



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.

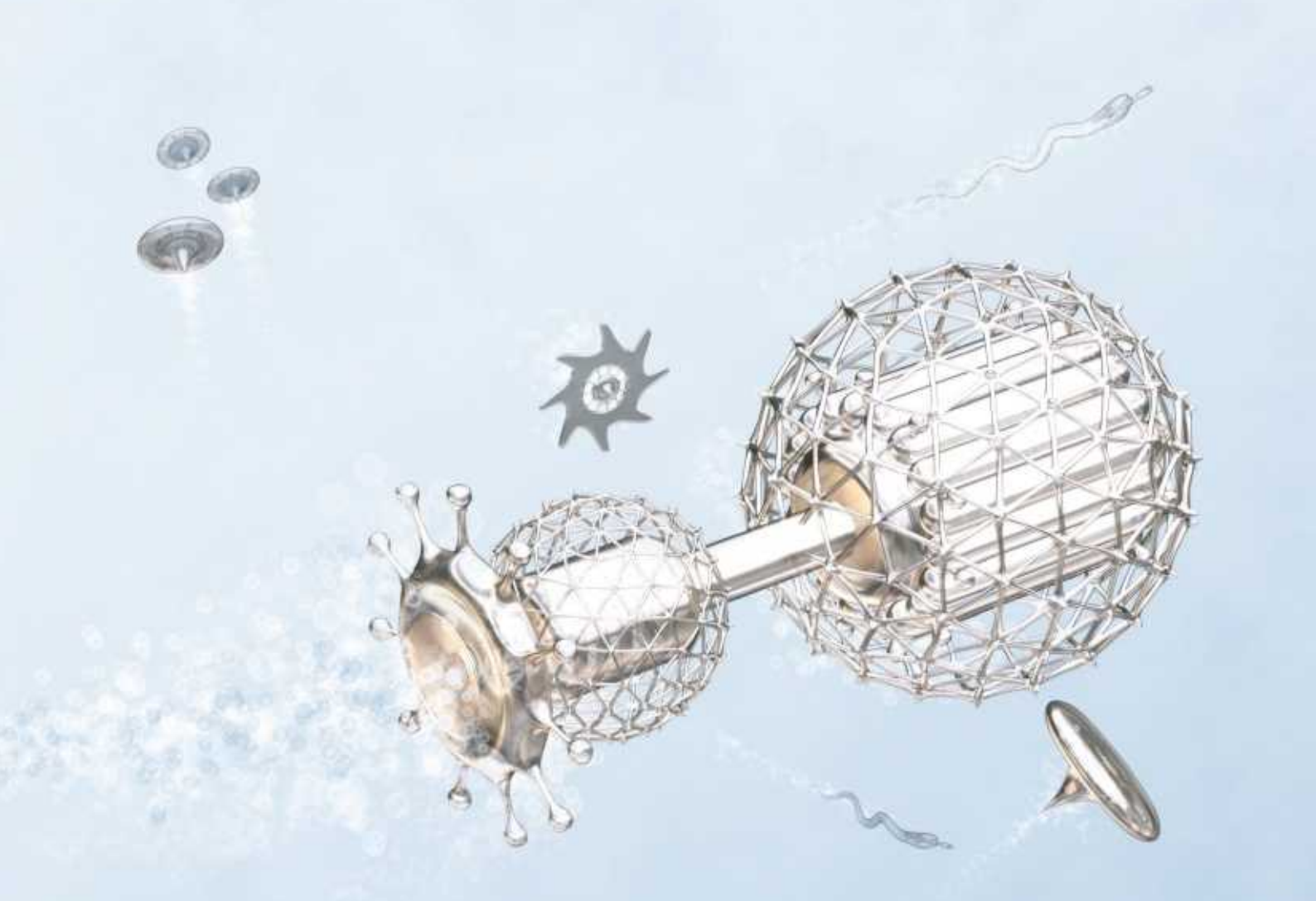
Imaginez des bistouris, des pelleteuses ou des arcs à souder aussi petits que des bactéries. De minuscules outils robotisés, injectés dans le corps, pourraient localiser et neutraliser les sources de maladie, par exemple les plaques dans les artères ou les dépôts de protéines associés à la maladie d'Alzheimer. 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-

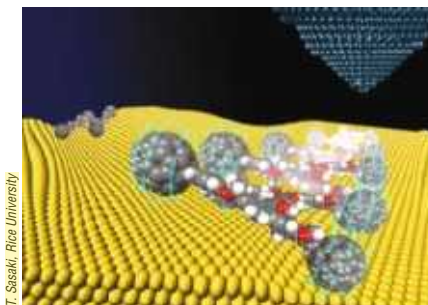
loppé des nanomoteurs catalytiques simples qui convertissent en mouvement l'énergie stockée dans des molécules de carburant. Nous nous sommes inspirés d'un moteur catalytique beaucoup plus gros présenté en 2002 par Rustem Ismagilov et George Whitesides, de l'Université Harvard. Ces chercheurs avaient 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.



T. Sasaki, Rice University

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

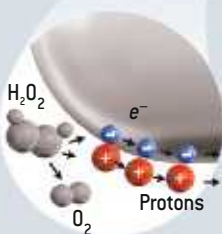
d'eau, propulsant la tige dans la direction opposée. Grâce à ce flux continu, la tige surmonte la viscosité de l'eau. Ce type de moteur permettrait à des robots de la taille d'une bactérie de nager dans le corps humain, ou mettrait en mouvement de minuscules composants, tels des rotors (*ci-dessous*).

Avancée de la tige

Platine

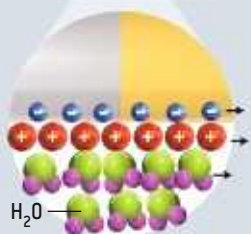
Or

Écoulement du fluide le long de la tige



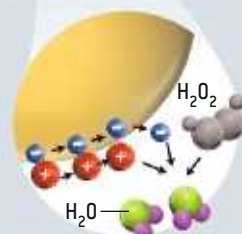
1 Libération de protons

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.