

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.

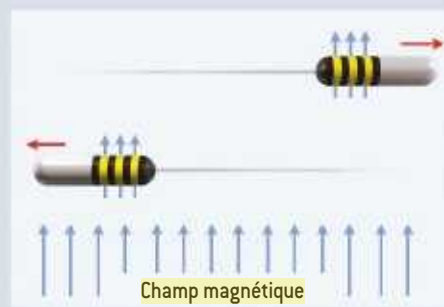
Nanotiges non contrôlées

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)