

Mesures électriques HF et microscopie à sonde locale sous MEB

M. BERTHE

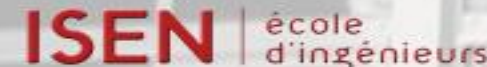
maxime.berthe@isen.fr



Journées pédagogiques du GN-MEBA, 01/12/2015



ANR-11-EQPX-0015_EXCELSIOR





5 PLATEFORMES TECHNIQUES

- ◆ **Micro Nano Fabrication (1600m²)**
- ◆ **HF and MEMS/NEMS Characterization**
- ◆ **Scanning Probe Microscopy**
- ◆ **Telecom**
- ◆ **Electro-Magnetic Compatibility**



Dimension



ANR-11-EQPX-0015_EXCELSIOR

HF and MEMS/NEMS Charact. Platform

Mesures électriques
Fréquences : DC - IR
Dimensions : cm - μm



NCC : Nanoscience Characterization Center

Scanning Probe Microscopy Platform

Imagerie et mesures physiques
Dimensions : Å - μm
Fréquences : DC - kHz



Equipex Excelsior

Imagerie et mesures physiques
Dimensions : Å - μm
Fréquences : DC - IR



Fréquence

Caractérisation de composants HF en Nano-électronique

*La prochaine génération de nano-composants dépendra de notre capacité à mesurer de façon **fiable et reproductible** les propriétés et performances de ceux-ci à l'échelle nanométrique sur une large gamme de fréquences.*

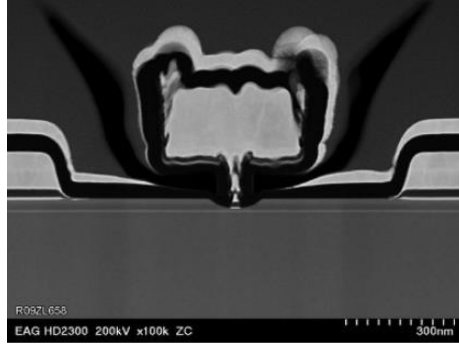
- Proposer une modélisation robuste pour le design de circuits et systèmes
- Offrir un retour pour les développements technologiques.
- Améliorer la connaissance des propriétés de nouveaux matériaux/composants intégrés dans des technologies complexes.

PLAN

- ❑ Mesures Haute Fréquence à l'échelle nanométrique :
Mesurer quoi? Comment?
- ❑ Notre approche expérimentale
 - ❑ Le Nanoprobe : connecter en toutes conditions
 - ❑ L'AFM sous SEM : mesures multi-physiques localisées
 - ❑ Le Nano-prober HF : caractérisation des nano-composants électroniques
- ❑ Conclusion et Perspectives

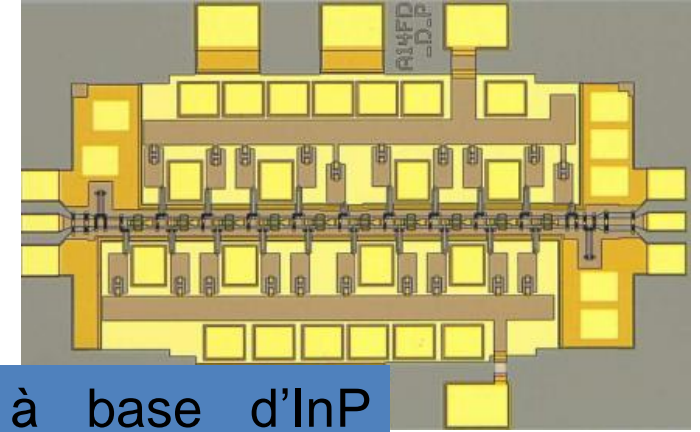
Nano-caractérisation haute fréquence : Quels composants?

Technologies III-V



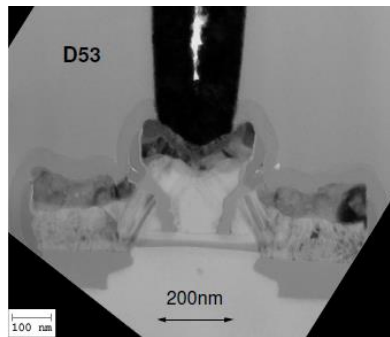
Northrop Grumman Corporation
*IEEE Trans. on Terahertz Science And
Technology, Vol. 1, N° 1, Sept. 2011*

Lgate=30nm
CPW pitch: 30μm



❑ Les technologies à base d'InP s'adressent à l'intégration dans des circuits et systems fonctionnant jusqu'à **670 GHz** ($\sim 0.6 \times f_{max}$)

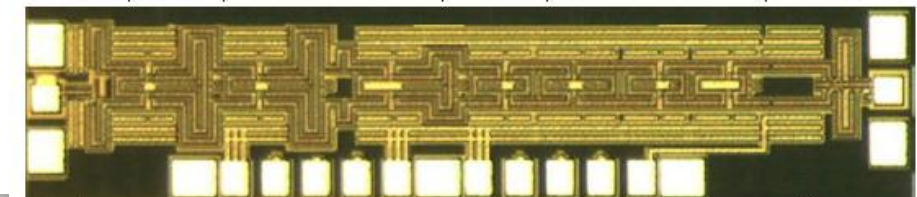
Technologies Silicium



heinemann@ihp-microelectronics.com
IEEE Proc. of IEDM, 2010

❑ Technologies 0.13μm SiGe HBT :
fT/fmax ~ 300GHz/500GHz

Diff. Conv. 54GHz Tripler 54GHz PA 162GHz Tripler 162GHz PA 325GHz Doubler



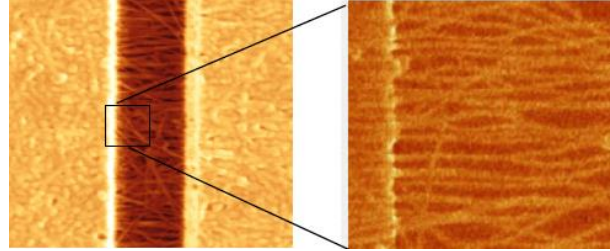
18GHz Input

DC-Bias

325GHz Output

Nano-caractérisation haute fréquence : Quels composants?

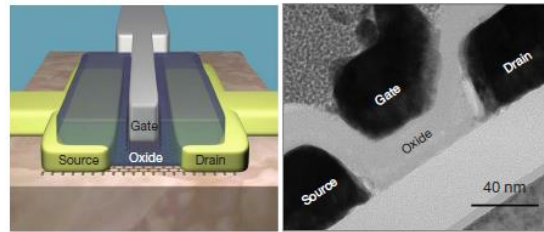
Technologies organiques,
matériaux 1D & 2D



IEMN – CEA IRAMIS
Appl. Phys. Lett. 94, 243505 (2009)

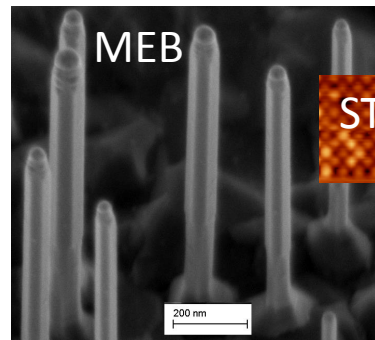
❑ Transistors HF à base de SWCNT :
 $f_T = 80\text{GHz}$.

$D_{\text{CNT}} \sim 1\text{nm}$



IBM Thomas J. Watson Research Center,
Yorktown Heights, New York 10598, USA.
Nature, vol 472, 7 avril 2011

❑ Transistors HF à base de Graphene (CVD) :
 $f_T = 155\text{GHz}$.



STM

Y. Makoudi, IEMN Physique

Nanofil InAsSb 35 x 4.5 nm²

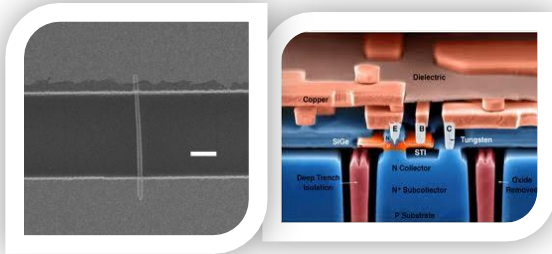
❑ Dynamique du transport de charge dans les
matériaux 1D et 2D :
 $1\mu\text{s} < T < 100\text{fs}$.

Nano-caractérisation haute fréquence : comment mesurer une nanostructure?

1. Size Mismatch



≠



En HF, les instruments opèrent à des longueurs d'onde cm & mm...

Cables, sondes, etc sont gigantesques par rapport à ...

...des DUT (device under test) de taille nanométrique.

Paramètres électriques intrinsèques des nano-composants

Quantum de résistance: h/e^2

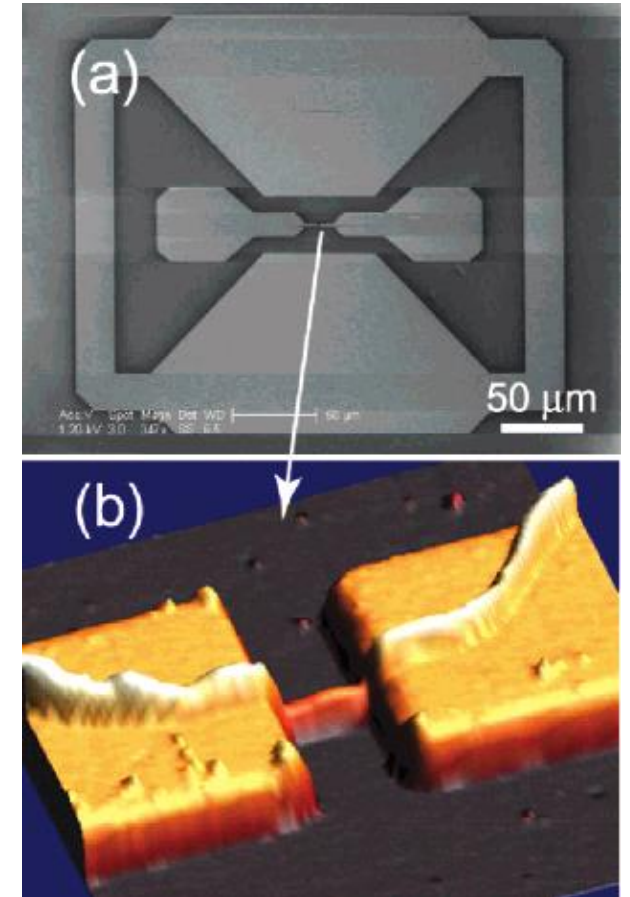
$\approx 26 \text{ k}\Omega$

Capacitance

$\approx 1 \text{ aF} - 100\text{aF}$

2. Electrical Mismatch

Plus le système est gros, plus il y a de résistances et de capacités parasites, d'incertitudes, de bruit.



NANO LETTERS
2008 Vol. 8, No. 1 152-156 Duke University

3. Localization of DUT

PLAN

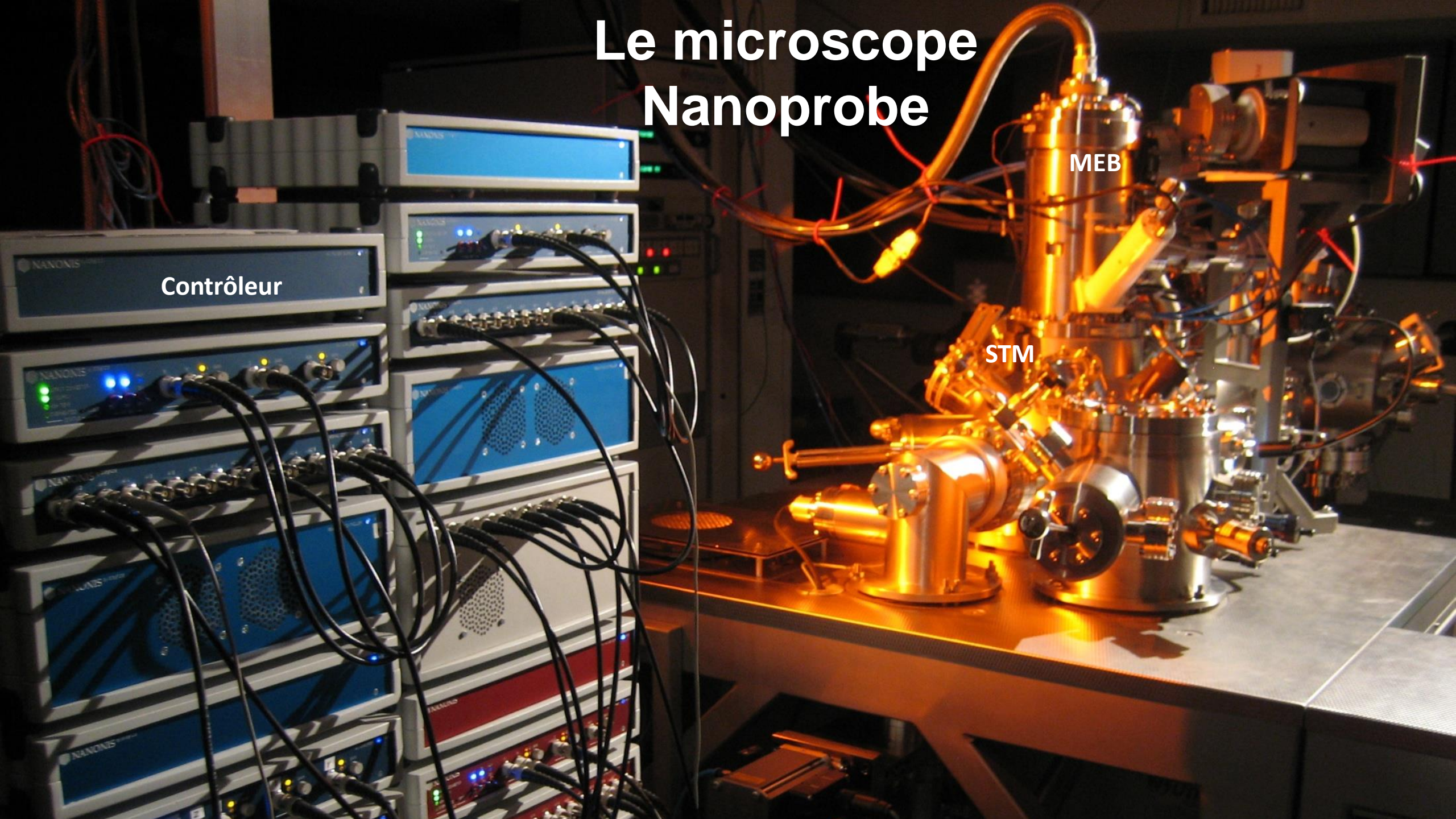
- ❑ Mesures Haute Fréquence à l'échelle nanométrique :
Mesurer quoi? Comment?
- ❑ Notre approche expérimentale
 - ❑ Le Nanoprobe : connecter en toutes conditions
 - ❑ L'AFM sous SEM : mesures multi-physiques localisées
 - ❑ Le Nano-prober HF : caractérisation des nano-composants électroniques
- ❑ Conclusion et Perspectives

Le microscope Nanoprobe

Contrôleur

MEB

STM



Le Nanoprobe

Sur l'écran : les sondes sont manipulées à la souris pour une meilleure précision

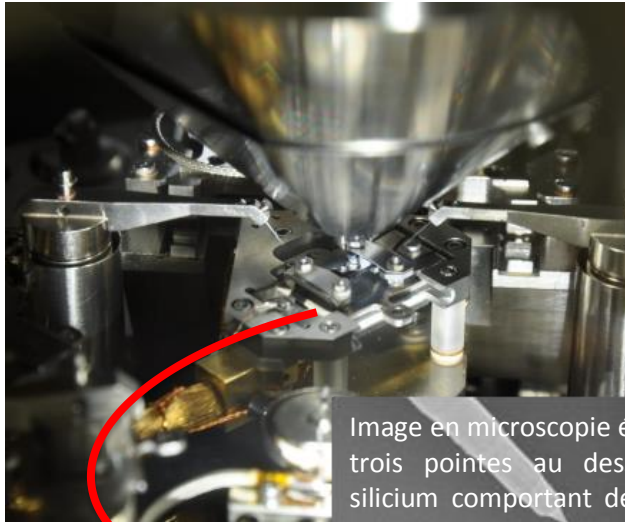
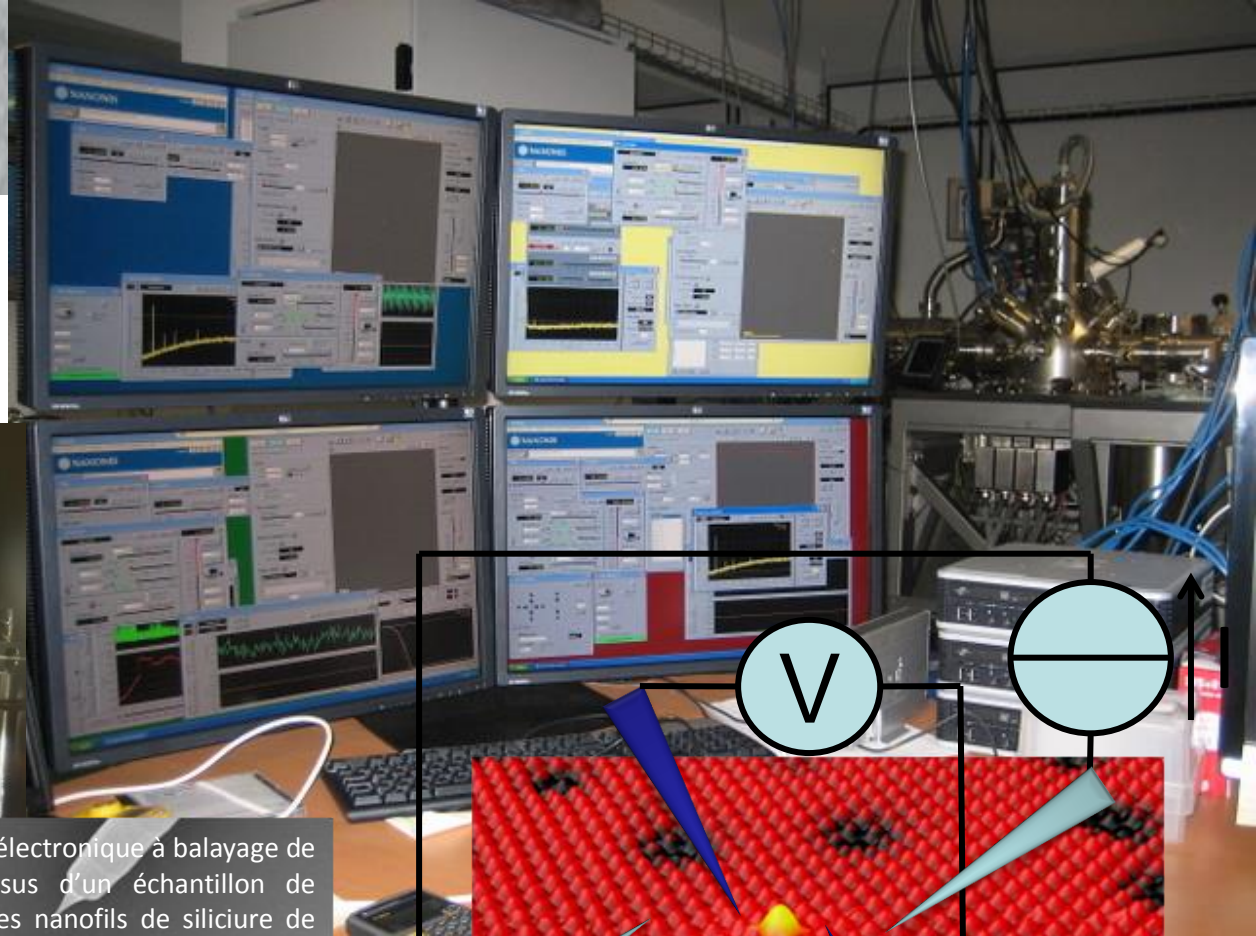


Image en microscopie électronique à balayage de trois pointes au dessus d'un échantillon de silicium comportant des nanofils de siliciure de platine

- 2 instruments difficiles à combiner :
- STM : compact, besoin d'isolation
- MEB : volumineux, besoin de couplage

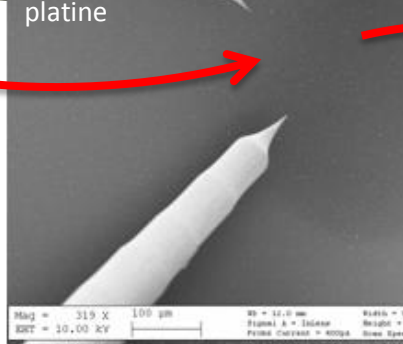
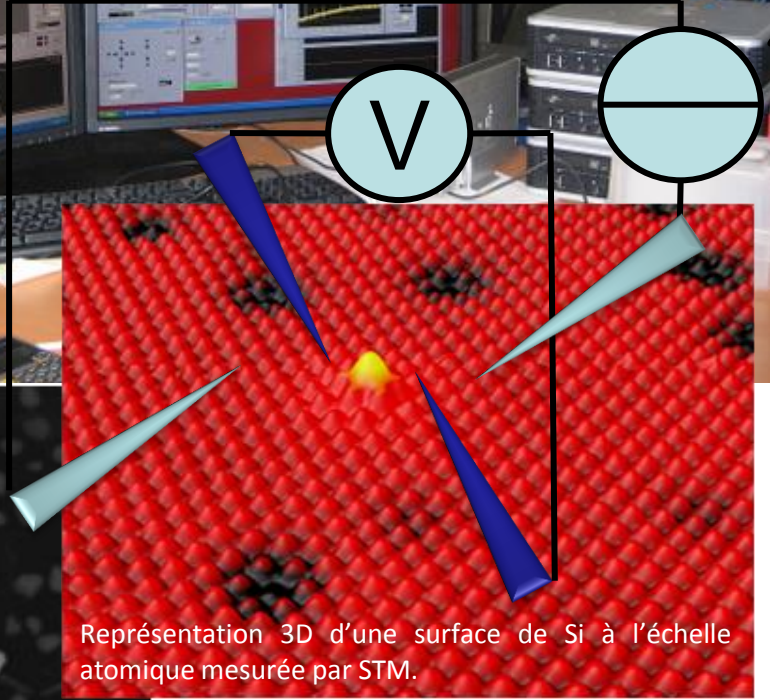
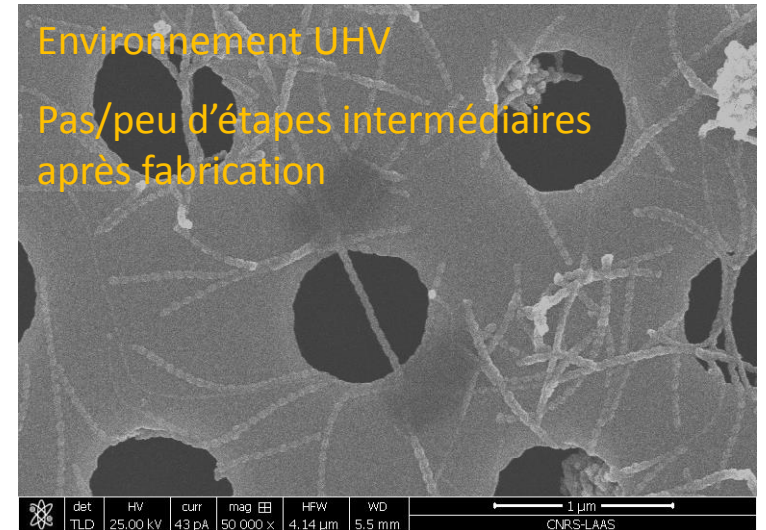
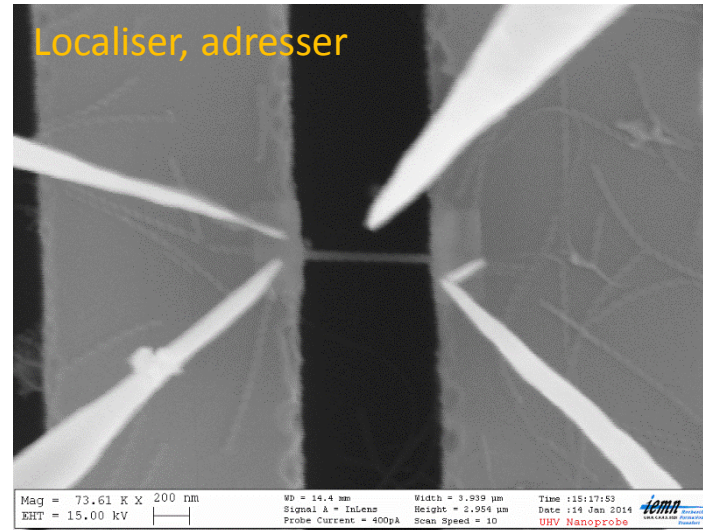
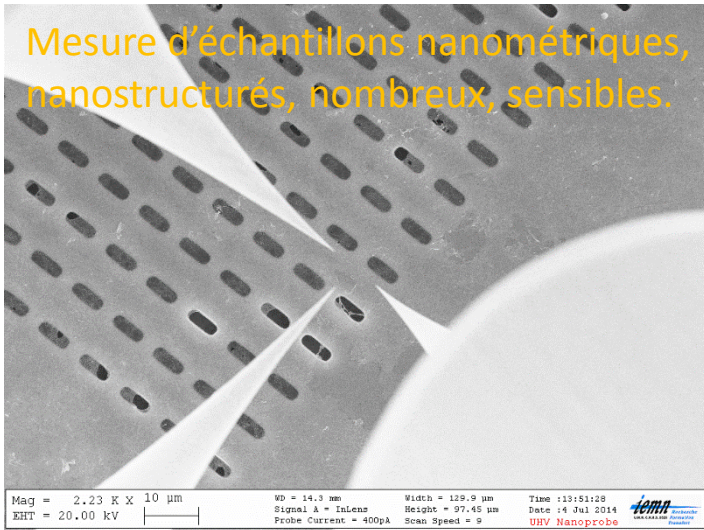
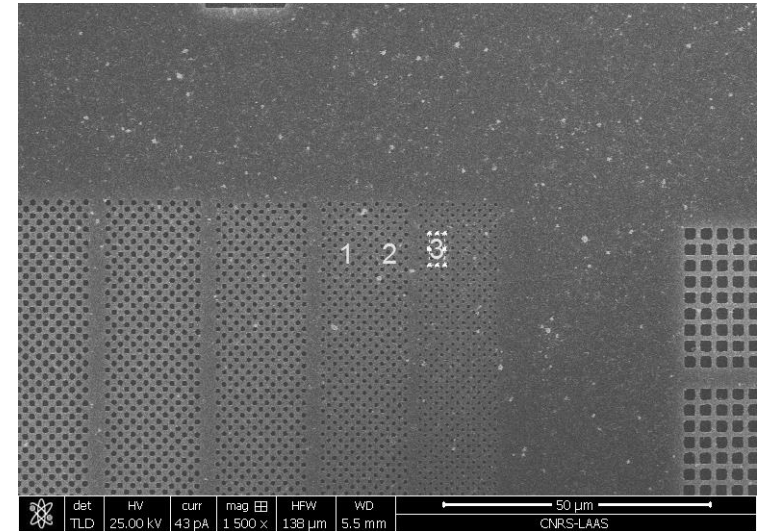
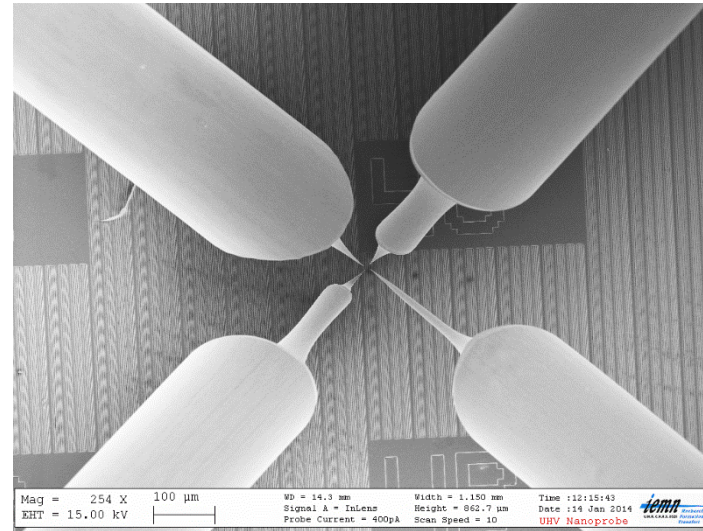


Image MEB de deux pointes connectées à un nanofil de PtSi. Distance pointe-pointe = 800nm.



Représentation 3D d'une surface de Si à l'échelle atomique mesurée par STM.

Le Nanoprobe



Le Nanoprobe : Caractéristiques MEB

Beam Voltage

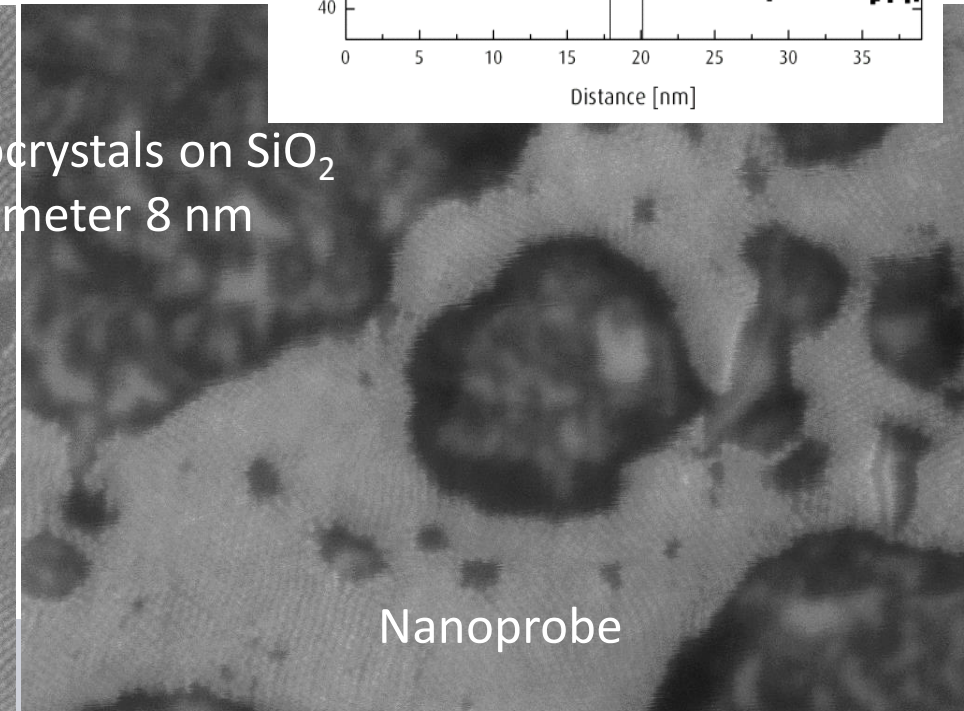
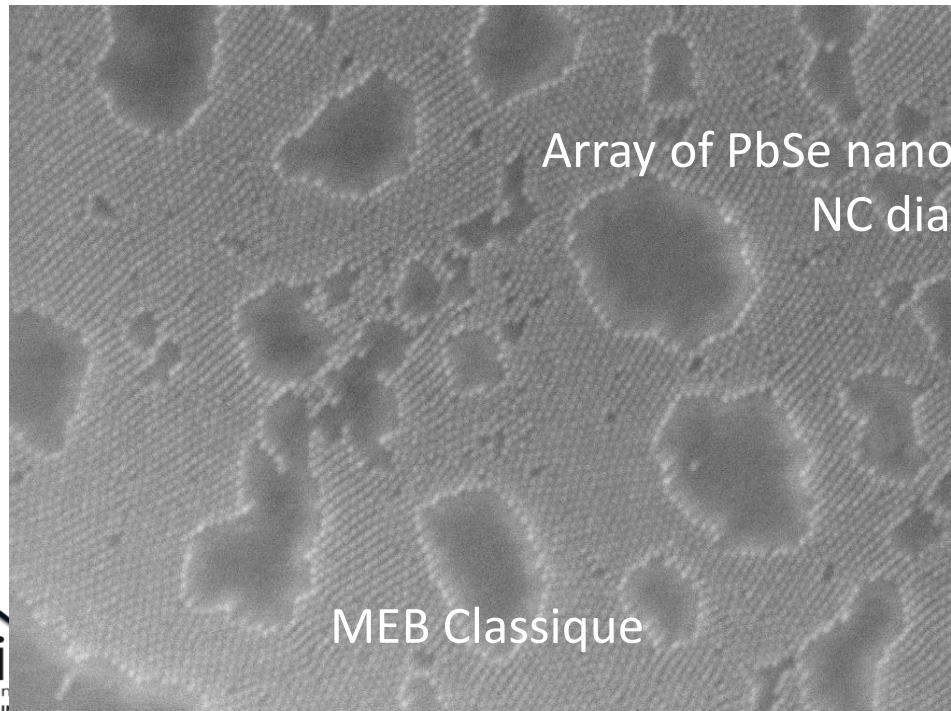
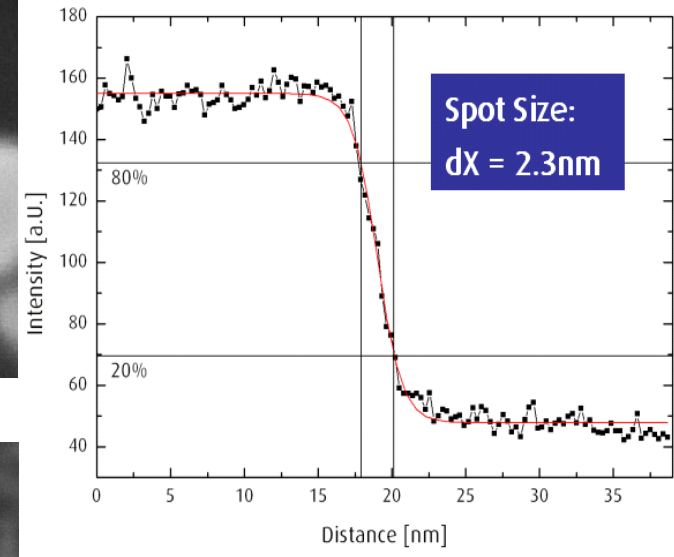
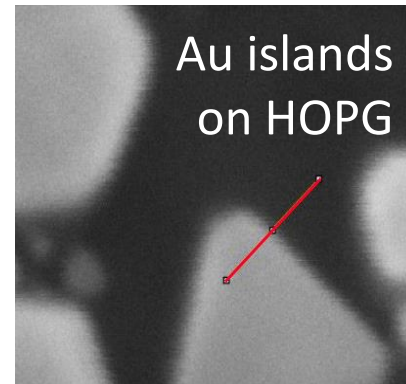
- max. 30 kV
- min 0.1 kV

Beam Current

- 10 pA to 10 nA
- 1 nA into < 10 nm at 1 keV

Working distance*

- 8 mm standard
- up to 15 mm with ≤ 6 nm resolution



100 nm EHT = 10.00 kV Signal A = InLens Signal = 1.000 WD = 2.7 mm
Grand. = 125.00 K X Signal B = SE2 Mixage = Off Platine: 1 = 0.0°

iemn

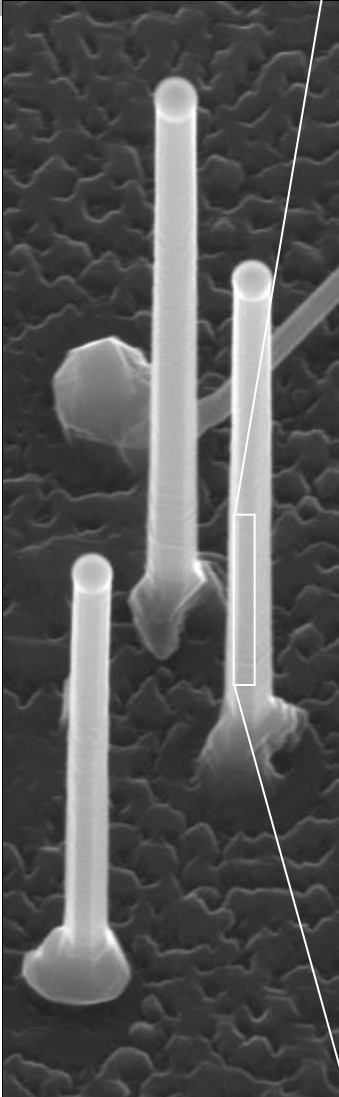
Mag = 300.00 K X 100 nm
EHT = 15.00 kV

WD = 14.6 mm Width = 966.5 mm
Signal A = InLens Height = 724.9 mm
Probe Current = 1.5nA Scan Speed = 14

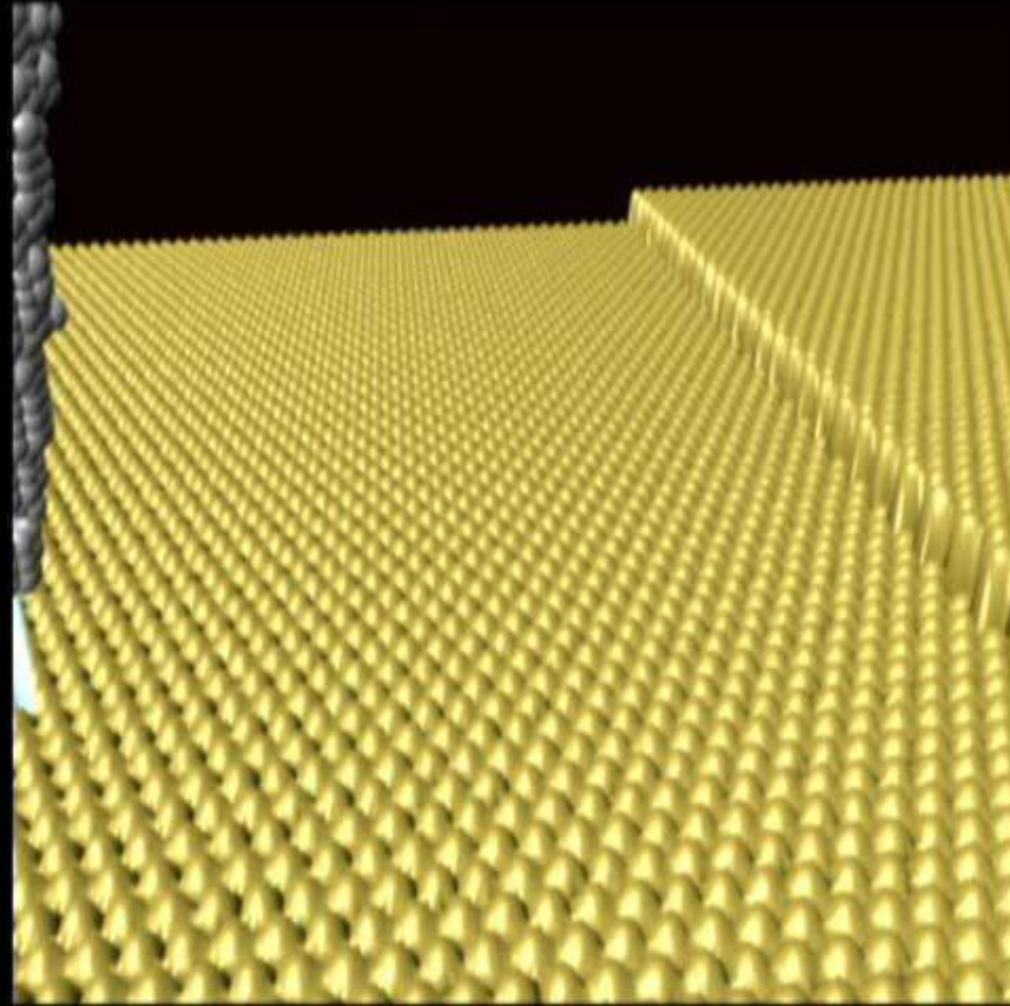
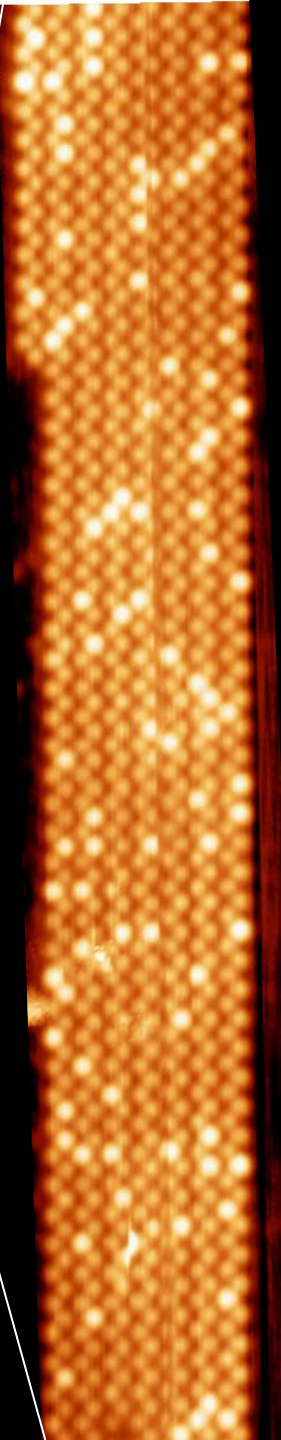
Time : 6:14:20
Date : 9 Dec 2009

Omicron
HHV Nanoprobe

LE NANOPROBE : Caractéristiques STM

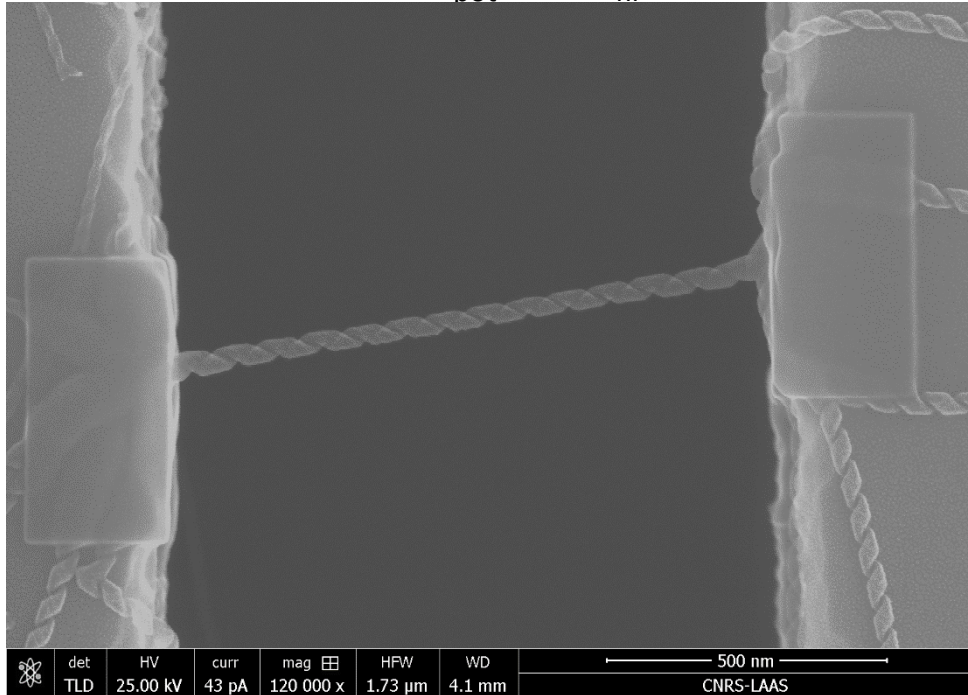


Nanofils



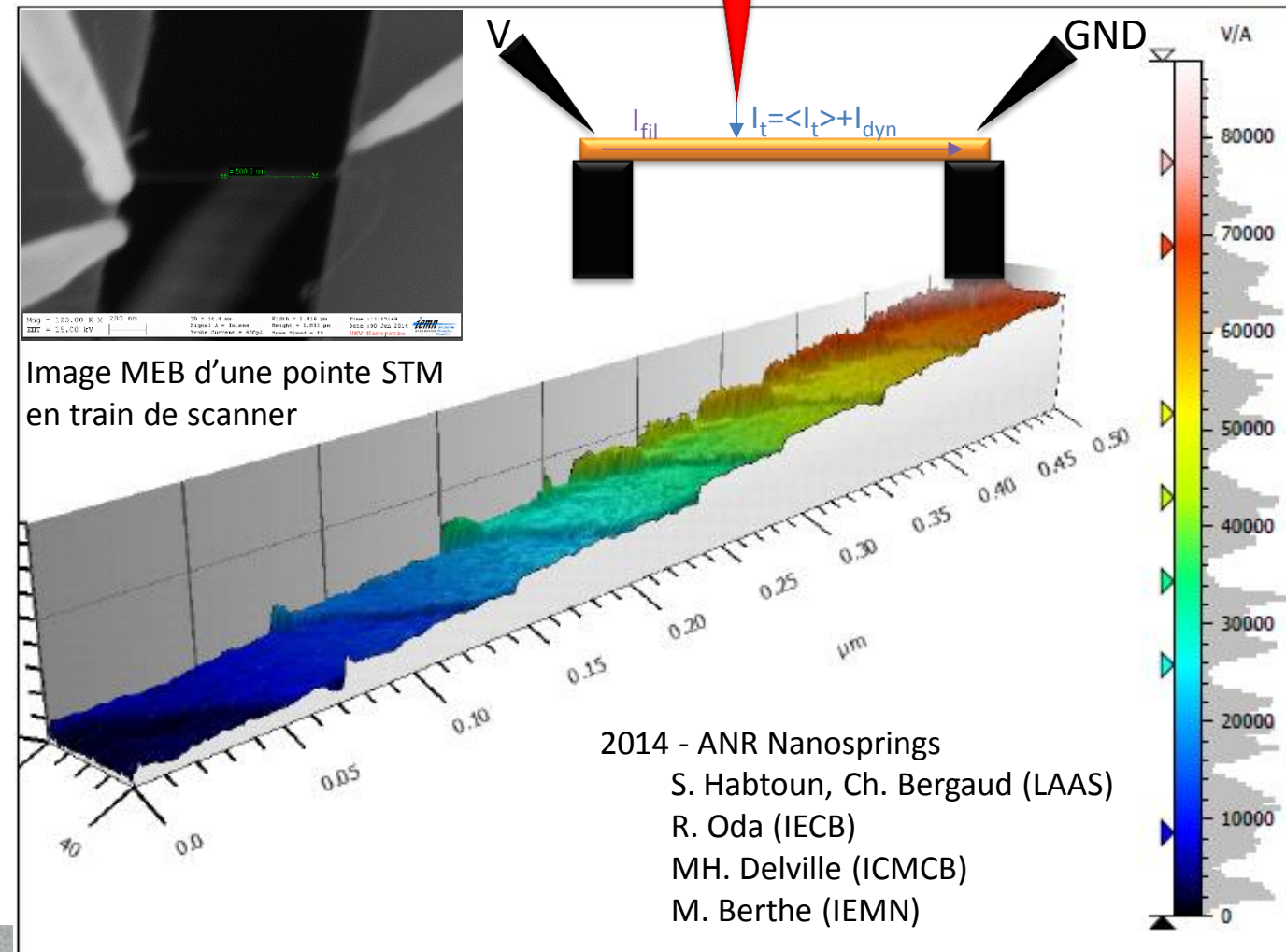
Le Nanoprobe, Exemple 1 : Mapping électrique de structures hélicoïdales suspendues

Dans cette structure 1D, on mesure directement $R(X,Y) = V_{\text{pot}}(X,Y)/I_{\text{fil}}$

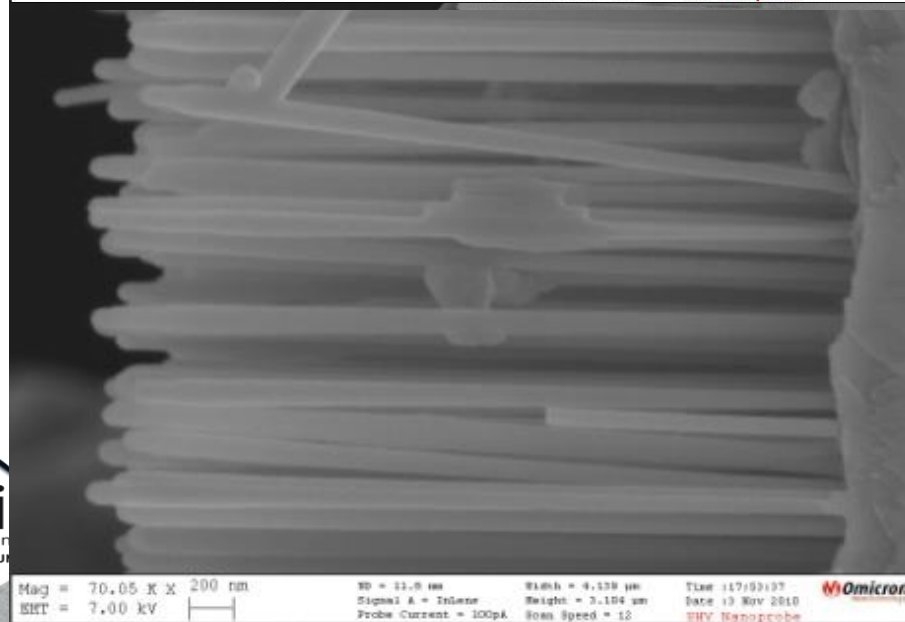
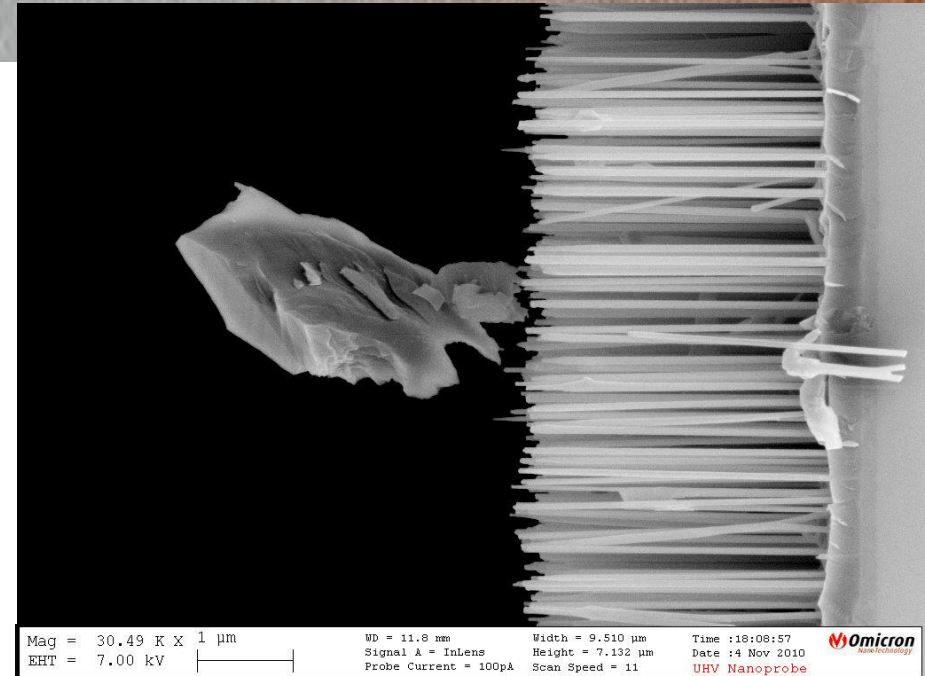
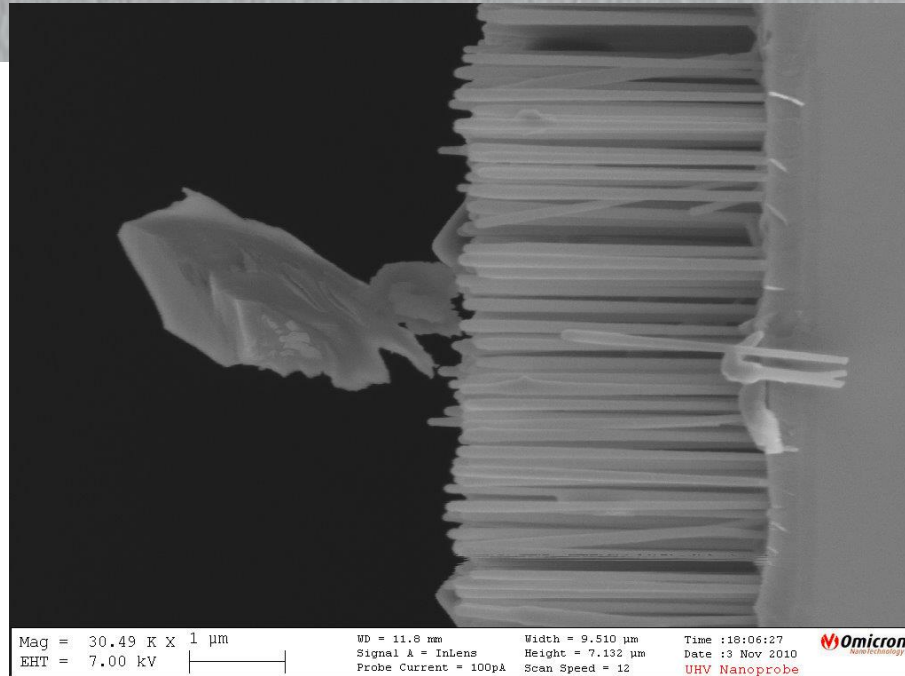


On peut remonter aux paramètres physiques de chaque spire (épaisseur, longueur) en mesurant la pente et les sauts de $R(X,Y)$.

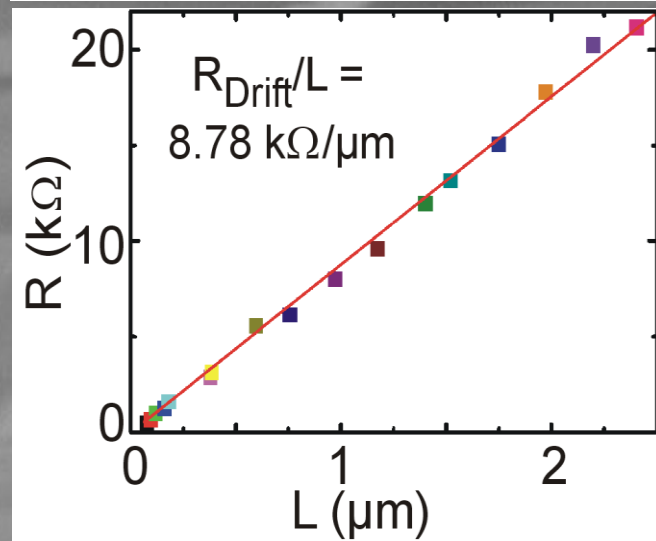
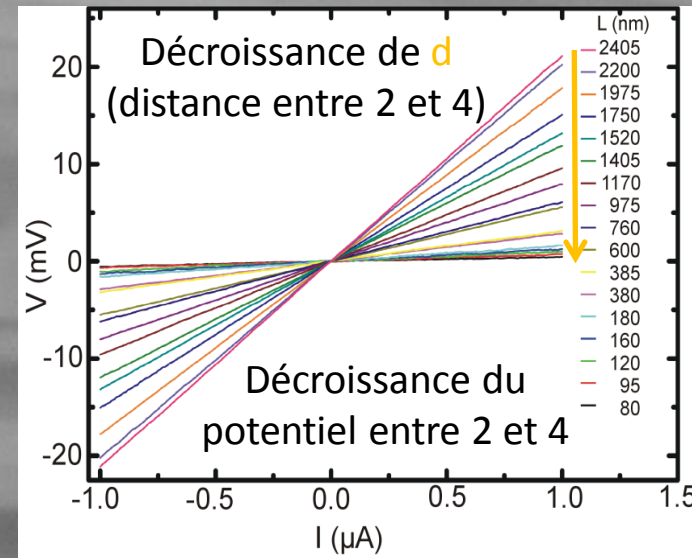
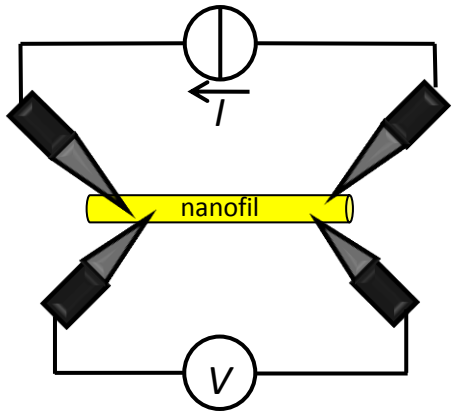
$$V_t(X,Y) = V_{\text{pot}}(X,Y, \langle I_t \rangle = 0)$$



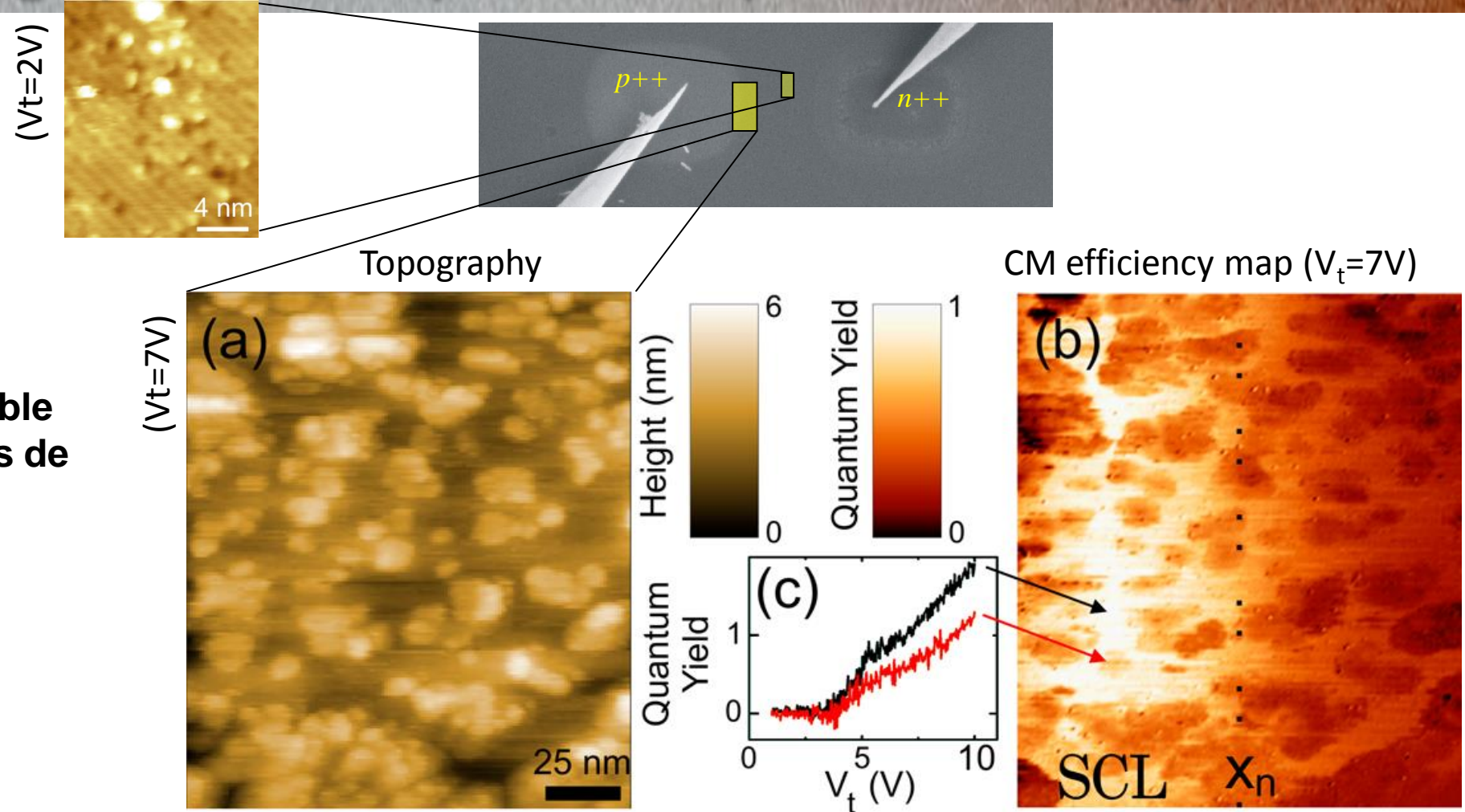
Le Nanoprobe, exemple 2 : mesure de nanofils InAs



Le Nanoprobe, exemple 2 : mesure de nanofils InAs



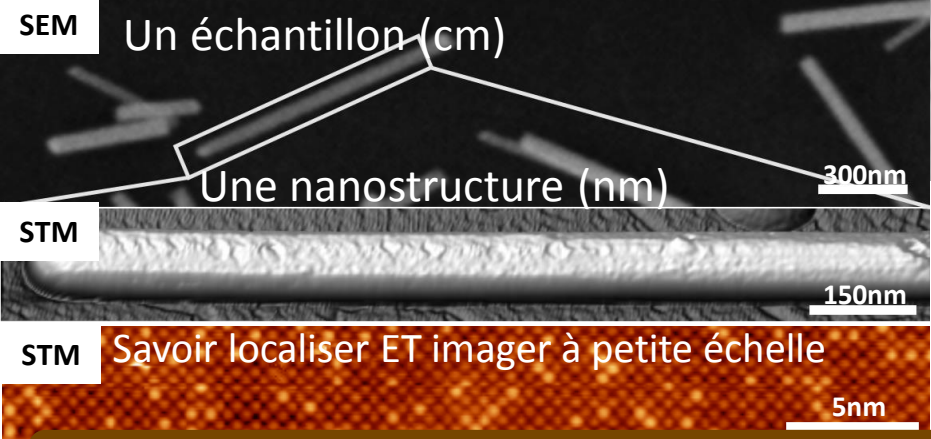
Le Nanoprobe, exemple 3 : Cartographie de multiplication de porteurs de charge



Le MEB est indispensable pour localiser les zones de dopage ainsi que les jonctions pour pouvoir positionner les pointes

Plus grand rendement sur les zones propres et bien ordonnées.

Le Nanoprobe



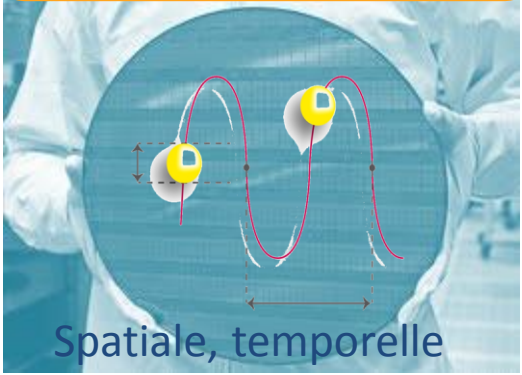
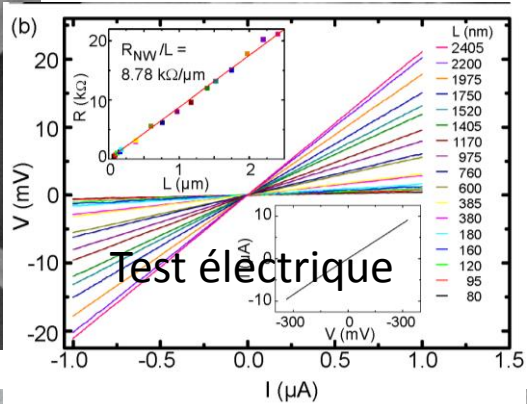
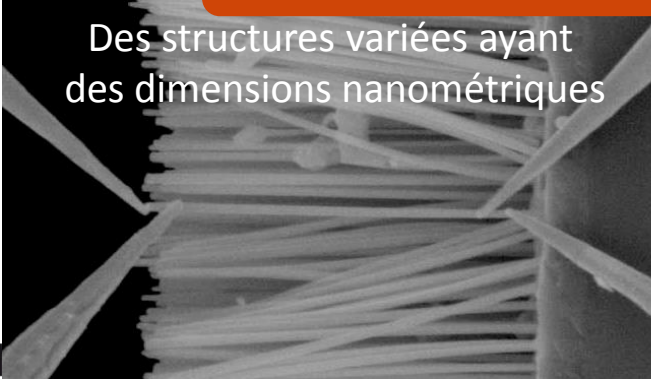
Localisation
Imagerie
Test
Dynamique

OBSERVER/MANIPULER



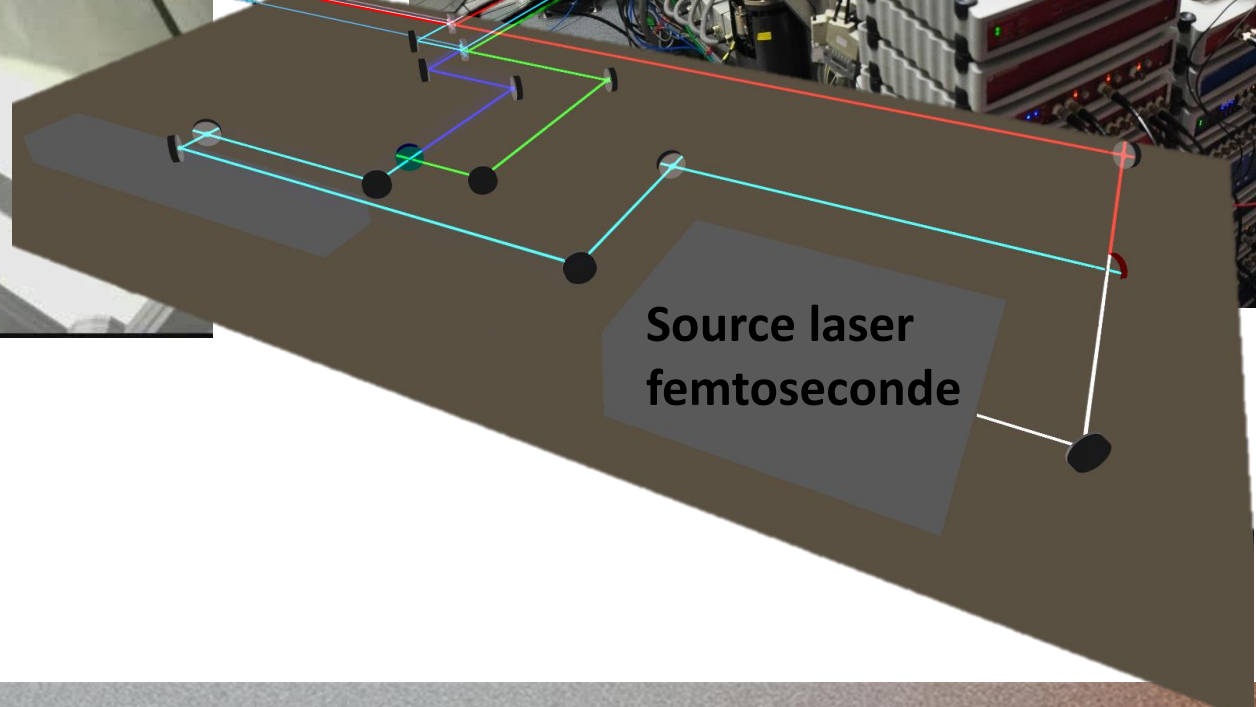
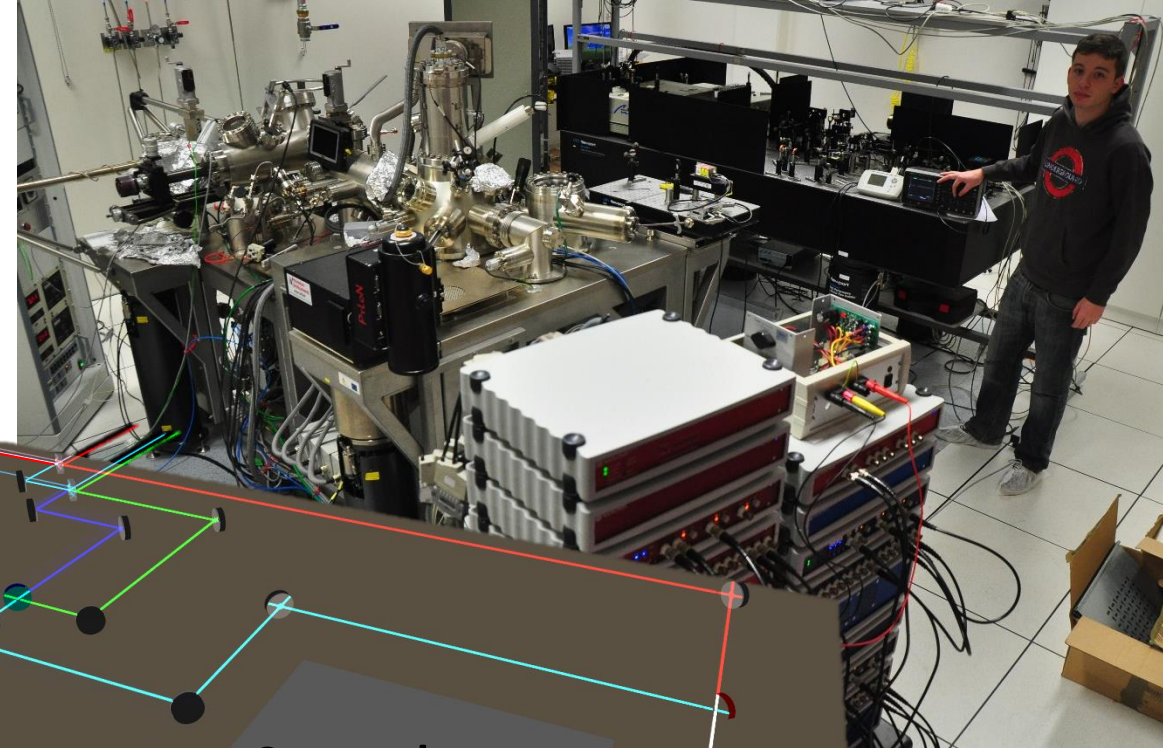
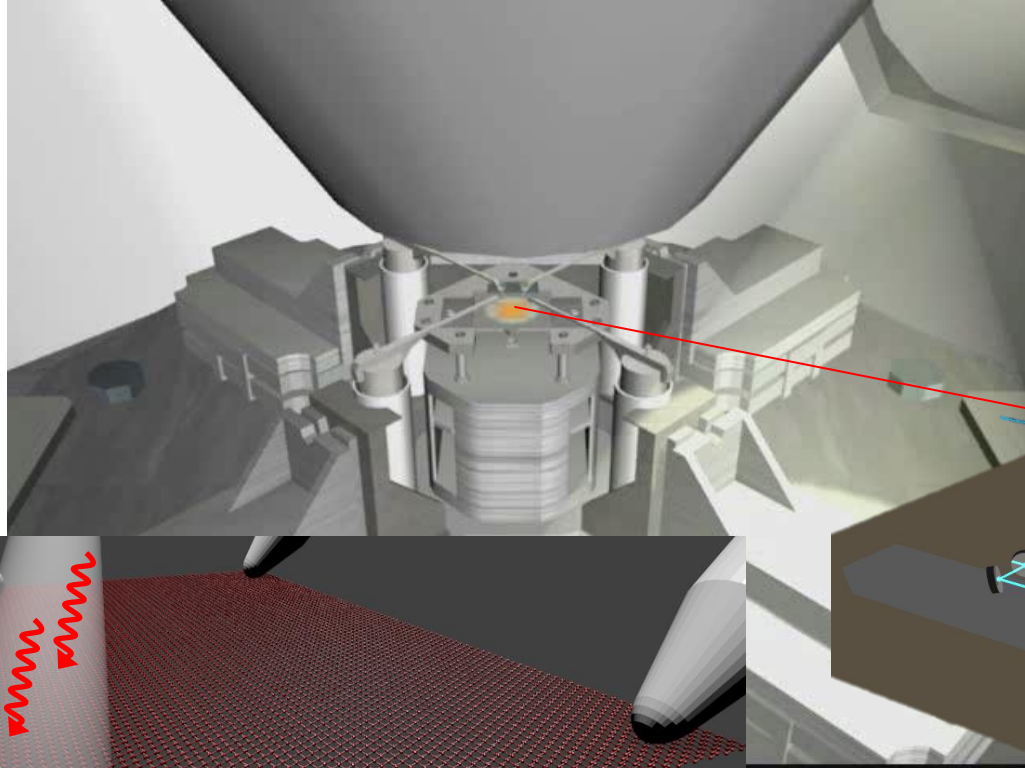
CONNECTER/TESTER

RESOLUTION



Le Nanoprobe : Mesure de phénomènes dynamiques à l'échelle nanométrique

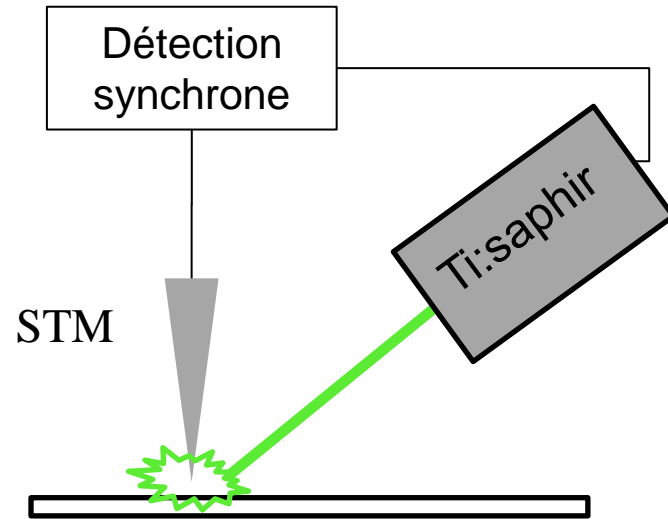
Microscopie corrélative STM/pompe-sonde optique : déterminer l'origine de la séparation des porteurs de charge dans les hétérojonctions semi-conductrices



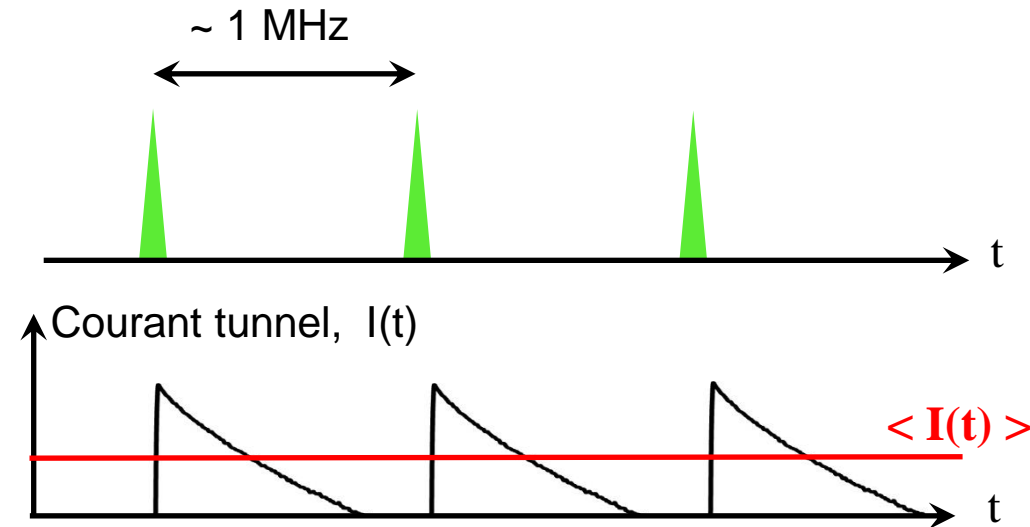
*Comprendre l'évolution
temporelle des
phénomènes physiques*

Le Nanoprobe : Mesure de phénomènes dynamiques à l'échelle nanométrique

Transport résolu en temps: couplage STM – Optique

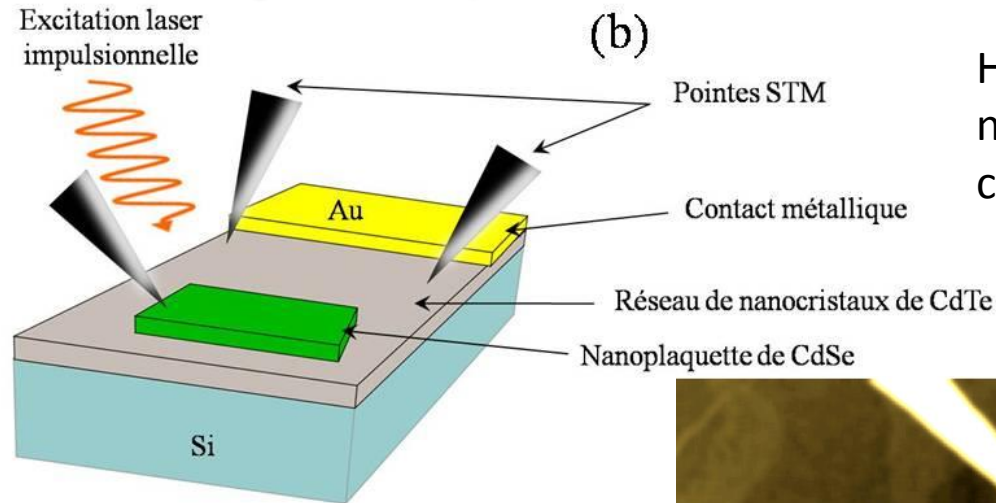
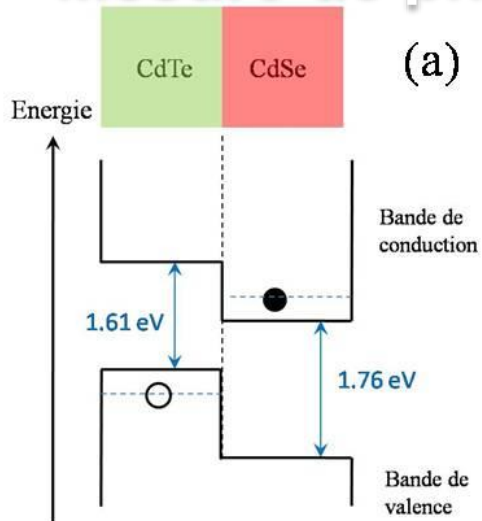


Résolution temporelle définie par la largeur des impulsions laser (~100 fs)
Résolution spatiale donnée par le STM

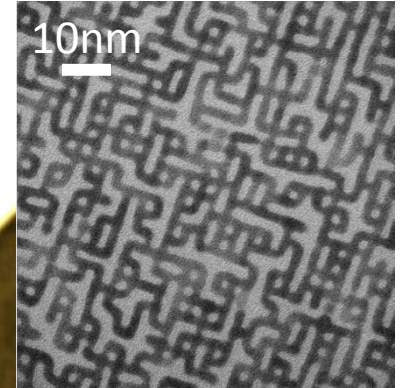


Faible résolution temporelle STM (~1 ms) \Rightarrow mesures de courant moyen $\langle I(t) \rangle$

Le Nanoprobe : Mesure de phénomènes dynamiques à l'échelle nanométrique



Hétérojonctions de nanostructures colloïdales



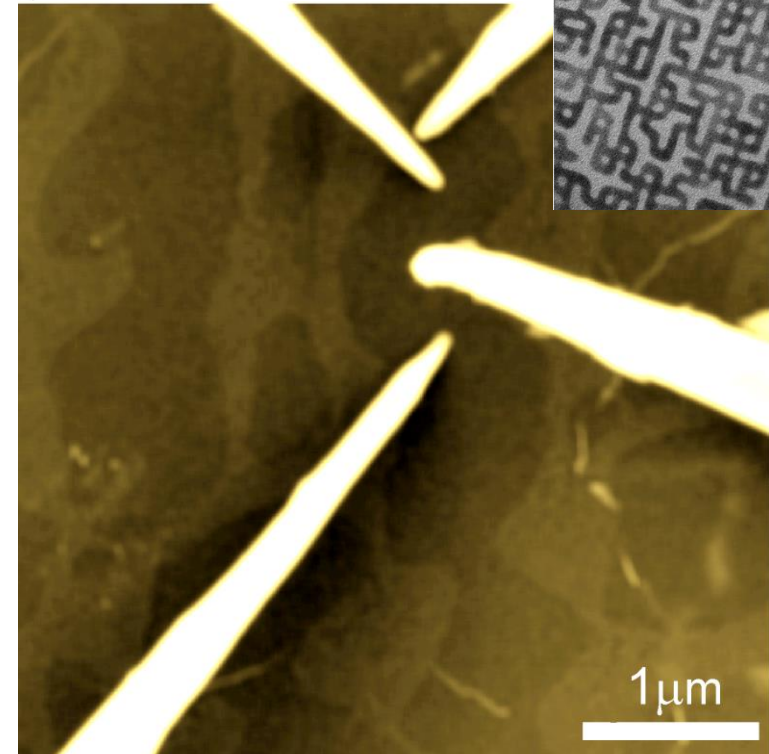
Caractérisation du réseau de nanocristaux:

- Transport (anisotropie, influence des défauts,...)
- Photo-conductivité (dynamique des porteurs)

Hétéro-jonction CdSe/CdTe:

- dynamique de séparation des porteurs
- Mesures simultanée des courants de porteurs

Accumulation de porteurs de charge



Nature Communications 09/2015; 6:8195.

DOI: 10.1038/ncomms9195

PLAN

- ❑ Mesures Haute Fréquence à l'échelle nanométrique :
Mesurer quoi? Comment?
- ❑ Notre approche expérimentale
 - ❑ Le Nanoprobe : connecter en toutes conditions
 - ❑ L'AFM sous SEM : mesures multi-physiques localisées
 - ❑ Le Nano-prober HF : caractérisation des nano-composants électroniques
- ❑ Conclusion et Perspectives

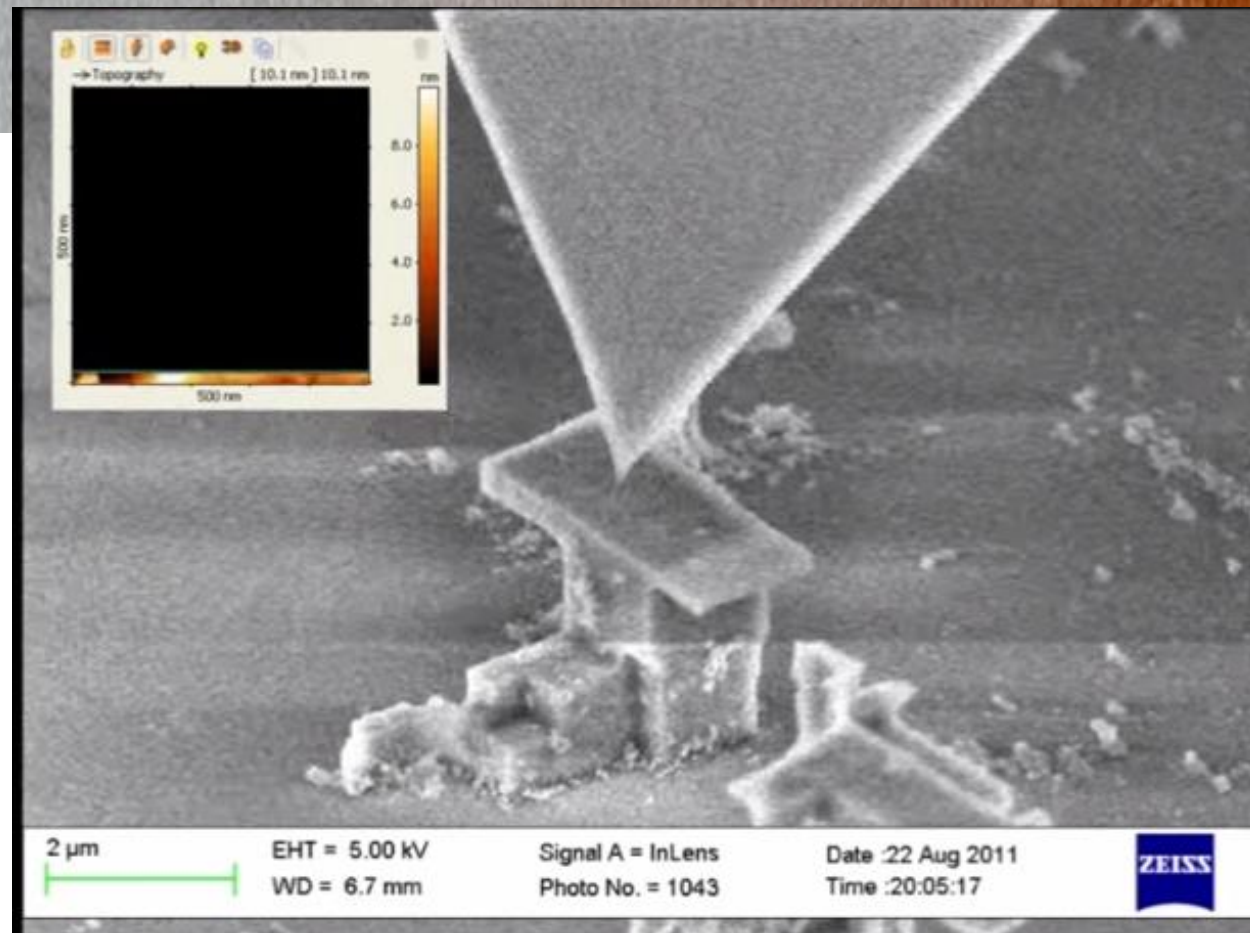
L'AFM-SEM : objectifs

Combiner les deux microscopies pour une localisation rapide d'objet unique

Utiliser les possibilités de caractérisation multi domaines sous un environnement contrôlé

Excelsior: aller vers des sondes HF combinées avec la technique AFM

exemple : caractériser le contact électrique en mesurant la courbe courant vs force (effet "pop in" lié au changement de phase du matériau)



CRITERES:

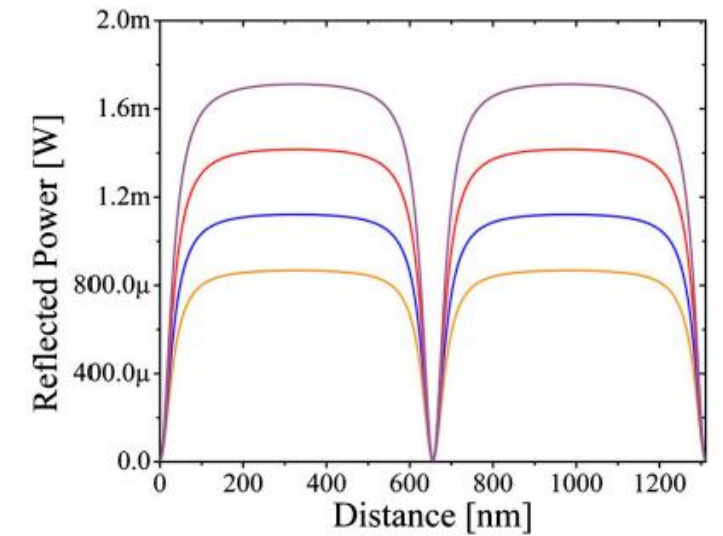
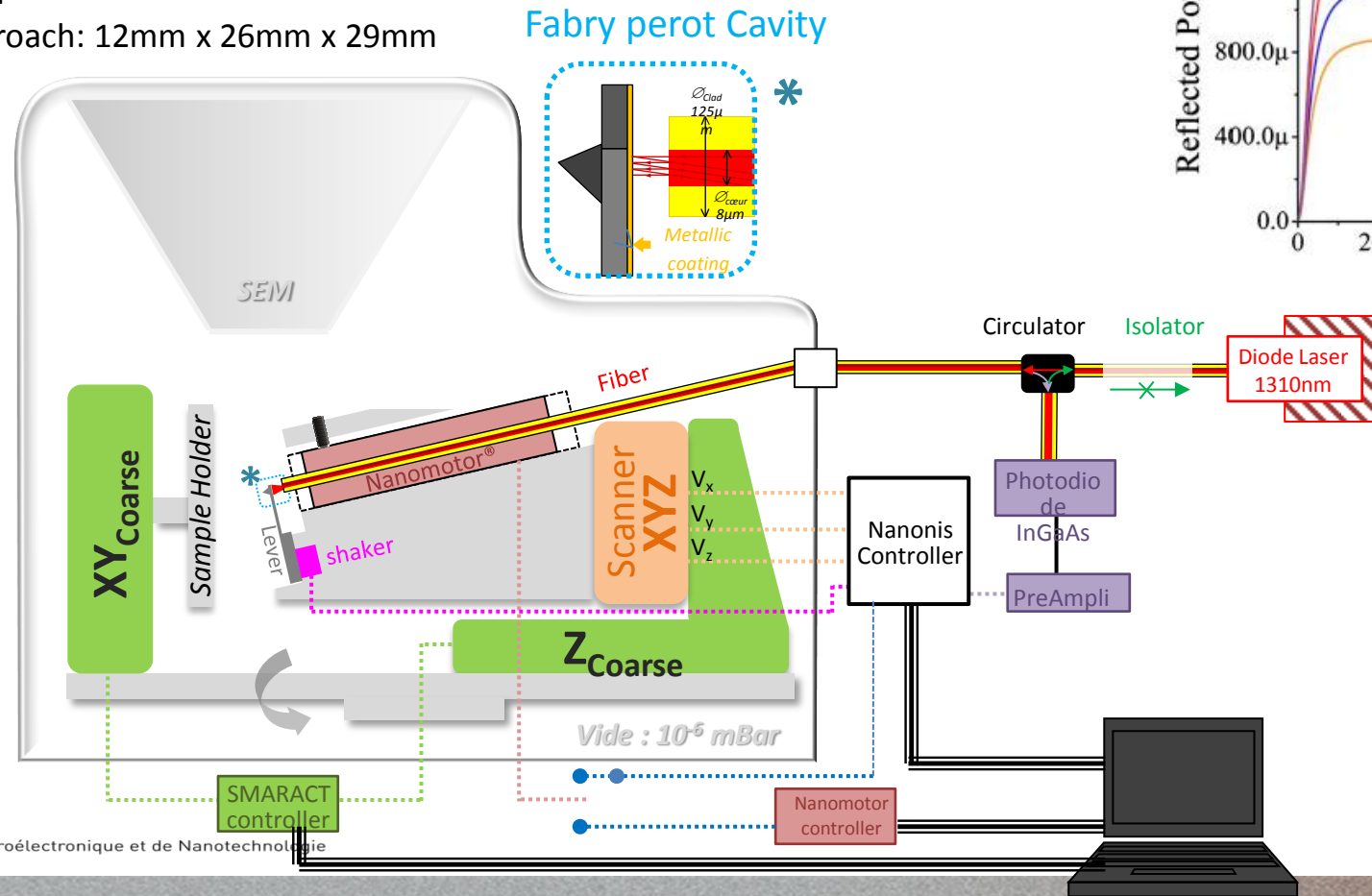
- Compatibilité SEM&vide (Encombrement, nature matériaux, zéro électronique)
- Vision totale de la pointe
- Automatisation réglage

L'AFM-SEM : principe

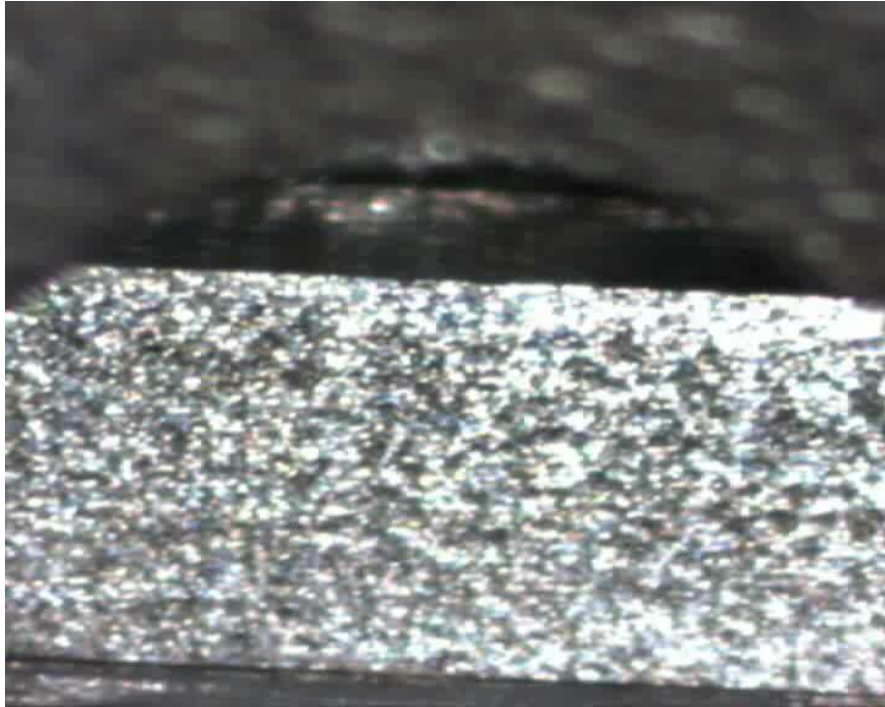
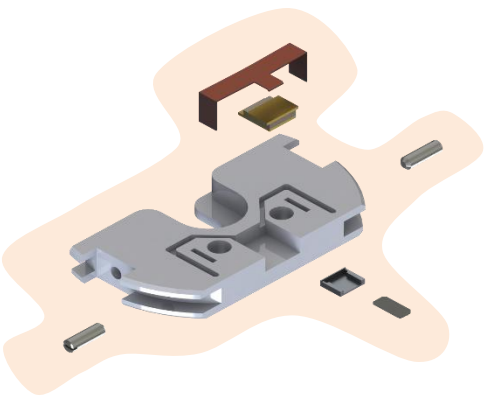
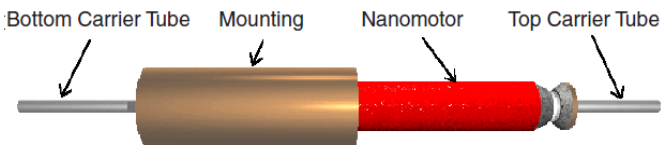
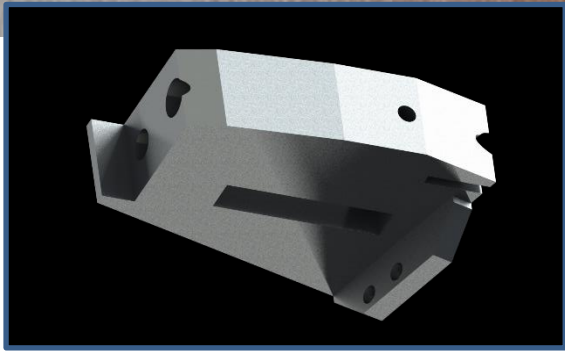
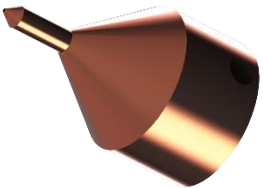
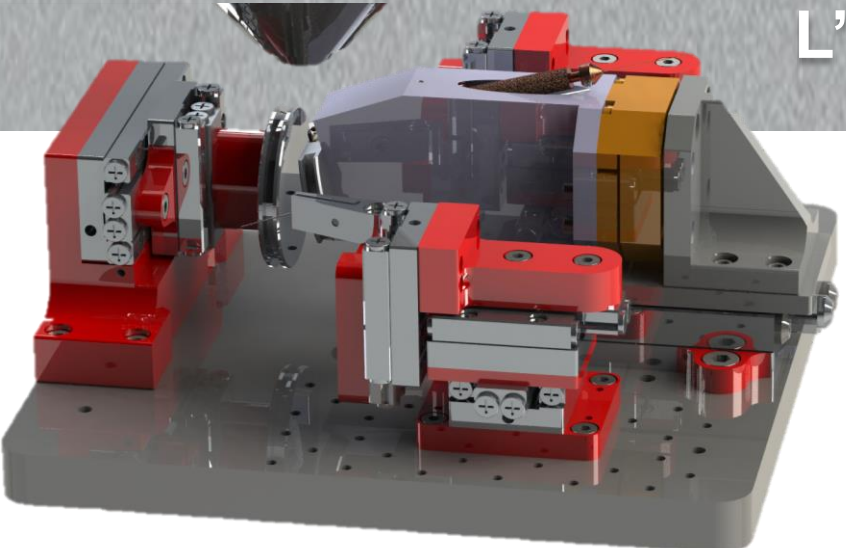
AFM is based on the coupling of a *cantilever* and an *optical fiber* with interferometric *Fabry-Perot* scheme detection allowing high resolution, zero electronics under vacuum and *all mode compatibility* like contact and non contact modes.

Specifications:

- XY Scan size: $40\mu\text{m} \times 40\mu\text{m}$ and Z Range : $4\mu\text{m}$
- Sample size: 30mm diameter
- X Y Coarse position and approach: $12\text{mm} \times 26\text{mm} \times 29\text{mm}$



L'AFM-SEM : Conception

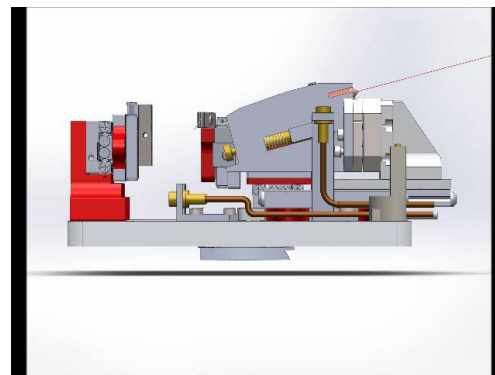


L'AFM-SEM : Conception

Fab-Lab

- Logiciel de cao
- Impression 3D
- Machine à commande numérique

Intérêt pour l'innovation
Outils mutualisables



CAO

- Dessiner les pièces
- Simuler le fonctionnement et les contraintes

Impression 3D

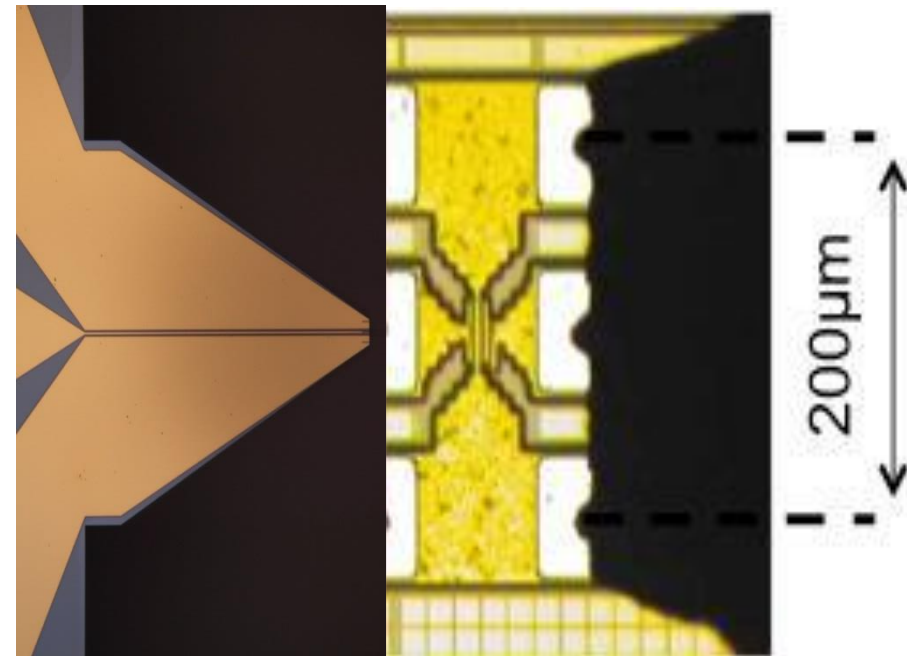
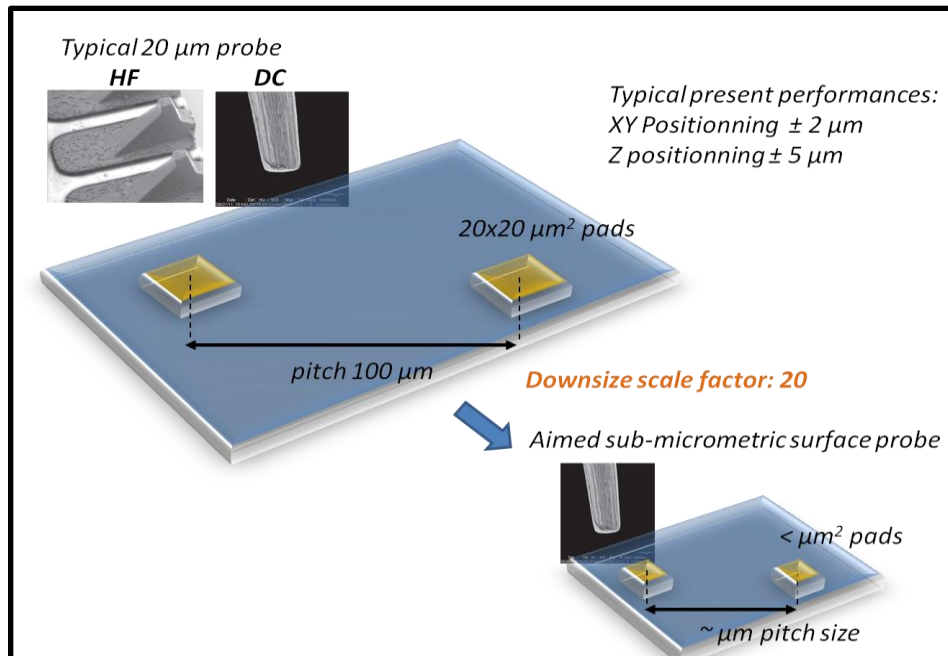
- Permet de valider les concepts par une maquette
- Réalisation d'objets complexes en plastique par la technique « bottom-up » : construction
- Différent des techniques classiques d'usinage qui sont « top-down »



PLAN

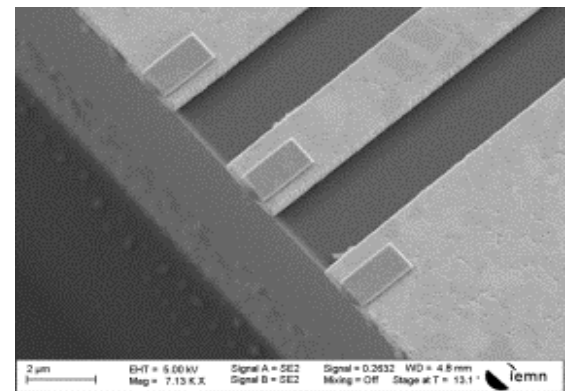
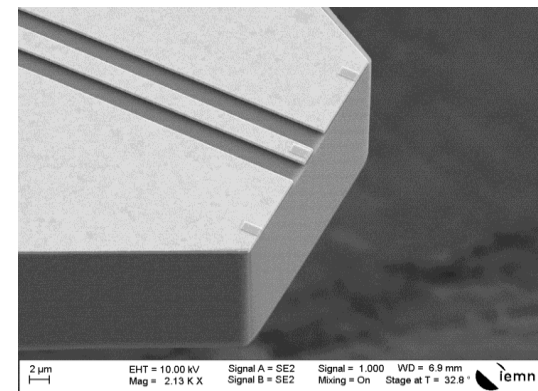
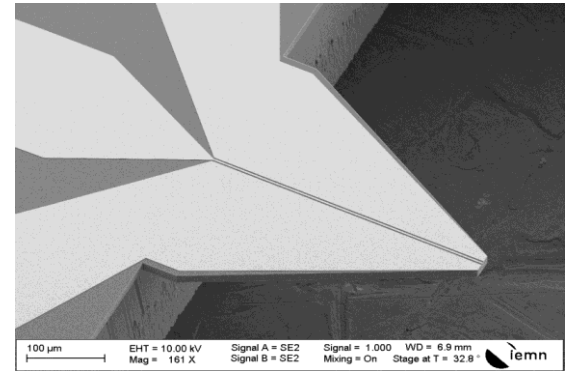
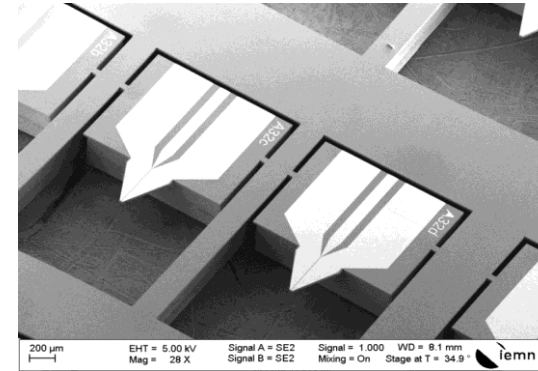
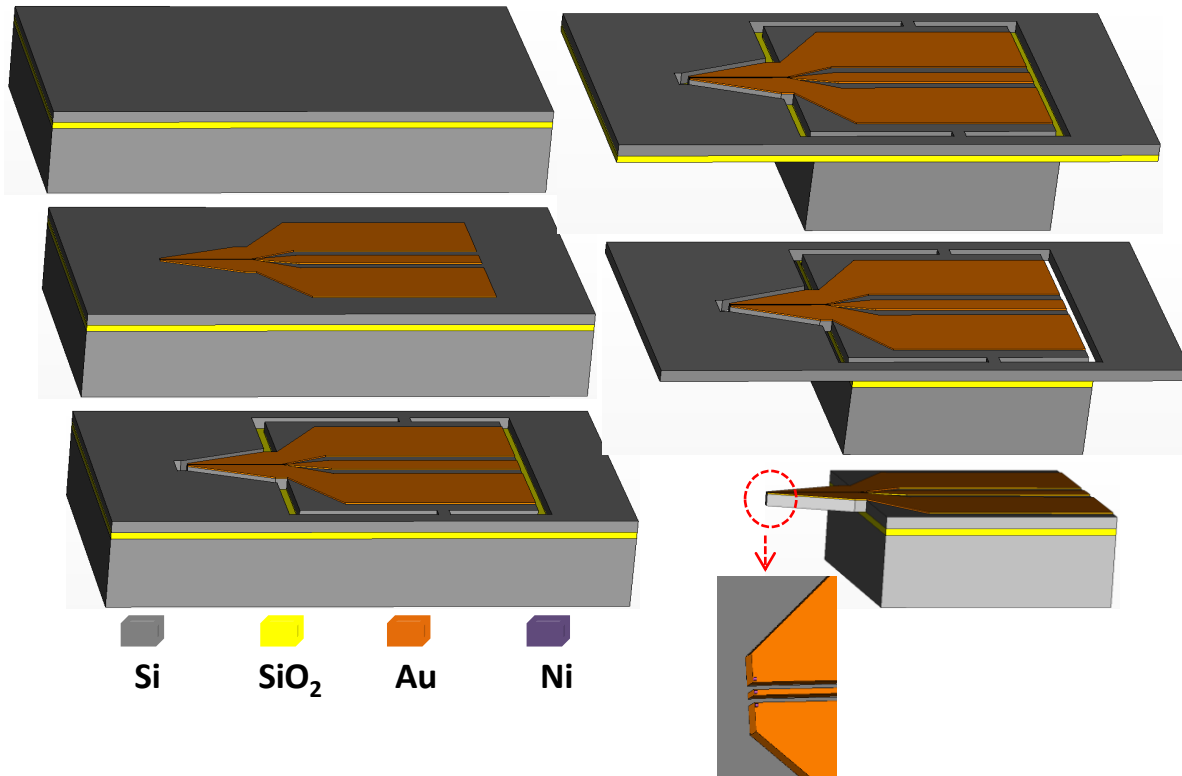
- ❑ Mesures Haute Fréquence à l'échelle nanométrique :
Mesurer quoi? Comment?
- ❑ Notre approche expérimentale
 - ❑ Le Nanoprobe : connecter en toutes conditions
 - ❑ L'AFM sous SEM : mesures multi-physiques localisées
 - ❑ Le Nano-prober HF : caractérisation des nano-composants électroniques
- ❑ Conclusion et Perspectives

Le Nano-prober HF : Un nouveau concept de sondes miniaturisées pour le test HF sur des composants nanoélectroniques



- Dimension des contacts : Micromètre / sub-micromètre
- Pitch = μm

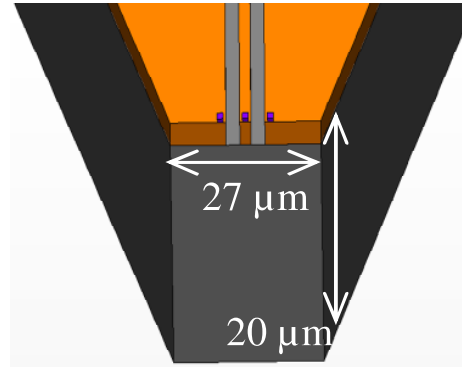
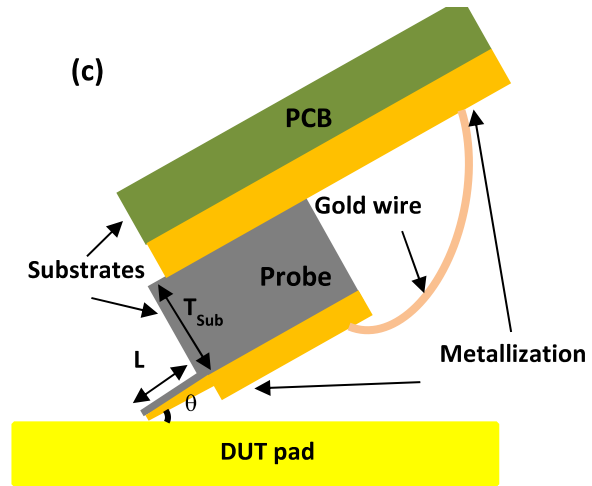
Le Nano-prober HF : Technologie MEMS SOI, Process



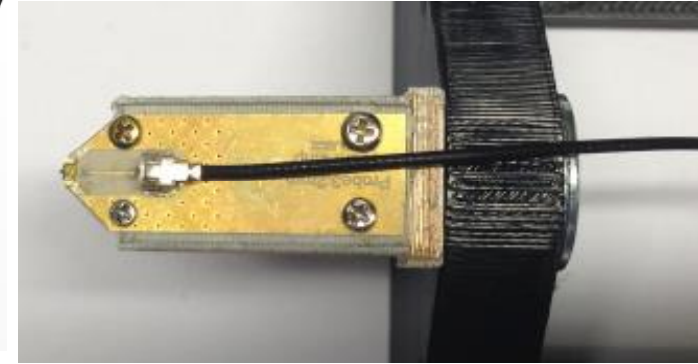
J. Micromech. Microeng. 25 , 7 (2015)

Images MEB des sondes HF MEMS

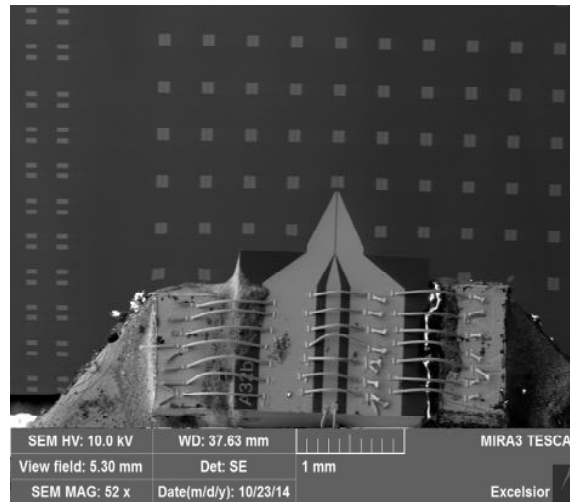
Le Nano-prober HF : Intégration des sondes



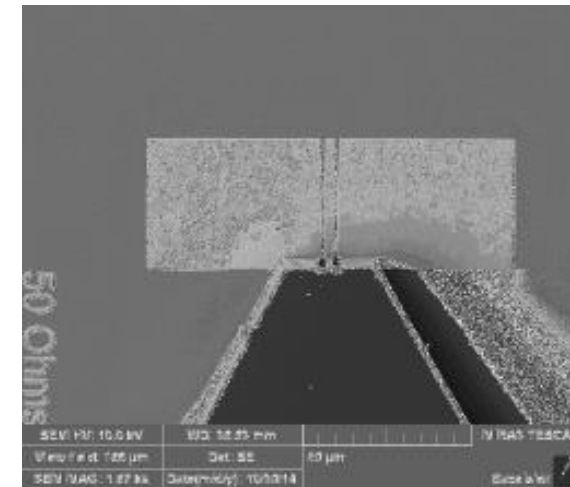
(a)



(b)

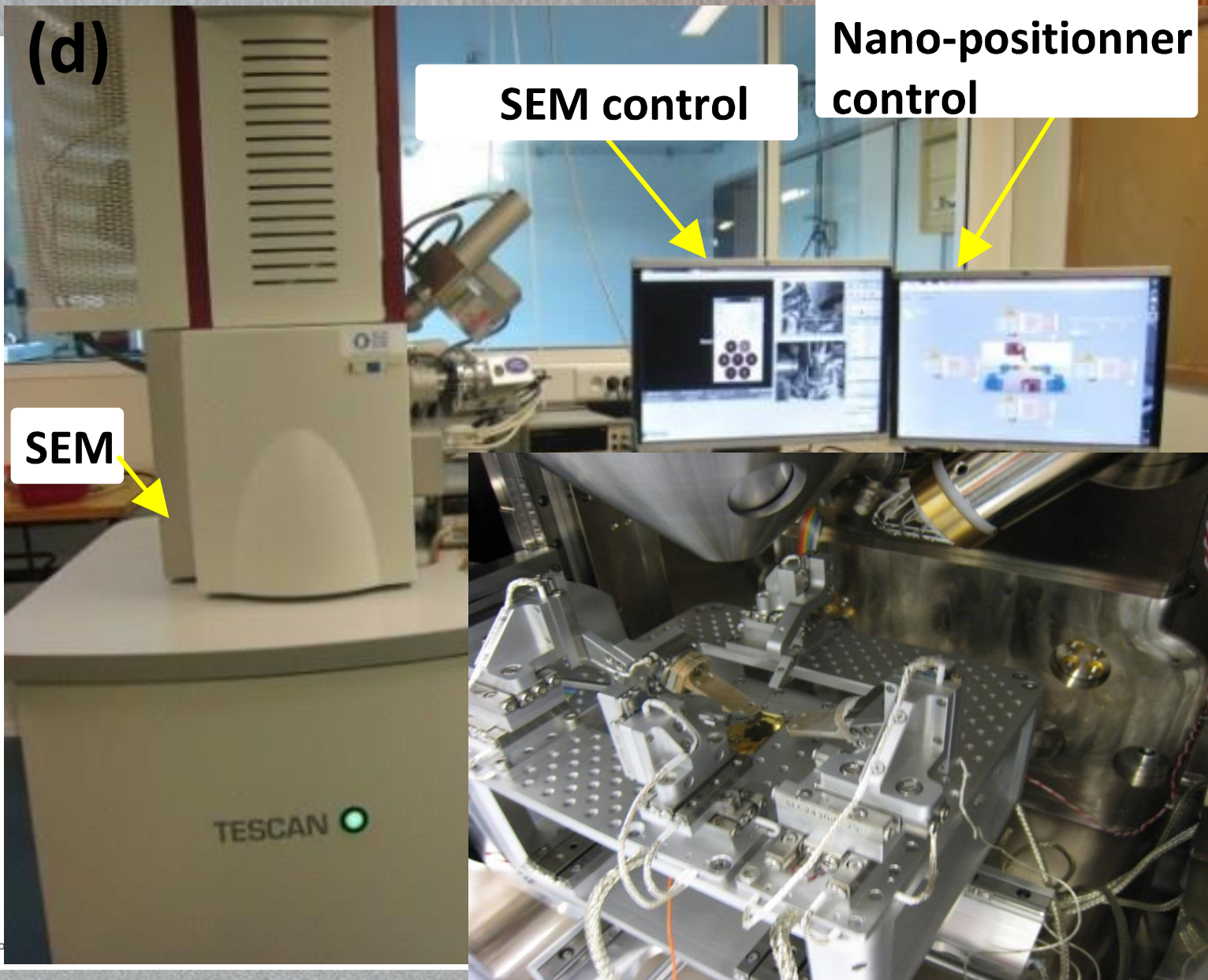
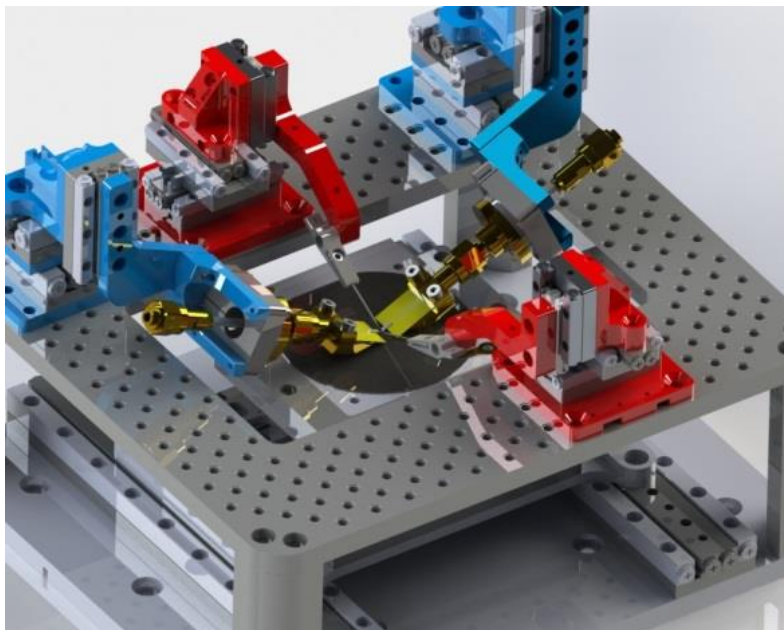
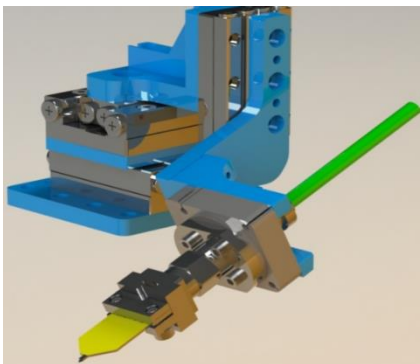


(c)



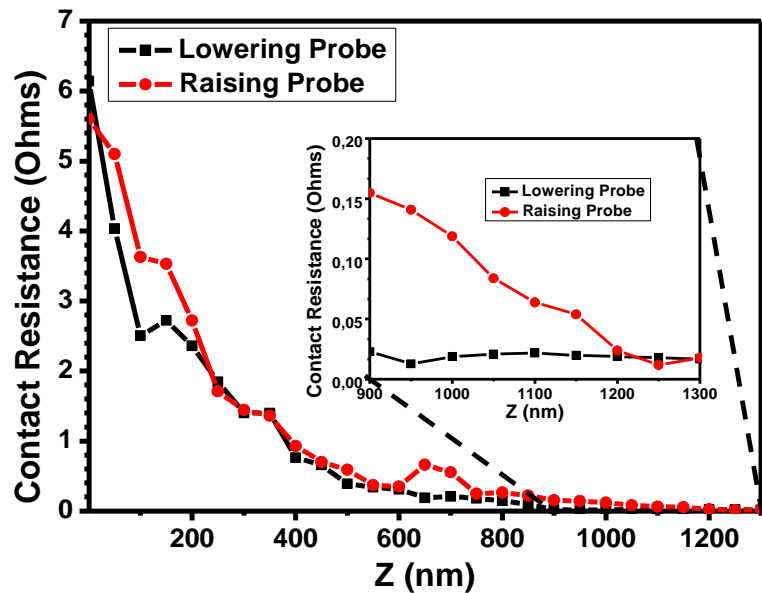
(d)

Nano-prober HF : système de mesure sur wafers



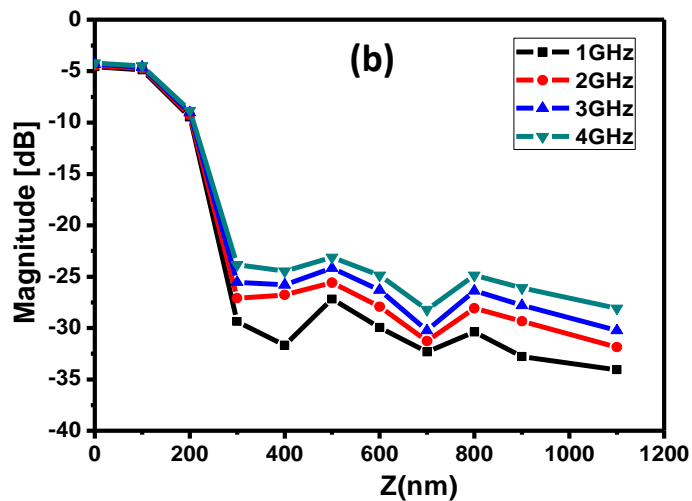
DC

Le Nano-prober HF : Performances

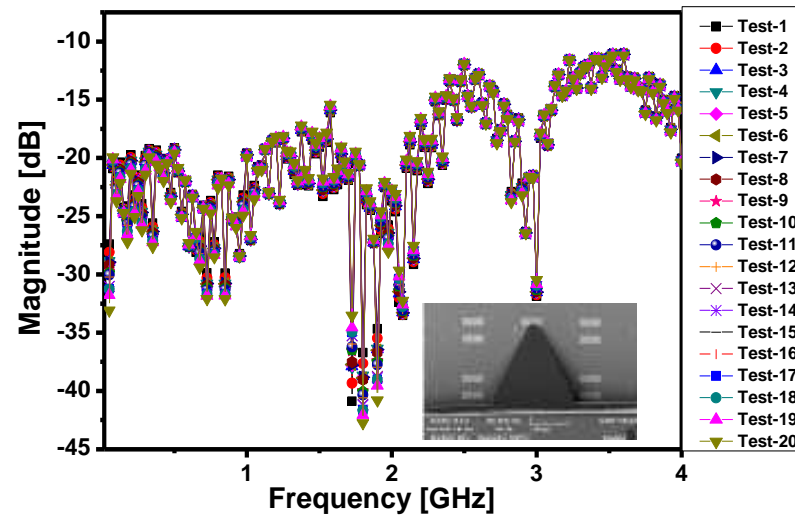


Résistance de contact : 0.02Ω

AC

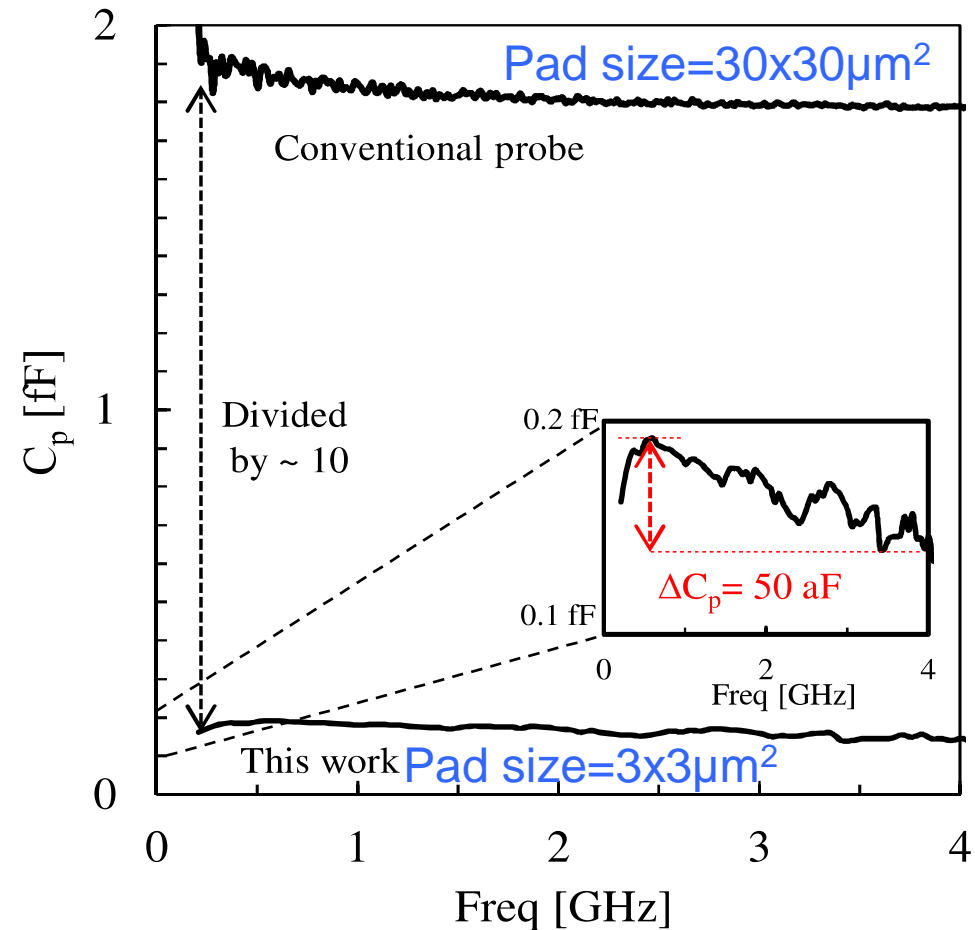


Mesures micro-ondes stables sur un déplacement vertical de $1\mu\text{m}$.

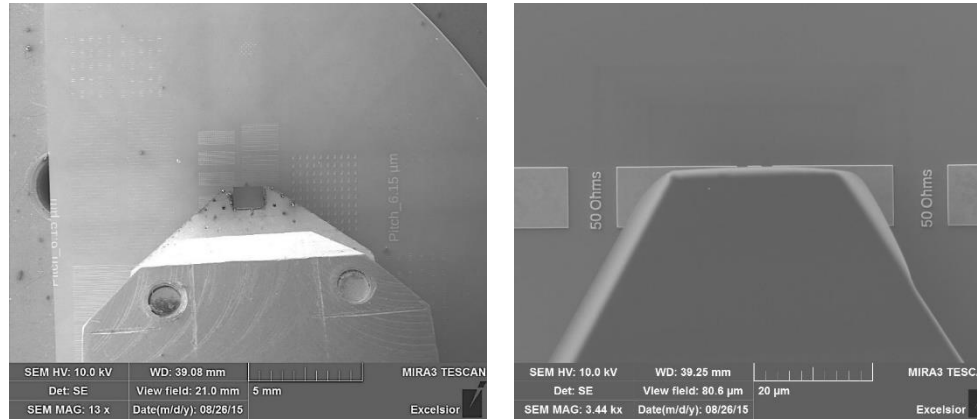


La qualité des contacts assure une bonne reproductibilité des mesures micro-ondes.

Le Nano-prober HF : Tirer profit de la miniaturisation des sondes pour des mesures de paramètres S plus fiables.

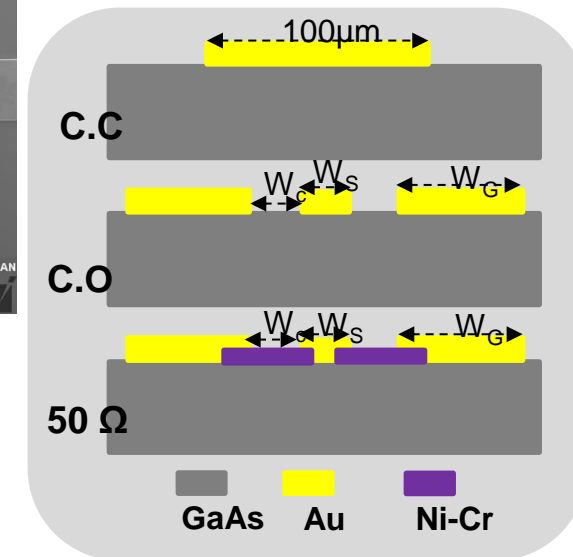


IEEE Microw. Wirel. Compon. Lett. (2015)



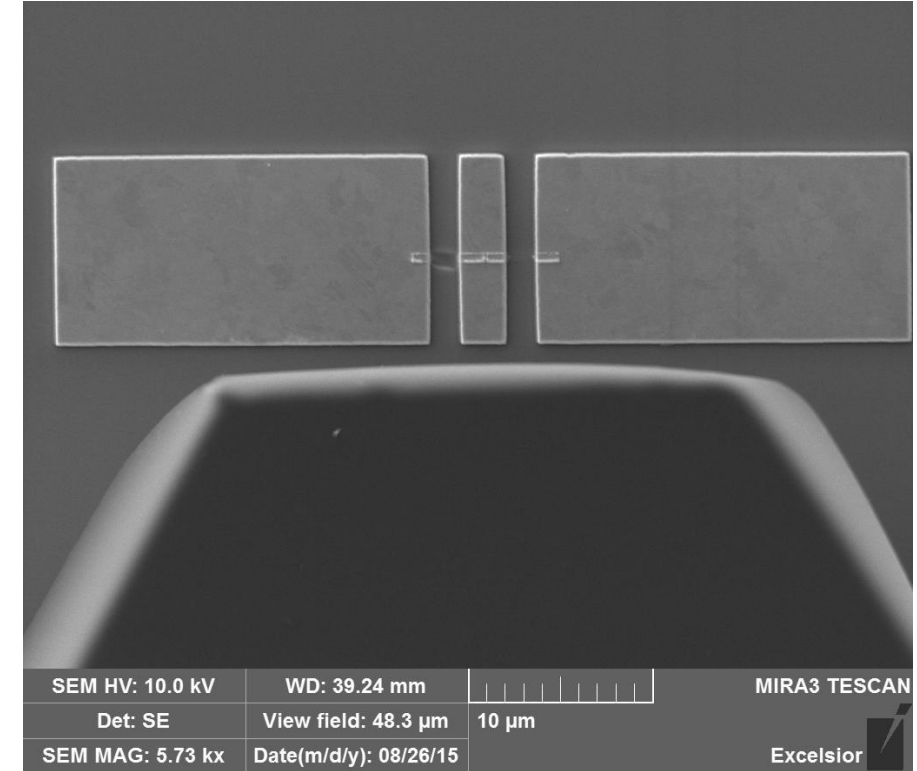
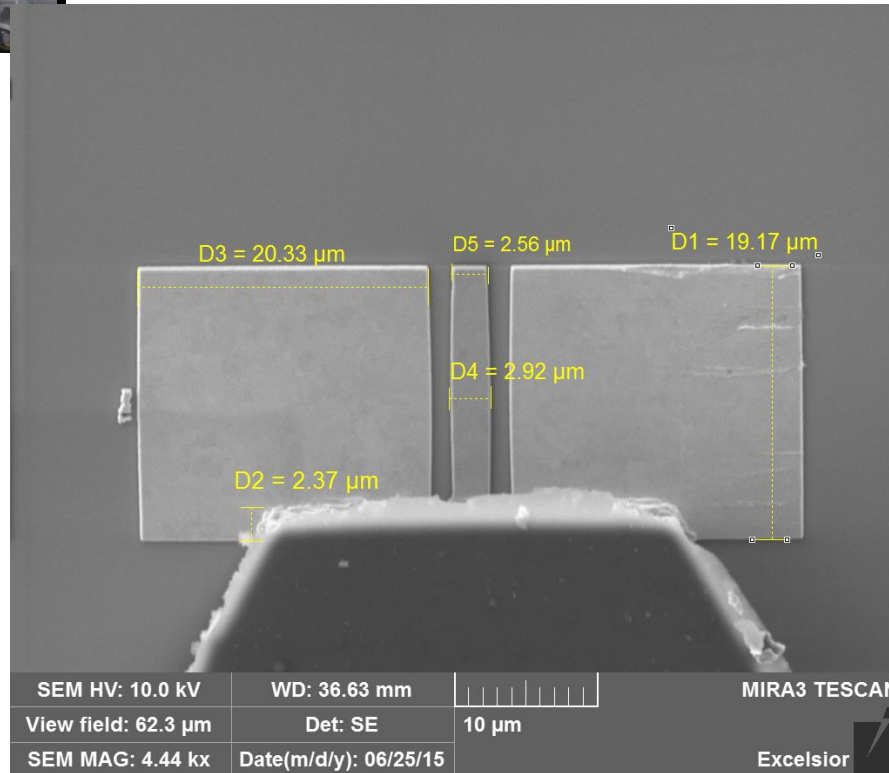
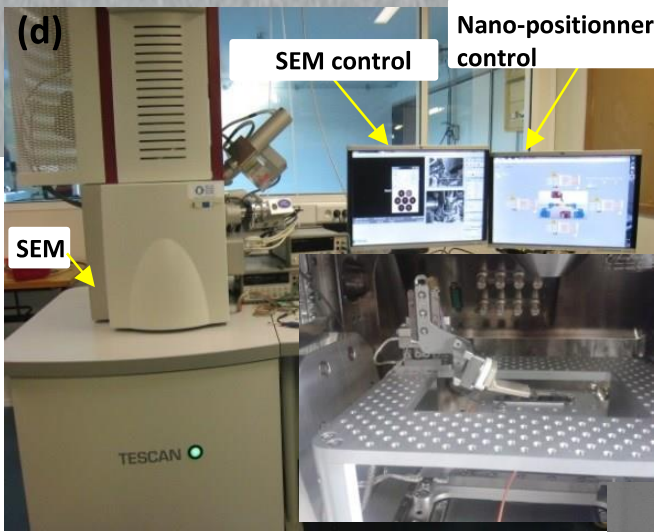
Capacité totale = $C_{\text{pad}} + C_{\text{device}}$

- Réduction de la capacité parasite : 1 ordre de magnitude.
- Précision et sensibilité accrues.

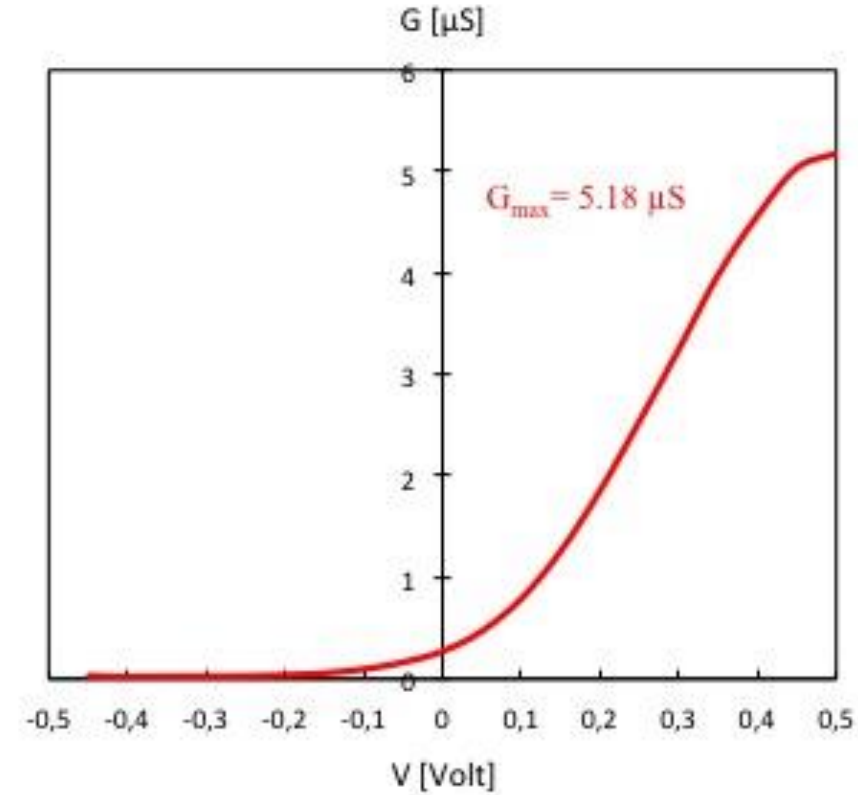
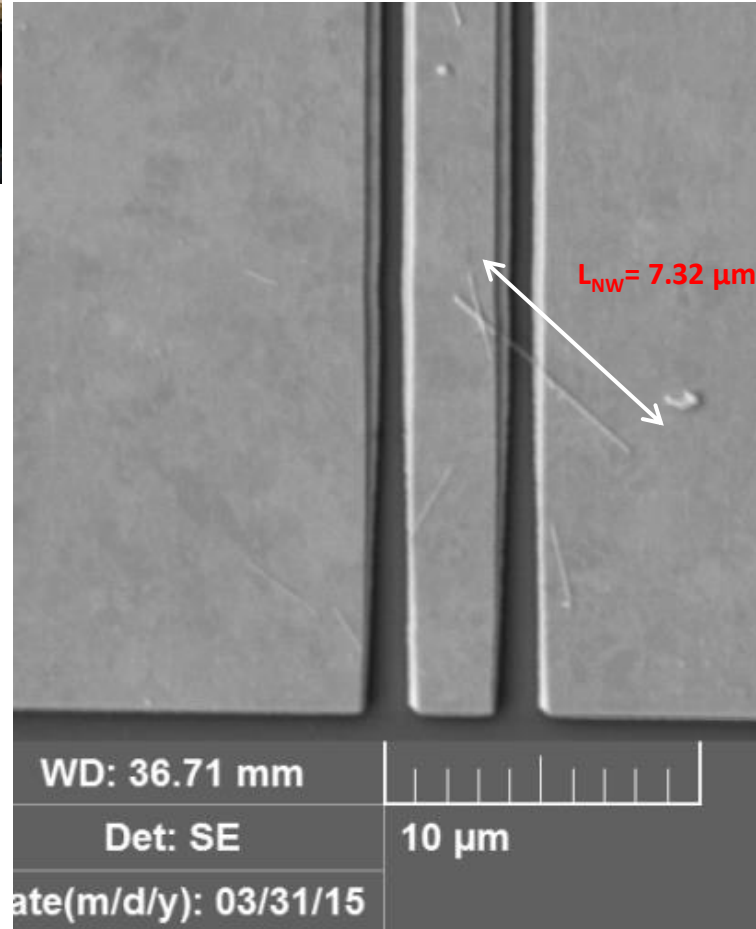
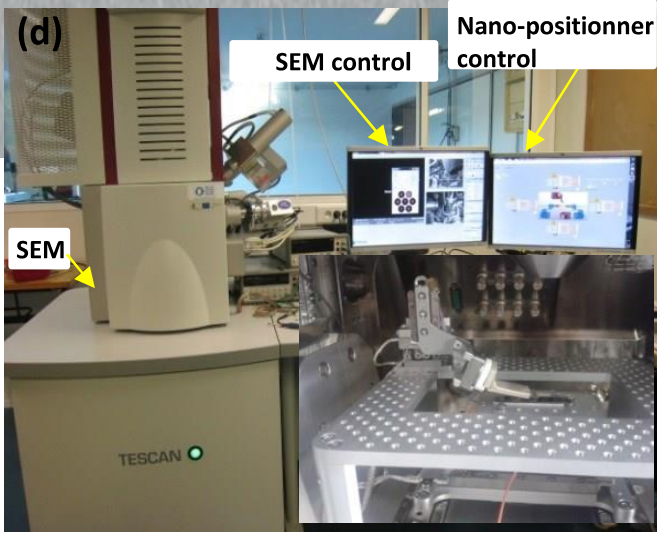


$W_S = 2.3 \mu\text{m}$,
 $W_G = 50 \mu\text{m}$,
 $W_C = 1.8 \mu\text{m}$

Le Nano-prober HF : Augmenter l'information



Le Nano-prober HF : Exemple



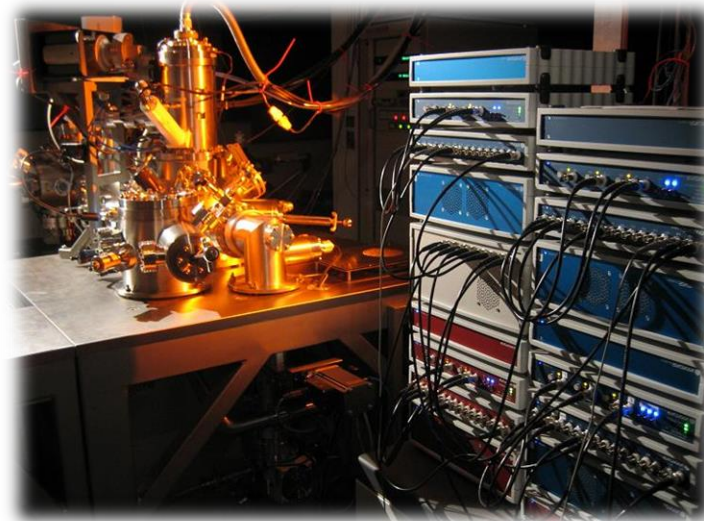
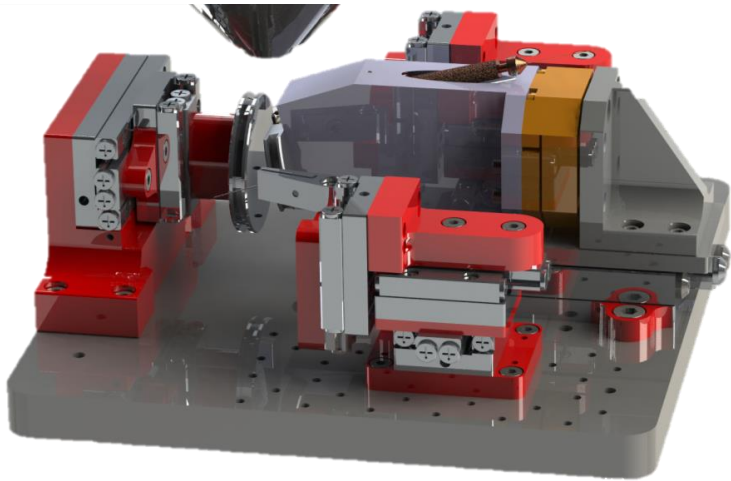
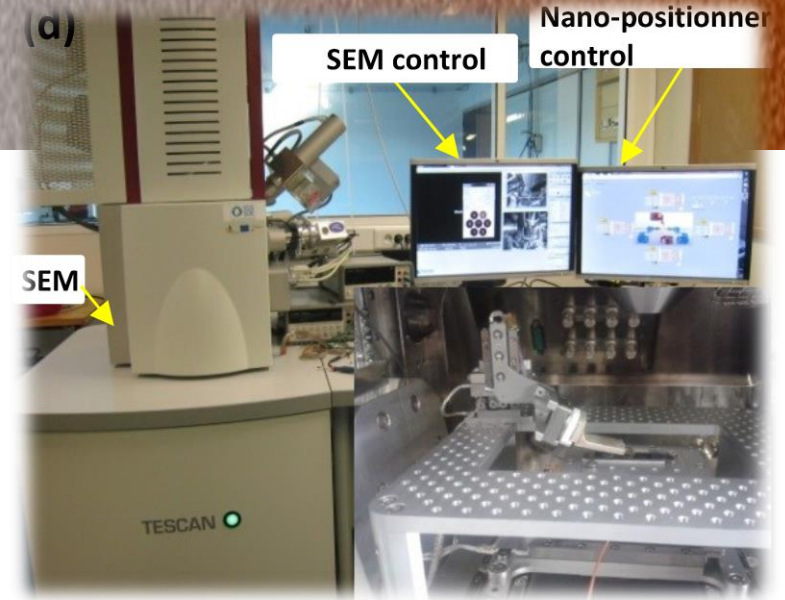
PLAN

- ❑ Mesures Haute Fréquence à l'échelle nanométrique :
Mesurer quoi? Comment?
- ❑ Notre approche expérimentale
 - ❑ Le Nanoprobe : connecter en toutes conditions
 - ❑ L'AFM sous SEM : mesures multi-physiques localisées
 - ❑ Le Nano-prober HF : caractérisation des nano-composants électroniques
- ❑ Conclusion

Conclusion

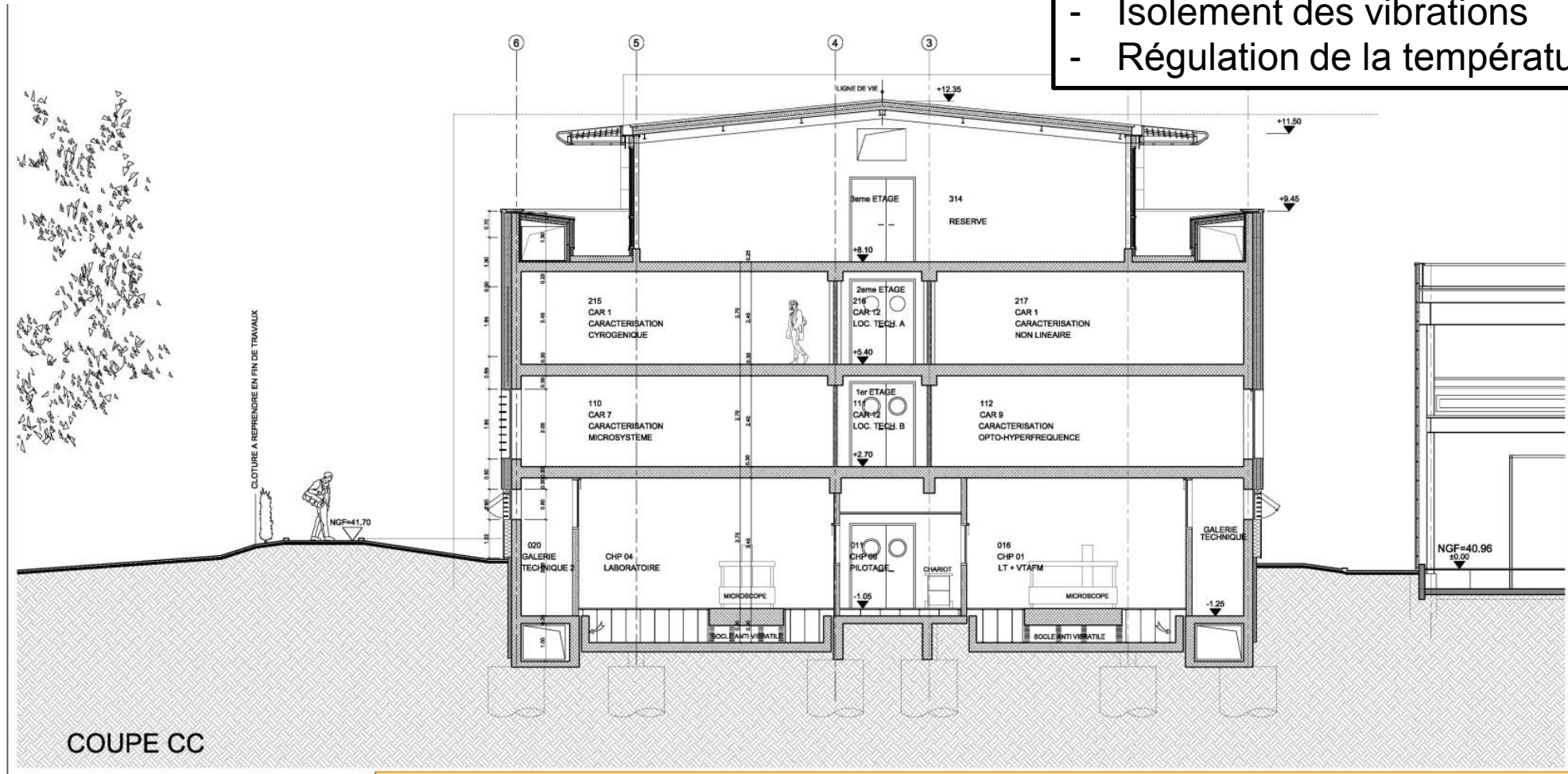
3 instruments combinant

- MEB
- Microscopie
- Mesures électriques
- Mesure de composants
- Mesure de nanostructures
- Mesures physiques



Conclusion

- Environnement ISO 8
- Isolement des vibrations
- Régulation de la température et de l'hygrométrie



CNRS CENTRE NATIONAL DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
Délégation Régionale Nord Pas-de-Calais et Picardie
2 rue des Canoniers 59046 LILLE Cedex

EXTENSION DE L'INSTITUT D'ELECTRONIQUE DE MICROELECTRONIQUE ET DE NANOTECHNOLOGIE (IEMN)

Cité Scientifique – Avenue Poincaré – 59652 VILLENEUVE D'ASCO

ARCHITECTE MANDATAIRE: **WERNER STUTZ COLLECTIF ARCHITECTURE**
17-19 rue Jérome David 75016 PARIS
tel. 01 45 56 70 08 fax. 01 42 24 01 28
e-mail : wstutz@wstutz.fr

B.E.T. LABORATOIRES: **2BConcept CONSULTING**
41 Boulevard Les Moulins 59000 WILLEMETREUX FRANCE
tel./fax. 02 20 81 32 18
e-mail : 2bconcept-conseil@orange.fr

B.E.T. STRUCTURE et LOTS TECHNIQUES: **SNC-Lavalin**
67, Avenue de la République 59000 LILLE CEDEX
tel. 03 20 35 35 35 fax. 03 20 35 35 35
e-mail : agence@snclavalin.com

PRO	N° DE FICHER : 1206 PRO Cas	N° D'ANTHRE : 1206	N° DE PLAN : 307
PROJET COUPES TRANSVERSALES BB - CC - DD		ECHELLE : 1/50	DATE D'ENVOI NOTICE : 30/07/13



NCC : Nanoscience Characterization Center

Acknowledgement

P. Capiod,¹ A. Diaz,¹ T. Demonchaux,¹ J. Marzouk,¹
C. Durand,^{1,2} T. Xu,^{1,3} A. El Fellahi,¹
J. P. Nys,¹ , D. Deresmes,¹ M. Berthe,¹ C. Boyaval,¹
C. Kzreminski,¹ C. Delerue,¹ D. Stiévenard,¹
W. Evers,⁴ L. Siebbeles,⁴ D. Vanmaekelbergh,⁵
K. Haddadi,¹ S. Arscott,¹ T. Lasri,¹ G. Dambrine¹

¹ *Institut d'Electronique et de Microélectronique et de Nanotechnologies*

(CNRS, UMR 8520) Lille, France,

² *Center for Nanophase Materials Sciences, Oak Ridge National Laboratory,*

Oak Ridge, TN 37831, USA

³ *Key Laboratory of Advanced Display and System Application, Shanghai University,*

Shanghai 200072, People's Republic of China

⁴ *Kavli Institute of Nanoscience, Delft University of Technology, 2628 CJ, The Netherlands*

⁵ *Debye Institute for Nanomaterials Science, University of Utrecht, Princetonplein 1,*

3584 CC Utrecht, The Netherlands

Financial support :





iemn

Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie
UMR CNRS 8520