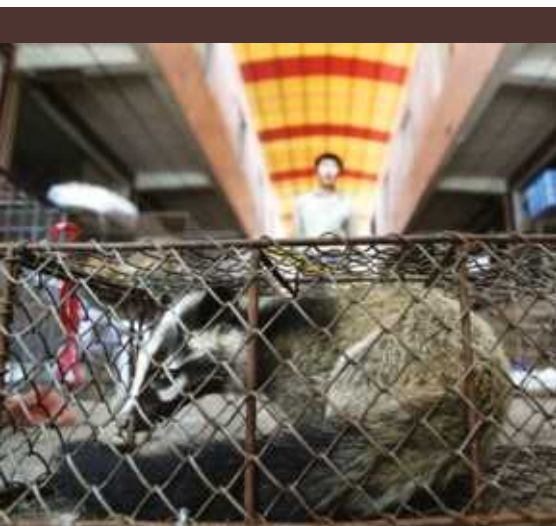




- Pays : Chine
- Virus déjà observés : SRAS, H5N1
- Population étudiée : les commerçants sur les marchés.



- Pays : Malaisie
- Virus déjà observé : le virus Nipah
- Population étudiée : les chasseurs d'animaux sauvages.

gent la plupart des maladies infectieuses. Les populations à risque sont par exemple les personnes souffrant de drépanocytose – une maladie héréditaire caractérisée par l'altération de l'hémoglobine, la protéine de transport de l'oxygène dans le sang – qui reçoivent des transfusions sanguines pour traiter leur maladie.

Si nous découvrons des individus infectés dans ces populations, nous devons lancer un programme mondial de surveillance des approvisionnements en sang. De fait, nous tentons de mettre au point de nouveaux tests diagnostiques qui permettent de vérifier la présence de ces virus dans le sang.

Il serait aussi utile de déterminer le mode de transmission d'un agent pathogène : nous saurions alors quelles tactiques adopter pour bloquer sa propagation. Par exemple, si un virus est sexuellement transmissible, les responsables de santé publique pourraient lancer des campagnes d'information recommandant l'utilisation du préservatif.

Les gouvernements peuvent aussi prendre certaines mesures pour éviter que le sang conservé dans les banques ne soit contaminé par de nouveaux virus. Par exemple, après nos découvertes concernant la relation entre l'exposition à des primates non humains et l'apparition de nouveaux virus, le gouvernement canadien a modifié sa politique de don du sang : celle-ci exclut désormais les donneurs ayant eu des contacts avec des primates non humains.

C'est l'affaire de tous

En plus de nos tentatives de prévention, des programmes informatiques tels que *HealthMap* et *Promed* compilent des rapports quotidiens sur les épidémies dans le monde entier, et des systèmes d'alerte sur internet, tels que ceux pilotés par *google.org*, utilisent l'ensemble des données pour prévoir les épidémies de grippe.

De même, on a montré que les systèmes de surveillance des pays concernés et de l'Organisation mondiale de la santé joueront un rôle majeur pour stopper la prochaine épidémie de peste.

Pour notre part, nous aimerions étendre notre réseau de surveillance à d'autres pays, tels le Brésil et l'Indonésie, qui présentent une grande diversité d'espèces animales. Si notre programme réussit à prévenir ne serait-ce qu'une seule pandémie dans les 50 prochaines années, le coût investi sera minime comparé aux bénéfices humains et financiers.

Les hommes essaient de prédire diverses menaces naturelles, tels les ouragans, les tsunamis, les tremblements de terre et les éruptions volcaniques. Nous n'avons aucune raison de croire que prévoir les pandémies est plus difficile. Étant donné les sommes d'argent colossales nécessaires pour stopper une pandémie, les dégâts humains qu'elle engendre, et les conséquences néfastes qu'elle a sur l'économie, il est préférable de la stopper dès son apparition, et ce à moindre coût. Le principe de prévention n'a jamais été plus judicieux. ■

Une transmission à double sens



Wilfried Knechtwost, Getty Images

✓ **Non seulement les pathogènes passent de l'animal à l'homme, mais ils peuvent aussi circuler dans l'autre sens. Les maladies infectieuses que l'homme transmet à l'animal sont par exemple la tuberculose (le bétail est concerné), la fièvre jaune (les singes d'Amérique du Sud), la rougeole (les gorilles) et la poliomyélite (les chimpanzés).**

✓ BIBLIOGRAPHIE

N. Wolfe *et al.*, *Origins of major human infectious diseases*, *Nature*, vol. 447, pp. 279-283, mai 2007.

N. Wolfe *et al.*, *Bushmeat hunting, deforestation, and prediction of zoonotic disease emergence*, *Emerging Infectious Diseases*, vol. 11, pp. 1822-1827, décembre 2005.

N. Wolfe *et al.*, *Emergence of unique primate T-lymphotropic viruses among central african bushmeat hunters*, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 102, pp. 7994-7999, mai 2005.

N. Wolfe *et al.*, *Naturally acquired simian retrovirus infections in central african hunters*, *Lancet*, vol. 363, pp. 932-937, mars 2004.

✓ SUR LE WEB

Le site du programme *Global viral forecasting initiative* : www.gvfi.org.



La *propulsion* des nanorobots

Thomas Mallouk et Ayusman Sen

L'ESSENTIEL

- ✓ En s'inspirant des moteurs biologiques à l'œuvre dans les cellules, les chimistes mettent au point des machines microscopiques propulsées par des réactions catalytiques.
- ✓ À cette échelle, les nanorobots doivent lutter contre des lois physiques capricieuses : les fluides paraissent aussi visqueux que du miel et l'agitation moléculaire rend les trajectoires chaotiques.
- ✓ Ces nanorobots motorisés pourraient à terme administrer des médicaments, assembler d'autres machines, ou effectuer des opérations de microchirurgie.

Des moteurs catalytiques qui utilisent le fluide environnant comme combustible propulsent aujourd'hui des robots microscopiques. Ils ouvrent la voie à de nombreuses applications.

Imaginez des bistouris, des pelleteuses ou des arcs à souder aussi petits que des bactéries. De minuscules outils robotisés, injectés dans le corps, pourraient localiser et neutraliser les sources de maladie, par exemple les plaques dans les artères ou les dépôts de protéines associés à la maladie d'Alzheimer. Ces nanomachines – des robots à l'échelle du nanomètre – pourraient aussi pénétrer dans les poutres des ponts ou les ailes des avions pour y réparer d'invisibles fissures avant qu'elles ne s'aggravent et provoquent des catastrophes.

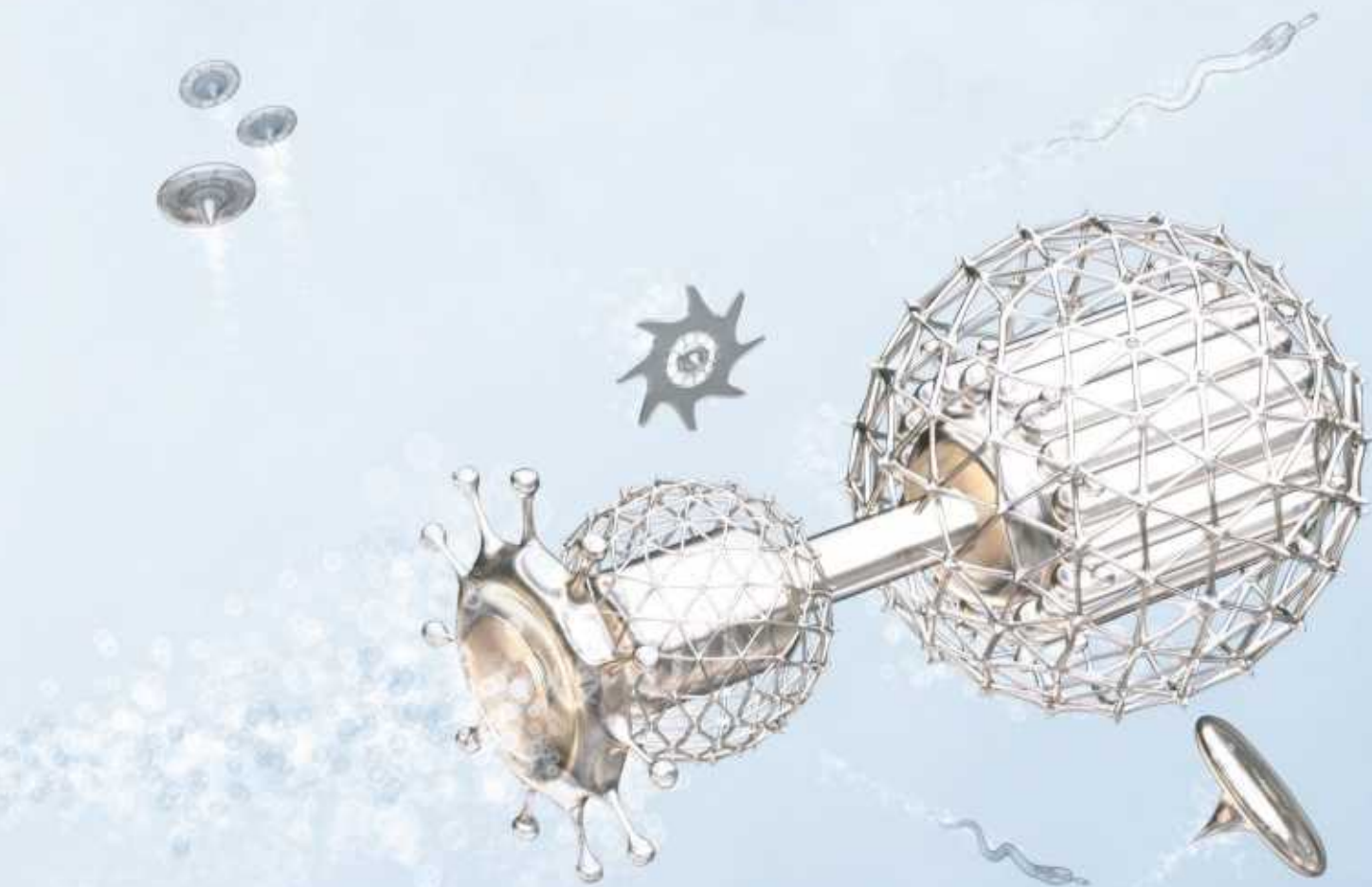
Ces dernières années, les chercheurs ont créé tout un ensemble de remarquables structures à l'échelle moléculaire, qui pourraient devenir les composants de ces

minuscules machines. Une voiture moléculaire dotée de quatre fullerènes (des molécules de carbone en forme de ballon de football) en guise de roues, 5 000 fois plus petites qu'une cellule humaine, a ainsi été mise au point.

Mais sous le capot de cette nanoviture, pas de trace de moteur. Elle ne se déplace qu'au gré des collisions aléatoires avec les molécules du milieu environnant, un processus connu sous le nom de mouvement brownien. C'est actuellement le plus grand problème des nanomachines : nous savons les construire, mais pas comment les faire se déplacer.

À l'échelle d'une cellule ou au-dessous, le déplacement pose des défis spécifiques. L'air et l'eau paraissent aussi épais que de la mélasse, et le mouvement brownien s'op-





pose au déplacement dirigé des molécules. Dans de telles conditions, des moteurs à explosion ou électriques tels ceux des voitures ou des trains, à supposer que l'on arrive à en construire à l'échelle moléculaire, ne pourraient même pas démarrer.

La nature, en revanche, regorge d'exemples de nanomoteurs. Il suffit de regarder une cellule. Des nanomoteurs permettent à une cellule de changer de forme, aux chromosomes de se séparer lors de la division cellulaire, de construire des protéines, d'acheminer des substances chimiques en tous sens, etc. D'autres actionnent les fibres musculaires et les flagelles des bactéries. Tous ces moteurs sont fondés sur le même principe : ils convertissent de l'énergie chimique, habituellement stockée sous forme d'adénosine triphosphate, ou ATP, en énergie mécanique. Et tous exploitent des catalyseurs, des composés qui facilitent certaines réactions chimiques telles que l'hydrolyse de l'ATP.

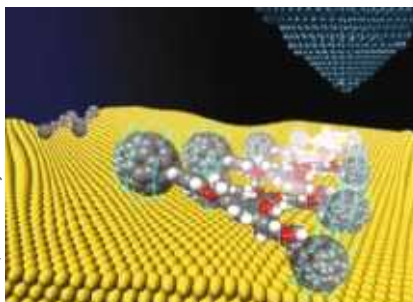
Les chercheurs progressent aujourd'hui à grands pas dans la construction de nanomoteurs artificiels inspirés de ces principes. En 2004, au sein d'une équipe de l'Université de Pennsylvanie, nous avons déve-

loppé des nanomoteurs catalytiques simples qui convertissent en mouvement l'énergie stockée dans des molécules de carburant. Nous nous sommes inspirés d'un moteur catalytique beaucoup plus gros présenté en 2002 par Rustem Ismagilov et George Whitesides, de l'Université Harvard. Ces chercheurs avaient montré que des « bateaux » mesurant de l'ordre du centimètre, munis à la poupe de bandes de platine, avançaient spontanément à la surface d'une solution de peroxyde d'hydrogène (H_2O_2). Le platine favorise la dissociation du peroxyde d'hydrogène en oxygène et en eau, et les bulles d'oxygène qui se forment propulsent le dispositif vers l'avant, comme un moteur à réaction.

Notre version miniaturisée du moteur de Harvard consistait en une tige d'or et de platine longue de deux micromètres – la taille caractéristique d'une bactérie – et large de 0,35 micromètre. Ces engins étaient mélangés à la solution, plutôt que de flotter à la surface, à l'instar des moteurs cellulaires immergés dans leur propre combustible. Sous le microscope, nos tiges catalytiques se déplaçaient de façon autonome, à une vitesse



1. LES ROBOTS MICROSCOPIQUES ont besoin d'une source d'énergie pour se déplacer. Les moteurs catalytiques, qui convertissent l'énergie chimique en mouvement, permettront peut-être à des nanomachines [ici, une vue d'artiste] de se déplacer et d'opérer dans un milieu fluide où le mouvement brownien et la viscosité prédominent.



2. LA NANOVOITURE est un exemple parmi d'autres de machine moléculaire articulée. Elle comporte des essieux à base de carbone et des roues formées de fullerènes (des molécules de carbone en forme de ballon de football). Mais pour l'instant, il lui manque un moteur, si bien qu'elle ne peut qu'avancer et reculer aléatoirement au gré du relief et de l'agitation thermique.

de quelques dizaines de micromètres par seconde, et ressemblaient étonnamment à des bactéries en train de nager.

Pourtant, comme souvent en science, l'hypothèse qui avait motivé cette expérience était fautive. Nous avons imaginé que de minuscules bulles étaient éjectées à l'arrière des nanotiges et les propulsaient. Le comportement réel de nos nanobateaux est cependant tout autre, ce qui nous rappelle qu'à très petite échelle, il faut bien souvent penser la mécanique de façon radicalement différente que dans le monde usuel.

L'inertie vaincue par la viscosité

À l'échelle macroscopique, la notion d'inertie a un sens. Lorsqu'un rameur pousse l'eau vers l'arrière avec ses avirons, la force de réaction pousse les rames, et par extension le bateau, vers l'avant. Lorsque la poussée cesse, le bateau continue de glisser sur l'eau jusqu'au prochain coup de

rame. La distance sur laquelle un objet continue de se déplacer après une poussée donnée est déterminée par son inertie, c'est-à-dire sa résistance face aux changements de sa vitesse, mais aussi par la force de traînée engendrée par la viscosité du milieu.

La force de traînée d'un objet est proportionnelle à sa largeur, tandis que son inertie est proportionnelle à sa masse, qui varie elle-même comme sa largeur au cube. En conséquence, si l'on considère des échelles de plus en plus petites, l'inertie des objets diminue beaucoup plus rapidement que leur force de traînée, au point de devenir négligeable devant celle-ci. À l'échelle du micromètre, tout déplacement inertiel est ainsi stoppé par la traînée en moins d'une microseconde, après un centième de nanomètre à peine. Pour un objet de taille micrométrique, se déplacer dans l'eau est aussi dur que, pour nous, nager dans du miel ! Un nanodispositif n'a quasiment aucune inertie, et les systèmes de propulsion inertielle, tel le bateau cata-

ANATOMIE D'UN MOTEUR CATALYTIQUE

Les nanomoteurs créés par les auteurs sont des tiges d'or et de platine longues de deux micromètres. Ils sont propulsés par la dissociation du peroxyde d'hydrogène (H_2O_2) présent dans l'eau. Cette réaction chimique induit un flux de protons le long de la tige, lesquels entraînent des molécules

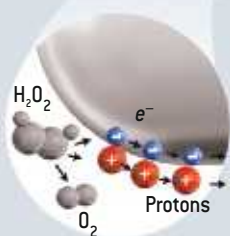
d'eau, propulsant la tige dans la direction opposée. Grâce à ce flux continu, la tige surmonte la viscosité de l'eau. Ce type de moteur permettrait à des robots de la taille d'une bactérie de nager dans le corps humain, ou mettrait en mouvement de minuscules composants, tels des rotors (*ci-dessous*).

Avancée de la tige

Platine

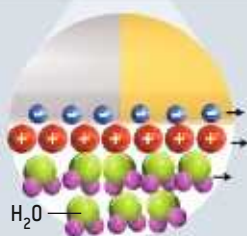
Or

Écoulement du fluide le long de la tige



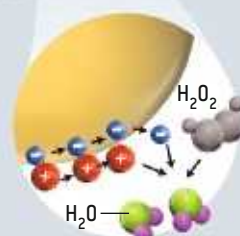
1 Libération de protons

Le platine favorise la dissociation des molécules H_2O_2 en électrons (e^-), en protons et en O_2 . Des protons sont produits en continu.



2 Les protons entraînent l'eau

Des électrons circulent dans la tige jusqu'à la partie en or, tandis que les protons glissent à la surface. Leur charge positive attire les molécules d'eau, qui sont entraînées le long de la tige.



3 Capture des protons

La surface en or catalyse la formation d'eau (H_2O) à partir des protons recyclés et des molécules H_2O_2 .



Un rotor

Le même couple de réactions chimiques met en mouvement l'eau autour des dents de cette roue de 100 micromètres de diamètre et la fait tourner.

lytique de R. Ismagilov et G. Whitesides propulsé par des bulles qui s'échappent ponctuellement, sont sans espoir.

Pourtant, il est manifeste que nos nanotiges se déplacent. Pourquoi ? Parce que la propulsion n'est pas inertielle : une force engendrée de façon continue parvient à dominer la traînée. À l'extrémité en platine d'une tige, chaque molécule de peroxyde d'hydrogène se dissocie en une molécule d'oxygène (O_2), deux électrons et deux protons. À l'extrémité en or, les électrons et les protons se combinent avec chaque molécule de peroxyde d'hydrogène pour produire deux molécules d'eau. Ces réactions créent un excédent de protons à une extrémité de la tige et une pénurie à l'autre ; en conséquence, les protons se déplacent du platine jusqu'à l'or le long de la tige.

Or les protons attirent les régions négativement chargées des molécules d'eau. Ils entraînent ainsi ces molécules avec eux dans leur déplacement, ce qui, en réaction, propulse la tige dans la direction opposée.

Une fois ce principe établi, plusieurs autres concepts de moteurs catalytiques ont été élaborés. Les équipes d'Adam Heller, à l'Université du Texas à Austin, et de Joseph Wang, à l'Université de l'Arizona, ont par la suite montré que des mélanges de différents combustibles (glucose et oxygène ou peroxyde d'hydrogène et hydrazine) étaient plus efficaces qu'un combustible unique pour faire fonctionner ces nanomoteurs.

Garder le cap malgré l'agitation moléculaire

Sur le même principe, en inversant le point de vue, on peut induire un écoulement dans un fluide en y plongeant une surface métallique catalytique fixe : le fluide se met alors en mouvement à l'interface entre le solide et le fluide. Nous avons mis en évidence cet effet de pompage sur une surface d'or avec des motifs en argent plongée dans du peroxyde d'hydrogène.

Une des limitations de nos premières nanotiges était le mouvement brownien : les impacts des molécules environnantes leur faisaient subir sans répit des changements de direction aléatoires. Pour envisager une application quelconque, un mécanisme de pilotage était clairement nécessaire.

Notre première tentative pour résoudre ce problème s'appuyait sur un contrôle

NAVIGATION À LA BOUSSE

Propulser les nanorobots n'est que la moitié du problème. Un autre défi est de stabiliser leur trajectoire et de pouvoir les diriger. Des aimants intégrés dans les nanotiges, avec un axe Nord-Sud perpendiculaire à la longueur de la tige, permettent un pilotage à distance par l'application d'un champ magnétique.

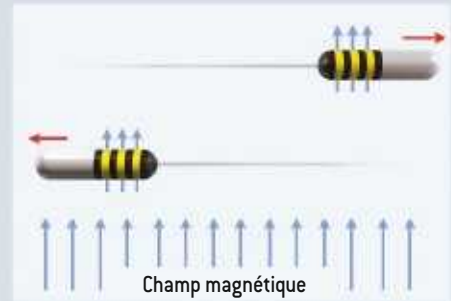
Nanotiges non contrôlées

En l'absence de champ magnétique, l'agitation moléculaire rend les trajectoires aléatoires.



Pilotage magnétique

En présence d'un champ magnétique, les tiges s'orientent perpendiculairement au champ. Elles se déplacent alors selon une seule direction, dans un sens ou dans l'autre.



Don Foley

magnétique. Nous avons inséré dans les tiges des disques de nickel aimantés, l'axe des pôles étant dirigé perpendiculairement à la longueur des tiges. Un aimant situé à quelques millimètres exerce un couple suffisant sur la tige pour la maintenir alignée selon une direction et vaincre la tendance de l'agitation moléculaire à faire tourner la tige dans tous les sens. La seule force résultante est celle de l'action catalytique, qui s'exerce selon la longueur de la tige. Nos nanotiges se déplacent ainsi en ligne droite et peuvent être pilotées en jouant sur l'orientation de l'aimant.

L'année dernière, Vincent Crespi, de l'Université de Pennsylvanie, et l'un d'entre nous (A. Sen) ont montré que des nanomoteurs pilotés magnétiquement peuvent tracter des conteneurs (des billes de plastique) environ dix fois plus gros qu'eux dans un fluide. On peut envisager de nombreuses applications intéressantes pour ces robots à pilotage externe. Ils pourraient par exemple délivrer des médicaments dans des cellules particulières du corps, ou acheminer des molécules le long d'une chaîne de montage nanoscopique.



3. NANOPROPULSION BIOLOGIQUE : des bactéries telles qu'*Escherichia coli* utilisent des moteurs moléculaires pour faire tourner des filaments nommés flagelles (ci-dessus, un modèle de flagelle sur ordinateur). Dans l'environnement liquide d'une bactérie, la viscosité domine l'inertie ; si le flagelle s'arrête de tourner, la bactérie s'arrête immédiatement.

UN GRADIENT CHIMIQUE ou de la lumière permettent d'orienter les déplacements des nanomachines.

Pour d'autres applications, il sera toutefois essentiel que les nanorobots soient capables de se déplacer de façon autonome. Nous avons récemment découvert que nos nanotiges catalytiques peuvent suivre des chemins dits chimiotaxiques, analogues au trajet semé de miettes de pain du Petit Poucet ou, plus prosaïquement, analogues à ceux que suivent parfois les bactéries.

Une bactérie se déplace normalement par une série de petits trajets en ligne droite, entrecoupée de virages aléatoires. Mais lorsqu'une portion de ligne droite coïncide avec un gradient chimique, par exemple une concentration de nutriments qui croît dans la direction de leur source, la bactérie augmente un peu la longueur de son trajet rectiligne. Les trajets favorables durant plus longtemps que ceux qui vont dans des directions

défavorables, la bactérie, au gré de son déplacement erratique, finit par converger sur sa cible, même si elle ne peut pas se diriger directement. On parle alors de chimiotaxie.

La course vers la lumière

De façon similaire, nos nanomoteurs se déplacent plus vite quand le combustible est plus concentré. Les portions de trajet de leur mouvement brownien dirigées vers une source de combustible (par exemple une boule de gel imbibée de peroxyde d'hydrogène) sont ainsi allongées entre deux changements de cap et, en moyenne, les nanomoteurs se rapprochent de la source.

Plus récemment, nous avons mis au point des nanodispositifs mus et dirigés par la lumière (phototaxie). Ils exploitent la lumière pour casser des molécules en ions positifs et négatifs. Ces deux types d'ions diffusent à des vitesses différentes, ce qui crée un champ électrique, lequel met en mouvement les particules. Selon la nature des ions libérés et la charge des nanodispositifs, ceux-ci sont attirés vers la lumière, ou au contraire, vers l'ombre.

Une utilisation étonnante de cette technique est un système activé par la lumière où certaines particules se comportent comme des prédateurs et d'autres comme des proies : les particules d'un type cèdent des ions qui attirent les particules de l'autre type vers elles. Le mouvement d'ensemble de ces particules ressemble à celui des globules blancs, les phagocytes, qui « pourchassent » une bactérie.

Le déplacement de nanodispositifs par chimiotaxie ou phototaxie en est encore au stade préliminaire, mais cela pourrait aboutir à la conception de nanorobots autonomes « intelligents », qui se déplaceraient vers leur cible en exploitant des combustibles abondants dans l'organisme ou dans l'environnement. Ces travaux ouvrent aussi la voie à la conception de robots qui communiqueraient chimiquement les uns avec les autres et seraient à même d'accomplir des tâches collectives, par exemple se déplacer en groupes ou former des motifs.

Bien que les dispositifs qui présentent ces comportements collectifs soient inanimés, leur mouvement est régi par les mêmes processus physiques que celui des micro-organismes vivants dont ils sont inspirés. Cette analogie offre en retour un

Le moteur électrostatique moléculaire

Mettre au point des propulseurs, comme les auteurs de cet article s'y attachent, est un objectif important en nanosciences. Réussir à maîtriser la rotation de moteurs moléculaires à l'échelle du nanomètre et de la molécule unique en est un autre. Cela conduira à la conception de dispositifs électroniques et mécaniques de plus en plus petits et économes en énergie.

Un moteur moléculaire nanométrique est une machine qui transforme de façon continue une énergie pour produire un travail via un mouvement de rotation unidirectionnel contrôlé. Ce mouvement doit être réversible et d'une amplitude suffisamment grande pour qu'il soit mesurable et exploitable.

Les moteurs que nous avons synthétisés comportent une partie fixe (le stator, *en bleu*) greffée par une liaison covalente à une surface fixe, et une partie mobile (le rotor, *en rouge*), qui porte des cinq groupes transporteurs de charge. Entre ces deux parties, un atome de ruthénium joue le rôle de rotule et confère

à cette molécule un caractère organométallique. Deux nano-électrodes servant de réservoirs d'électrons (*en jaune*) sont connectées aux moteurs.

En présence d'une différence de potentiel, l'électrode positive injecte à la partie mobile de la molécule des



Le moteur électrostatique moléculaire ne mesure que deux à quatre nanomètres de diamètre.

charges de même signe. La répulsion avec l'électrode qui s'ensuit, dans un sens privilégié, entraîne un mouvement de rotation. Il s'agit donc d'un moteur électrostatique, fonctionnant sur un principe décrit par Benjamin Franklin dès 1748... à grande échelle. Une disposition asymétrique des électrodes permet de contrôler le sens de rotation.

Sur cette architecture générale, nous avons synthétisé plusieurs molécules de deux à quatre nanomètres

de diamètre et de constitutions différentes, qui illustrent les contraintes à respecter. Le système doit tout d'abord être le plus rigide possible, c'est-à-dire ne pas présenter de degrés de rotation inutiles, qui entraîneraient une trop grande variété de géométries. Il faut ensuite que la rotation autour de l'axe vertical soit facile, mais sans qu'il y ait de risques de dissociation de la partie fixe et de la partie mobile.

Plusieurs collaborations internationales sont maintenant mises en œuvre pour étudier cette rotation électro-induite. À plus long terme, ces moteurs pourraient intégrer des robots nanométriques capables de remplir des fonctions variées, allant de la médecine à la vie de tous les jours, ou pourraient motoriser les nanovéhicules que nous développons par ailleurs.

Jean-Pierre Launay
et **Gwénaél Rapenne**

Université Paul Sabatier
de Toulouse – Centre
d'élaboration de matériaux
et d'études structurales
(CEMES-CNRS)



4. SUIVRE LES RESSOURCES est une bonne façon de se diriger. Les nanotiges catalytiques se déplacent par poussées aléatoires, mais la poussée est d'autant plus longue que la concen-

tration de combustible est élevée. En conséquence, les nanorobots se déplacent en remontant le gradient chimique du combustible, à l'instar des bactéries qui suivent la nourriture

(on parle de chimiotaxie). On voit ici les nanotiges s'agglutiner spontanément autour d'une goutte de gel imprégné de peroxyde d'hydrogène (en haut à gauche de chaque image).

éclairage sur le fonctionnement des différents composants des systèmes vivants.

Nous avons par exemple découvert en étudiant les nanomoteurs catalytiques que la vitesse de croisière théorique d'un nanomoteur doit être proportionnelle à sa taille. Cette loi d'échelle découle du fait que la force de traînée est proportionnelle à la taille de l'objet, et que le rendement de la réaction catalytique est proportionnel à sa surface, elle-même proportionnelle au carré de la taille.

Les limites physiques du nanomonde

Le biologiste James Marden, de l'Université de Pennsylvanie, a trouvé une loi d'échelle plus générale qui relie la masse d'un moteur à la force maximale qu'il peut exercer. Selon cette loi, valable des moteurs moléculaires jusqu'aux réacteurs d'avion, les moteurs plus petits sont toujours moins puissants. En particulier, tout en bas de l'échelle, vers 50 à 100 nanomètres, toute force propulsive développée par un nanomoteur catalytique ne peut plus surpasser l'agitation moléculaire. Cela implique que les bactéries de la taille du micromètre sont les plus petits nageurs libres de la biologie. Aux échelles plus petites, le mouvement brownien empêche de conserver une trajectoire stable dans un fluide. De fait, dans la nature, tous les moteurs à échelle moléculaire, y compris les protéines musculaires et les enzymes qui produisent l'ATP, sont soit contraints de se déplacer le long d'un chemin, soit enchâssés dans une membrane. Il en sera nécessairement de même avec les futurs nanorobots.

Pour les moteurs à échelle moléculaire, la propulsion catalytique mise en évidence dans nos nanotiges pourrait aussi se révé-

ler insuffisante pour dominer le mouvement brownien, que le robot soit piloté ou non. Cependant, la nature a trouvé des moyens de mettre le mouvement brownien à contribution plutôt que de lutter contre lui. De nombreux moteurs biologiques sont fondés sur le principe du « cliquet » :

l'énergie d'une réaction catalysée sert non pas à créer un mouvement dans une certaine direction, mais à permettre aux impacts des molécules d'être convertis en mouvement s'ils s'exercent dans la bonne direction, et d'être contrebalancés s'ils poussent dans la direction contraire. Ces dernières années, des expériences sur les premiers « cliquets browniens » artificiels ont débuté (voir l'encadré page 64).

Orlin Velev, de l'Université de Caroline du Nord, et ses collègues ont présenté une autre approche de la propulsion et du pilotage. Ils ont récemment montré que l'on peut propulser des objets dans du liquide sans aucun combustible. Leurs submersibles contiennent une diode, dispositif qui permet au courant électrique de passer dans un sens mais pas dans l'autre.

Lorsqu'on applique un champ électrique alternatif dans le voisinage du dispositif, la diode le convertit en champ statique, qui pointe dans une direction constante et produit une force nette par interaction des charges, donc une poussée. On sait fabriquer des diodes en circuits intégrés bien plus petites qu'un micromètre, et l'on a synthétisé des diodes moléculaires de deux ou trois nanomètres de long seulement.

Comme ils sont alimentés de façon externe, les moteurs à diode suivent des lois d'échelle différentes des moteurs



LES AUTEURS



Ayusman SEN est professeur de chimie à l'Université d'État de Pennsylvanie, aux États-Unis.

Thomas MALLOUK est professeur de physique et chimie des matériaux dans la même université.

✓ SUR LE WEB

Le groupe de recherche en nano-ingénierie de l'Université d'État de Pennsylvanie : <http://research.chem.psu.edu/axsgrp/research.html>



Les nanonageurs en vidéo sur <http://www.pourlascience.fr/ewb/pages/v/video.php>

En raison de l'agitation thermique, un nanodispositif immergé dans un fluide est soumis à des impacts moléculaires incessants et aléatoires. D'où une trajectoire erratique, le mouvement brownien. Des chimistes ont mis au point des machines moléculaires qui exploitent ce phénomène : les cliquets browniens. Ainsi, l'équipe de David

Leigh, de l'Université d'Édimbourg, développe un système de monorail qui transforme des déplacements aléatoires en mouvement directionnel (*ci-dessous*). Cela semble à première vue violer le deuxième principe de la thermodynamique, mais tout va bien : les mouvements browniens consomment eux-mêmes de l'énergie.

❶ Le dispositif se déplace aléatoirement

Un « nanoglisser » est conçu pour se déplacer pas à pas le long d'un monorail immergé dans un liquide. Sans moteur, il saute aléatoirement en avant ou en arrière chaque fois qu'il subit un impact assez fort de la part d'une molécule de liquide.

❷ Des barrières entrent en jeu

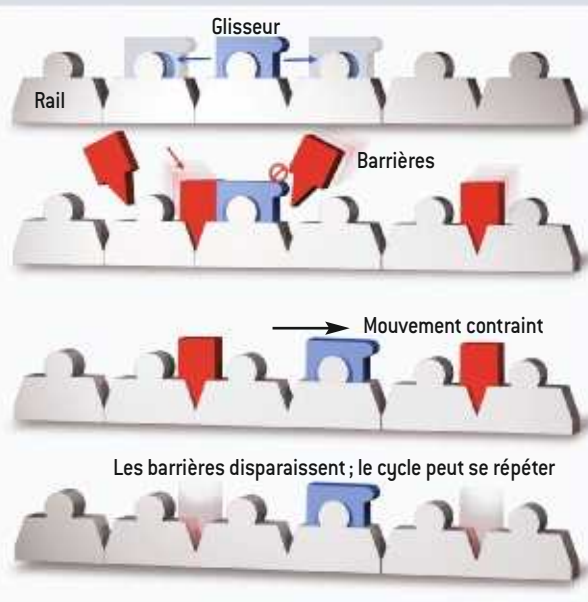
Les molécules du liquide peuvent aussi se lier aux rails et agissent alors comme des barrages pour le glisseur. Celui-ci est toutefois, par construction, asymétrique, de sorte qu'il empêche les barrières de se fixer directement devant lui.

❸ Le mouvement devient dirigé

Dès lors, quand une molécule heurte le véhicule, le barrage l'empêche de reculer. Les obstacles augmentent ainsi les chances du véhicule d'avancer d'un pas dans un sens plutôt que dans l'autre.

❹ L'ardoise est effacée

Les barrières se rompent de temps en temps, si bien que le glisseur peut continuer à avancer. Une telle rupture consomme irréversiblement de l'énergie, comme le requiert la deuxième loi de la thermodynamique.



Don Foley

catalytiques. O. Velev a démontré qu'entre les échelles du centimètre et du millimètre, la vitesse d'un moteur à diode ne varie pas avec sa taille, ce qui est en accord avec la théorie. Cela suggère que de tels moteurs pourraient être assez puissants à l'échelle de quelques dizaines de micromètres, l'ordre de grandeur d'une cellule humaine.

Feynman visionnaire

On peut ainsi imaginer des scalpels microscopiques comportant des composants de propulsion, de pilotage et de détection imprimés sur de minuscules puces de silicium, et dirigés à distance à l'aide de champs électriques de radiofréquence, qui ne sont pas absorbés par les tissus corporels. Ces microscalpels pourraient être délivrés dans la zone souhaitée avec une très fine aiguille, puis télécommandés jusqu'à leur destination.

Les scientifiques – et les auteurs de science-fiction – envisagent de telles nanomachines au moins depuis une célèbre conférence du physicien Richard Feynman sur les potentialités du monde nano-

scopique donnée en 1959, qui abordait les limites d'échelle pour les dispositifs mécaniques et les systèmes de stockage de l'information. Il fit remarquer que, les lois de la physique classique étant valables jusqu'à l'échelle des molécules, il n'y avait pas de raison théorique qui interdise de réaliser des engins à partir de composants moléculaires.

La conférence de Feynman inspire encore aujourd'hui le développement de machines à l'échelle moléculaire. Depuis, la représentation de la cellule vivante a évolué, de celle d'un bouillon d'enzymes où se produisent des réactions métaboliques jusqu'à celle d'une montre suisse de précision, constituée de moteurs chimiques bien compartimentés et liés mécaniquement.

Nous avons fait de grands progrès dans la fabrication de nanomoteurs inspirés de la biologie, mais il y a encore beaucoup à apprendre sur la propulsion catalytique à ces échelles. Sans aucun doute, les recherches à venir sauront exploiter ces connaissances en biomédecine, en énergétique, en synthèse chimique et dans bien d'autres domaines. ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

J. Wang, Can man-made nanomachines compete with nature biomotors ?, *ACS Nano*, vol. 3, n° 1, pp. 4-9, 27 janvier 2009.

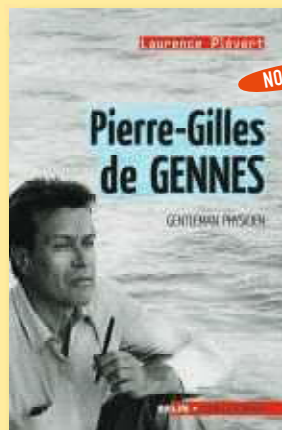
W. F. Paxton et al., Chemical Locomotion, *Angewandte Chemie International Edition*, vol. 45, n°33, pp. 5420-5429, 18 août 2006.

Z. L. Wang, les nanogénérateurs, *Pour la Science* n° 366, avril 2008.

D. Astumian, Les moteurs moléculaires, *Pour la Science*, n° 290, décembre 2001.

La sélection **POUR LA SCIENCE**

Des livres scientifiques à la pointe de l'actualité



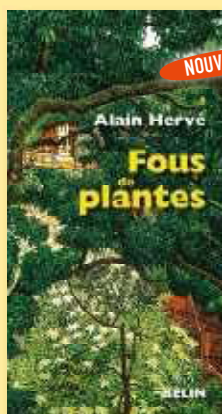
NOUVEAUTÉ

Pierre-Gilles de Gennes

Laurence Plévert

Qui est véritablement Pierre-Gilles de Gennes ? D'où vient l'élégance des théories qu'il a élaborées et son goût pour l'éclectisme scientifique, qui l'a amené de la supraconductivité aux neurosciences en passant par les cristaux liquides ou la physique du sable ? C'est ce que nous raconte Laurence Plévert, longtemps journaliste à *Pour la Science*, dans la première biographie du prix Nobel de physique qui lui a consacré de longues heures d'entretien.

005228 • 368 pages • 23,00 €



NOUVEAUTÉ

Fous de plantes

Alain Hervé

L'auteur, écrivain et botaniste, raconte avec talent et passion des histoires de plantes, de jardins exceptionnels et d'hommes fous de plantes, qui consacrent leur vie à leur découverte, à leur culture... Un livre « jubilatoire » écrit le botaniste Francis Hallé dans sa préface.

005123 • 160 pages • 14,50 €



Feuilletez les premières pages de ces livres en exclusivité et commandez en ligne sur notre site

www.editions-belin.com

Actualité

Astronomie

004607	Aux confins du système solaire	23,00 €
004733	Le ciel, PRIX DU LIVRE D'ASTRONOMIE un jardin vu de la Terre	27,50 €
004900	L'astronomie des Anciens	25,00 €
004109	Les autres mondes	24,00 €

PRIX DU LIVRE D'ASTRONOMIE



A. Doressoundiram
E. Lellouch

Biologie / Évolution

004698	Kant et le chimpanzé	17,00 €
004206	La Terre avant les dinosaures	25,00 €
004694	Comment la vie a commencé	19,50 €
004952	À la conquête des virus	19,50 €
005119	Darwin, l'homme qui osa !	6,95 €
004951	Les poissons font-ils l'amour ?	19,50 €



J.-F. Salazar

Physique

075089	Carnets de voyages relativistes	20,00 €
004552	La physique PRIX ROBERVAL par les objets quotidiens	22,50 €
004751	Sons et lumière	23,00 €
004006	Météorologie	23,00 €
004724	La fusion nucléaire	21,00 €



B. Vauclair

Nature

004681	Guide des orchidées de France	16,90 €
004674	Guide des champignons de la montagne	16,90 €
004672	Guide des oiseaux des villes et des jardins	16,90 €
004671	Guide des coquillages de France	16,90 €



F. Dupak, P. Lebas
P. Pernot

Mathématiques

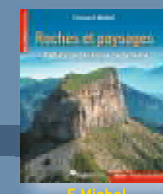
075090	Au pays des paradoxes	24,00 €
004622	Vous avez dit hasard ?	25,00 €
004286	Menteur qui comme Ulysse...	17,50 €
004737	Les déchiffreurs	19,50 €



J.-P. Delahaye

Géologie

004081	Roches et paysages	21,00 €
004729	Ce que disent les minéraux	23,50 €



E. Michard

Environnement et société

004624	Petit traité de l'imposture scientifique	18,00 €
004950	OGM, le nouveau Graal ?	17,50 €
004508	Atmosphère, océan et climat	29,00 €



P. Failler

Mais qu'est-ce qui fait fleurir les plantes ?

François Parcy

De nombreuses plantes ne fleurissent qu'après avoir été soumises à une période de froid et quand le jour a une durée adaptée. Les mécanismes du contrôle de la floraison sont désormais élucidés à l'échelle moléculaire.

L'ESSENTIEL

- ✓ Pour fleurir, la plupart des plantes ont besoin d'une exposition de plusieurs semaines au froid et d'une longueur de jour adaptée.
- ✓ On dispose désormais d'une description précise des mécanismes moléculaires qui font fleurir les plantes.
- ✓ Le froid déclenche la synthèse de protéines qui inhibent un gène clé au sommet de la tige.
- ✓ Dans les feuilles, la lumière active la synthèse du florigène, une protéine qui migre dans la sève jusqu'au bouton floral.

Chaque année, les mêmes plantes fleurissent à peu près au même moment. Dans les pays tempérés, les crocus et les primevères s'épanouissent en février-mars, les champs de colza dessinent des damiers jaunes au printemps ; en été, les coquelicots parsèment les champs de taches rouges, et les colchiques marquent l'arrivée de l'automne. Si les plantes à fleurs accompagnent ainsi les saisons, c'est qu'elles sont adaptées à leur environnement : chaque espèce fleurit, donc se reproduit, lors de la période la plus favorable à la dispersion des graines, qui assureront la naissance d'une nouvelle génération.

Cette adaptation sous-entend que les plantes sont capables de capter des signaux de l'environnement spécifiques d'une période de l'année. Ces signaux ont été identifiés à partir des années 1920 : ce sont principalement la température et la durée du jour. Mais les mécanismes moléculaires qui permettent à la plante d'interpréter ces messages environnementaux, et de fleurir ont été découverts récemment. Après avoir rappelé quelques généralités sur la floraison, nous exami-

nerons le rôle essentiel que jouent le froid et la longueur du jour sur l'apparition – ou non – des fleurs.

Les plantes à fleurs, ou angiospermes (du grec *angeion*, capsule, *sperma*, semence), représentent la majorité des espèces végétales sauvages et cultivées, avec plus de 260 000 espèces connues. Apparu au Jurassique supérieur, il y a 150 millions d'années, ce groupe végétal doit son succès évolutif à l'« invention » de la fleur.

Fleurir au bon moment

Cet organe, constitué de feuilles modifiées, abrite et protège les organes reproducteurs (les étamines, mâles, et les carpelles, femelles), attire les insectes pollinisateurs (par ses parfums, ses couleurs et son nectar) et donne naissance à un fruit, structure adaptée à la survie et à la dispersion des graines qu'il contient. Grâce à leurs fleurs et à leurs fruits, les angiospermes ont colonisé tous les milieux, y compris aquatiques, en supplantant les plantes aux graines non protégées et dépourvues de fleurs, les gymnospermes (les conifères par exemple).