

# NRTW 2026

## National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1<sup>er</sup> & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

### Approche systémique et protection contre la corrosion dans les dispositifs microélectroniques

Sabrina MARCELIN<sup>1</sup>, Bernard NORMAND<sup>1</sup>,  
Romain HAEFFELE<sup>1,2</sup>, Florian GEORGES<sup>1,2</sup>, Mathieu LOYER<sup>1,2,3</sup>,  
Lucile BROUSSOUS<sup>2</sup>, Eric SABOURET<sup>2</sup>, Emilie DELOFFRE<sup>2</sup>, Sébastien PETITDIDIER<sup>2</sup>,  
Maria-Luisa CALVO-MUNOZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> MATEIS UMR CNRS 5510, INSA Lyon, Univ. Lyon 1, Villeurbanne cedex

<sup>2</sup> STMicroelectronics, Grenoble, Crolles, Agrate

<sup>3</sup> CEA Leti, Grenoble

Organisé par :

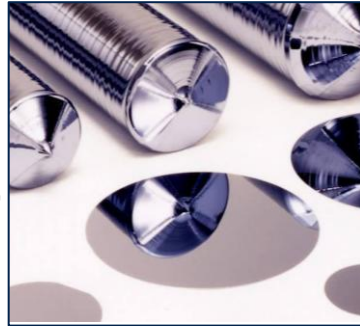
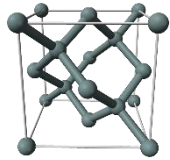
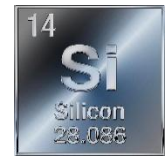


Financé par :



## Etapas de fabrication d'une micro-puce électronique

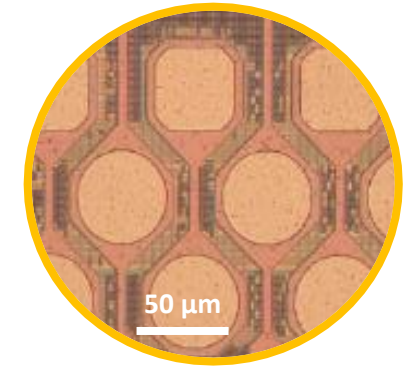
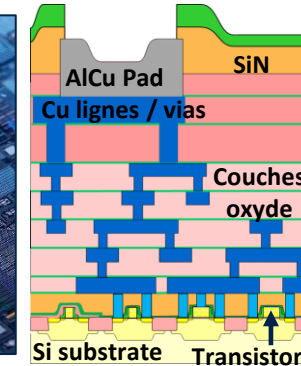
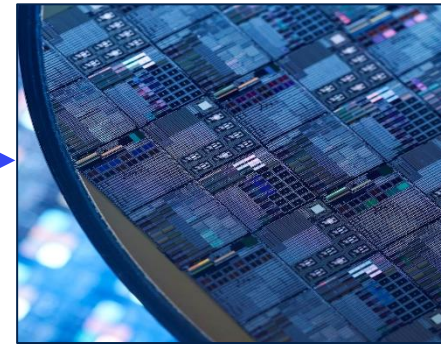
### 1) Silicium pur



#### Procédés Front-End

- Implantation ionique (dopage)
- Métallisation (PVD/CVD)
- Photolithographie
- Gravure (sèche/humide)
- Polissage mécano-chimique (CMP)
- Traitement thermique

### 2) Circuits intégrés

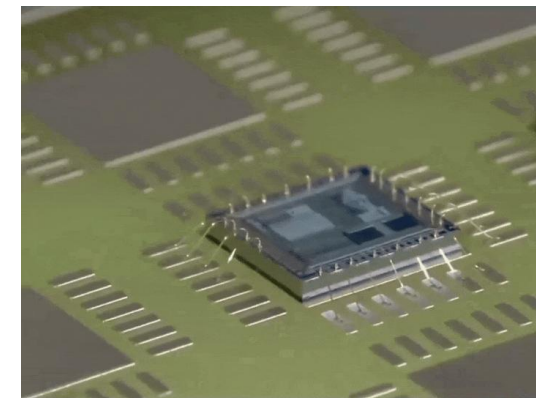


### 3) Boîtier



#### Procédés Back-End

- Découpe
- Collage
- Câblage
- Moulage
- Plaquage



Optical view of the wire-bonding process

## Problématiques scientifiques

### Cas 1

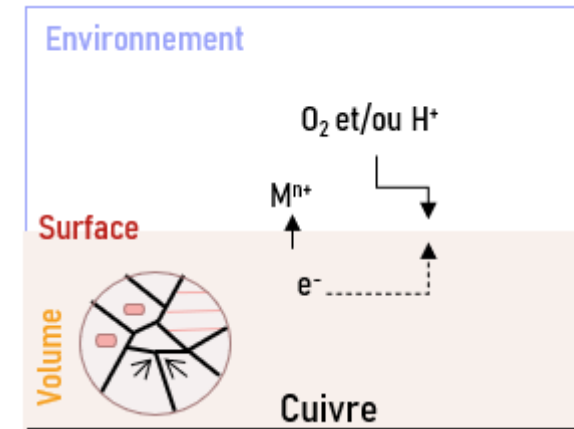
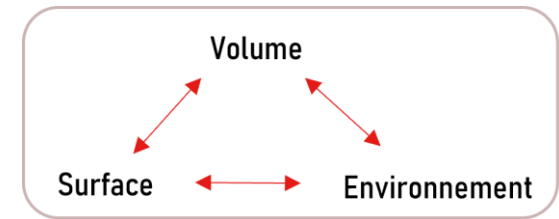
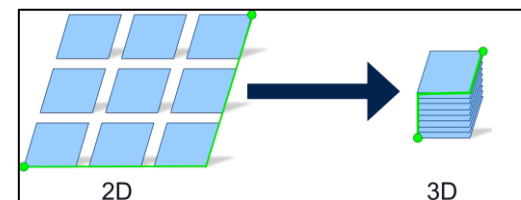
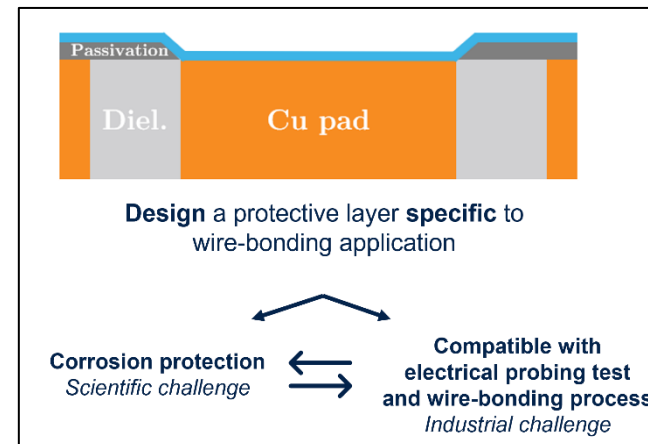
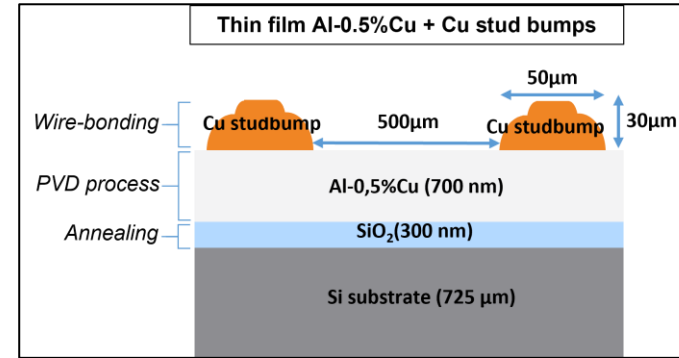
Contamination dans la fabrication microélectronique entraîne des problèmes de fiabilité liés à la corrosion

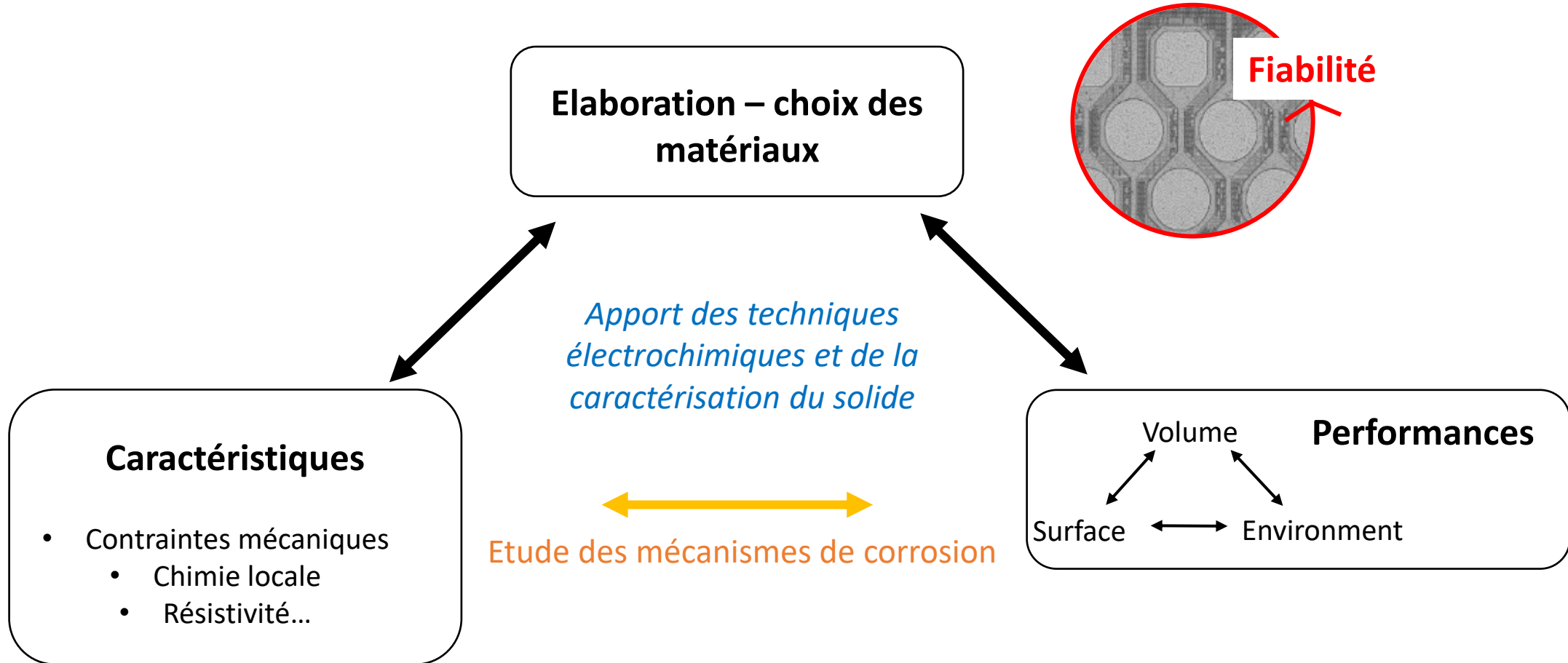
### Cas 2

Protection du pad de cuivre avant l'opération de câblage

### Cas 3

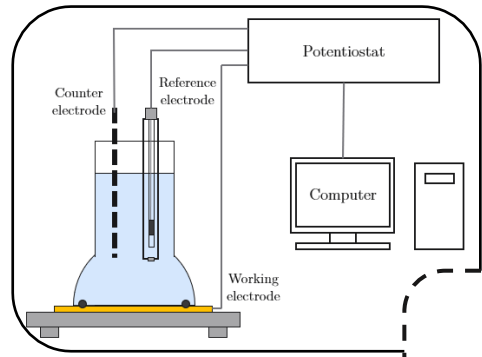
Collage hybride à basse température







# Approche multi-échelle

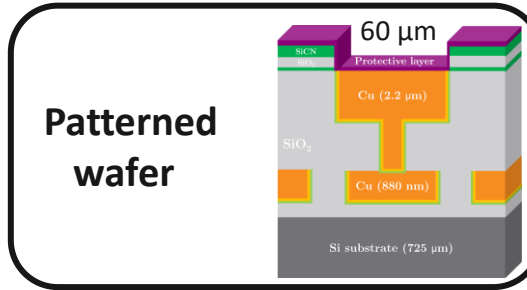


*EIS, polarization curves, etc.*

**Global electrochemistry techniques**

Immersion in 0.1M NaCl pH=6 RT  
EIS :  $[2 \cdot 10^{-2} - 10^5]$  Hz 10 pts/decade  
 $\Delta E = \pm 10$  mV vs  $E_{corr}$   
LSV : 1 mV/s  $\pm$  0.7V vs OCP

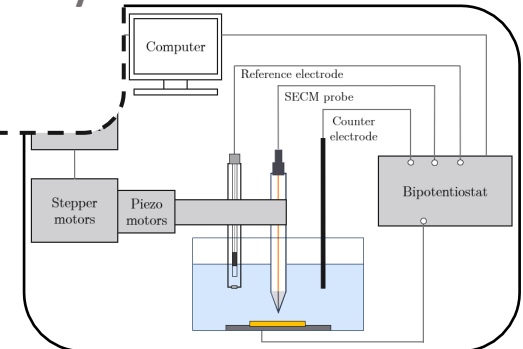
*Fundamental understanding*



**Patterned wafer**

*Behavior in package*

**Local electrochemistry techniques**

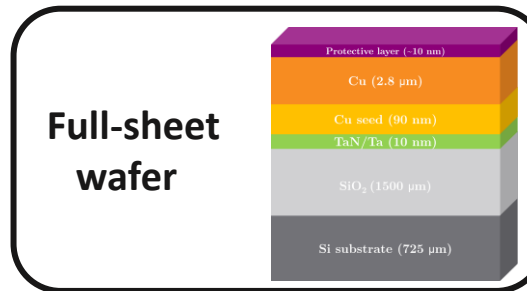


**Scanning Electrochemical Microscopy**

Immersion in 5mM NaCl/  
2mM FCMeOH  
pH=6 RT

*Technical limitations (scale, media, etc.)*

*Simplification of the problem*



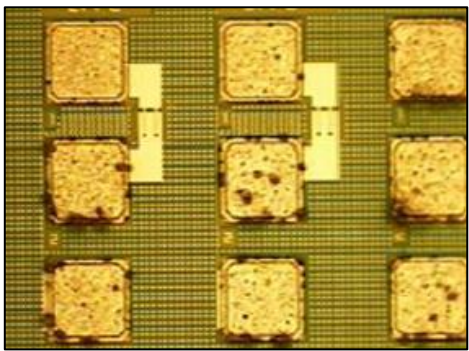
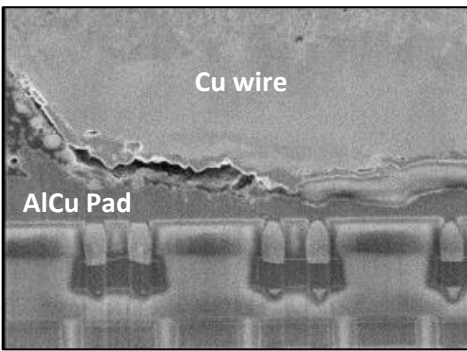
**Full-sheet wafer**

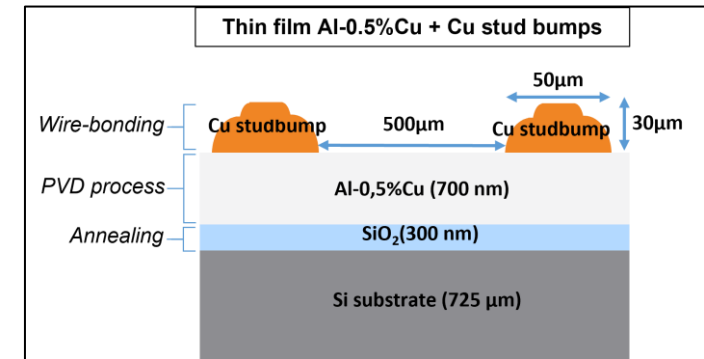
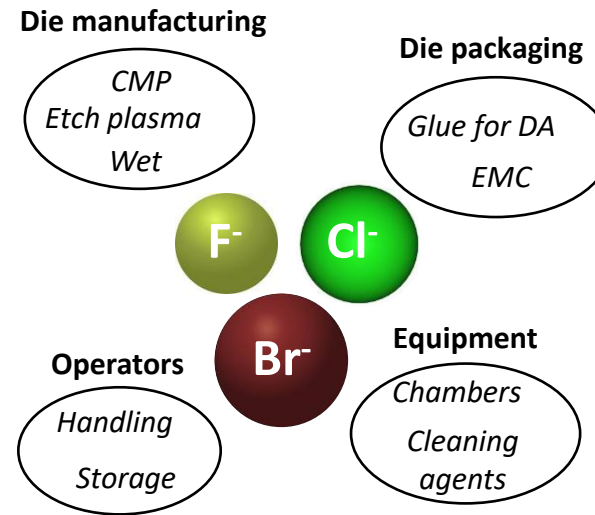
# Cas 1 : Effet des contaminants sur la robustesse

Thèse de Florian Georges, en cours  
L. Broussous, E. Sabouret, B. Normand

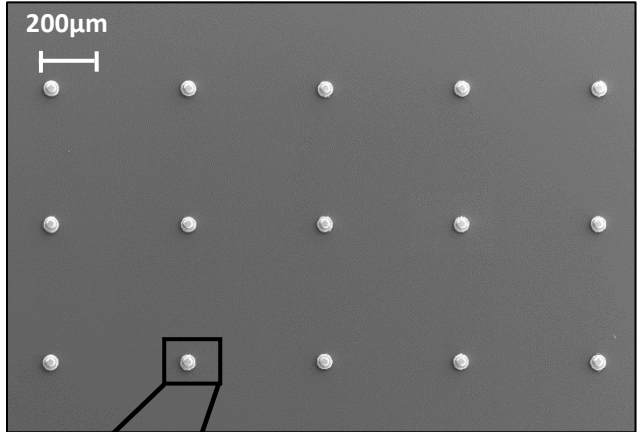
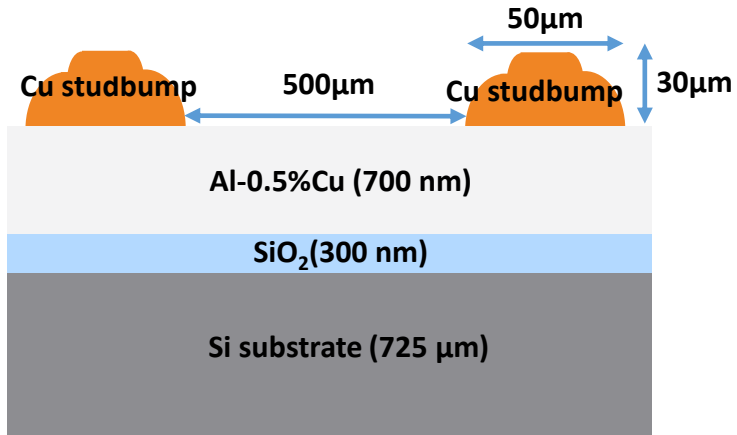


Contamination dans la fabrication microélectronique entraîne des problèmes de fiabilité liés à la corrosion

<p>Contaminated solution of sawing</p>	<p>Presence of humidity and halides</p>
	
<p>Localized corrosion of the pads</p>	<p>Crevice corrosion in confined space</p>

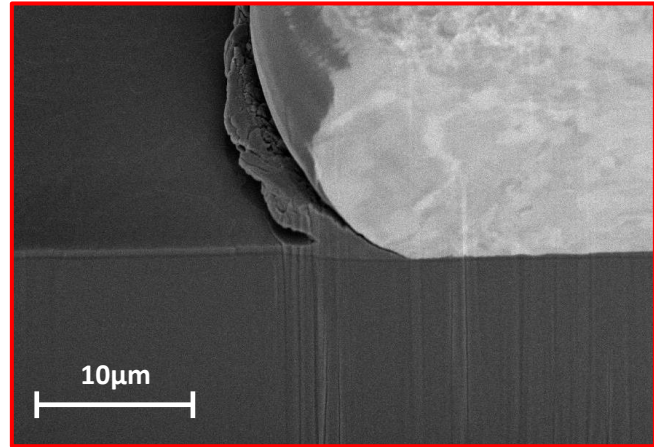
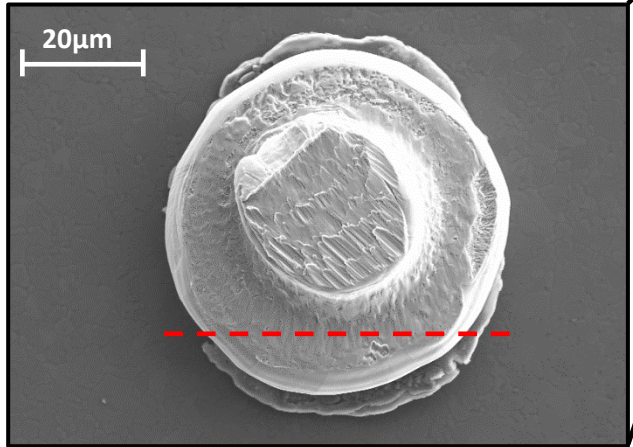


## Interface pad/wire



Paramètres de câblage

Wire type	Cu 99% / 0.8 mils
Bump diameter	50 μm
Bump height	30 μm
Bump shear	31.3 gf
Temperature	175°C



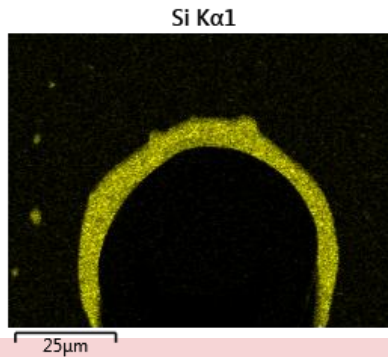
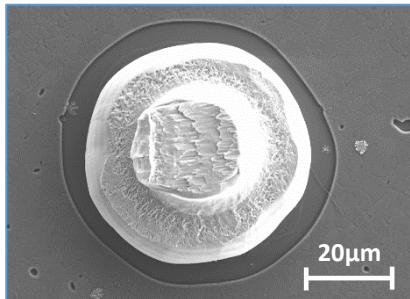
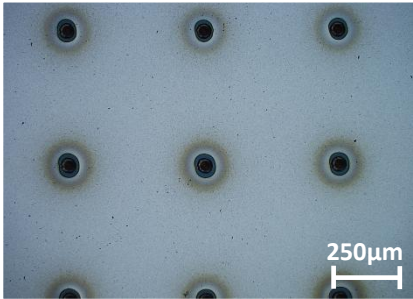
- splash d'Al autour du Cu
- pas d'intermétalliques à l'interface

Micrographie MEB – coupe FIB

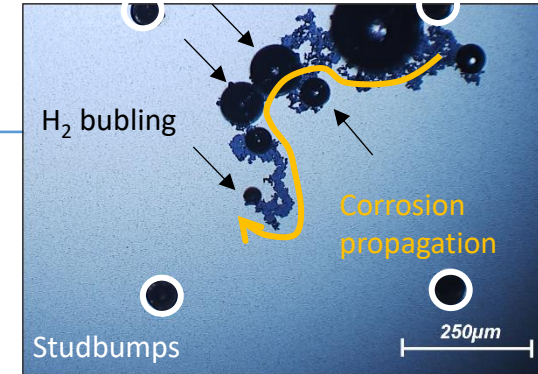
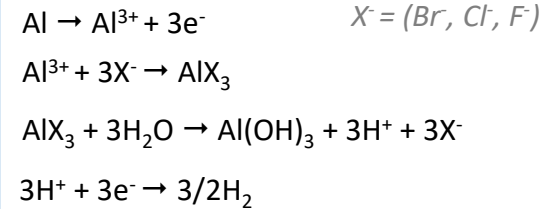
→ Tous les fils sont connectés à un film uniforme : ce n'est pas tout à fait représentatif des **dispositifs réels**.

## Exposition en milieu aqueux contenant des halogénures

1mM F<sup>-</sup> (19.0 ppm)

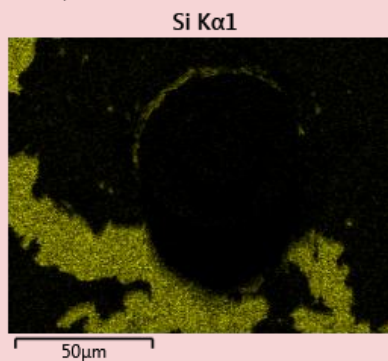
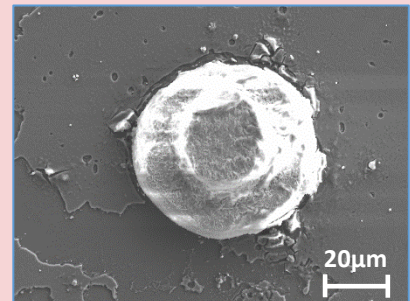
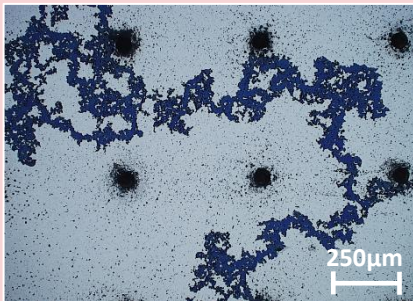


### Couche Al-0.5 % Cu



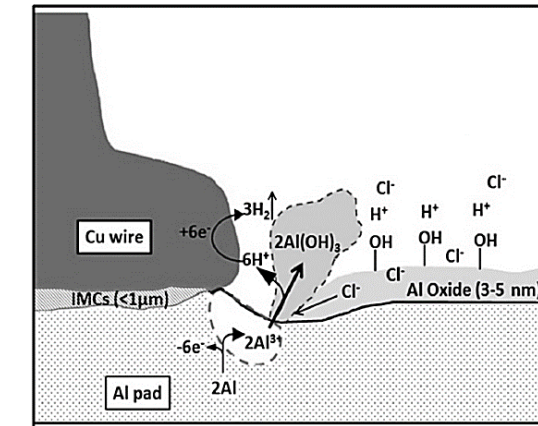
[1] N. Ross et al. *Microelectronics reliability* (2020)  
[2] G.I Kumar et al. *Corrosion and materials degradation* (2021)

1mM Cl<sup>-</sup> (35.5 ppm)

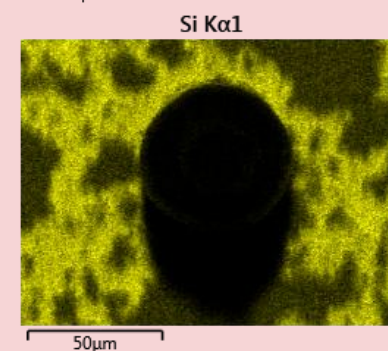
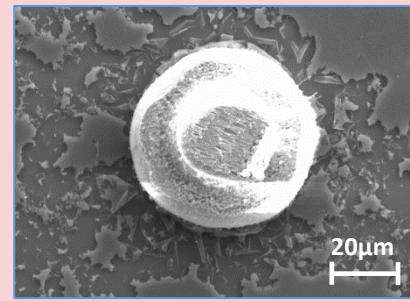
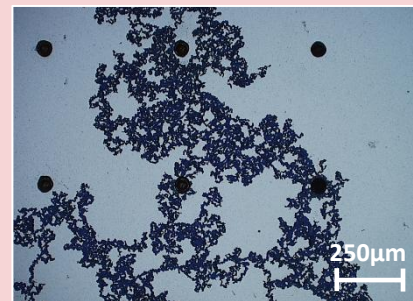


### Solubilité dans l'eau (20°C)

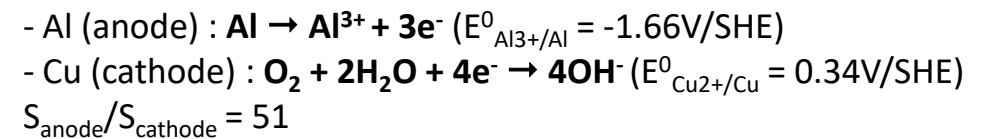
AlF<sub>3</sub> : 0.0053g/L  
AlCl<sub>3</sub> : 450g/L  
AlBr<sub>3</sub> : very soluble  
(Data from Sigma Aldrich SDS)



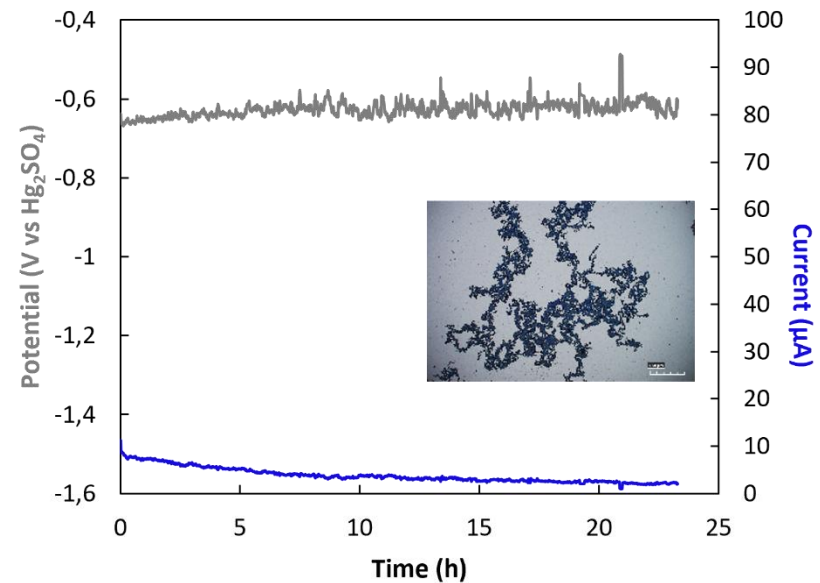
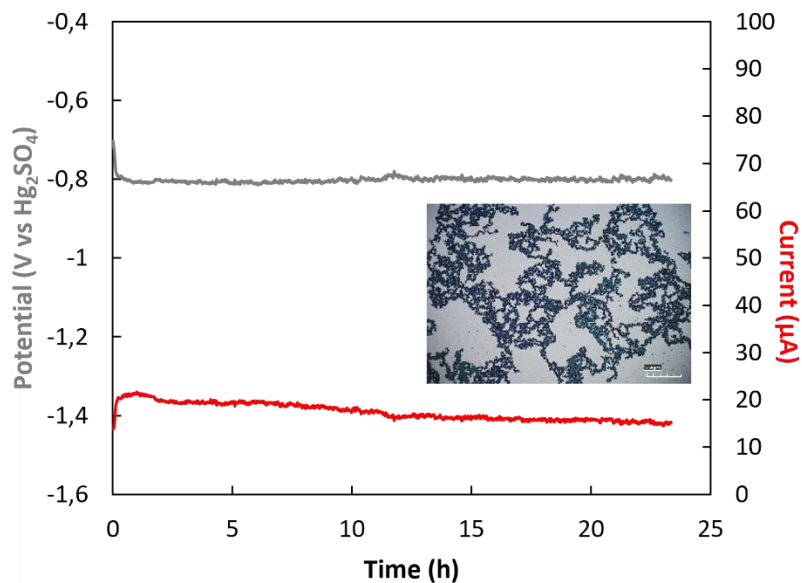
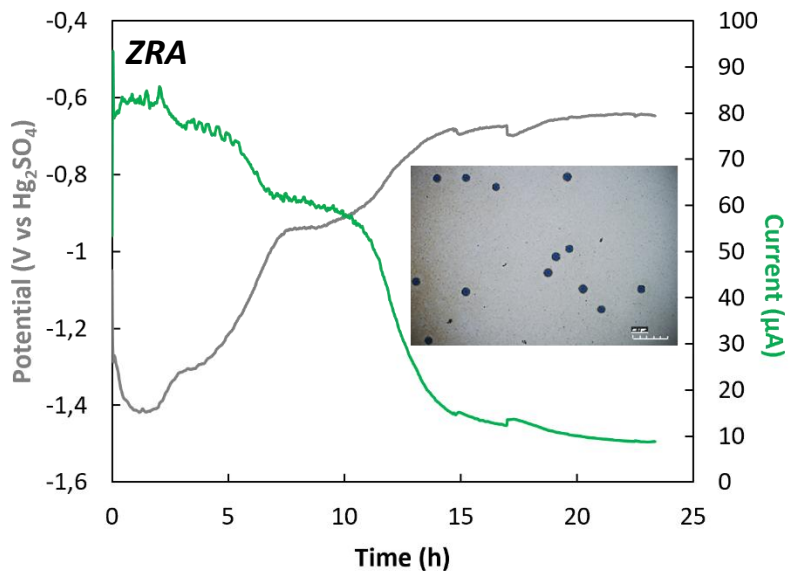
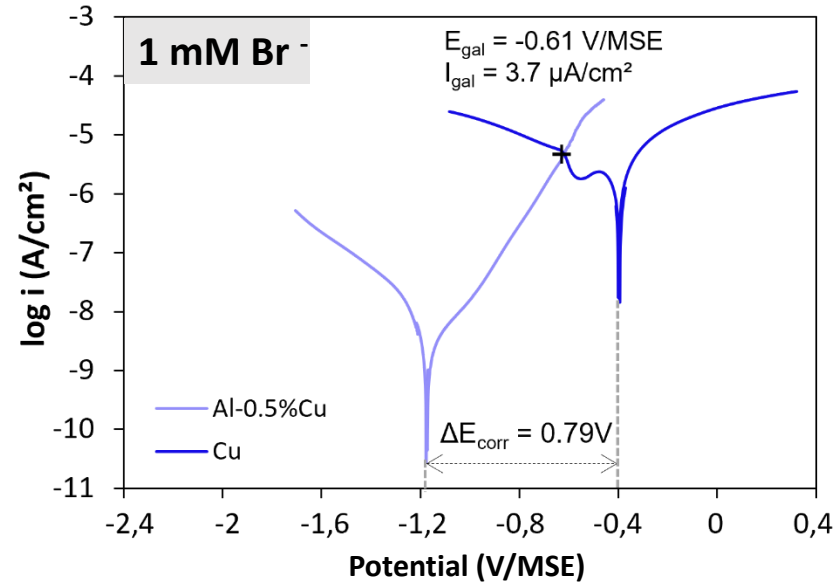
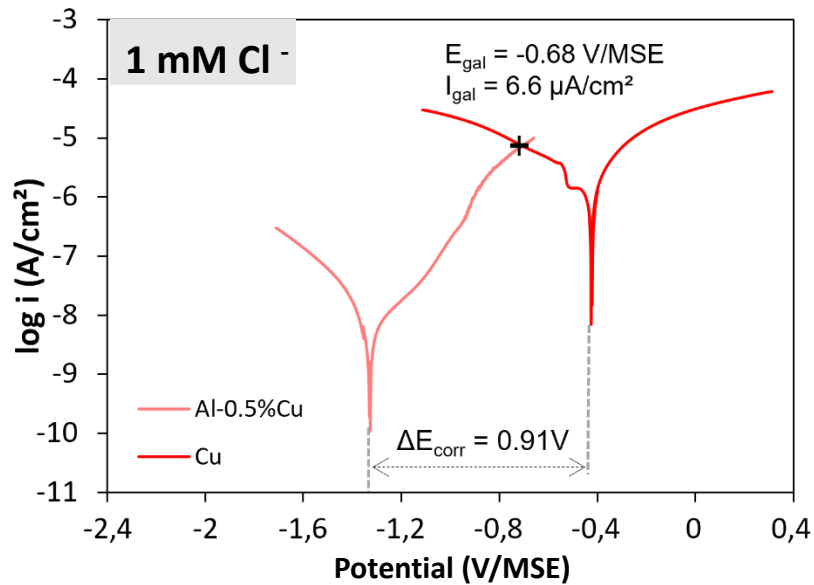
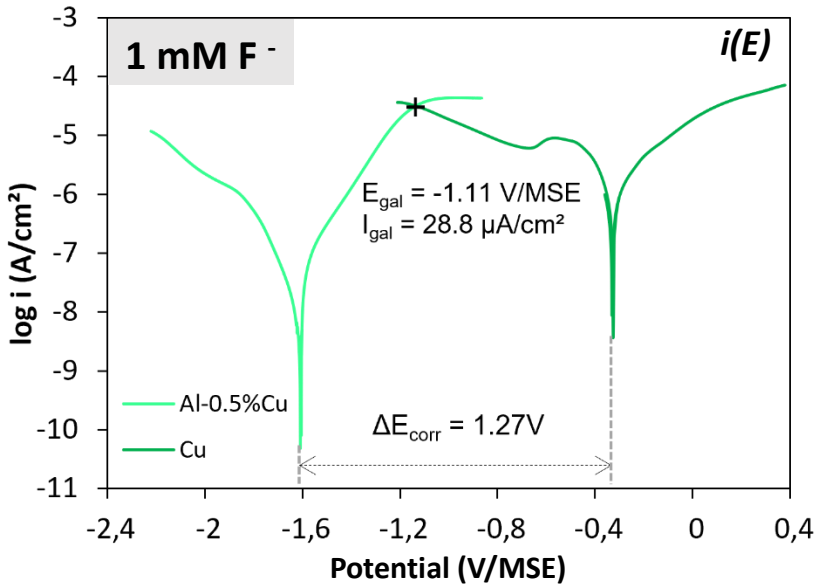
1mM Br<sup>-</sup> (79.9 ppm)



### Couplage galvanique Al/Cu



## Couplage galvanique Al/Cu ( $S_a/S_c = 51$ )



## Effet de la réactivité de surface sur la robustesse

Cu studbump

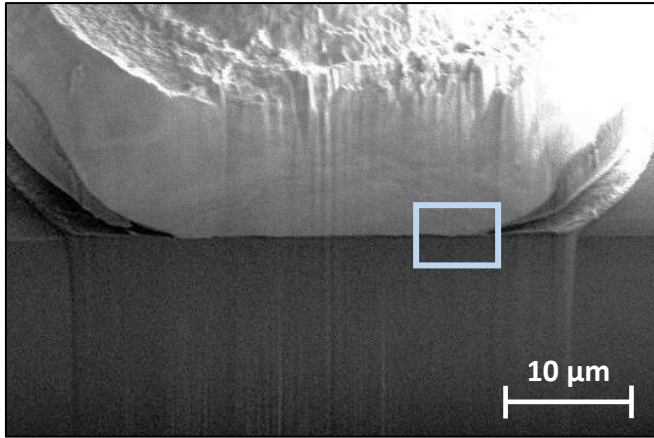
Al-0,5%Cu (700 nm)

SiO<sub>2</sub>(300 nm)

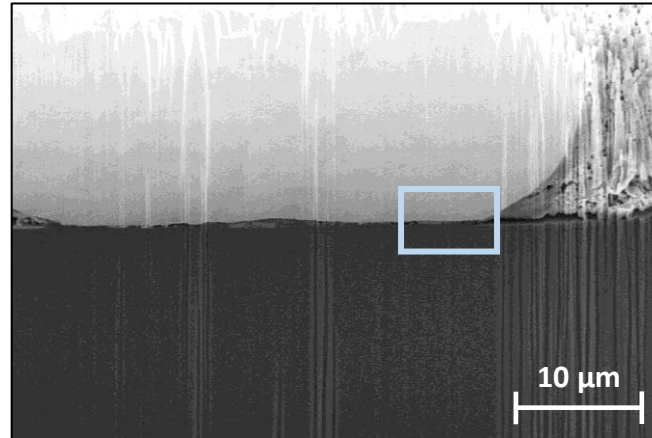
Si substrate (725 μm)

Après 24 h  
d'immersion

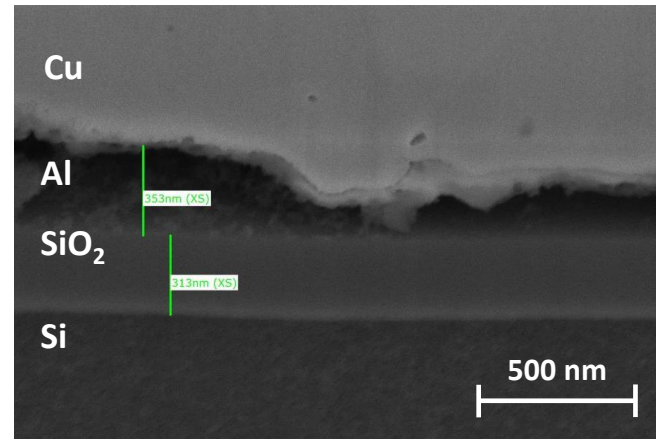
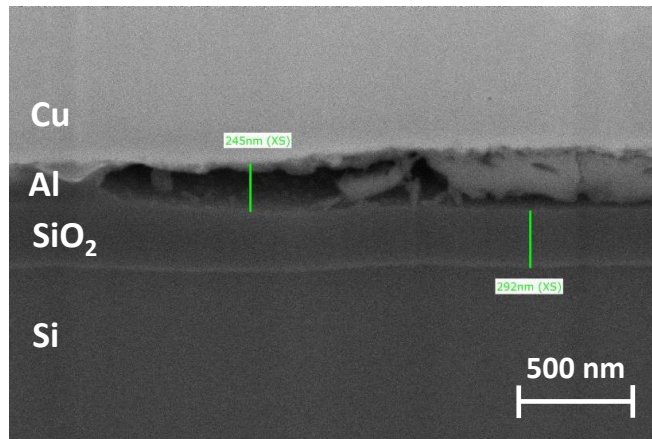
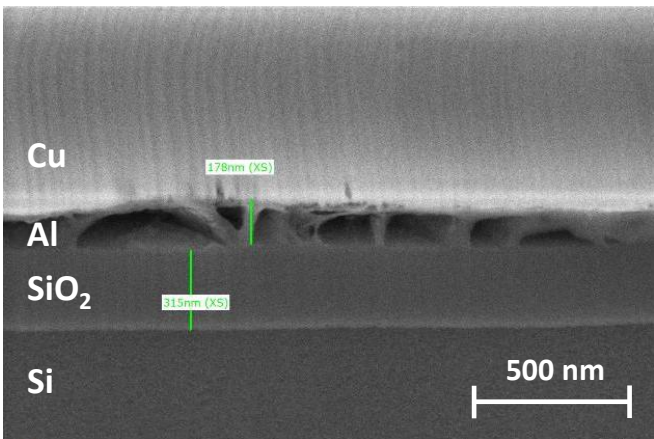
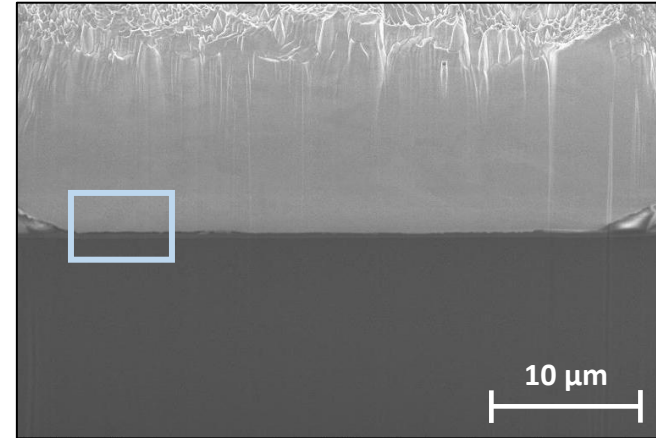
1mM F<sup>-</sup>



1mM Cl<sup>-</sup>

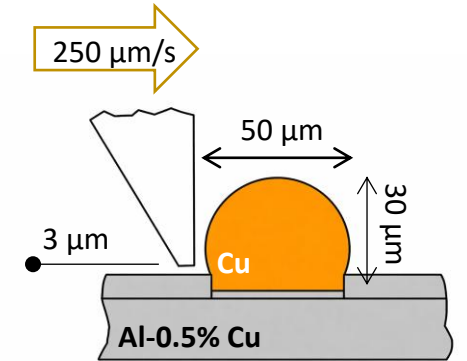
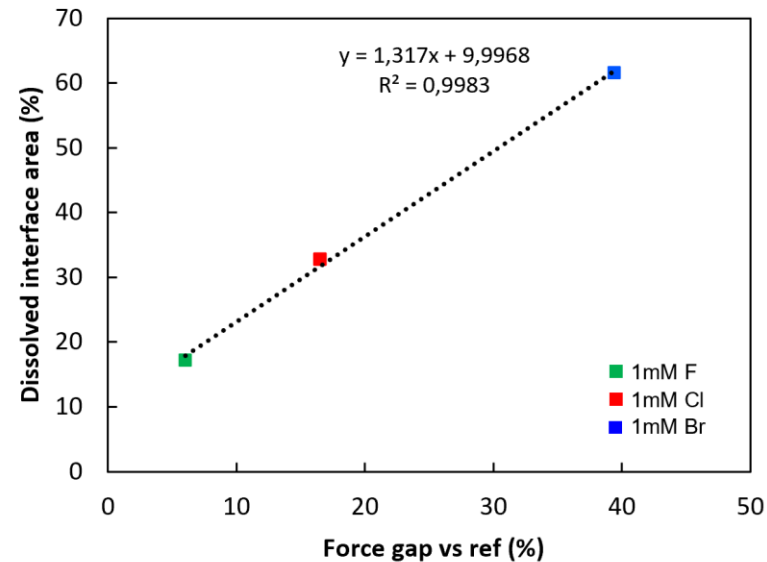
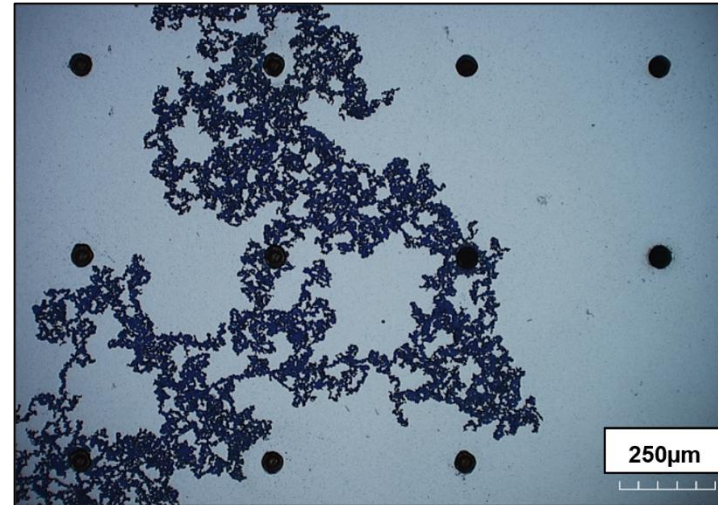
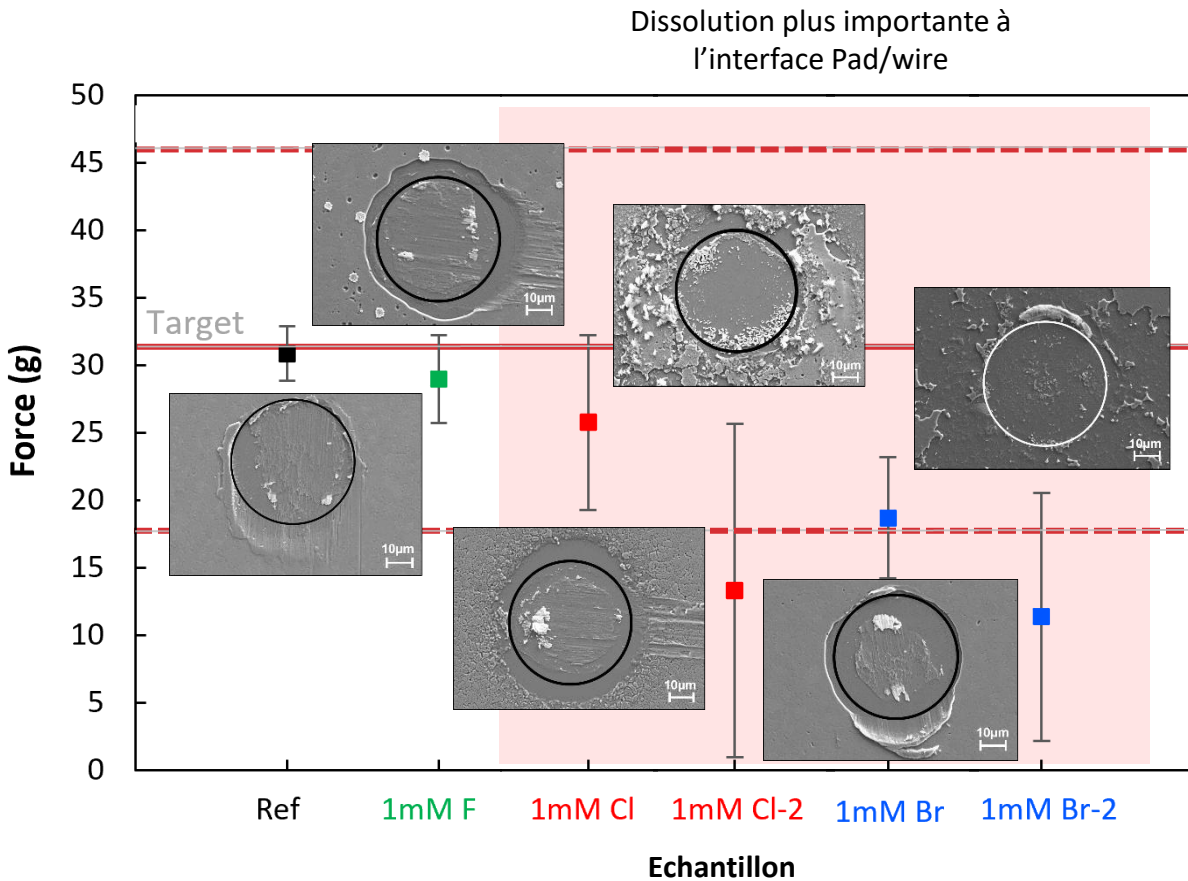


1mM Br<sup>-</sup>



Evaluation de la fiabilité du câblage vis-à-vis des forces mécaniques exercées sur les dispositifs

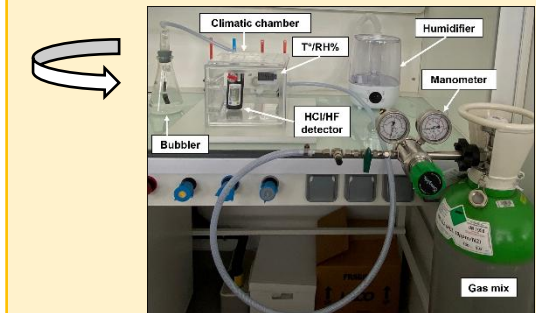
## Ball shear tests



- Spec JESD22-B117B
- 20 bumps / échantillon

### Conclusions

- Sensibilité à la corrosion pour de faibles [X<sup>-</sup>] (qqes 10<sup>aines</sup> ppm)
  - Différents mécanismes de corrosion induits par le couplage galvanique dans les milieux contenant les X<sup>-</sup>
- ⇒ Corrélation directe avec les problèmes de fiabilités



# Cas 2 : Solution de protection de la micro-puce électronique

Protection du pad de cuivre avant l'opération de câblage

Thèse de Romain Haeffele, 2021-2024  
L. Broussous, B. Normand



Publication in progress

Contraintes techniques

Substrat "instable"

Hillocks de cuivre induits par des contraintes mécaniques

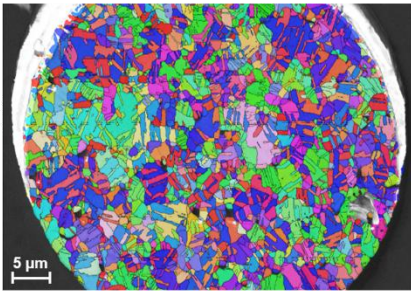
Revêtement "souple"

Environnement agressif

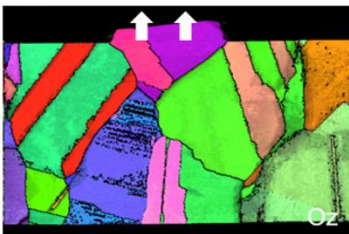
Humidité, température, contamination aux halogénures

Revêtement stable et couvrant

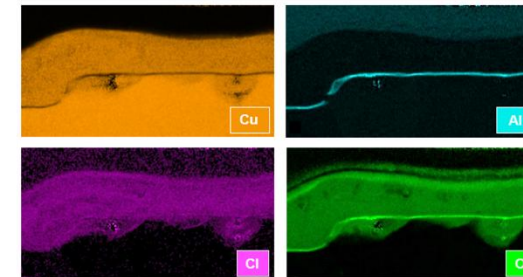
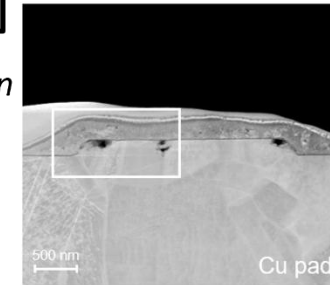
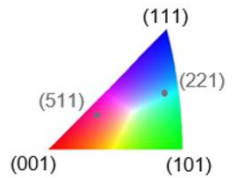
Couche PECVD  
Si(C)N:H PECVD



IPF Z of a bare copper bond pad



Cross-section of a copper hillock



TEM-EDS analysis of the corrosion products after HTS test

## Motivation pour la sélection de Si(C)N:H

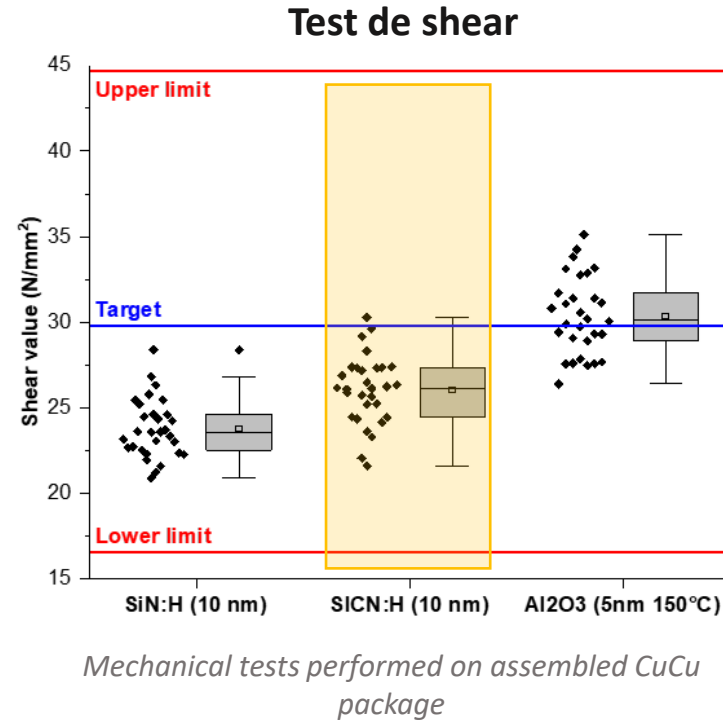
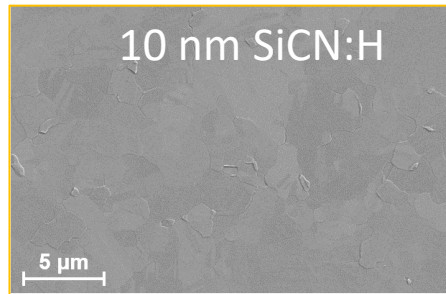
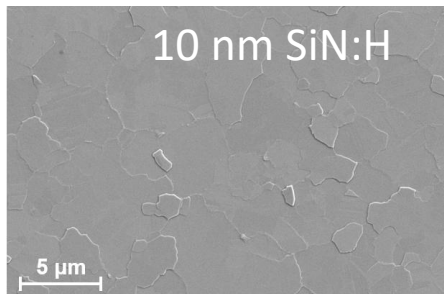
### Films fins de SiN:H et SiCN:H

- ✓ Disponibilité industrielle
- ✓ Tests de compatibilité pour le câblage par fils
- ✓ Température de dépôt <400°C
- ✓ Effet de l'azote sur la corrosion localisée [3]



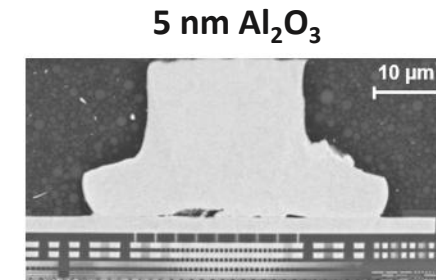
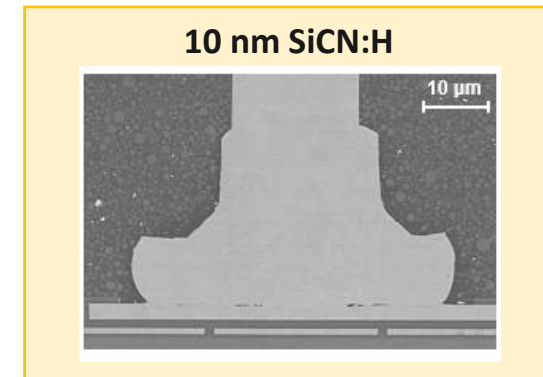
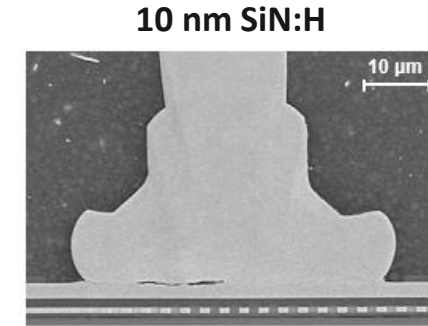
### SiCN:H thin films

- ✓ Meilleures propriétés mécaniques
- ✓ Temps de dépôt plus faible (réduction des hillocks)



Materials	SiN:H	SiCN:H	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Hardness (GPa)	20 ±1	12 ±1	12.3 ±0.1

Berkovich hardness of the studied thin films

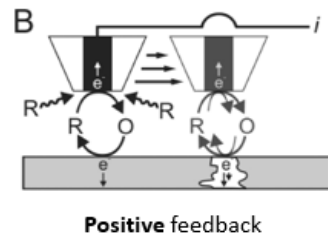
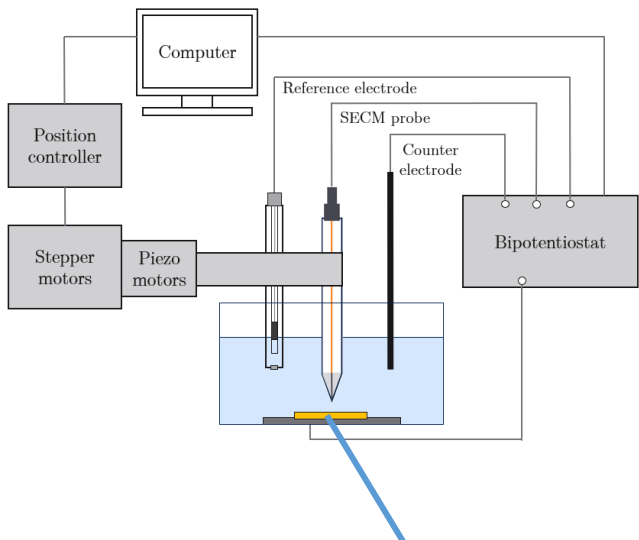


SEM cross section after wire-bonding trials for different protective layers

[3] Normand (2004). Nitrogen contribution in passivity of high nitrogen stainless steels: passivation mechanisms and extrapolation to HNS. pp. 509–520.

# Cas 2 : Solution de protection de la micropuce électronique

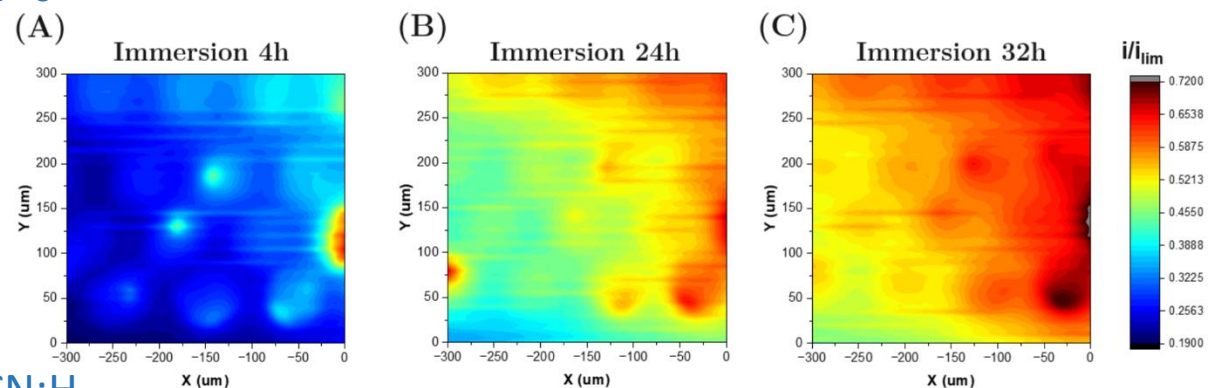
## Mesure de la réactivité sur systèmes réels



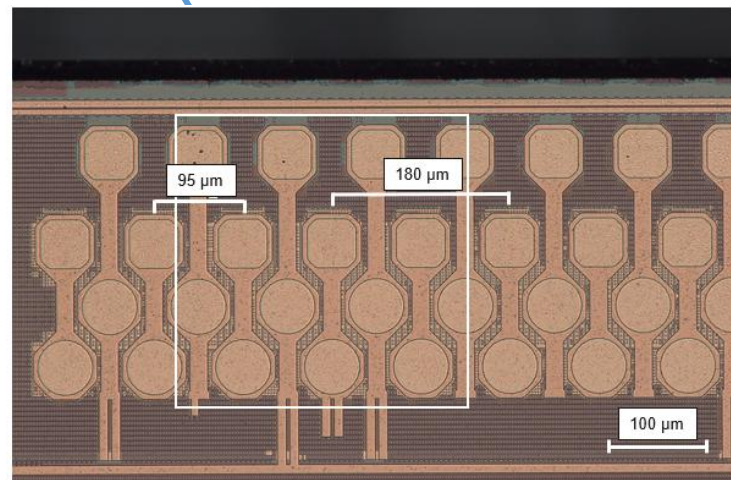
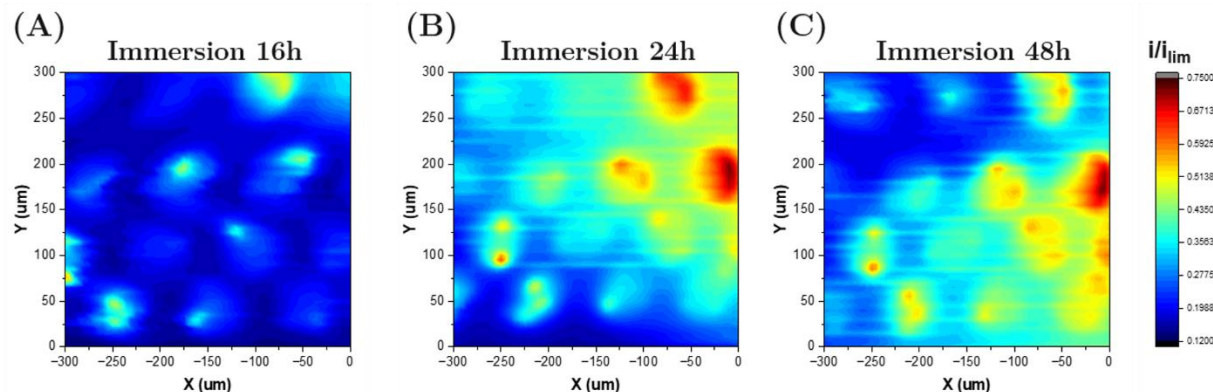
10 nm  $Al_2O_3$

### Cartographies SECM (Scanning ElectroChemical Microscopy)

NaCl 5 mM + FeCMeOH 2 mM



10 nm SiCN:H



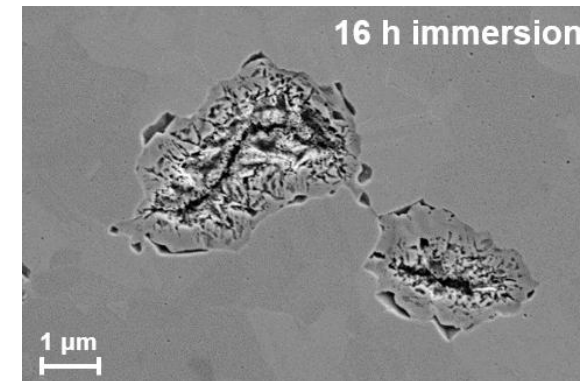
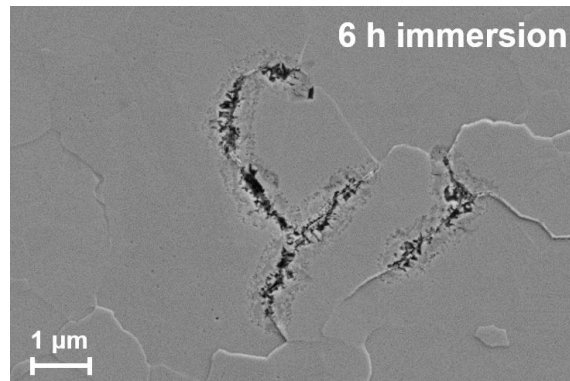
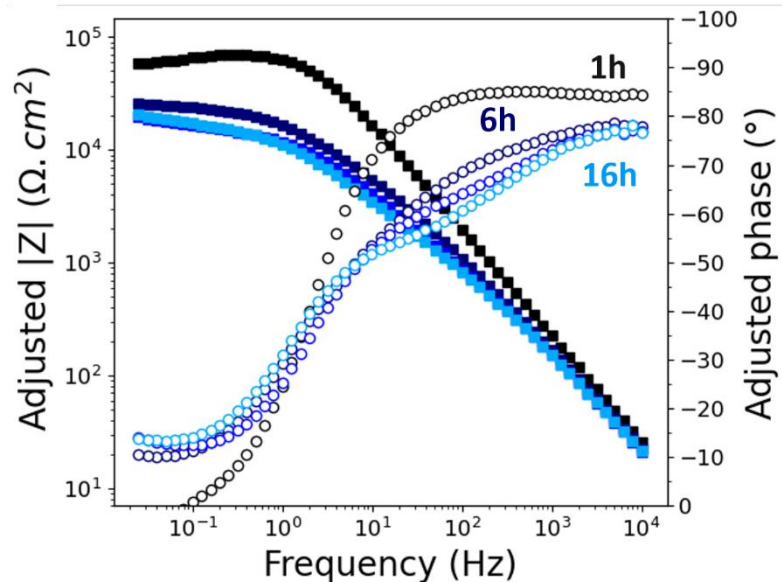
Optical image of the scanned area

# Cas 2 : Solution de protection de la micropuce électronique

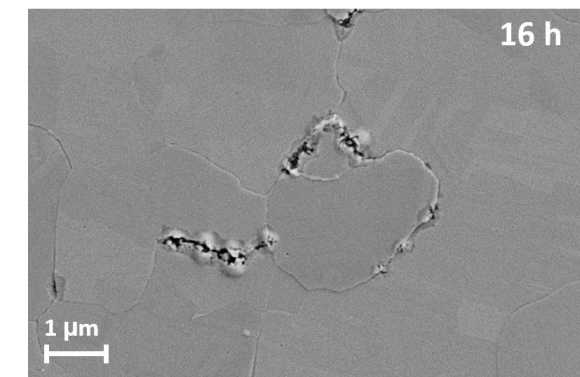
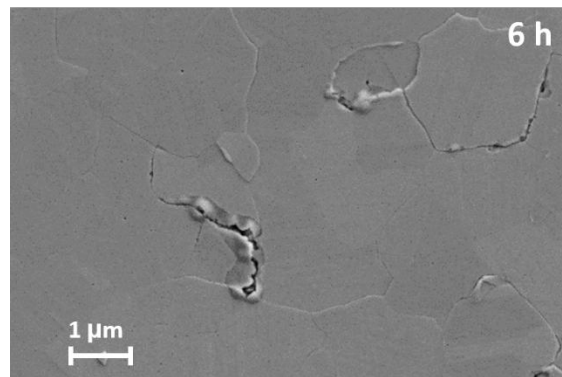
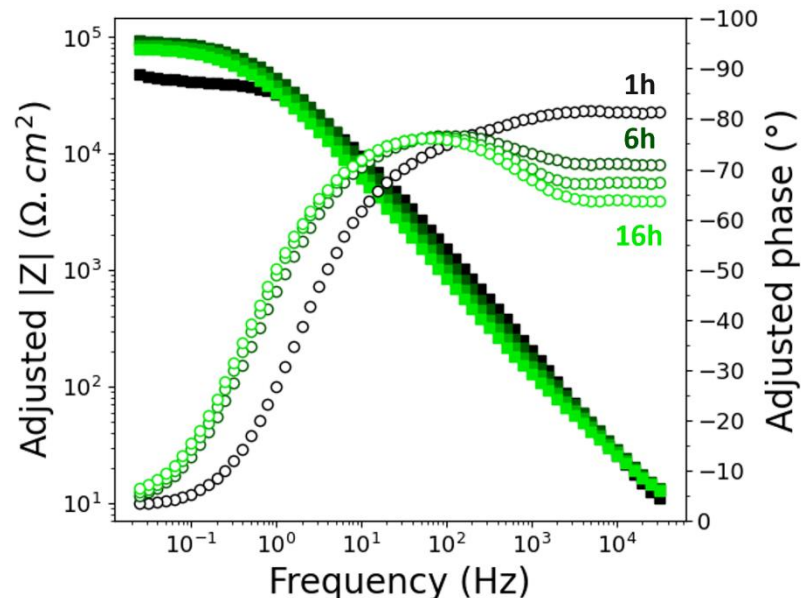
## SiCN:H sur Cu électrodéposé

SiCN:H  
Cu ECD

10 nm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



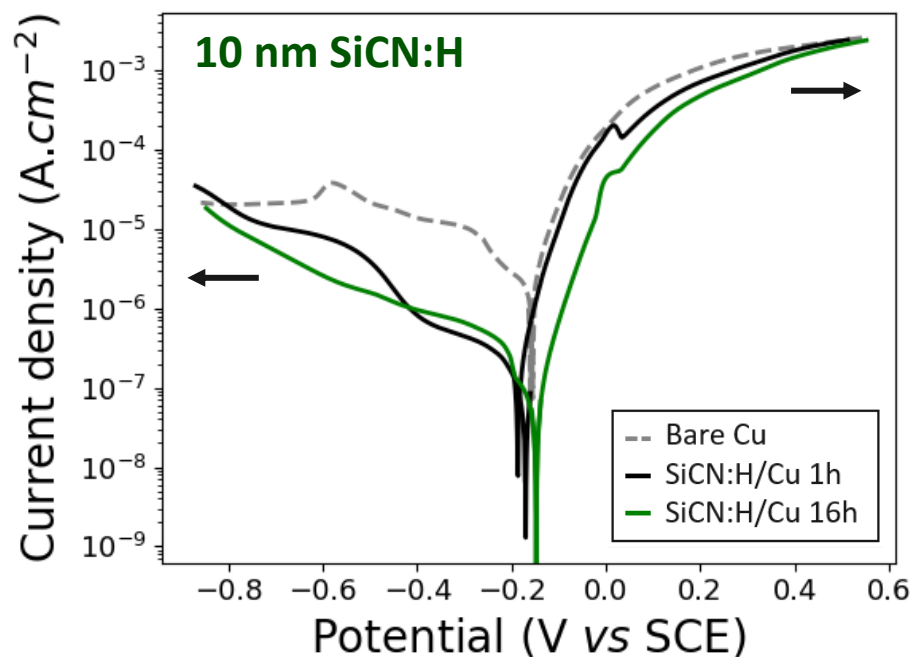
10 nm SiCN:H



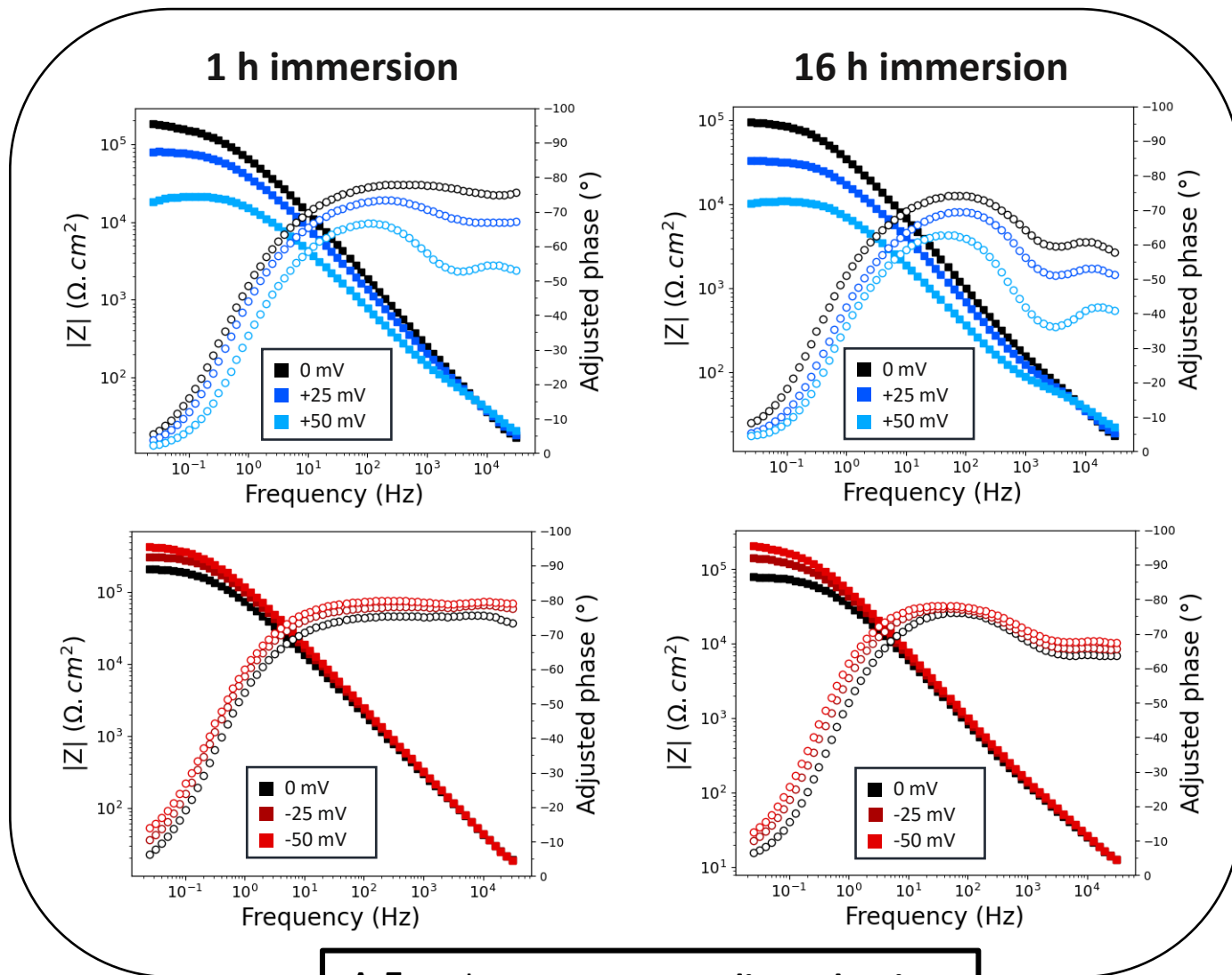
# Cas 2 : Solution de protection de la micropuce électronique

## Etude du mécanisme de corrosion

NaCl 0,1 M



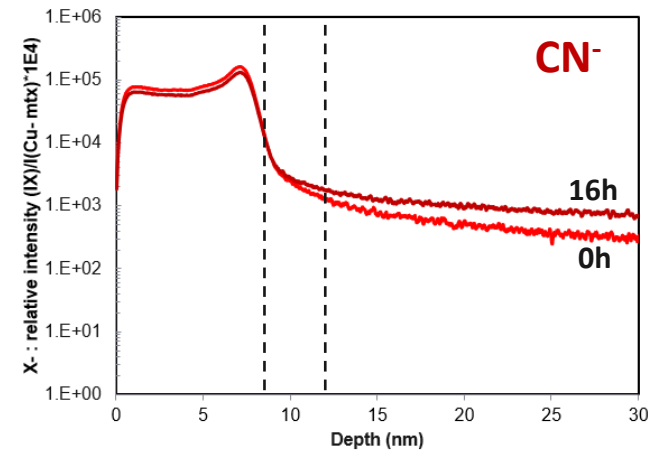
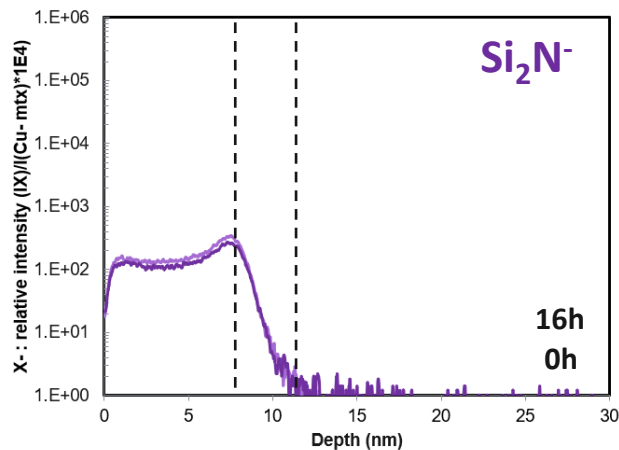
Déplacement de  $E_{corr}$  vers des valeurs plus anodiques  
 Diminution de la densité de courant avec le temps  
 d'immersion à l'OCP



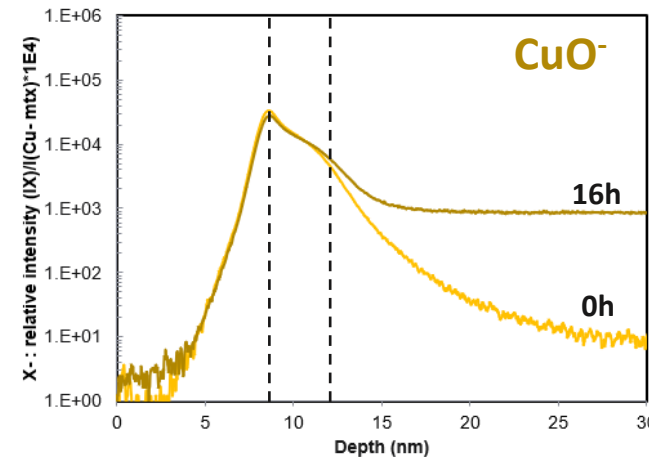
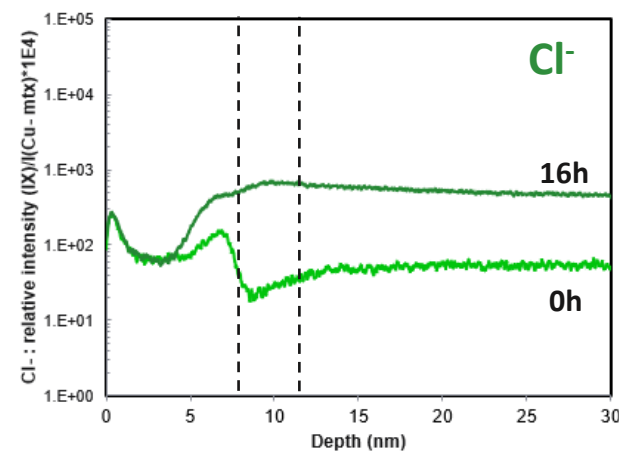
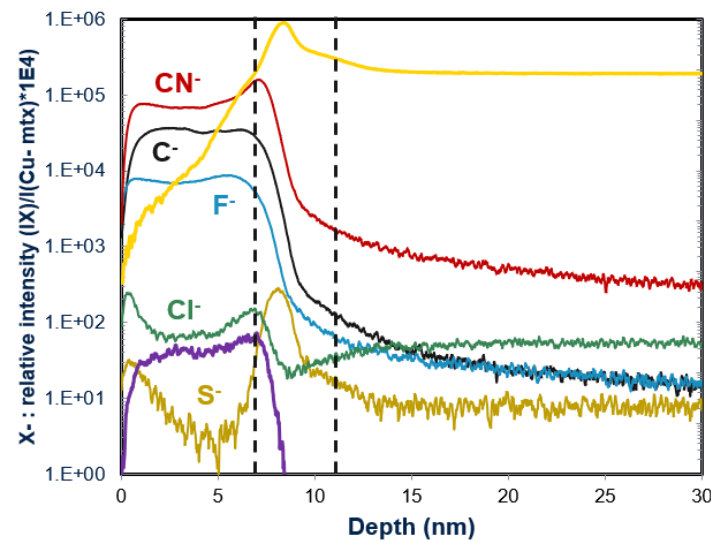
A  $E_{corr}$ , le processus anodique domine.

# Cas 2 : Solution de protection de la micropuce électronique

## Analyse ToF-SIMS des systèmes revêtus



La couche SiCN:H layer n'est pas modifiée après l'immersion dans l'électrolyte.

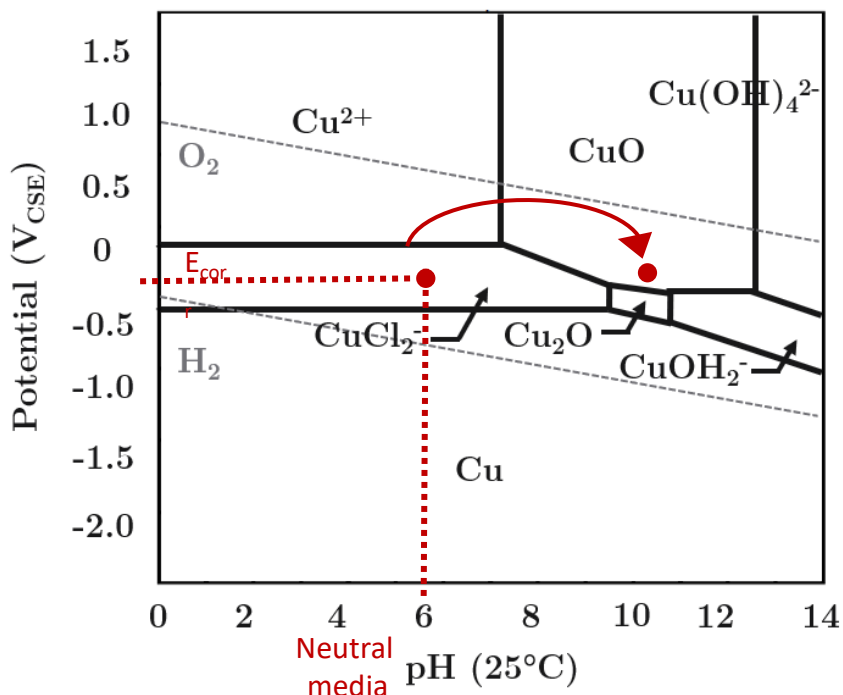


Oxydation du Cu à  $E_{corr}$

## Proposition du mécanisme de corrosion

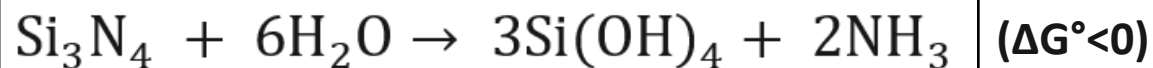
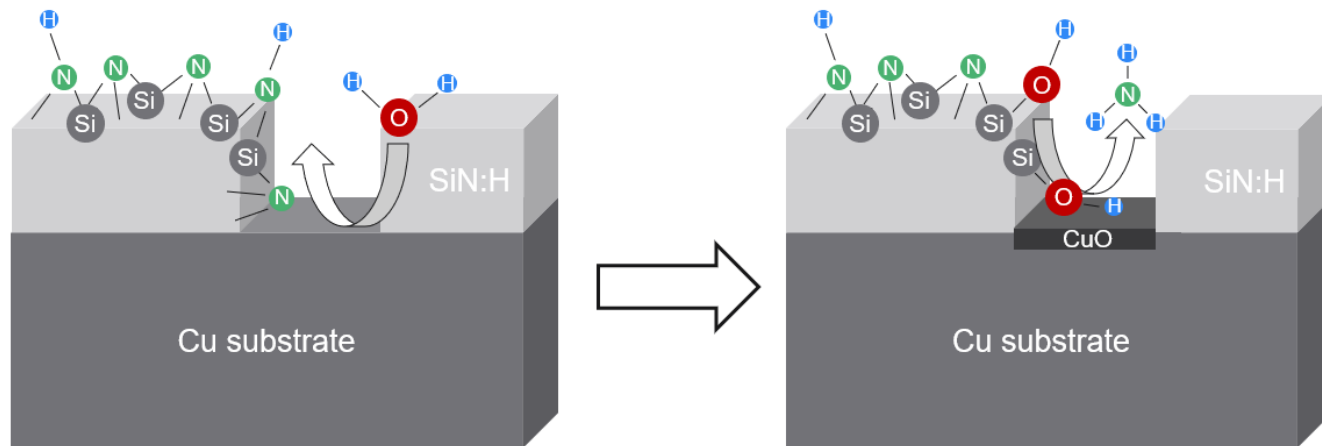
A pH=6 et à  $E_{corr}$ , la formation de l'oxyde de Cu n'est thermodynamiquement pas possible.

→ Augmentation locale du pH ?



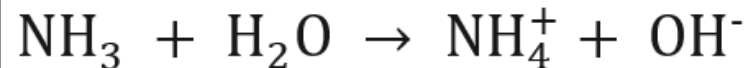
Pourbaix diagram of copper-chloride-water system at 25°C  
 ( $[Cu^{2+}] = 10^{-6} M$  &  $[Cl^-] = 0.2 M$ )

### Mécanisme proposé :



L'ammoniaque étant une base faible, elle accepte un proton pour former l'ion ammonium

→ Augmentation locale du pH



### Perspectives

- Evaluation du risque de l'oxydation contrôlée
  - Effet sur les propriétés électriques
  - Impact sur la fiabilité à long terme

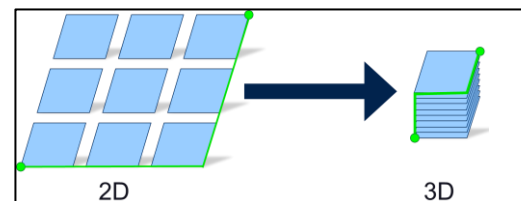
# Cas 3 : effet de la microstructure du Cu pour le collage hybride à basse T

Thèse de Mathieu Loyer, en cours

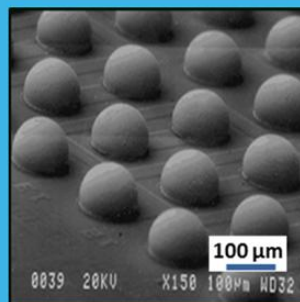
E. Deloffre, S. Petitdidier,

Maria-Luisa Calvo-Munoz, B. Normand

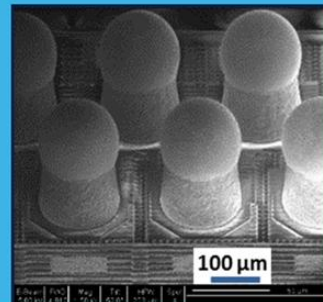
Collage hybride à basse température



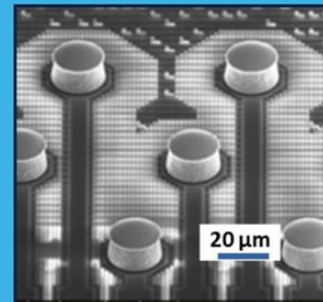
Publication in progress



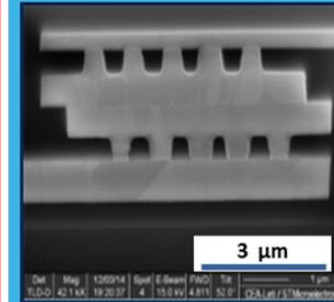
Solder Balls  
Pitch min: 140 µm



Copper Pillars  
Pitch min: 80 µm



Micro Pillars  
Pitch min: 10-20 µm



Hybrid bonding  
Pitch min: < 3 µm

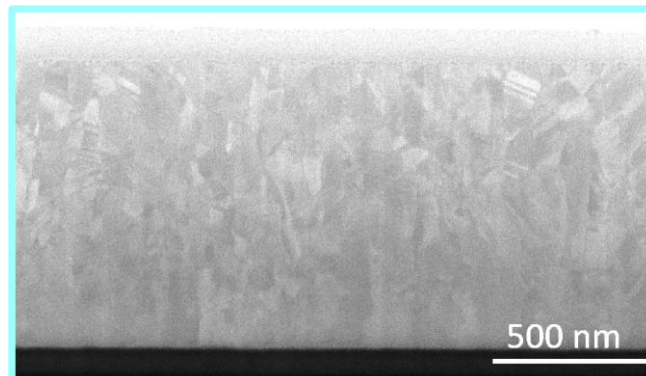
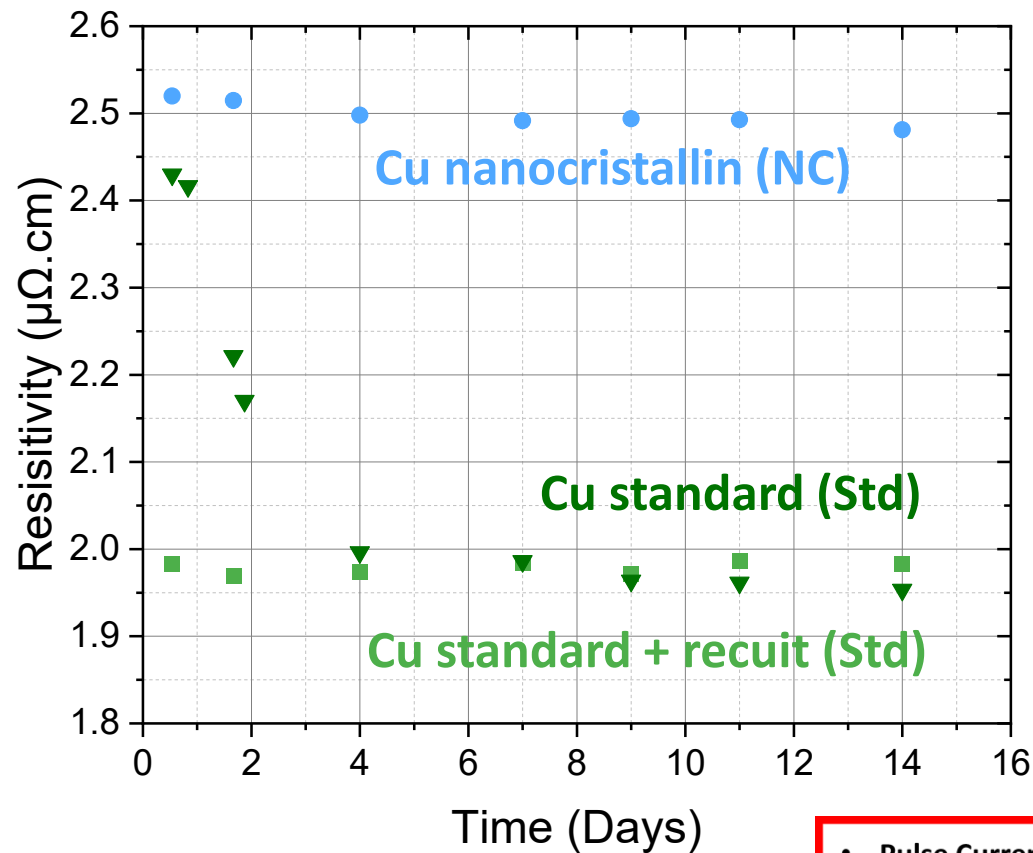
Interconnects pitch size reduction

[1]



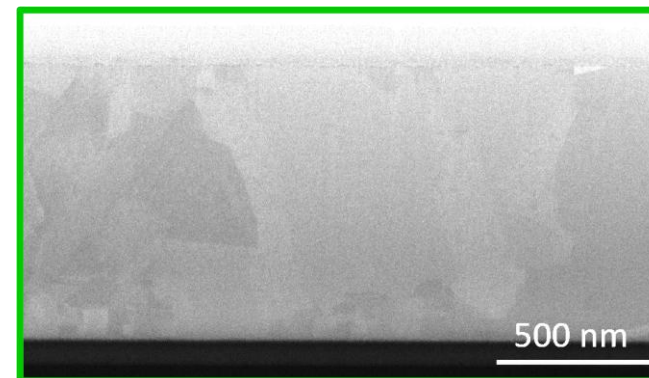
# Cas 3 : effet de la microstructure du cuivre pour le collage hybride à basse T

## Effet de la microstructure sur la résistivité



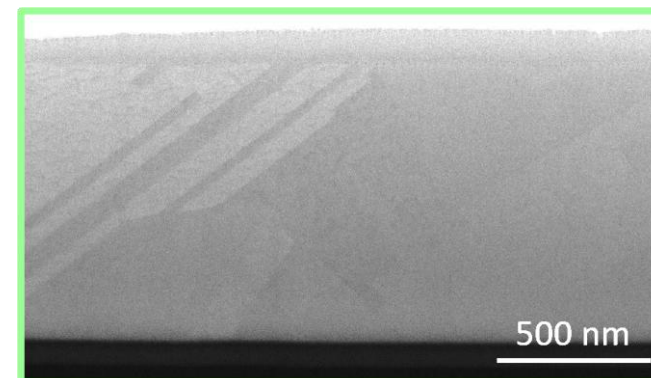
Le cuivre nanocrystallin reste stable pendant plusieurs jours, voire plusieurs mois, selon les paramètres spécifiques du procédé.

**Courant pulsé**

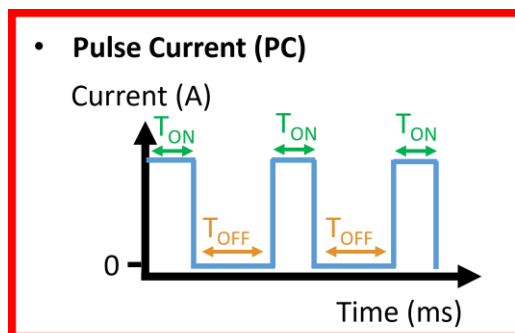


Le cuivre standard subit un recuit spontané dans les 2 à 3 jours suivant son dépôt.

**Courant direct**

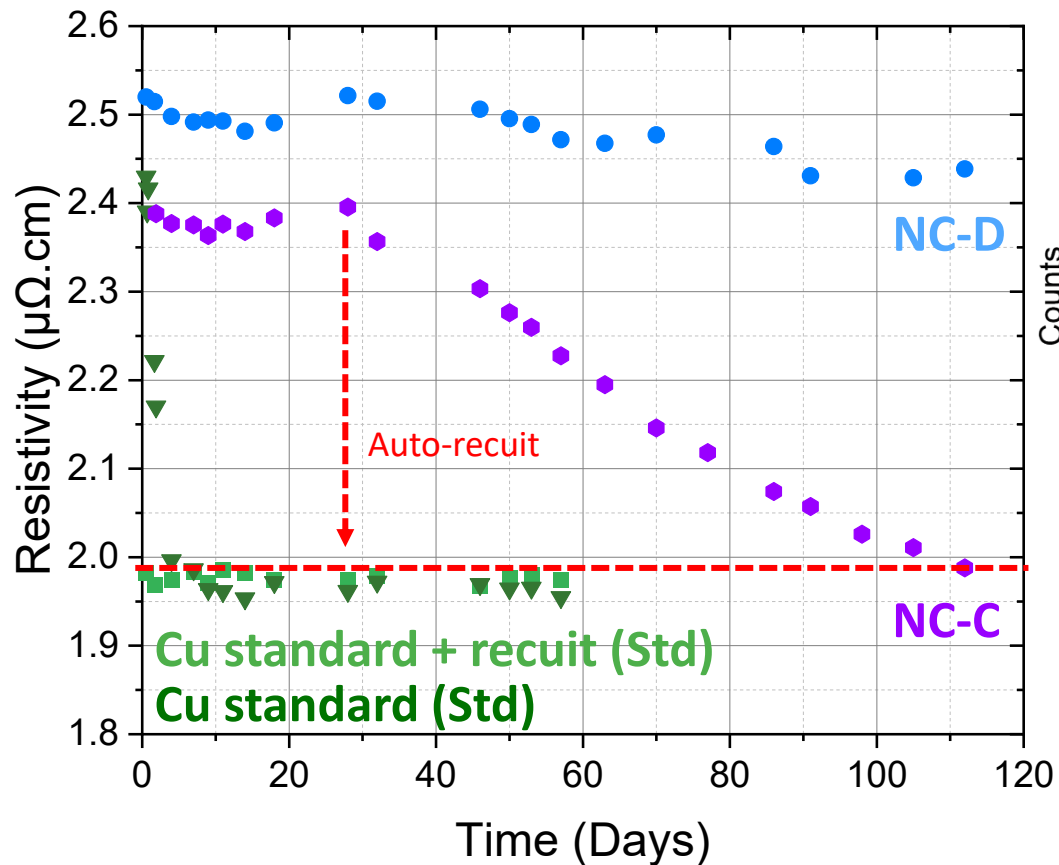


Le cuivre auto-recuit ou recuit thermiquement présente une résistivité d'environ 2 μΩ.cm.



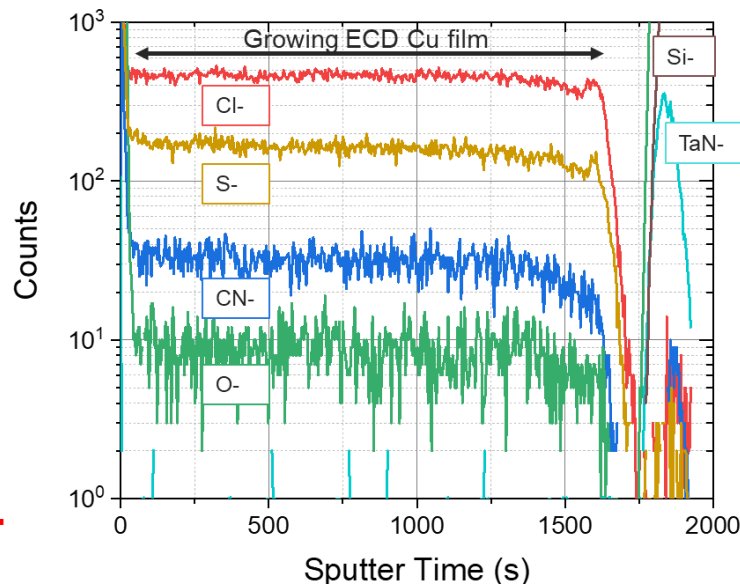
✓ Sélection de la μstructure nanocrystalline  
-> Effet des paramètres du dépôt

## Effet de la microstructure sur la résistivité



Amélioration du maintien de la résistivité sur plus de 3 mois.

### Cu nanocristallin



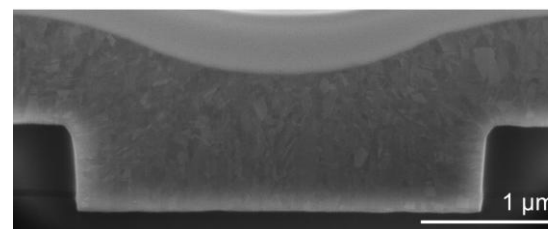
- Répartition importante des impuretés dans l'épaisseur de la couche de Cu.
- Taille moyenne de grain 35 nm sans orientation spécifique

### Perspectives

- Avant collage : Auto-recuit rapide pour les cavités de plus de 2  $\mu\text{m}$ , et protusion du Cu pour les plus petites zones de contact et creux pour les plus grandes après l'étape de la CMP
- Après collage : Caractérisation de l'oxyde interfacial et fiabilité
- Essais électriques sur les dispositifs et simulations électriques



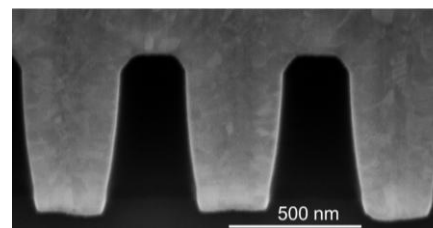
3  $\mu\text{m}$



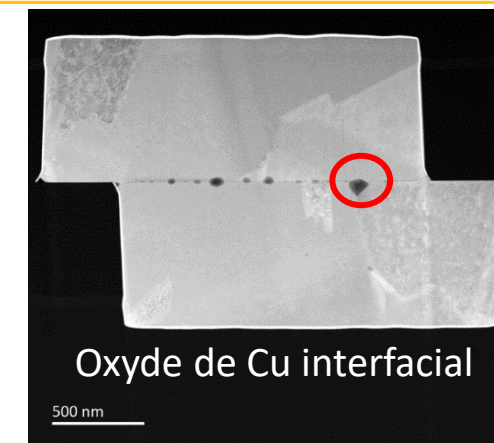
1  $\mu\text{m}$



0.3  $\mu\text{m}$

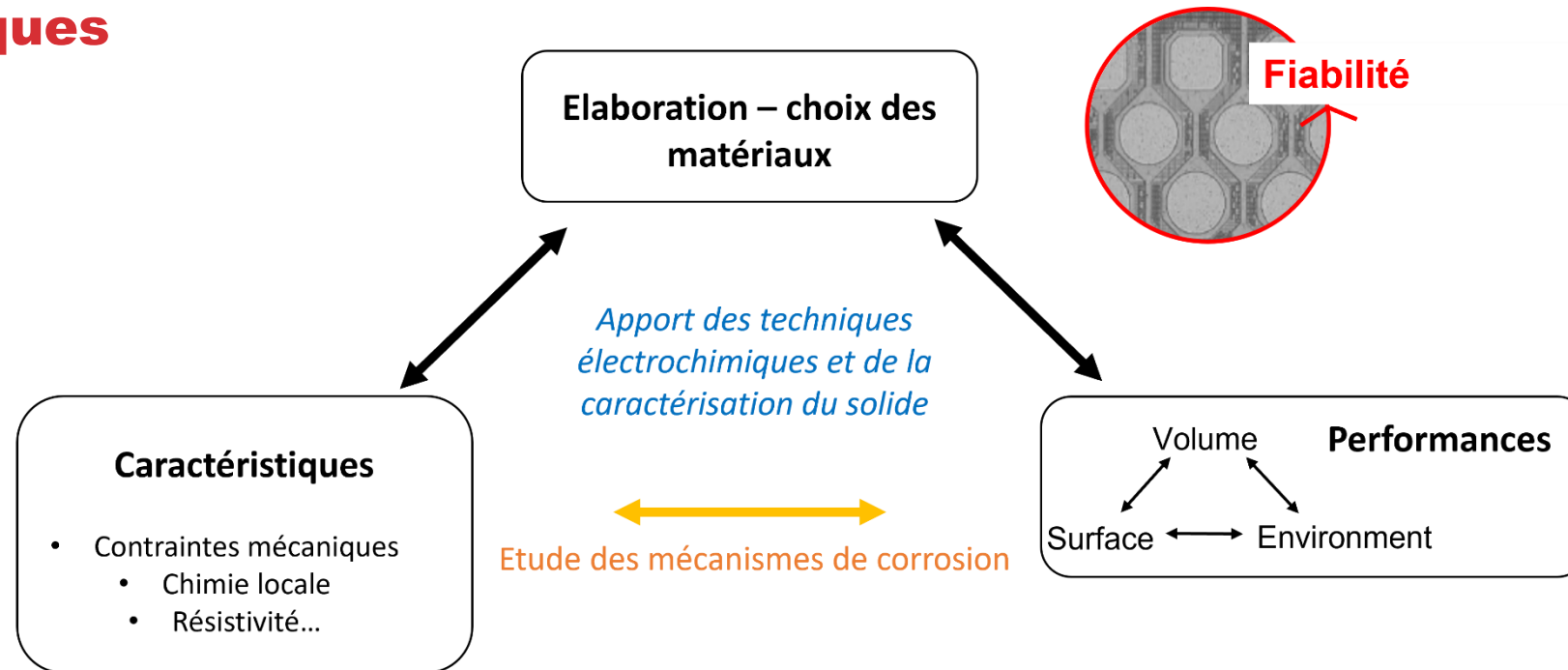


500 nm



500 nm

## Approche systémique et protection contre la corrosion dans les dispositifs microélectroniques



- Rôle des halogénures dans les mécanismes de dégradation des interconnexions en cuivre.
- La compréhension du mécanismes de corrosion permet d’orienter le choix de revêtements de protection adaptés aux contraintes thermiques des procédés.
- La maîtrise de la microstructure du cuivre apparait est le levier clé pour améliorer la fiabilité des dispositifs.

# NRTW 2026

## National Reliability Technology Workshop

Mercredi 1<sup>er</sup> & jeudi 2 avril 2026 | Grenoble

# merci pour votre écoute !

Organisé par :



Financé par :

