

# Apport du microscope à force atomique pour l'étude de certains phénomènes relatifs aux micro-contacts électriques

M. Vincent<sup>1,2</sup>, S.W. Rowe<sup>1</sup>, C. Poulain<sup>2</sup>, D. Mariolle<sup>2</sup>, L. Chiesi<sup>1</sup>, F. Houzé<sup>3</sup>, J. Delamare<sup>4</sup>



<sup>1</sup> Schneider Electric Industries, 38050 Grenoble

<sup>2</sup> CEA-Leti, MINATEC Campus, 17 rue des Martyrs 38054 Grenoble

<sup>3</sup> LGEP, UMR CNRS-Supélec 8507, 11 rue Joliot-Curie, 91190 Gif-sur-Yvette

<sup>4</sup> Grenoble Electrical Engineering Lab, UMR CNRS INPG-UJF 5269, 38042 Saint Martin d'Hères



## CONTEXTE

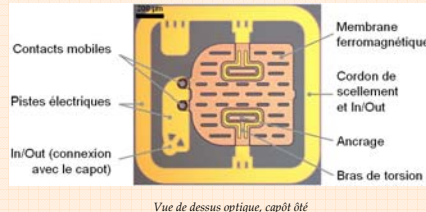
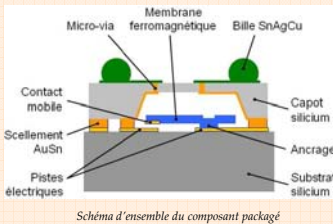
Miniaturisation dans le domaine de la commutation électrique : apparition sur le marché de **micro-interrupteurs en technologie MEMS** (Radant, Omron, Asulab...) [1-3]

MAIS **fiabilité et durée de vie limitées par la dégradation du contact électrique**, avec des problématiques spécifiques à la taille (sub)micrométrique du contact :

(i) faibles forces d'appui, (ii) surfaces de contact réduites, (iii) conducteurs en films minces, (iv) rôle prépondérant de la rugosité

- Les solutions issues des études à l'échelle macroscopique ne sont pas directement transposables
- Nécessité de comprendre les mécanismes de défaillance de ces dispositifs, en reconsidérant les phénomènes à l'échelle appropriée : thèse CIFRE M.VINCENT [4]

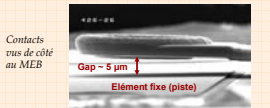
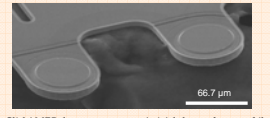
## LE MICRO-INTERRUPTEUR Schneider Electric / CEA-Leti



Principales caractéristiques :

- Actionnement magnétique extérieur
- Double contact, simple coupure
- 3 revêtements étudiés : Au, Ru, W
- 3 calibres de courant / tension à commuter : 10  $\mu$ A / 3 Vdc, 1 mA / 5 Vdc, 10 mA / 14 Vdc
- Temps de commutation < 100  $\mu$ s
- Fréquence maxi d'utilisation 1 kHz

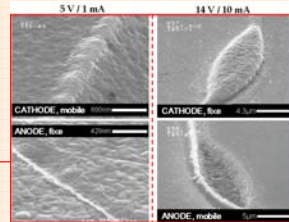
Application principale en détection de position



## TESTS D'ENDURANCE PAR CYCLAGE

répétition de manœuvres de fermeture/ouverture sous sollicitation électrique (« hot-switching »)

- Évaluation des performances et de la fiabilité
- Mise en évidence de modes de défaillance
- > 5 mécanismes principaux identifiés
- Parmi ceux-ci : des **transferts de matière**
- toujours orientés de l'anode vers la cathode (que celles-ci soient fixes ou mobiles)
- modérés sous 5V/1mA, importants sous 14V/10mA

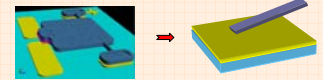


D'après la bibliographie :

- Plusieurs cas déjà observés de transferts de matière dans des conditions courant / tension similaires [5-7]
- Mais aucune explication convaincante quant à leur origine

En particulier :

- la survenue d'un arc électrique est impossible sous 5V/1mA
- pour des distances inter-électrodes submicrométriques, les tensions minimales de claquage rapportées sont de 20-25 V



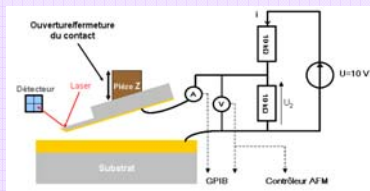
- Raideur adaptée (forces qq 10-100  $\mu$ N)
- Techno bien contrôlée et reproductible
- Modification plus aisée des revêtements
- Bon contrôle de la cinématique de commutation

⇒ Étude de compréhension indispensable, ⇒ Outils privilégiés : nanoindenteur [8-10], AFM [7,11] ⇒ « Levier AFM / plan » = Véhicule-test idéal

## ÉTUDE DU MICRO-CONTACT SIMPLIFIÉ « LEVIER/PLAN » PAR AFM

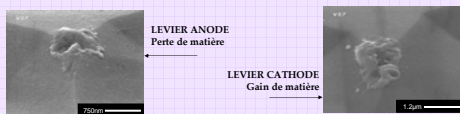
### Montage expérimental utilisé

- Utilisation en mode approche-retrait
- Cycles de commutation avec vitesse plus lente et bien contrôlée
- Structure simplifiée « levier sans pointe / plan » avec revêtements identiques à ceux du MEMS réel



### Reproduction des transferts de matière observés sur les éléments du MEMS

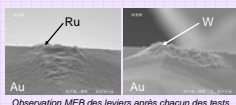
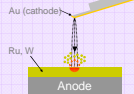
⊙ Contact Au/Au, 300 cycles sous 5V/1mA, vitesse 100 nm/s



- Comportement identique de transfert directionnel, de l'anode vers la cathode
- Phénomène accéléré : dégradation après seulement quelques centaines de cycles (contre plusieurs dizaines de milliers sur le micro-interrupteur réel)

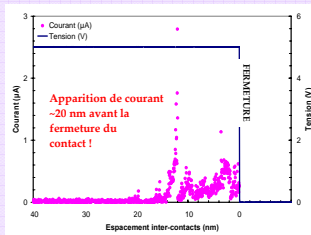
⊙ Contact dissymétrique, 100 cycles sous 5V/1mA, vitesse 30 nm/s

Anode : Plan revêtu Ru ou W  
Cathode : Levier AFM revêtu Au  
100 cycles en hot switching 5V/1mA, 30 nm/s  
Le matériau déposé sur les leviers à l'issue du cyclage est bien le métal revêtant le plan.

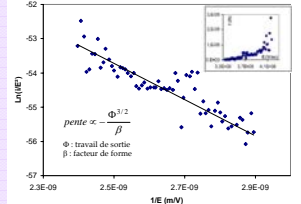


### Étude de la phase de fermeture du micro-contact

Contact Au/Au, 5V/1mA, vitesse 6 nm/s



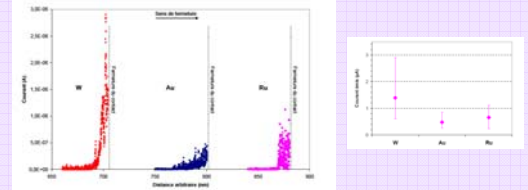
Tracé des pics de courant en coordonnées Fowler-Nordheim



→ Mise en évidence d'un phénomène d'émission électronique par effet de champ

### Influence de la nature du matériau

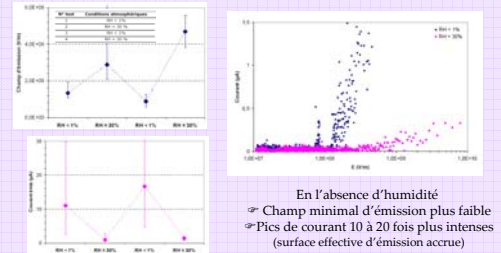
Tests 5V/1mA, vitesse 6 nm/s



- Distance de début d'émission plus faible pour Ru
- Émissions plus intenses pour W

### Influence de l'atmosphère

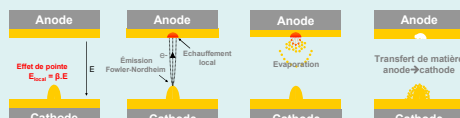
Tests 5V/1mA, vitesse 30 nm/s



- En l'absence d'humidité
- Champ minimal d'émission plus faible
- Pics de courant 10 à 20 fois plus intenses (surface effective d'émission accrue)

### Scénario de transfert proposé :

Champ électrique plus intense au sommet d'aspérités de la cathode  
Émission électronique bombardant l'anode en regard  
Échauffement local sur celle-ci, départ de matière par évaporation  
Dépôt de ce matériau sur la cathode.



## CONCLUSION

L'utilisation détournée du mode approche-retrait de l'AFM a permis une étude fine de la fermeture sous 5V d'un contact simplifié représentatif d'un micro-switch MEMS. Cette étude a mis en évidence un phénomène d'émission par effet de champ pouvant être à l'origine des transferts de matière inexpliqués jusqu'alors. Les différentes observations réalisées ont conduit à énoncer des préconisations pour le choix des revêtements de cathode et d'anode. Ces travaux font ressortir tout l'intérêt de considérer le système « levier/plan » comme véhicule-test pour l'étude des phénomènes dans les micro-contacts.

REFERENCES  
[1] S. Majumder et al., IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, vol. 3, 1935-1938, 2003.  
[2] T. Seki et al., Sensors and Actuators A: Physical, 132 (2), 663-688, 2006.  
[3] F. Gaissar et al., IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 269-273, 2001.  
[4] M. Vincent, Thèse de doctorat de l'Université de Grenoble, 2010.  
[5] H. Kwon et al., International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 231-234, 2007.  
[6] H.S. Newman et al., IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 18 (2), 100-102.  
[7] Z. Yang, Ph.D. Thesis, North Carolina State University, 2008.  
[8] D.J. Dickell et al., IEEE Trans. Comp. Hyb. Manuf. Technol., 30 (1) 75 (2007).  
[9] B.H. Jung et al., J. Microelectr. Microeng., 18 (05)020 (2008).  
[10] P.Y. Duvivier, Thèse de Doctorat de l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2010.  
[11] J. Chen et al., Appl. Phys. 102 (7)074902 (2007).