

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 nanodispositifs servant de réservoirs d'électrons (*en jaune*) sont connectés 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/axsgroup/research.html>



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