

l'intérieur et l'extérieur des gouttes. On peut y parvenir en ajoutant des molécules encore plus hydrophobes que les molécules d'huile, que l'on nomme des costabilisateurs. Pendant le mélange, ces molécules se répartissent sur toutes les gouttes, où elles se retrouvent à la même concentration.

Toutefois, cela change quand les plus grosses des gouttelettes commencent à croître aux dépens des plus petites ; comme seules les molécules d'huile diffusent, et non celles des costabilisateurs, les concentrations de ces derniers diminuent sur les gouttes qui grossissent et augmentent sur celles qui diminuent. Comme les différences de concentration augmentent l'énergie globale du système, les molécules d'huile tendent alors à diffuser en sens inverse pour annuler ces différences et réduire ainsi l'énergie.

Un équilibre grâce à la pression osmotique

Nommé osmose, ce phénomène se caractérise par une pression osmotique qui, dans le cas qui nous intéresse, peut contrecarrer suffisamment la pression de Laplace pour entraîner une diffusion inverse des molécules vers les gouttelettes dont la taille diminue. Un équilibre peut ainsi se créer, qui stabilise l'émulsion. Cette méthode ne fonctionne cependant que si les tailles de gouttes ne sont pas uniformes au début du processus.

Tous ces phénomènes peuvent être observés dans le lait, dont les corps gras se séparent normalement de la phase

aqueuse peu après la traite pour former la crème. Pour l'éviter, il faut répartir les gouttelettes de gras de la façon la plus homogène possible. C'est ce que l'on réalise en homogénéisant le lait sous haute pression. Les forces de cisaillement qui se développent au cours de cette opération ont pour conséquence que le diamètre des gouttelettes de gras passe de 10-30 micromètres à seulement un ou deux micromètres. C'est pour cette raison que les laits homogénéisés vendus en supermarché ne produisent pas de crème, contrairement aux laits non travaillés.

Par ailleurs, certains composants naturels confèrent au lait une stabilité supplémentaire. C'est le cas de la lécithine, un phospholipide doté d'une tête hydrophile et de deux queues hydrophobes qui empêchent la fusion des gouttelettes de gras, car elles agissent comme un tensioactif ionique. En outre, les corps gras du lait les moins solubles se comportent comme des costabilisateurs.

Il existe aussi des émulsions d'eau dans du gras, tel le beurre liquide. Dans ce cas, le costabilisateur, au lieu d'être hydrophobe, doit être particulièrement hydrophile, et se dissout mieux dans l'eau que dans la graisse. Une condition que le sucre ou le sel remplissent.

Les émulsions ont des parents proches : les suspensions. Plutôt que des dispersions de gouttelettes liquides dans un liquide, ce sont des dispersions de particules solides dans un liquide. Les émulsions et les suspensions font partie du groupe des dispersions, c'est-à-dire des mélanges de

substances ne se dissolvant pas les unes dans les autres et ne réagissant pas non plus chimiquement. Notons que les dispersions comprennent aussi les aérosols, qui sont de fines dispersions de solides ou de liquides dans un gaz. Le brouillard (dispersion de gouttelettes d'eau dans l'air) et la fumée (dispersion de particules de suie dans l'air) en sont des exemples.

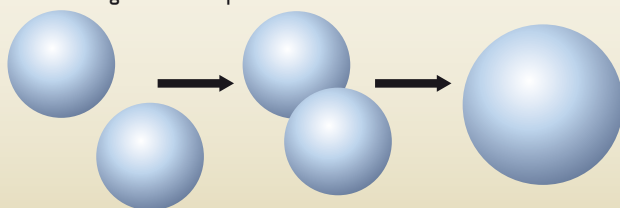
Les émulsions sont des dispersions

En chimie, on parle de dispersion quand on a un milieu continu où sont réparties de façon homogène des particules solides ou des gouttelettes de diamètres compris entre 1 et 1 000 nanomètres (soit un micromètre). Les particules dispersées (solides ou liquides) sont nommées des colloïdes, et les dispersions sont des systèmes colloïdaux. Les dispersions (émulsions, suspensions, aérosols, etc.) sont omniprésentes dans notre vie quotidienne : en cuisine, quand nous manipulons de la crème, du beurre ou de la mayonnaise, dans la salle de bains, où nous employons des lotions corporelles, des crèmes et du dentifrice, ou dans l'atelier quand nous manipulons peintures et colles.

Les colloïdes sont très étudiés, car, tant par la taille minuscule des particules dispersées que par les nombreuses combinaisons de matériaux possibles, ils ont de nombreuses applications dans les domaines les plus divers. Les chercheurs qui les étudient ont d'abord tenté d'imiter la nature ou de s'en inspirer, pour obtenir des dispersions

Coalescence des gouttelettes

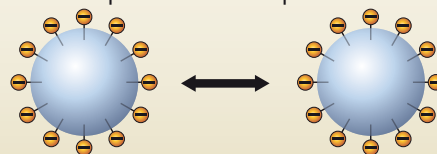
Fusion des gouttelettes qui se rencontrent



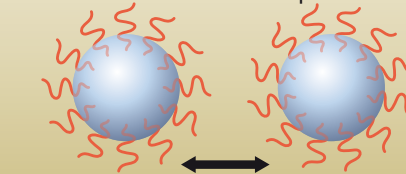
2. LES ÉMULSIONS SONT INSTABLES, car les gouttelettes constituant la phase dispersée tendent à fusionner *(ci-dessus)*. Toutefois, l'ajout d'un tensioactif – une molécule à deux extrémités, l'une hydrophile (lipophile) et l'autre hydrophobe (lipophile) – limite cette tendance, soit par répulsion électrostatique *(ci-contre en haut)*, soit par répulsion stérique *(ci-contre en bas)*.

Les tensioactifs stabilisent les émulsions...

...via une répulsion électrostatique



...ou via leur encombrement stérique.



artificielles utiles. Une étape importante a été franchie par le Norvégien John Ugelstad (1921-1997) et par Mohamed El Aasser, de l'Université Lehigh aux États-Unis. Dans les années 1970, tous deux ont développé un procédé permettant de produire des mini-émulsions stables.

On nomme ainsi des émulsions contenant des gouttelettes de 30 à 50 nanomètres de diamètre. On les produit en ajoutant aux fractions huileuse et aqueuse une dose de tensioactif et un costabilisateur avant de mélanger le tout à l'aide d'ultrasons. Le dosage du tensioactif est déterminant : s'il est en quantité insuffisante, l'émulsion n'est pas stable ; s'il est trop concentré, des micelles, c'est-à-dire des agrégats de molécules à extrémités hydrophobes et hydrophiles, se forment, au sein desquelles l'huile diffuse de façon incontrôlée.

Il est à noter que les mini-émulsions se distinguent des micro-émulsions, qui sont des émulsions où les tailles particulières sont plutôt de l'ordre de dix nanomètres. On les obtient en ajoutant un cotensioactif (en général un alcool).

Les mini-émulsions servent à fabriquer une large palette de matériaux intéressants de par leurs applications. Les trois principaux types de tels matériaux sont les nanosphères, les nanocapsules et les particules Janus (des particules dont les deux moitiés sont différentes) ; on les obtient en enrobant des colloïdes par des polymères. Lors de la synthèse de ces particules, les gouttelettes contenues dans une mini-émulsion servent de minuscules réacteurs (voir la figure 4).

Des mini-émulsions pour de nombreux matériaux intéressants

Pour créer des nanoparticules de polymère, on prépare une mini-émulsion de la phase huileuse constituée de monomères dans de l'eau ; puis on déclenche une polymérisation, au cours de laquelle les monomères se lient pour former de longues chaînes moléculaires. Ces opérations aboutissent à de minuscules sphérules de plastique de taille uniforme. Ce procédé est applicable à presque tous les monomères et les techniques de polymérisation courantes conviennent à la fabrication, de sorte que les plastiques les plus divers peuvent être envisagés.

Les mini-émulsions permettent aussi d'obtenir des nanoparticules à partir de

polymères déjà synthétisés. Pour ce faire, on dissout les molécules lipophiles du polymère dans un liquide huileux légèrement volatil, puis on fait une émulsion dans l'eau. Il suffit alors de laisser le liquide huileux volatil s'évaporer pour obtenir une émulsion de polymères dans l'eau. Cette méthode offre la possibilité de produire des émulsions débarrassées des catalyseurs et autres agents nécessaires à la production du polymère, sans avoir à le caractériser précisément.

Des nanoparticules de plastique

Les dispersions aqueuses de nanoparticules de polymères ont de nombreuses applications industrielles. Elles se distinguent par le fait qu'elles ne contiennent pas de solvants organiques, substances souvent toxiques et coûteuses. Cela les rend moins polluantes, plus faciles d'emploi et bon marché. On s'en sert pour préparer des surfaces. Après y avoir étalé la dispersion, on la chauffe, ce qui permet de souder les nanoparticules et de former un film, dont les propriétés dépendent du polymère employé.

Parce qu'elles sont particulièrement résistantes, les résines de polymères, tels les polyuréthanes et les polyesters, se sont par exemple imposées dans les peintures automobiles capables de résister aux éraflures. Pour leur part, les plastiques mous, tels les polybutadiènes ou les élastomères, à base de polyisoprène, conviennent pour produire des colles.

Les particules Janus sont des nanoparticules particulières, car elles sont constituées de deux moitiés dotées de propriétés différentes. On les nomme ainsi d'après Janus, le dieu romain à deux visages, gardien des passages, des croisements, des choix. On obtient des particules Janus en créant des émulsions d'un liquide huileux volatil contenant deux polymères non miscibles dans le même solvant. Leurs molécules se répartissent de façon régulière sur les gouttelettes, mais ne se mélangent pas, de sorte qu'après vaporisation du liquide huileux volatil, les particules sont recouvertes de deux types de polymères. Ainsi, les particules Janus présentent deux moitiés différentes, portant des charges électriques opposées. Si, en outre, les deux moitiés sont noires et blanches, on peut

LES AUTEURS



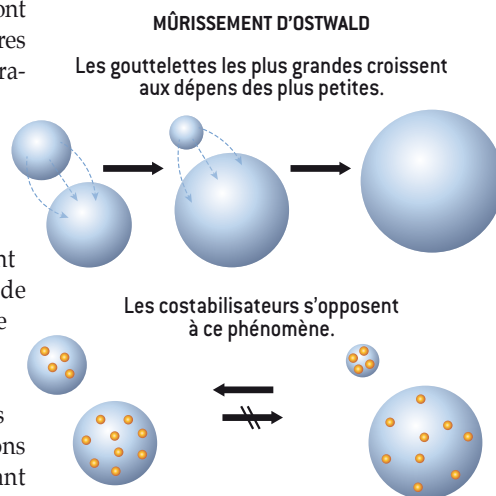
Daniel KLINGER, physico-chimiste, travaille à l'Université de Santa Barbara en Californie.



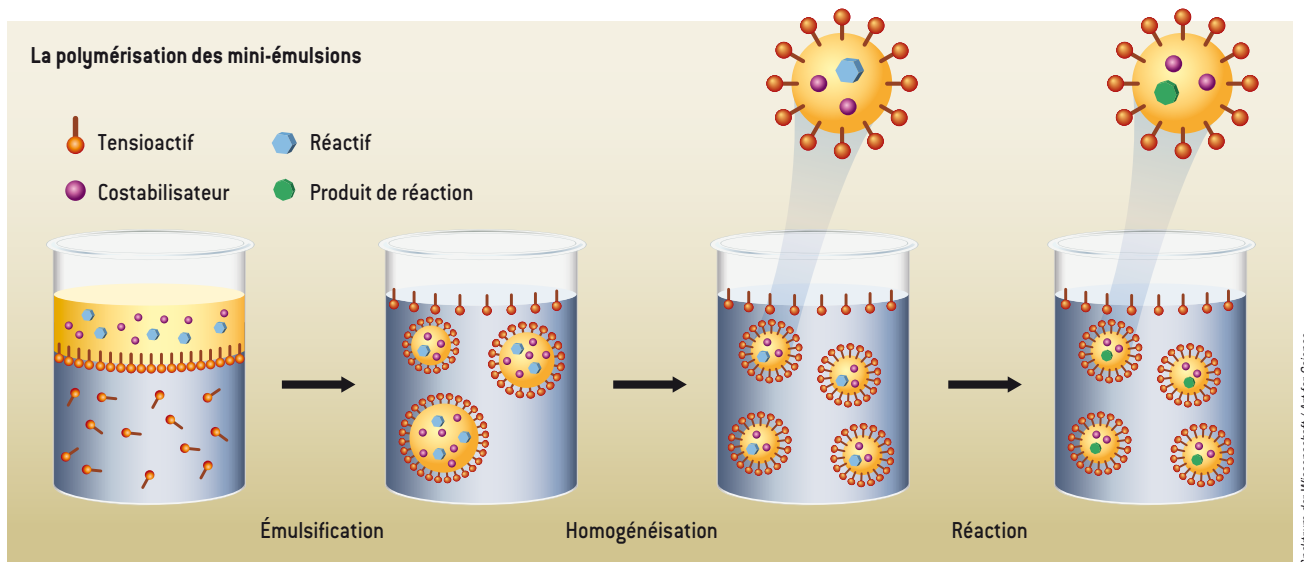
Nicolas VOGEL, physico-chimiste, effectue ses recherches à l'Université Harvard.



Katharina LANDFESTER dirige l'Institut Max Planck pour la recherche sur les polymères, à Mayence en Allemagne.



3. UNE ÉMULSION, même si elle a été stabilisée, finit pas se dissocier par « mûrissement d'Ostwald ». Ce processus désigne la très lente migration des molécules des gouttelettes les plus petites (pression interne plus grande) vers les gouttelettes les plus grosses (pression interne inférieure). Cette migration est due à la très faible solubilité du liquide des gouttelettes dans le solvant. Bien que les deux liquides soient dits non miscibles, le liquide des gouttelettes est très légèrement soluble dans le solvant.



4. LA SYNTHÈSE DE NANOPARTICULES UNIFORMES est possible avec des mini-émulsions. On mélange un tensioactif, un réactif et un costabilisateur. On obtient une émulsion. Après homogénéisation, on ajoute un réactif qui peut, par exemple, être polymérisé à la fin : de minuscules sphères de plastique se forment.

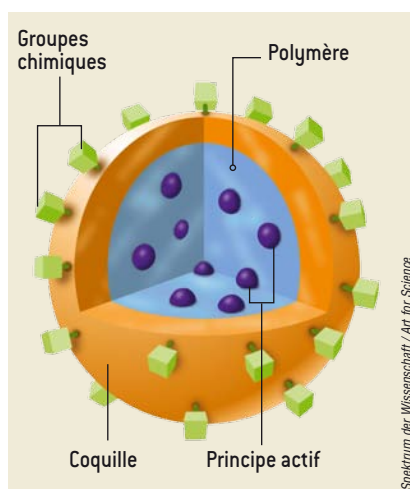
s'en servir comme encre électronique sur des écrans de liseuses, puisque l'application d'un champ électrique permet de faire venir en surface soit la face blanche, soit la face noire, et d'obtenir ainsi le contraste recherché.

Une nanocapsule correspond à un noyau solide ou liquide entouré d'une coquille de polymère plastique. Les mini-émulsions suivies d'une polymérisation rendent leur préparation simple. La substance à entourer est mélangée avant la préparation de la mini-émulsion. Si elle est plus hydrophobe que le matériau destiné à la coquille, on travaillera à partir d'une émulsion d'huile dans l'eau, de sorte que les gouttelettes d'huile contiendront à la fois le monomère et la substance à encapsuler.

Des pigments protégés par des nanocapsules

Pendant la polymérisation qui suit, les monomères s'assemblent en un plastique réparti à l'interface de la gouttelette et de son solvant aqueux. La coquille se forme donc spontanément. Dans l'industrie, on emploie largement ce procédé afin d'envelopper dans une enveloppe protectrice des particules de pigments (des particules de suie par exemple) et ainsi éviter qu'elles ne s'agregent.

Quand la substance à encapsuler est hydrophile, on doit en revanche préparer une mini-émulsion d'eau dans l'huile.



5. LES NANOPARTICULES issues des mini-émulsions s'adaptent aux fonctions les plus diverses. Pour les y préparer, on choisira de stocker des substances dans la capsule ou de fixer des groupes chimiques ou un polymère particulier à sa surface... Il est possible de synthétiser les particules sous la forme de sphérules, de capsules ou de gel, et il pourra être souvent intéressant de les utiliser sous la forme de dispersions.

Plusieurs types de synthèses sont alors possibles. Dans le premier, deux monomères différents sont employés ; tandis que l'un est en solution dans les gouttelettes d'eau, l'autre est dissous dans le solvant huileux. Les deux monomères se rencontrent à l'interface eau-huile, où ils réagissent pour former le polymère formant la coquille.

Nommé nanoprecipitation, le deuxième procédé consiste à introduire un polymère soluble dans l'huile ; celle-ci est un mélange de deux liquides huileux, dont l'un, légèrement volatil, solubilise le polymère. Au cours de la vaporisation du liquide huileux légèrement volatil, le polymère se dépose (précipite) sur la couche extérieure des nanogouttes d'eau et forme ainsi la coquille.

C'est surtout en médecine que la possibilité d'encapsuler des principes actifs est utile. L'imagerie par résonance magnétique nucléaire (IRM) en fournit un premier exemple. Pour examiner spécifiquement un organe, on doit injecter au patient un produit de contraste formé de nanoparticules contenant un oxyde de fer magnétisable (Fe_3O_4). Si l'on utilisait cette substance à l'état naturel, elle se diluerait dans l'eau, donc dans le sang, ce qui pourrait provoquer un choc physiologique lié au fer. C'est pourquoi il est important d'entourer le produit de contraste d'une coquille, produite de la façon que nous avons décrite.

Toutefois, transporter un principe actif n'est pas tout en médecine : encore faut-il le livrer à la bonne adresse ! Cette nécessité est par exemple évidente lorsqu'il s'agit de marqueurs de tumeur, censés atteindre les cellules cancéreuses et les marquer afin de faciliter leur détection. Les particules de fer encapsulées conviennent à cette fin, pourvu que l'on prenne soin, par des moyens chimiques adéquats, de tapisser leur surface d'anticorps qui se collent aux cellules cancéreuses.

Des principes actifs libérés sur commande

Dans beaucoup de cas, une fois parvenues à l'endroit visé, les nanocapsules sont censées libérer des principes actifs. Il s'agit en général de substances qui

endommagent les cellules cancéreuses ou les détruisent. Souvent, elles ne sont pas assez sélectives et endommagent aussi des tissus sains, ce qui est à l'origine des effets secondaires indésirables des chimiothérapies.

C'est pourquoi on cherche à réaliser des nanocapsules intelligentes, qui ne relâchent leur principe actif qu'à la réception d'un signal à l'endroit visé. Grâce à la réalisation de mini-émulsions, nous avons pu réaliser de telles nanocapsules. Pour cela, nous avons encapsulé une substance antitumorale dans un polyester synthétique, lequel ne se dissout qu'en milieu légèrement acide. Or c'est le cas à l'intérieur des tumeurs, puisque ces dernières, manquant le plus souvent d'oxygène, tirent leur énergie d'une fermentation lactique. Dans un environnement neutre, les nano-

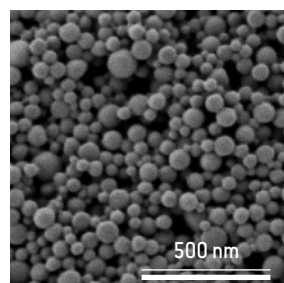
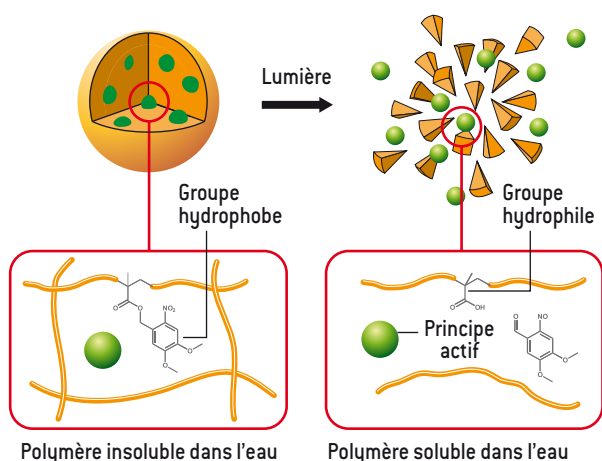
capsules restent fermées, ce qui épargne les cellules saines.

Les principes actifs peuvent être libérés sous l'effet d'une impulsion lumineuse ou de la chaleur. Le polymère dont est faite la coquille n'est pas le seul récepteur possible pour un tel signal déclencheur : on peut aussi intégrer à l'intérieur de la capsule des substances particulières réagissant au signal. Ainsi, nous avons développé récemment sur ce principe des concepts de nanoparticules et de nanocapsules thermosensibles ou photosensibles (voir l'encadré ci-dessous).

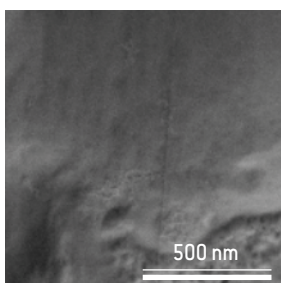
Dans toutes les applications médicales évoquées jusqu'à présent, il s'agit d'ajuster les propriétés des nanoparticules à l'objectif poursuivi. Les minuscules sphères peuvent aussi être exploitées pour conférer des propriétés spéciales à des

L'OUVERTURE DES NANOCAPSULES SUR SITE

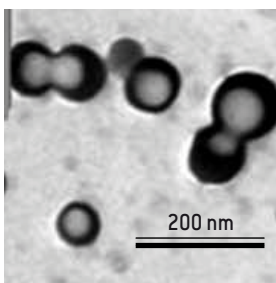
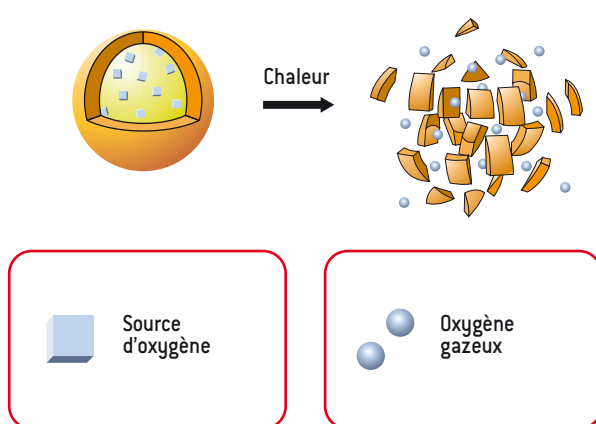
Grâce au procédé des mini-émulsions, les chercheurs fabriquent des nanoparticules et les équipent de déclencheurs qu'un signal active lorsque la nanoparticule est près de sa cible. Dans l'exemple de gauche, des parties hydrophobes de molécules se séparent de chaînes polymères sous l'effet d'un rayonnement ultraviolet. Irradié par cette lumière, le plastique initialement hydrophobe devient hydrophile, donc soluble dans l'eau, ce qui libère le principe actif qu'il contient. On peut aussi utiliser comme signal un saut de température. Dans l'exemple de droite, une nanocapsule de plastique contient un principe actif qui, chauffé, libère de l'oxygène ; le dégagement de ce gaz fait alors sauter la paroi de la capsule.



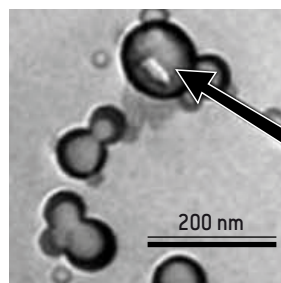
Particules sphériques



Particules dissoutes



Nanocapsules intactes

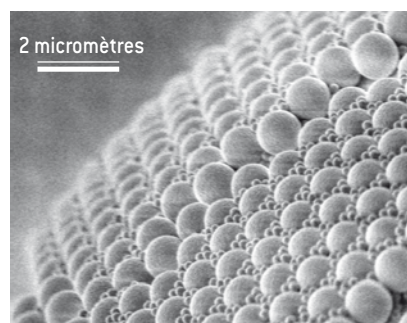
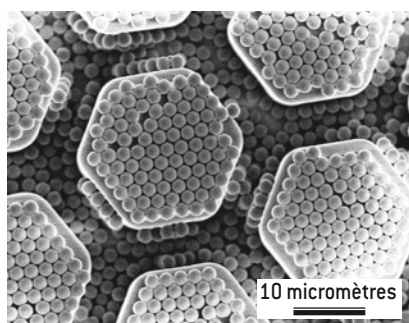
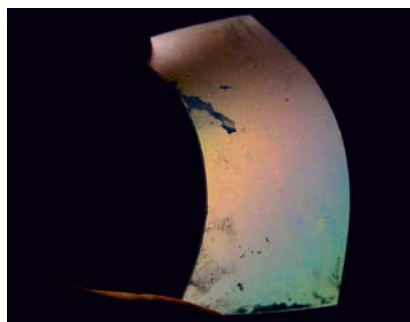
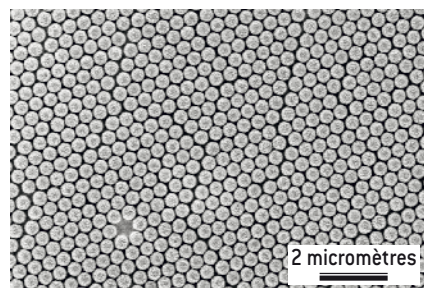
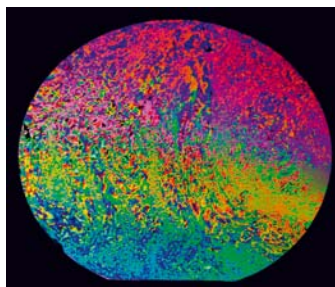
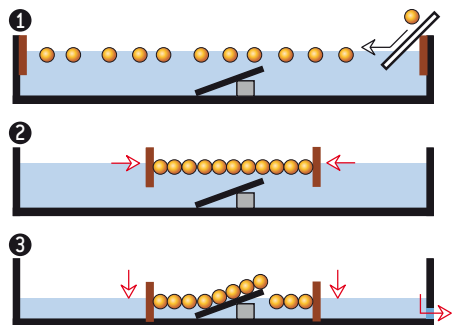


Nanocapsule détruite

Les mini-émulsions servent aussi à revêtir des objets d'une couche de nanosphères. Pour ce faire, on dépose la dispersion de particules sur une surface d'eau recouvrant l'objet (1); les particules s'y répartissent en se liant par paquets. Cette monocouche de particules est compactée par réduction de la surface d'eau (2). Une monocouche de sphères recouvre ainsi l'objet une fois que l'eau a été évacuée (3). La méthode peut servir à revêtir un substrat de si-

licium (ci-dessous, des interférences l'irisent), où le microscope électronique révèle l'arrangement régulier des particules (ci-dessous, à droite).

On peut également déposer des structures complexes, par exemple sur une feuille de plastique souple (en bas à gauche), former des microcolonnes structurées (en bas au milieu), recouvrir une sphère de particules de tailles différentes (en bas à droite), etc.



Spectrum der Wissenschaft / Art for Science : Photos : D. Klinger, N. Vogel, K. Landfester

surfaces. En cela, la nature a précédé les chercheurs, puisque les ailes de certains papillons et coléoptères sont irisées, sans pour autant contenir le moindre pigment! Ces couleurs résultent d'une microstructuration des surfaces par des particules colloïdales bien ordonnées. Cette structuration transforme la surface en un réseau optique qui crée des interférences lumineuses, où sont favorisées les longueurs d'onde du même ordre de grandeur que les dimensions des particules.

Structurer des surfaces

L'effet lotus, qui fait glisser l'eau sur certaines feuilles végétales, résulte aussi de la présence à leurs surfaces de minuscules structures formant des motifs réguliers et recouverts d'une couche hydrophobe. N'y trouvant qu'un contact limité, les gouttes d'eau s'y égrenent, puis y glissent en emportant la poussière qu'elles rencontrent. Ce

type de surface autonettoyante est à l'œuvre sur certaines façades de bâtiment ou sur certains vêtements. En électronique, la structuration de surfaces à l'échelle du nanomètre est aussi intéressante pour miniaturiser des composants.

Le procédé de structuration idéal ne doit pas seulement conduire à des structures régulières et hautement ordonnées. Il doit aussi s'appliquer à de grandes surfaces, être rapide et peu coûteux, etc. Autant de contraintes difficiles à concilier. Les méthodes modernes de la lithographie à base de faisceaux d'électrons ou de rayons X permettent une structuration très précise, mais elles nécessitent des instruments très onéreux. Les méthodes moins exigeantes techniquement, telle la photolithographie conventionnelle sous rayonnement ultraviolet, sont rapides et peu coûteuses, mais leur résolution est de quelques centaines de nanomètres seulement (soit quelques micromètres).

Afin de structurer précisément des surfaces à grande échelle et à faibles coûts, nous avons développé un procédé fondé sur la cristallisation de particules colloïdales en deux dimensions. Il exploite le fait que les tailles des particules peuvent être réglées de façon précise, à l'intérieur d'un intervalle compris entre 50 nanomètres (0,05 micromètre) et quelques micromètres. Les diamètres des particules colloïdales que l'on obtient ne fluctuent que de cinq pour cent, ce qui suffit pour la plupart des applications.

Cristalliser une monocouche

De petites sphères aussi régulières se forment surtout à la faveur d'une auto-organisation, où apparaissent des structures périodiques ordonnées, dans lesquelles chaque sphère est entourée de six voisines. Il s'agit là de l'organisation naturelle d'un empilement d'oranges.

Actuellement
en kiosque

pourlascience.fr/dossiers

DOSSIER

■ POUR LA

SCIENCE

Le magazine thématique de l'actualité scientifique

- Avatar, Game of Thrones... les langues imaginaires
- Le français des SMS
- Les langues sifflées
- La naissance des langues

Entretien avec
Alain Rey



Le magazine thématique de l'actualité scientifique

N° 82 Janvier-Mars 2014



L'évolution des langues

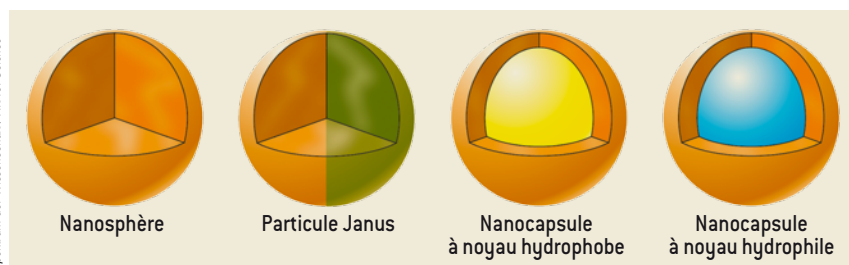
Quel avenir ?

DOSSIER HORS-SÉRIE

POUR LA SCIENCE • DOSSIER N° 82 • JANVIER-MARS 2014

n° 82 – 120 pages – prix de vente : 6,95 €

Les langues, à l'instar des espèces, naissent, vivent et meurent, parfois prématurément, faute de protection. Ce numéro dresse un état des lieux de la diversité linguistique, des menaces qui pèsent sur elle, des solutions pour sauvegarder les langues en danger... car chaque langue qui meurt emporte avec elle un fragment de l'humanité !



6. PLUSIEURS TYPES DE NANOPARTICULES sont synthétisés à partir des mini-émulsions, par exemple des nanoparticules Janus ou divers types de nanocapsules.

Les cristallographes qualifient de réseau hexagonal une telle disposition.

Notre procédé repose sur l'idée de déposer sur un substrat solide des monocouches de colloïde, faites d'une seule couche de sphères. Pour cela, nous recouvrons d'eau un objet et nous versons une dispersion colloïdale. Si l'on procède avec soin, les particules s'ordonnent les unes à côté des autres à la surface de l'eau. De cette façon, on parvient à recouvrir cette dernière d'une couche de particules colloïdales ordonnées selon un réseau hexagonal.

Si ensuite on évacue le liquide, la monocouche arrive au contact du substrat, dont peu importe la nature ; il peut s'agir de céramique, de plastique, de métal ou de tout autre solide non soluble dans l'eau. Il n'est pas nécessaire non plus que la surface soit parfaitement lisse. On peut ainsi déposer une monocouche de particules colloïdales sur du silicium, sur des substrats plastiques souples, sur des surfaces préstructurées, etc. On peut aussi ajouter plusieurs monocouches de sphères de tailles différentes (voir l'encadré page 58).

Une nouvelle forme de lithographie

Des agencements réguliers de particules colloïdales peuvent aussi servir de masque pour graver sur le substrat des motifs faits de cônes de tailles nanométriques. Par exemple, on parvient ainsi à rendre non réfléchissantes des surfaces de verre : grâce aux nanocônes, l'indice optique varie progressivement dans la direction perpendiculaire à la surface. La transition entre le verre et l'air est alors douce, ce qui évite les discontinuités d'indice optique à l'origine des reflets. On peut également fabriquer de cette façon des surfaces autonettoyantes exploitant l'effet lotus.

Nos méthodes de fabrication de nanocapsules peuvent aussi être mises à profit

pour enfermer à l'intérieur de particules de polymère des substances moléculaires riches en métaux, ce que l'on nomme des complexes métalliques. Nous avons appliqué cette idée à nos monocouches, ce qui autorise une nouvelle forme de lithographie. Ces arrangements colloïdaux ne sont qu'une étape vers des motifs constitués uniquement de particules métalliques.

Une fois que ces monocouches de particules métalliques ont été déposées sur un objet, on chauffe leur surface à l'aide d'une torche à plasma, ce qui libère le métal et soude une minuscule particule métallique là où les nanocapsules se trouvaient en contact avec le substrat.

La taille de ces minuscules particules métalliques est ajustée à volonté par la quantité de complexe métallique que contient chaque nanocapsule. Puisque cette dernière peut être aussi petite que l'on veut, on parvient à produire des particules métalliques extrêmement petites, de diamètre inférieur à dix nanomètres.

Des nanoparticules métalliques de diamètre bien précis

La distance entre particules est déterminée par le diamètre des nanocapsules initiales. Elle peut de même être ajustée de façon très précise. Notre procédé allie ainsi les avantages de la lithographie colloïdale – rapidité, utilisation possible sur de grandes surfaces, peu de matériel nécessaire – avec une précision de quelques nanomètres, obtenue d'ordinaire uniquement au moyen de grands et coûteux équipements. Le dépôt ordonné de nanoparticules métalliques permet notamment de réaliser des mémoires informatiques, à base de nanoparticules magnétiques.

Puisqu'on peut encapsuler plusieurs complexes métalliques suivant une proportion fixée, il est aussi possible de réaliser des alliages à proportions fixées. C'est ainsi que notre équipe est parvenue récemment à déposer sur un substrat des nanoparticules faites d'un alliage fer-platine.

Tout cela ne représente que quelques-unes des nombreuses applications possibles des mini-émulsions ou, d'une manière générale, des colloïdes. Un siècle après leur première description, ces systèmes restent très prometteurs. ■

■ BIBLIOGRAPHIE

N. Vogel *et al.*, *From soft to hard : The generation of functional and complex colloidal monolayers for lithography*, *Soft Matter*, vol. 8, pp. 4044-4061, 2012.

D. Klinger et K. Landfester, *Stimuli-responsive microgels for the loading and release of functional compounds – Fundamental concepts and applications*, *Polymer*, vol. 53, pp. 5209-5231, 2012.

K. Landfester, *Miniemulsionspolymerisation und Struktur von Polymer- und Hybridnanopartikel*, *Ang. Chemie*, vol. 121, pp. 4556-4576, 2009.

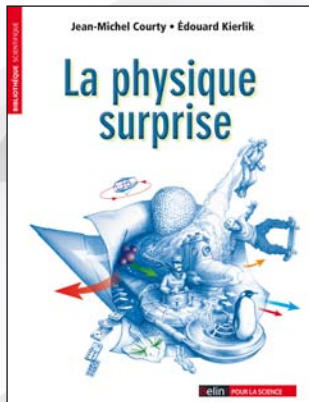
H. J. Butt *et al.*, *Physics and Chemistry of Interfaces*, Wiley-VCH, 2006.

S. Nayak et L. A. Lyon, *Weiche Nanotechnologie mit weichen Nanopartikel*, *Ang. Chemie*, vol. 117, pp. 7862-7886, 2005.

La librairie SCIENCE

Le savoir scientifique au fil des pages

La physique surprise



**Jean-Michel Courty
et Édouard Kierlik**

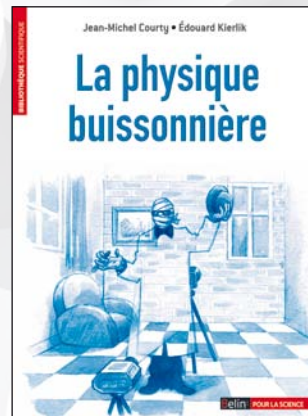
Passionnés de physique et curieux de tout, Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik vous invitent à une nouvelle promenade sur des chemins de traverse dans un langage accessible, simple et imagé, sans jargon ni formules. Avec

eux, laissez-vous surprendre par les phénomènes physiques que vous avez déjà côtoyés sans même les remarquer !

Éditions Belin / Pour la Science
184 pages – 24 euros – ISBN 978-2-8424-5121-9

La physique buissonnière

Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik



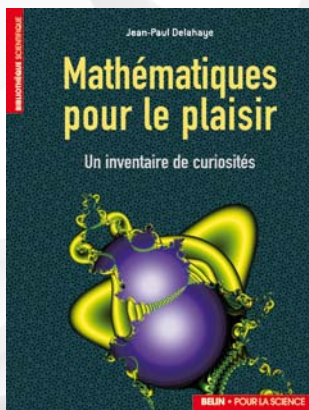
Une plante plus rapide qu'une mouche, un tuyau qui parle, une cape qui rend invisible, etc. La nature est pleine de surprises pour qui veut bien s'aventurer hors des sentiers battus. Passionnés de physique, les auteurs vous invitent à une promenade sur des chemins de traverse pour comprendre cette physique du quotidien.

Éditions Belin/Pour la Science 2009
160 pages – 22,35 euros – ISBN 978-2-8424-5105-9

Mathématiques pour le plaisir

Un inventaire de curiosités

Jean-Paul Delahaye

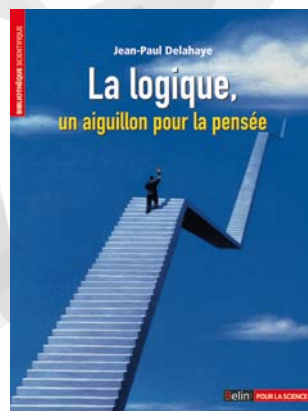


Arts et mathématiques, géométries amusantes, jeux, nombres, casse-tête et énigmes... Les mathématiques sont une source de joie et d'épanouissement pour celui qui sait y consacrer un peu d'attention et d'esprit ludique !

Éditions Belin / Pour la Science 2010
208 pages – 25,40 euros
ISBN 978-2-8424-5104-2

La logique, un aiguillon pour la pensée

Jean-Paul Delahaye



La logique a connu d'incroyables progrès depuis deux siècles : l'incomplétude de Gödel et l'indécidabilité de Turing ; la troublante loi de Benford, etc. Cet ouvrage sur la logique moderne des sciences intéressera autant mathématiciens que philosophes et curieux intrigués par le monde abstrait des raisonnements.

Éditions Belin / Pour la Science
200 pages – 27 euros – ISBN 978-2-8424-5115-8