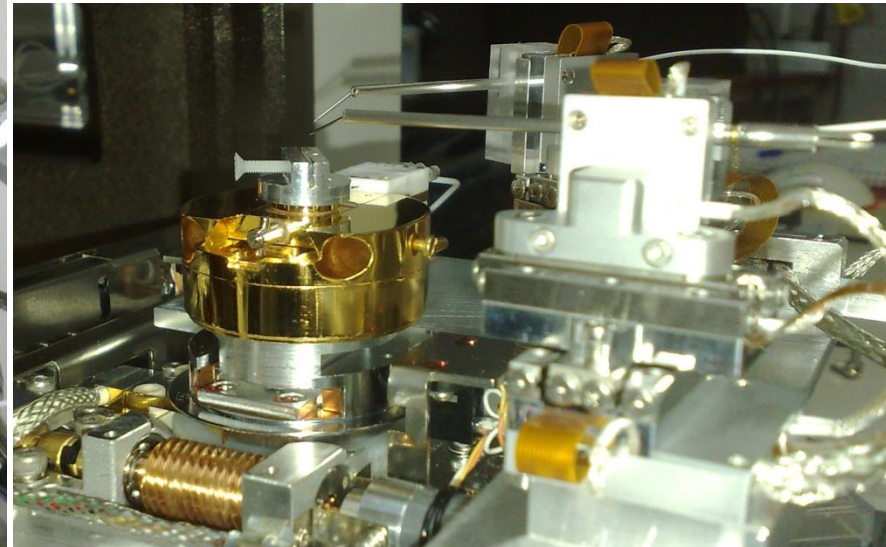


Raccordements des pointes et du porte-échantillon sous HV à la masse colonne MEB (avant mesure électrique EBIC, cf photo des brides à l'extérieur) car porte-échantillon et porte-pointe isolés: étape cruciale pour éviter effets électrostatiques (décharges) qui détruiraient les objets à contacter (attention à tout effet capacitif... sur support porte-échantillon ... y compris dans les câbles auxquels les pointes sont reliées)

Aperçu une fois inséré



Vue de dessus (chambre ouverte)



Vue de face

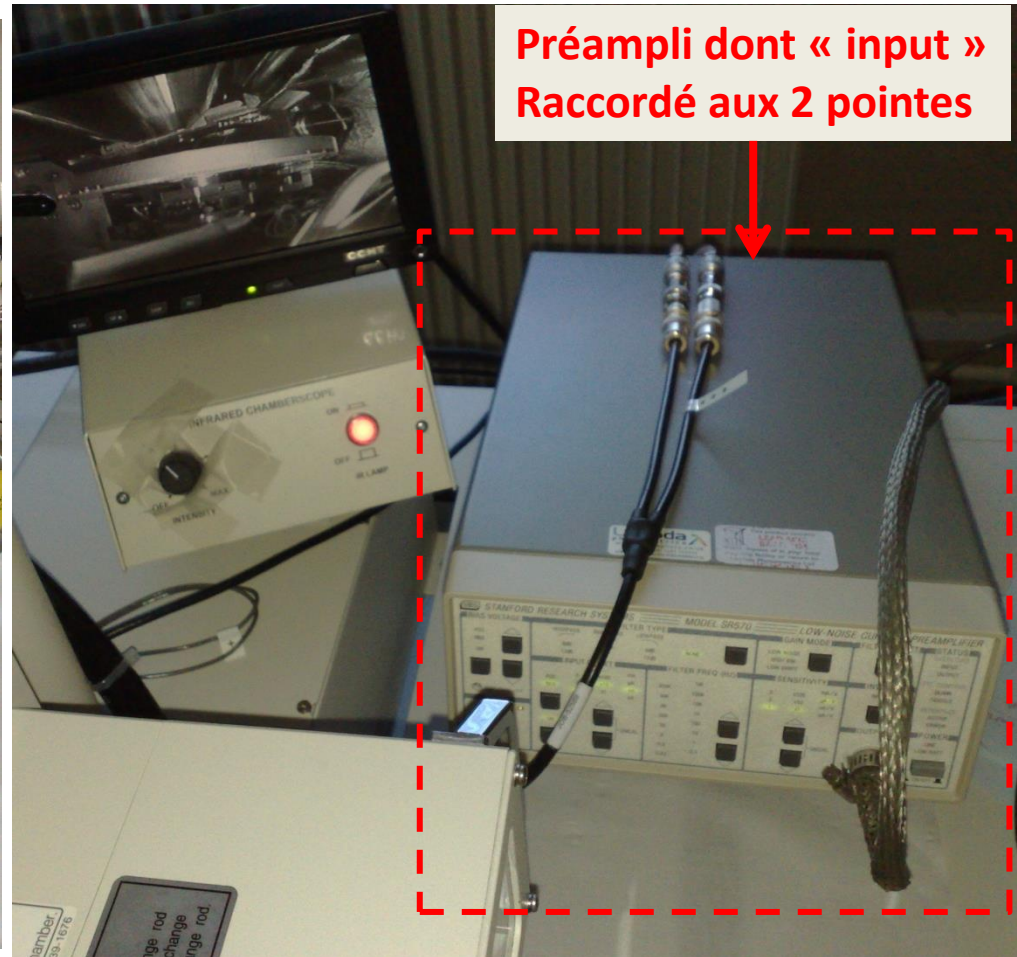
**2 pointes pour la prise de contacts
Mobiles (« Left » et « Right »)**

Aperçu une fois inséré

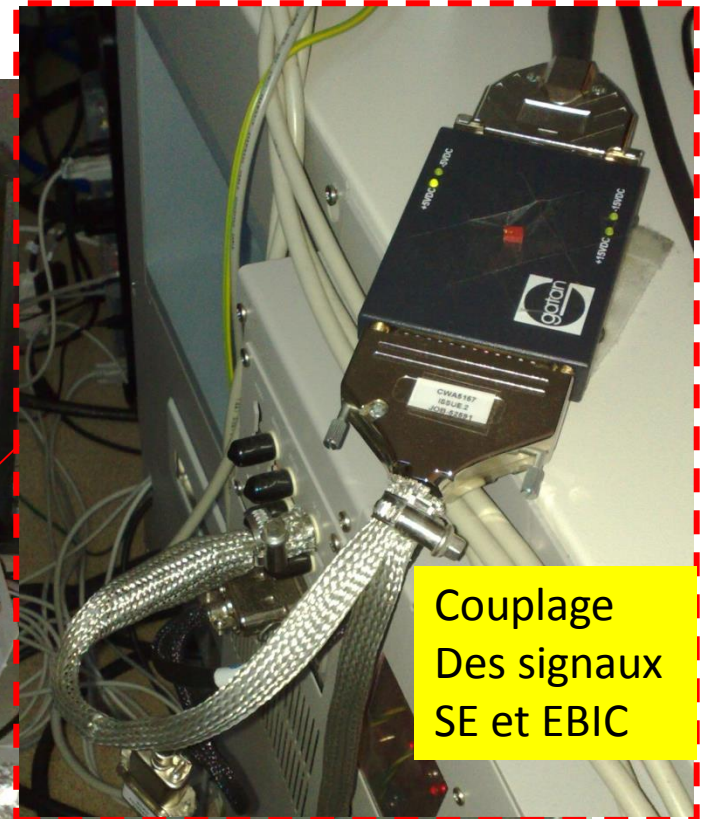
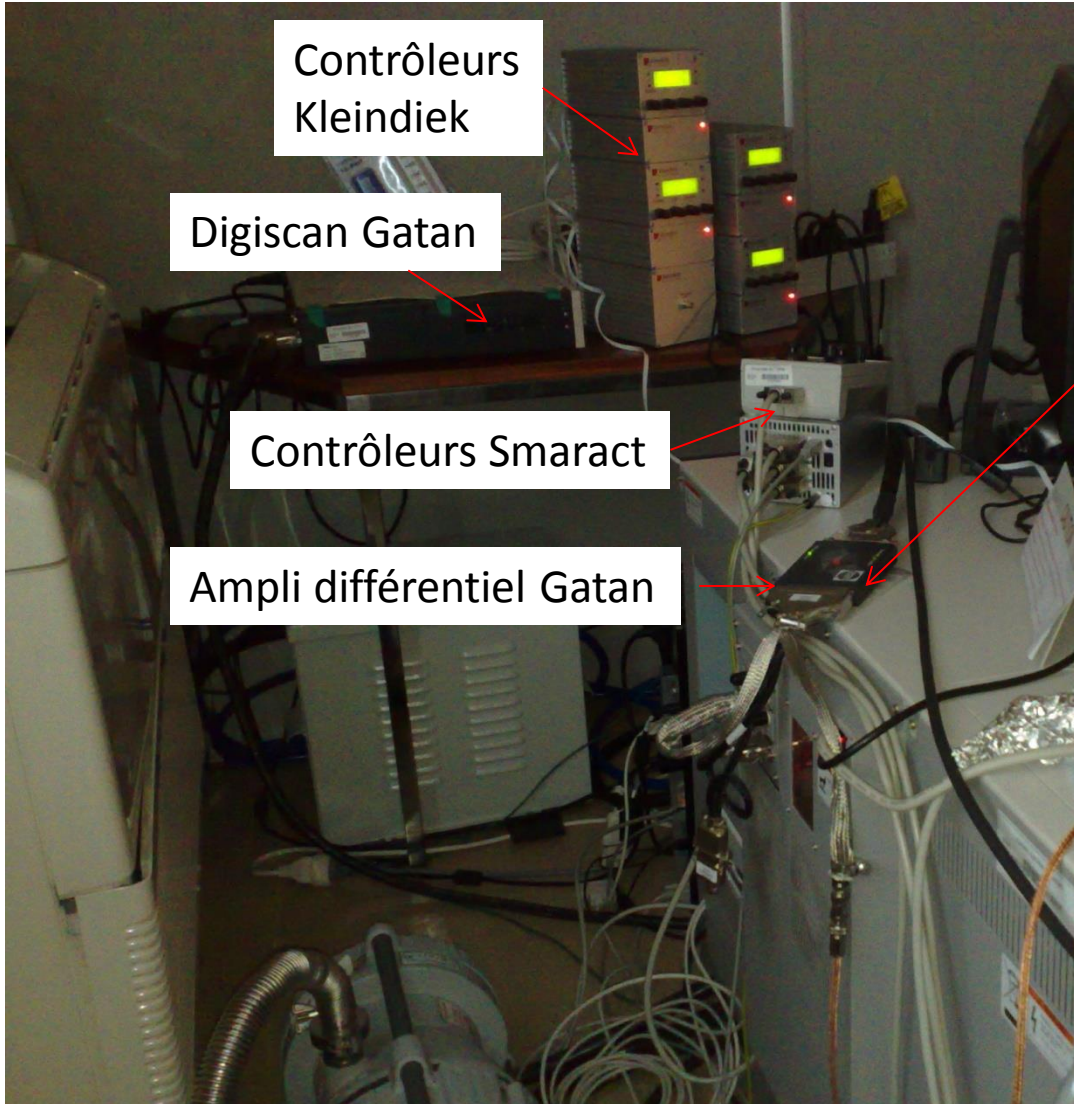


Vue depuis la caméra IR

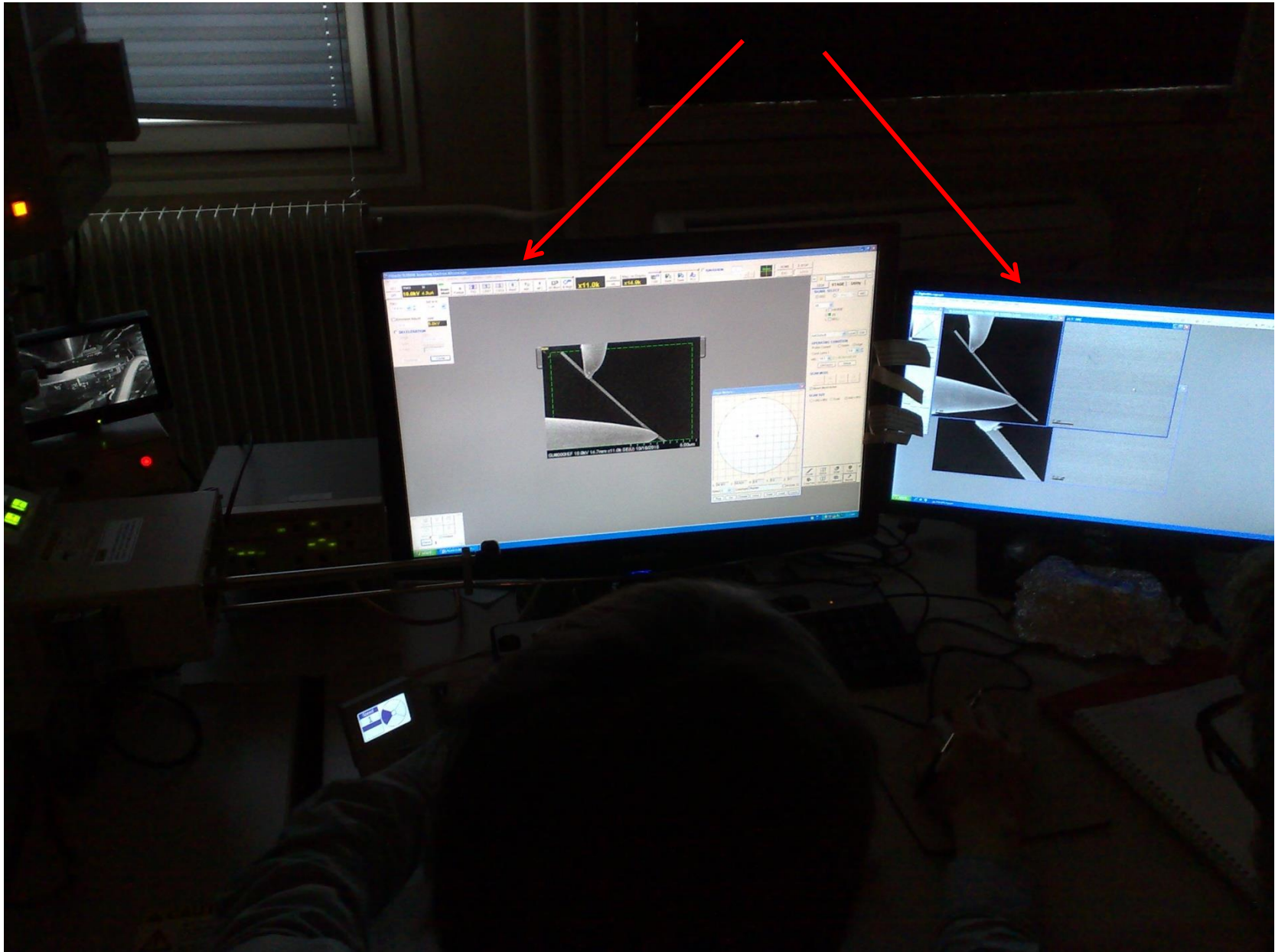
Instrumentation autour du MEB



Instrumentation autour du MEB



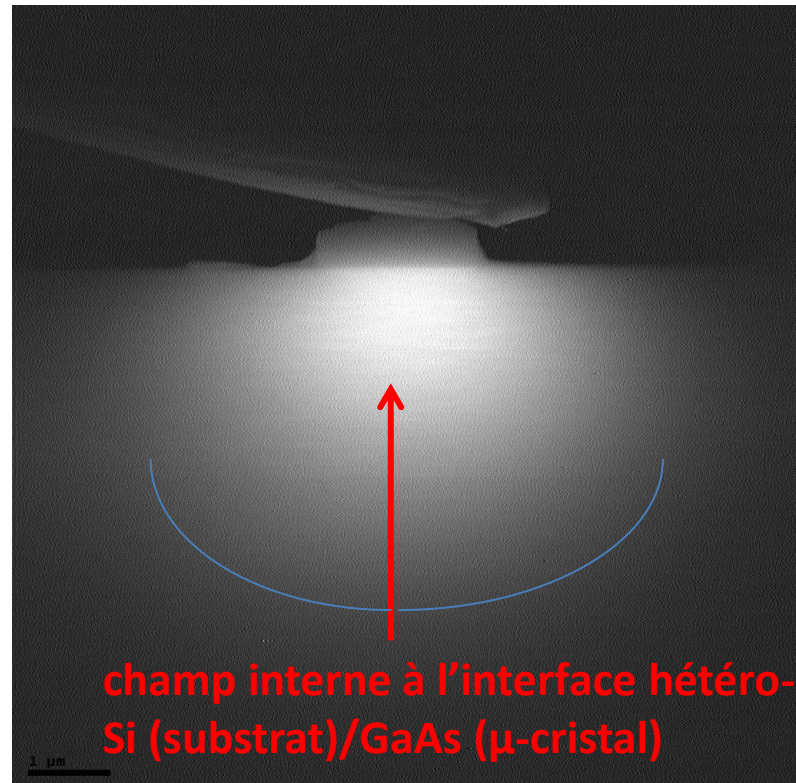
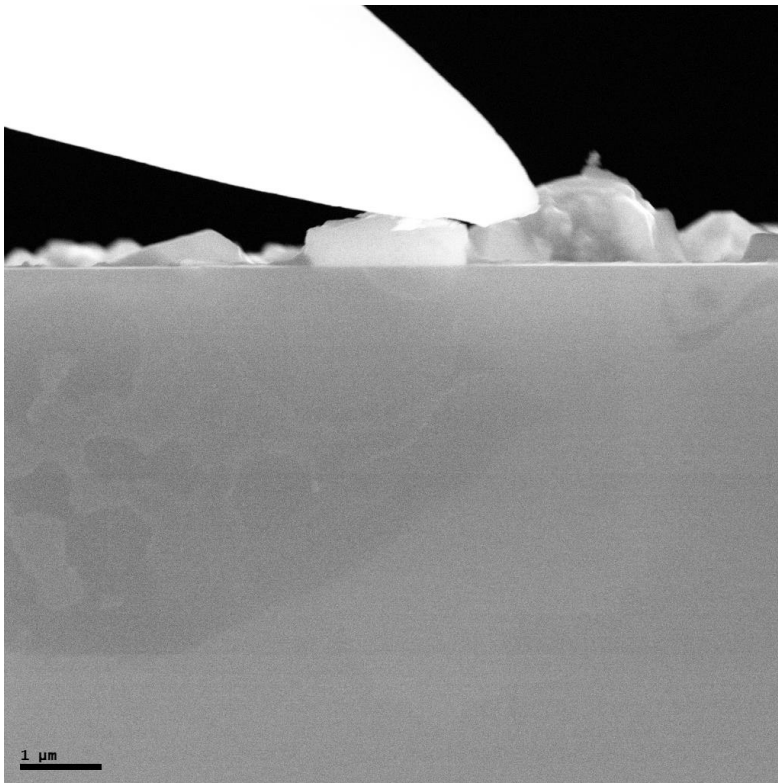
2 écrans: SEM Hitachi et EBIC Gatan



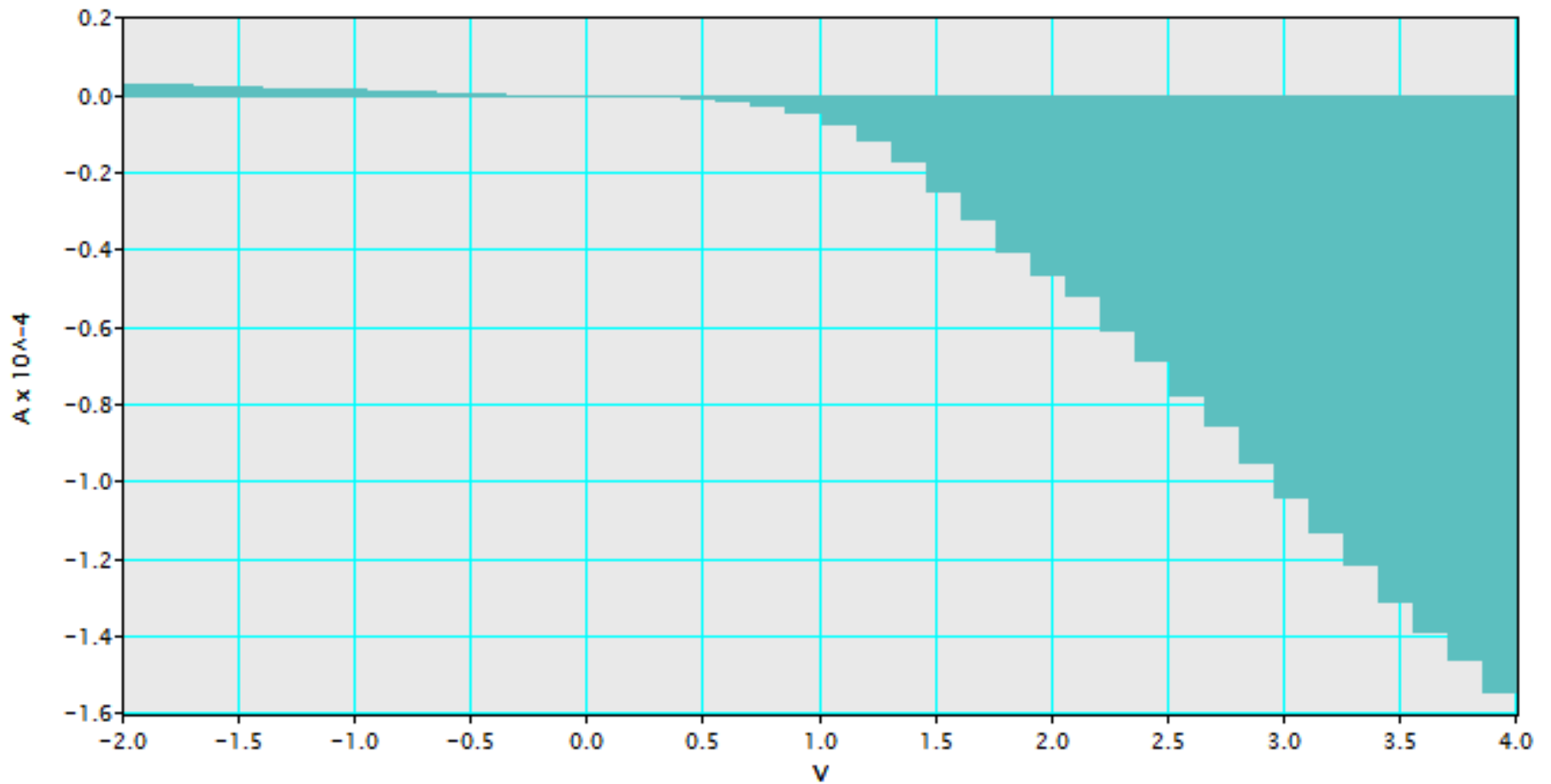
Exemple d'application: contacter pyramides GaAs (μ -cristaux)

- Vue en coupe: « cross-section »

Image SE Formée en // avec Image EBIC

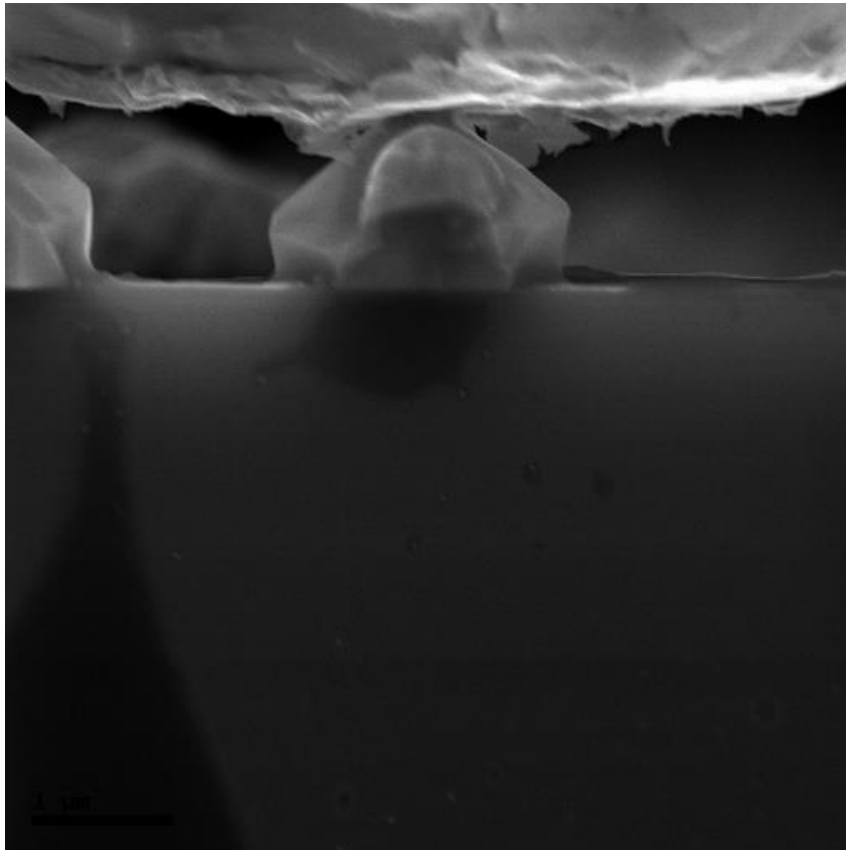


Caractérisation I-V: μ -cristal GaAs

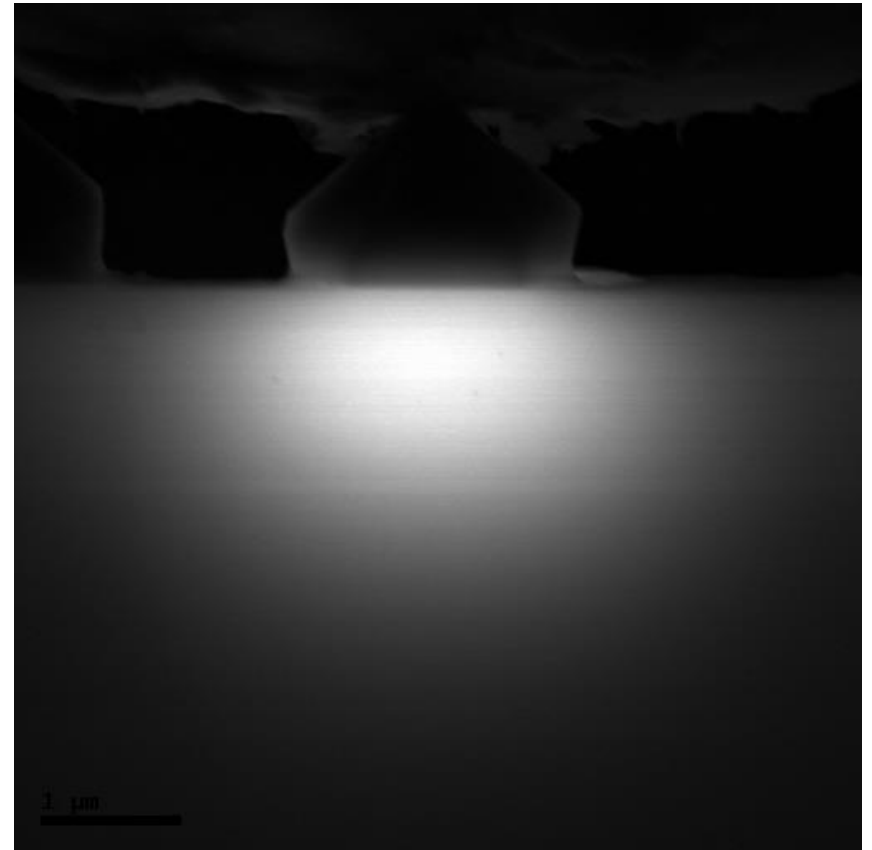


EBIC: μ -crystal GaAs (cross section)

SE image

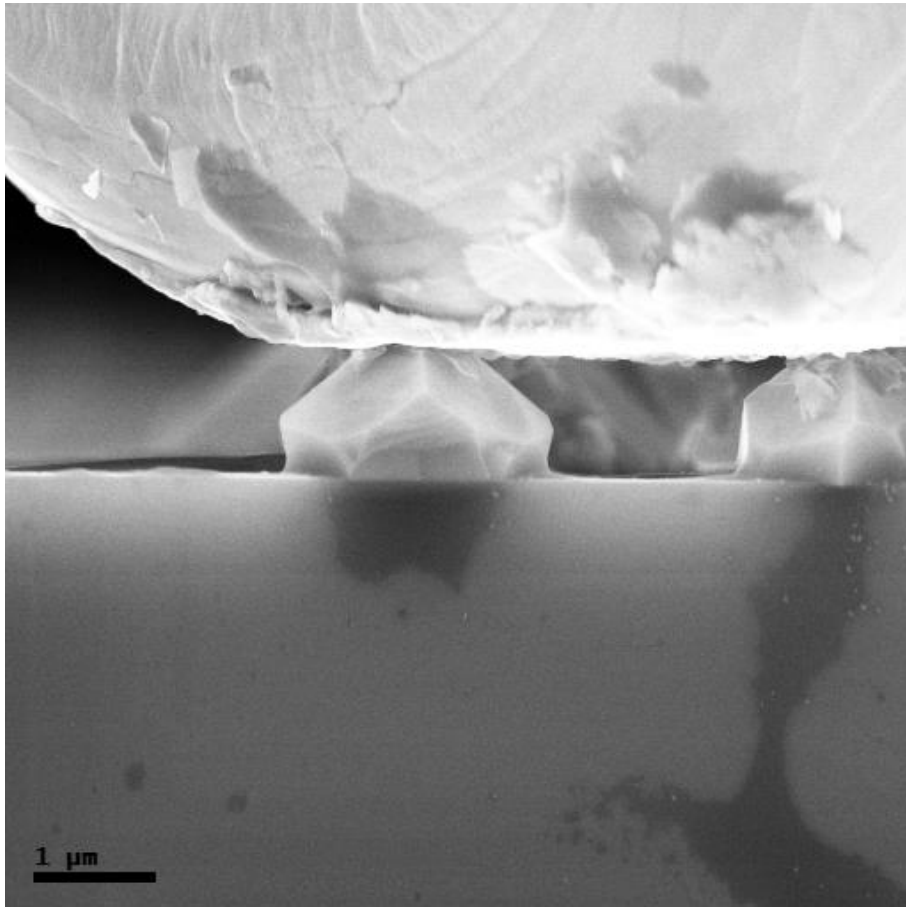


EBIC image

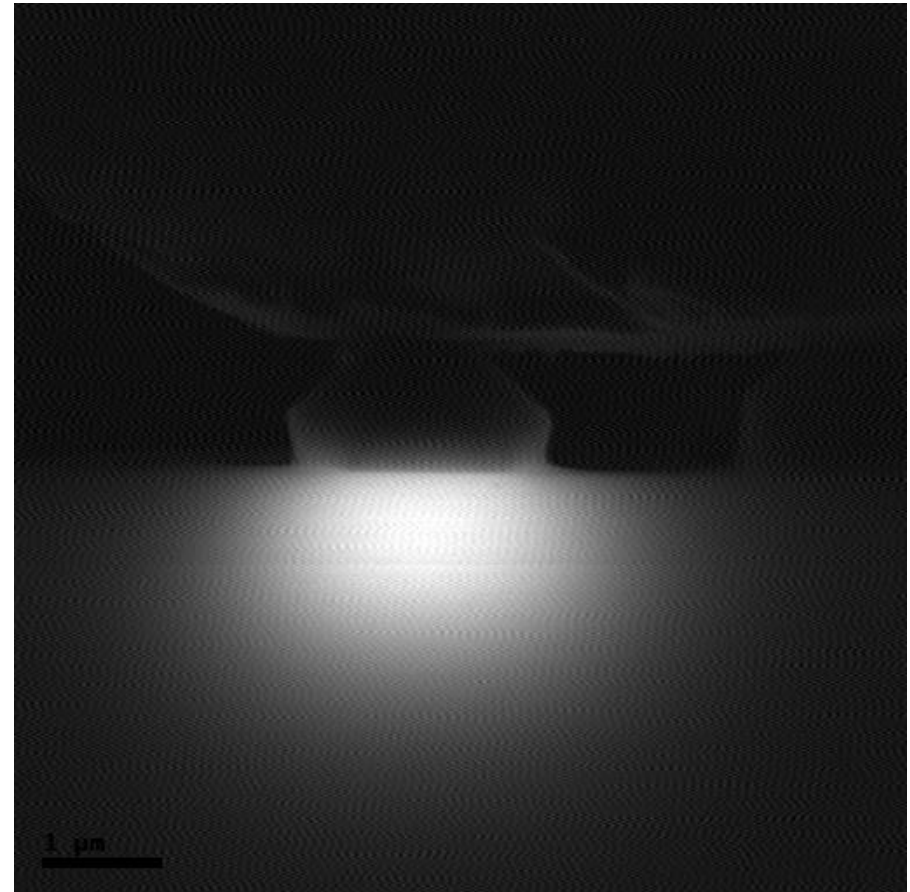


EBIC: μ -crystal GaAs (cross section)

SE image

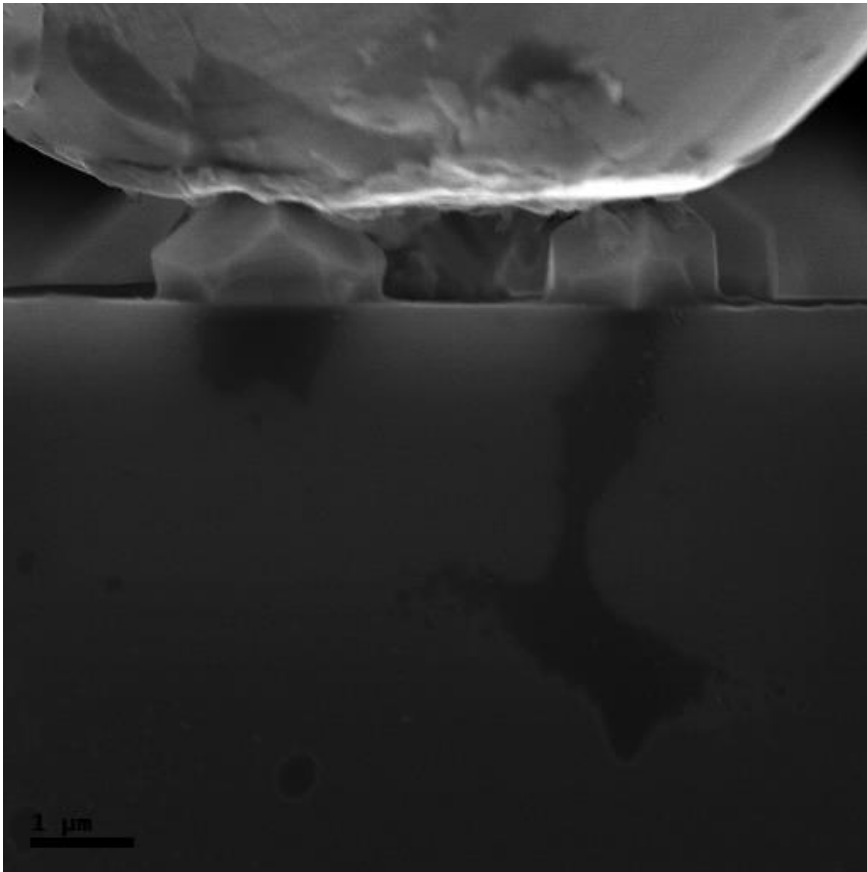


EBIC image

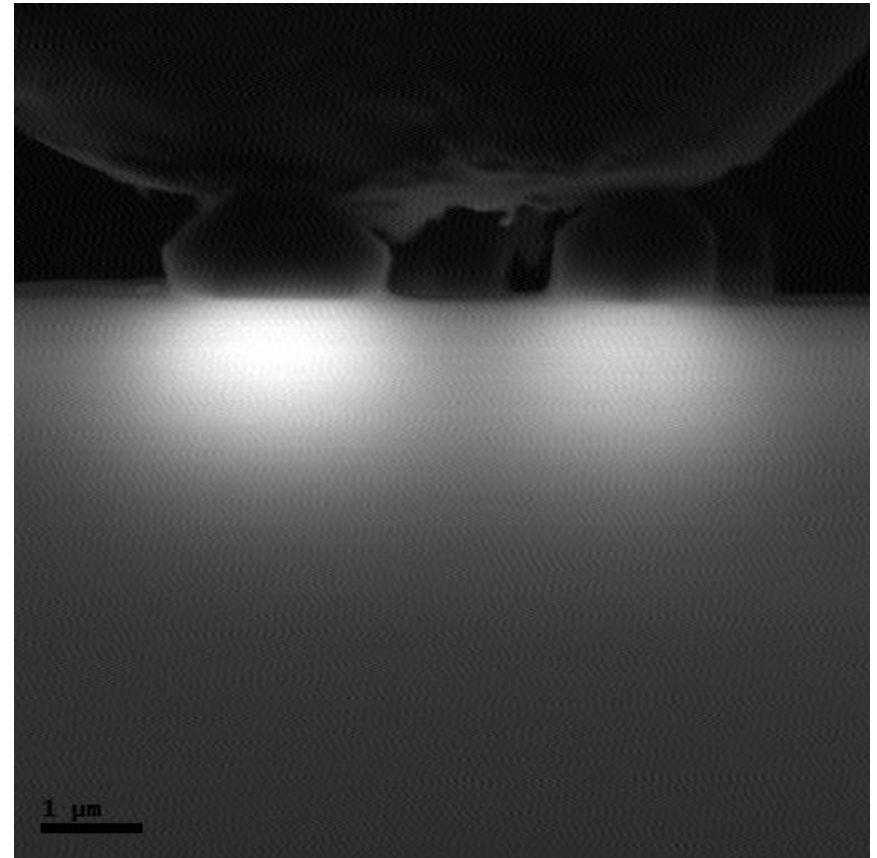


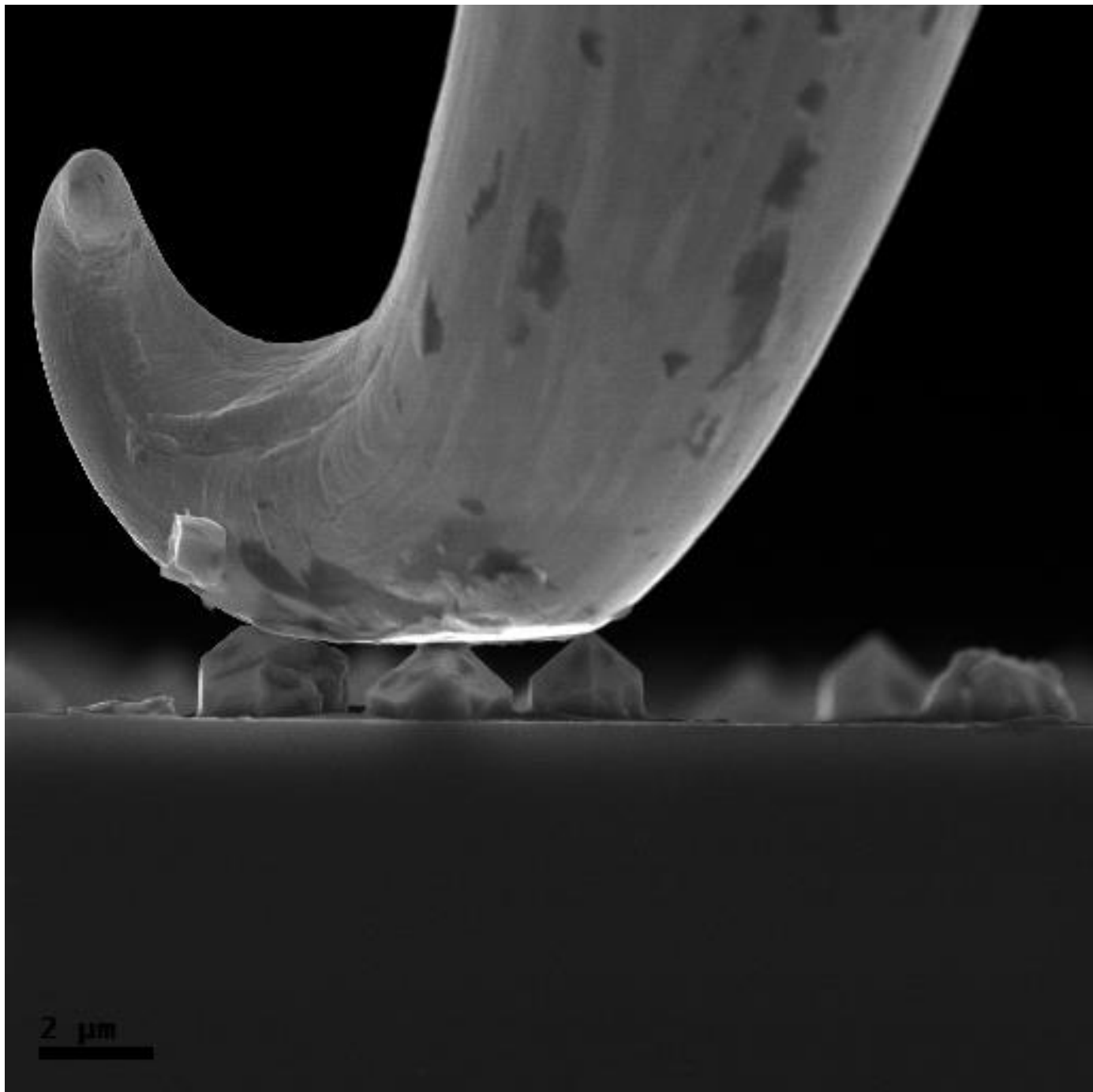
2 μ -cristaux contactés à la fois (avec la même pointe)

SE image



EBIC image





Difficultés rencontrées

- Électricité statique: cristal « saute » si l'on contacte avec l'extrémité de la pointe
- Obtenir contact ohmique (pas de signal sur l'image EBIC sinon, I-V non redresseuse)
- ↑ Force d'appui pour ↑ signal électrique:
↑ surface de contact et ↓ résistance, car:
 - Oxyde superficiel à traverser
 - Contamination Carbone pointe+ech.mais pas trop sinon écrase le cristal

Comment savoir si on est bien contacté ?

- Changement de contraste sur l'image SE (effet d'ombrage)
- Avec pointes très fines ($R_c \leq 100\text{nm}$): pendant la phase de descente (atterrissage), on observe glissement de l'apex vers l'avant sur l'image SE, du à la flexion du ressort (pointe assimilée à un ressort de constante de raideur k faible)

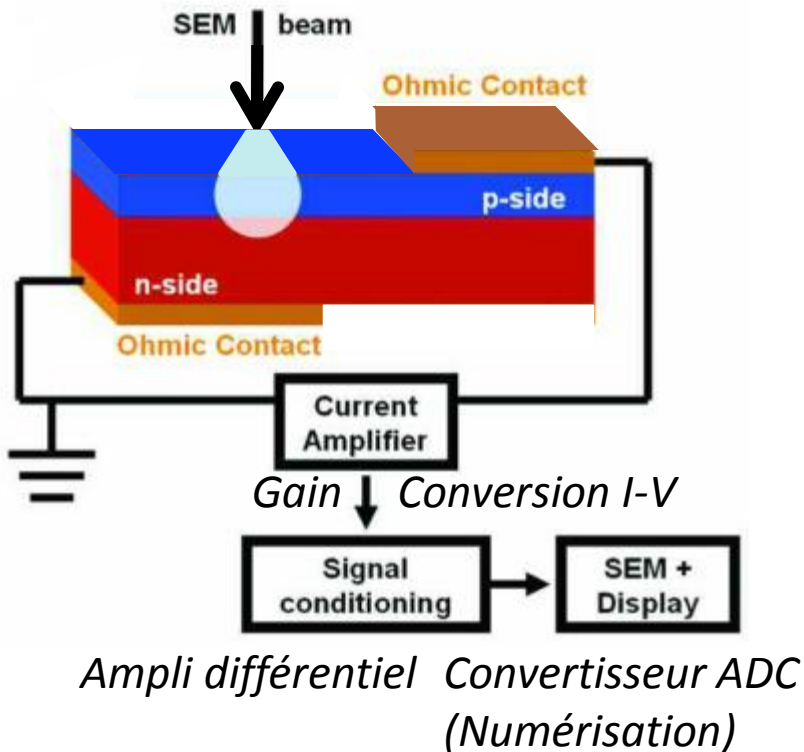
Comment savoir si on est bien contacté ?

Par rapport à l'APPLICATION visée:

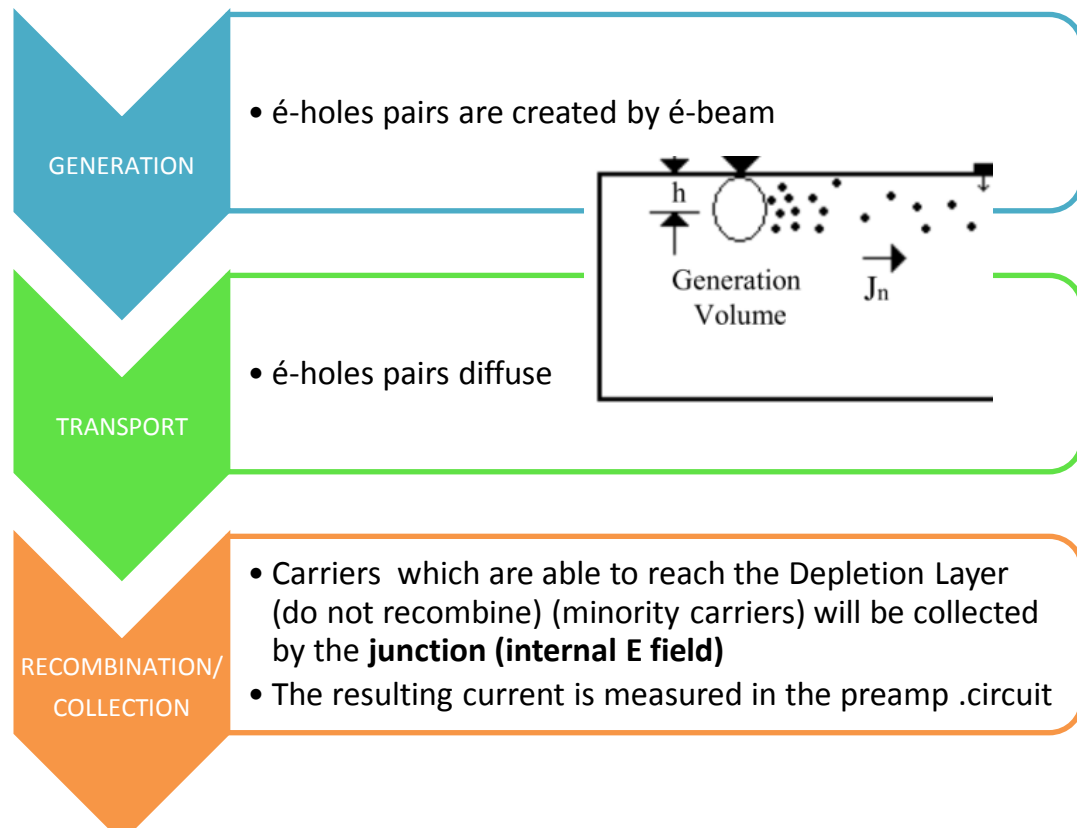
- Contacter pour Caractéristique I-V d'une jonction (=redresseuse)
- Contacter pour Imagerie EBIC de micro et nano structure: champ interne à l'interface hétéro-structure ou jonction

Rappel: Principe de l'EBIC (Electron Beam Induced Current): en quoi ça consiste

- SEM injection, collection circuit



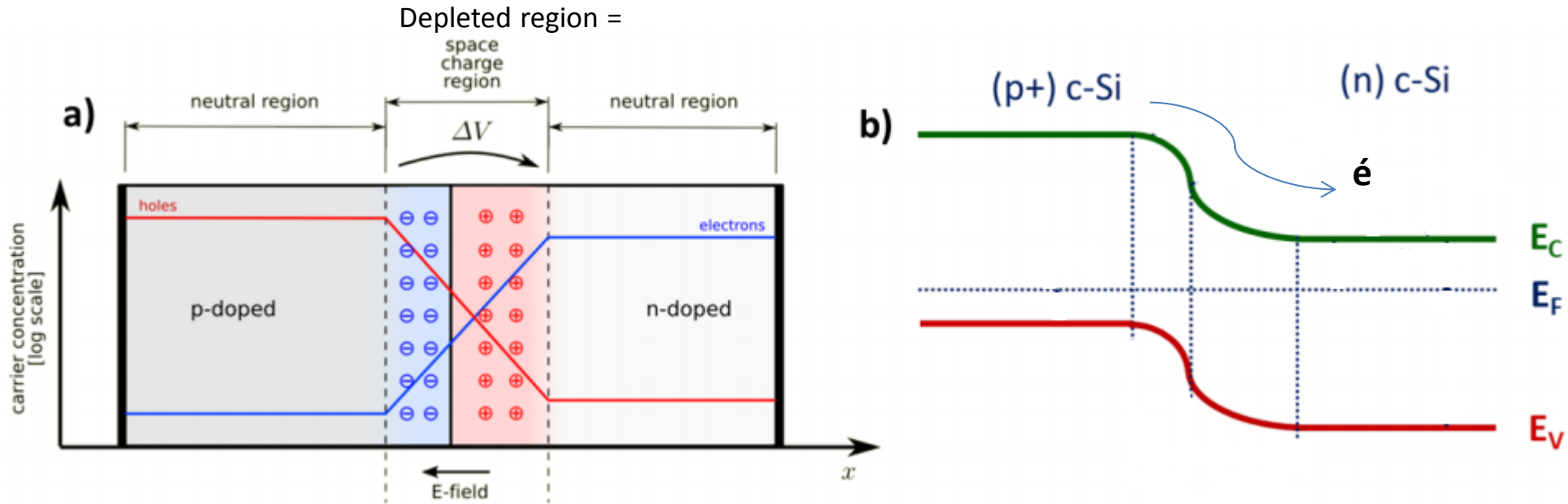
- Carriers' story



Construction d'une image EBIC en // de l'image SE
(cf photo montage: boîtier où signal EBIC couplé à signal SE)



Diagramme de bandes pour mieux comprendre l'EBIC



Paires é-trous dissociés/séparés par le champ interne de la jonction

Plus paires é-trous capables de diffuser vers la jonction avant de se recombiner

passent à travers la jonction pour atteindre la zone où ils sont majoritaires:

Les é générés côté « p-doped » rejoignent la zone « n-doped »

Les trous générés côté « n-doped » rejoignent la zone « p-doped »

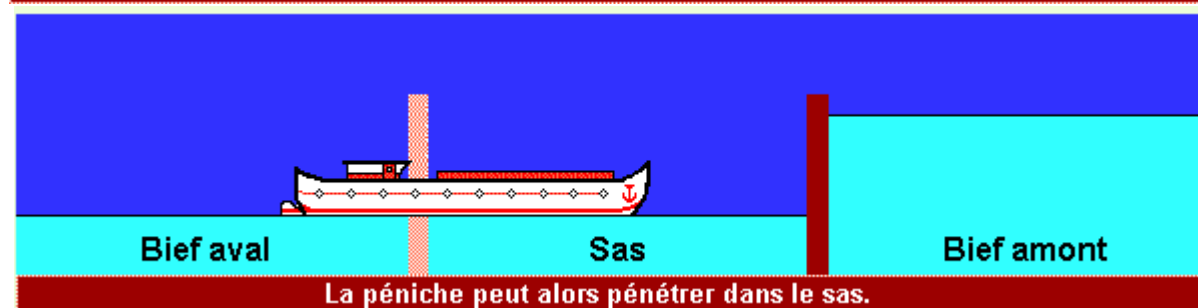
} Ce qui constitue
Un courant « EBIC »
(courant de porteurs
minoritaires)

Centres de recombinaisons (dus à des défauts) tuent le signal EBIC: ils apparaissent contrastées sur l'image EBIC: Sombre sur fond clair ou clair sur fond sombre

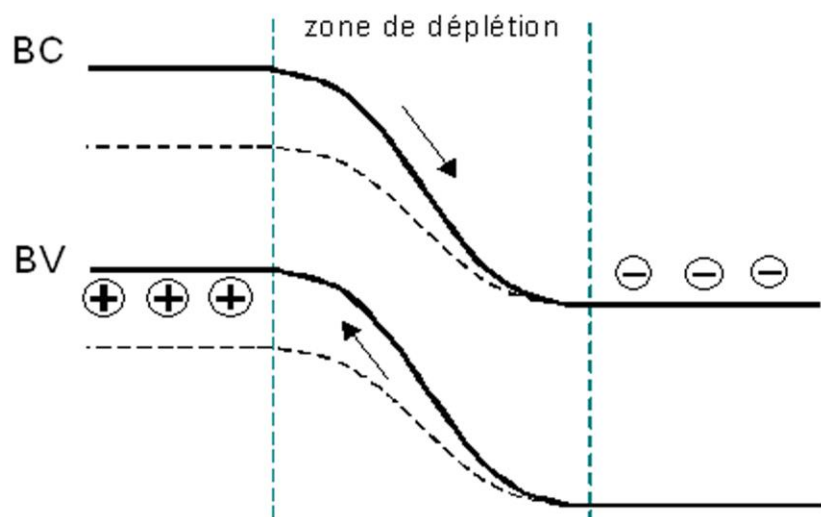
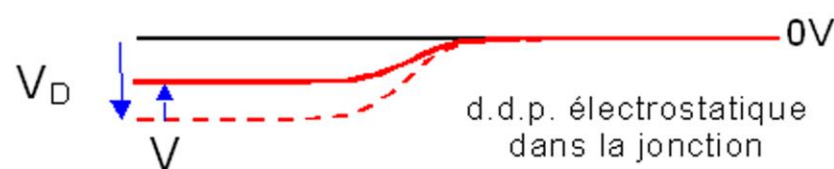
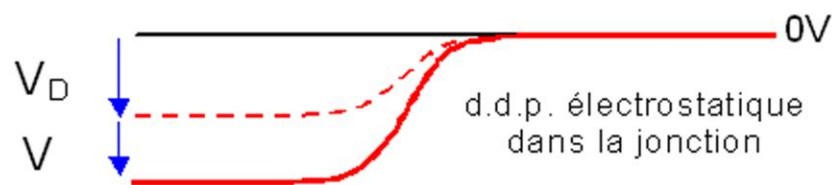
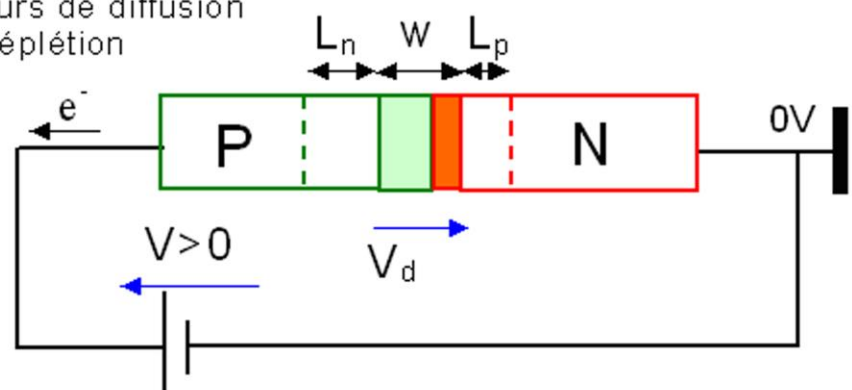
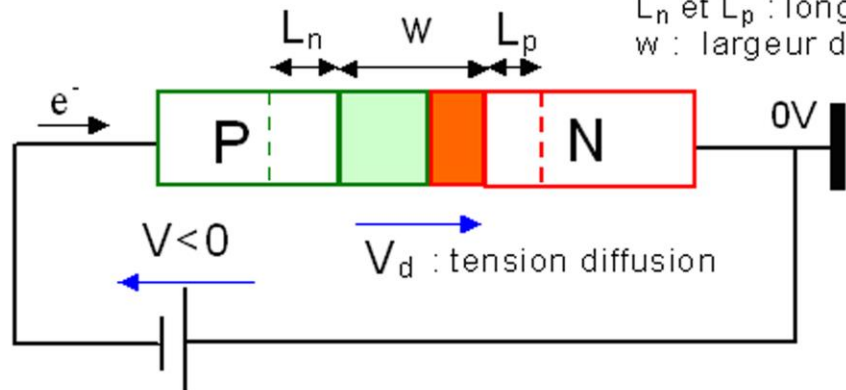
(EBIC: à quoi ça sert?)

- Caractériser l'efficacité de collecte des porteurs
- Info pour le fabricant (épitaxieur...): connaître les performances de son fil pour applis LEDs, Cellules Solaires...
- Analyse de défauts: pourquoi certains fils n'émettent pas (appli LEDs)

Effet de la polarisation externe sur le Diagramme de bandes



L_n et L_p : longueurs de diffusion
 w : largeur de déplétion

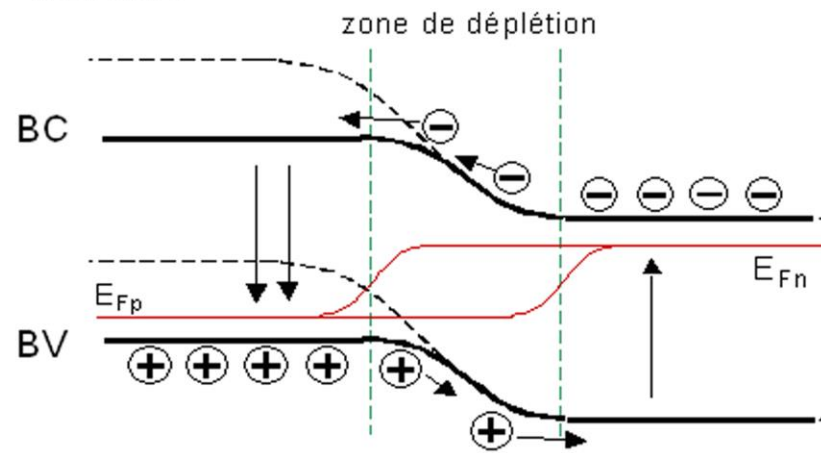


Conclusion : faible courant

a) Polarisation en sens indirect

RAPPEL : La mobilité des e^- est plus grande que celle des h^+

E_{Fn} : niv. Fermi pour e^-
 E_{Fp} : niv. Fermi pour h^+

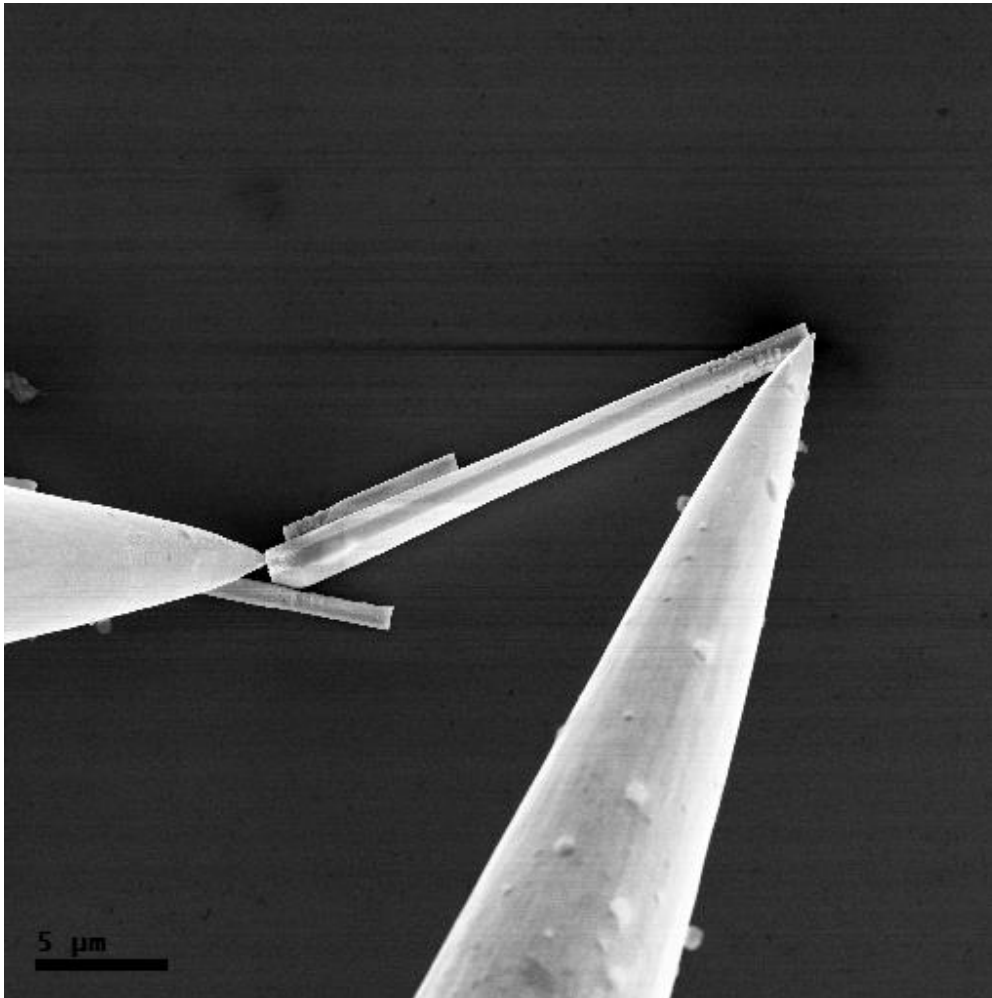


Conclusion : fort courant

b) Polarisation en sens direct

Contact de nanofils III-V à jonction radiale pour imagerie EBIC

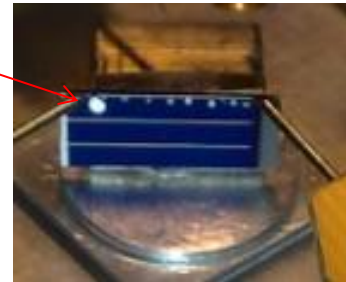
Nanofil GaN (n-cœur)/ InGaN (p-coquille)



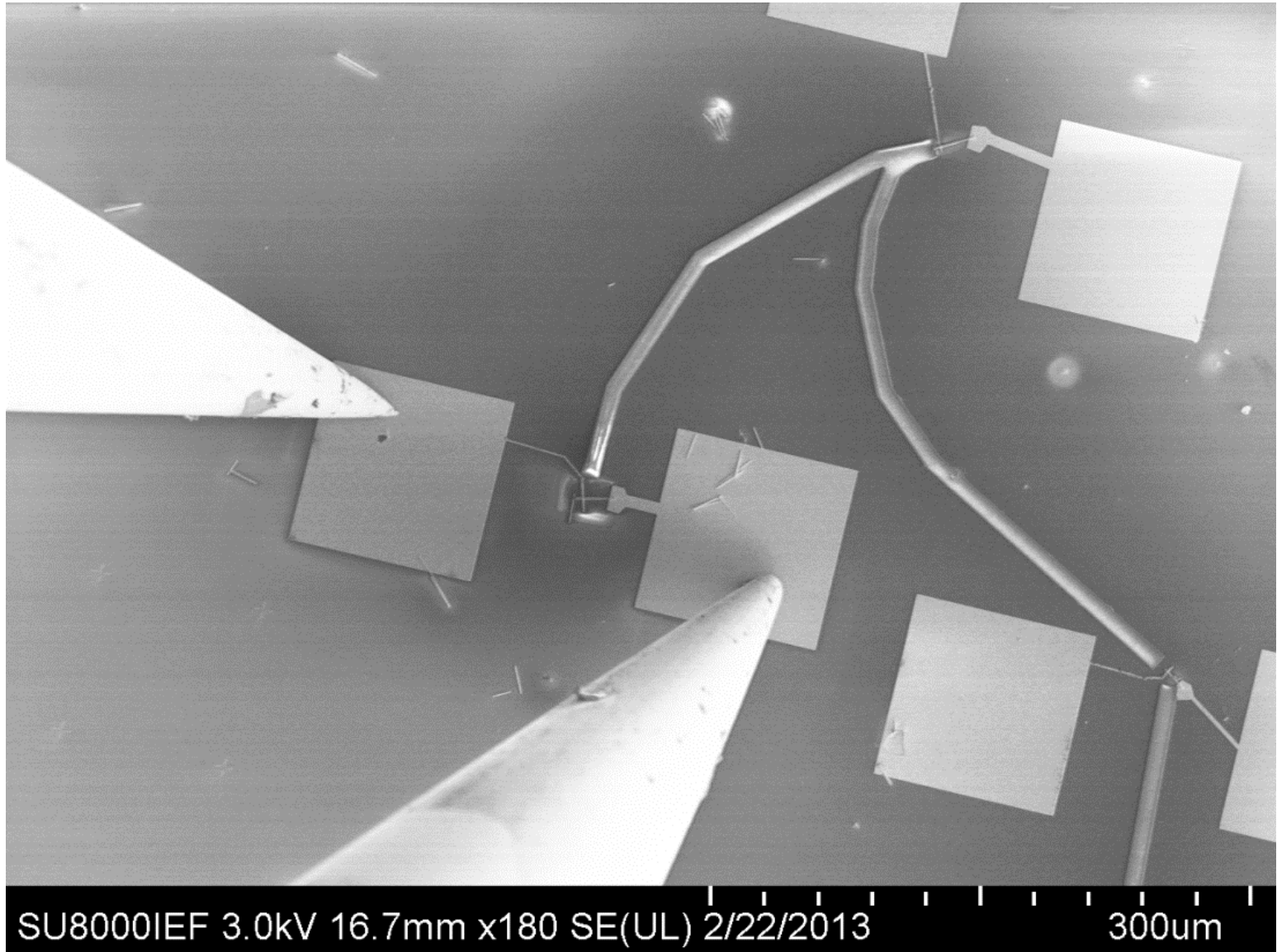
Contact entre pointe Métallique (W)
Et Semi-Conducteur GaN
est **Schottky**
(cf diagramme de bandes
avec niveaux de Fermi E_F ,
comme dans le cas de la jonction p-n)

Solutions pour éviter barrière Schottky

- \uparrow surface de contact (pointes + grosses) ou changer de matériaux (pointe-échantillon)
- Polariser (« bias ») pour \downarrow barrière Schottky
- Dépôt d'électrodes métalliques multi-couches pour obtenir contact Ohmique (non Schottky): abaisse progressivement barrière de potentiel (**ingénierie de bandes**)
- Goutte Ag déposée sur motifs électrodes lorsque suffisamment grandes (grilles..., y compris sur électrodes planaires (dépôts pleine plaque)
- Évite aussi d'endommager (percer) la couche conductrice à contacter car W dur ...



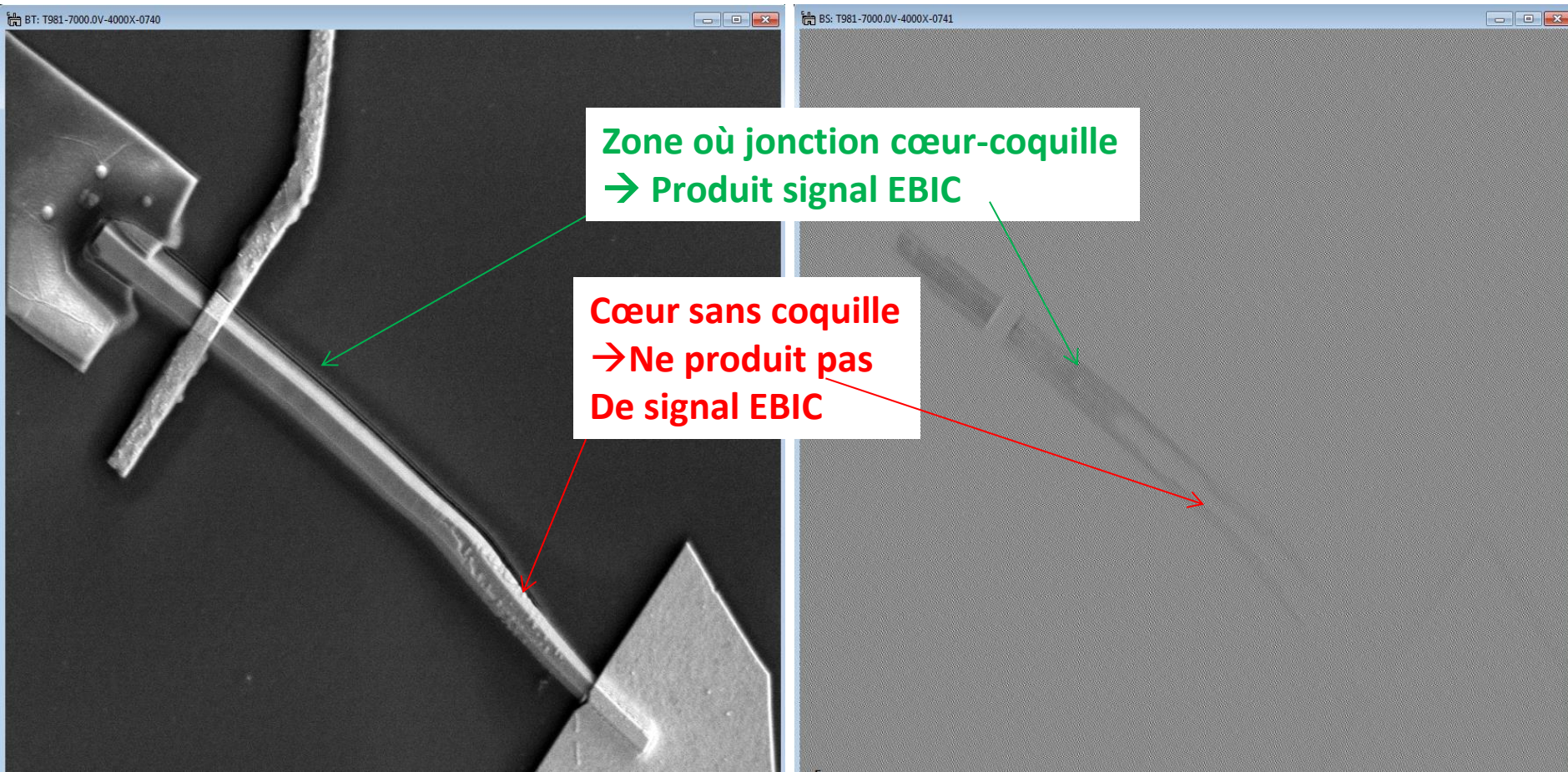
Imagerie EBIC avec contacts sur pads



Imagerie EBIC sur nanofils contactés par électrodes (litho élec.)

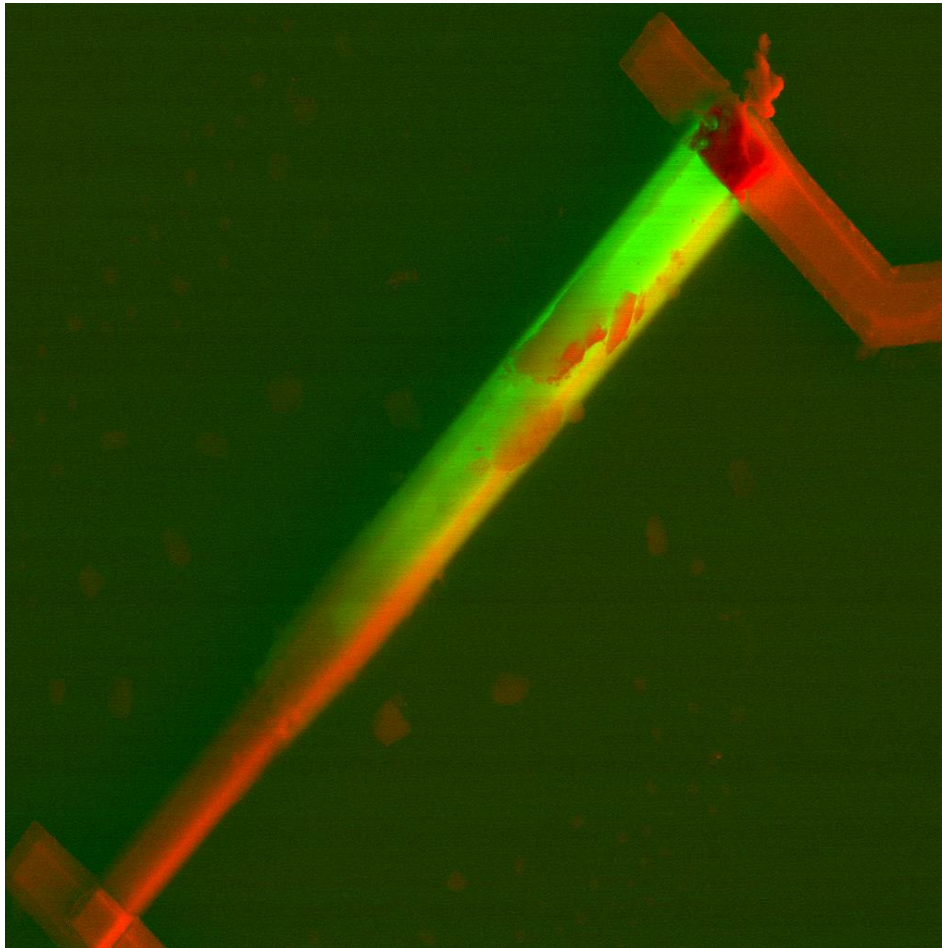
Depletion zones can be characterized

- SEM image
- EBIC image



Avec rendu multi-couleur SE/EBIC

- SE rouge + EBIC vert

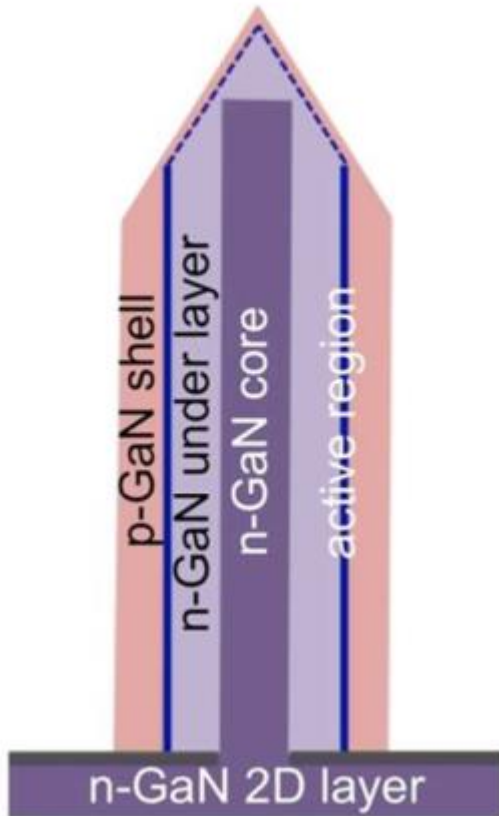


Question de résolution EBIC/SE

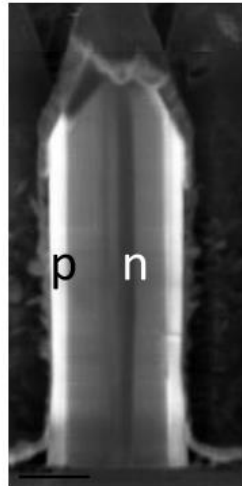
(WD=12 à 18mm/ HV 2 à 15kV(jonctions enterrées)/ Courant sonde 15pA à 200pA)

- Jonction radiale nanofils cœur-coquille:

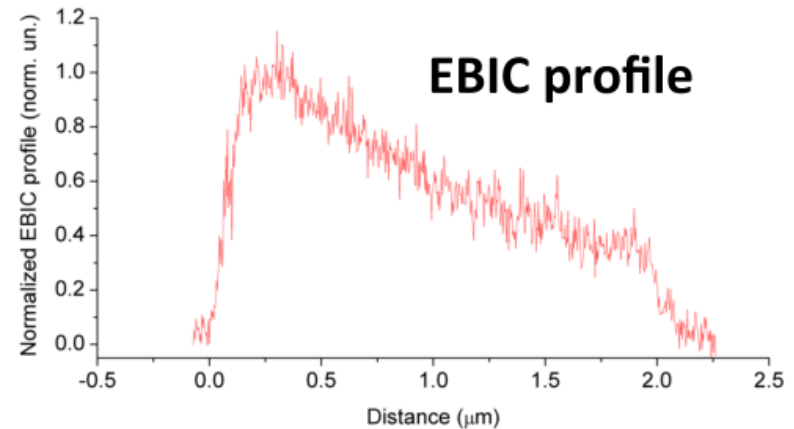
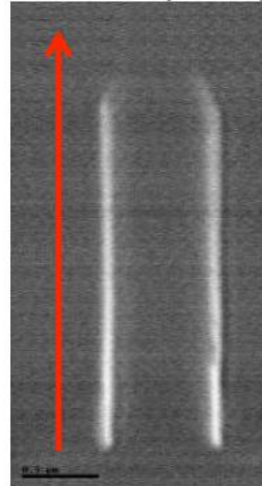
Coupe transverse



SEM (2kV)



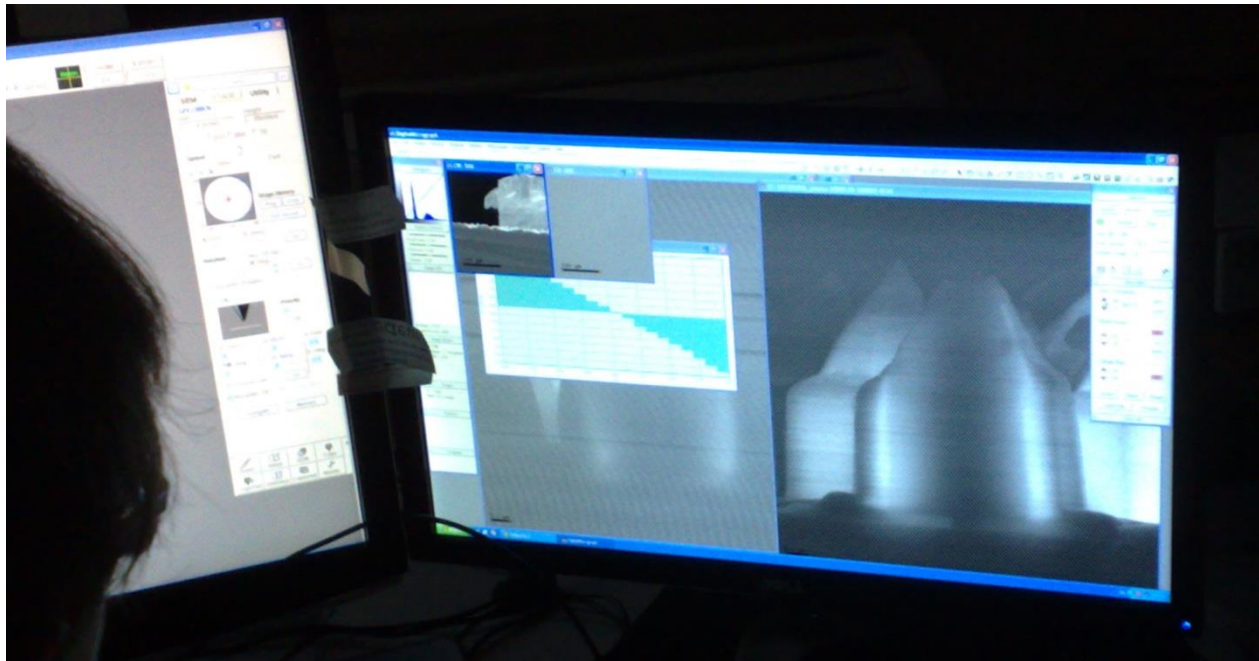
EBIC (2kV)



Attaque chimique de la jonction au sommet du nanofil

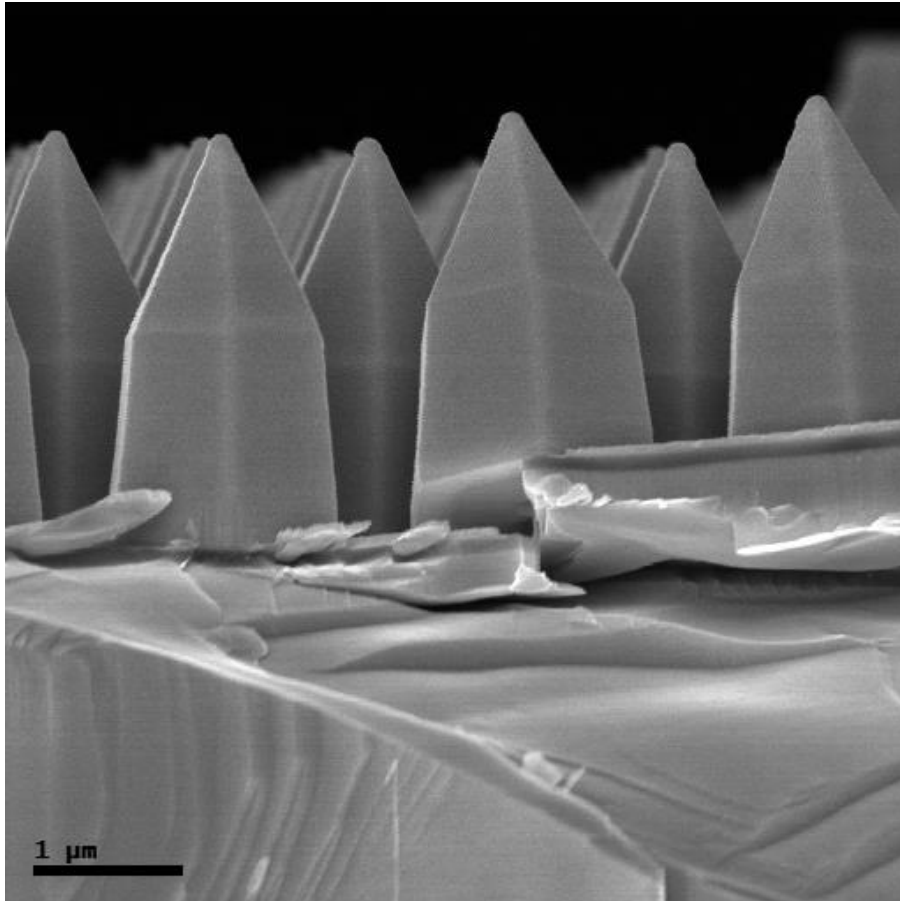
Coupe transverse

⇒ Le signal EBIC disparaît en haut du fil !

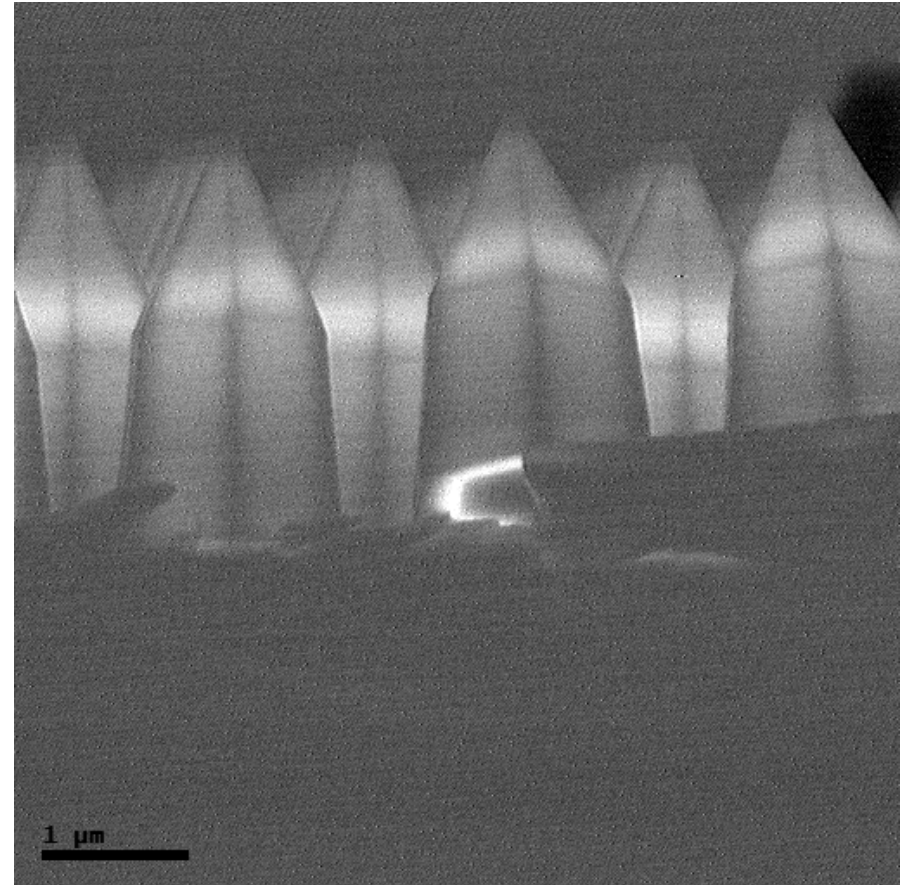


GaN core-shell nanowires

SE image

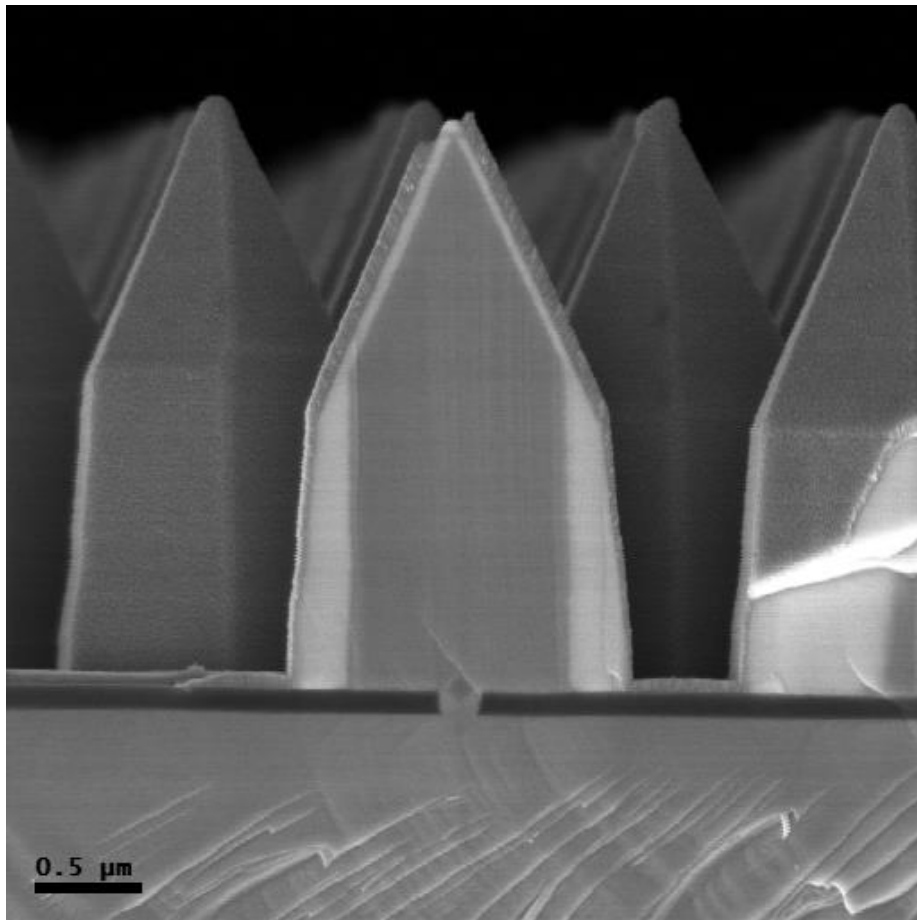


EBIC image

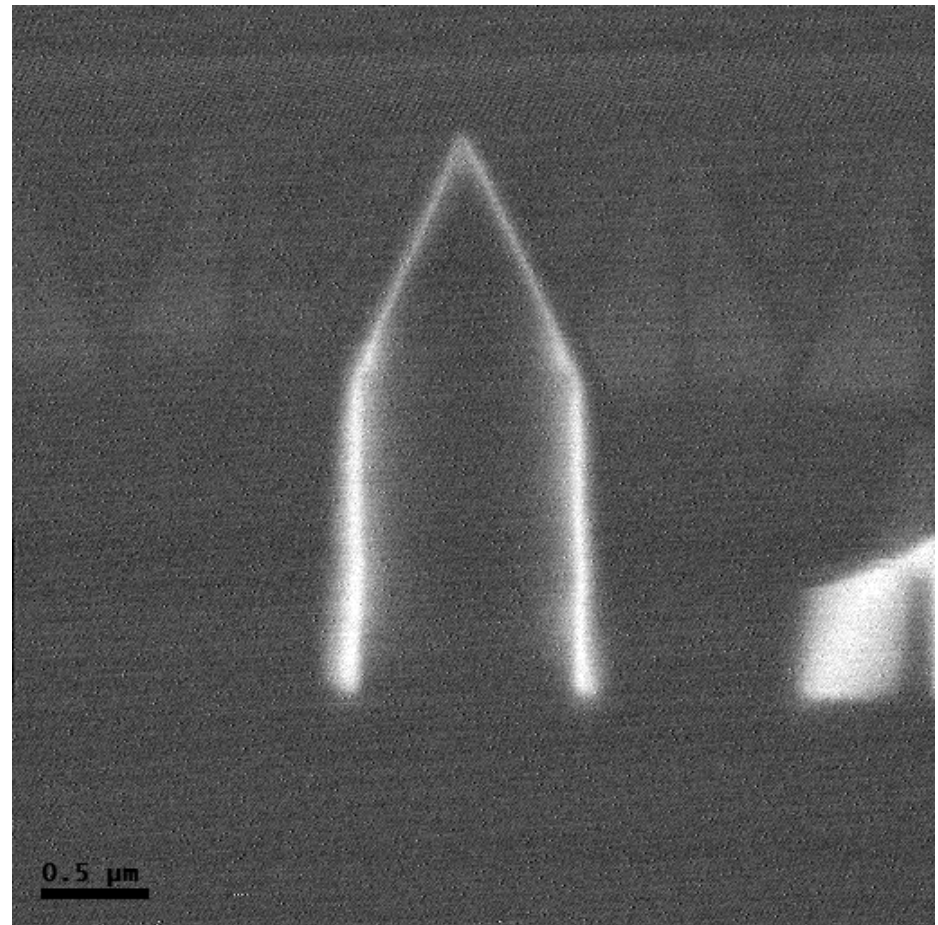


GaN core-shell nanowires

SE image

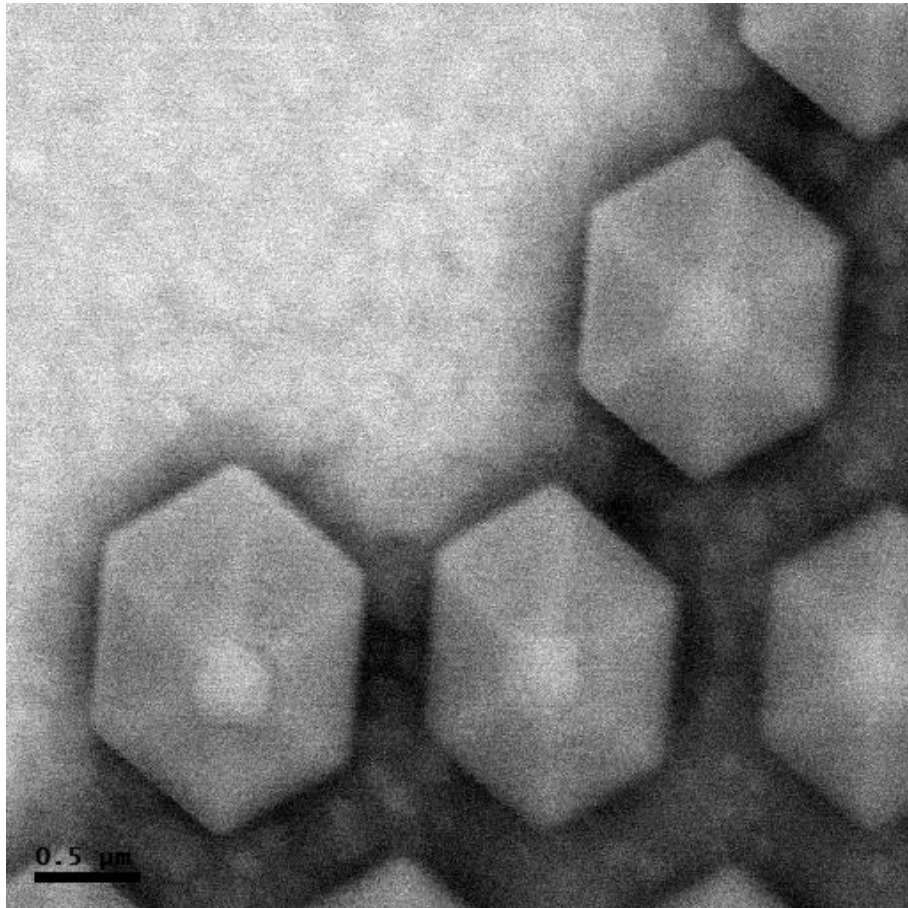


EBIC image

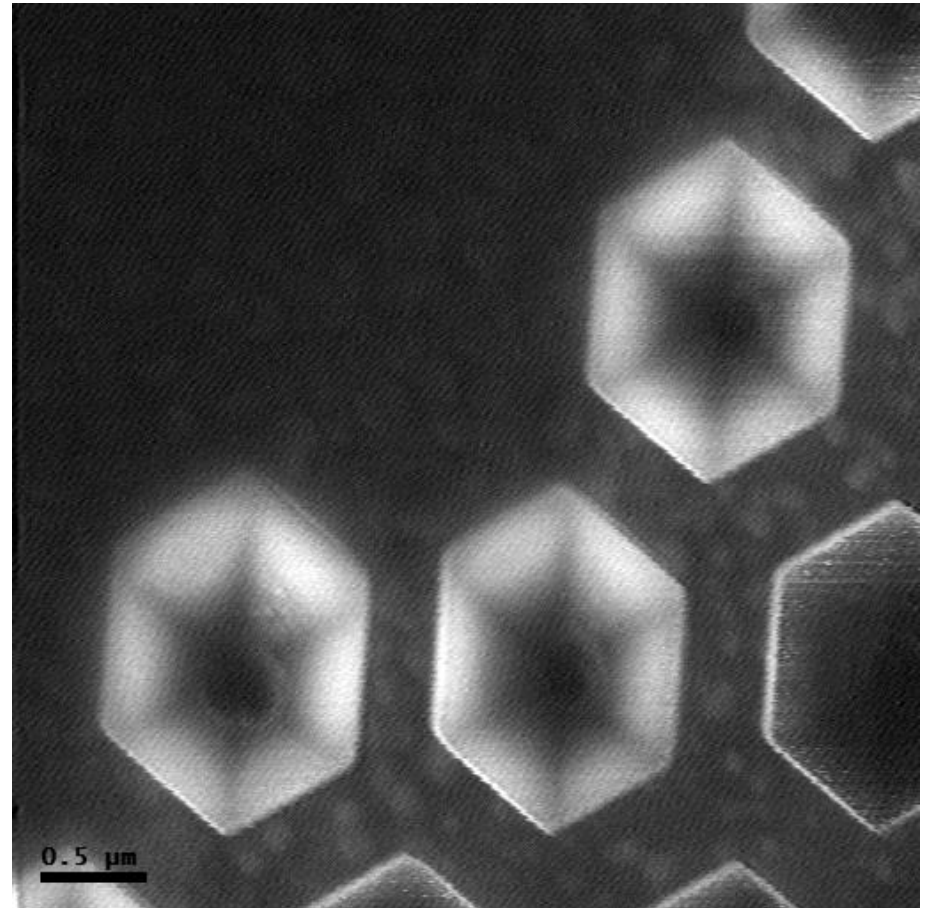


GaN core-shell nanowires

SE image



EBIC image

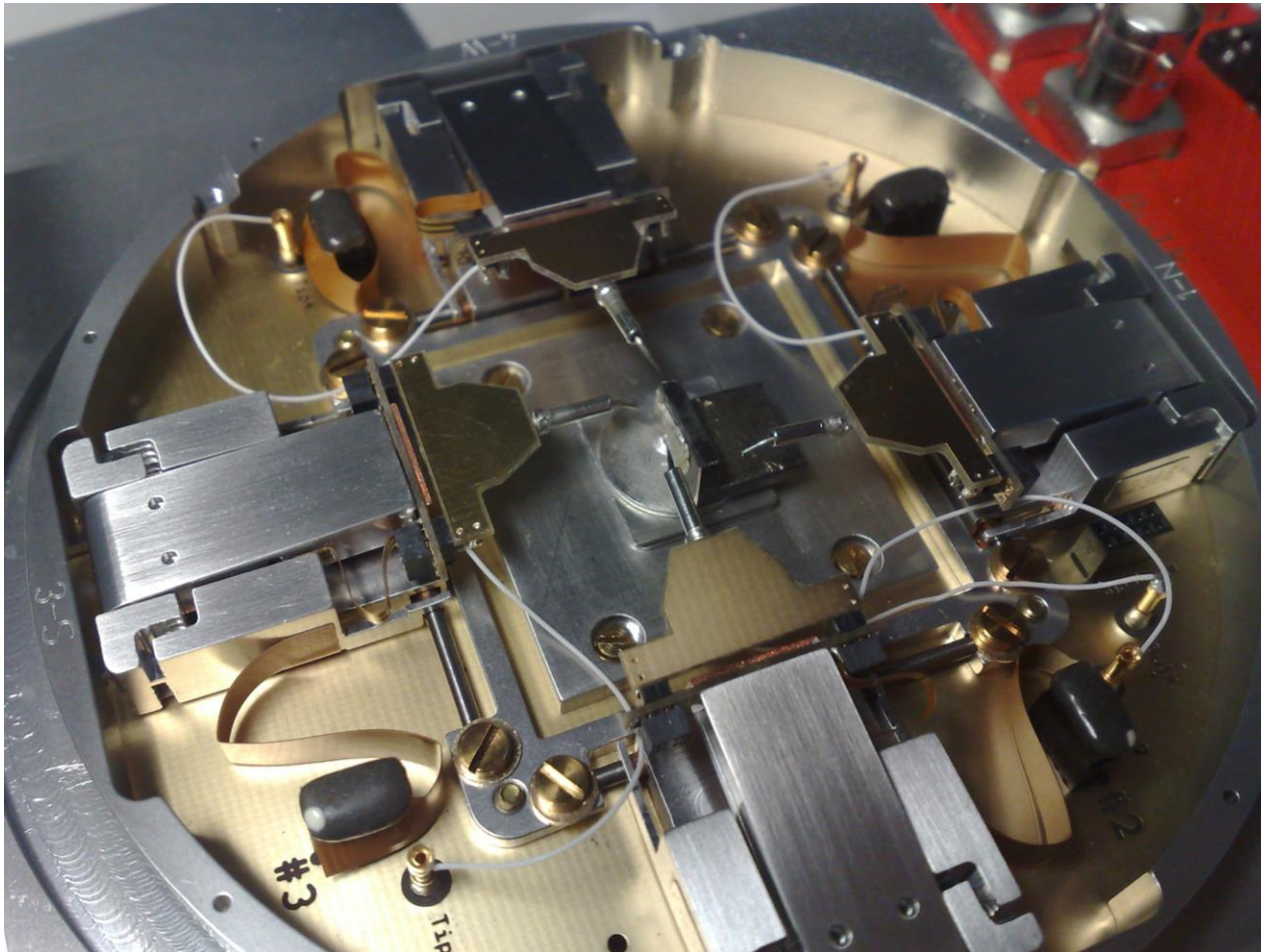


PLAN

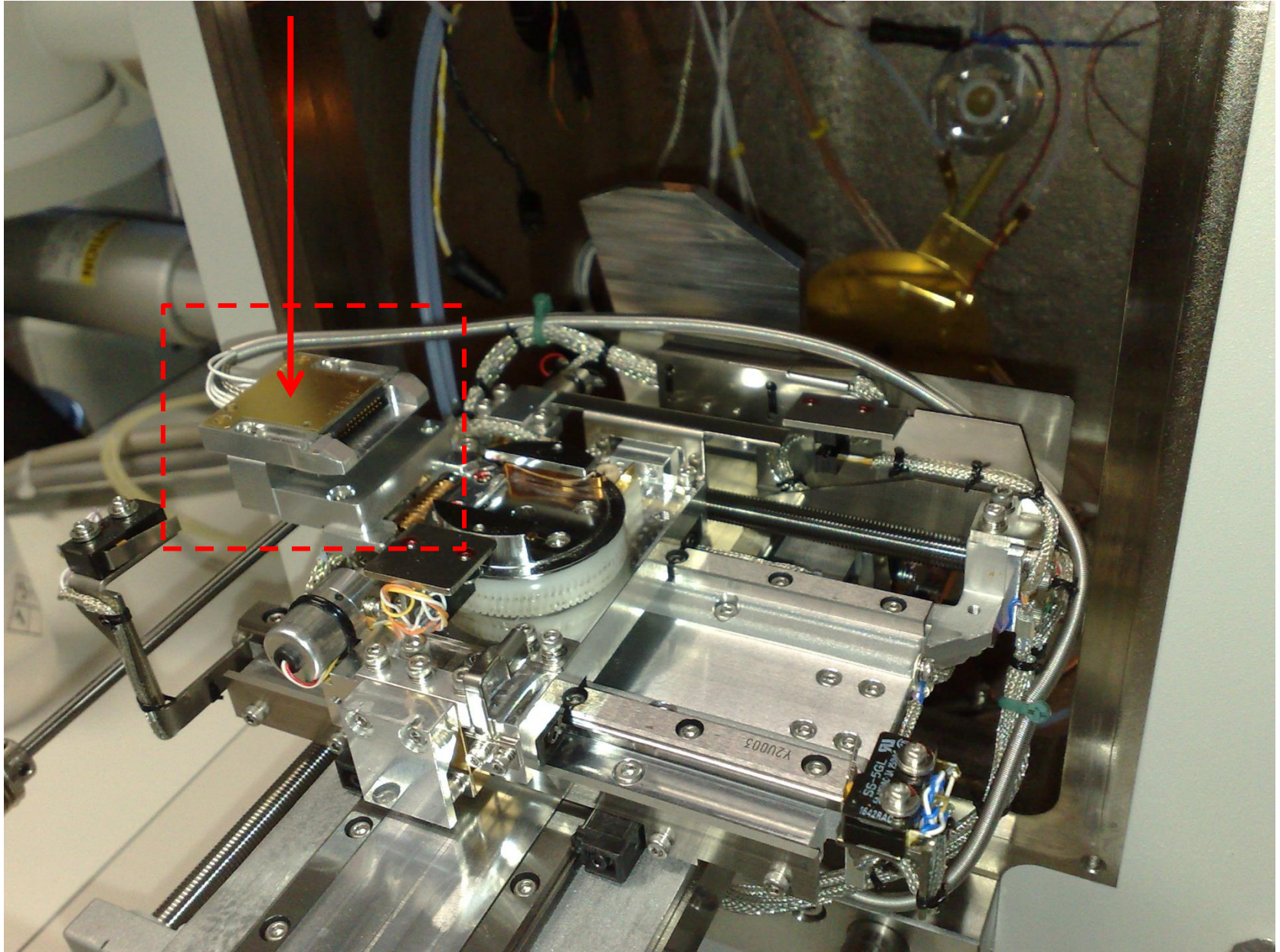
- Introduction: problématique
- Ingrédient 1: CFEG UHR
- Ingrédient 2: Nanomanipulateurs
- Ingrédient 3: pointes fines
- Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN
- **Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC**
- Conclusion
- Perspectives

II. Montage « Prober Shuttle » PS4 Kleindiek

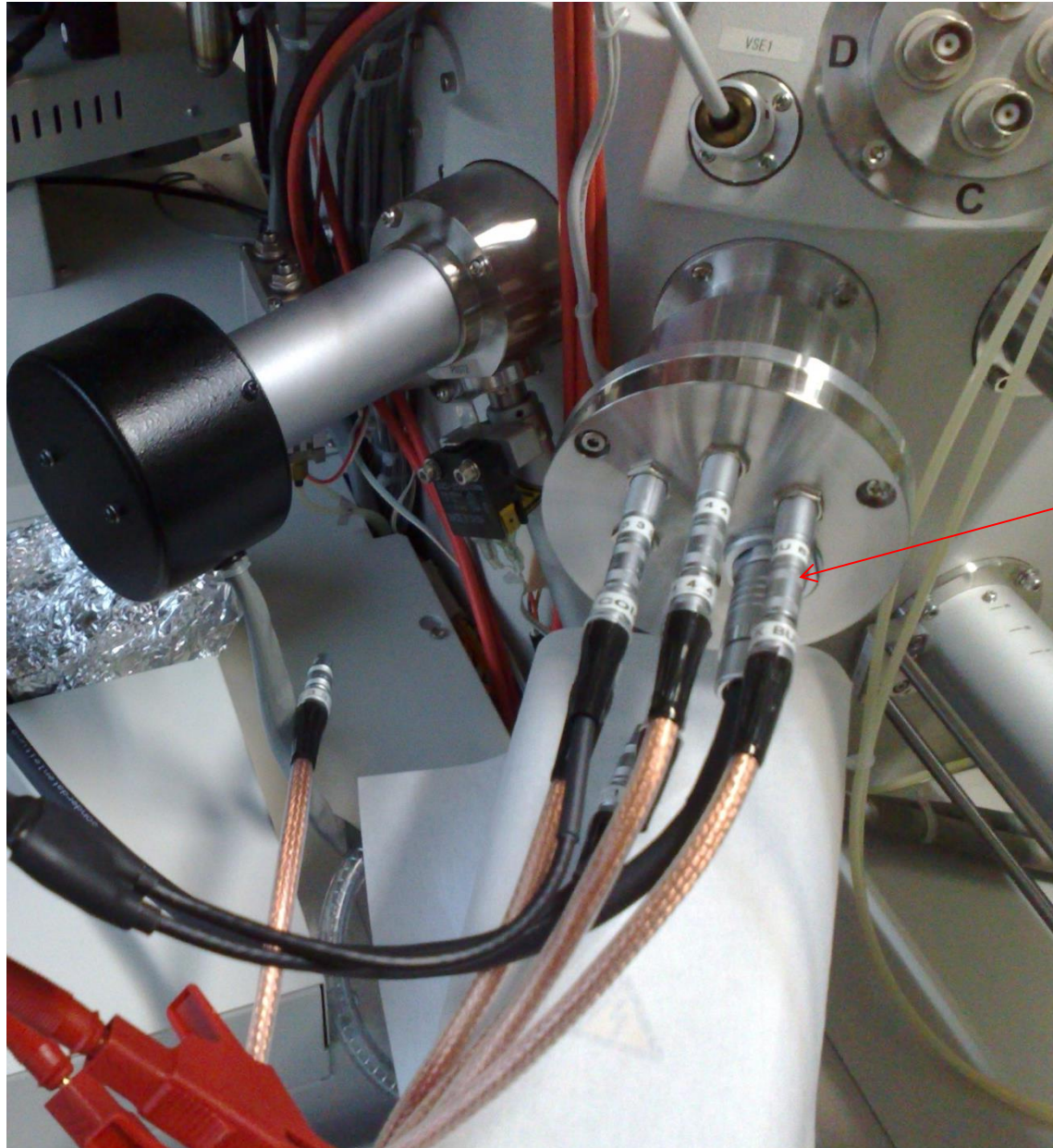
- Adapté aux MEBs équipés d'un SAS pour chargement rapide (galette 4", ép. 9mm)



Socket adapter inside SEM chamber



Bride pour traversées électriques



1 connecteur pour alim. Piezo
(diam. 16mm)

5 connecteurs triax (diam. 9mm)

Pour liaison électrique vers 4 pointes
+Platine porte-éch. « bulk »

Contacter un nanofil en direct

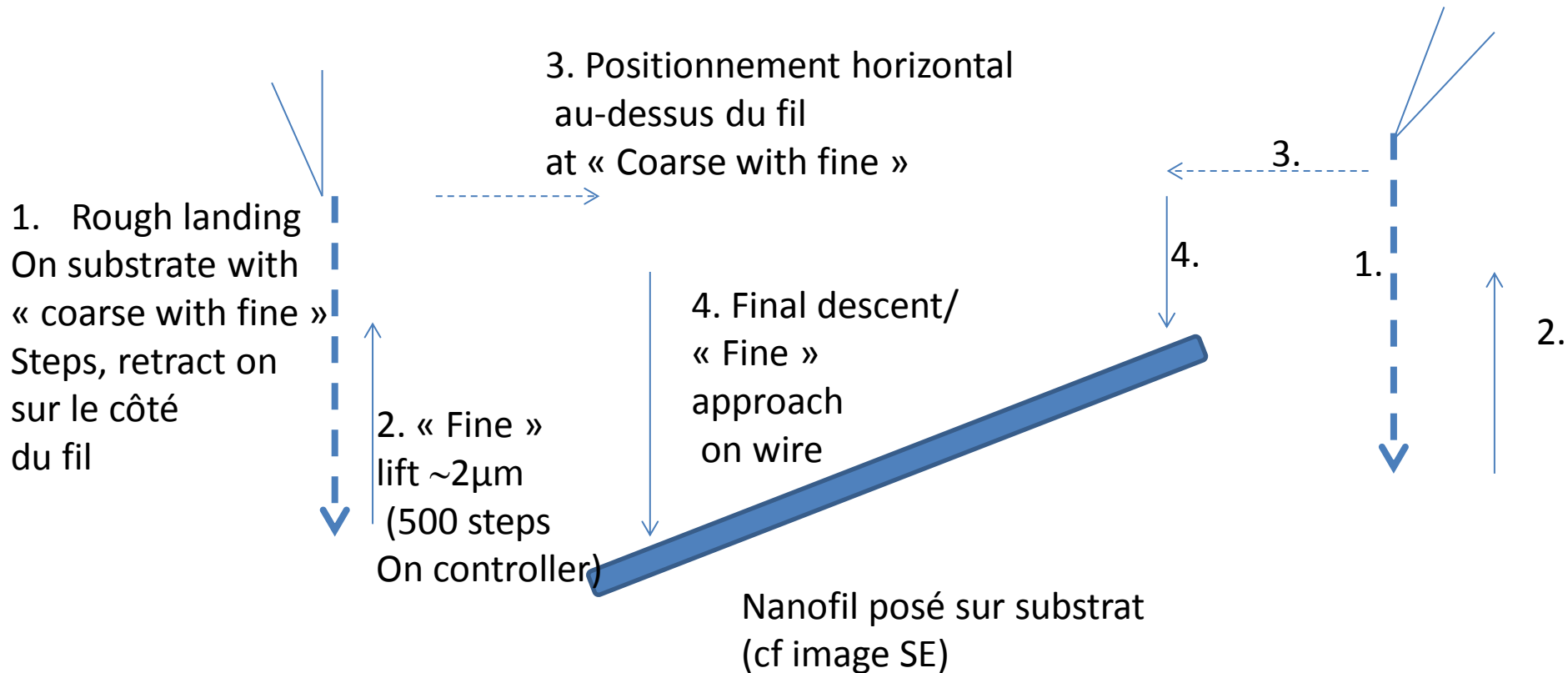
- L'approche à vitesse rapide (/« Coarse » on PS4): Ramener les pointes à proximité du nanofil
- L'atterrissage: cf méthode dans diapo suivante



06102015255-Tip-to-nanowire-contact-bottom.mp4

Méthode pour poser les pointes (Rc 100 ou 35nm) sur un nanofil

en évitant les vibrations pouvant endommager le fil



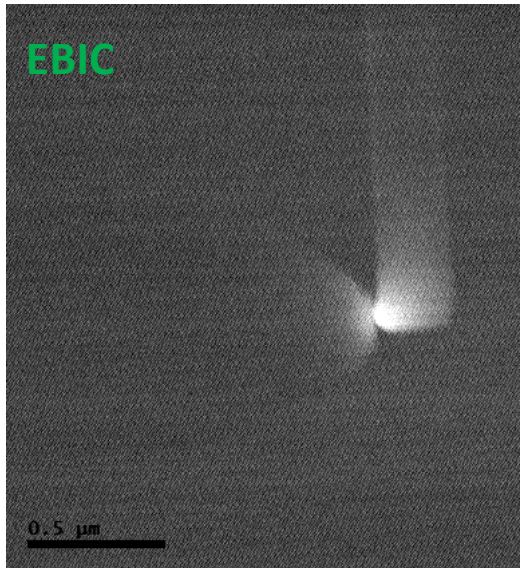
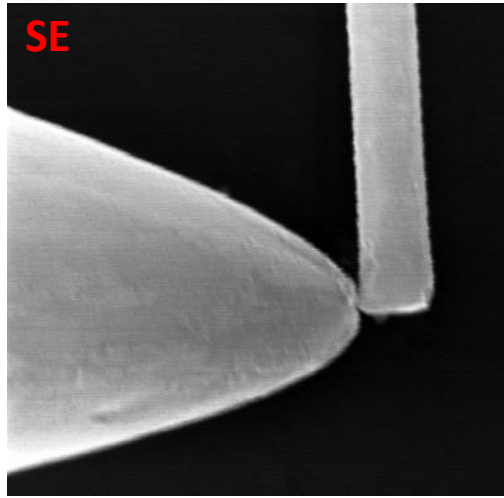
Conditions d'observation

- Faible tension (1 à 3kV) pour mieux voir la morphologie du fil et optimiser l'**efficacité** de **génération** des porteurs **dans la jonction** (effet de dilution lorsque HV↑)
- Faibles courants (qq pA) pour éviter **Carbon contamination** et établir contact fiable (d'autant plus critique que fil est fin)
- Grandissement le plus faible possible pendant la phase d'approche
- WD ~10mm (résolution du MEB largement suffisante pour voir et contacter le nanofil avec détecteur Upper:
1.8nm à 1kV sans décél. À WDopt=1.5mm
1nm à 15kV à WDopt=4mm)
♥WD jusqu'à 5mm avec le Prober Shuttle PS4

Nanofil III-V à jonction longitudinale InP/GaInP

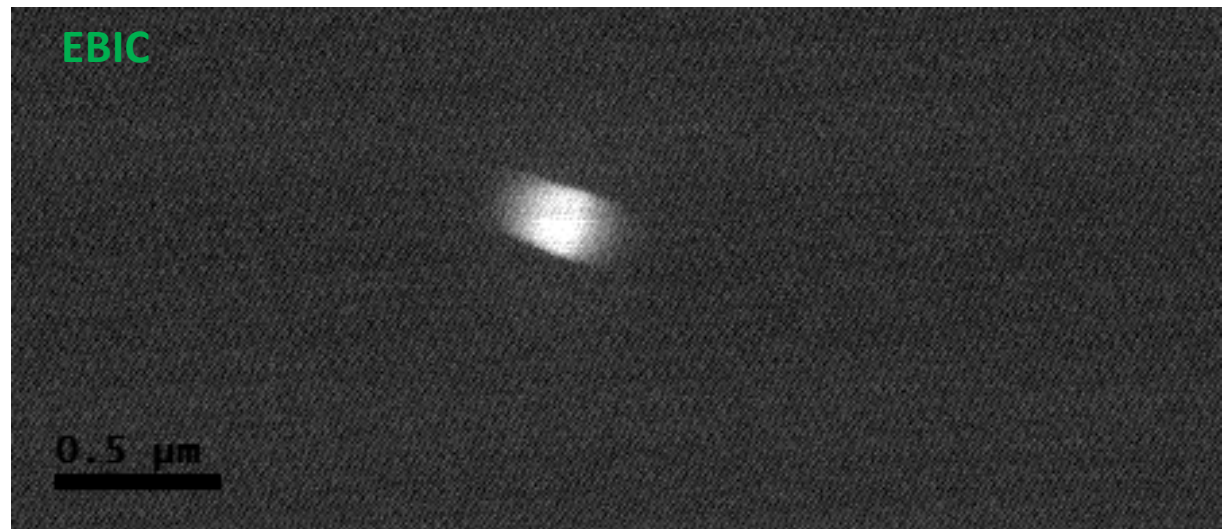
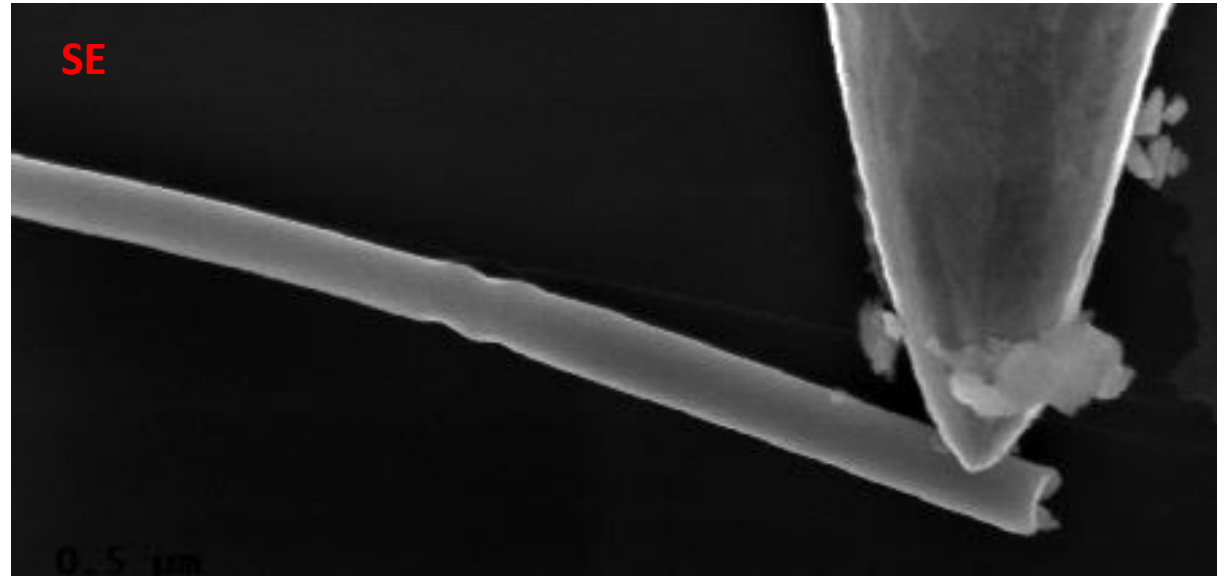
- Gap différent que GaN
→ contact ohmique possible directement avec pointes, sans utiliser d'électrode, en polarisant

Polar 0V



Jonction Schottky
Pointe-nanofil

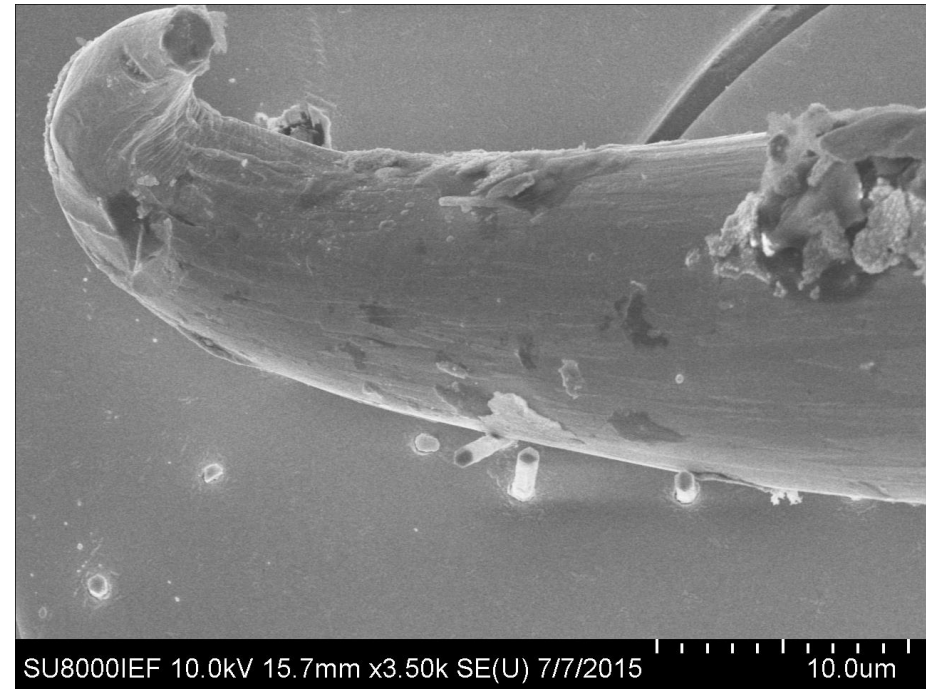
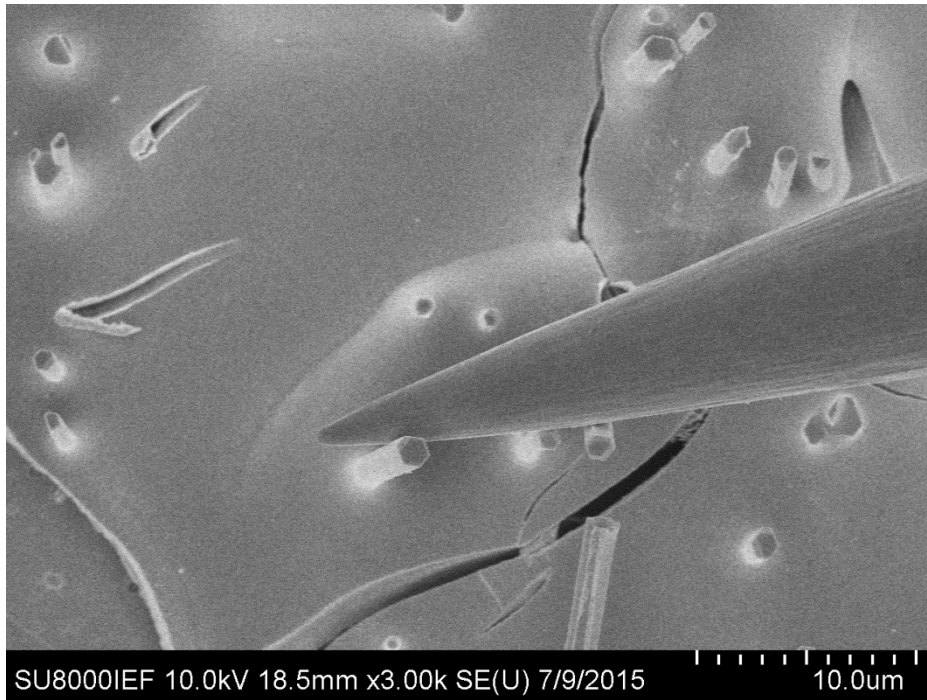
Polar 1V



Signal EBIC issu de la jonction dans le nanofil \rightarrow ok !

Clive in-situ d'un nanofil

- Avec les pointes



07072015219.mp4

Nanofil clivé in-situ

Image SE

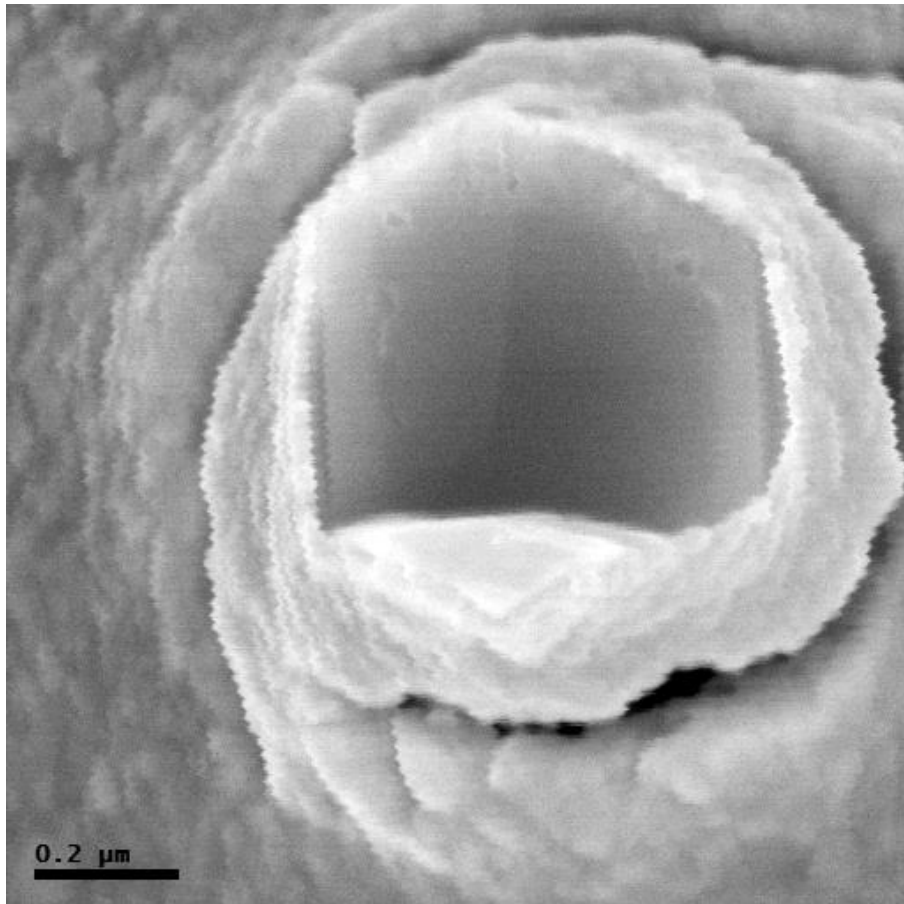
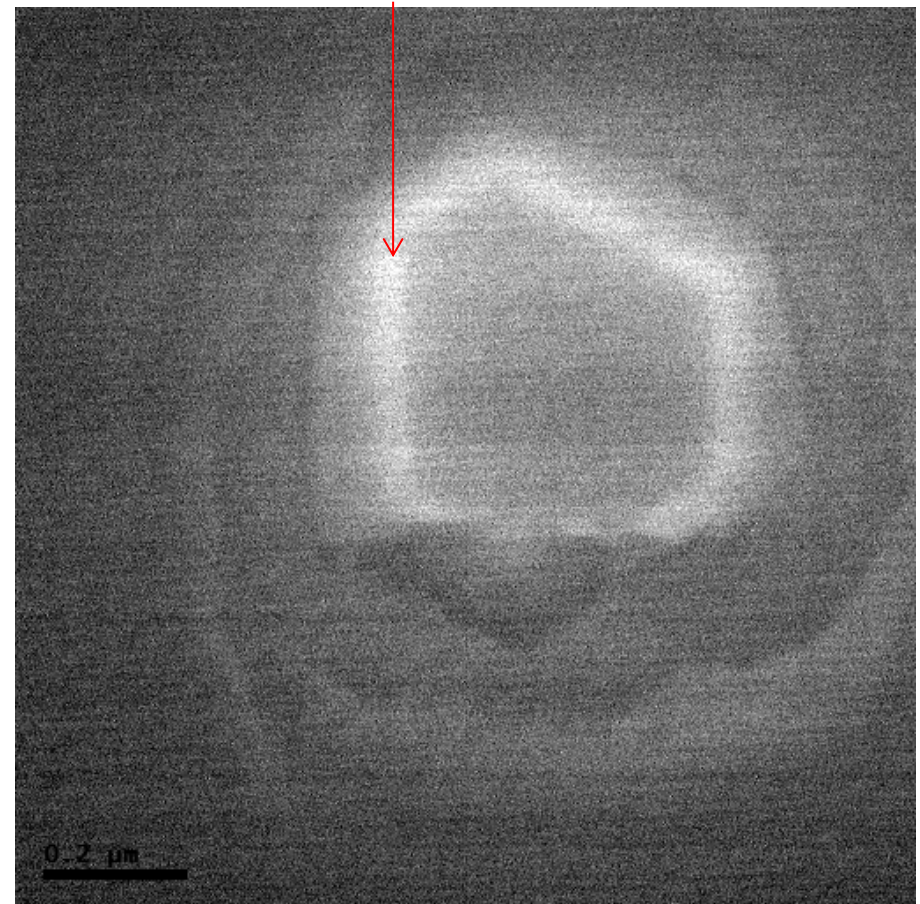


Image EBIC
révèle la jonction radiale



PLAN

- Introduction: problématique
- Ingrédient 1: CFEG UHR
- Ingrédient 2: Nanomanipulateurs
- Ingrédient 3: pointes fines
- Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN
- Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC
- **Conclusion**
- Perspectives

Conclusion

- Manipulateurs doivent être pilotés d'une certaine façon pour arriver à contacter les nanostructures sans les détruire/endommager/modifier (atterrissage « en douceur », précautions électriques opératoires: mise à la masse avant contact...)
- Qualité et fiabilité du contact liée à l'état des pointes... aux matériaux en contact (! Barrière Schottky → tenter polar., sinon dépôt électrodes ad hoc), mais aussi aux conditions d'observation!
 - nettoyer pointes fréquemment si besoin pour retrouver conductivité
- Contact ohmique est possible en posant directement les pointes sur le nanofil (ou nano-structure au sens large) dans certains cas (couples matériaux pointe-échantillon), quitte à polariser
- Résolution du CFEG UHR suffisante pour visualiser les jonctions radiales et longitudinales dans les nanofils, y compris à grande WD (limitation: poire d'interaction EBIC, longueur de diffusion des porteurs >> résolution en SE-détecteur Upper=through lens)

PLAN

- Introduction: problématique
- Ingrédient 1: CFEG UHR
- Ingrédient 2: Nanomanipulateurs
- Ingrédient 3: pointes fines
- Montage Smaract « maison » appliqué à l'imagerie EBIC de μ -cristaux GaAs et nanofils GaN
- Montage Kleindiek appliqué à contact nanofils + EBIC
- Conclusion
- **Perspectives**

What's next ? : Perspectives

- Couplage optique: injecter lumière dans dispositif pour exciter 1 guide d'onde, des molécules ...
- Collecter la lumière émise par le nanofil en champ proche (SEM-SNOM) sous injection électrique
- Cathodo: complémentaire à EBIC pour évaluer performances globales d'un dispo opto-élec. à base de nanostructures (LEDs, cellule solaire), dans le même Microscope

Contacts sur les échantillons

μ -cristaux AsGa (IEF)

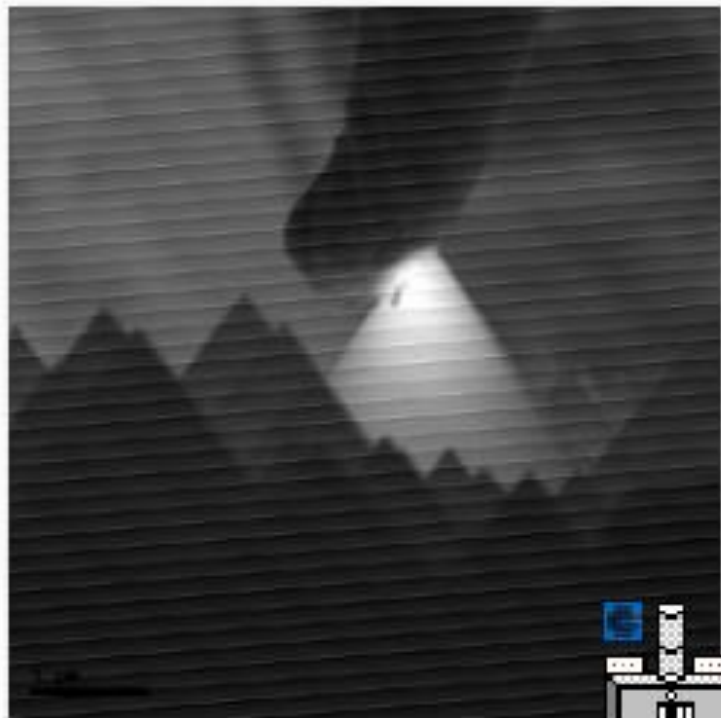
- Laetitia Vincent
- Charles Renard
(croissance CVD)

Nanofils

- Maria Tchernycheva (IEF)
 - Pierre Lavenus
 - Vladimir Neplokh
 - Hezhi Zhang (gravure jonction au sommet du fil)
 - Valerio Piazza
- * Noëlle Gogneau*LPN
(croissance MBE
Nanofils GaN-InGaN cœur-coquille)

Merci pour votre attention

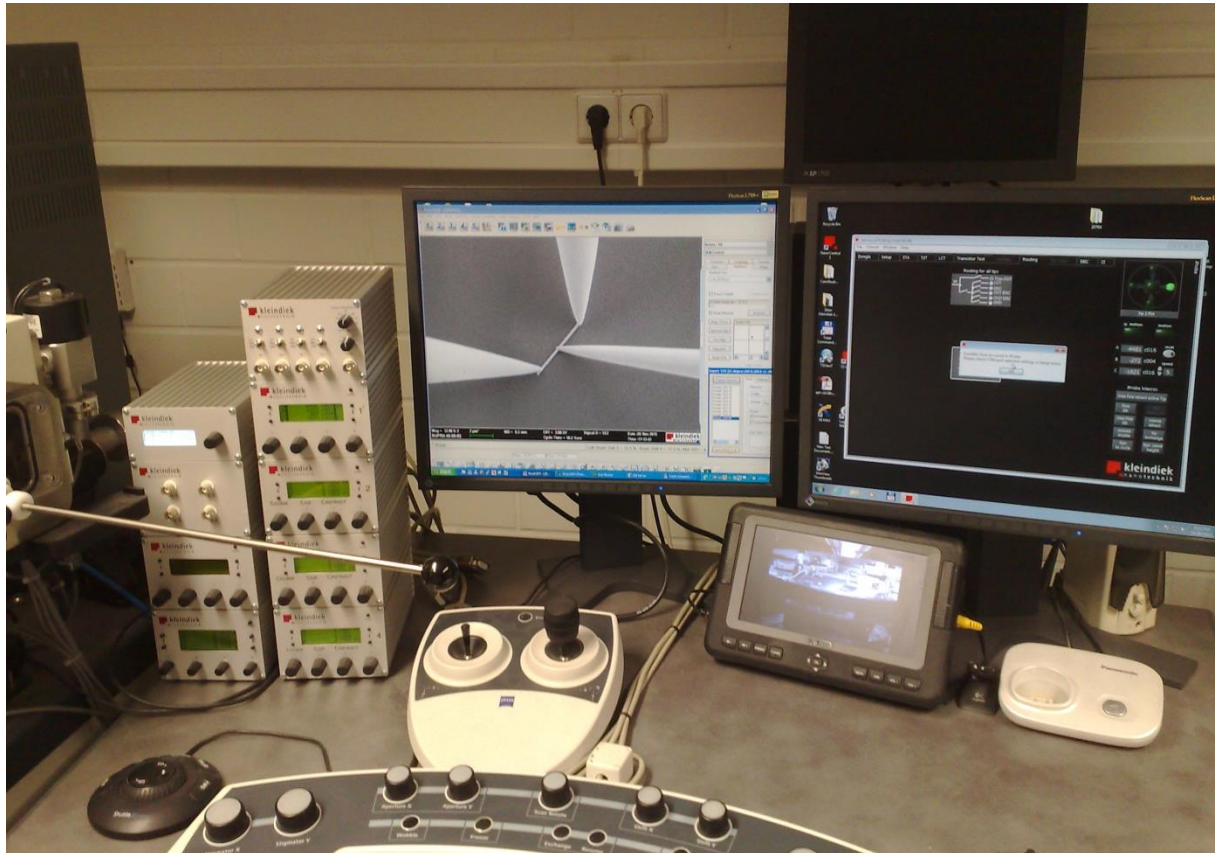
Questions ? fabien.bayle@u-psud.fr

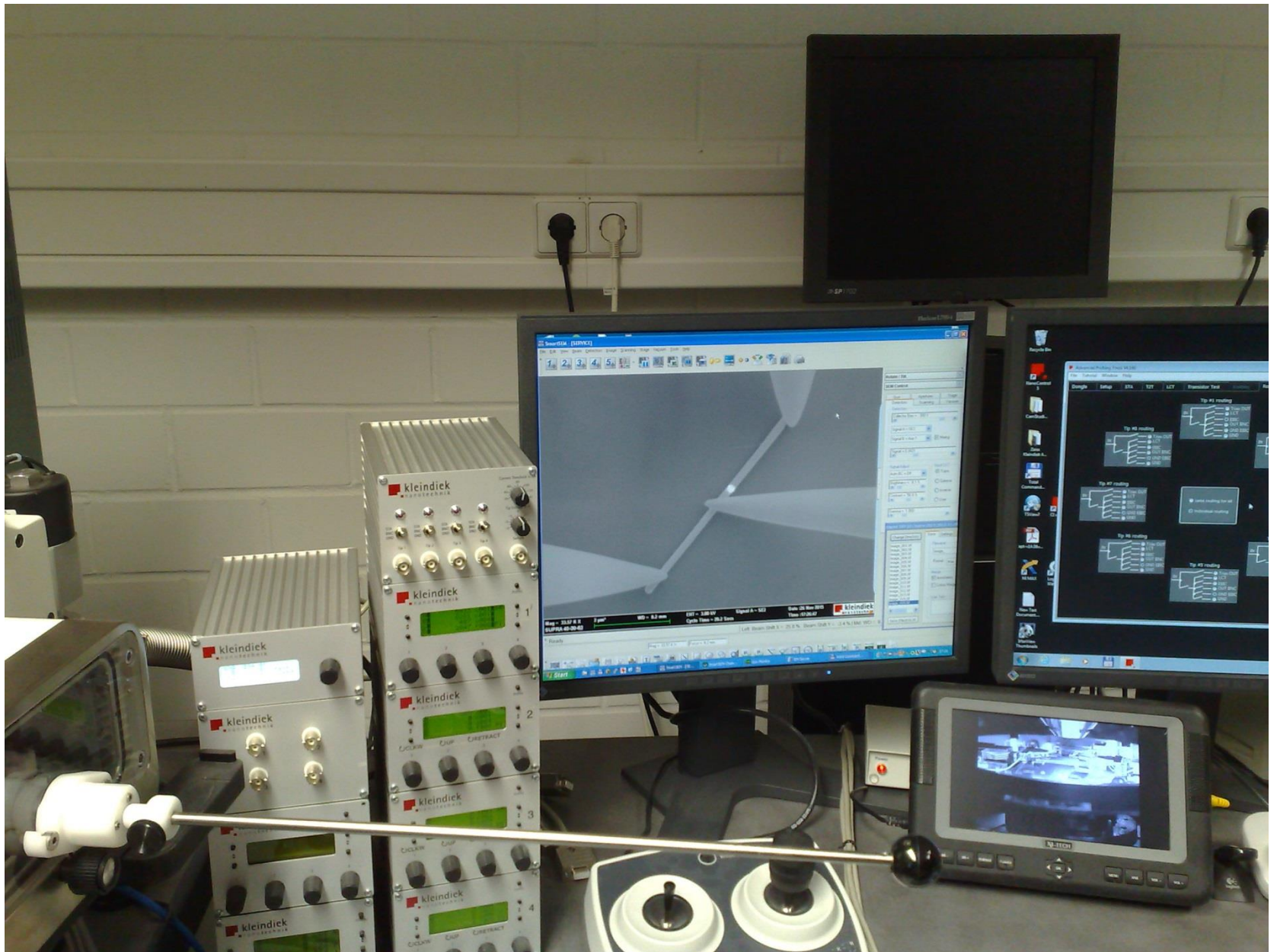


1409112d-30000.0V-5000X-0160

Challenges à adresser

- Caractériser la résistivité du nanofil par méthode 4 pointes





Influence des paramètres de conduite/pilotage du moteur piezo

- Amplitude:

determines the size of the coarse step (length of displacement)

- Fréquence:

☞ Frequency affects speed of manipulator

And size of coarse steps (resonance effects occurring in driving principle of manipulator)

*Higher frequencies usually result in smaller coarse steps→higher resolution movements

*Above 4 kHz, motors wear down more quickly

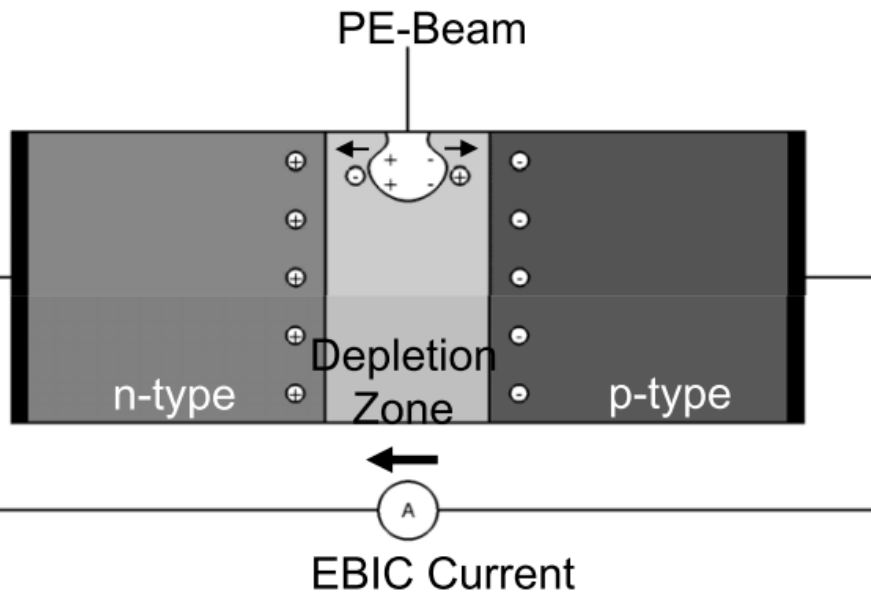
 Certain frequencies may cause manipulator to behave unpredictably

Adjusted on trial/error basis, recommended value: 2.7 kHz

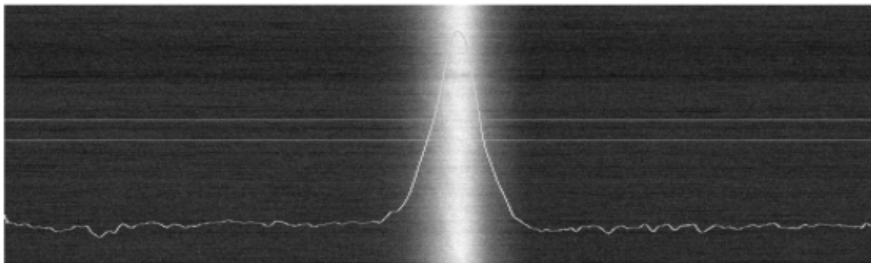
Allowable range: 0.5 to 10 kHz, à plus haute fréquence: usure prématurée

Rappel: principe EBIC

EBIC Principle



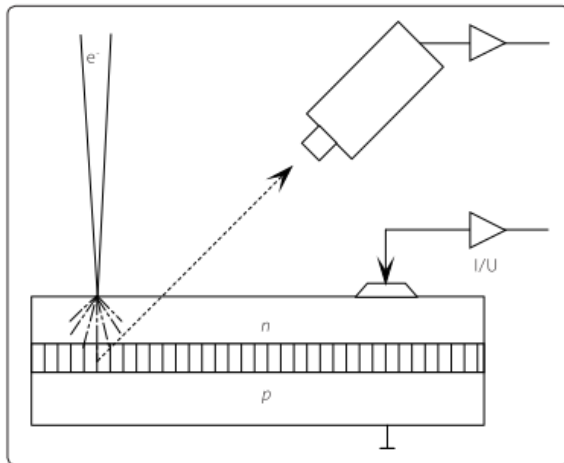
- Primary electrons generate electron-hole pairs in semiconductor material
- Electrons and holes were separated within the internal electrical field of a depletion zone generating an EBIC current
- EBIC signal as input for SEM imaging system
- depletion zones and electrically defects can be characterized



EBIC: principle

Imaging using EBIC

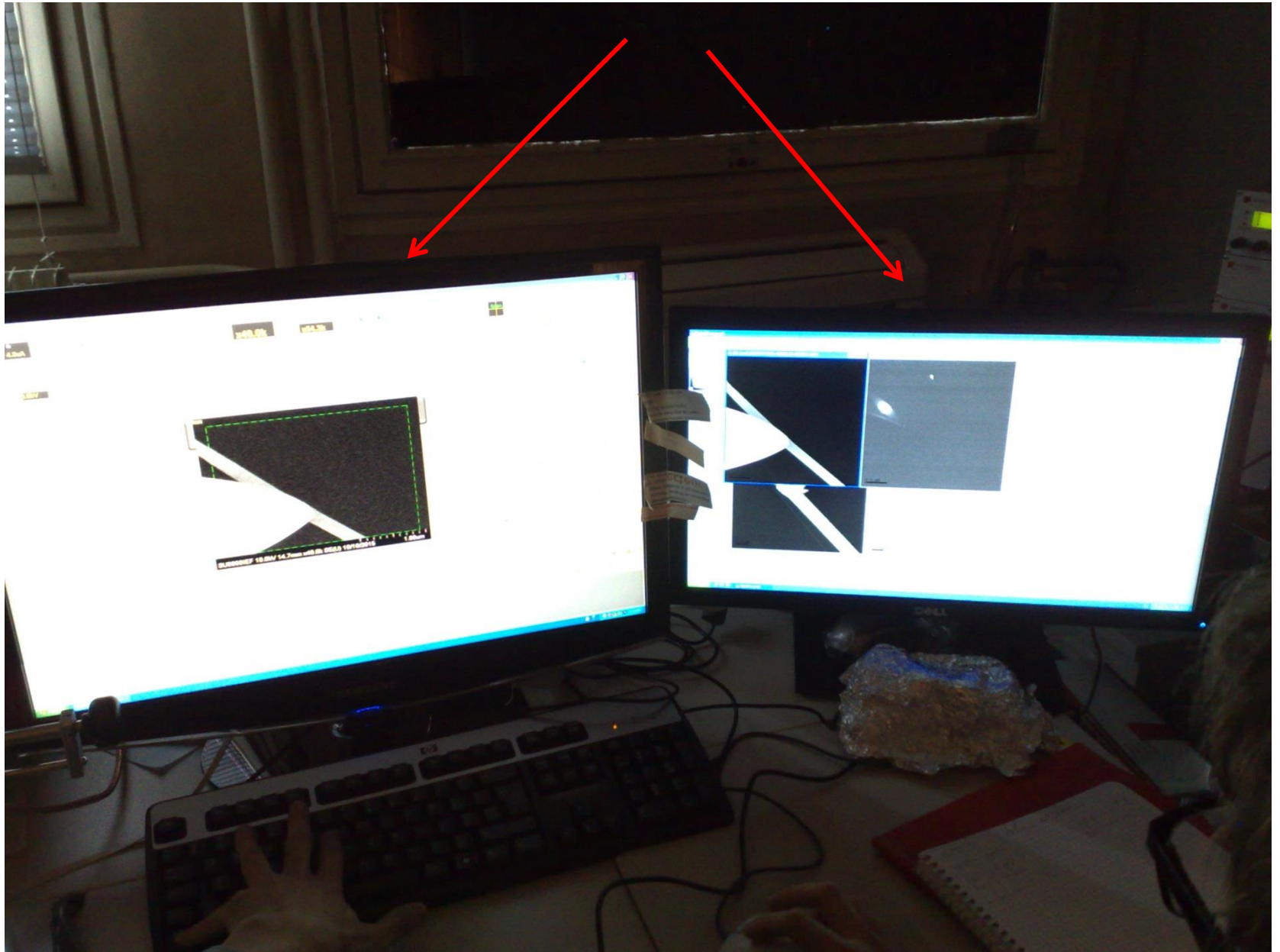
EBIC images are created from electrons that penetrate the semiconductor's oxide and metal layers and reach the p-n junctions. The electron-hole pairs that are generated in this process are separated by the diffusion voltage and measured as a current that flows through the probe tip of the manipulator.



The current signal is converted to a voltage and fed back to the SEM to obtain a current image of the sample. Light and dark areas in the image indicate p-n junctions (n- and p-wells to the substrate). Grey regions indicate areas without current flow.

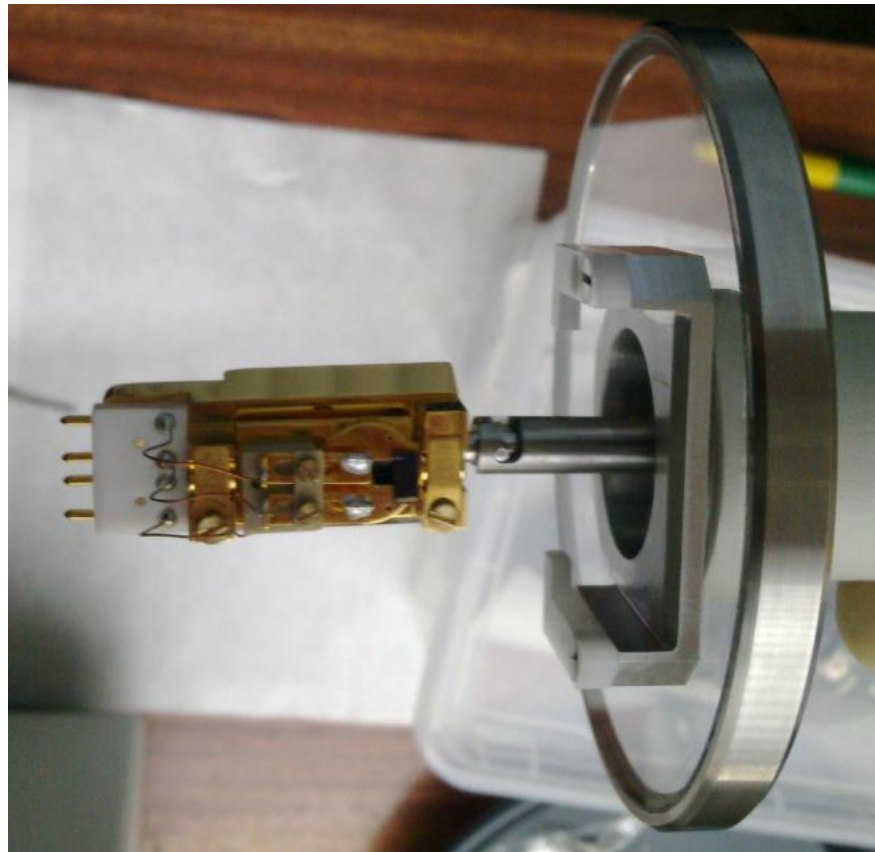
A great advantage of EBIC is the ability to generate electron hole-pairs at specific depths by selecting an appropriate electron beam energy. The higher the beam energy, the deeper the penetration into the sample. By acquiring images using different energies, a three-dimensional image of the p-n junctions can be obtained. Offset and amplification are adjusted using the EBIC/RCI amplifier to enhance the details in the area of interest.

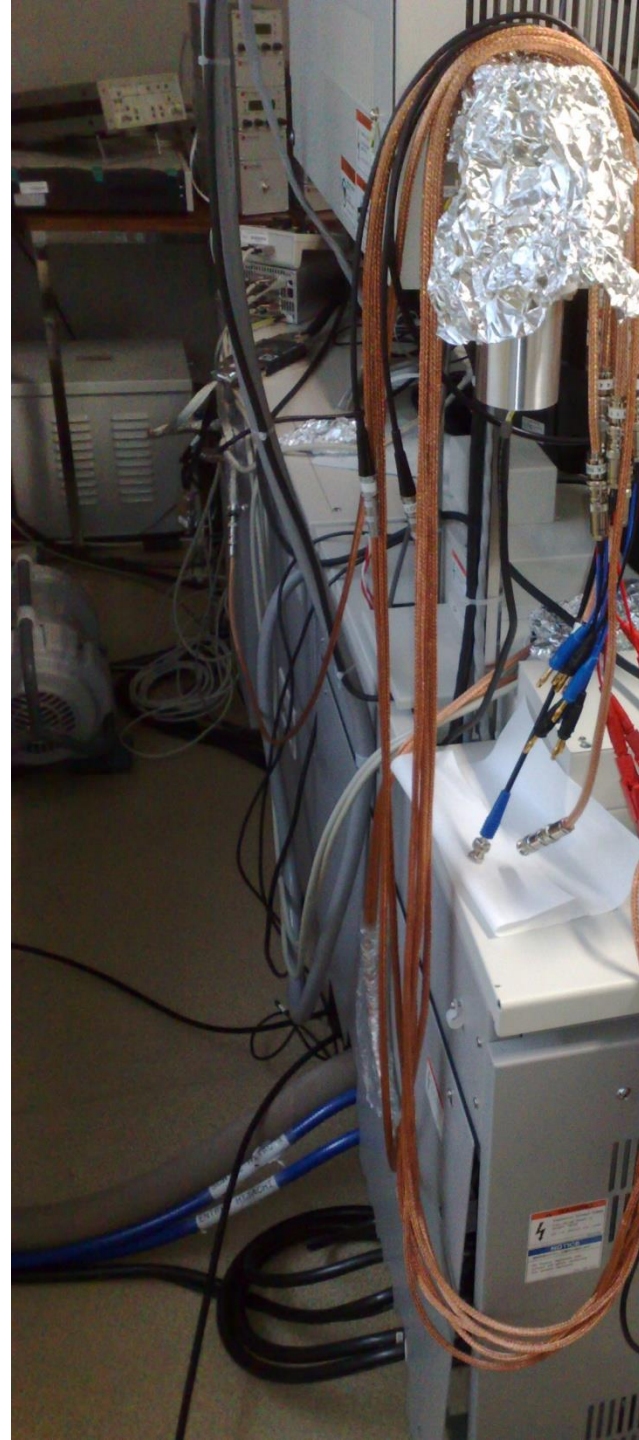
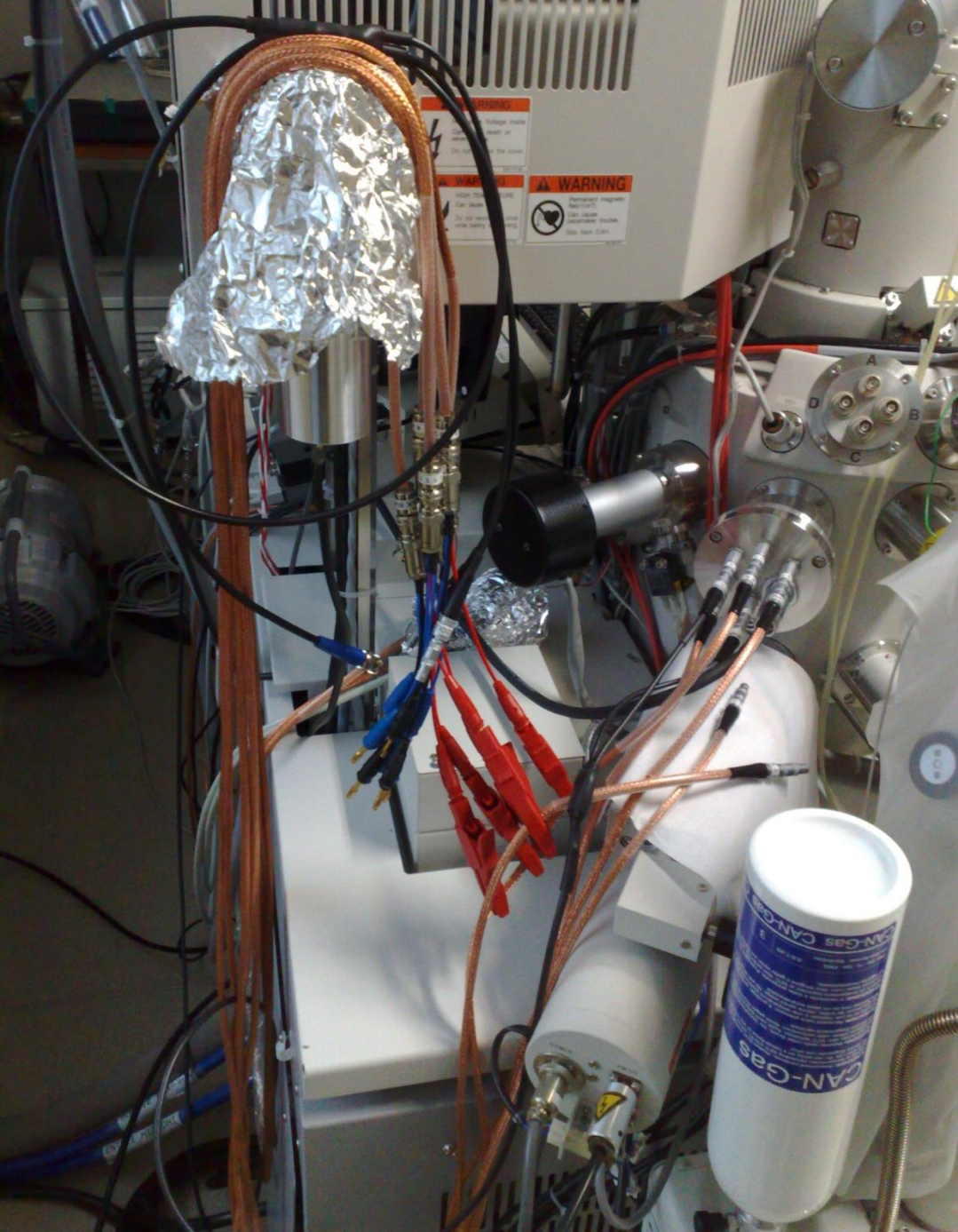
2 écrans: SEM Hitachi et EBIC Gatan

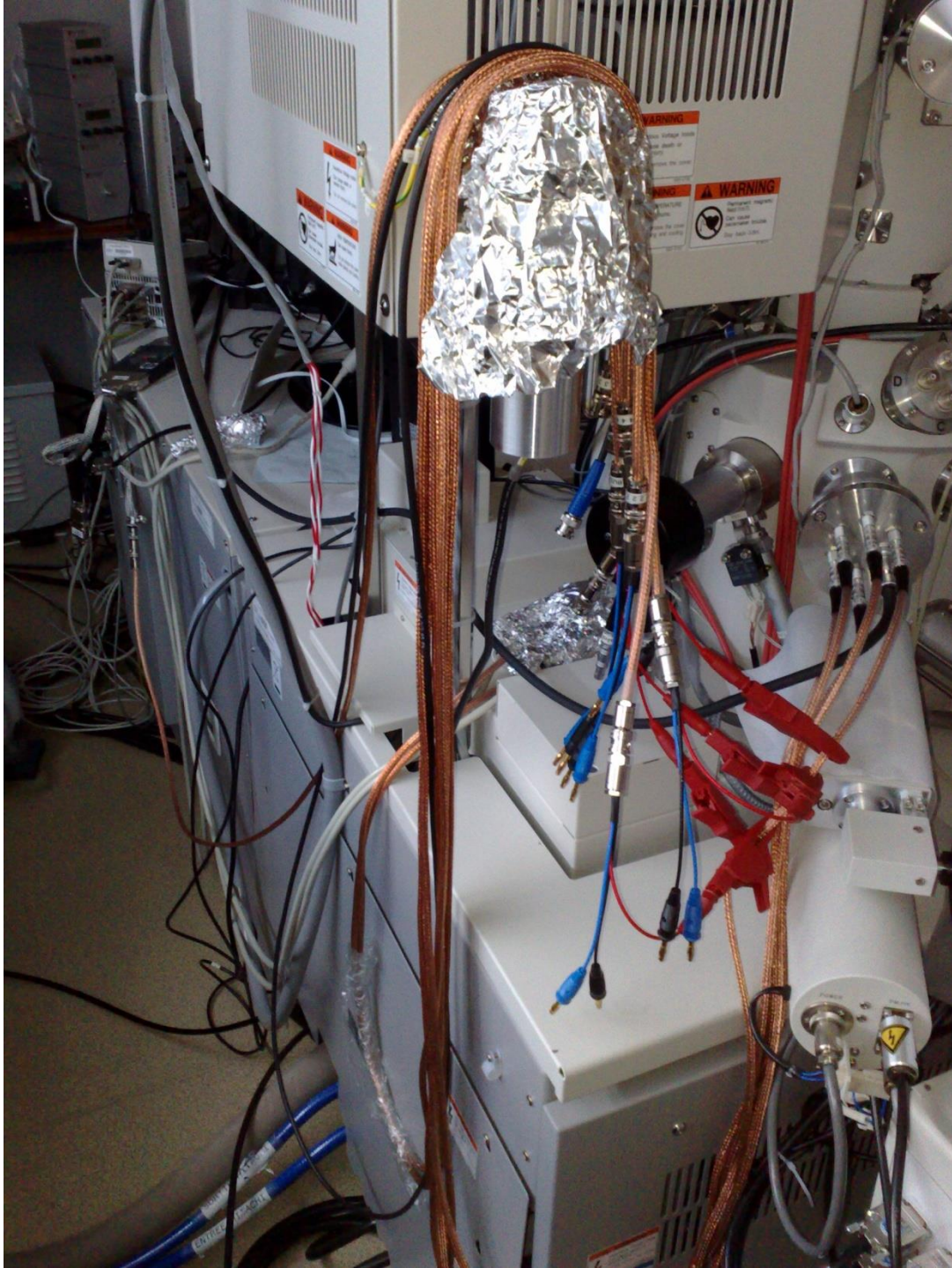


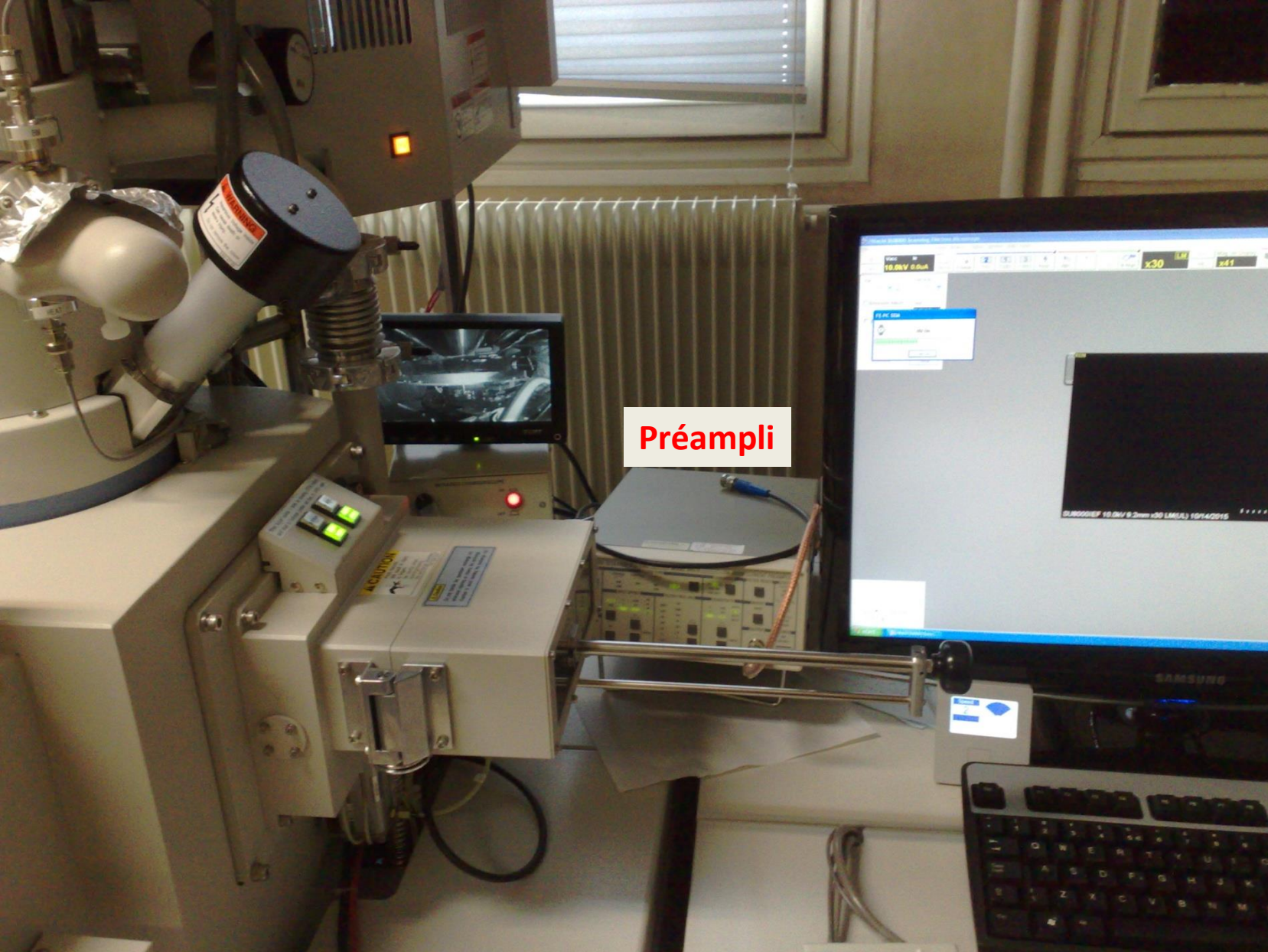
EBIC sans nanomanipulateur

- C:\Users\Fabien\Desktop\GATAN-Notice\pour-Notice-EBIC\231120112628





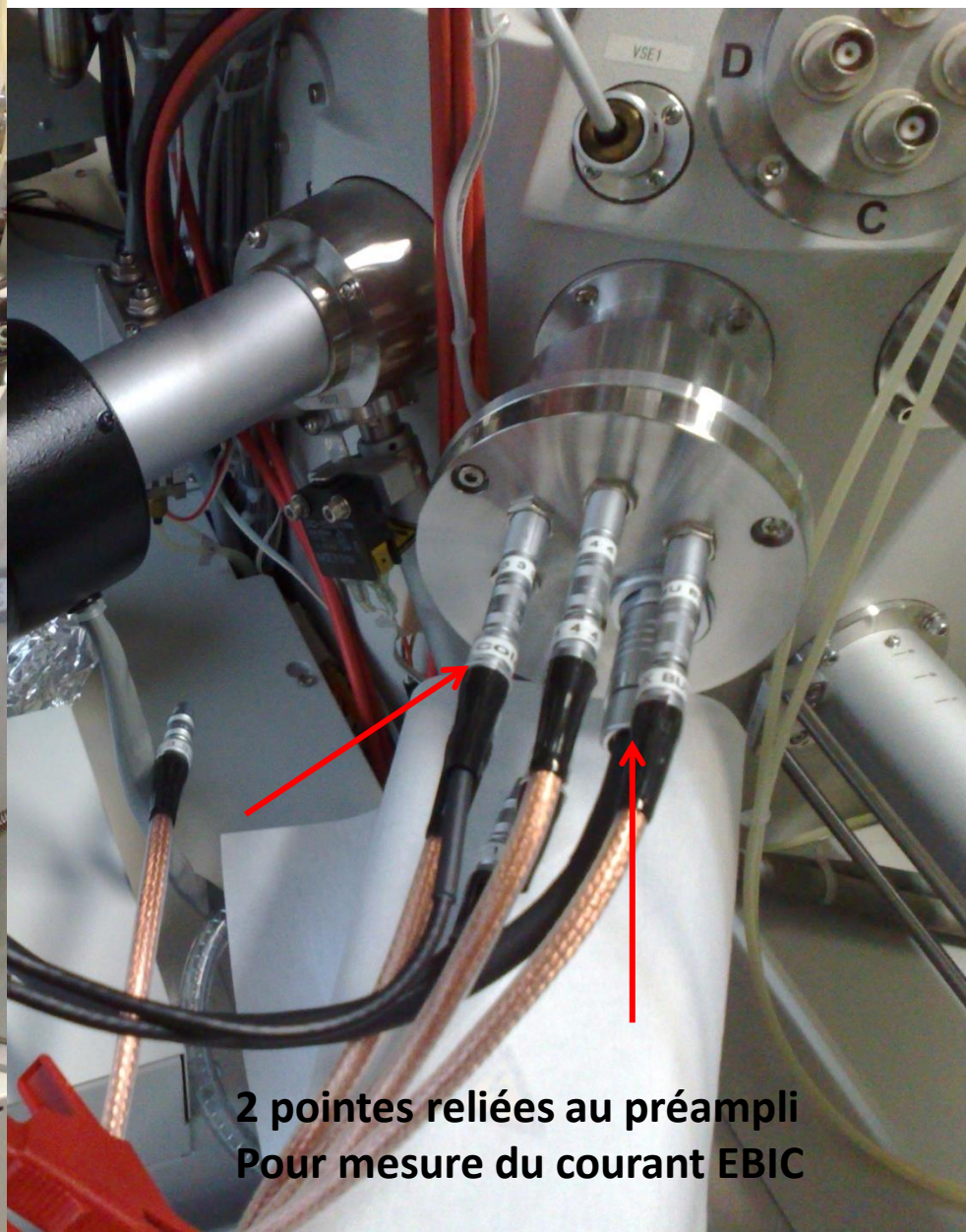
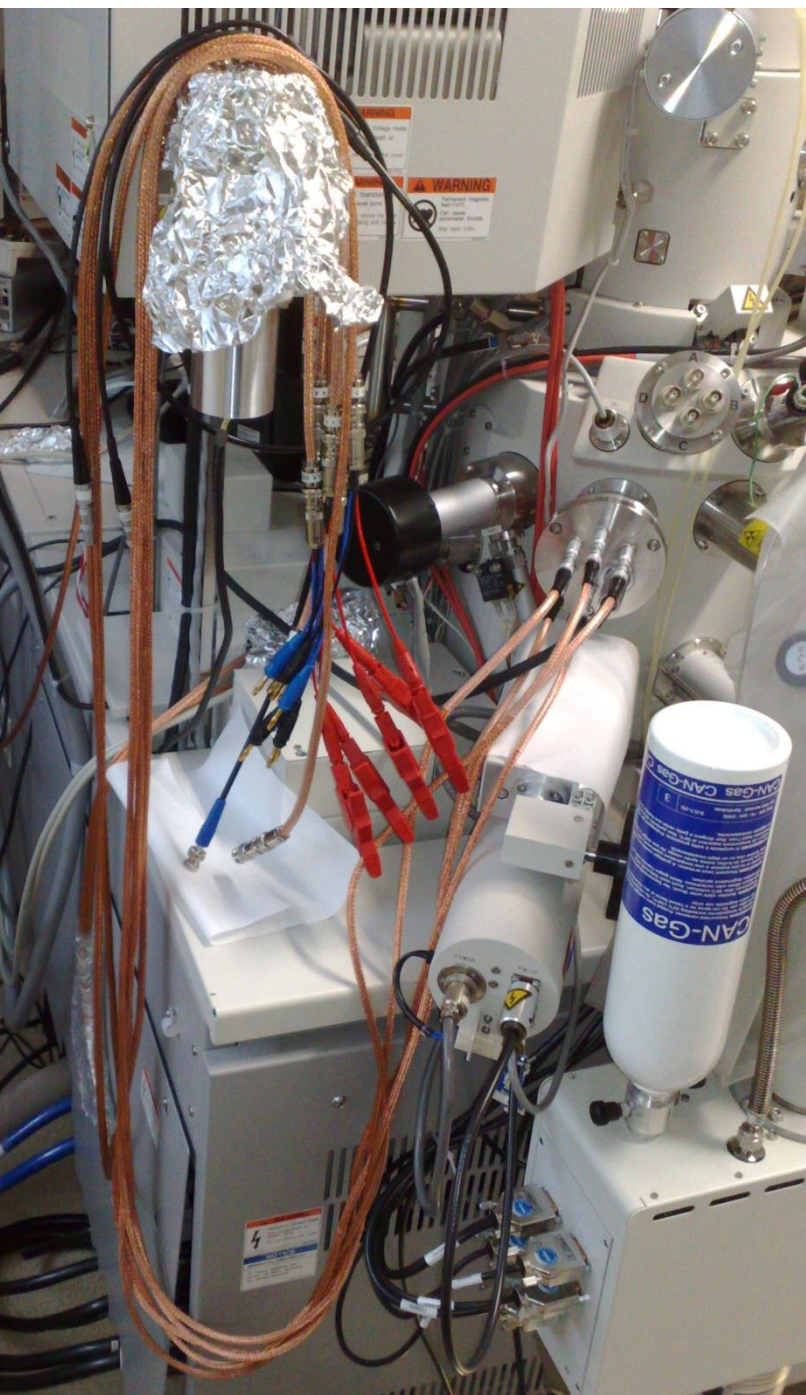




Préampli







**2 pointes reliées au préampli
Pour mesure du courant EBIC**

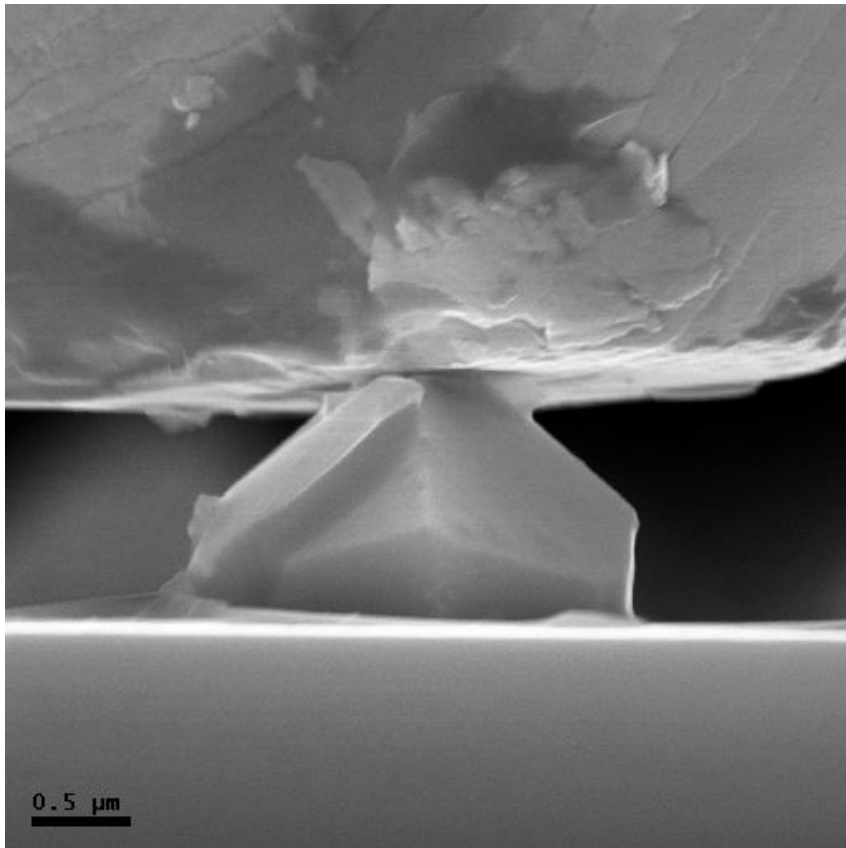


Les pointes sont reliées à la masse de la colonne avant de contacter la structure et de mesurer le courant EBIC sinon elles se chargent pendant l'observation Sous HV !

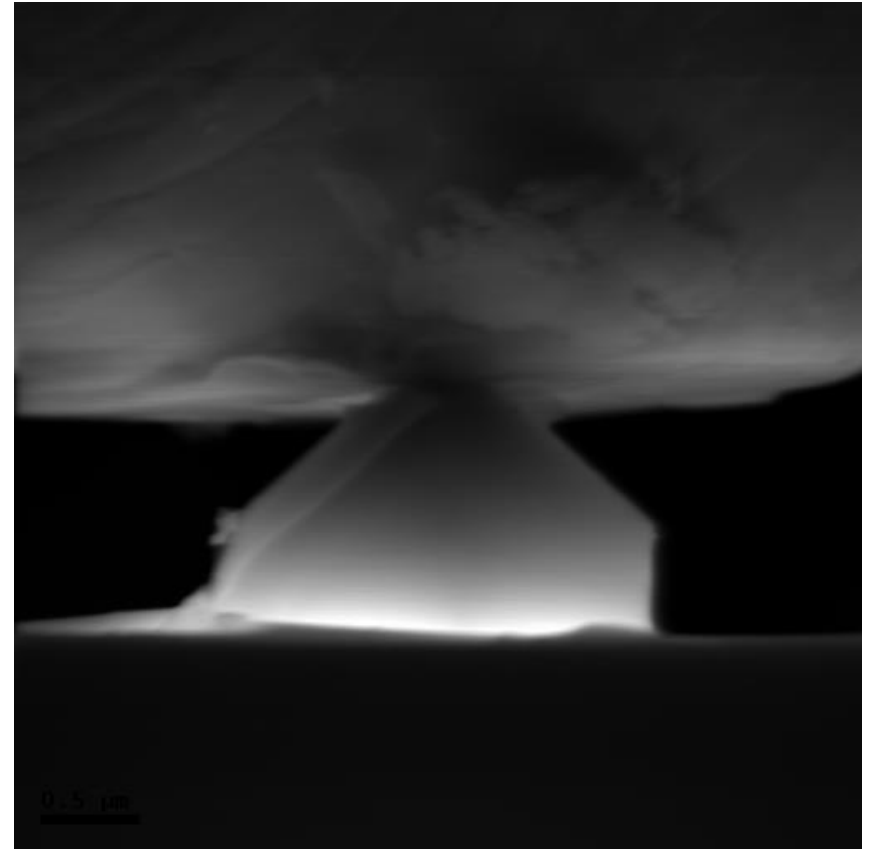
Quel contact? Pour quoi faire? EBIC: μ -cristal GaAs (cross section)

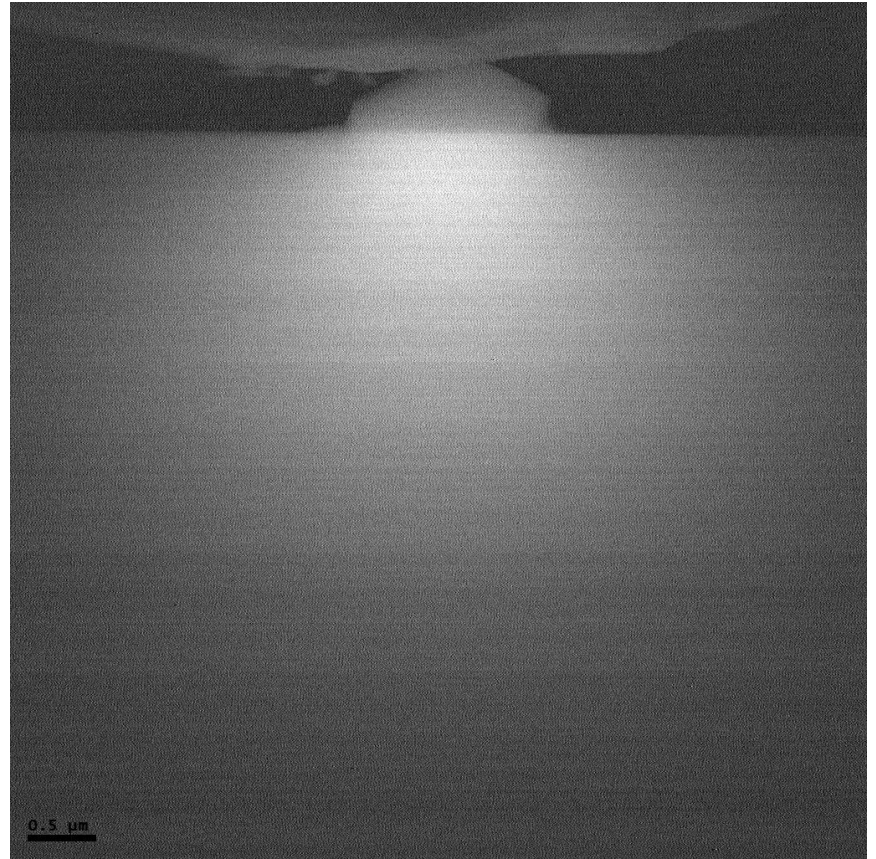
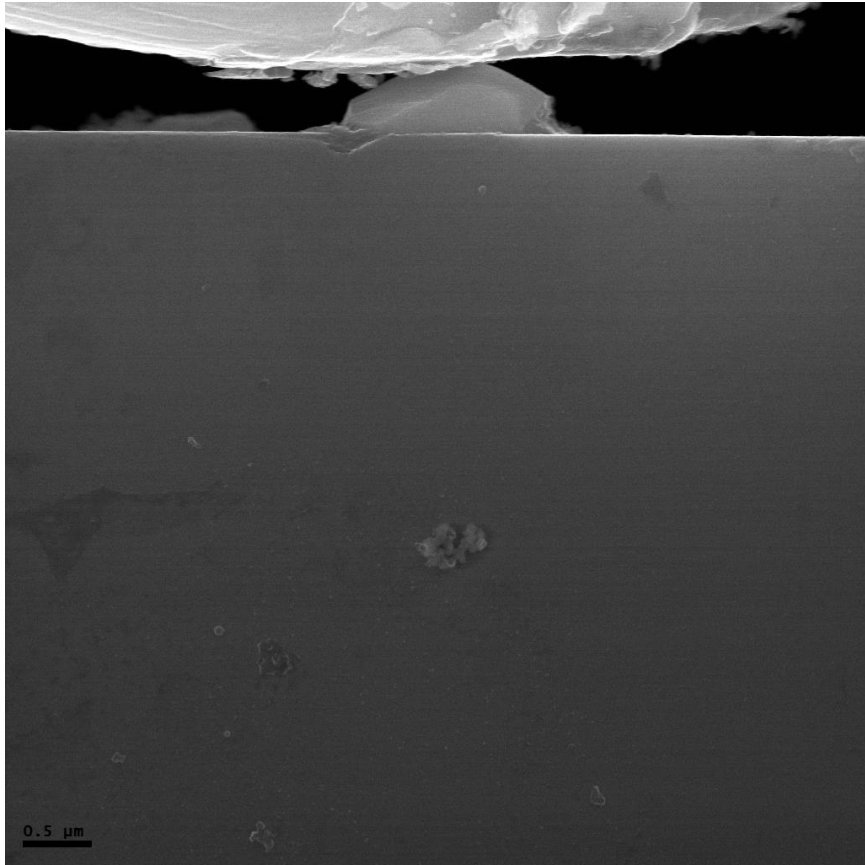
Slightly tilted

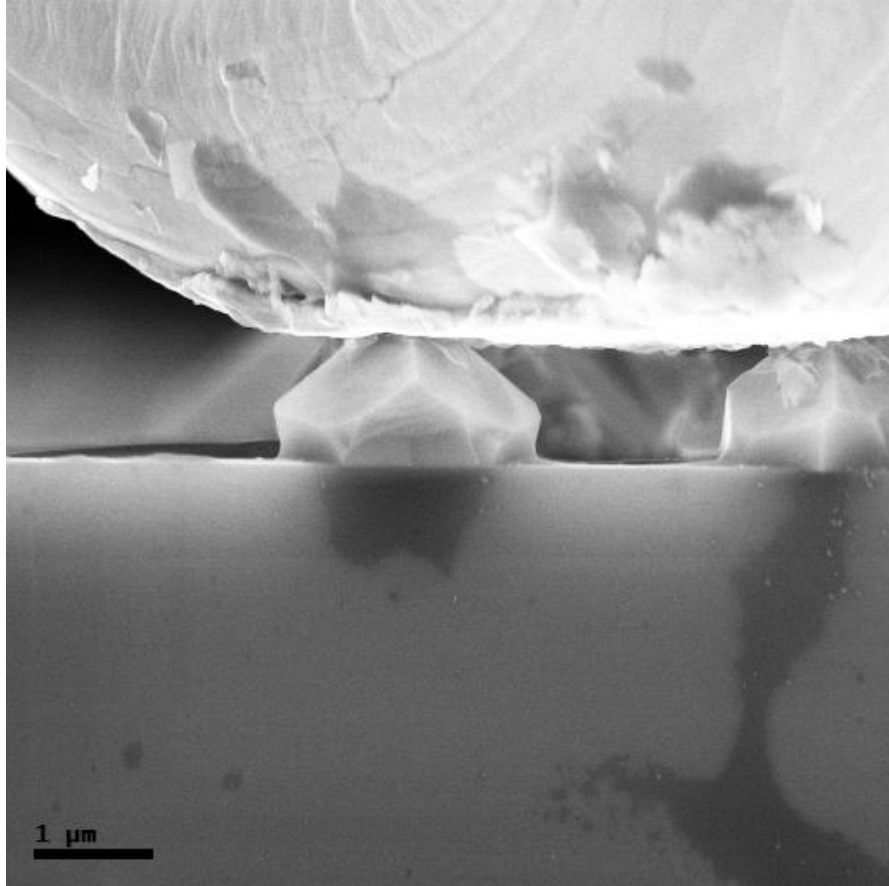
SE image



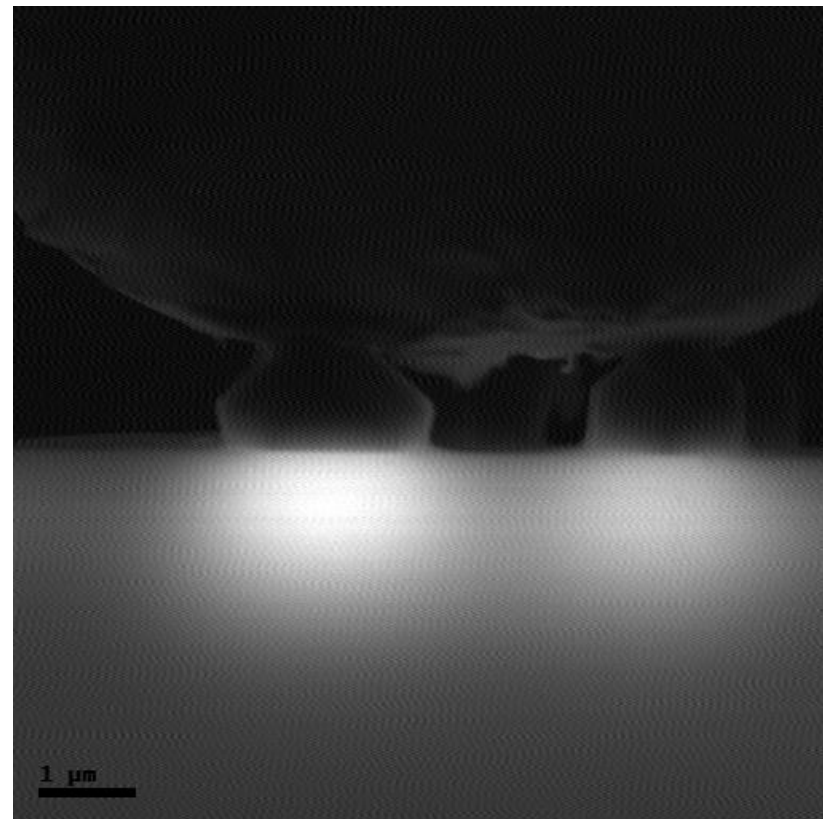
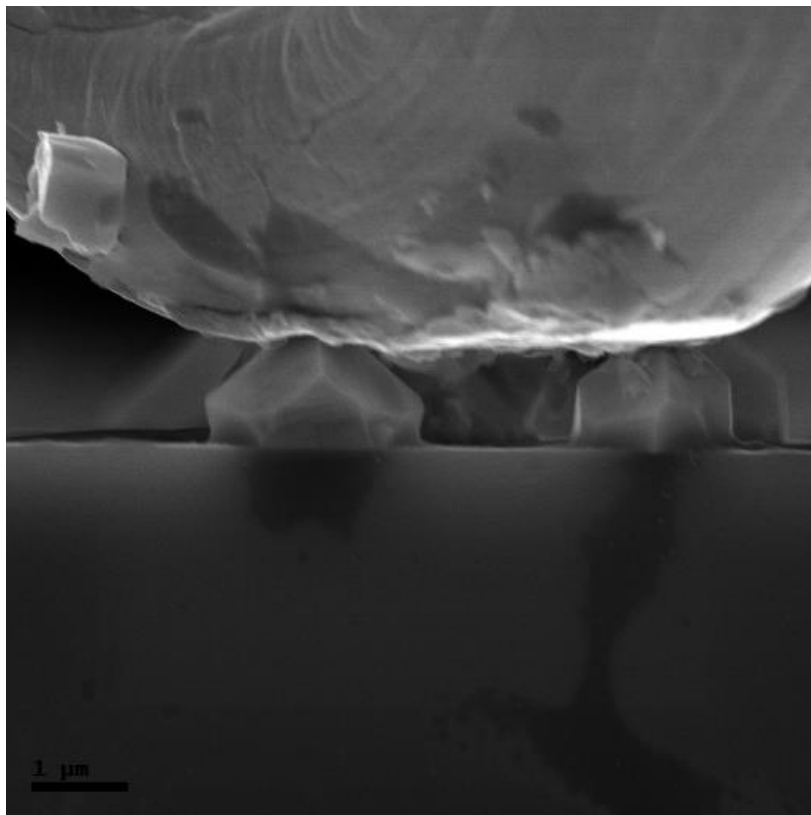
EBIC image

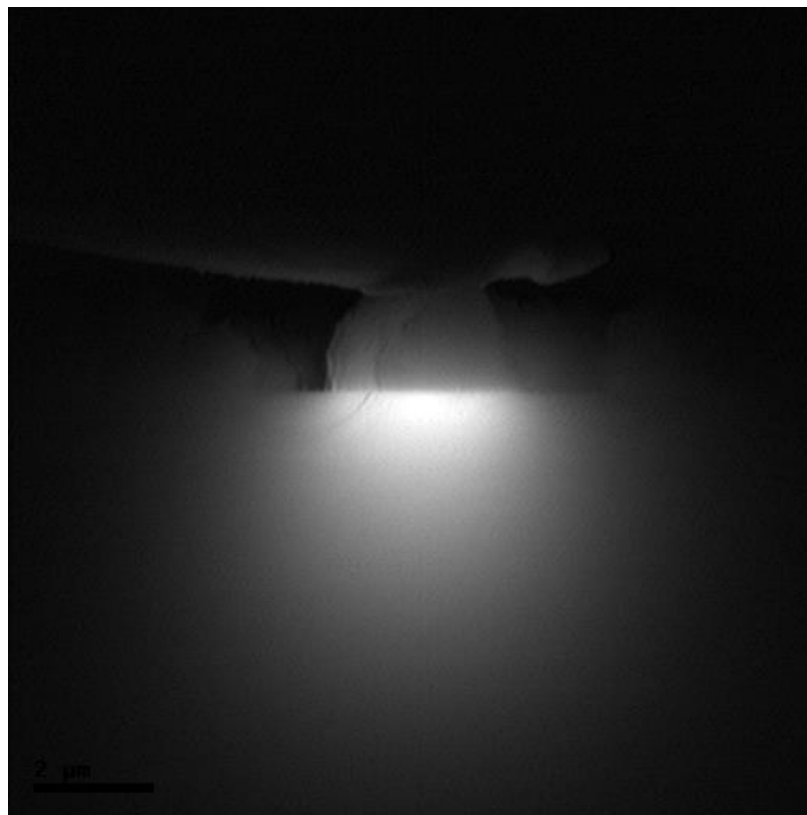
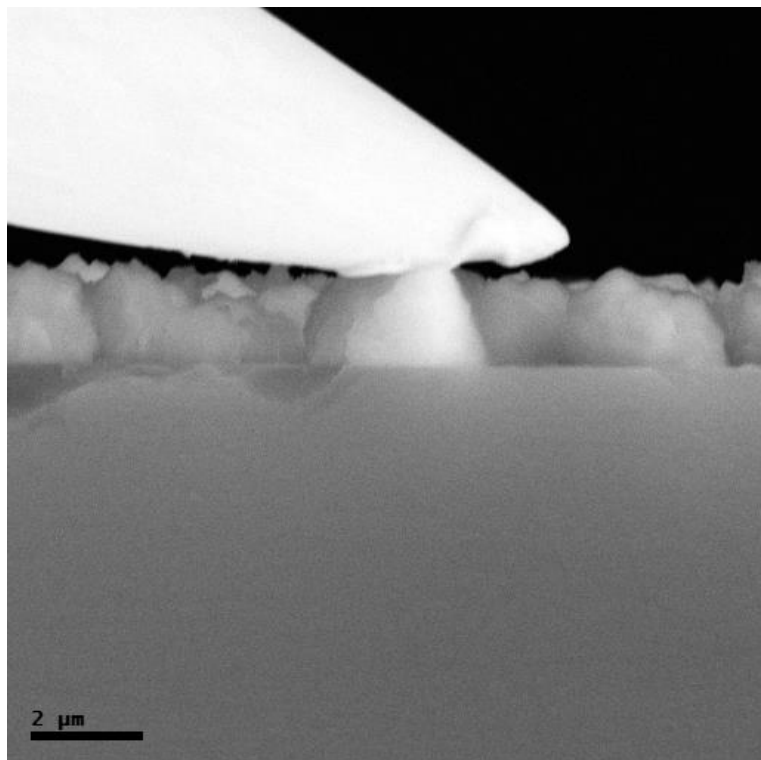




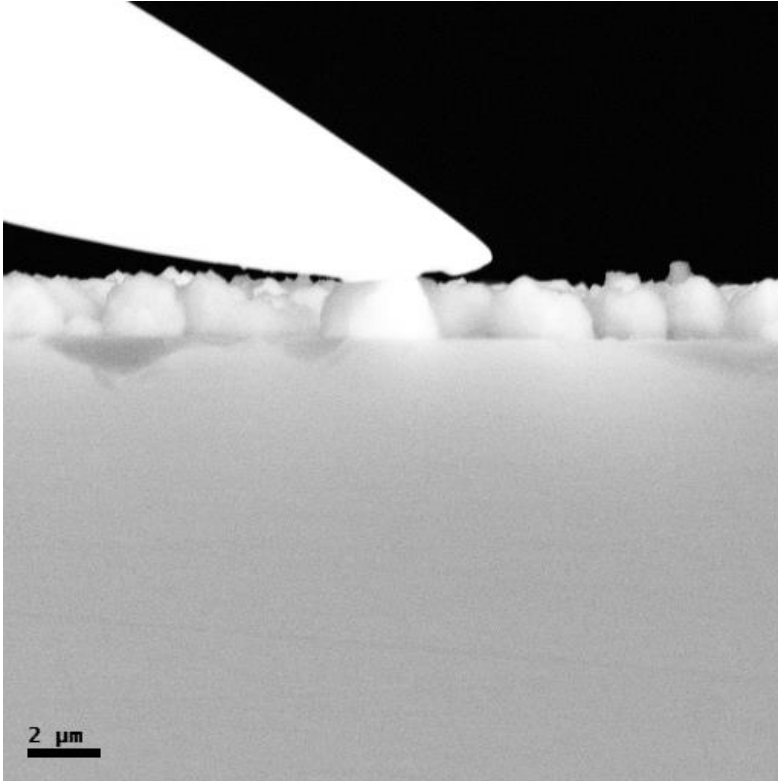


2 cristaux contactés à la fois (avec la même pointe)

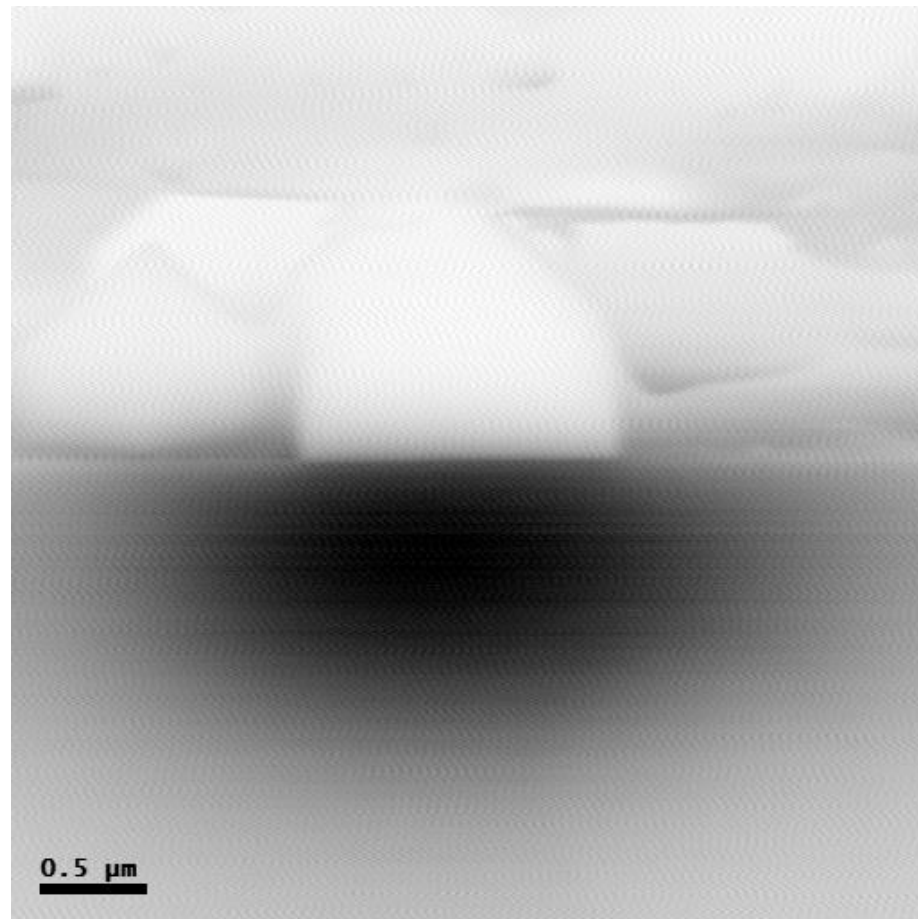
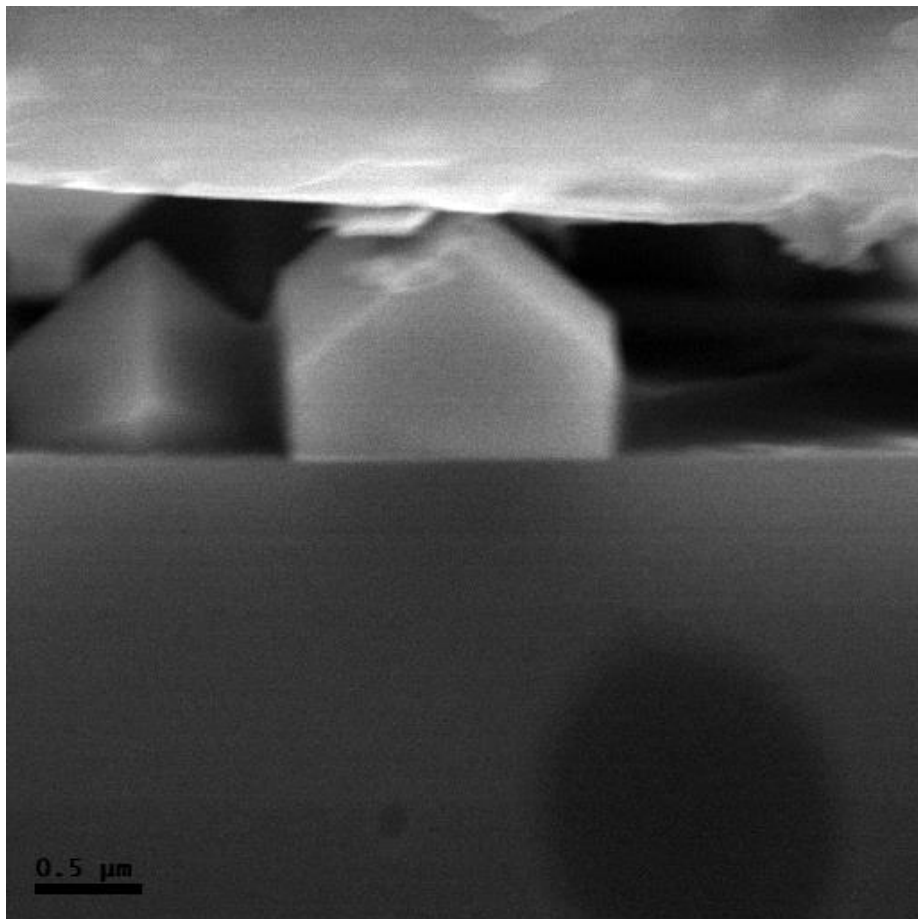




En dé-zoomant:

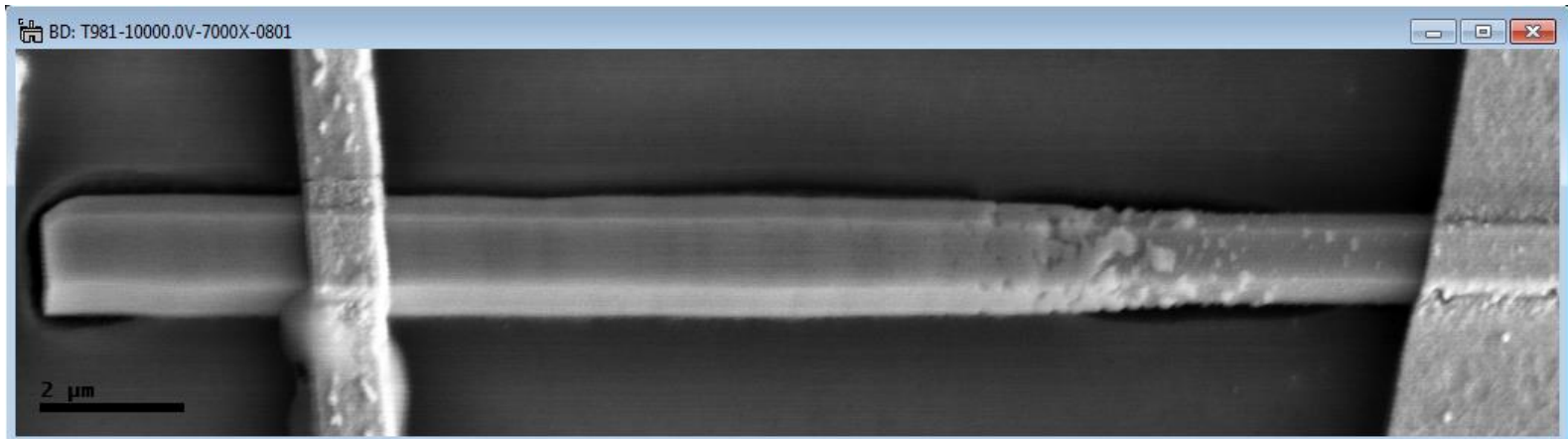


Champ clair au champ sombre: permuter branchement des pointes sur le préampli

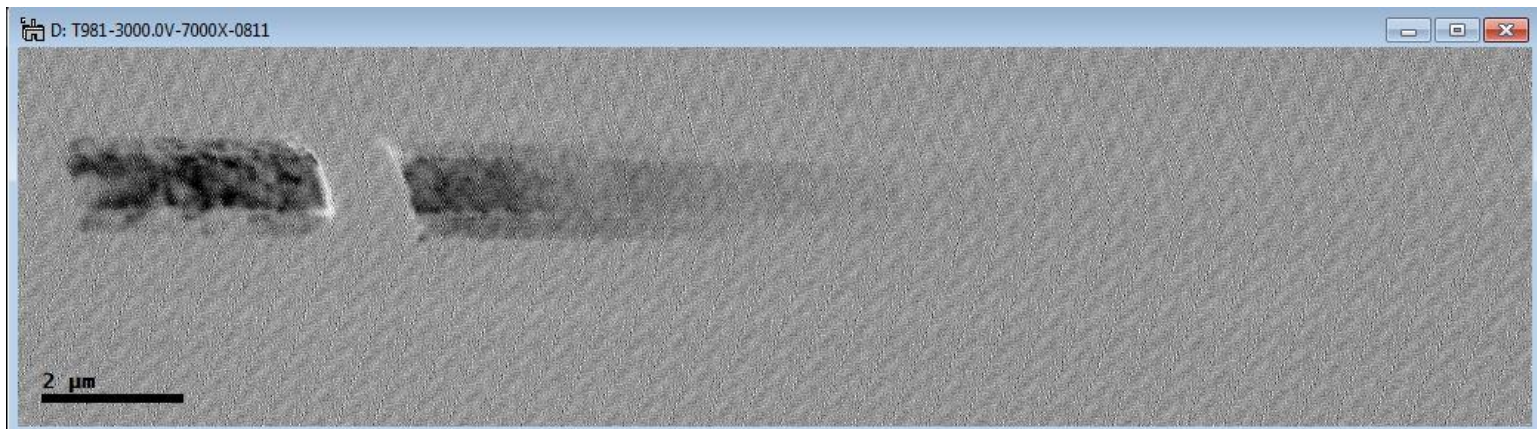


Electrically active defects can be characterized

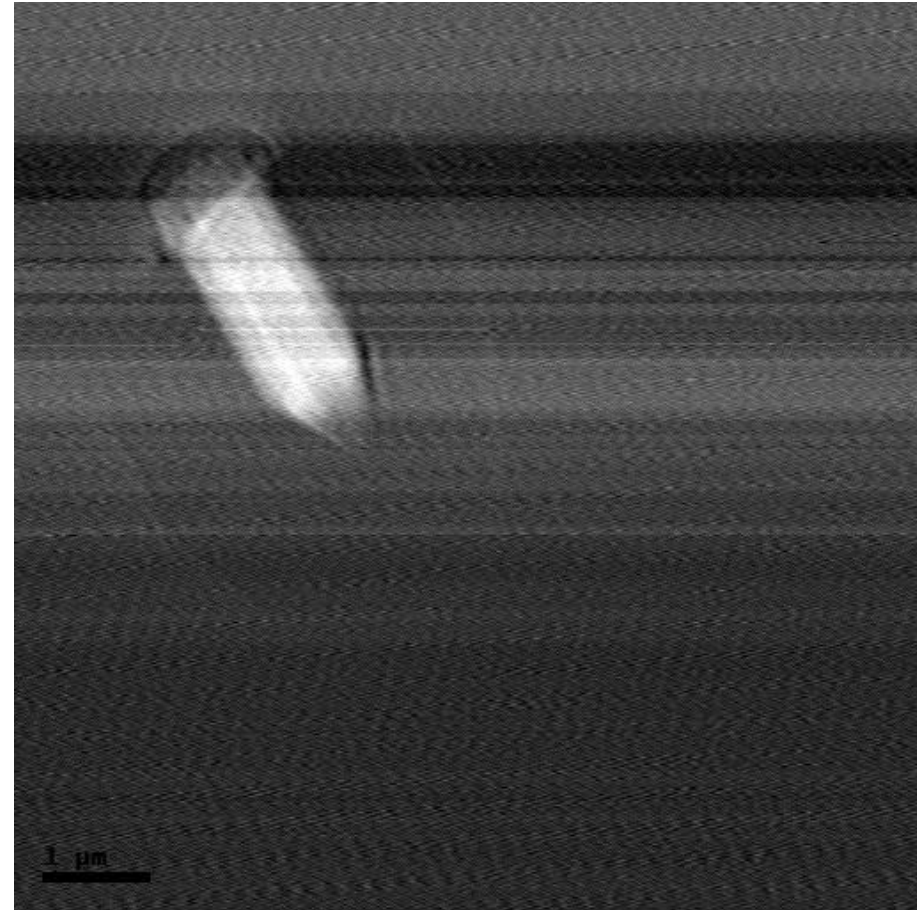
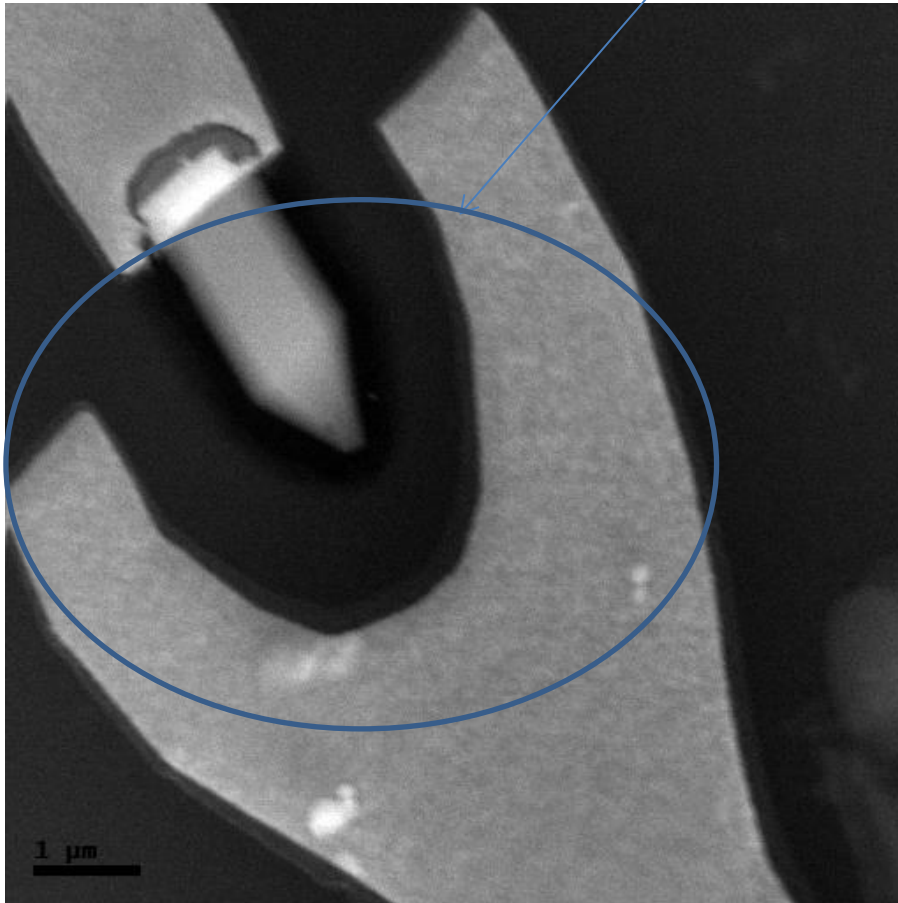
- SEM image



- EBIC image



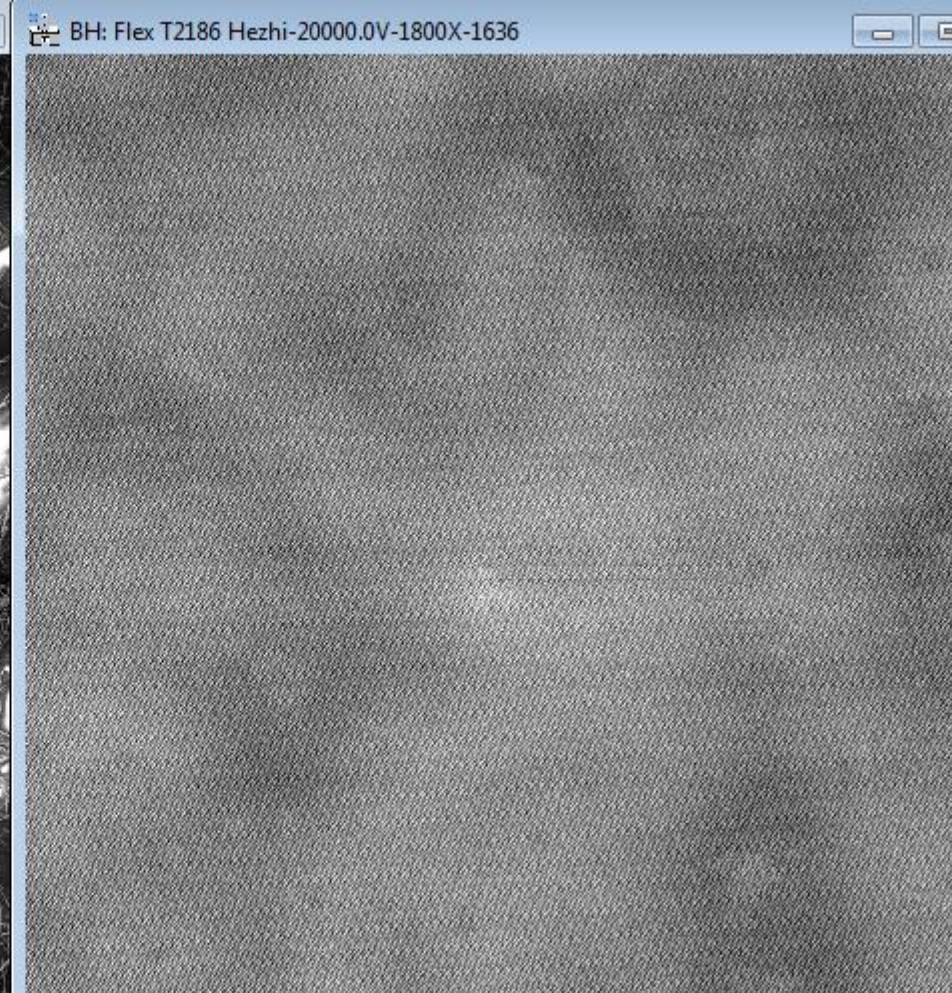
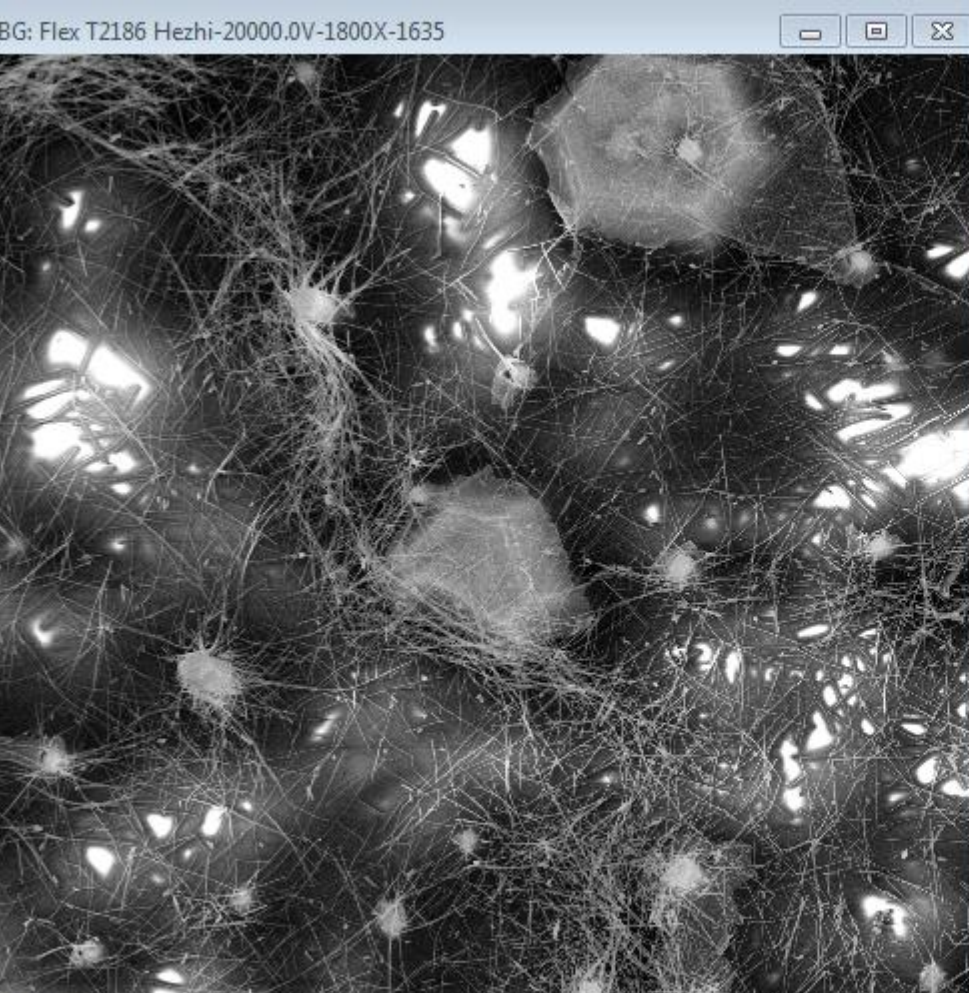
Electrode en Graphene



Pas visible sur l'image SE (contraste =sombre)

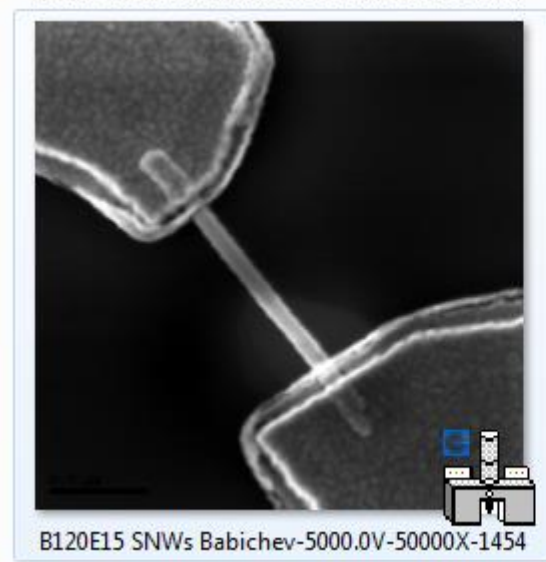
Electrodes flexibles

- Films Ag entre nanofils III-V



(Schottky même avec contact pads)

- → Polariser



Contact Schottky

- Contact Métal-Semi-Conducteur est Schottky (cf diagramme de bandes avec niveaux de Fermi constants de part et d'autre de la jonction, comme dans le cas de la jonction p-n)
- Sauf si on augmente \uparrow la surface de contact

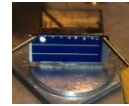
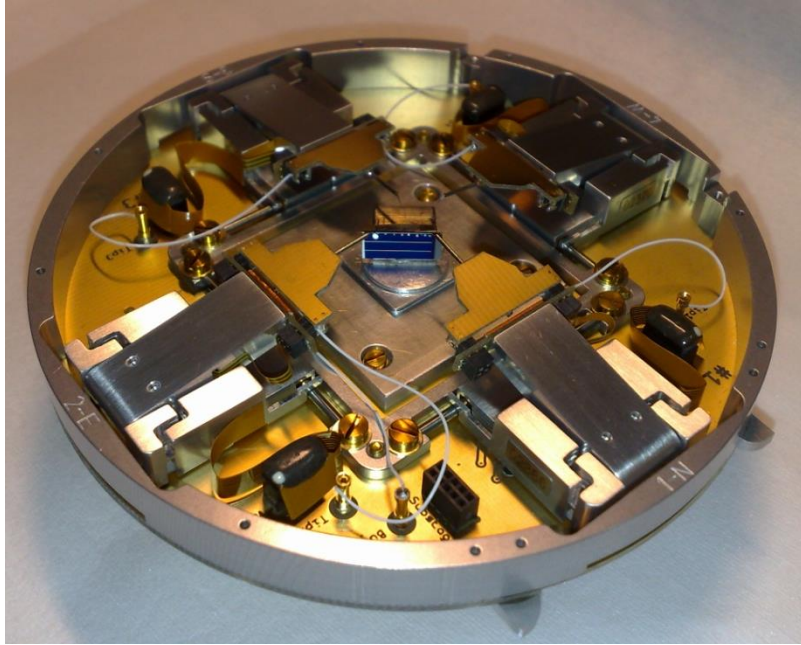
Obstacle: jonction Schottky pointe-nanofil

- Animation: comment évolue digramme de bandes des TI de solar cell quand on applique un bias: cas des III-V \rightarrow piezo à PQ (champ interne induit pente dans le diagramme au niveau des Puits de potentiel)

Comment éviter le contact Schottky?

- ↑ surface de contact
- Déposer une électrode métallique reliée au nanofil (dépôt-litho): cf images EBIC/SEM (Al/Ti côté p et Ni/Au... côté n: cf diagramme de bandes, thèse Photis et Slides Ezgui; idem pour les fils debout cœur-coquille)
- Déposer une goutte de laque Ag dans la zone à contacter: évite aussi de courber/abîmer/endommager les pointes lors des « atterrissages » brutals (cf photo pointe tordue) car milieu « mou » (soft)/surface ductile
- Ingénierie de bandes pour abaisser la barrière Schottky (ou **permuter les connexions des pointes au préampli**)
- Polariser (bias) pour s'affranchir de/surmonter/dépasser/éviter la barrière Schottky pointe-nanofil (exple sur nanofil InP/GaInP from Lunde où Gap différent → contact ohmique possible directement avec pointes, sans utiliser d'électrode)



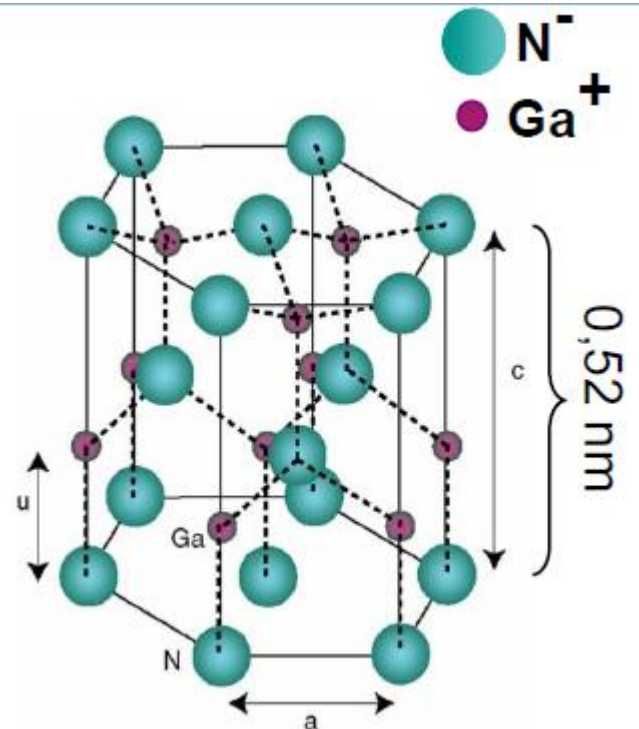


Comment savoir si on est contacté ?

- I-V trace est redresseuse
- Image EBIC for weak signal (fil unique où i-V est quasi linéaire)

Nanofil III-V à jonction radiale GaN/InGaN

- C'est un cristal piézo aussi ! Direction polaire: [0001] (cf schéma Jacopin)
- Signal dans l'image EBIC lié au champ interne du cristal piézo ?
- Pointes en regard: $R_c=100\text{nm}$



Contacter un nanofil en direct

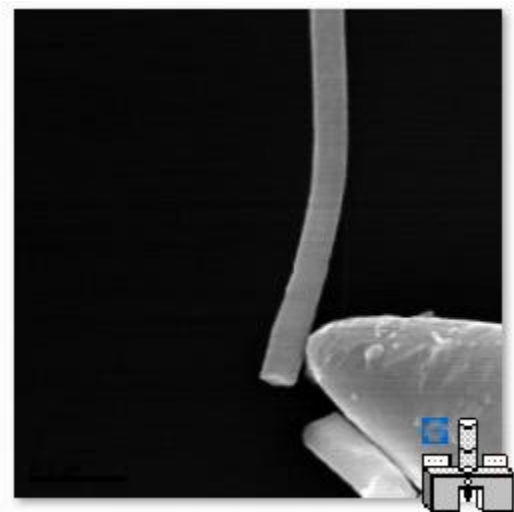
Vidéo du nokia à commenter et analyser oralement:
C:\Users\Fabien\Desktop\GATAN-Notice\pour-Notice-
EBIC\PS4-06-10-2015-nanofil InP-GaInP LUND-for-
GNMEBA\ 06102015249 et 06102015252

06102015255-contact-bas

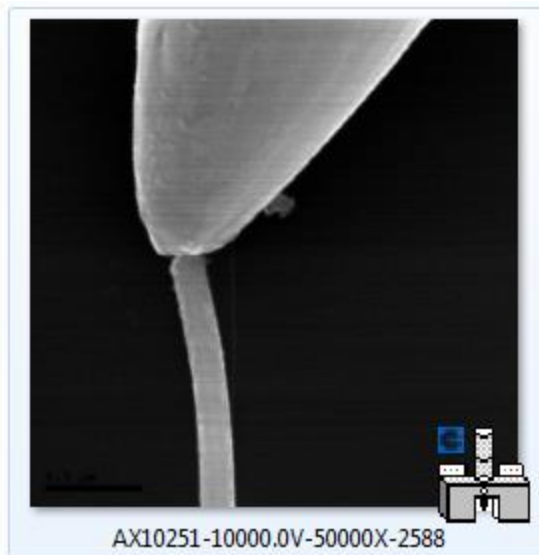
06102015253 et 06102015254 (à chaque fois on entend mouvement du joystick allant en bu
Cockpit recorder)

Images EBIC correspondantes où on verrait jonction Shottky avec la pointe et
Jonction p-n Au milieu du fil: sur 06102015256

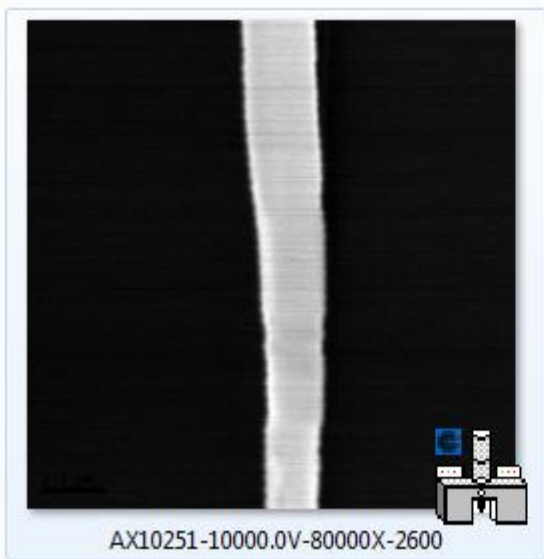
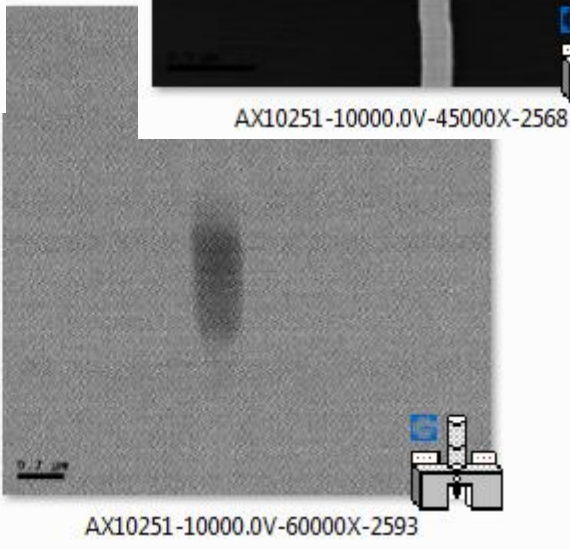
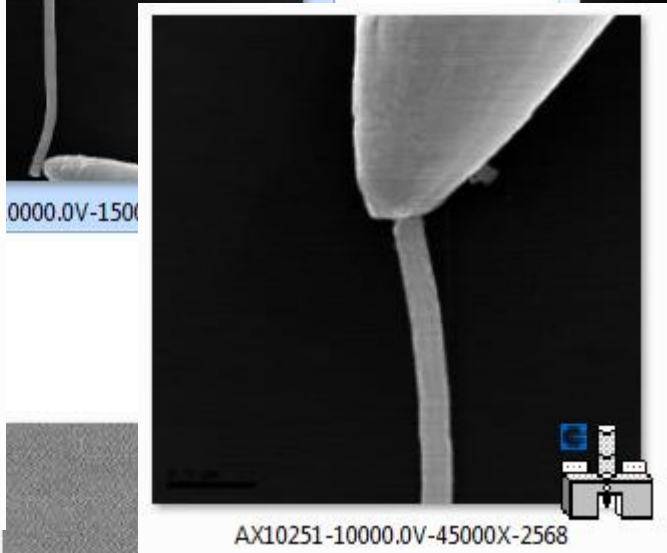
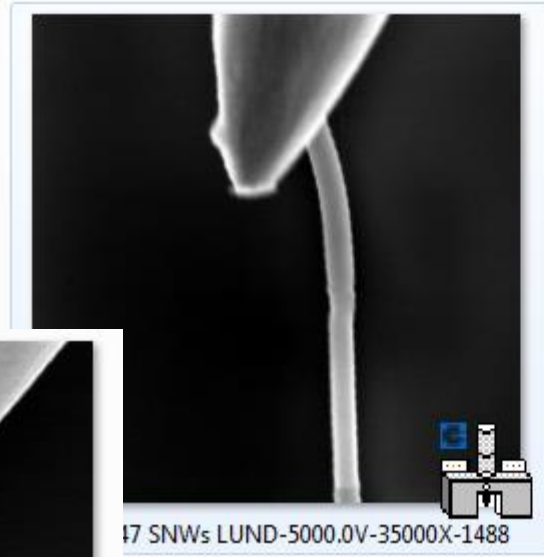
Puis 06102015257 et 06102015258



AX10251-10000.0V-50000X-2582



AX10251-10000.0V-50000X-2588



0000.0V-150000X-2568

17 SNWs LUND-5000.0V-35000X-1488

AX10247 SNWs LUND-5000.0V-35000X-1488

0000.0V-40000X-2625

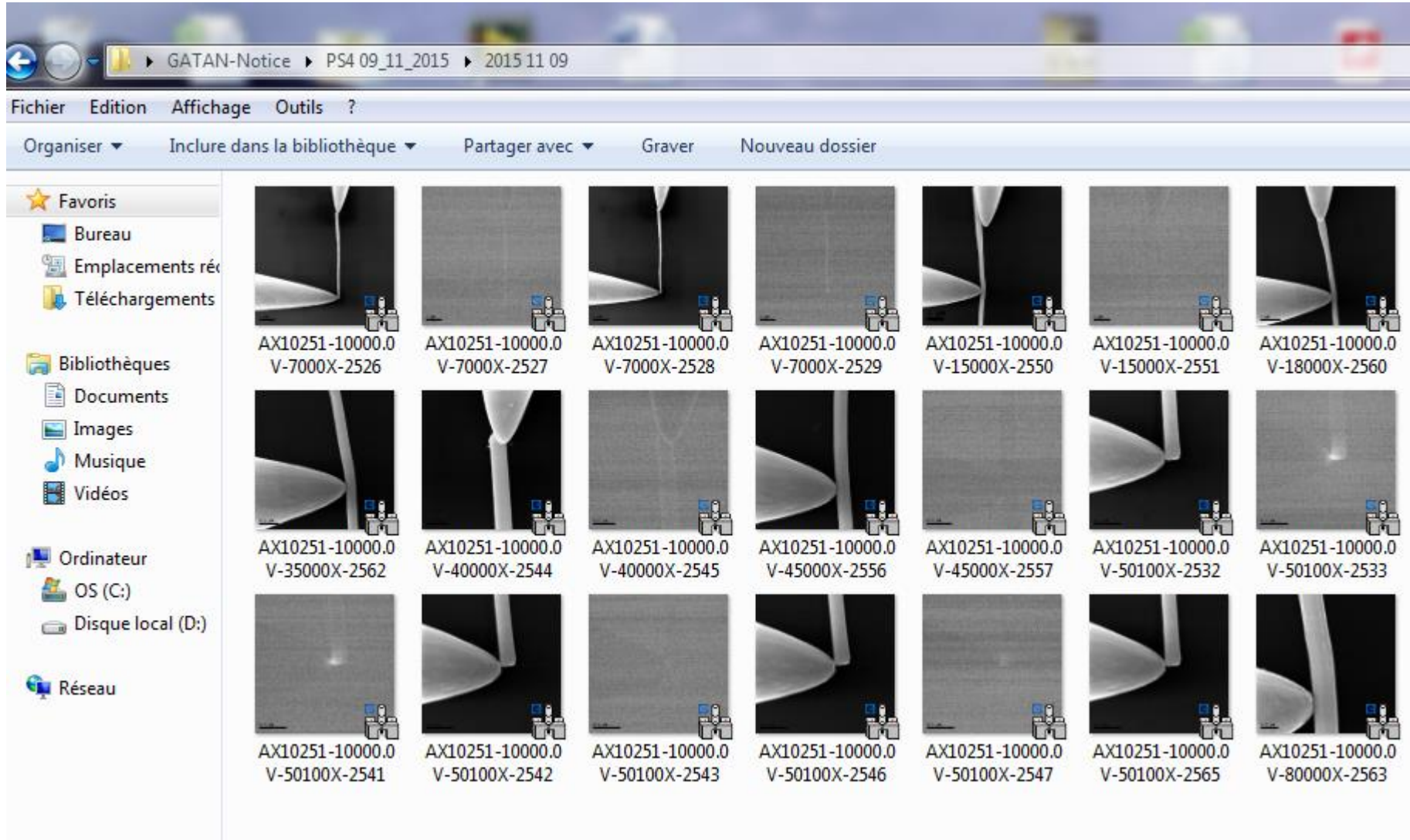
AX10251-10000.0V-45000X-2568

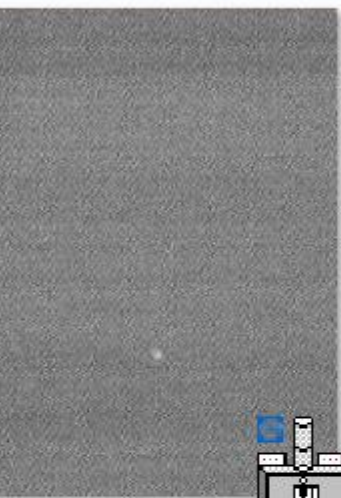
-60000X-2592

AX10251-10000.0V-60000X-2593

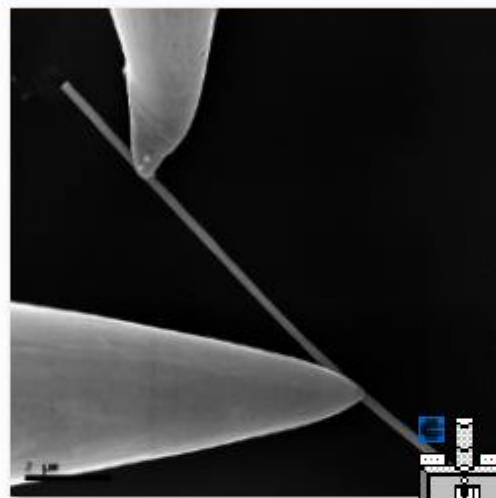
AX10251-10000.0V-80000X-2600

AX10251-

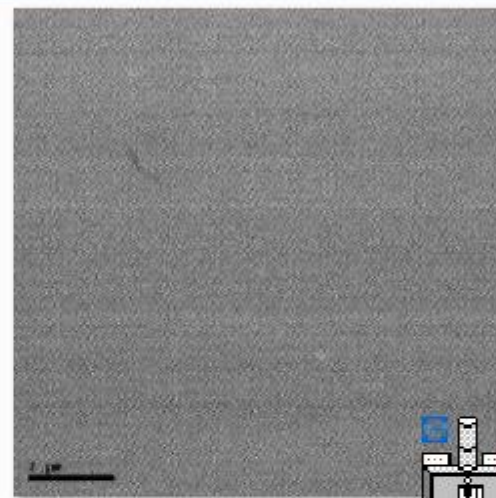




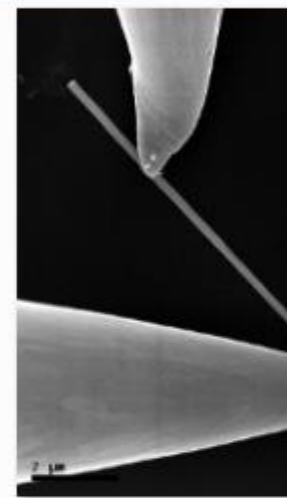
Lund AX10247 SNWs-10000.0V-11000X-1687



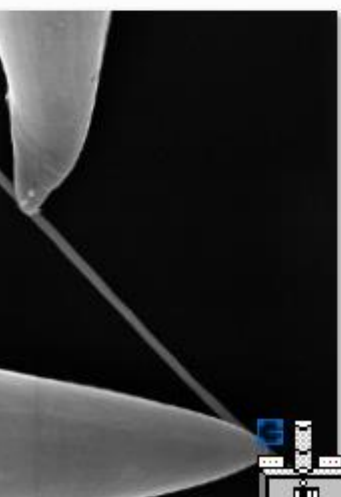
Lund AX10247 SNWs-10000.0V-11000X-1688



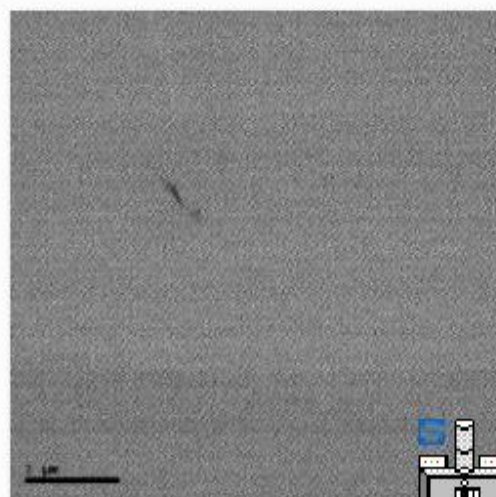
Lund AX10247 SNWs-10000.0V-11000X-1689



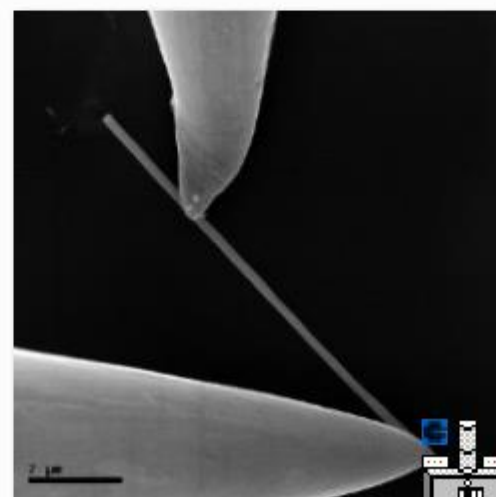
Lund AX10247 SNWs-10000.0V-11000X-1690



Lund AX10247 SNWs-10000.0V-12000X-1676



Lund AX10247 SNWs-10000.0V-12000X-1677



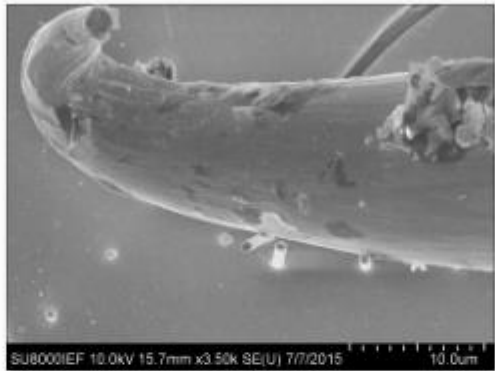
Lund AX10247 SNWs-10000.0V-12000X-1678



Lund AX10247 SNWs-10000.0V-12000X-1679

Clive in-situ du

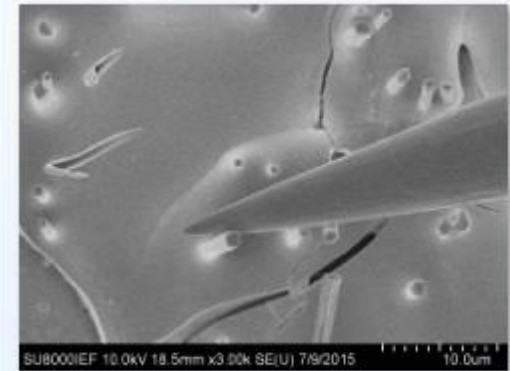
- Avec les pointes



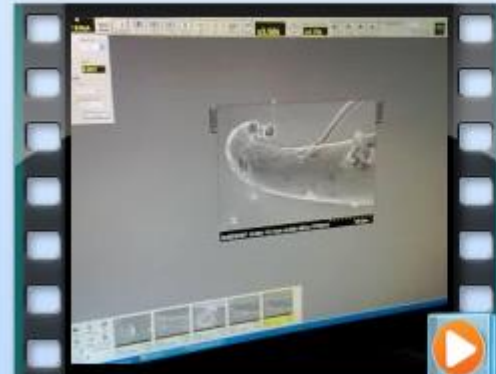
T2167 EBIC_i004



T2167 EBIC_i004



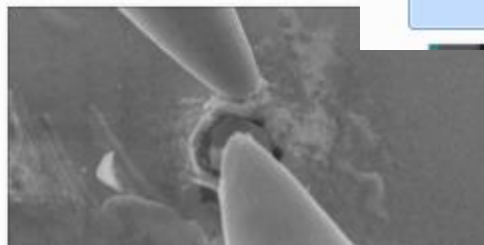
T2167 EBIC_i005



07072015219

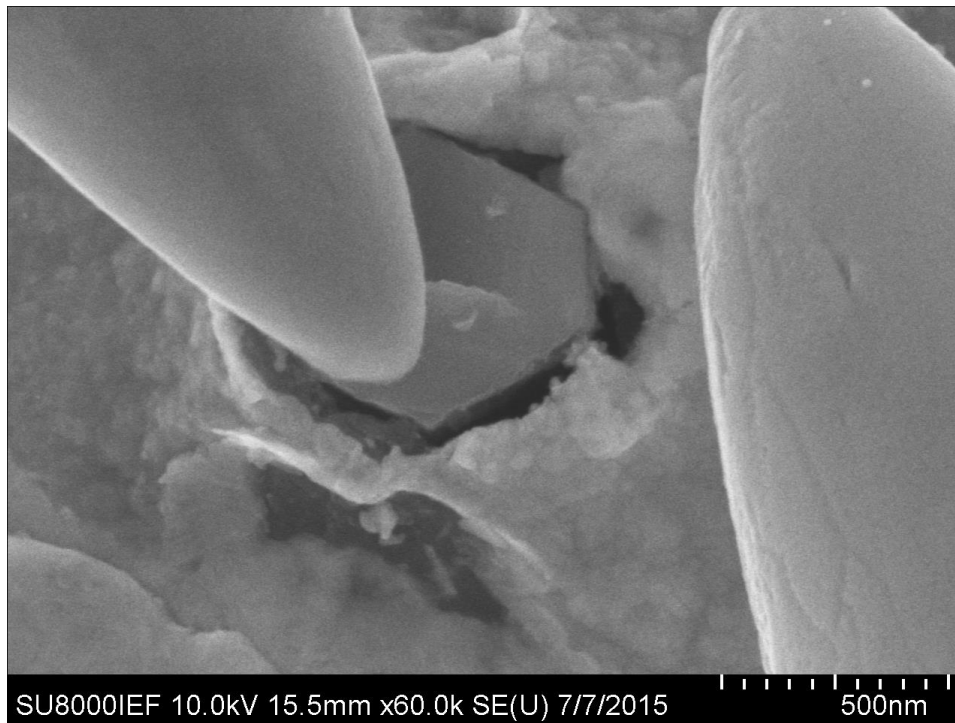


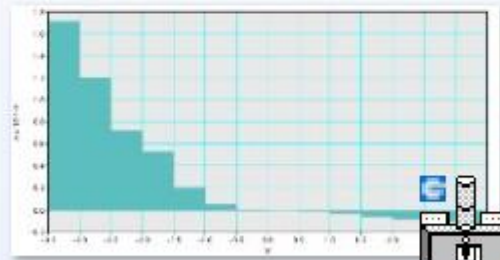
07072015219



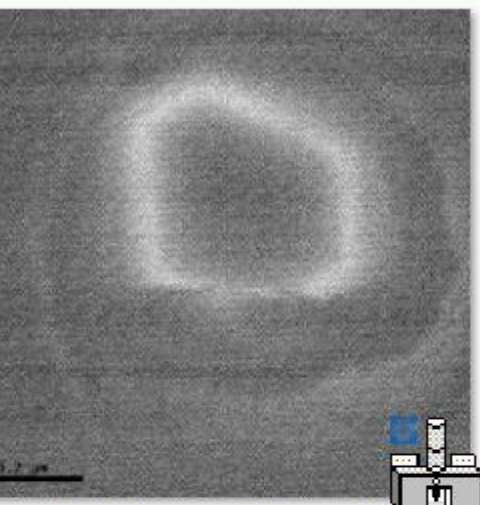
Contacter section transverse du fil

- Vidéo 07072015222 très instructive (aperçu des à-coups des manipulateurs lorsque amplitudes non optimisées, à recouper car trop long en intégralité)

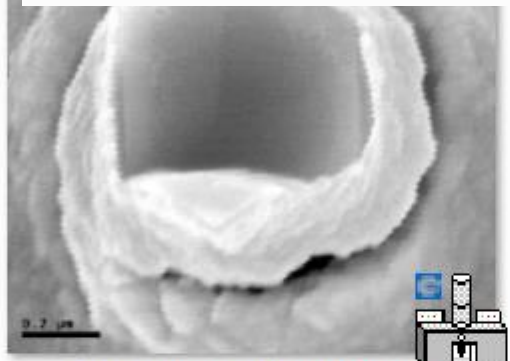




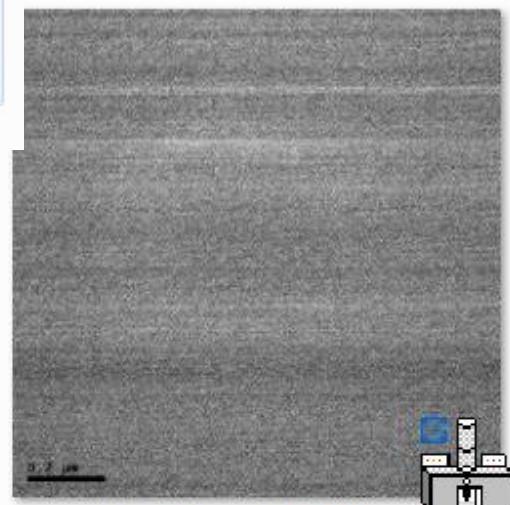
Unknown specimen-Unknown voltageV-0X-1068



T2167 EBIC-5000.0V-110000X-1082



T2167 EBIC-10000.0V-100000X-1073



T2167 EBIC-10000.0V-100000X-1074



T2167 EBIC-10000.0V-100000X-1075

