

Les nanomachines moléculaires

De la biologie aux systèmes artificiels et aux dispositifs

Jean-Pierre Sauvage

Summary From biology to artificial systems and devices

In biology, many rotary or linear motors play an essential role in numerous processes: synthesis and hydrolysis of ATP, transport of molecules (kinesin and dynein), functioning of the striated muscle, etc. In the course of the last decade, a few laboratories have proposed complex molecular systems, made in a totally artificial way, whose behavior is reminiscent of primitive machines or motors. A recent example is that of a molecular « muscle » based on a rotaxane dimer. Under the action of an external signal, the molecule is stretched or contracted, in a reversible way. The overall length of the « muscle » is either 8.5 nm (stretched situation) or 6.5 nm (contracted form). A few long-term potential applications will be discussed in the article.

Mots-clés

Machines moléculaires, moteurs moléculaires, caténanes, rotaxanes, dispositifs moléculaires.

Key-words

Molecular machines, molecular motors, catenanes, rotaxanes, molecular devices.

L'élaboration de « machines » et « moteurs » moléculaires de synthèse représente un domaine particulièrement actif, domaine 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 resteront 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 ».

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 ?

- 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.

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

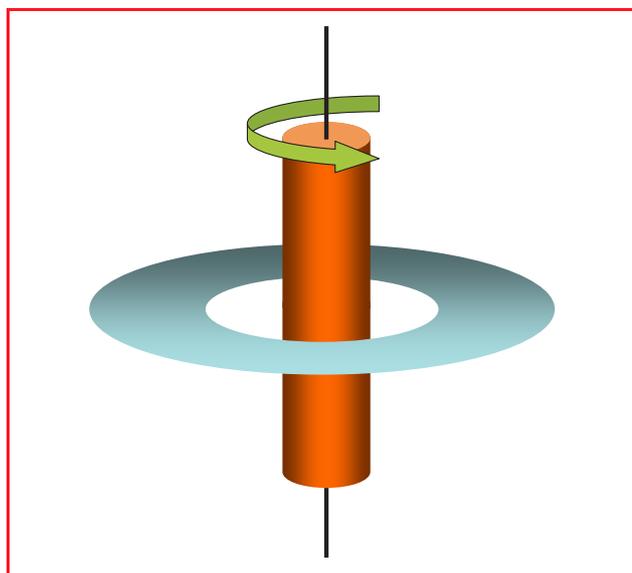


Figure 1. Dans un moteur rotatif, l'axe (« rotor ») tourne à l'intérieur de la roue (« stator »); il est essentiel de contrôler le sens de la rotation.

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 » $\alpha_3\beta_3$. Lorsque des protons sont transportés de la face inférieure de la membrane vers sa face supérieure, le « cylindre » c_{12} est mis en mouvement. La protéine γ étant solidaire de c_{12} , elle

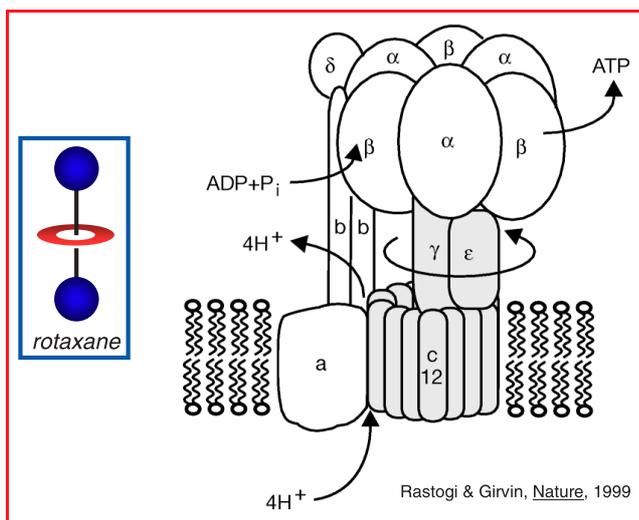


Figure 2 - L'ATP synthase.

L'ATP synthase est le rotaxane naturel le plus important.

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 P_i), 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 coll., 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 ($\alpha_3\beta_3$) 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 immergeant 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 coll. en 1999. Elle est représentée de manière schématique sur la 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.

• 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, capables de remplir des fonctions très variées.

• 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.

• 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.

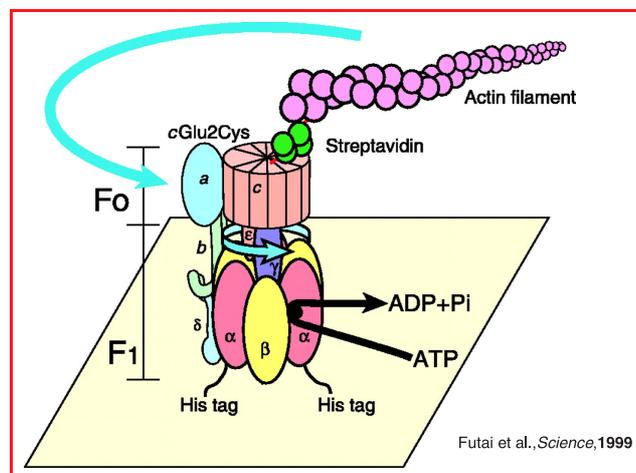


Figure 3.

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.

Moteurs artificiels à l'échelle moléculaire

C'est au cours des dix 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 : un numéro spécial du journal américain *Accounts of Chemical Research*, paru en 2001 [1] et un volume de la série de livres *Structure & Bonding*, paru également en 2001 [2]. Une revue écrite par Balzani et coll. fait également office de référence [3]. Deux types de systèmes doivent être clairement différenciés :

- 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 ;
- 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.

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.

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

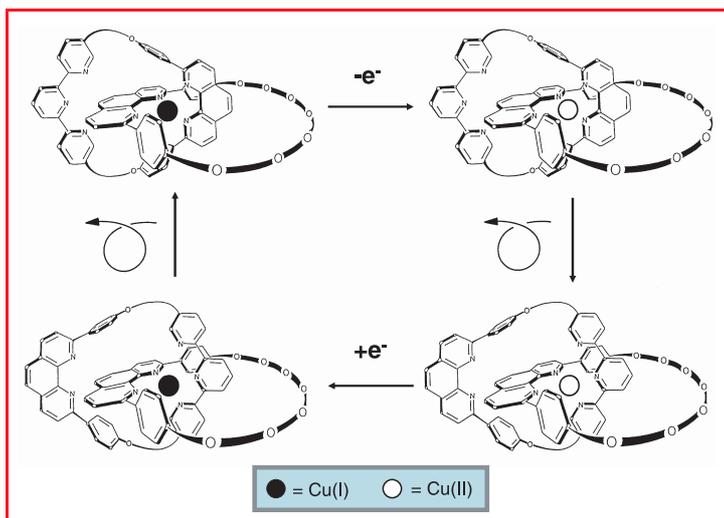


Figure 4.

La mise en mouvement du caténane est réalisée par voie électrochimique.

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, États-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.

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

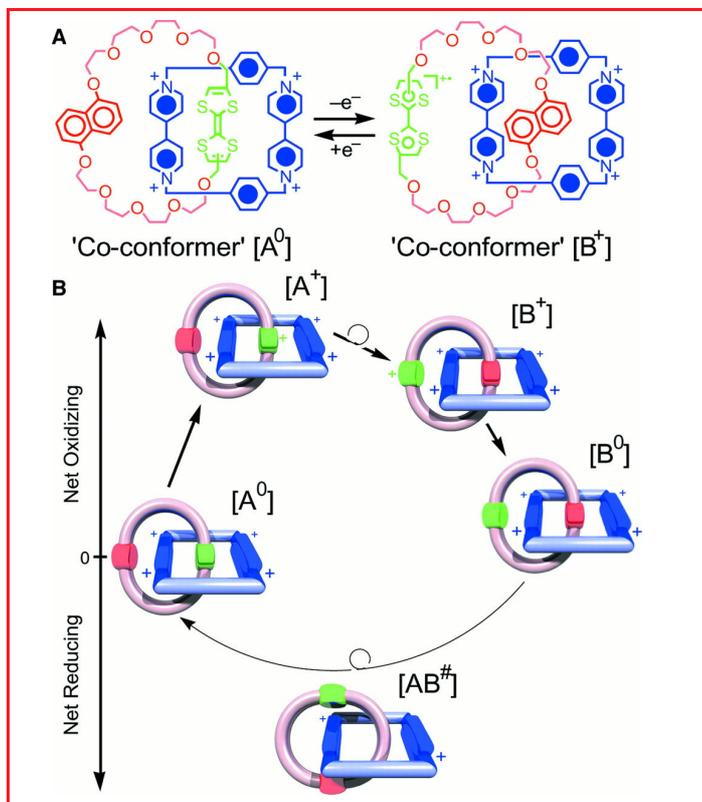


Figure 5.

BREAKTHROUGH OF THE YEAR

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

Molecules Get Wired

Computer chip technology and scientific breakthroughs have been marching in step for decades. Without computers, scientists couldn't track climate change, sequence the genomes of entire organisms, or image the human brain at work. But the ability to cram ever more circuitry onto silicon chips now faces fundamental limits. Ironically, it's now possible to make the innards of a circuit—the transistors, resistors, capacitors, and wires—so small they no longer function.

In recent years, scientists have tried to get around these limits by going for the ultimate in shrinkage: turning single molecules and small chemical groups into transistors and other standard components of computer chips. It's a provocative idea, but many have doubted that researchers would ever manage to link such devices together into more complex circuits. Today, those doubts are diminishing. This year, researchers wired up their first molecular-scale circuits, a feat *Science* selects as the Breakthrough of 2001. If researchers can wire these circuits into intricate computer chip architectures, this new generation of molecular electronics will undoubtedly provide computing power to launch scientific breakthroughs for decades.

It's easy to see the allure of computing with molecules. Today's state-of-the-art computer chips pack some 40 million transistors onto a slab of silicon no bigger than a postage stamp. The smallest features in

nents. But their suggestion remained little more than a pipe dream until the advent of scanning probe microscopes in the 1980s, which gave researchers the tools to probe individual molecules and move them around at will. That led to a spate of studies in the late 1990s that showed that individual molecules could conduct electricity like wires or semiconductors, the building blocks of modern microprocessors.

Turning individual molecules into devices was not far behind. In 1997, groups led by Robert Metzger of the University of Alabama, Tuscaloosa, and Chong-Wu Zhou of Yale University created molecular diodes, one-way current valves that are among the most basic and essential elements in the chip designer's tool kit. In July 1999, another group led by James Heath and Fraser Stoddart of the University of California, Los

carry out rudimentary computing operations. In January, a team led by Charles Lieber, a chemist at Harvard University, got the ball rolling. In the 26 January issue of *Science*, Lieber's team reported arranging indium-phosphide semiconducting nanowires into a simple configuration that resembled the lines in a ticktacktoe board. The team then used a technique called electron beam lithography to place electrical contacts at the ends of the nanowires in order to show that the array was electronically active. The tiny arrangement wasn't a circuit yet, but it was the first step, showing that separate nanowires could communicate with one another.

The next step came at the American Chemical Society meeting in April. Heath and his colleagues at UCLA reported making semiconducting crossbars. But in this case, Heath's team placed molecules called rotaxanes, which function as molecular transistors, at each junction. By controlling the input voltages to each arm of the crossbar, the scientists showed that they could make working 16-bit memory circuits.

But molecular crossbars were only part of the success story. Researchers also made heady progress with their favorite nanomaterial, carbon nanotubes. These tiny straws of carbon are among the hottest materials in the nanotech world because they have an atomically perfect structure, resembling a rolled-up sheet of chicken wire. Depending on how these carbon sheets are rolled—so that chains of carbon atoms circle or spiral

Good connections. Molecules can now be crafted into working circuits. Constructing real molecular chips will be a big challenge.

Figure 6.

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

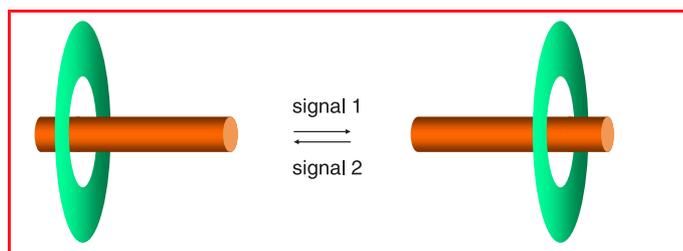


Figure 7 - Un rotaxane en mouvement. Déplacement de l'anneau le long de l'axe.

of the year » pour l'année 2001, par le magazine *Science*. Le titre et l'illustration sont représentés *figure 6*.

Les « navettes » moléculaires

Sur le schéma de la *figure 6*, 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 7 et 8*.

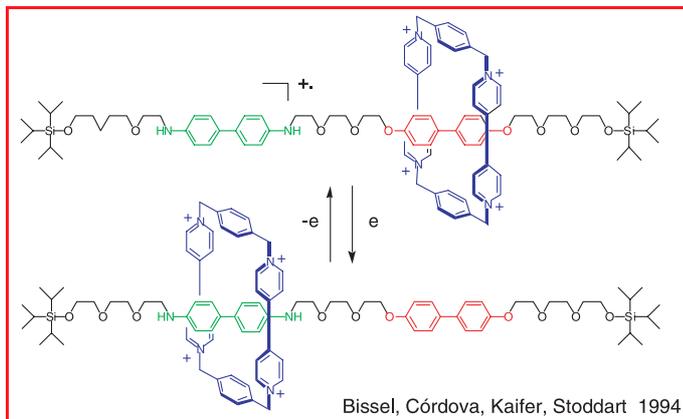


Figure 8 - Un rotaxane « commutable » fondé sur des complexes accepteur d'électron/donneur d'électron. L'anneau bleu (accepteur) interagit avec la « station » verte (donneur) avant que celle-ci ne soit oxydée. Après l'oxydation de cette dernière, il est repoussé vers la station rouge (donneur).

La première « navette » moléculaire a été décrite par Stoddart, Kaifer et coll. en 1994. Le principe de fonctionnement ressemble à celui du caténane discuté au paragraphe précédent. L'anneau bleu (accepteur d'électrons) a le choix entre deux « stations » : une station verte, plus riche en électrons sous sa forme neutre que la station rouge, et la station rouge. Par oxydation (-e⁻), la station verte perd tout caractère donneur d'électrons. 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 autre rotaxane, pour lequel l'anneau coulisse le long de l'axe, sous l'impulsion d'un signal électrochimique, a été

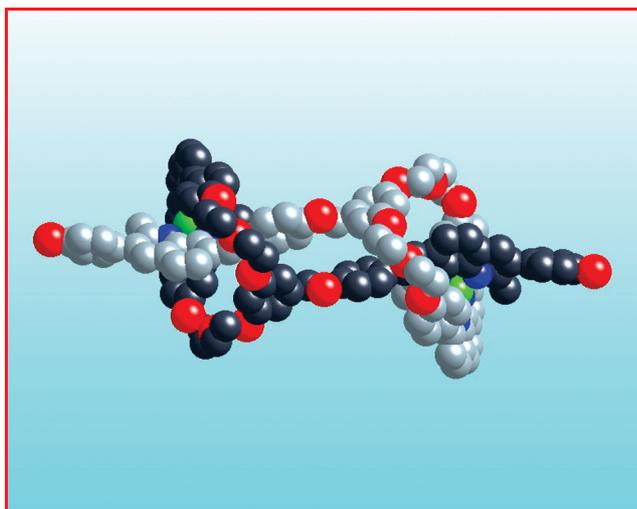


Figure 12 - Structure aux rayons X du précurseur du « muscle » de synthèse.

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).

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 importantes de

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 des 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 moléculaires (« 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

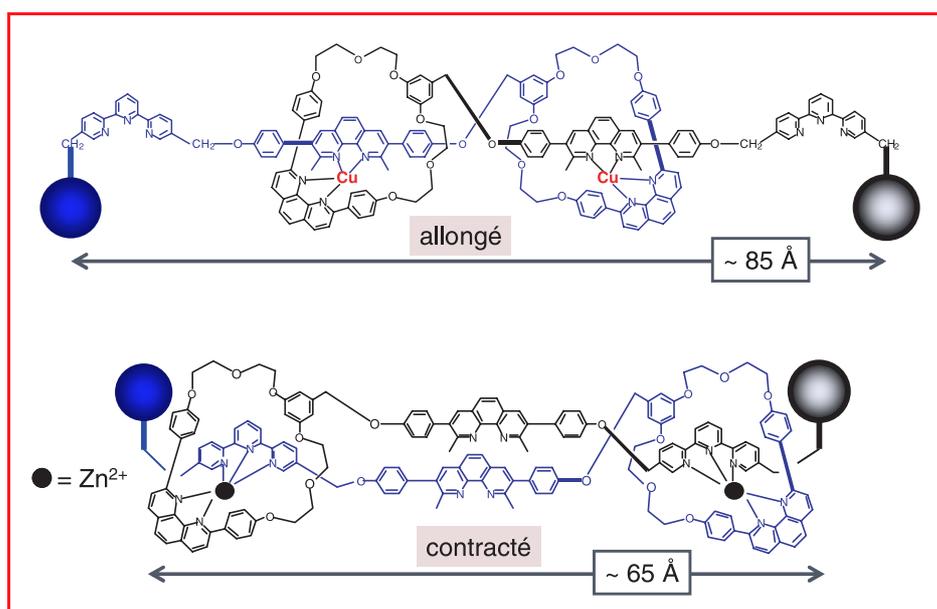


Figure 13 - Les deux états du « muscle ».

« 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 ?

Références

- [1] *Accounts of Chemical Research*, numéro spécial sur les machines moléculaires, juin 2001.
- [2] *Structure & Bonding*, volume spécial sur les machines et les moteurs moléculaires, J.-P. Sauvage (éd.), 2001, vol. 99.
- [3] Balzani V., Credi A., Raymo F.M, Stoddart J.F., Artificial Molecular Machines, *Angew.Chem. Int. Ed.*, 2000, 39, p. 3348.



Jean-Pierre Sauvage

est directeur de recherche au Laboratoire de chimie organo-minérale à l'université Louis Pasteur de Strasbourg*, membre de l'Académie des sciences.

* Laboratoire de chimie organo-minérale (UMR 7513-CNRS), Faculté de Chimie Institut Le Bel, Université Louis Pasteur, 4 rue Blaise-Pascal, 67070 Strasbourg Cedex.

Tél. : 03 90 24 13 61 ou 03 90 24 13 64. Fax : 03 90 24 13 68.

E-mail : sauvage@chimie.u-strasbg.fr

<http://wwwchimie.u-strasbg.fr/~lcom/>