

supporte aussi d'être placé sous vide, donc à très faible pression, des conditions souvent utilisées pour étudier les matériaux. Normalement, ces faibles pressions entraîneraient l'évaporation du liquide. Pas avec le gallium!

Comme la plupart des métaux fondus, le gallium a une faible viscosité: elle ne représente que le double de celle de l'eau. Sa tension de surface, notion qui traduit la cohésion d'un liquide et sa capacité à s'étaler ou mouiller une surface, est de 500 millinewtons par mètre (mN/m). C'est la plus élevée qui soit pour un liquide à température ambiante (par comparaison, la tension de surface de l'eau est de 72 mN/m, et celle de l'éthanol 22 mN/m). Ainsi, en l'absence de couche superficielle d'oxyde, le métal coule comme l'eau grâce à sa faible viscosité, et forme naturellement des gouttes bien sphériques à cause de sa tension de surface élevée (pour que l'énergie élastique emmagasinée par la surface soit minimale, la superficie doit être minimale, ce qui, pour un volume donné de liquide, correspond à une sphère).

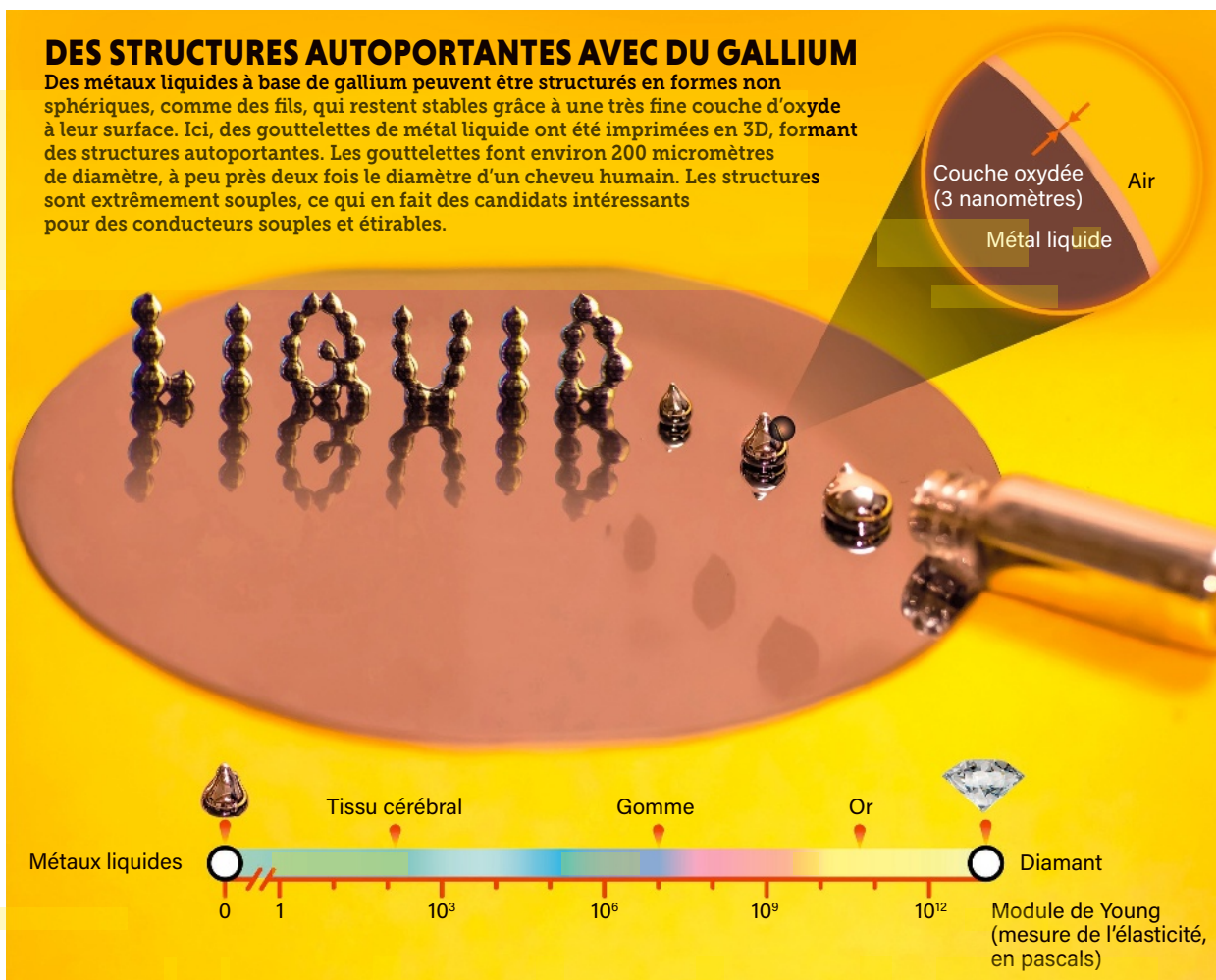
Cet article est traduit et adapté de celui publié dans *Physics Today* (avril 2021, pp. 30-36) sous le titre « Liquid metals at room temperature », avec l'autorisation de l'American Institute of Physics.

Enfin, caractéristique importante, le gallium a une faible toxicité, et le corps humain est capable de l'éliminer s'il est ingéré. Ses sels ont été approuvés par la FDA (l'autorité des États-Unis en matière d'alimentation et de médicaments) pour une utilisation chez l'humain dans des applications telles que l'imagerie par résonance magnétique (IRM).

Bien que cet élément soit relativement abondant dans le sol, il est difficile à extraire. On le trouve en particulier sous forme d'impuretés dans l'alumine (précurseur de l'aluminium), ce qui en fait un matériau cher; un gramme de gallium coûte entre 0,2 et 0,9 euro environ. Ce métal a des applications industrielles en tant que précurseur pour des composés semi-conducteurs tels que l'arséniure de gallium (GaAs) et le nitrure de gallium (GaN). Les chercheurs étudient aussi l'oxyde de gallium Ga_2O_3 . Ce semi-conducteur a une tension de claquage élevée et une large bande d'énergie interdite: une piste prometteuse pour l'électronique de puissance (pour les véhicules

DES STRUCTURES AUTOPORTANTES AVEC DU GALLIUM

Des métaux liquides à base de gallium peuvent être structurés en formes non sphériques, comme des fils, qui restent stables grâce à une très fine couche d'oxyde à leur surface. Ici, des gouttelettes de métal liquide ont été imprimées en 3D, formant des structures autoportantes. Les gouttelettes font environ 200 micromètres de diamètre, à peu près deux fois le diamètre d'un cheveu humain. Les structures sont extrêmement souples, ce qui en fait des candidats intéressants pour des conducteurs souples et étirables.



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 ?

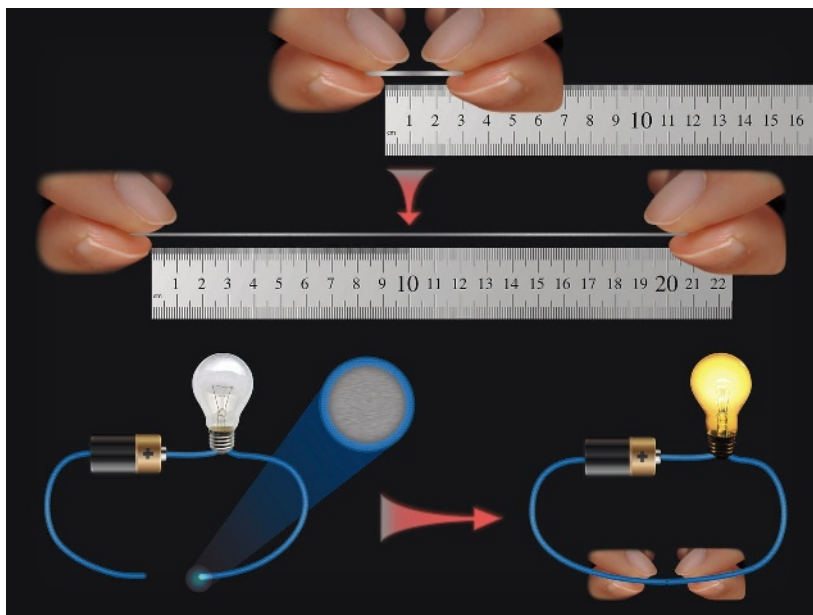
La propriété la plus importante du gallium pour les applications est sans doute la formation rapide d'une pellicule d'oxyde à sa surface. Cette couche d'oxyde a une épaisseur de quelques nanomètres (un cheveu humain est environ 30000 fois plus épais). Nous l'avons mentionné plus haut, ce film d'oxydation 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.