



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-

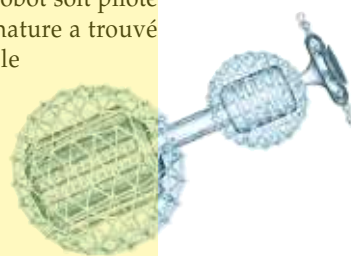
ler insuffisante pour dominer le mouvement brownien, que le robot soit piloté ou non. Cependant, la nature a trouvé des moyens de mettre le mouvement brownien à contribution plutôt que de lutter contre lui. De nombreux moteurs biologiques sont fondés sur le principe du « cliquet » :

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

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

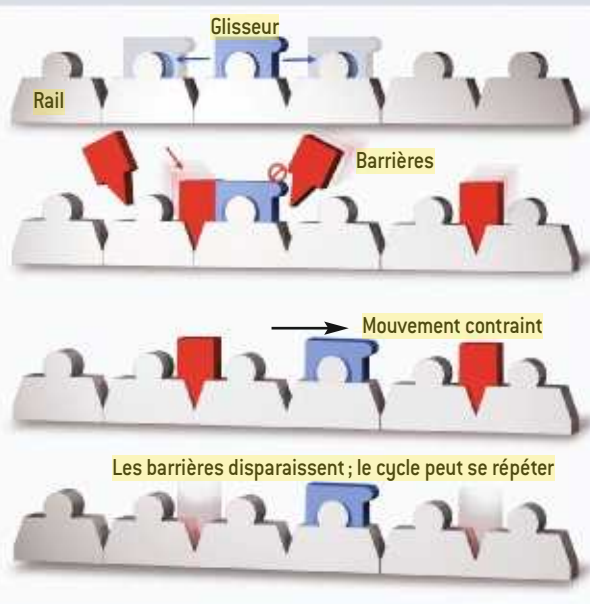
Les molécules du liquide peuvent aussi se lier aux rails et agissent alors comme des barrages pour le glisseur. Celui-ci est toutefois, par construction, asymétrique, de sorte qu'il empêche les barrières de se fixer directement devant lui.

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.