

électriques et les énergies renouvelables par exemple) et pour l'optoélectronique dans le domaine ultraviolet.

Quant au gallium lui-même et à ses alliages liquides, leurs applications en sont toujours aux étapes initiales de développement, mais plusieurs entreprises commencent à mettre à profit leurs propriétés uniques. Passons en revue quelques-unes de ces propriétés et leurs utilisations possibles.

L'OXYDATION, INCONVÉNIENT OU ATOUT ?

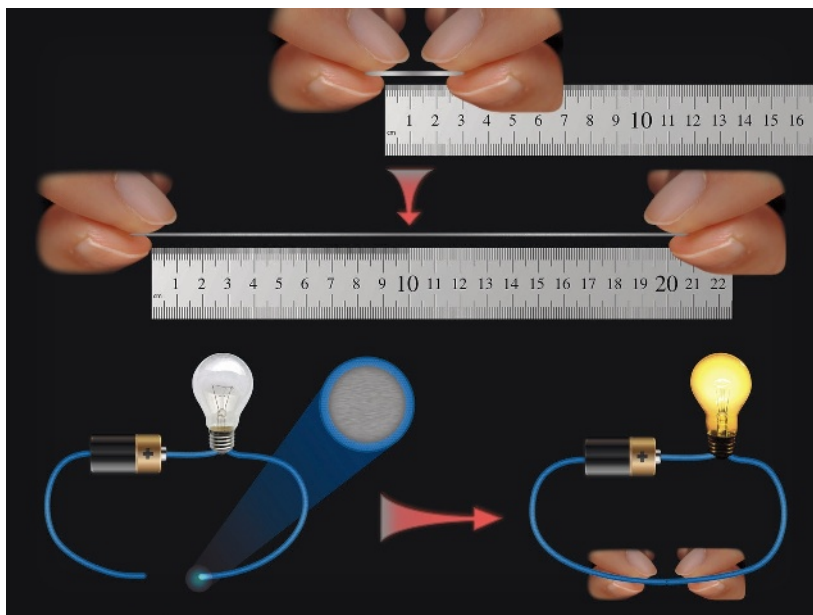
La propriété la plus importante du gallium pour les applications est sans doute la formation rapide d'une pellicule d'oxyde à sa surface. Cette couche d'oxyde a une épaisseur de quelques nanomètres (un cheveu humain est environ 30000 fois plus épais). Nous l'avons mentionné plus haut, ce film d'oxydation était autrefois considéré comme un inconvénient. Cependant, grâce à lui, on structure le métal liquide selon des formes qui seraient impossibles à obtenir avec des liquides classiques, en particulier ceux qui, comme le gallium, présentent une faible viscosité et une tension de surface élevée (voir l'encadré page ci-contre).

Le gallium liquide et certains de ses alliages peuvent être imprimés et structurés de diverses façons qui ne seraient pas possibles avec des métaux solides. On peut par exemple les injecter, les peindre, les étaler, les mouiller, les mouler ou les imprimer. Bien que très mince, la couche d'oxyde stabilise les structures résultantes. Mais si les contraintes mécaniques exercées sur la surface dépassent un certain seuil, la couche d'oxyde se rompt et le métal, peu visqueux, coule alors facilement.

La résistance du film d'oxyde dépend non seulement de l'oxyde lui-même, mais aussi de la courbure de la surface qu'il recouvre. Ainsi, le propre poids d'une goutte sphérique de gallium peut briser la couche d'oxyde quand son diamètre excède quelques millimètres, tandis qu'un cylindre vertical de 0,1 millimètre de diamètre atteint plusieurs centimètres de haut sans s'effondrer.

En l'absence de contrainte, la couche d'oxyde se forme rapidement et contribue à maintenir la forme du métal. C'est un peu l'équivalent, à petite échelle, d'un matelas à eau : une mince barrière solide contient le liquide. Mais alors qu'un matelas à eau fuirait s'il était percé, la couche qui enrobe le gallium liquide se referme spontanément après une rupture. La capacité de ce métal à couler lorsque l'oxyde est brisé, combinée à la capacité de l'oxyde à se reformer, est ce qui rend possible la structuration du gallium liquide.

La façon la plus simple de structurer le métal est sans doute de l'injecter dans un tube. Si le tube a un diamètre inférieur à 1 millimètre



environ, on peut le considérer comme un microcanal, utile pour manipuler les fluides dans diverses applications. Parmi celles-ci figurent les dispositifs intégrés de «laboratoire sur puce» permettant, par exemple, de miniaturiser des analyses de liquides biologiques. L'injection du métal liquide dans de tels canaux est une façon simple de créer des électrodes, des pompes, des valves et d'autres composants microfluidiques.

Il est aussi possible d'utiliser le gallium liquide en impression 3D, une technique aujourd'hui répandue de fabrication de structures par addition de matière. La plupart des imprimantes 3D du commerce «impriment» des polymères, mais on pourrait renforcer l'intérêt de ces structures en réalisant des composites qui intègrent des métaux liquides à une matrice de polymères.

Par ailleurs, l'oxyde de surface qui se forme sur le gallium liquide a pour conséquence de rendre le matériau adhérent à la plupart des surfaces, une propriété nécessaire pour maintenir une forme imprimée. En l'absence d'oxyde, le gallium formerait des gouttes sphériques et n'adhérerait pas sur la plupart des matériaux.

ÉTIRABLE ET AUTORÉPARABLE

Avec un métal liquide tel que le gallium ou certains de ses alliages, il est aussi possible de créer des fils électriques mous et extensibles. En effet, en plaçant le métal liquide dans un tube étroit en caoutchouc ou en un autre matériau extensible, on produit un fil qui conserve la conductivité électrique du métal tout en restant étirable. On s'affranchit ainsi d'un compromis classique que l'on doit faire avec les conducteurs constitués de matériaux composites : l'ajout de particules conductrices, en

Des fils constitués de métal liquide cumulent les avantages : la conductivité d'un métal et les propriétés mécaniques du caoutchouc. Une fibre d'élastomère creuse remplie de métal liquide (en haut) peut être étirée jusqu'à dix fois sa longueur initiale. Son extensibilité n'est limitée que par les propriétés du polymère. Le métal liquide peut également former des circuits (en bas) qui se réparent électriquement après avoir été sectionnés. Le métal reste bien contenu au niveau de l'interface sectionnée, sans déborder, parce qu'il forme une couche d'oxyde au contact de l'air. Les interfaces fusionnent à nouveau quand on les applique l'une contre l'autre. En revêtant le métal d'une enveloppe isolante de polymère autoréparateur (en bleu), on permet au circuit de se réparer mécaniquement.

métal ou en carbone, à du caoutchouc augmente sa conductivité, mais change ses propriétés mécaniques. Les métaux liquides, en revanche, ne les modifient pas notablement. On crée ainsi des fils qui peuvent s'étirer jusqu'à dix fois leur longueur initiale tout en conservant la même conductivité métallique (voir la figure page 51).

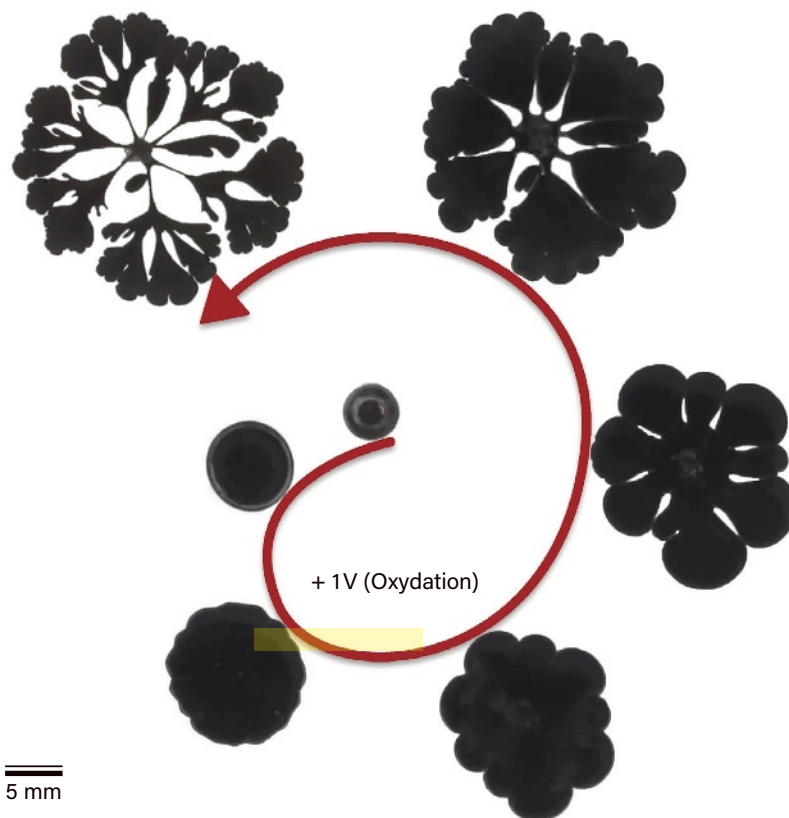
Par exemple, le gallium est utilisé dans des dispositifs où il sert d'interconnecteur électrique entre des petites puces rigides insérées dans une matrice d'élastomère. Ces systèmes hybrides souples combinent dès lors les fonctionnalités des puces avec les capacités de déformation élastique de la matrice. Ils ouvrent donc la voie vers des dispositifs électroniques performants à porter sur soi ou à fixer sur la peau, ou encore vers des capteurs souples qui imitent les propriétés mécaniques de la peau.

Autre atout des conducteurs en gallium liquide: ils se réparent eux-mêmes lorsqu'ils sont endommagés. Quand un fil de métal liquide est coupé, il se forme rapidement une pellicule d'oxyde qui empêche le matériau de fuir hors du circuit (voir la figure page 51). Et lorsque les extrémités sectionnées sont réunies, les interfaces exposées fusionnent (la mince couche d'oxyde se rompt et le liquide se reconnecte) et la connexion électrique se rétablit. En 2012, avec mes collègues, nous avons incorporé des fils de métal liquide dans une matrice de polymère lui-même autocicatrisant. Dans ce cas, c'est le circuit tout entier qui se répare par simple contact.

Les propriétés des métaux liquides peuvent également être mises au service de l'étude de surfaces (monocouches moléculaires par exemple) à l'aide d'électrodes molles, comme nous l'avons montré dès 2007. Plutôt que de déposer des électrodes métalliques au moyen d'un équipement coûteux qui nécessite souvent des températures élevées, susceptibles d'altérer les propriétés des molécules, on place simplement le métal liquide sur la surface, avec laquelle le contact s'établit en douceur. L'électrode sert alors à mesurer les propriétés électriques des molécules de la surface. Cette approche est utile en électronique moléculaire, où l'on explore la possibilité d'utiliser des molécules comme éléments de base de composants électroniques tels que des transistors.

IMITER LES NEURONES DE LA PIEUVRE

Les conducteurs au gallium peuvent aussi servir de capteurs. Quand on déplace ou tord des fils conducteurs classiques, tels ceux à base de cuivre, leur section ne varie pas. En revanche, en réponse à des déformations, les conducteurs à métal liquide changent de géométrie, et donc modifient la capacitance ou la



DE SURPRENANTES FIGURES FRACTALES

Les gouttelettes de gallium ont une tension de surface énorme en l'absence de couche superficielle d'oxyde, et forment donc des sphères (au centre). Mais lorsqu'on place une gouttelette dans un électrolyte et qu'on applique un potentiel positif, on déclenche une oxydation superficielle. Ici, une gouttelette est reliée par le dessous à un petit fil (non illustré) et plongée dans une solution électrolytique d'hydroxyde de sodium; elle est photographiée par le dessus et semble noire parce qu'elle est rétroéclairée. Le processus d'oxydation entraîne un étalement du métal en forme de fractales, ce qui suggère que la tension effective est pratiquement nulle dans les conditions présentées.

résistance du composant dont ils font partie. Ils offrent ainsi la possibilité de détecter un contact, une contrainte mécanique ou d'autres modes de déformation.

Récemment, en 2019, des étudiants de mon groupe de recherche ont mis à profit de tels circuits tactiles pour créer des matériaux souples qui effectuent des opérations logiques simples, sans utiliser de transistors classiques. Nous nous sommes inspirés de la pieuvre, dont les neurones répartis le long des bras ont la capacité de produire une réponse localisée à un stimulus sensoriel sans faire appel à un processeur centralisé comme le cerveau.

Pour faire la démonstration du concept de «logique des matériaux», nous avons créé des circuits composés de fils de métal liquide insérés dans un composite de silicone, circuits où le courant électrique peut suivre divers chemins. Une pression sur l'une des portions du circuit réduit la section du fil et augmente donc la résistance localement. Ce changement dévie le courant vers d'autres chemins ou modifie les chutes de potentiel dans certaines parties du