

**Un cas extrême de contact électrique miniature : l'A.F.M. à pointe conductrice**

L. Boyer, P. Chrétien, F. Houze, R. Meyer et O. Schneegans

Laboratoire de Génie Électrique de Paris  
Supélec  
Plateau du Moulon  
F-91190 Gif-sur-Yvette, France  
[houze@lgep.supelec.fr](mailto:houze@lgep.supelec.fr)

# Un cas extrême de contact électrique miniature : l'A.F.M. à pointe conductrice

Lionel BOYER  
Laboratoire de Génie Electrique de Paris  
Supélec – Plateau du Moulon  
91190 GIF sur Yvette

Pascal CHRETIEN, Frédéric HOUZE,  
René MEYER, Olivier SCHNEEGANS

E-mail : . houze@lgep.supelec.fr

## Résumé

*Dans la recherche de la miniaturisation des contacts électriques, la sonde utilisée dans les microscopes à force atomique peut être considérée comme un modèle réduit extrême. Après avoir montré en quoi consiste ce contact, nous donnerons quelques idées d'applications envisageables.*

## 1. Introduction

Un contact électrique est constitué de deux électrodes conductrices pressées l'une contre l'autre. Il est souvent défini par un seul paramètre : une résistance de valeur  $R_c$  que l'on nomme "résistance de contact". Sauf dans certains cas particuliers, on cherche à faire en sorte que cette résistance soit suffisamment faible. Les études théoriques font souvent référence au contact "sphère-plan" car il se prête bien aux modélisations.

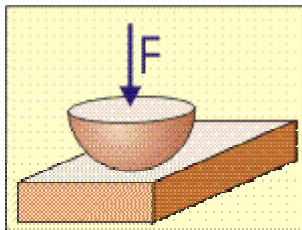


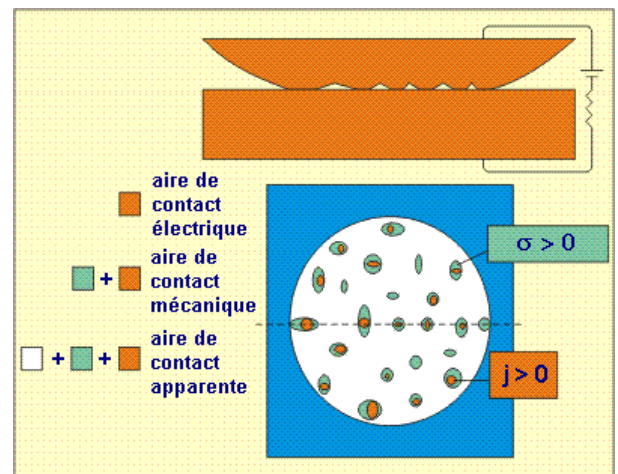
Figure 1. Le contact sphère-plan

Dès 1891, Maxwell [1] avait étudié un contact circulaire de rayon "a" entre deux solides infinis constitués d'un même matériau conducteur (de résistivité  $\rho$ ), et donnait pour la résistance de contact l'expression ci-dessous :

$$R_c = \frac{\rho}{2a}$$

Si cette expression peut être largement utilisée dans tous les calculs de contacts "fort courant", (dimensionnement des contacts de disjoncteurs etc...), l'avènement des dispositifs électroniques et numériques embarqués où les signaux sont de petits niveaux (en courant et en tension) et où les connexions doivent être facilement montées ou démontées, a montré qu'elle était insuffisante. En effet, il faut alors réaliser une étude plus fine de la surface de contact et savoir faire la différence entre l'aire de contact

apparente, l'aire de contact mécanique, et enfin l'aire de contact électrique, cette dernière ne représentant souvent



qu'un faible pourcentage de la première. La résistance  $R_c$  est alors la résistance équivalente à la mise en parallèle d'un certain nombre de petits points de contact.

Figure 2. Différence entre aire de contact électrique et aire de contact apparent.

En 1966, Greenwood [2] a montré comment tenir compte de cette disposition, et en 2001 Lionel Boyer [3] a généralisé cette formulation en introduisant l'existence d'un film "isolant" entre les deux surfaces, tenant ainsi compte du lubrifiant ou des traces de solvant résiduels à la fabrication des connecteurs, très souvent présents dans ce type de dispositif.

## 2. L'A.F.M. conducteur

Cette technique d'étude de surfaces conductrices consiste à mettre en parallèle un microscope à force atomique et un dispositif de mesure de résistance locale mis au point dans notre laboratoire. Elle est parfois désignée par "C-AFM" dans les articles relatifs à ce type d'instrumentation.

## 2.1 Le microscope à force atomique

Le microscope à force atomique est un instrument de la famille des microscopes à champ proche, développés à partir de 1982 (voir [4]). Dans cette technique, la pointe-sonde est placée à l'extrémité libre d'une poutre élastique et dans le mode de travail que nous utilisons (dit "contact") elle touche la surface à analyser. Dans ce cas l'interaction pointe/surface est fortement répulsive.

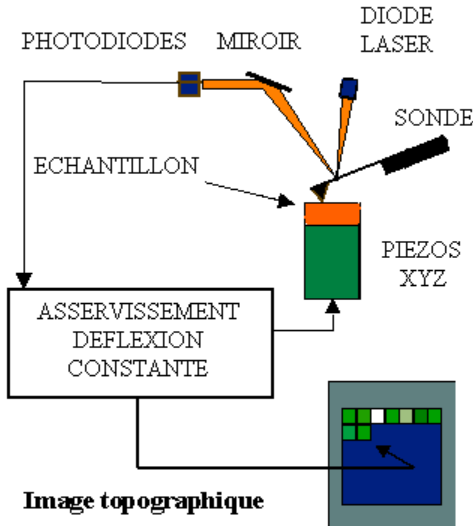


Figure 3. Principe du microscope à force atomique

La pointe est placée au contact de l'échantillon avec une force choisie, évaluée par la mesure optique de la déflexion de la poutre élastique. Une zone carrée de la surface est alors balayée ligne par ligne, en maintenant la déflexion du levier à la valeur de consigne au moyen d'une boucle d'asservissement qui ajuste en permanence la position verticale de l'échantillon (voir figure 3). On obtient au final une cartographie de la zone explorée, dont la résolution dépend à la fois du rayon de courbure de la pointe utilisée (valeurs typiques 10-50nm) et de la taille du carré balayé (les images comportent au maximum 512x512 pixels).

## 2.2 La mesure de résistance locale

A partir de 1994 nous avons mis au point, dans notre équipe [5], un instrument (le "résiscope") qui mesure la résistance locale entre la sonde et la surface de l'échantillon. Le principe de cette mesure est simple : on adjoint à l'AFM de base un montage électronique permettant d'appliquer une polarisation stable et bien définie entre l'échantillon et la pointe - obligatoirement conductrice cette fois - et on mesure le courant résultant qui traverse le nano-contact (voir figure 4). De cette façon, on peut toujours, comme en AFM traditionnel, travailler soit en mode "imagerie" (faire des cartographies  $R(x,y)$ ), soit en mode "courbe" (étudier localement les variations de  $R$  en fonction de la force ou de la polarisation).

L'intensité du courant que l'on arrive à faire passer entre la pointe et l'échantillon détermine une valeur  $V/i$  de la résistance locale de la surface explorée.

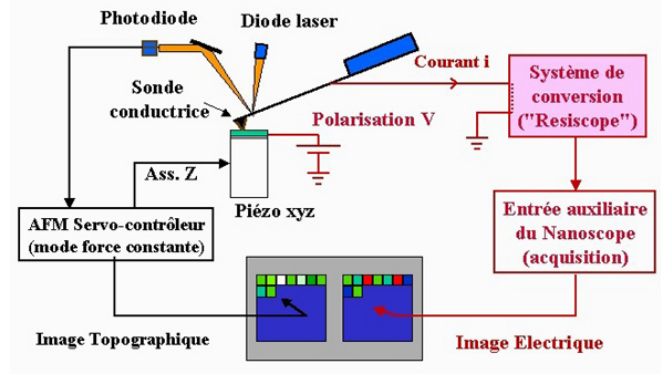


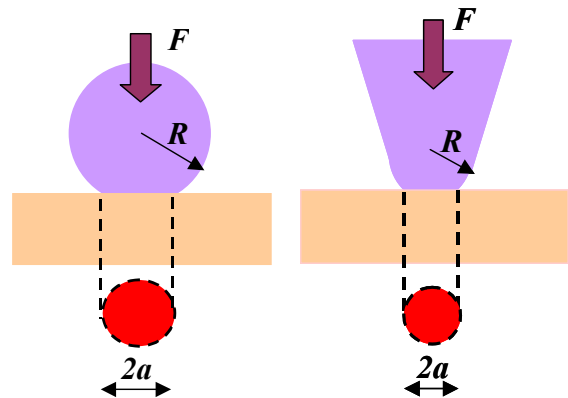
Figure 4. Principe du résiscope

## 3. Le nano-contact

Parmi les difficultés que nous avons rencontrées dans la mise au point du résiscope, il ne faut pas négliger que, comme dans toute technique d'imagerie, la part d'analyse et d'interprétation des résultats est primordiale. Comment comparer la situation où la pointe passe sur un plot bon conducteur noyé dans un isolant à celle où elle passe sur un échantillon qui conduit moyennement dans toute son épaisseur ? Nous ne savons pas toujours répondre aux questions sur le cheminement du courant, et les illustrations qui suivront (dans l'exposé oral) donneront un aperçu des possibilités qui s'offrent à nous, sans masquer les questions qui restent posées.

### 3.1 Les particularités du nano- contact :

Essayons de comparer un contact de type "sphère/plan" étudié en laboratoire et le contact pointe/surface d'une expérience d'AFM avec des réglages typiques :



$R = 5 \text{ mm}$ devient	$R = 50 \text{ nm}$
$F = 1 \text{ N}$ devient	$F = 10 \text{ nN}$
$a = 40 \text{ mm}$ devient	$a = 2 \text{ nm}$

La pression moyenne dans la zone de contact passe alors de  $2.10^8 \text{ Pa}$  à  $8.10^8 \text{ Pa}$ , rendant plus compliquée la modélisation mécanique qui devient non élastique, sans parler des forces de capillarité non négligeables dues à un inévitable ménisque liquide si on ne manipule pas sous vide.

Sur le plan électrique, les dimensions de la zone de contact devenant inférieures au libre parcours moyen des électrons dans la pointe, on ne peut plus parler de lignes de courant à cet endroit, il faut passer à une modélisation

ballistique. Il en va de même si l'on veut étudier les échanges thermiques (l'effet Joule dans la pointe peut intervenir si la surface explorée conduit bien).

Ces problèmes deviennent encore plus insurmontables si l'on veut tenir compte du fait que la pointe balaye la surface et que les mesures seront en fait réalisées en régime transitoire.

*C'est pour cette raison que pour les deux paragraphes qui suivent, les images en couleur et les explications seront présentées lors de l'exposé oral.*

### 3.2 Les applications macroscopiques :

Notre premier objectif était de réaliser des images simultanées de la topographie et de la résistance locale d'une surface. Le résultat obtenu peut donc être interprété comme une juxtaposition de 512x512 carrés dont on connaît la taille, la position, et la résistance. En utilisant la formule de "Greenwood-modifiée Boyer", on peut alors vérifier que l'on obtient une valeur en concordance avec la résistance mesurée du contact "macroscopique".

### 3.3 Les applications microscopiques :

On peut distinguer ici deux types d'expériences :

a – Les expériences qui servent à tester la nature du contact et à mieux le modéliser, par exemple :

- des courbes intensité fonction de la polarisation.
- des courbes force en fonction du déplacement.
- des courbes intensité en fonction du déplacement.

b – des expériences où l'on teste la surface explorée, et même où l'on agit sur elle, par exemple :

- comportement électrique de couches organiques.
- films de silicium micro-cristallin.
- nanostructures métalliques fractales.
- supraconducteurs de type II (YBaCuO).
- création de zones isolantes dans un conducteur organique.

## 4. Conclusions

Les applications variées de l'AFM conducteur permettent d'espérer que la diversité des situations rencontrées vont donner lieu à une modélisation de plus en plus précise du nano-contact, ce qui donnera lieu à d'autres applications dans la connaissance des surfaces et de leur traitement.

## Références

- [1] J. C. Maxwell, "A Treatise on Electricity and Magnetism" (1891), New York, Dover, 1952.
- [2] J. A. Greenwood, "Constriction resistance and the real area of contact", *Brit. J. Appl. Phys.*, vol. 17, pp. 1621 – 1632, 1966.
- [3] L. Boyer, "Contact Resistance Calculations : Generalisations of Greenwood's Formula Including Interface Films", *IEEE Trans. Comp. Pack. Tech.*, vol 24, pp 50-58, mars 2001
- [4] G. Binnig, H. Rohrer, "Scanning tunneling microscopy" *Helv. Phys. Acta*, **55**, pp 726-735, 1982
- [5] F. Houzé, R. Meyer, O. Schneegans et L. Boyer "Imaging the local properties of metal surfaces by atomic force microscopy with conducting probes", *Appl. Phys. Lett.* 69 (13), pp 1975-1977, (1996).