

L'absence de frottement (ou le super-glissement) résonne agréablement à l'oreille de tous skieurs. Certaines interfaces peuvent présenter cette propriété. Au laboratoire L\_Sim nous avons simulé le comportement d'un de ces systèmes et l'observation expérimentale a été réalisée en collaboration avec l'université de Berkeley. Nous avons ainsi pu confirmer expérimentalement une prédiction théorique faite en 2000.

Le frottement est une importante propriété qui nous gouverne ainsi que le monde qui nous entoure. Les lois de la friction d'une surface sur une autre sont bien connues à notre échelle macroscopique. Mais leurs relations avec le monde microscopique à l'échelle de l'atome ne sont étudiées que depuis quelques années, motivées en particulier dans le domaine des micro-nano-technologies par le rôle accru des surfaces à cette échelle. Résultat inattendu : la propriété étonnante de certaines interfaces, les interfaces incommensurables (voir encart), dont le coefficient de friction peut s'annuler, amenant à un «super-glissement». Montrée théoriquement pour un modèle simple à une dimension, l'existence d'une telle propriété pour des matériaux réels n'était pas universellement admise. Nos résultats montrent que c'est pourtant effectivement le cas. Nous confirmons également expérimentalement notre prédiction théorique faite en 2000, que cette propriété peut intervenir au cœur d'un matériau, ici l'or, lorsque l'interface incommensurable est un joint de grains particulier.

Pour cela, nous avons mis à profit une nouvelle technique expérimentale mise au point au «National Center for Electron Microscopy» (NCEM) du Lawrence Berkeley Laboratory en Californie. On effectue des tests de compression sur des piliers de quelques centaines de nanomètres de diamètre avec une pointe dont on fixe la position et pour laquelle on mesure la force exercée. Le déplacement de la pointe et la déformation des piliers sont observés dans un microscope électronique à transmission

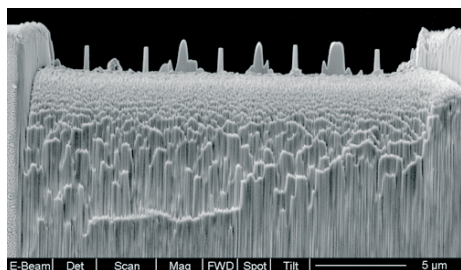


Fig. 1 : Paysage vu par microscopie électronique (NCEM) de l'échantillon après la préparation des piliers par FIB. Le premier plan correspond au substrat de germanium. Dans le fond, se dressent cinq piliers d'or ( $\varnothing = 200\text{ nm}$ ,  $h = 1\ \mu\text{m}$ ) ainsi que des restes de la couche d'or. Parmi eux, un seul s'avèrera avoir une interface adaptée à l'étude.

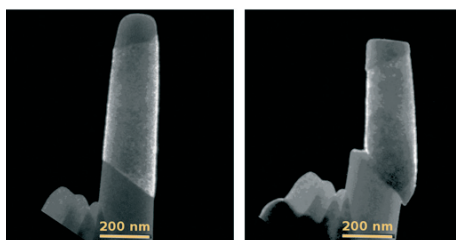


Fig. 2 : Glissement d'un grain par rapport à l'autre pendant la compression d'un pilier polycristallin dans un MET (voir la simulation correspondante sur la figure de l'encart).

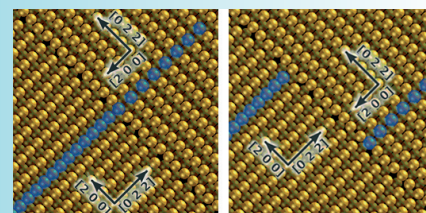
(MET). Pour préparer le protocole de nos expériences de nano-compression, des simulations numériques à l'échelle 1/10 ont été faites au laboratoire L\_Sim. Nous avons tenu compte de la structure atomique des échantillons : le comportement de chaque atome est calculé par une méthode de dynamique moléculaire. Ces calculs ont prédit qu'en positionnant l'interface à  $45^\circ$  par rapport à l'axe du pilier, un glissement d'un grain par rapport à l'autre se produirait, avec une reconstruction de la structure cristalline à la surface du pilier, à l'avant et à l'arrière du glissement. Ces reconstructions sont des défauts d'extrémité dont nous avons pu calculer comment elles s'opposent à la propriété de glissement de l'interface elle-même.

Pour faire des piliers de diamètre 200 nm, une couche d'or de même épaisseur est déposée au NCEM sur un substrat de germanium. Il en résulte des grains cristallisés dont l'orientation n'a que deux variantes possibles, à  $90^\circ$  l'une de l'autre. En revanche, l'orientation des interfaces entre les grains est variable ce qui a nécessité la fabrication d'une douzaine de piliers pour obtenir quelques configurations adéquates.

Des piliers sont ensuite sculptés par un faisceau d'ions (FIB) dans l'épaisseur de la couche d'or (Fig. 1). Puis ils sont placés dans le microscope équipé du test mécanique. Les piliers ayant la bonne interface (caractérisée par la diffraction électronique faite sur les grains) ont eu leurs grains décalés comme modélisé (Figs. 2 et 3). Ceux qui sont monograins ou ont des interfaces non adaptées se retrouvent écrasés par la pointe du dispositif. Nous avons pu relier l'évolution de la force appliquée, à l'aide de cristaux piézo-électriques, au type et à la taille

## Interface incommensurable

Une interface entre deux structures périodiques est dite incommensurable, lorsque les deux structures ne partagent pas de périodicité commune le long de l'interface. Dans ce cas, l'environnement à un endroit de l'interface ne s'y reproduira jamais exactement ailleurs. L'interface présentée ici (à gauche) est un joint de grains séparant deux cristaux identiques mais tournés de  $90^\circ$ , selon un certain axe, l'un par rapport à l'autre. À cause de la structure cristalline cubique de ces cristaux, une périodicité de  $d$  fait face à une périodicité de  $\sqrt{2}d$  dans l'autre grain. Le nombre  $\sqrt{2}$  n'étant pas un rationnel, l'alignement des colonnes atomiques ne se répète jamais exactement. La figure de droite montre l'interface après glissement. Elle n'est pas perturbée : les mêmes environnements atomiques se retrouvent avant et après, mais «ailleurs» sur l'interface.



de la reconstruction de surface. Ce travail a permis de conclure que dans le cœur d'un matériau, il est possible d'avoir cette étonnante propriété de glissement. Il ouvre la voie à des études plus générales sur les joints de grains avec un protocole basé sur une combinaison de techniques, et un cas de référence.

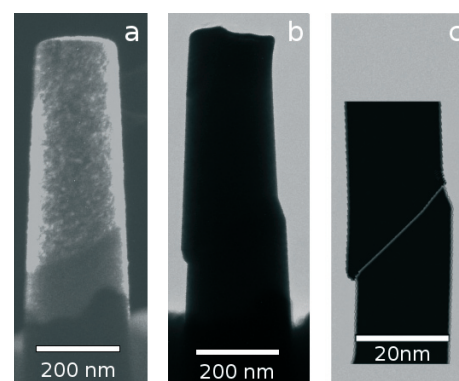


Fig. 3 : Bicristal d'or vu au MET: (a) avant et (b) après compression. (c) Modèle numérique après compression. Remarquez la dissymétrie des reconstructions aux extrémités des interfaces et le bon accord expérience-calcul.