

Le motif en nid d'abeilles apparaît donc incomplet, et c'est la raison pour laquelle nous observons un motif en pétales de fleurs.

Si nous n'avons encore jamais vu directement son réseau, comment s'assurer que nous synthétisons bien du silicène ? Il faut chercher d'autres signatures de ce matériau. Une première piste consiste à modéliser la forme que prend le silicène sur un substrat d'argent et à la comparer à la structure révélée par un microscope à effet tunnel.

La modélisation en renfort

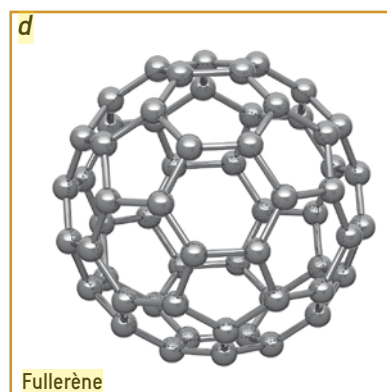
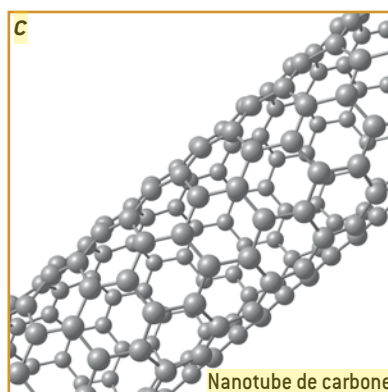
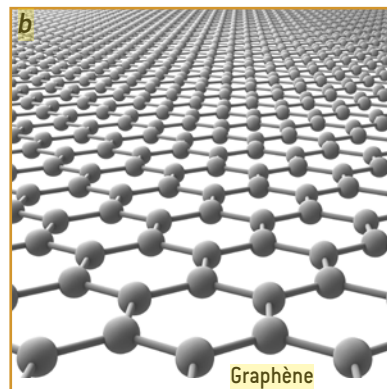
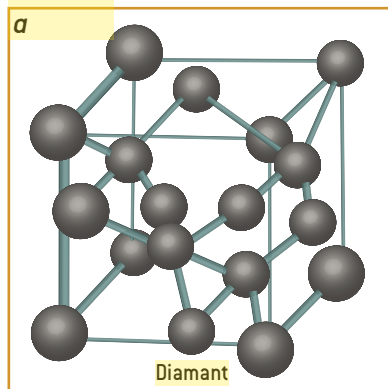
Pour modéliser l'arrangement des atomes de silicium, nous partons de la structure du silicène libre, puis la « déposons » sur le substrat d'argent. Le programme prend en compte les interactions des atomes de silicium et d'argent, et, en minimisant l'énergie totale du système, propose un système à l'équilibre. Dans quelle mesure ce silicène épitaxié théorique correspond-il au silicène obtenu expérimentalement ? Utilisant ce type de simulation, Bénédicte Ealet, du Centre interdisciplinaire de nanoscience de Marseille, a montré que le silicène modélisé dans ces calculs donne une image en pétales de fleurs en accord avec ce que nous observons.

La deuxième approche consiste à mesurer certaines caractéristiques spécifiques du silicène. Si les mesures correspondent à ce que prévoit la théorie, ce serait une autre façon de confirmer qu'il s'agit bien de silicène. Par exemple, dans le silicène libre, les atomes peuvent être répartis en deux groupes qui forment deux plans parallèles. La configuration sans ondulations du graphène correspondrait au cas limite où les deux plans sont confondus. L'écart entre les deux plans du silicène impliquerait des propriétés électroniques différentes entre le silicène et le graphène. Toutefois, la distance entre les deux plans est suffisamment petite pour que le silicène présente, en théorie, des propriétés de conduction électrique très proches de celles du graphène.

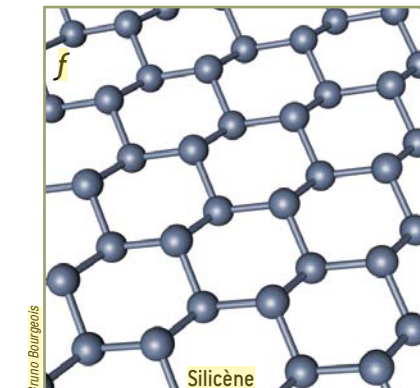
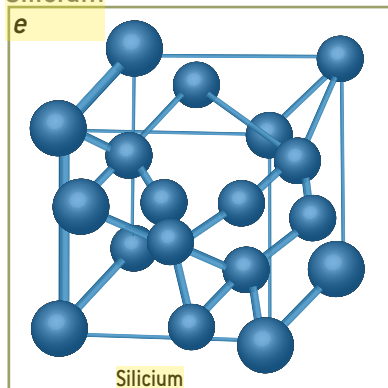
Il est cependant très difficile de mesurer les propriétés électriques du silicène. Pour évaluer la conductivité du silicène épitaxié, nous avons utilisé avec Bruno Granddier, de l'Institut d'électronique, de microélectronique et de nanotechnologie de Lille, une sonde à quatre pointes, mais il est impossible de le faire sur une seule

ALLOTROPES DU CARBONE ET DU SILICIUM

Carbone



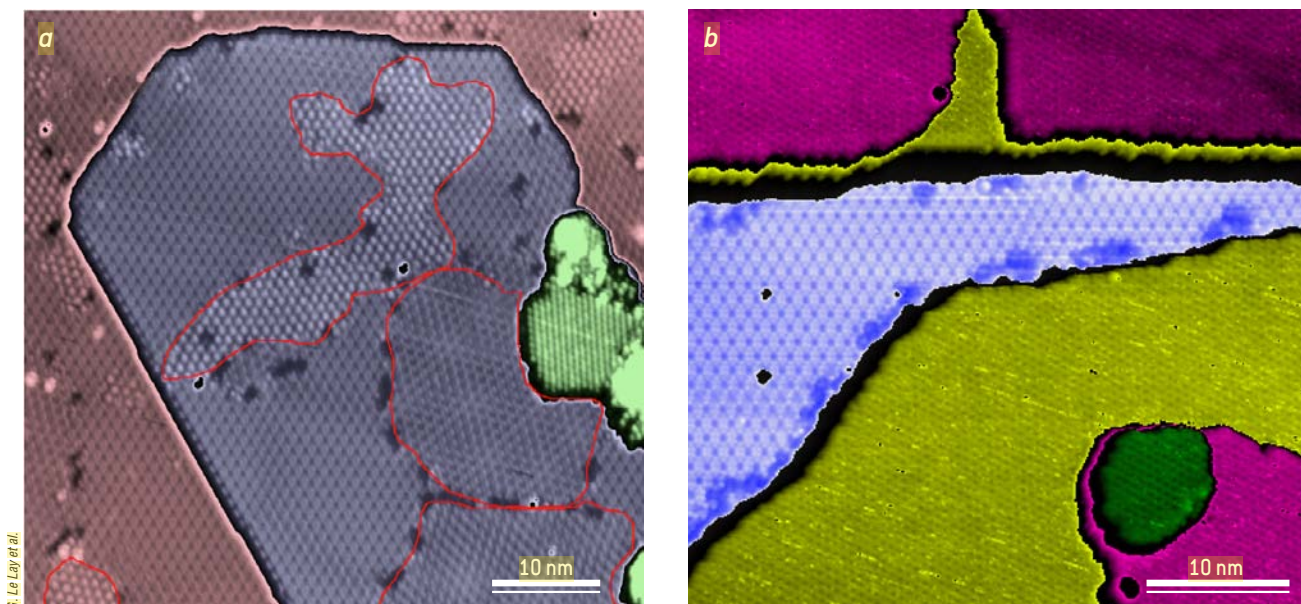
Silicium



Les matériaux constitués uniquement d'atomes de carbone existent sous des formes très différentes, qualifiées d'allotropes. Les plus connus sont le diamant (**a**) et le graphite qui est une superposition de couches bidimensionnelles, où les atomes dessinent des structures hexagonales en « nid d'abeilles ».

En 2004, les physiciens Andre Geim et Konstantin Novoselov ont isolé une couche unique de graphite, le graphène (**b**). Les propriétés de conduction du graphène laissent entrevoir de nombreuses applications en électronique. Chaque allotrope présente des propriétés différentes : les nanotubes (**c**) ont une conduction thermique et une conduction électrique élevées ainsi qu'une résistance mécanique importante. Les fullerènes (**d**) ont de nombreuses applications en chimie. Le silicium existe principalement sous la forme cristalline similaire à celle du diamant (**e**). Récemment, des physiciens ont réussi à synthétiser une monocouche de silicium comparable au graphène, mais moins plane, le silicène (**f**). Ce dernier pourrait associer des caractéristiques du graphène et du silicium.

© a : Potapov/Alexander ; b : Mather ; c : Foutier/2005 ; d : Hupar 3D/Shutterstock.com



2. LES IMAGES DU SILICÈNE au microscope à effet tunnel révèlent des caractéristiques variées de ce matériau. On observe des domaines dont l'orientation des mailles diffère [a, les zones bleues entourées de rouge]. La méthode permet aussi de visualiser des empilements de plusieurs couches de silicène [b, en bleu, vert, rose et vert foncé].

couche de silicène sans créer un court-circuit avec le substrat d'argent, qui est un très bon conducteur.

Il est donc nécessaire d'utiliser une structure multicouche où plusieurs couches de silicène sont superposées. L'utilisation du silicène multicouche est beaucoup plus pratique et ses propriétés sont intrinsèques, c'est-à-dire que le substrat n'a pas d'influence sur les couches éloignées.

Avec Paola De Padova et Claudio Quaresima, de l'Institut sur la structure de la matière de Rome, ainsi que Maria-Carmen Asensio et José Avila, du Centre de rayonnement synchrotron SOLEIL en Île-de-France, nous avons utilisé une autre technique, la spectroscopie de photoélectrons, pour étudier les propriétés électroniques du silicène réel. Cette méthode consiste à exposer le matériau à un faisceau intense de photons à une longueur d'onde précise pour lui arracher des électrons qui renseignent sur sa structure électronique. Nous avons ainsi montré que le silicène multicouche se comporte comme un semi-métal, comme le graphène en simple couche : les porteurs de charge s'y déplacent à des vitesses très importantes (voir l'encadré page 36). Un semi-métal présente, dans une certaine mesure, une configuration électronique intermédiaire entre un métal et un semi-conducteur.

Par ailleurs, Alessandro Molle, de l'Institut de microélectronique et des micro-

L'AUTEUR



Guy LE LAY est professeur émérite à l'Université d'Aix-Marseille et au Laboratoire de physique des interactions ioniques et moléculaires, unité mixte du CNRS.

BIBLIOGRAPHIE

E. Scalise *et al.*, Two-dimensional Si nanosheets with local hexagonal structure on a MoS₂ surface, *Advanced Materials*, vol. 26, n° 13, pp. 2096-2101, 2014.

P. Vogt *et al.*, Synthesis and sheet resistance of multilayer silicene, *Appl. Phys. Lett.*, vol. 104, 021602, 2014.

A. Resta *et al.*, Atomic structures of silicene layers grown on Ag(111), *Nature Scientific Reports*, vol. 3, p. 2399, 2013.

P. Vogt *et al.*, Silicene : compelling experimental evidence for graphenelike two-dimensional silicon, *Phys. Rev. Lett.*, vol. 108, P. 155501, 2012.

systemes à Milan, et Michel Houssa, de l'Université catholique de Louvain, et leurs équipes ont obtenu une autre signature caractéristique du silicène réel en monocouche par spectroscopie Raman, où l'on mesure en réflexion la réponse optique du silicène sur lequel on focalise un faisceau laser. Le signal réfléchi par la monocouche est similaire à celui mesuré pour le graphène, confirmant une nouvelle fois que leurs propriétés électroniques sont très voisines.

Un matériau facile à doper

Le graphène est un matériau plutôt inerte, difficile à doper et, par conséquent, à transformer en semi-conducteur. Ainsi, l'ajout d'hydrogène transforme le graphène en semi-conducteur, mais le matériau est instable. Au contraire, le silicène réagit facilement avec d'autres éléments, ce qui permet, en principe, de le doper et de lui conférer les propriétés d'un semi-conducteur. Cela explique l'intérêt que suscite le silicène pour l'industrie de l'électronique.

La forte réactivité du silicène a cependant un inconvénient majeur : il s'oxyde facilement à l'air. Il réagit beaucoup moins à l'oxygène que le silicium usuel, mais il faut néanmoins prendre en compte ce phénomène lors de l'utilisation du silicène. Deux solutions permettent d'éviter cette difficulté. La première consiste à superposer