

Les nanomachines moléculaires : de la biologie aux systèmes artificiels et aux dispositifs

Jean-Pierre Sauvage

UMR 7513/CNRS et Université Louis Pasteur
Strasbourg

L'élaboration de "machines" et "moteurs" moléculaires de synthèse représente un domaine particulièrement actif, qui a vu le jour il y a environ une dizaine d'années. Ces machines sont des objets pour lesquels il sera possible de mettre en mouvement une partie du composé ou de l'assemblée molécule considérée, par l'intervention d'un signal envoyé de l'extérieur, alors que d'autres parties seront immobiles. Si une source d'énergie alimente le système de manière continue, et qu'un mouvement périodique en résulte, l'assemblée moléculaire en mouvement pourra être considérée comme un "moteur".

I. Quelles sont les raisons qui ont incité des chimistes des molécules, des physiciens, des biologistes et, également, des ingénieurs à s'intéresser aux machines moléculaires ?

(1) Tout d'abord, il apparaît de plus en plus clairement que les processus biologiques essentiels font intervenir des moteurs moléculaires (naturels). Ces *moteurs nanométriques* sont constitués de protéines dont la mise en mouvement, le plus souvent déclenchée par l'hydrolyse d'ATP (le "fioul" biologique), correspond à une fonction précise et importante. Que ce soit en biologie ou en ce qui concerne les machines ou moteurs de synthèse, deux grandes familles de mouvements peuvent être facilement identifiées : mouvement rotatif (Figure 1) ou mouvement linéaire.

dans un moteur rotatif, l'axe ("rotor") tourne à l'intérieur de la roue ("stator"); il est essentiel de contrôler le sens de la rotation

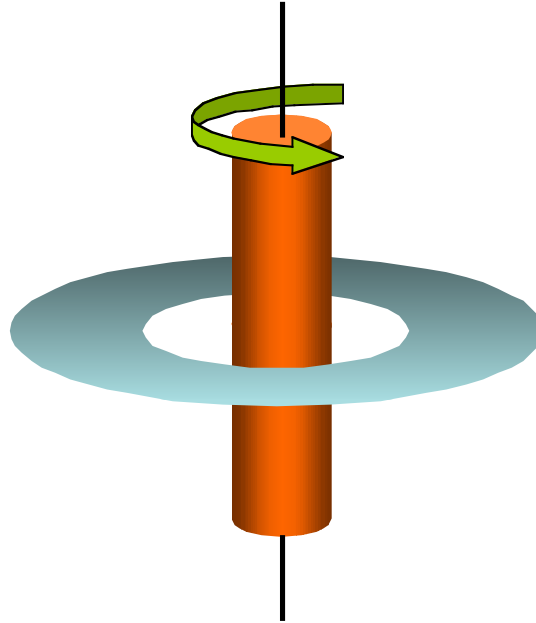


Figure 1

L'ATP synthase (schématisée Figure 2) est une enzyme universelle, dont la fonction est de fabriquer l'ATP des organismes vivants, à partir d'ADP et de phosphate inorganique (Pi). Pour ce faire, cette enzyme utilise l'énergie fournie par le gradient de protons développé de part et d'autre de la membrane sur laquelle elle est fixée. Cette enzyme (force proto-motrice de Mitchell) est un véritable moteur rotatif. De manière très simplifiée, on peut distinguer un rotor, constitué de l'ensemble γ , ϵ et c_{12} , et un stator formé des autres protéines. En particulier, l'axe γ est localisé à l'intérieur de la "roue" $\alpha_3\beta_3$.

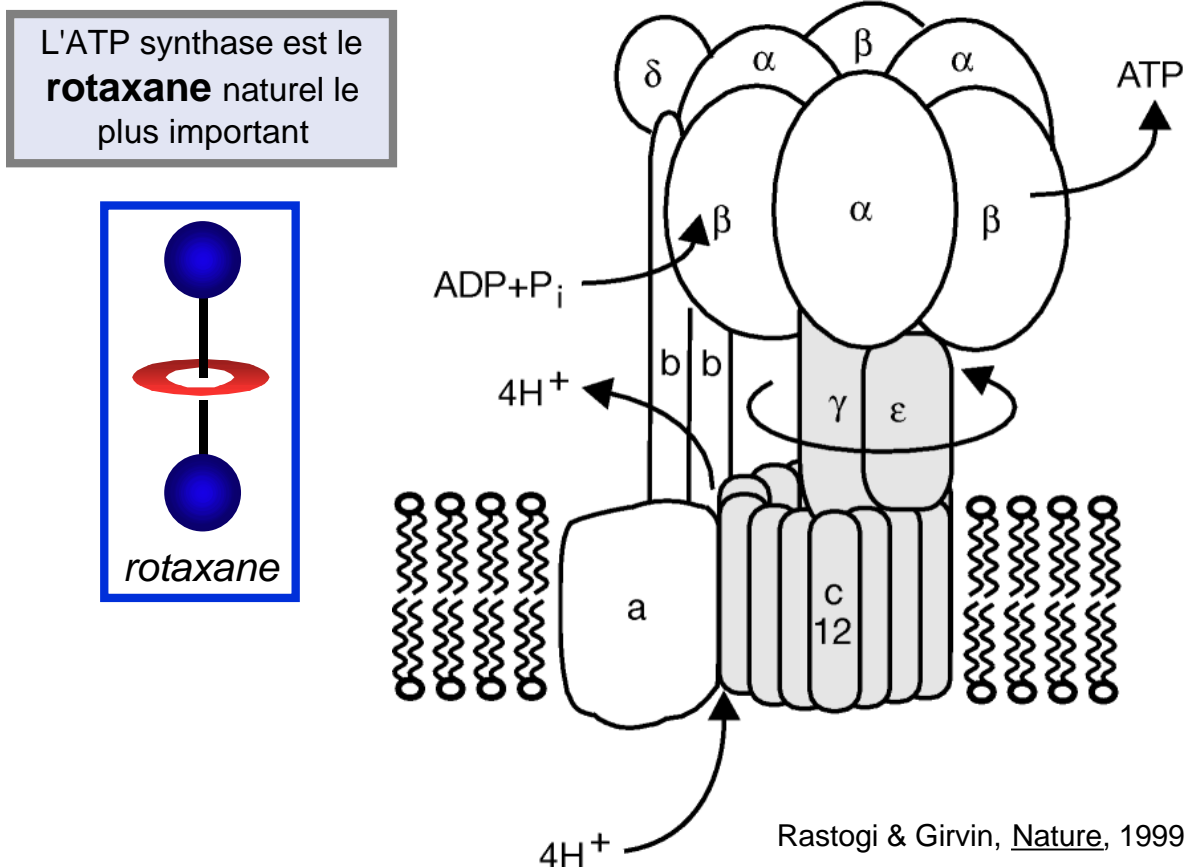


Figure 2

Lorsque des protons sont transportés de la face inférieure de la membrane vers sa face supérieure, le "cylindre" c12 est mis en mouvement. La protéine γ étant solidaire de c12, elle subit un mouvement de rotation continu autour de son grand axe, comme indiqué sur la figure. A chaque fois que l'ensemble grisé (γ , ϵ , c12) subit une rotation complète, trois molécules d'ATP sont produites. L'ATP synthase fonctionne également *dans l'autre sens*. Lorsque de l'ATP est présent dans le milieu, l'enzyme est capable d'hydrolyser l'ATP (en ADP et Pi), pour reconstituer le gradient de pH de la cellule. Il est admis que cette réaction d'hydrolyse est directement couplée à la rotation de l'axe γ à l'intérieur de l'ensemble $\alpha_3\beta_3$. Cette observation a conduit un groupe de recherche japonais (Yoshida et ses collègues, au "Tokyo Institute of Technology") à visualiser le mouvement de rotation. Lors de cette expérience spectaculaire, les chercheurs ont immobilisé des sous-unités protéiques essentielles au mouvement ($\alpha_3\beta_3\gamma$) sur une surface de verre, tout en ayant au préalable attaché un très long filament (1 à 3 μm) fluorescent à l'extrémité accessible du rotor γ . En immerçant ce dispositif dans une solution d'ATP, le système est mis en mouvement. Yoshida et ses

collègues ont pu clairement observer la rotation du filament par microscopie à fluorescence. Une expérience similaire, mais plus complète, a été réalisée par Futai et collaborateurs (1999). Elle est représentée de manière schématique sur la Figure 3.

La rotation de l'axe ("rotor" γ , ϵ , $c12$) a pu être visualisée en attachant un long filament à une extrémité et en alimentant le système en ATP

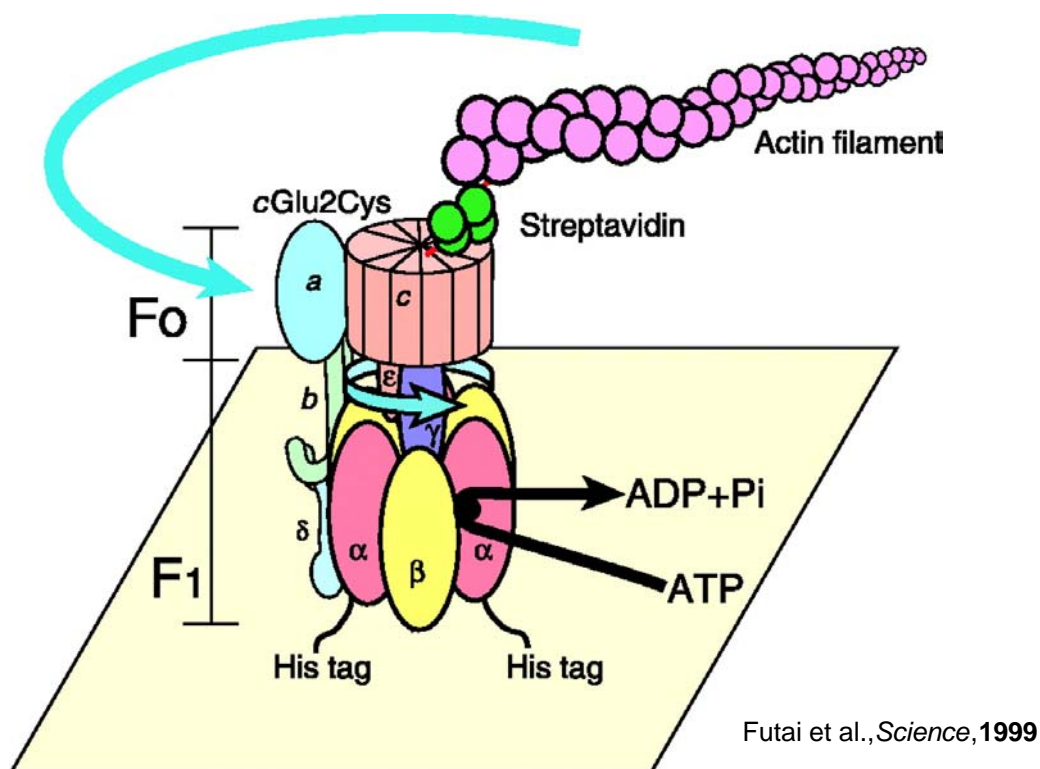


Figure 3

De nombreux moteurs linéaires revêtent également une grande importance en biologie; par exemple, des protéines moteurs telles que la dynéine ou la kinésine sont capables de "voyager" le long de microtubules, pour transporter les produits de la biosynthèse là où ils sont nécessaires au sein de la cellule. De la même manière, les muscles striés, présents chez tous les animaux supérieurs, fonctionnent comme des moteurs linéaires. Nous reviendrons plus loin sur ce point.

(2) Au cours des 25 dernières années, la chimie moléculaire a subi une véritable révolution. Les méthodes de synthèse nouvelles ont permis aux chercheurs de concevoir et d'élaborer des systèmes moléculaires de plus en plus complexes, souvent formés de plusieurs constituants.

En particulier, les concepts de la chimie supramoléculaire (utilisation d'interactions faibles) et l'introduction de techniques de synthèse fondées sur l'effet de matrice (en anglais, "template") ont constitué des avancées importantes. Par exemple, des composés constitués d'anneaux entrelacés ("caténanes") sont aujourd'hui très accessibles, alors qu'ils étaient considérés comme des molécules hypothétiques ou extrêmement difficiles à obtenir par les chimistes de synthèse, il y a encore 20 ans. Cette vaste famille de composés, ainsi que des molécules analogues comme les "rotaxanes" (un anneau traversé par un axe), constituent la base des machines moléculaires artificielles actuellement étudiées.

Les développements synthétiques récents dont nous avons été témoins n'auraient jamais pu avoir lieu sans les avancées remarquables des méthodes physiques d'analyse, adaptées à la caractérisation de molécules d'une grande complexité. La RMN à haut champ, la diffraction des rayons X et la spectroscopie de masse, en particulier, ont fait progresser les techniques de caractérisation et d'étude des composés. Ces deux facteurs combinés (méthodes de synthèse et techniques d'analyse) ont incité les chimistes de synthèse à tenter de fabriquer des machines moléculaires depuis le début des années 1990. Sachant que les progrès des outils synthétiques et des méthodes d'analyse sont rapides, il est permis de penser que les machines primitives proposées aujourd'hui seront rapidement remplacées par des machines moléculaires performantes, capable de remplir des fonctions très variées.

(3) Le développement rapide des techniques de microscopie à champ proche (Binnig et Rohrer, prix Nobel de physique en 1986) a changé radicalement notre relation à la molécule. La possibilité d'observer et de manipuler des objets nanométriques ouvre un champ d'investigation large, et permet aux chimistes de passer du comportement d'un ensemble de molécules (en solution, par exemple) à celui de la molécule isolée. Ce que les biologistes et les physiciens ont mis en évidence avec des moteurs biologiques (rotation de l'ATP synthase, par exemple), semble aujourd'hui être à la portée des chimistes avec des assemblées moléculaires artificielles.

(4) L'intérêt marqué par nos sociétés pour les nanosciences et les nanotechnologies, en accord avec les propos visionnaires de Richard Feynman en 1959 ("There is Plenty of Room at the Bottom"), coïncide avec les progrès récents ayant permis d'élaborer les premières machines moléculaires de synthèse. Le potentiel d'application de ces objets est vaste et nous en discuterons à la fin de cet article.

II. Moteurs Artificiels à l'Echelle Moléculaire

C'est au cours des 10 dernières années que les premières machines moléculaires artificielles ont été conçues et élaborées. Le développement très rapide du domaine nous interdit de passer en revue, de manière exhaustive, l'ensemble des travaux réalisés. Une illustration relativement détaillée du domaine peut être trouvée dans deux ouvrages récents :

(1) un numéro spécial du journal américain *Accounts of Chemical Research*, paru en 2002 (référence 1) et,

(2) un volume de la série de livres "*Structure & Bonding*", également paru en 2001 (référence 2). Une revue écrite par Balzani et collaborateurs fait également office de référence (référence 3). Deux types de systèmes doivent être clairement différenciés : (1) les composés en solution (ou arrangés en mono- ou multicouches), qui font intervenir un très grand nombre de molécules ; ces systèmes représentent l'essentiel du domaine ; (2) les molécules isolées, que l'on va étudier et utiliser comme des objets individuels. Aujourd'hui, il n'y a que de très rares exemples de cette famille de systèmes, dont l'étude passe par l'utilisation des techniques de microscopie à champ proche.

Dans la section qui va suivre, nous allons nous intéresser à la première famille de systèmes et nous discuterons brièvement quelques exemples.

(a) Vers des moteurs rotatifs

Quelques équipes ont proposé des moteurs rotatifs, encore très primitifs, fondés sur des molécules multifonctionnelles. L'un des systèmes les plus prometteurs a été réalisé par l'équipe de Feringa (Groningen, Pays-Bas). Il repose sur l'isomérisation photochimique d'une double liaison fortement encombrée. Bien que la molécule soit relativement simple; celle-ci est capable de subir un mouvement de rotation unidirectionnel, à la suite d'une séquence complexe de stimuli photochimiques et thermiques. Cependant, les recherches les plus actives sont probablement orientées vers l'utilisation de molécules à plusieurs constituants, comportant des anneaux entrelacés (caténanes) ou un anneau traversé par un axe (rotaxane). D'une certaine manière, ces composés semblent parfaitement adaptés à l'élaboration de machines, puisque l'on peut facilement imaginer des mouvements continus d'un constituant par rapport à l'autre, sans qu'aucun processus de dégradation n'intervienne.

L'exemple représenté sur la Figure 4 correspond sans doute au premier caténane pour lequel il a été possible d'induire, de manière contrôlée, un mouvement de rotation d'un anneau à l'intérieur d'un autre anneau (1994). Aujourd'hui, la direction du mouvement n'est pas encore contrôlée ; par conséquent, l'anneau (de gauche, dans le dessin de la Figure 4) subit

deux mouvements de rotation de un demi-tour chacun, plutôt qu'une véritable rotation d'un tour complet.

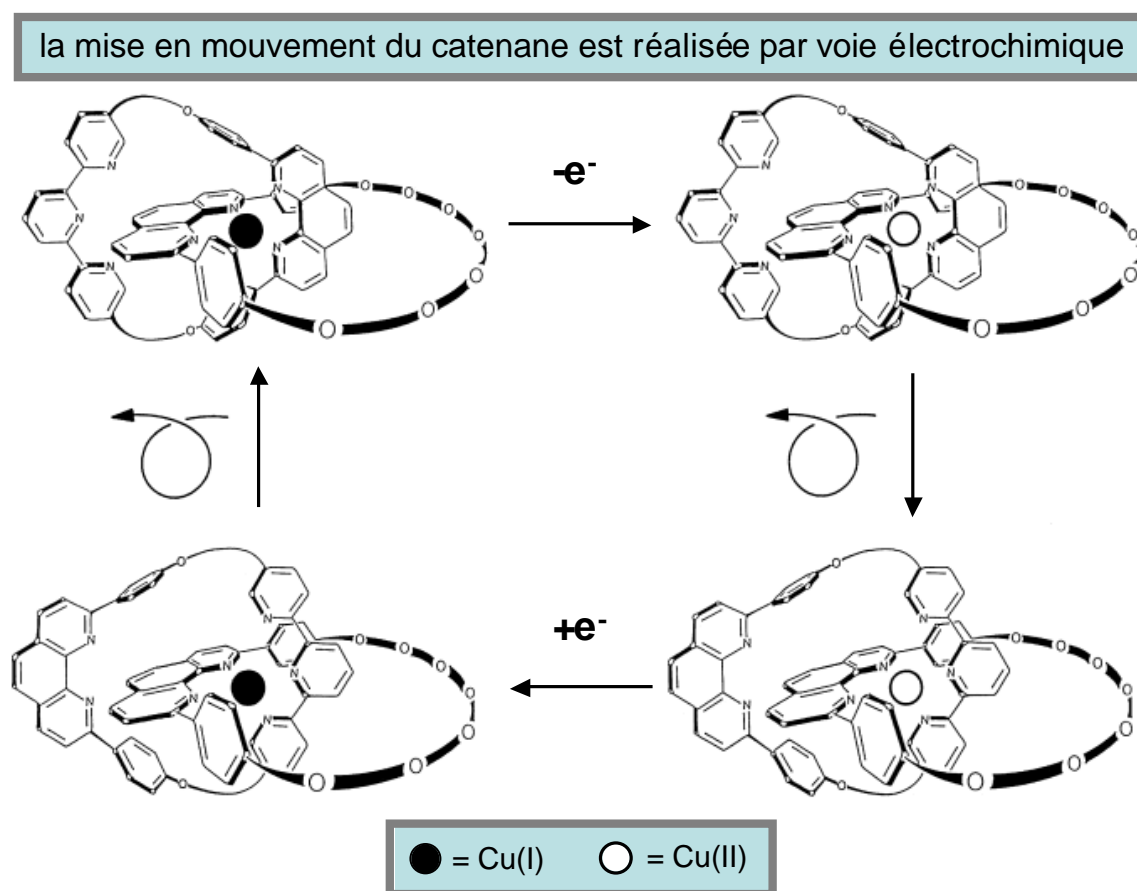


Figure 4

L'anneau de gauche contient un fragment *terdenté* (2,2',6',2''-terpyridine), ne participant pas à la coordination au métal, sur la ligne du haut. Un ligand *bidenté* (1,10-phénanthroline) est également présent dans chacun des deux anneaux. Le degré d'oxydation du métal (cuivre(I) ou cuivre (II)) détermine la géométrie d'équilibre du caténane. Cu(I) est stable dans une géométrie *tétraédrique* (tétracoordination ; en haut à gauche). Par contre, la situation la plus stable pour Cu(II) correspond à une *penta-coordination* (pyramide à base carrée ou bipyramide trigonale ; en bas à droite). La séquence de réactions est la suivante, en partant du coin supérieur gauche : une oxydation ($-e^-$) déplace le système loin de sa position d'équilibre thermodynamique : le complexe tétracoordiné de cuivre(II) du coin supérieur droit est instable. Le processus de relaxation du caténane implique que l'anneau de gauche subisse une rotation d'un demi-tour, pour placer le fragment terdenté à l'intérieur de l'autre anneau, en

interaction avec le centre Cu(II). L'espèce stable, représentée en bas à droite, est alors obtenue. Par réduction ($+e^-$), un processus symétrique du précédent a lieu, conduisant tout d'abord à un complexe pentacoordiné de cuivre(I), très instable (coin inférieur gauche). Celui-ci se réarrange rapidement, par rotation de l'anneau, pour fournir l'espèce de départ. Les premières molécules ont été modifiées au cours des dernières années, afin d'accélérer les mouvements de rotation. Aujourd'hui, certaines rotations d'anneau peuvent avoir lieu en quelques dizaines de millisecondes.

Le groupe de Stoddart (UCLA, Etats-Unis) est certainement l'un des plus actifs dans le domaine des machines moléculaires. Un exemple récent, représenté figure 5, a connu un très vif succès.

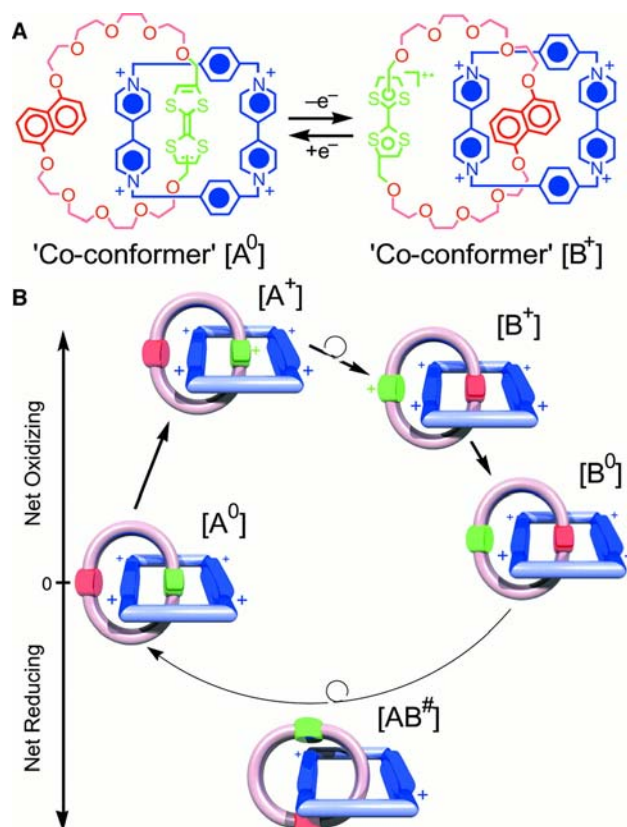


Figure 5

Sans entrer dans le détail du fonctionnement, notons que le caténane comporte deux anneaux différents : (1) l'anneau bleu (comportant quatre charges positives dans l'état de repos du système) présentant un caractère d'accepteur d'électron marqué, et (2) un anneau à deux

sites donneur d'électron (D). A l'état de repos [A^0], l'anneau bleu interagit fortement avec le groupement vert (TTF). Après oxydation, ce groupe est repoussé vers l'extérieur et le groupement naphthalénique, rouge, vient occuper l'espace disponible au centre de l'anneau bleu. Ce travail a permis d'élaborer un *interrupteur moléculaire* qui peut être reconfiguré. En effet, le caténane se comporte comme un véritable système à hystérésis, lorsqu'il est utilisé dans une monocouche disposée entre une électrode de silicium-n polycristallin et une électrode métallique. L'interrupteur est ouvert ou fermé en fonction du potentiel (+ 2 volts ou -2 volts) appliqué entre les électrodes. Le dispositif montre un véritable comportement *bistable*, un potentiel de -0,1 volt permettant de "lire" l'information stockée par l'interrupteur. Les chercheurs américains pensent que cela représente une étape importante vers les "ordinateurs moléculaires", même si de nombreuses questions restent aujourd'hui ouvertes.

Les découvertes des équipes de Stoddart et Heath ont récemment abouti à la fabrication d'un circuit à mémoire de 16 bits, fondé sur des rotaxanes très semblables aux caténanes de la figure 5. Ce travail a été élu "breakthrough of the year" pour l'année 2001, par le magazine *Science*. Le titre et l'illustration sont représentés ci-dessous (Figure 6).

Science, Vol. 294, 21 December 2001, p.2442

BREAKTHROUGH OF THE YEAR

In 2001, scientists assembled molecules into basic circuits, raising hopes for a new world of nanoelectronics

Molecules Get Wired

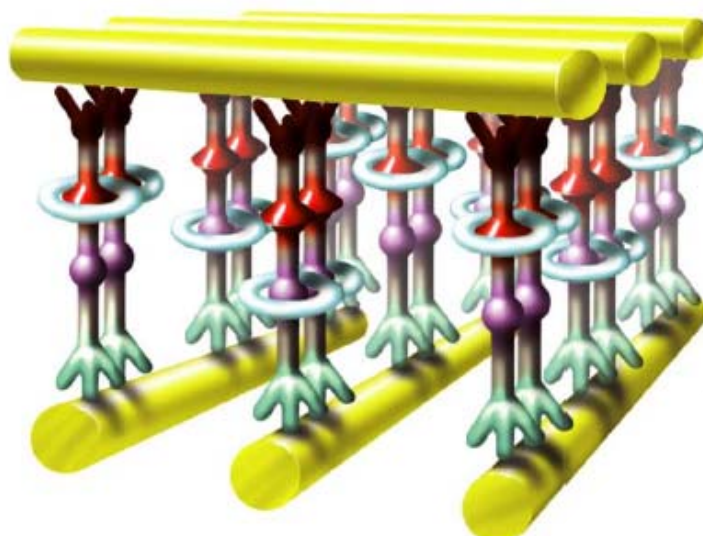


Figure 6

b) Les "navettes" moléculaires

Sur le schéma de la figure précédente, illustrant de manière très schématique les travaux récompensés par *Science*, nous reconnaissons des "rotaxanes", disposés verticalement entre les éléments d'une grille croisée, et dont les anneaux subissent vraisemblablement des mouvements de translation d'une position basse à une position haute et inversement. En ce sens, chaque anneau pourra être considéré comme une "navette", susceptible de subir un mouvement de va-et-vient de manière contrôlée, par voie électrique ou électrochimique. La mise au point de ce dispositif trouve son origine dans des travaux antérieurs, dont le principe est décrit dans les figures suivantes (Figures 7 et 8).

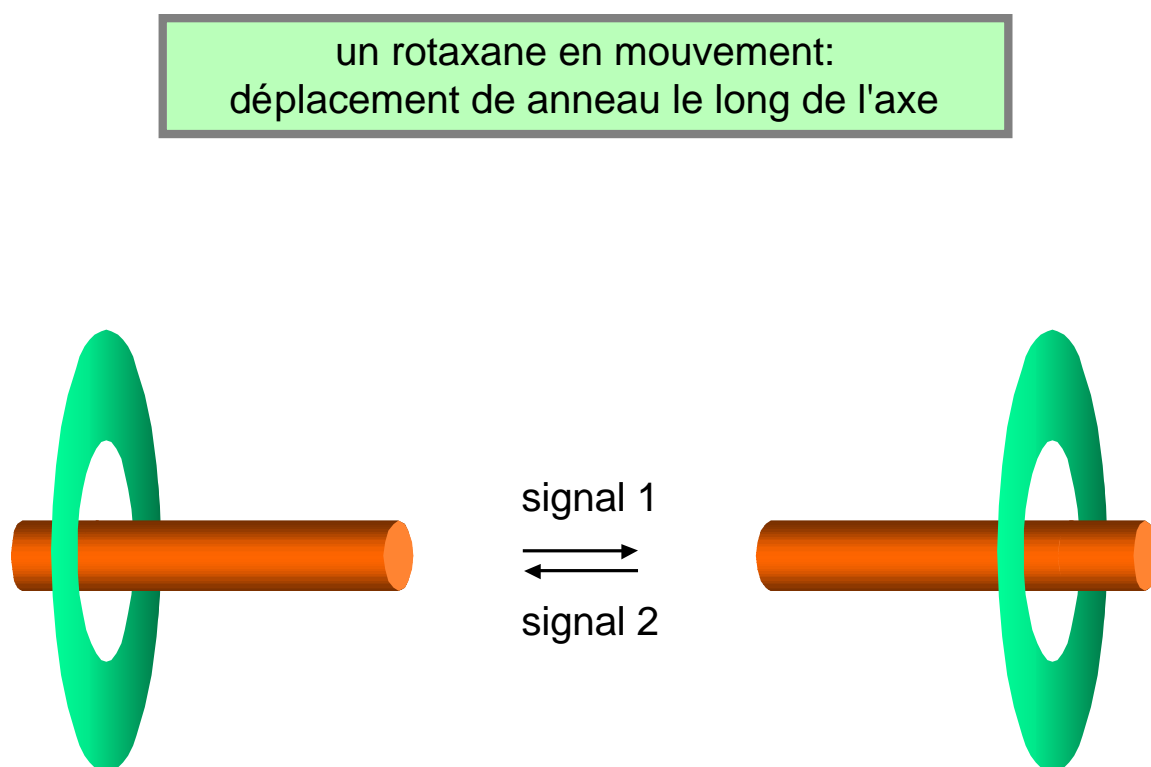


Figure 7

La première "navette" moléculaire a été décrite par Stoddart, Kaifer et leurs collaborateurs en 1994. Le principe de fonctionnement ressemble à celui du caténaire discuté au paragraphe précédent. L'anneau bleu (accepteur d'électron) a le choix entre deux "stations" : une station

verte, plus riche en électron sous sa forme neutre que la station rouge, et la station rouge. Par oxydation ($-e^-$), la station verte perd tout caractère donneur d'électron. Elle repousse l'anneau bleu vers la station rouge. Le processus inverse (retour vers la station verte) est obtenu en réduisant ($+e^-$) la station verte oxydée.

un rotaxane "commutable" fondé sur des complexes accepteur d'électron/donneur d'électron: l'anneau bleu (*accepteur*) interagit avec la "station" verte (*donneur*) avant que celle-ci ne soit oxydée. Après l'oxydation de cette dernière, il est repoussé vers la station rouge (donneur)

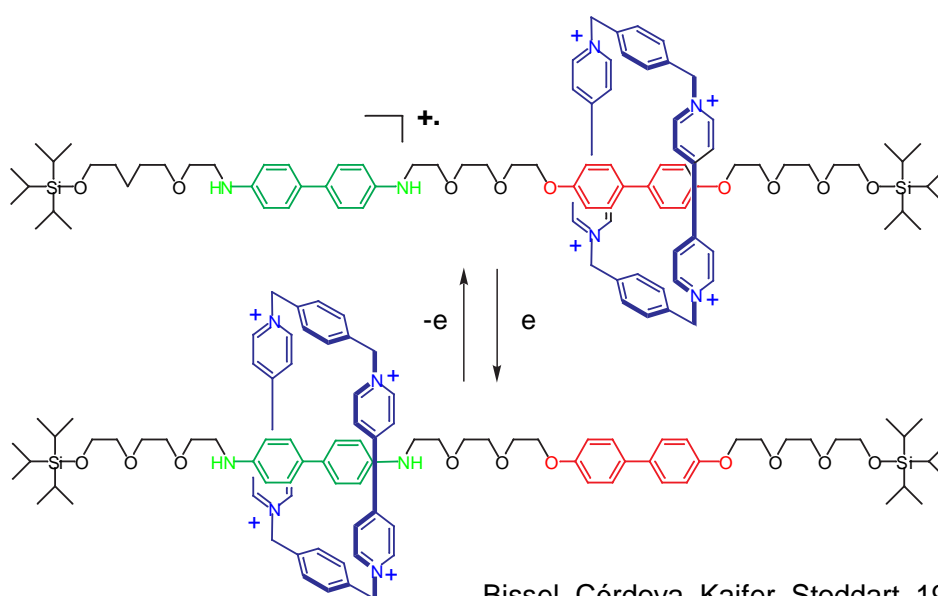


Figure 8

Un autre rotaxane, pour lequel l'anneau coulisse le long de l'axe, sous l'impulsion d'un signal électrochimique, a été proposé. Il est représenté Figure 9. Le système est fondé sur le couple Cu(I)/Cu(II). Son fonctionnement rappelle celui du caténane de cuivre mentionné auparavant : l'atome de cuivre(I) (en rouge) a un entourage constitué de 4 atomes d'azote. Après oxydation en cuivre(II), le système évolue vers un complexe à 5 coordinats azotés autour du centre métallique, ce qui provoque le mouvement de glissement de l'anneau vers la droite. Ce système est parfaitement réversible. Il correspond à la translation d'un fragment cyclique, dans un sens ou dans un autre, sur une longueur d'environ 1 nm.

un rotaxane complexé à Cu(I) ou Cu(II): glissement de l'anneau le long de l'axe qui le traverse, sous l'action d'un signal électrochimique

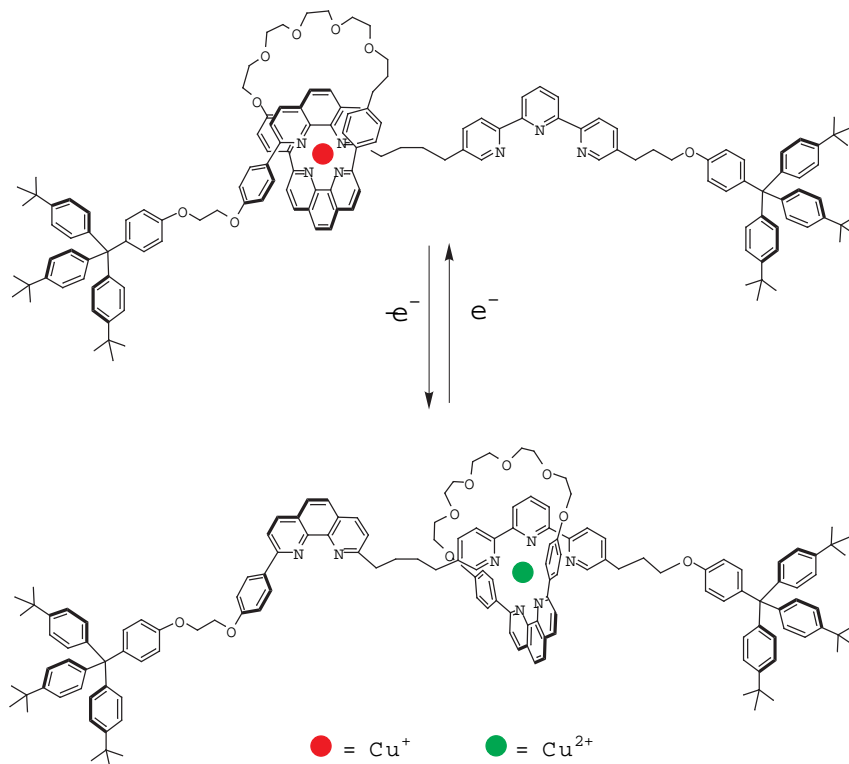


Figure 9

c) Vers des "muscles" moléculaires de synthèse

La fabrication d'objets nanométriques unidimensionnels, que l'on peut contracter ou allonger à volonté, sous l'action d'une impulsion extérieure, représente un défi important. De tels systèmes pourraient constituer des éléments actifs de dispositifs nano- ou microscopiques complexes, en liaison avec l'élaboration de microrobots, de contacteurs électriques ou de valves de petites dimensions, capable de piloter des processus divers (micropompes à applications médicales, circuits électriques de très faibles dimensions, etc...).

Tout un ensemble de travaux porte sur la mise au point de matériaux composites associant généralement un film de polymère conducteur et un film isolant. Le dopage et le "dé-dopage" du polymère conducteur provoquent une dilatation ou une contraction, qui se traduisent par un mouvement du dispositif. Des dispositifs millimétriques basés sur de tels principes ont été proposés. Bien sûr, l'utilisation de molécules subissant, au niveau individuel, une telle transformation, représente un objectif ambitieux mais important, à moyen terme.

En s'inspirant du mode de fonctionnement du muscle strié (le muscle le plus courant), une équipe a décrit récemment un composé capable de se contracter ou de s'allonger sous l'action d'un signal chimique. Là encore, il s'agit d'études réalisées en solution, sur un grand nombre de molécules désordonnées les unes par rapport aux autres. Il est très raisonnable de penser que de telles recherches pourront rapidement être transposées au niveau de la molécule isolée. Le principe (très simplifié) du muscle biologique et l'approche utilisée par le groupe de chimie moléculaire sont représentés ci-dessous (Figures 10 et 11).

Une représentation très schématique du fonctionnement du muscle strié: le glissement du filament fin le long du filament épais conduit à contracter ou allonger le muscle

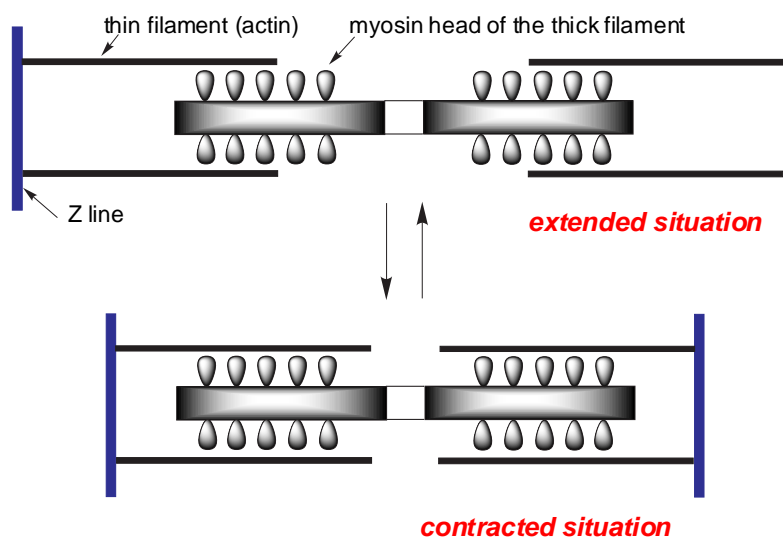
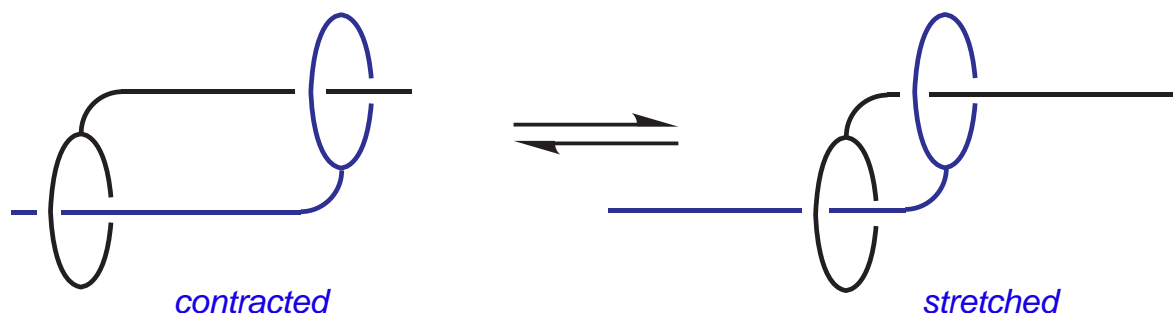


Figure 10

Un dimère de rotaxane représente la topologie idéale pour interconvertir une structure allongée et un système contracté



Maria Consuelo Jiménez (Chelo) et Christiane Dietrich-Buchecker

Figure 11

Un attrait important d'un *dimère de rotaxane* réside dans le caractère réversible du mouvement : le coulissage d'un des deux constituants le long de l'autre ne devrait en aucun cas conduire à la dissociation du système. La situation serait probablement très différente si l'on essayait de faire glisser deux filaments l'un sur l'autre, sans que ceux-ci ne soient reliés entre eux par une liaison mécanique (ou topologique).

La synthèse réalisée est complexe. L'une des clés a été de fabriquer un composé précurseur, possédant la topologie désirée. La structure de la molécule, obtenue par diffraction des rayons X, est représentée sur la figure 12.

Structure aux rayons X du précurseur du
"muscle" de synthèse

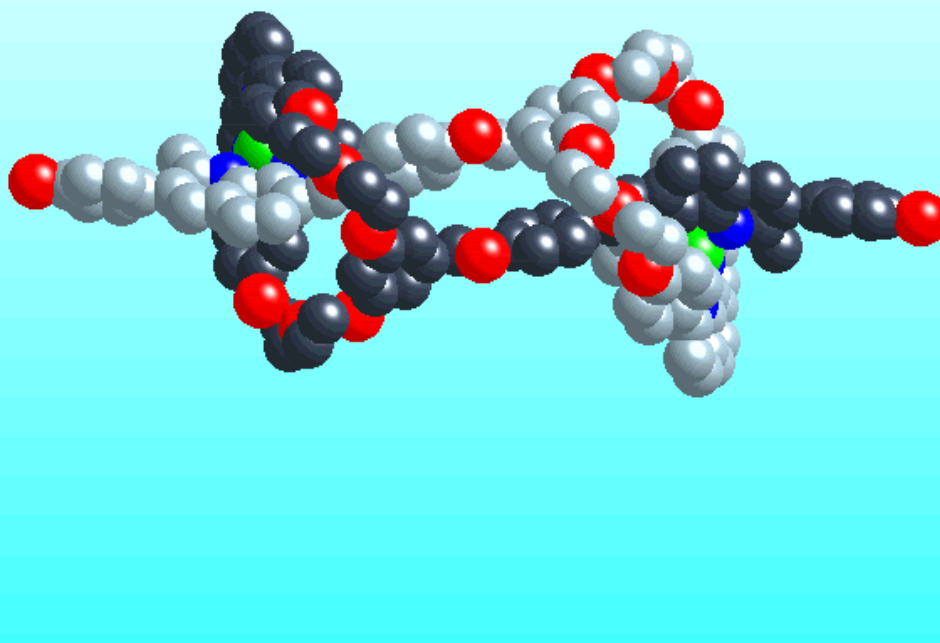
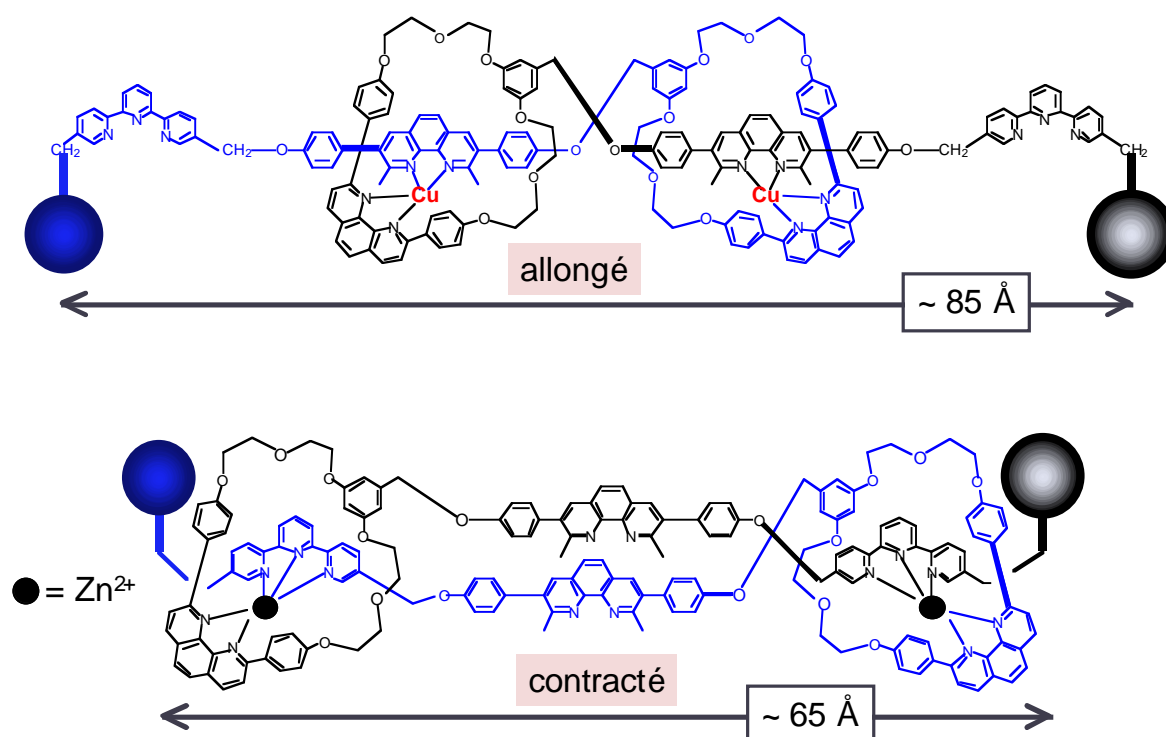


Figure 12

Les atomes coloriés en rouge sont des atomes d'oxygène. Deux atomes de cuivre(I) sont présents (couleur verte). La sous-unité gris clair et celle coloriée en gris anthracite sont identiques. Elles sont disposées comme cela est schématisé sur la figure décrivant la stratégie de l'approche: l'anneau gris clair est enfilé par le filament sombre ; ce dernier est rattaché à l'anneau sombre (à gauche) qui est, à son tour, traversé par le filament clair.

A partir du précurseur de la figure précédente, la molécule complète a pu être réalisée. Sa mise en mouvement est, aujourd'hui, réalisée par voie chimique.

les deux états du "muscle"



Le complexe de cuivre(I), de forme allongée, est transformé en complexe de zinc par simple échange de cation. Ceci provoque la contraction du dimère de rotaxane. L'échange inverse a lieu quantitativement par ajout d'un sel de cuivre(I) provoquant instantanément la conversion de la forme contractée en forme allongée. Des travaux sont en cours, afin de synthétiser de nouveaux composés rappelant ceux de la figure précédente, mais dont la mise en mouvement serait plus facile et d'un intérêt pratique plus grand : signal électrochimique ou, mieux, photonique. Notons cependant que la molécule subit un mouvement de grande amplitude, puisque sa longueur hors-tout varie de 8,5 à 6,5 nm (et inversement).

III. Des machines moléculaires aux dispositifs

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, des machines moléculaires fondées sur des rotaxanes et des caténanes organiques, dont la forme et les propriétés de conduction électrique peuvent être modifiées et contrôlées par un signal externe, ont conduit à des applications spectaculaires dans le domaine de l'électronique et du traitement de l'information au niveau moléculaire. Les possibilités de développement de machines et interrupteurs ont été largement

discutées dans la littérature scientifique, mais d'autres possibilités d'applications sont également très prometteuses.

Des capteurs ou détecteurs moléculaires (en anglais "sensors") dont le fonctionnement serait proche d'une machine moléculaire pourraient voir le jour rapidement. Par exemple, un mouvement moléculaire de grande amplitude pourrait être déclenché par la "reconnaissance" (complexation) d'un substrat ionique ou moléculaire. Ce mouvement pourrait conduire à des modifications importants des certaines propriétés physiques de la "machine" (couleur, propriétés d'émission, conductivité électrique, dichroïsme circulaire, etc...), ces modifications étant mises à profit pour détecter de faibles quantités de substrat. Le dosage d'espèces ciblées dans les fluides biologiques représente un domaine d'application immense. La mise au point de tels dispositifs passe vraisemblablement par l'organisation des molécules (dépôts sur une surface, cristaux liquides, mono- ou multicouches, etc...). La mise au point de *portes logiques*, analogues à celle de l'électronique, est actuellement en cours. Le principe de ces portes est proche de celui des capteurs mentionnés ci-dessus. En fonction de signaux envoyés de l'extérieur (deux ou plusieurs types différents), la molécule répondra par un signal retour traduisant une fonction (YES, NOT, AND, OR, NOR, etc...). L'utilisation d'un signal lumineux, provenant de la molécule, est, particulièrement prometteuse.

Le domaine des *nanodispositifs mécaniques* suscite également un grand intérêt. Il s'agit maintenant d'élaborer de véritables machines dont le mouvement aura une action mécanique conduisant à une opération. Par exemple, dans le domaine médical, certains envisagent de fabriquer *des pompes, des valves ou des leviers nanométriques* fondés sur des machines moléculaire ("drug-delivery"). Il serait ainsi possible d'ouvrir ou de fermer une valve, libérant une quantité donnée d'une molécule à fonction thérapeutique, dans un endroit précis de l'organisme (par exemple, libération d'insuline à partir d'un réservoir, déclenchée par une variation de la concentration de glucose).

Un certain nombre de travaux préliminaires ont déjà vu le jour, portant sur des *actionneurs* (en anglais : "*actuators*") capables de contrôler, entre autres, les mouvements d'un film polymère par voie électrochimique. Un autre exemple spectaculaire est celui d'une "pince", capable de se saisir d'un objet microscopique. Ces travaux reposent sur des objets *microscopiques* (polymères) plutôt que *nanoscopiques*, mais on peut espérer que des molécules isolées ou de petits agrégats moléculaires permettront, à moyen terme, de réaliser des opérations

mécaniques analogues. A long terme, on peut espérer que des micro- ou (mieux) nanorobots verront le jour. Ces robots devront posséder des "articulations" et des "muscles" nécessairement moléculaires, mis en mouvement par voie chimique, électro- ou photochimique.

La catalyse homogène peut également utiliser le potentiel de machines moléculaires. Là encore, un mouvement contrôlé pourrait permettre de piloter un système catalytique (admission du substrat, mise en route de la fonction catalytique ou son arrêt). A l'inverse, il est intéressant de noter que pratiquement tous les moteurs biologiques sont eux-mêmes des catalyseurs (hydrolyse de l'ATP). Les chimistes seront certainement capables un jour d'élaborer des moteurs, dont la fonction catalytique sera couplée à un mouvement continu, lorsque les réactifs sont transformés en produit (c'est à dire, par référence au monde macroscopique, lorsqu'un combustible est consommé).

La fonction de transport des protéines moteurs, telles que la dynéine ou la kinésine, pourra certainement être mimée par des systèmes de synthèse. Par exemple, nous avons vu que dans un rotaxane, un anneau peut se déplacer le long d'un fil qui le traverse. Si l'on imagine que l'anneau est porteur d'un récepteur moléculaire, la molécule contenue dans le récepteur sera elle aussi déplacée sur une certaine distance. Si l'on est capable de déclencher la libération de cette molécule lorsque l'anneau occupe une position bien définie, on est tout près de *réaliser un processus de transport*. Par exemple, un rotaxane de ce type dont l'axe traverserait une membrane, pourrait agir comme transporteur d'un substrat donné à travers la membrane. D'une certaine manière, ce comportement rappellerait la manière dont la kinésine transporte les *organelles* dans la cellule, sur de longues distances.

Sans prétendre que le domaine débouchera à court terme sur des applications, nous sommes cependant convaincus que son originalité et son potentiel à long terme sont indiscutables, et devraient conduire à des applications (peut-être pas encore identifiées) importantes.

Une question simple demeure, qui représente un défi particulièrement stimulant pour le chimiste : est-il possible de concevoir et d'élaborer des composés, vraisemblablement à plusieurs constituants, dont la mise en mouvement (déclenchée et entretenue par une réaction

chimique, une irradiation lumineuse, etc...) conduise à la production d'une énergie mécanique et, finalement, d'un travail, à l'échelle moléculaire ?

Quelques références importantes :

[1] Accounts of Chemical Research, numéro spécial sur les machines moléculaires, juin 2001.

[2] " Structure & Bonding ", volume spécial sur les machines et moteurs moléculaires, (J.-P. Sauvage Ed.), Vol.99, 2001.

[3] "Artificial Molecular Machines", V. Balzani, A. Credi, F. M. Raymo et J.F. Stoddart, Angew.Chem. Int. Ed. **2000**, 39, 3348-3391.