

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).

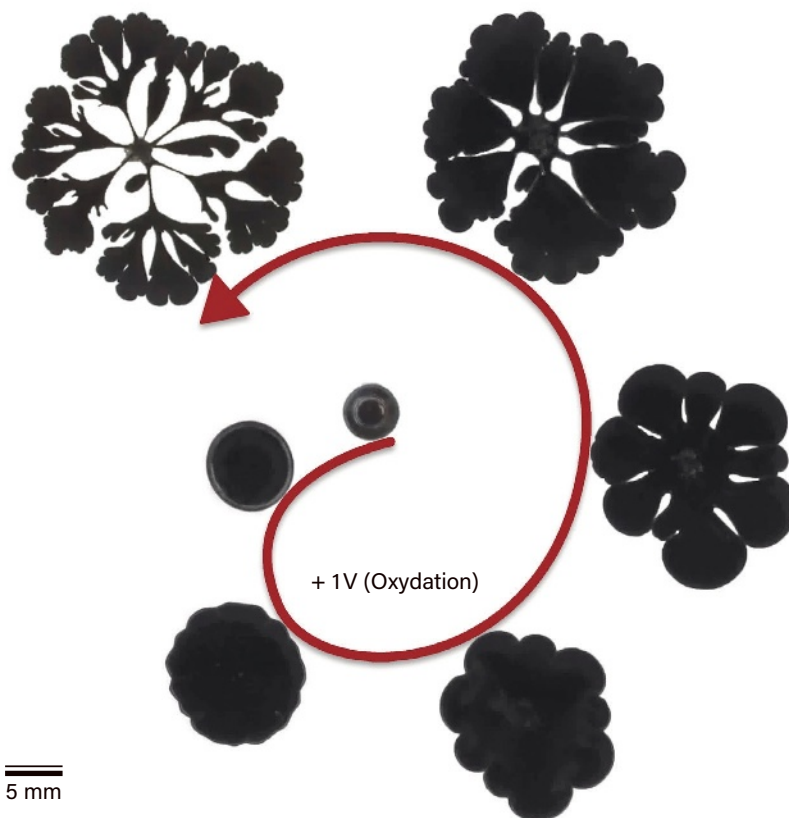
Par exemple, le gallium est utilisé dans des dispositifs où il sert d'interconnecteur électrique entre des petites puces rigides insérées dans une matrice d'élastomère. Ces systèmes hybrides souples combinent dès lors les fonctionnalités des puces avec les capacités de déformation élastique de la matrice. 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

circuit. Moyennant une conception appropriée, un circuit souple de ce type produit une réponse qui dépend uniquement du nombre de points de contact et de leur emplacement. Le principe est potentiellement utile pour la mise au point de matériaux intelligents, qui répondent à des signaux tactiles de façon complexe et adaptée.

MODULATION DE LA TENSION DE SURFACE

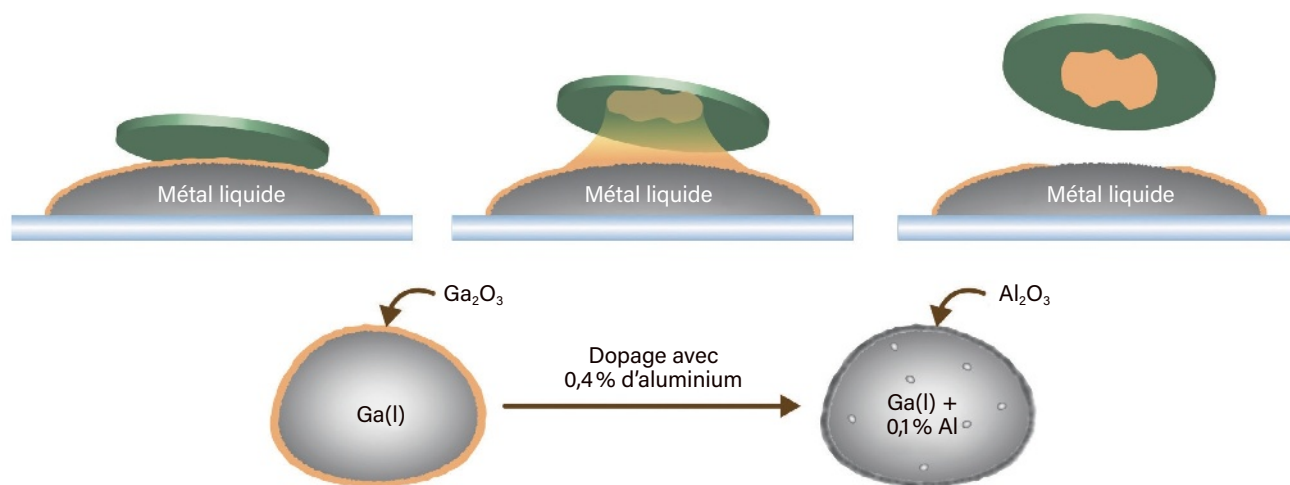
Revenons à la tension de surface exceptionnelle du gallium. Quiconque a eu la maladresse de casser un thermomètre au mercure connaît les gouttelettes sphériques de métal ainsi produites. Ces gouttelettes sont bien sphériques parce que les métaux liquides ont, en l'absence de couche oxydée, une tension de surface énorme. Et de fait, sans sa couche superficielle d'oxyde, le gallium a une tension de surface encore plus élevée que le mercure. L'oxyde peut être éliminé à l'aide d'un acide ou d'une base, mais de tels liquides sont corrosifs. En principe, on pourrait empêcher la couche d'oxyde d'apparaître en travaillant dans un environnement dépourvu d'oxygène, mais en pratique l'oxygène est difficile à éviter.

La réduction électrochimique apporte une solution simple à mettre en œuvre pour éliminer la couche d'oxyde du gallium. En appliquant au métal un potentiel réducteur modeste, de l'ordre de -1 volt, par rapport à une contre-électrode, on peut retransformer en gallium métallique les ions Ga^{3+} de la surface oxydée, grâce à l'apport d'électrons. Quand l'oxyde disparaît, le métal forme des billes (voir la figure page ci-contre, au centre). L'oxyde se reforme spontanément dès que l'on cesse d'appliquer le potentiel.

En 2014, mon équipe a découvert un phénomène inattendu qui se produit lorsqu'on applique un potentiel positif de (par exemple) $+1$ volt à une gouttelette de gallium liquide immergée dans une solution d'hydroxyde de sodium, NaOH (solution basique) : la gouttelette s'étale alors de manière fractale (voir la figure page ci-contre). Comment un liquide dont la tension de surface est dix fois supérieure à celle de l'eau, et donc qui tend fortement à minimiser sa surface, peut-il former une fractale ?

L'application d'un potentiel positif active la formation d'oxyde de surface. On pourrait s'attendre à ce que la couche d'oxyde forme une croûte à la surface du métal et entrave son écoulement. Mais nous avons constaté que, au cours de l'oxydation électrochimique, les gouttelettes se comportent comme si leur tension de surface était très faible. En fait, le NaOH dissout lentement mais continûment l'oxyde, qui se dépose à la surface de la gouttelette, de telle sorte que le métal peut continuer à s'écouler malgré la formation d'oxyde. La tension de surface étant notablement abaissée par l'oxydation électrochimique, la gravité aplatit la goutte, et les petits gradients de tension superficielle entraînent des écoulements dits « de Marangoni », qui contribuent à la formation des inhabituels motifs fractals.

Reste à comprendre la baisse de la tension de surface. Dans le phénomène d'électrocapillarité observé sur des électrodes au mercure, la charge qui s'accumule à l'interface métal-électrolyte peut abaisser la tension superficielle d'une gouttelette de métal. Cependant, pour différentes raisons, l'électrocapillarité n'explique pas à elle seule le comportement observé avec le gallium. En particulier, le changement de tension de surface, qui passe de plus de



EXFOLIER DES COUCHES MINCES

Différentes espèces d'oxydes se forment lorsqu'un métal liquide réagit avec l'air. Ces espèces peuvent être transférées à d'autres surfaces par exfoliation (en haut). Par ce procédé, il est simple de créer des couches ultraminces d'oxyde à température ambiante. En ajoutant de petites

quantités d'un dopant réactif à du gallium liquide (en bas), on peut transformer la surface d'oxyde natif (Ga_2O_3) en une espèce chimique différente. Par exemple, en ajoutant 0,4 % d'aluminium, on obtient une surface constituée d' Al_2O_3 .