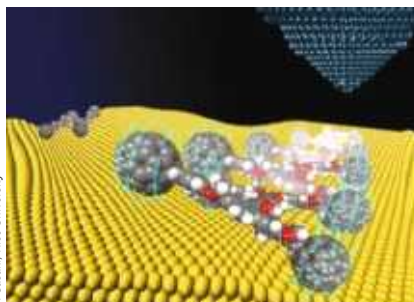




2. LA NANOVOITURE est un exemple parmi d'autres de machine moléculaire articulée. Elle comporte des essieux à base de carbone et des roues formées de fullerènes (des molécules de carbone en forme de ballon de football). Mais pour l'instant, il lui manque un moteur, si bien qu'elle ne peut qu'avancer 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

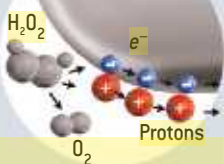
d'eau, propulsant la tige dans la direction opposée. Grâce à ce flux continu, la tige surmonte la viscosité de l'eau. Ce type de moteur permettrait à des robots de la taille d'une bactérie de nager dans le corps humain, ou mettrait en mouvement de minuscules composants, tels des rotors (*ci-dessous*).

Avancée de la tige

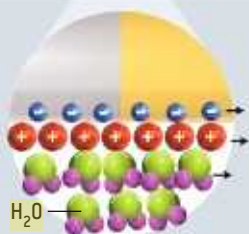
Platine

Or

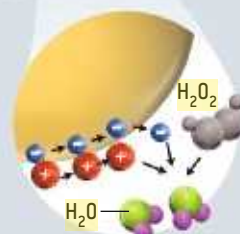
Écoulement du fluide le long de la tige



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 et des électrons 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.

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.

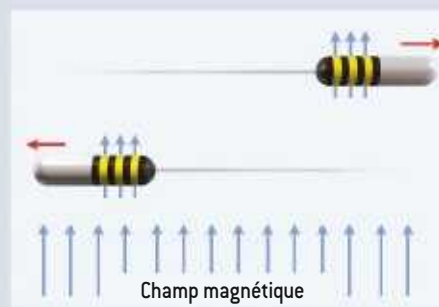
Nanotiges non contrôlées

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.



K. Namba, Université d'Osaka et projet de la France Nanomachine

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.