

Ce silence a eu des conséquences déplorables : l'apparente efficacité des armes chimiques, combinée à l'impunité dont a bénéficié l'Irak a encouragé d'autres pays à s'équiper d'armes chimiques et biologiques. Ironie du sort, plusieurs des pays qui s'étaient tus lorsque l'Irak avait utilisé des armes chimiques contre l'Iran ont été à leur tour menacés par les armes chimiques et biologiques irakiennes, pendant la guerre du Golfe, en 1991.

Depuis, la communauté internationale a fait pression sur l'Irak, et le Conseil de sécurité des Nations unies a pris des sanctions pour que le stock irakien d'armes biologiques et des autres armes de destruction de masse soit anéanti. L'Irak ne s'étant pas plié à ces exigences, les inspecteurs des Nations unies poursuivent leurs efforts pour obtenir des informations plus complètes sur les armements secrets irakiens.

Toutefois, les rapports des Nations unies sont factuels, sans expressions d'indignation. Or, tous les pays et tous les groupes qui mettent au point ce type d'armement méritent d'être condamnés. Nous devons sans cesse rappeler que les peuples civilisés ne doivent faire ni commerce ni usage de telles armes, et que les États-Unis et la Russie doivent détruire leurs stocks d'armes chimiques en une dizaine d'années, comme ils en sont convenus.

Comme l'indignation ne suffit pas, un contrôle strict des échanges nationaux et internationaux d'agents pathogènes, et une surveillance accrue des épidémies mondiales seront indispensables.

En attendant, on doit absolument commencer par faire respecter la Convention sur les armes chimiques, qui interdit la possession d'armes chimiques et qui dresse la liste des produits chimiques devant faire l'objet d'une déclaration par les nations signataires. Contrairement à la Convention sur les armes biologiques, de nombreuses procédures de vérification sont prévues par la Convention sur les armes chimiques, y compris des inspections impromptues quand on soupçonne qu'il y a violation des engagements. Des garanties commerciales sont accordées aux pays signataires, pour les inciter à adhérer à la convention.

La Convention sur les armes chimiques a été proposée en 1993 et, en octobre 1996, elle avait été signée par

157 pays et ratifiée par 66 : il manquait une signature pour qu'il puisse entrer en application. Le Sénat des États-Unis a bloqué la ratification, notamment parce qu'il n'acceptait pas les clauses de vérification.

Si l'on réussissait à faire appliquer le traité sur les armes chimiques, les négociations en cours sur le renforcement de la Convention sur les armes biologiques seraient probablement facilitées. Inversement, si la Convention sur les armes chimiques échoue, les perspectives d'un accord sur les protocoles de vérification de l'application du traité biologique s'amenuiseront : les arsenaux chimiques et biologiques continueront à proliférer. Or, plus ces armes persisteront, plus le sentiment de leur illégitimité s'érodera, et plus la probabilité de leur utilisation par les armées ou par les terroristes augmentera.

Comme l'ont remarqué certains experts, les terroristes utilisent généralement les armes présentes dans les arsenaux de leur pays ; notamment, les responsables de la secte Aum auraient découvert l'intérêt des armes chimiques pendant la guerre entre l'Irak et l'Iran. Si les armes biologiques et chimiques disparaissent des arsenaux, elles devraient cesser d'attirer les terroristes.

Les traités, la vérification de leur application, la surveillance du commerce des agents pathogènes doivent tous améliorer le contrôle de l'armement chimique et biologique. En insistant sur le sens moral qui rejetait jadis les armes biologiques, on augmentera les chances qu'elles soient éliminées à tout jamais.

Leonard COLE est professeur de sciences politiques à l'Université Rutgers de Newark.

Leonard A. COLE, *Clouds of Secrecy : The Army's Germ Warfare Tests over Populated Areas*, Rowman and Littlefield, 1990.

Biological Weapons : Weapons of the Future ?, sous la direction de Brad Roberts, Center for Strategic and International Studies, 1993.

Malcolm DANDO, *Biological Warfare in the 21st Century*, Macmillan, 1994.

Leonard A. COLE, *The Eleventh Plague : The Politics of Biological and Chemical Warfare*, W.H. Freeman and Company, 1996.

Les nanomatériaux

RICHARD SIEGEL

Des solides composés de grains très fins sont plus durs, plus malléables ou plus transparents que les matériaux habituels.

Un soir de septembre 1989, nous avons décidé de nommer «matériaux nanophases» la nouvelle catégorie de matériaux que nous fabriquons. Les métaux nanophases, les céramiques nanophases et autres solides nanophases, autrement nommés nanomatériaux, sont constitués des mêmes éléments chimiques que leurs homologues classiques, mais, tandis que ces derniers sont des assemblages de grains dont le diamètre varie du micromètre au millimètre, composés de plusieurs milliards d'atomes, les grains constitutifs des matériaux nanophases mesurent moins de 100 nanomètres et contiennent au plus quelques dizaines de milliers d'atomes. Un agrégat de trois nanomètres de diamètre, par exemple, contient 900 atomes et est un million de fois plus petit que le point final de cette phrase.

Les nanomatériaux ont des propriétés originales, parce que leurs petits grains réagissent très différemment des grains plus gros aux contraintes mécaniques ou aux champs électromagnétiques. Par exemple, le cuivre nanophase est cinq fois plus dur que le cuivre ordinaire, et les céramiques nanophases sont moins cassantes que leurs cousines à gros grains. Nous ajustons la dureté, la couleur ou la plasticité de ces matériaux, en choisissant la taille des grains qui les constituent.

On trouve aujourd'hui des nanomatériaux dans de nombreux produits de consommation courante, des cosmétiques à l'électronique, et la liste de leurs applications n'est pas close. La croissance de l'entreprise que nous avons fondée pour les commercialiser témoigne de ce développement : nous produisons aujourd'hui par tonnes des matériaux qui n'étaient fabriqués, il y a quelques années encore, que par milligrammes, seulement pour les laboratoires de recherche.

Les nanomatériaux sont présents depuis longtemps dans la nature, des roches des météorites aux valves des coquillages. Dès que les hommes firent du feu, ils fabriquèrent aussi des particules nanométriques de fumée. Toutefois, l'histoire scientifique des nanomatériaux n'a commencé qu'en 1959, lorsque Richard Feynman évoqua en public les potentialités des toutes petites particules de matière condensée : «Je suis certain que si nous maîtrisons la structure de la matière à petite échelle, nous accéderons à un beaucoup plus grand nombre de propriétés de la matière.»

Des confirmations théoriques de cette intuition apparurent bientôt : au début des années 1960, Ryogo Kubo, de l'Université de Tokyo, détermina le comportement quantique de petits agrégats d'atomes. Ce modèle ne décrivait pas les conséquences du confinement des atomes sur les propriétés des

matériaux, mais il les faisait pressentir : lorsque la taille des grains élémentaires d'un matériau devient inférieure à la longueur critique associée à une propriété donnée, cette propriété devient ajustable.

Des métaux à grains fins

La recherche sur les agrégats nanométriques s'est développée au cours des 20 années suivantes, surtout au Japon et en URSS. Toutefois ces recherches étaient confidentielles, et c'est seulement en 1981, lors d'un colloque au Danemark, que Herbert Gleiter, de l'Université de la Sarre, annonça que les matériaux fabriqués par compactage de particules ultrafines avaient des propriétés radicalement différentes de celles des matériaux ordinaires. Peu après, son équipe publia plusieurs articles novateurs sur les métaux nanocristallins.



1. DES SUSPENSIONS DE PARTICULES NANOMÉTRIQUES du même matériau ont des couleurs différentes selon la taille de ces particules. Chacun des flacons présentés sur les photographies contient du sélénium de cadmium : seule la taille des grains varie. Chacun a une couleur différente, en lumière blanche (à droite) et en lumière ultraviolette (ci-dessus).

Quatre ans plus tard, avec Horst Hann, ancien élève de H. Gleiter, nous avons essayé de fabriquer des matériaux non métalliques avec des grains nanométriques. En quelques mois, nous avons obtenu une céramique composée d'agrégats d'oxyde de titane de dix nanomètres de diamètre (l'oxyde de titane est un pigment blanc, très utilisé dans diverses industries, de la peinture à la pâte à papier).

Notre technique ressemblait à celle des chimistes russes ou japonais. Lorsque l'on fait bouillir de l'eau près d'une fenêtre et qu'il gèle dehors, les molécules d'eau qui s'évaporent rencontrent l'air froid de la pièce et se condensent en fines gouttelettes d'eau suspendues dans l'air. La convection

naturelle conduit l'air et les gouttelettes vers la vitre froide, où l'eau liquide se condense en cristaux de glace. De la même façon, lorsqu'un métal est chauffé à une température supérieure à sa température de fusion, des atomes s'en évaporent. Pour fabriquer un nanomatériau, on refroidit ces atomes avec un gaz inerte, tel l'hélium, qui ne réagit pas chimiquement avec eux : les atomes d'hélium absorbent l'énergie des atomes métalliques, qui se condensent en petits agrégats solides. Le diamètre de ces agrégats quasi sphériques est ajustable entre 1 et 100 nanomètres par le réglage de la vitesse d'évaporation des atomes métalliques, et de la nature et de la pression du gaz inerte.

Pour obtenir un métal nanophase, on fait évaporer ce métal, et l'on agglomère les agrégats formés avant qu'ils ne puissent réagir avec des molécules de leur environnement. Pour obtenir une céramique, au contraire, les agrégats métalliques doivent réagir avec un gaz (l'oxygène pour l'oxyde de titane) avant d'être agglomérés. La simplicité de cette méthode nous laissait penser que nous pourrions fabriquer la forme nanophase de la plupart des matériaux, métaux, céramiques, semi-conducteurs, polymères, et composites de ceux-ci. Nous nous sommes toutefois concentrés sur les céramiques et les métaux, afin de bien comprendre le comportement de ces matériaux.



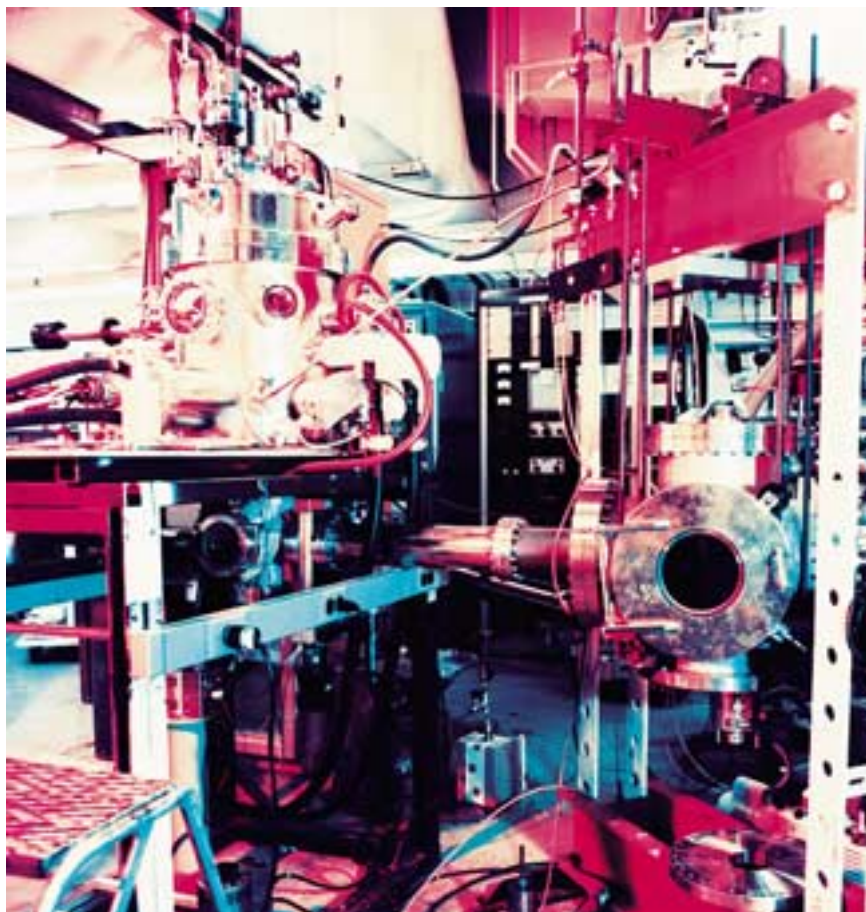
Ayant d'abord fabriqué de la poudre ultrafine d'oxyde de titane, nous avons cherché à l'agglomérer en un bloc de taille macroscopique. Qu'obtiendrait-on par un frittage, où l'on comprime la poudre tout en la chauffant suffisamment pour que les grains se lient les uns aux autres en échangeant des atomes? Les chimistes pensaient que le frittage d'une poudre nanométrique interviendrait à une température inférieure à celles qui sont habituellement nécessaires et produirait un solide plus compact (de petits grains sont plus faciles à empiler de façon compacte). Toutefois, avant la mise au point de notre méthode de synthèse, les poudres céramiques fines étaient obtenues par des techniques de précipitation à partir de solutions ; ces agglomérats étaient difficiles à compacter, et les solides frittés que l'on fabriquait étaient souvent poreux.

Une céramique plus dure

Nos poudres nanométriques de titane étaient également agglomérées, mais ces agglomérats étaient si fragiles que

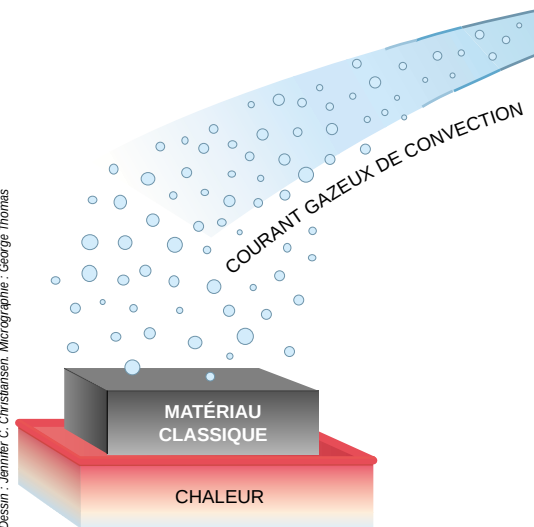
les grains se soudaient ou se disjoignaient aussitôt. En outre, notre poudre ultrafine avait d'excellentes propriétés mécaniques et rhéologiques. Elle pouvait être frittée à des températures inférieures d'environ 600 °C à celles requises pour l'oxyde de titane classique (1 400 °C). Le solide obtenu était aussi plus dur et moins cassant.

L'oxyde de titane nanophase est même malléable : à température ambiante, il prend la forme du moule où on le presse. De surcroît, de nombreuses autres céramiques nanophases ont la même propriété. En 1988, nous avons analysé plus finement ces propriétés. À température ambiante, l'oxyde de titane nanophase devient beaucoup plus malléable lorsque la taille de ses grains est inférieure à 30 nanomètres. Cette découverte ouvrait la voie vers la mise en forme directe par emboutissage : on pourrait fabriquer rapidement et à faible coût des pièces en céramique, pour l'industrie automobile, par exemple. En outre, ces pièces résisteraient mieux aux hautes températures ou à l'atmosphère corrosive qui règnent dans un moteur.



2. ON FABRIQUE LES NANOMATÉRIAUX à l'aide d'une chambre de synthèse (en haut, à gauche) et d'une presse (en bas, à droite).

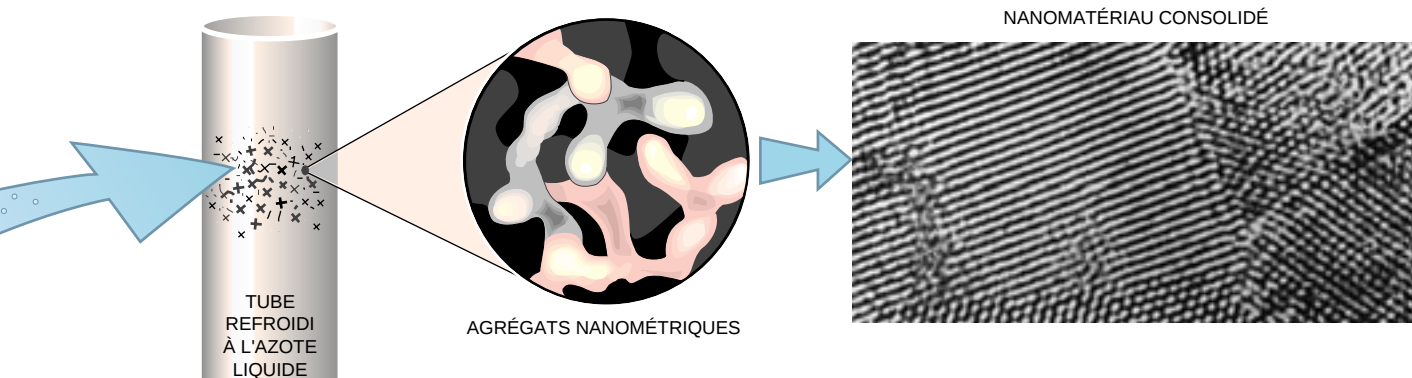
3. QUAND ON CHAUFFE un bloc métallique au-dessus de son point de fusion, des atomes s'évaporent. Ils se condensent en agrégats qui sont conduits, par convection, jusque dans un tube collecteur, où ils sont refroidis. Ces agrégats sont ensuite retirés du tube, puis compactés dans une presse.



Dessin : Jennifer C. Christiansen. Micrographie : George Thomas

Une autre équipe a déformé de l'oxyde de titane nanophase très dense en le comprimant à des températures aussi élevées que 800 °C ; la déformation peut atteindre 60 pour cent sans rupture, alors que les céramiques ordinaires cassent toujours dans de telles conditions. Récemment, une équipe a démontré la faisabilité de l'emboutissage de l'oxyde de titane nanophase, rapprochant ce procédé de l'industrialisation.

Comment des matériaux si fragiles que des céramiques se déforment-ils ainsi sans casser, quand ils sont de type nanophase? Lorsque l'on marche sur un tas de sable, les grains glissent les uns sur les autres. Dans le cas d'un solide massif, en revanche, les grains sont liés, de sorte que si l'on comprime un point, beaucoup de liaisons intergranulaires se rompent simultanément et une cassure apparaît. Lorsqu'une fracture commence à se former, des atomes voisins se déplacent pour la combler : plus les grains sont petits, plus la distance que ces atomes doivent parcourir est courte, et donc plus la réparation est rapide. Des grains nanométriques glissent donc plus facilement les uns sur les autres que des grains millimétriques. Les céramiques ordinaires que sont les minéraux se déforment ainsi, mais en plusieurs millions d'années. Les céramiques nanophases, qui ressemblent plus à un tas de sable, supportent une déformation rapide, compatible avec les procédés industriels.



La dureté des métaux varie en sens inverse de celle des céramiques : plus les grains des métaux classiques sont petits, plus le matériau est dur. Les métaux nanophases seraient-ils durs à l'extrême ? Nous avons fabriqué du palladium et du cuivre nanophases ; puis nous avons mesuré leur dureté en fonction de la taille de leurs grains. La dureté du cuivre augmente à mesure que la taille moyenne de ses grains diminue : quand les grains ont 50 nanomètres de diamètre, le cuivre nanophase est deux fois plus dur que le cuivre classique ; avec des grains de 6 nanomètres (la plus petite taille que nous obtenons), il est cinq fois plus dur. Ces résultats ont été confirmés par différentes méthodes, pour plusieurs métaux nanophases.

Pourquoi cette dureté exceptionnelle ? Un métal est déformé lorsque ses plans atomiques cristallins glissent les uns sur les autres. Imaginons un

tapis posé sur un parquet (le tapis représente un plan cristallin et le parquet un autre) : si nous essayons de faire glisser le tapis à plat, le frottement de toute sa surface s'oppose au mouvement ; en revanche, si nous plissons le tapis sur toute sa largeur à l'une de ses extrémités et que nous propageons ce pli de l'autre côté, le tapis se déplace facilement. Le pli est analogue à un défaut dans un plan atomique nommé dislocation : les métaux se déforment par la propagation de dislocations. Pour renforcer la dureté des métaux ordinaires, on peut disposer des obstacles sur le chemin des dislocations, telles des interfaces entre des grains différemment orientés, des joints de grains. C'est pourquoi la réduction de la taille des grains, qui augmente la densité des joints de grains, accroît la dureté.

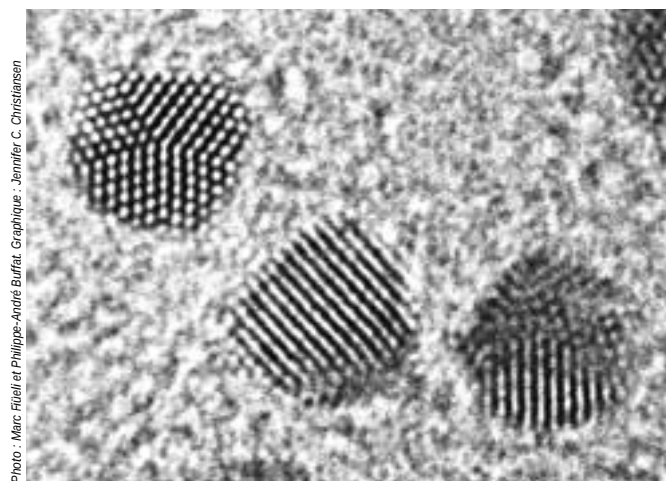
Les métaux nanophases sont-ils particulièrement durs parce qu'ils contiennent un grand nombre de joints de grains capables d'empêcher la propagation de dislocations ? Les analyses ont montré que la cause de leur dureté est ailleurs : en observant en microscopie électronique à transmission des agrégats métal-

liques et des métaux nanophases, nous avons découvert que les agrégats, isolés ou compactés, sont la plupart du temps dépourvus de dislocations. Ils sont simplement trop petits pour en contenir, et celles-ci sont difficiles à créer.

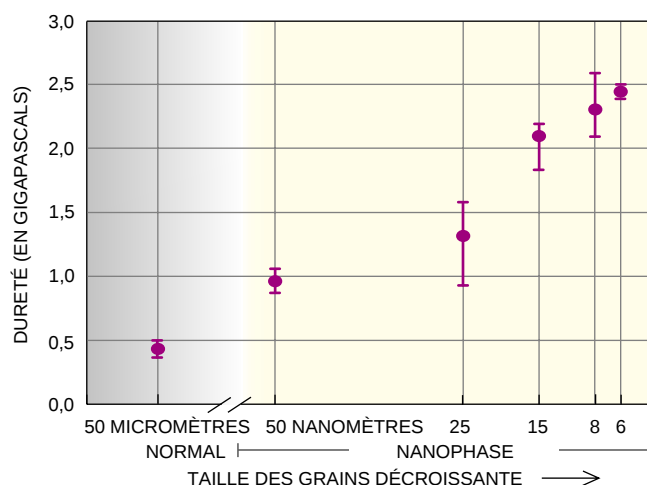
Plus de transparence

Les caractéristiques optiques des nanomatériaux dépendent également de la taille et de la disposition des agrégats. Par exemple, des particules de 1 à 50 nanomètres de diamètre sont trop petites pour disperser la lumière visible, dont la longueur d'onde est comprise entre 380 et 765 nanomètres : elles perturbent aussi peu la propagation des rayonnements lumineux qu'un canot de sauvetage brise les lames de l'océan. Autrement dit, les solides nanophases sont transparents s'ils ne contiennent pas de pores de taille supérieure à celle des agrégats. Une céramique transparente d'oxyde d'yttrium, qui est habituellement un matériau opaque, a ainsi été fabriquée.

Au contraire, les rayonnements de longueur d'onde inférieure, tels



4. DES AGRÉGATS D'OR d'environ trois nanomètres de diamètre, observés ici en microscopie électronique à transmission sur un film de carbone amorphe, ne contiennent que quelques plans atomiques (traits blancs et noirs).



5. LA DURETÉ DU CUIVRE NANOPHASE augmente quand la taille de ses grains diminue. Les grains nanométriques ne contiennent pas beaucoup de dislocations, défauts qui facilitent la déformation du métal massif.

Réactivité et taille des agrégats

En 1973, une équipe du Laboratoire de physico-chimie des rayonnements, à Orsay, observait, pour la première fois, que les propriétés d'agrégats de quelques atomes métalliques sont différentes de celles du métal massif. Dans les agrégats, la force des liaisons chimiques entre les atomes dépend beaucoup de leur nombre, surtout quand celui-ci est faible. Ce nombre d'atomes gouverne toutes les propriétés physiques et chimiques des agrégats.

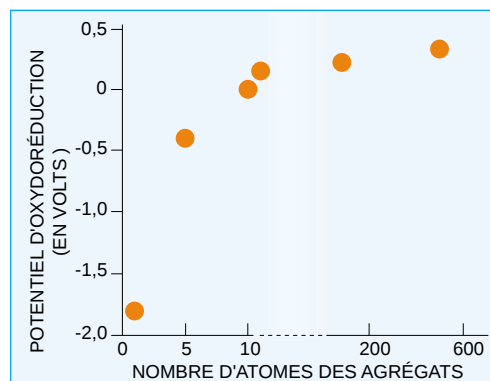
Depuis cette date, nous synthétisons des petits agrégats en solution, en transformant des ions métalliques en atomes neutres à l'aide de rayonnements ionisants (gamma, X ou faisceau de particules). Les atomes, formés isolément, s'agrègent progressivement. La taille finale des agrégats varie de quelques atomes à quelques centaines d'atomes. Elle est ajustée par le réglage de la dose de rayonnement et par l'ajout de molécules tensioactives qui forment une enveloppe autour de chaque agrégat et le stabilisent. Pour des conditions données, tous les agrégats croissent à la même vitesse et atteignent donc des tailles très proches. On observe directement, comme dans un film au ralenti, les différentes étapes, de la formation des atomes isolés à la coalescence des agrégats, en associant l'irradiation par des impulsions brèves (fournies par un faisceau de particules) à une détection spectroscopique en fonction du temps.

Les agrégats formés en solution par synthèse radiolytique peuvent être déposés à la surface de divers matériaux (oxydes, électrodes métalliques ou semi-conductrices, fibres de carbone), ou insérés dans les pores d'un matériau (membrane polymère, zéolithe). Des agrégats bimétalliques sont produits avec la même méthode, à partir d'une solution qui contient des ions de deux métaux : selon les conditions d'irradiation, on conduit la synthèse soit vers des structures où le cœur est formé du métal le plus noble et l'enveloppe du moins noble, soit vers un véritable alliage, comme dans une solution solide, avec parfois même des arrangements ordonnés des deux types d'atomes.

Plusieurs sociétés industrielles se sont intéressées à ces agrégats synthétisés par voie radiolytique, afin d'en exploiter les propriétés. Diverses applications sont utilisées ou en cours de développement : en catalyse, en électronique, en optique non linéaire et dans les processus photographiques.

La principale propriété thermodynamique d'un agrégat est sa capacité à perdre ou à gagner un électron en réagissant avec un autre système chimique, capacité caractérisée par une grandeur mesurable nommée potentiel d'oxydoréduction. La variation de ce potentiel d'oxydoréduction en fonction du nombre d'atomes des agrégats a été établie (voir la figure) : on introduit en solution une molécule référence, qui peut échanger des électrons avec les agrégats, et dont on connaît le potentiel d'oxydoréduction. Les agrégats les plus petits perdent des électrons et se dissolvent : leur potentiel est inférieur à celui de la référence. En revanche, les agrégats de potentiel supérieur à celui de la référence gagnent des électrons et, par la réduction successive d'ions métalliques à leur surface, leur taille augmente. Grâce à ces études, le mécanisme du développement photographique, employé empiriquement depuis plus d'un siècle, est enfin complètement expliqué. Ces travaux permettront d'améliorer la qualité des émulsions photographiques.

Jacqueline BELLONI, URA 75 du CNRS et Université Paris Sud



Plus un agrégat métallique est petit, plus son potentiel d'oxydoréduction est faible : les plus petits agrégats s'oxydent beaucoup plus facilement que le métal massif. Le potentiel est ici rapporté à l'électrode normale à hydrogène

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

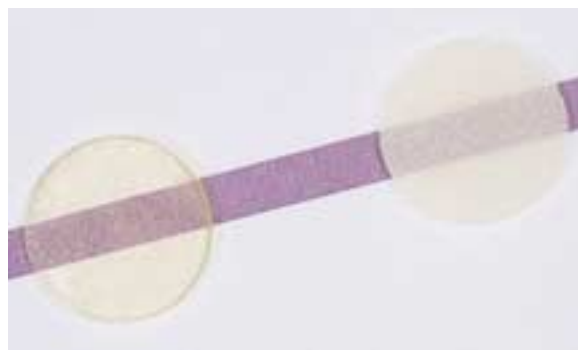
Le grand rapport entre la surface exposée et le volume de l'oxyde de titane nanophase n'était pas la seule raison de ces performances : des manques d'atomes d'oxygène, à l'intérieur des grains (lacunes mises en évidence par spectroscopie Raman), permettent la diffusion rapide des atomes de soufre venant 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.