

les ultraviolets, sont dispersés ou absorbés par les céramiques nanométriques d'oxyde de titane, d'oxyde de zinc ou d'oxyde de fer. On teste aujourd'hui ces poudres pour fabriquer des écrans solaires.

En outre, des phénomènes quantiques de confinement font varier la couleur apparente de certains agrégats nanométriques avec leur taille. Des solutions d'agrégats d'un même matériau, par exemple le sélénure de cadmium, mais de tailles différentes ont des couleurs différentes. Cette propriété serait utilisable dans l'industrie des cosmétiques.

Les chimistes étudient aussi l'utilisation des matériaux nanophases comme catalyseurs. Depuis longtemps, ils emploient des particules nanométriques de platine et de rhodium, déposées sur des matériaux supports. Donald Beck, de la Société *General Motors*, avait montré que l'oxyde de titane élimine le sulfure d'un flux gazeux contenant du sulfure d'hydrogène (semblable à certains effluents de raffineries, par exemple). Aussi pensions-nous que de l'oxyde de titane nanophase faiblement compacté, de grande porosité, serait, grâce au grand rapport surface sur volume de ses petits agrégats, un bon catalyseur d'oxydation du sulfure en soufre. Le succès dépassa nos espérances : la quantité totale de sulfure éliminée d'un échappement simulé, sur une durée de sept heures à 500 °C, était environ cinq fois supérieure à celle qui était éliminée par toutes les autres formes d'oxyde de titane que nous avons testées. En outre, après sept heures d'exposition, la proportion de sulfure oxydé restait élevée, alors que tous les autres échantillons étaient devenus inefficaces.

Une éponge à sulfure

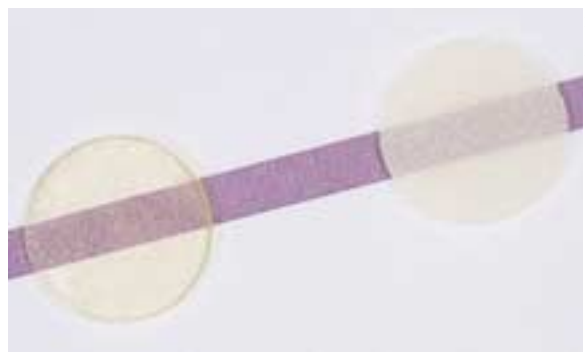
Le grand rapport entre la surface exposée et le volume de l'oxyde de titane nanophase n'était pas la seule raison de ces performances : des manques d'atomes d'oxygène, à l'intérieur des grains (lacunes mises en évidence par spectroscopie Raman), permettent la diffusion rapide des atomes de soufre venant de la surface. Ainsi libérés, les sites de fixation du sulfure, à la surface des grains, peuvent accueillir d'autres atomes de soufre : la longévité du catalyseur est renforcée.

Les nanomatériaux ont enfin des propriétés électromagnétiques intéressantes.

De la poudre magnétique ultrafine sert déjà dans des dispositifs d'enregistrement. Les ingénieurs ont observé avec intérêt que l'application d'un champ magnétique réduit considérablement la résistivité électrique de certaines nanostructures : cette magnétorésistance géante devrait être utilisée pour le stockage des données.

Une autre application industrielle des propriétés électromagnétiques des nanomatériaux utilisera probablement de l'oxyde de zinc. Ce dernier entre aujourd'hui dans la composition d'un composant électronique courant, le varistor, dont la résistance électrique diminue lorsque le courant qui le traverse augmente sur un large intervalle, la tension aux bornes restant égale à une tension dite de seuil. Les varistors actuels sont fabriqués avec une céramique semiconductrice : l'oxyde de zinc, polycristallin et dopé par diverses impuretés sélectionnées. Comme leur comportement non linéaire provient des propriétés électriques des joints de grains, j'avais supposé que l'oxyde de zinc nanophase, qui possède un nombre de joints de grains bien supérieur à celui du matériau ordinaire, serait encore mieux adapté à la fabrication des varistors.

Nous avons réussi à produire de l'oxyde de zinc nanophase pur, et nous venons de montrer qu'il se comporte en varistor. Sa tension de seuil est petite (environ 40 fois inférieure à celle de l'oxyde ordinaire, fortement dopé), mais utilisable pour les mêmes appli-



6. LES CÉRAMIQUES TRANSPARENTES, tel l'oxyde d'yttrium (à gauche), contiennent des pores et des agrégats de diamètre inférieur à 50 nanomètres. Les particules et les pores plus grands dispersent la lumière visible, et rendent opaque le même matériau (à droite).

cations. En outre, si l'on dope l'oxyde de zinc nanophase comme celui des varistors commerciaux, il est encore plus performant. Nous produirons bientôt des varistors à l'oxyde de zinc dont la tension de seuil variera sur plus d'un facteur 300. Les paramètres importants seront la taille des grains (le nombre de joints de grains chargés dans le matériau), et la quantité et le type du dopant placé dans les joints de grains.

Beaucoup d'équipes dans le monde mettent au point de nouvelles méthodes de synthèse des nanomatériaux : à partir de précurseurs atomiques ou moléculaires, par des méthodes chimiques ou physiques, et à partir du traitement d'un précurseur massif, par exemple en raffinant mécaniquement les grains ou en cristallisant des substances amorphes. Ces méthodes permettront de fabriquer une grande variété de nanomatériaux, et d'explorer ainsi l'éventail de leurs propriétés exceptionnelles. Une révolution est en marche : elle s'accélérera à mesure que nous maîtriserons la matière à l'échelle atomique.

Richard SIEGEL est professeur de sciences des matériaux à l'Institut polytechnique Rensselaer.

Pierre JOYES, *Les agrégats inorganiques élémentaires*, les Éditions de physique, Courtabœuf, 1990.

R. DAGANI, *Nanostructured Materials Made from Ultrasmall Building Blocks Promise to Advance a Range of Technologies*, in *Chemical & Engineering News*, vol. 70, n° 47, pp. 18-24, 23 novembre 1992.

R.W. SIEGEL, *Nanostructured Materials : Mind over Matter*, d'après *Proceedings of the First International Conference on Nanostructured Materials*, sous la direction de M. José Yacamán, T. Tsakalakos et B.H. Kear, in *Nanostructured*

Materials, vol. 3, nos 1-6, pp. 1-18, 1993.

R.W. SIEGEL, *Nanophase Materials*, in *Encyclopedia of Applied Physics*, vol. 11, sous la direction de George L. Trigg, VCH Publishers, 1994.

Nanophase Materials : Synthesis, Properties, Applications, sous la direction de G.C. Hadjipanayis et R.W. Siegel, Kluwer Academic Publishers, 1994.

H. GLEITER, *Nanostructured Materials : State of the Art and Perspectives*, d'après *Proceedings of the Second International Conference on Nanostructured Materials*, sous la direction de H.-E. Schaefer, R. Wüschum, H. Gleiter et T. Tsakalakos, in *Nanostructured Materials*, vol. 6, nos 1-4, pp. 3-14, 1995.

La résistance des bactéries aux antibiotiques

ANTOINE ANDREMONT • DENIS CORPET • PATRICE COURVALIN

Les antibiotiques sauvent des millions de vies. Toutefois, ils favorisent la sélection de bactéries résistant aux antibiotiques. Ces résistances, mal maîtrisées, menacent aujourd'hui la santé publique.

Baudelaire et Maupassant, morts de la syphilis, auraient été sauvés par la pénicilline, Chopin et Musset, morts de la tuberculose, par la streptomycine. Ils sont décédés bien avant que la pénicilline ne soit disponible. Elle a été découverte en 1928, mais presque 20 ans s'écouleront avant qu'elle ne soit fabriquée industriellement.

À son retour de vacances, le médecin bactériologiste anglais Alexander Fleming observe une culture de bactéries qui l'intrigue : au lieu d'avoir proliféré pendant son absence, les staphylocoques ont été en partie détruits. Il découvre que la culture a été accidentellement contaminée par la moisissure *Penicillium*, qui a tué les bactéries. Il prépare un filtrat de moisissure, qu'il nomme pénicilline : la solution a un fort pouvoir bactéricide et une faible toxicité.

Cette découverte a peu de retentissement, car on pense alors que toute substance toxique pour les microbes est aussi néfaste pour l'homme. En outre, Fleming ne réussit pas à isoler le produit actif, très instable. En 1940, Florey et Chain purifient une pénicilline concentrée et stable ; le premier patient atteint de septicémie (ou infection généralisée grave) à staphylocoque est traité en 1941. Peu après, la production industrielle est mise au point aux États-Unis. En raison de l'efficacité de la pénicilline, on croit posséder enfin un médicament contre la plupart des infections bactériennes : la méningite, la fièvre typhoïde, la syphilis ou autres fléaux semblent définitivement vaincus.

Pourtant, dès 1945, Fleming prévoit les risques potentiels liés à l'utilisation des antibiotiques. Il craint que leur utilisation à grande échelle ne sélectionne des bactéries résistantes : dans son laboratoire, il observe que des bactéries, sensibles à la pénicilline en début d'expérience, parviennent à se multiplier en présence de concentrations croissantes de l'antibiotique. Selon lui, les bactéries sensibles ont été détruites, et les bactéries résistantes se sont multipliées sans limitation.

Premières résistances

Dans un entretien qu'il accorde à un journaliste du *New York Times*, il met la communauté médicale et le public en garde : « Les plus grands maux viendraient de ce que l'automédication aboutisse à l'utilisation de doses trop faibles d'antibiotiques. Cela aboutirait à ce qu'au lieu d'éliminer l'infection, on apprenne aux microbes à résister à la pénicilline et à ce que ces microbes résistants soient transmis d'un individu à un autre jusqu'à ce qu'ils en atteignent un chez qui ils provoquent une pneumonie ou une septicémie que la pénicilline ne pourra pas guérir. »

Fleming avait raison, et la capacité des bactéries à acquérir des mécanismes de résistance aux agents antimicrobiens est bien supérieure à celle qu'il avait imaginée.

Or, ces bactéries sont omniprésentes. Elles se sont adaptées à tous les milieux, liquides ou solides, vivants ou inanimés, et sont généralement inoffensives pour l'homme. Pourtant,

quelques unes sont pathogènes : adaptées aux conditions physiologiques de l'organisme, elles y prolifèrent, ce qui déclenche les symptômes des infections bactériennes, notamment l'augmentation de la température corporelle.

Malgré les avertissements lancés par certains microbiologistes pendant les années 1960 et 1970, les médecins ont cru que l'apparition de bactéries résistant aux antibiotiques n'était qu'un phénomène limité, qui serait compensé par la découverte de nouvelles molécules antibiotiques.

Les années 1990 sont celles du désenchantement : un certain nombre d'espèces bactériennes sont devenues résistantes aux antibiotiques, au point que les infections qu'elles causent ne sont plus curables par les antibiotiques disponibles. Ces bactéries résistantes sont des bactéries pathogènes, tels que les pneumocoques, responsables de maladies pulmonaires, mais aussi des bactéries dites opportunistes ; peu agressives chez les personnes bien portantes, les bactéries opportunistes déclenchent des infections chez les personnes dont les défenses immunitaires sont affaiblies, notamment chez les malades hospitalisés.

Ces infections acquises à l'hôpital, également nommées infections nosocomiales (du grec *nosos*, maladie et *komeo*, soigner), sont parfois redoutables. Elles représentent, en France comme dans les autres pays industrialisés, un risque important pour la santé publique : près de cinq pour cent des personnes hospitalisées sont atteintes par une infection nosocomiale.