

risation structurale. Une surface de Cu a été soumise à des impulsions laser vertes ( $\lambda = 532$  nm) et infrarouges ( $\lambda = 1064$  nm) d'une intensité dix fois moindre que celle qui conduit à une dégradation irréversible des surfaces à grande échelle.

La réflectivité d'atomes d'hélium est un moyen très sensible pour détecter des changements structuraux à la toute première couche atomique des matériaux. Les faisceaux laser et hélium sont simultanément dirigés vers un échantillon de Cu (111). La figure montre la réflectivité d'atomes d'hélium pendant l'illumination par le laser ( $\lambda = 532$  nm). Toute les dix secondes, la réflectivité décroît en escalier suite à chaque impulsion laser. La lumière produit des changements structuraux cumulatifs à l'échelle atomique, dont la nature a été identifiée comme la création de paires adatome (atome déplacé en surface)-lacune.

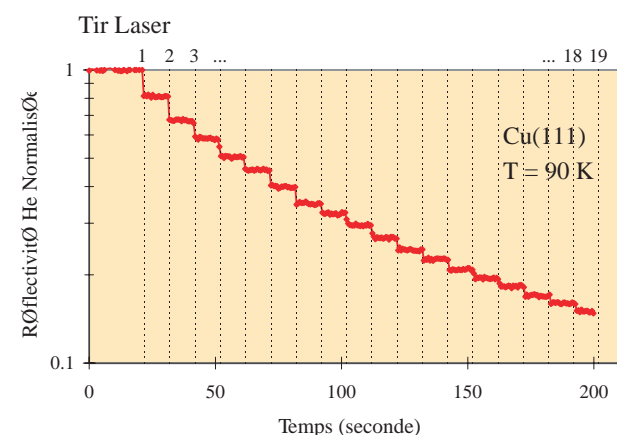


Figure : Réflectivité d'atomes d'hélium sur la surface de Cu (111) à une température de 90 K. Les faisceaux hélium et laser sont simultanément dirigés vers la surface à une cadence de tir de 0,1 Hz pour le laser. Synchrone avec les tirs laser, la réflectivité d'atomes d'hélium décroît en escalier suite à la production d'adatomes et de lacunes, par la lumière verte. Paramètres expérimentaux: laser  $\lambda = 532$  nm à 114 mJ/cm<sup>2</sup> en 10 ns, polarisation linéaire et incidence normale. La longueur d'onde des atomes d'hélium est  $\lambda = 0.58$  Å.

Cette expérience a été effectuée à une température constante de 90 K, température à laquelle adatoms et lacunes sont essentiellement immobiles et ne forment donc pas d'îlots. Ceci permet de déterminer le rendement du phénomène : ainsi pour de faibles concentrations d'adatomes et de lacunes (donc après la première impulsion laser), il faut environ 10000 photons absorbés pour produire une paire adatome - lacune à la toute première couche atomique pour une fluence incidente de 114 mJ/cm<sup>2</sup>.

A température ambiante, les paires adatome-lacune, créées par la lumière verte sont mobiles et forment des îlots. Après une irradiation prolongée, donc après la

création massive d'adatomes et de lacunes, ils s'auto-organisent sous forme de pyramides de quelques nanomètres (nano-objets), comme les images STM le démontrent (photo). L'origine de ce phénomène est cinétique : les adatoms peuvent diffuser latéralement, mais lorsqu'ils arrivent aux bords des îlots, il leur faut vaincre une barrière énergétique de diffusion "verticale" plus grande (barrière dite Ehrlich-Schwöbel). Les adatoms et les lacunes sont donc confinés au niveau auquel ils ont été créés.

La lumière verte conduit donc à d'importantes modifications structurales réversibles à l'échelle nanométrique sous forme de motifs pyramidaux et ce malgré un faible échauffement provoqué par le laser, de quelques dizaines de degrés K seulement.

Encore plus surprenant, pour une même énergie optique absorbée, la lumière infrarouge n'occasionne aucun changement structural. Cette différence inattendue entre l'action de la lumière verte et infrarouge indique sans ambiguïté, que la nanostructuration relève ni de la montée transitoire en température induite par le laser, ni de gradients de température. L'excitation électronique primaire joue ici un rôle capital. La lumière verte excite donc un état électronique localisé et d'une durée de vie suffisante pour se coupler aux mouvements des atomes (période de vibration typique de l'ordre de 100 fs). Cet état est inaccessible à la lumière infrarouge. Cette proposition est corroborée par l'identification (Cao et al., Phys. Rev. B 56, 1099 (1997)) d'une excitation interbande d'électrons d localisés et d'une "longue" durée de vie de 70 fs dans le Cu.

Le laser peut donc induire la nanostructuration de ces surfaces métalliques, à une échelle spatiale bien inférieure à la longueur d'onde de la lumière utilisée. Cette restructuration est radicalement différente des endommagements irréversibles préalablement observés, car il suffit de porter la surface pendant quelques minutes à une température supérieure à 500 K pour la lisser totalement. Utiliser ces surfaces comme masque pour piloter la croissance d'autres matériaux sera la prochaine étape à franchir.

**Pour en savoir plus :**

H.-J. Ernst, F. Charra, L. Douillard, Science 279 (1998) 679

**Contacts :**

H.-J. Ernst 01 69 08 30 32, ernst@srsim.saclay.cea.fr  
F. Charra 01 69 08 97 22, charra@drecam.cea.fr  
L. Douillard 01 69 08 46 59, albane@srsim.saclay.cea.fr

# Transport électronique à travers un atome

Quelle est la conductance des plus petits circuits électriques imaginables, formés d'un seul atome entre deux électrodes métalliques ? Comment est-elle liée aux propriétés chimiques de l'espèce considérée ? Les physiciens du groupe de *Quantronique* du SPEC au CEA-Saclay, en collaboration avec deux groupes de l'Université Autonome de Madrid (Espagne) et un groupe de l'Université de Leiden (Pays-Bas), viennent d'apporter à cette question une réponse aussi bien expérimentale que théorique, en utilisant la richesse du transport électrique dans les métaux supraconducteurs.

Ce sont le nombre et la force des liens établis par l'atome central avec ses voisins qui déterminent cette conductance. Chacune des orbitales de valence de cet atome donne lieu à un chemin de conduction ou "canal" par où passe le courant. En présence d'une tension électrique appliquée entre les électrodes, le flux d'électrons est fonction du nombre de canaux disponibles et de l'efficacité de chacun d'eux. Cette efficacité est caractérisée par un coefficient de transmission  $\tau_i$  qui est déterminé par l'arrangement des atomes autour de l'atome central. La conductance totale du contact est simplement  $G = G_0 T$ , où  $T = \sum \tau_i$  est la transmission totale et  $G_0 = 2e^2/h = 77 \mu S = (12.9 k\Omega)^{-1}$  est le "quantum de conductance" ( $e$  est la charge de l'électron et  $h$  la constante de Planck).

En pratique, des contacts électriques de taille atomique sont obtenus depuis quelques années par différentes techniques apparentées à celle du microscope à effet tunnel. L'équipe de Saclay a développé la technique des jonctions à cassure microfabriquées, qui permet une stabilité sans égale. En utilisant les techniques de lithographie par faisceau d'électrons, on découpe dans une couche métallique mince un micropont suspendu ayant un diamètre de l'ordre de 100 nm en son point le plus étroit (voir figure 1). En pliant le substrat à l'aide d'un poussoir mécanique on casse le micropont en son point le plus faible. Ceci est fait dans un vide cryogénique afin de garantir la propreté des deux électrodes résultant de la cassure. En relâchant la contrainte on ramène ensuite les deux électrodes au contact. La distance entre électrodes est contrôlée par le poussoir avec une précision meilleure que 10 pm ce qui permet de reconstruire le contact " atome par atome ". Pour chaque réalisation du contact on mesure le cou-

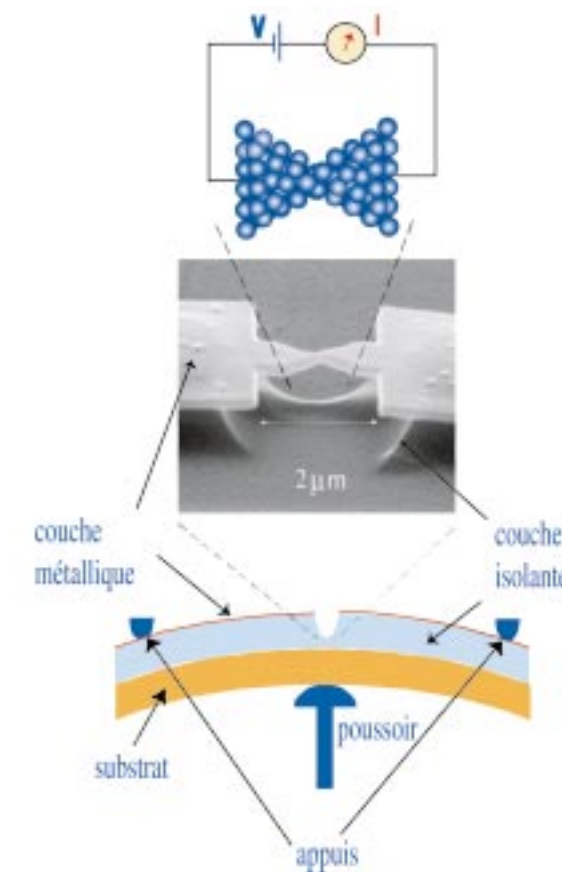


Figure 1: Jonction à cassure microfabriquée. (a) Comment établir un contact à un petit nombre d'atomes entre deux électrodes métalliques ? (b) Une couche métallique mince (100 nm d'épaisseur) avec un étranglement de 100 nm en son milieu est déposée sur un substrat métallique recouvert d'une couche isolante en polyimide. En creusant l'isolant sous l'étranglement on libère un pont métallique suspendu. (c) Le pont est étiré jusqu'à la cassure en pliant le substrat. La distance entre les deux électrodes résultantes est fixée avec une précision sub-atomique par la flexion contrôlée du substrat. Un mouvement de 1 µm du poussoir se traduit par une variation de 10 pm de la distance entre électrodes. On peut alors recréer le contact atome par atome.

rant électrique qui circule lorsque on applique une tension électrique. Ce courant croît linéairement avec la tension lorsque le métal est normal (non supraconducteur), et de cette mesure on ne peut extraire qu'un nombre, la conductance  $G$  (i.e. la transmission totale  $T$ ) du contact. Rien ne peut donc être dit à propos des canaux individuels qui composent le contact. Au contraire, on peut dénombrer les canaux et déterminer l'efficacité de chacun d'eux en mesurant le courant en fonction de la tension électrique appliquée dans des contacts de métaux supraconducteurs. C'est la variété des processus de transfert de charge dans l'état supra-

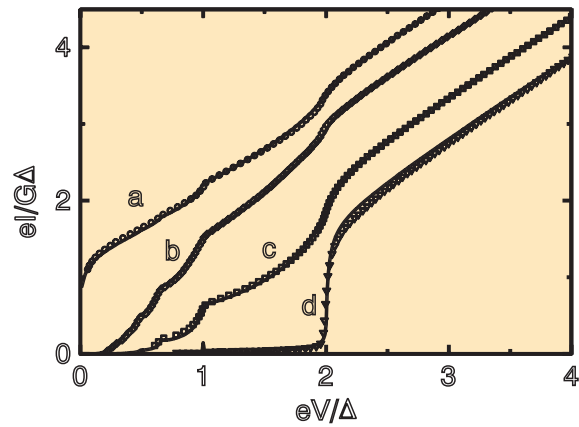


Figure 2 : Caractéristiques courant-tension (I-V) mesurées à 30mK (points) de différents contacts atomiques en Al. Les courbes en train plein sont des ajustements théoriques qui permettent de déterminer le nombre de canaux de conduction dans le contact ainsi que la transmission de chacun d'entre eux.

- (a)  $T=1.747, t_1=0.997, t_2=0.46, t_3=0.29$   
 (b)  $T=0.85, t_1=0.74, t_2=0.11$   
 (c)  $T=0.88, t_1=0.46, t_2=0.35, t_3=0.07$   
 (d)  $T=t_1=0.025$ .

Cette dernière courbe correspond au cas tunnel, où les deux électrodes sont physiquement séparées. Le gap supraconducteur mesuré est  $\Delta/e=185\mu V$ ,  $G$  est la conductance totale de chaque contact, mesurée à des tensions bien au dessus du gap.

conducteur, où les électrons peuvent passer seuls, en paires ou même en paquets plus gros, qui permet de démêler la contribution de chaque canal ouvert, car dans ce cas le transport de charge dépend de façon fortement non-linéaire de chaque coefficient de transmission. La figure 2 montre des exemples de caractéristiques courant-tension (I-V) obtenues pour différents contacts en Al à basse température (30 mK), ainsi que les meilleurs ajustements théoriques calculés en utilisant comme paramètres libres le nombre de canaux et leur transmission  $\tau_i$ .

La figure 3 montre un exemple de l'évolution de la conductance  $G$  lorsqu'on étire les contacts jusqu'à la rupture. On observe une décroissance par paliers de la transmission qui traduit la diminution du nombre d'atomes au contact. Le nombre indiqué sur chaque palier est celui du nombre de canaux obtenu en chaque point par l'analyse des caractéristiques I-V.

Ces mesures ont été réalisées pour quatre matériaux différents (Al, Pb, Nb et Au). Dans chaque cas, le nombre de canaux au dernier palier avant rupture correspond à la valence de l'espèce chimique. Trois canaux pour le plomb et l'aluminium, cinq pour le niobium. Pour le contact en or, rendu localement supraconducteur par contact avec des réservoirs supraconducteurs en Al, le dernier palier correspond à un seul canal de conduction comme prévu pour un métal monovalent. Remarquons que la résistance minimale d'un contact d'un atome d'or est fixée par les lois de la mécanique quantique à 12.9 kOhms. L'ensemble de ces résultats montre que juste avant rupture ces contacts ne sont constitués que d'un seul atome. De plus, on a pu

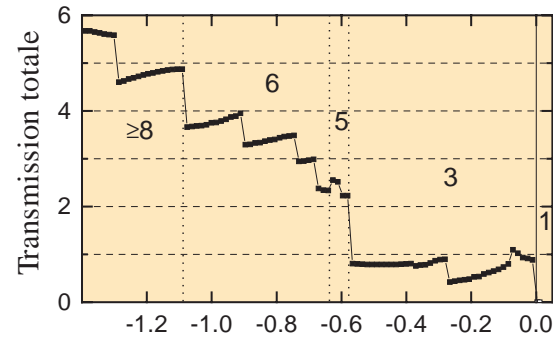


Figure 3 : Evolution typique de la conductance totale  $G$  lors de l'ouverture continue des contacts pour un pont en aluminium. Les sauts correspondent à des réarrangements atomiques induits par la contrainte. Le nombre de canaux qui contribuent à la conductance dans chaque cas est indiqué. Il est obtenu à partir d'ajustement théoriques des caractéristiques courant-tension comme ceux de la figure 2. Les distances positives correspondent au régime tunnel.

constater que l'efficacité de chacun des canaux peut-être modifiée en comprimant ou en étirant le contact. Ces expériences établissent ainsi un lien entre les propriétés de transport des contacts atomiques et les propriétés chimiques des atomes constituant le contact. Il est peut-être utile de rappeler ici que les propriétés de transport à travers un métal massif dépendent au contraire de la structure de bande de celui-ci, laquelle n'a en général que peu de rapport avec la valence chimique de l'atome du métal isolé. Par exemple, bien qu'à l'échelle macroscopique l'or soit un bien meilleur conducteur que le plomb, la résistance minimale d'un contact à un atome de plomb peut-être, grâce à ces trois canaux de conduction, beaucoup plus faible que celle d'un atome d'or. Les concepts qui émergent de ces expériences constituent un premier pas vers la compréhension des lois qui régissent les circuits électriques à l'échelle atomique et moléculaire, frontière ultime de la miniaturisation.

**Pour en savoir plus :**

Nature, vol 394 daté du 9 juillet 98.  
 Phys. Rev. Lett. **78**, 3535 (1997)

**Contact :**

C. Urbina (SPEC), 01 69 08 74 44,  
 urbina@spec.saclay.cea.fr

**Phases magazine**

La lettre du DRECAM et du SPhT

Directeur de la Publication : I. Nenner

Comité B de Rédaction :

S. Ayrault (LPS) ; N. Betz (SRSIM) ; H. Rothard (CIRIL) ;  
 L. Boyer (DIR) ; C. Fermon, O. Dauchot (SPEC) ;  
 T. Golinelli (SPhT) ; Y. Sidis (LLB) ; N. Herlin (SPAM) ; O.  
 Klein (LSI) ; H. Desvaux (SCM)

Réalisation : L. Boyer, C. Fermon

Impression : Impact Graphic

ISSN N°1276-8650 Dépôt légal 4ème trimestre 1997

# Feu vert aux atomes

Une équipe du Service de Recherche sur les Surfaces et l'Irradiation de la Matière (SRSIM) s'intéresse à l'action de la lumière sur la réorganisation de surfaces de cuivre à l'échelle nanométrique.

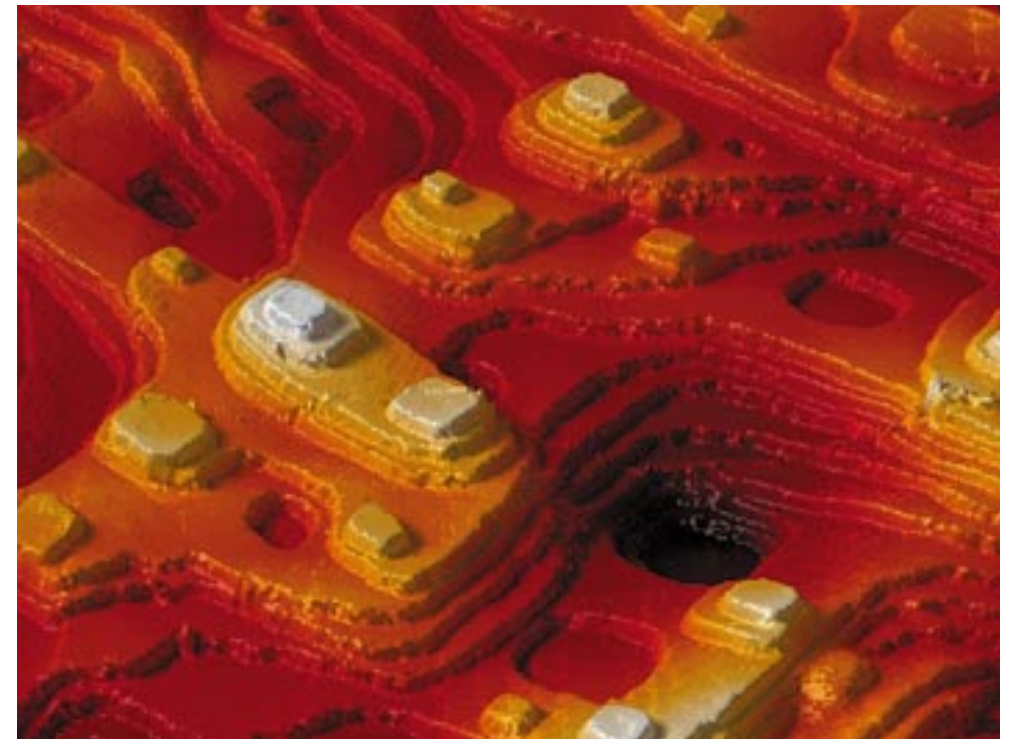


Photo : Image STM (1000 Å x 1000 Å) obtenue à température ambiante et sous ultraviolette d'une surface Cu (001) après 300 tirs laser de lumière verte. A cette température, les adatoms et lacunes créés par la lumière sont mobiles et forment des îlots. La production massive d'adatoms et de lacunes après irradiation prolongée conduit à une restructuration de la surface sous forme de nano-objets pyramidaux

La fabrication de nanostructures (c'est-à-dire la formation de motifs structuraux à l'échelle nanométrique) et l'exploitation de leurs propriétés physiques spécifiques représentent un des grands domaines de la recherche, sur le plan fondamental et appliqué. La nanostructuration peut être obtenue par croissance de couches minces sur des surfaces (Molecular Beam Epitaxy, MBE), soit par auto-organisation des matériaux déposés, soit par croissance guidée sur des surfaces préstructurées. Outre les techniques MBE, l'action d'un faisceau de lumière peut également mener à une formation de motifs à l'échelle nanométrique.

La lumière absorbée par les métaux est généralement totalement transformée en chaleur en quelques picosecondes car les excitations électroniques sont délocalisées et de courtes durées de vie. A ce jour, les changements structuraux induits par la lumière à la surface de métaux sont irréversibles et attribués aux phénomènes de contraintes thermiques et/ou fusion de surface.

J. Ernst, F. Charra et L. Douillard du SRSIM ont décidé d'aller y voir de plus près, c'est-à-dire à l'échelle de l'atome, en utilisant la diffraction d'atomes d'hélium et le microscope à effet tunnel (STM) pour la caracté-