

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 chimiotactiques, 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)