

Les molécules-machines

Christian Joachim et Jean-Pierre Launay

Résumé	L'article décrit un certain nombre de réalisations et d'expériences basées sur la « molécule unique ». La synthèse chimique fournit des molécules d'une grande complexité pour lesquelles on peut étudier, après dépôt sur une surface appropriée, des phénomènes fondamentaux : transport d'électrons, commutation, amplification, actions mécaniques. Une grande importance est attachée au contrôle précis de la connexion molécule/métal. L'outil d'étude essentiel est ici le microscope à effet tunnel, qui permet dans un premier temps l'identification et l'observation précise de la molécule (y compris sa conformation), et dans un second temps, l'accès aux propriétés de l'objet unique.
Mots-clés	Commutateur moléculaire, amplificateur moléculaire, rotor moléculaire, machine moléculaire, microscope à effet tunnel, nanojonction, marche atomique.
Abstract	The molecular machines The paper describes several realizations and experiments based on a « single molecule ». Chemical synthesis yields highly elaborated molecules which can be deposited on a suitable surface, so that basic processes can be studied: electron transport, switching, amplification, mechanical actions. The precise control of the molecule/metal connection is of utmost importance. The main tool is here the scanning tunnelling microscope, allowing in a first step the identification and observation of the molecule (including its conformation), and in a second step, the study of the properties of this single object.
Keywords	Molecular switch, molecular amplifier, molecular rotor, molecular machine, scanning tunnelling microscope, nanojunction, atomic step.

Il est des dispositifs expérimentaux comme des machines qu'aucun principe de la physique ou loi de la chimie n'impose d'avoir une taille macroscopique. Certes, un cristal de silicium, superbement transformé en sa surface par les technologies de la micro-électronique, réalise des prouesses en calcul, en mémorisation ou en mécanique. Mais pour rendre de la matière non vivante utile à la fabrication d'un calculateur, d'une mémoire ou d'un transducteur, il n'est pas nécessaire qu'elle soit mise sous la forme d'un matériau massif, ou même d'une monocouche moléculaire. La matière vivante réalise également des prouesses fonctionnelles avec ses moteurs protéiques [1] ou ses neurones, mais ce sont des ensembles composés d'un nombre gigantesque d'atomes. Il est alors permis de s'interroger sur la plus petite taille que pourrait présenter un moteur, un calculateur ou un instrument de mesure. Cette question de machine rejoint alors les préoccupations des chimistes de synthèse, sans passer par la science des matériaux.

Depuis la découverte en 1989 que la microscopie à effet tunnel permet de manipuler la matière atome par atome [2], une nouvelle branche des sciences et techniques se développe qui pose comme principe de « rester en bas », c'est-à-dire de réaliser des dispositifs expérimentaux et des machines fonctionnelles avec le moins d'atomes possibles [3]. L'application de ce principe rencontre au moins deux problèmes :

l'intégration de toute une machine dans une molécule nécessite des moyens technologiques puissants afin de pouvoir échanger des ordres, des données, fournir de l'énergie ou des signaux de synchronisation avec cette molécule ; il faut que la molécule ait suffisamment de ressources pour se prêter à cette fonctionnalisation [4].

La molécule doit donc s'agrandir pour accueillir la fonction et devient une molécule-monument. On peut parler alors de *monumentalisation* pour atteindre une fonction complexe, par opposition à la *miniaturisation* qui concerne maintenant les moyens de communication à mettre en œuvre pour atteindre cette molécule. Nous verrons même dans la suite qu'il n'est pas absolument nécessaire d'assurer les interfaces homme/molécule. Certaines machines moléculaires pourraient devenir autonomes, au grand bénéfice de notre santé et de notre environnement [5].

Les « technologies » fondamentales

Quand le chimiste ou le physicien parle d'une molécule, il parle en général d'une classe d'équivalence de cette molécule, c'est-à-dire d'un *ensemble* de molécules. Ici au contraire, une molécule est une molécule *unique*, dont l'image peut être obtenue par exemple avec un microscope à effet tunnel. Comme cette molécule a été déposée sur une surface, elle a une conformation souvent différente de sa voisine de surface, qu'elle soit adsorbée auprès d'une marche monoatomique, sur un défaut ou tout simplement de par la proximité avec sa voisine.

Mais avant d'en arriver à cette étape d'imagerie, il nous faut d'abord concevoir la molécule en correspondance avec le dispositif ou la fonction à réaliser. Cette conception peut être tout à fait anthropomorphique, comme avec l'exemple de la charrette à bras moléculaire [6] ou des propositions de transistor unimoléculaire basées uniquement sur la forme de triode de la molécule [7] (*figure 1*). Mais il n'est pas nécessaire pour une molécule d'avoir des roues pour se déplacer sur une surface, et il n'est pas nécessaire à une

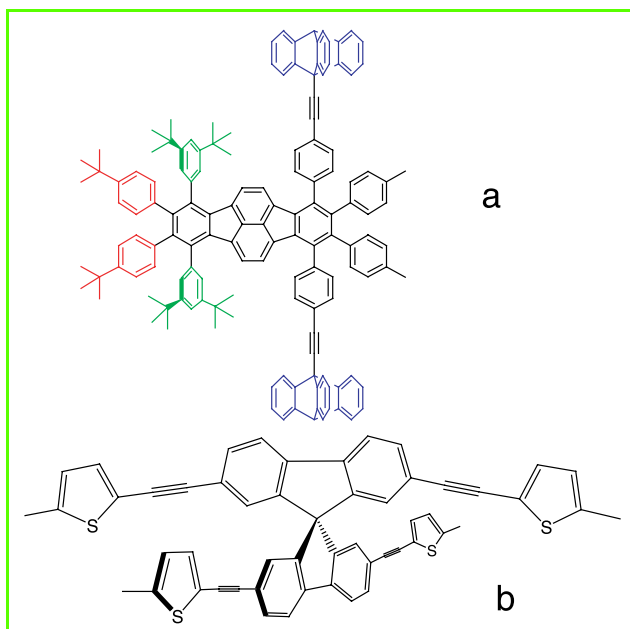


Figure 1 - a) La charrette à bras moléculaire [6]. En bleu : roues ; en vert : pieds ; en rouge : poignées. b) La triode moléculaire, réalisée à partir d'une « croix » (partie centrale uniquement) [7].

molécule de ressembler à un circuit électronique pour calculer [8].

Cette phase de conception nécessite un travail conjoint du chimiste théoricien et du chimiste de synthèse. Curieusement, au cours de ces années, nous avons noté que la fonction propre embarquée dans la molécule avait tendance à occuper de moins en moins de place par rapport aux groupements nécessaires à l'adaptation de cette molécule à son futur environnement – une surface – et aux interconnexions qui seront nécessaires pour réaliser l'interface homme/molécule.

Stratégiquement, deux voies s'ouvrent aux chimistes de synthèse : soit obtenir un grand nombre de ces molécules après des synthèses multi-étapes (10 à 20 étapes, qqs % de rendement final), soit assembler la molécule directement sur la surface afin d'éviter cette chute de rendement par étape. Actuellement, seule la synthèse « extrinsèque » est pratiquée (figure 2). Mais les premières expériences de chimie sous pointe (synthèse « *in situ* ») sont suffisamment prometteuses pour que certains groupes explorent déjà cette voie.

Une fois la synthèse réalisée et les différentes étapes de purification et de caractérisation spectroscopique passées, vient la phase de lancement/dépôt. Il s'agit d'amener un grand nombre de molécules intactes sur la surface afin de passer aux phases d'imagerie, de manipulation, puis d'expériences. Les techniques de dépôt dont nous disposons (en général la sublimation) ont la mauvaise habitude de casser nos molécules pendant le lancement (il existe bien sûr des techniques plus douces utilisant des gaz porteurs ou des solvants : MALDI, electrospray). En outre, l'atterrissage est problématique car la surface d'accueil de ces molécules – véritable table d'expérience – doit être d'une propreté extrême à l'échelle atomique, ce qui la rend extrêmement réactive et favorise nombre de fragmentations.

Après la synthèse et le dépôt, vient l'imagerie et la détermination de la conformation qu'adopte la molécule sur une surface donnée. Ici, les progrès ont été considérables, aussi bien dans la qualité des images STM (et bientôt AFM) obtenues que dans les techniques de calculs permettant de reconnaître une molécule et d'extraire ses conformations. Une molécule comme le « lander » (voir après) a été imagée sur au moins cinq STM-UHV différents en Europe et donne la même image dans les mêmes conditions.

D'une manière générale, les molécules sont des objets souples, dont la forme dépend de l'environnement local. La détermination de la conformation exacte de la molécule adsorbée s'obtient en comparant, ligne de balayage par ligne de balayage, l'image expérimentale et l'image calculée dans

les mêmes conditions de tension et de courant. On procède alors à un affinement de la conformation de la molécule (et du site d'absorption) à l'aide de programmes de mécanique moléculaire tenant compte de l'interaction de la molécule avec la surface et de la présence de la pointe, jusqu'à ce que les images théorique et expérimentale convergent (figure 3).

Une fois cette identification réalisée, les expériences peuvent commencer. Il en existe actuellement de trois types : des expériences de mécanique, de spectroscopie ou d'électronique (le magnétisme et l'optique sont encore peu développés sur une seule et même molécule). Pour les expériences de mécanique et de spectroscopie, nous en sommes encore à une interface à

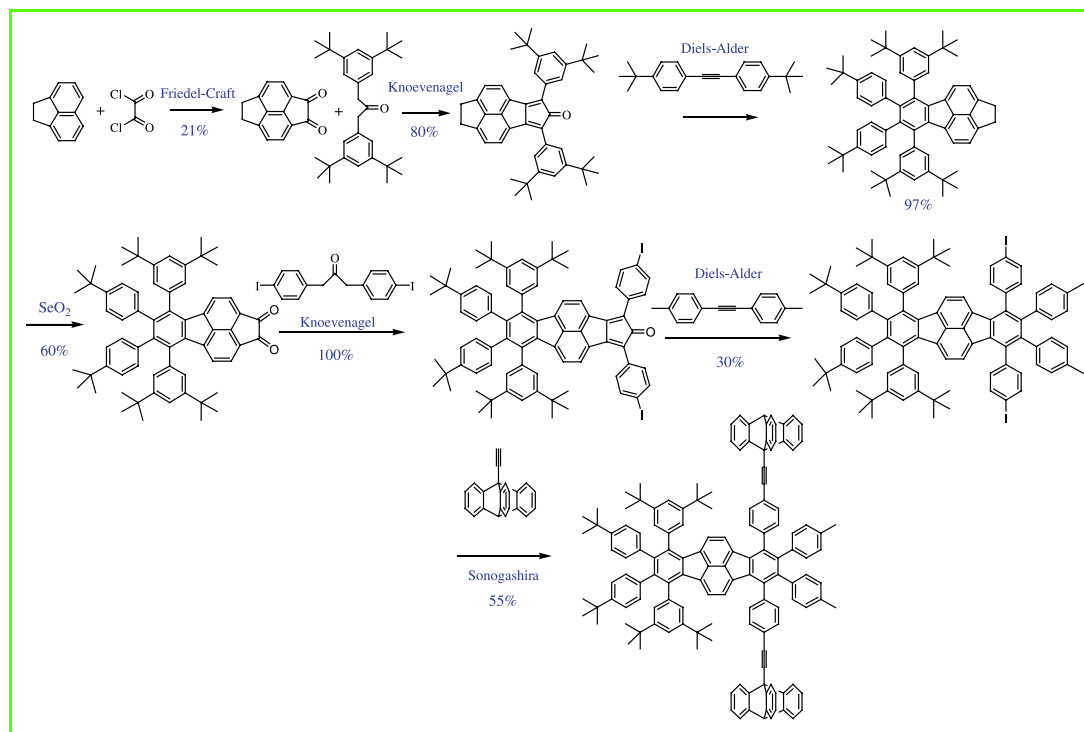
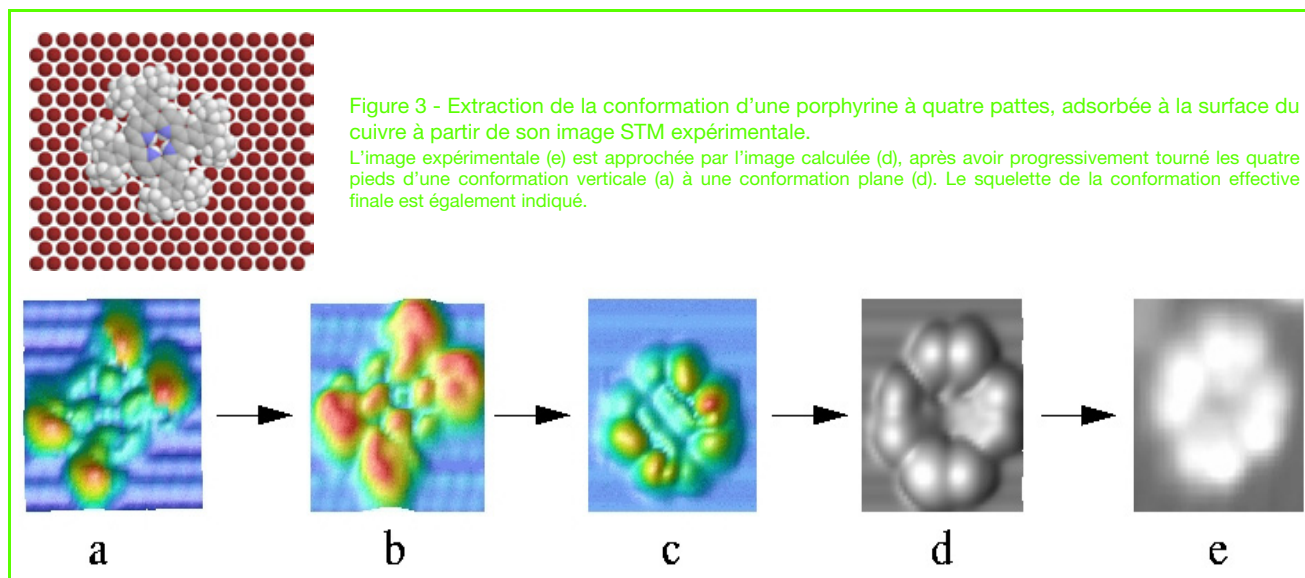


Figure 2 - Schéma de synthèse de la charrette [6].



deux réservoirs, la pointe et la surface. Pour l'électronique, la demande est maintenant de réaliser des expériences planaires, la pointe du STM n'étant plus utilisée que comme moyen d'imagerie. Née au début des années 2000, cette nouvelle tendance exige la réalisation de fils d'interconnexions précis à l'échelle atomique, où chaque atome des interconnexions doit être exactement positionné. Or, que ce soit pour des nanocommunications optique ou électronique, les techniques de nanolithographie modernes que l'on rencontre dans les salles blanches ne permettent pas d'atteindre une telle précision.

Ainsi, pour réaliser ces fils métalliques, on cherche actuellement à utiliser des masques solides amenés au plus proche de la surface sans la polluer, ou même à utiliser des molécules pour tisser ces fils [9] (figure 4). Cette nouvelle technologie, d'échelle atomique, est en cours d'exploration

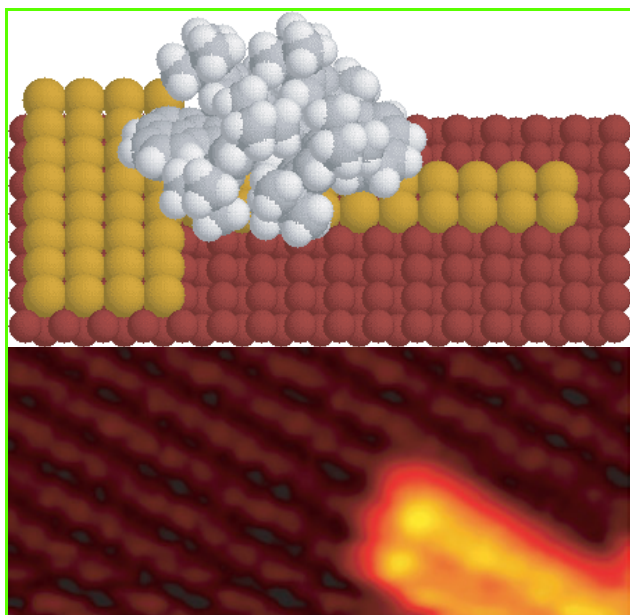


Figure 4 - Molécule-araignée [9].

En haut : modèle moléculaire de la conformation d'un « lander » à quatre pieds après adsorption sur la surface de cuivre Cu(110) et assemblage du petit fil de cuivre de deux atomes de large en bord de marche. En bas : image STM expérimentale du bout du petit fil de cuivre. En fond, on reconnaît également les rangées atomiques de la surface du cuivre.

dans un petit nombre de laboratoires académiques et industriels en Europe, aux États-Unis et au Japon.

Phénomènes élémentaires avec et dans une seule molécule

Un des premiers phénomènes que l'on puisse étudier dans une molécule unique est l'échange d'électrons guidé par un fil moléculaire. Il s'agit d'un phénomène quantique bien connu, illustré pour la première fois par W. Heisenberg en 1927, dans le cas apparenté de l'échange d'énergie. Distinguons à ce sujet deux variantes. D'abord, le *transfert* intramoléculaire d'électrons, lorsque la molécule est isolée de tout réservoir d'électrons. Dans ce cas, un seul électron est échangé à la fois au travers du fil moléculaire entre deux groupements chimiques, un donneur et un accepteur d'électrons (figure 5). Il y a ensuite le *transport*, lorsque la molécule est connectée à des plots métalliques. Là, un grand nombre d'électrons, fournis par ces réservoirs, sont échangés chaque seconde au travers de la jonction métal/molécule/métal ainsi formée. Un courant tunnel prend alors naissance dans les électrodes. Le cas du transfert a été étudié en solution ou dans des expériences en jet moléculaire. Au sens strict, on ne travaille pas alors avec une seule molécule, mais avec un ensemble de molécules sans interaction. En effet, il faut bien assurer la mesure du phénomène d'échange en accumulant un grand nombre d'événements quantiques.

Dans le cas de la solution, on trouve dans la molécule deux sites redox permettant la localisation d'un électron excédentaire et une structure conjuguée relativement rigide assurant le couplage électronique entre les deux extrémités (figure 5a). L'étude du transfert est alors possible par spectroscopie visible-proche IR (transition intervalence).

Pour le transport, la source d'électrons n'est plus un seul atome ou un seul groupement chimique, mais un réservoir, qui peut être la surface d'un métal, une pointe très effilée ou l'extrémité d'un nanofil métallique. Il existe actuellement différentes techniques pour fabriquer une nanojonction métal/molécule/métal, comme la nanolithographie électronique ou la technique des jonctions brisées. De tels dispositifs ont permis la fixation d'une molécule unique, attachée par des fonctions thiols présentes aux extrémités (figure 5b). Cependant, la maîtrise de l'interaction électronique métal/molécule dans ces jonctions demande une précision meilleure que

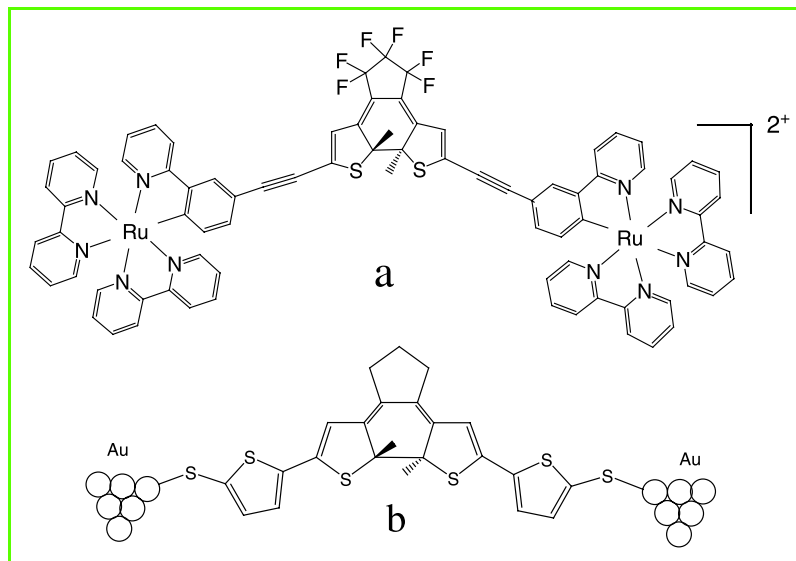


Figure 5 - Transfert et transport, illustrés sur le cas de molécules de type « commutateur moléculaire ».

a) molécule à deux sites redox étudiée en solution [10a]; b) molécule connectée à deux plots d'or [10b].

0,05 nm. Or, cette précision n'est pas atteinte par les techniques de nanolithographie, comme indiqué précédemment. Les études les plus fines dans ce domaine ont commencé dès l'invention du microscope à effet tunnel. Elles sont réalisées avec des molécules déposées sur une surface ultra propre en ambiance ultravide, et adressées par la pointe d'un microscope à effet tunnel jouant le rôle de deuxième électrode. Pour que la géométrie du système métal/molécule/métal soit bien définie et invariante dans le temps, la meilleure solution est de bloquer sur une marche atomique une molécule spécialement conçue à cet effet, comme dans l'exemple des « landers » [11] (figure 6).

Les lois régissant l'échange d'électrons au travers d'une molécule sont des lois de la physique quantique. De ce fait,

les lois relatives aux conducteurs ou semi-conducteurs moléculaires de dimensions macroscopiques ou mésoscopiques ne s'appliquent pas. Par exemple, on ne peut pas parler de la *conductivité* d'un fil moléculaire, mais de la *conductance* de la jonction métal/molécule/métal. Ainsi, même si l'on peut discerner des ressemblances structurales avec les motifs chimiques de certains polymères conducteurs, ce type d'étude nécessite le développement d'une chimie spécifique, sous-tendue par un important effort de conception, de modélisation et de synthèse (cf. figures 1-7). Parmi les défis à relever, on peut citer : (i) l'obtention du transfert (donc du transport) sur les plus grandes distances possibles (plusieurs nm), avec un taux d'atténuation minimal de l'effet tunnel, (ii) la réalisation de molécules rigides, de géométrie bien définie (il faut en particulier éviter l'aléa dû à des conformations variées) et (iii) l'incorporation de groupements protecteurs afin de protéger le fil moléculaire de toute interaction perturbatrice avec sa surface d'accueil. La condition (i) est indispensable pour dégager assez de place dans la molécule afin d'y introduire des fonctions plus complexes, telles que la commutation, l'un des effets majeurs recherchés en électronique moléculaire (cf. figure 5).

Il existe maintenant quelques exemples de molécules siège d'un phénomène de commutation (passage d'un état passant-ON à un état non passant-OFF), valide à l'échelle moléculaire. Ainsi, dans le cas des molécules étudiées en solution, il a été possible d'intercaler une unité photochrome entre les deux sites redox et de démontrer le passage d'un état OFF à un état ON par une photo-isomérisation qui modifie le caractère conjugué de la molécule [10] (figure 5a).

Dans le cas d'un dispositif surface-molécule-pointe de STM, on peut par exemple jouer sur la conformation métastable d'un groupement d'une molécule. Influencé à la fois par la structure chimique de la molécule et par son interaction avec la surface, ce groupement peut basculer vers la surface ou retrouver sa conformation initiale sous l'effet de la pointe

du STM. Un effet d'interrupteur à bascule est alors obtenu (figure 7). Le chimiste peut ici contribuer à explorer les limites de la thermodynamique à petite échelle, en synthétisant des interrupteurs moléculaires dont l'énergie de commutation soit la plus petite possible, l'objectif étant d'atteindre la limite fondamentale $kT \log 2$ [12].

Bien entendu, les exemples cités plus haut sont des démonstrateurs de laboratoire. Mais avec une molécule aussi simple que C_{60} , coincée entre une surface et la pointe d'un STM, il est déjà possible de mettre en évidence un effet d'amplification. En effet, la structure électronique est telle qu'une légère compression de la molécule (obtenue en modifiant la tension aux bornes du piézoélectrique de commande) entraîne une augmentation considérable de la conductance de la jonction. Un montage électronique adéquat permet ainsi de réaliser un amplificateur dont la partie active est constituée d'une seule molécule de C_{60} [13].

Passons maintenant aux molécules analogues à des dispositifs mécaniques. Le but est ici de reproduire à l'échelle nanométrique des mouvements habituels, tels

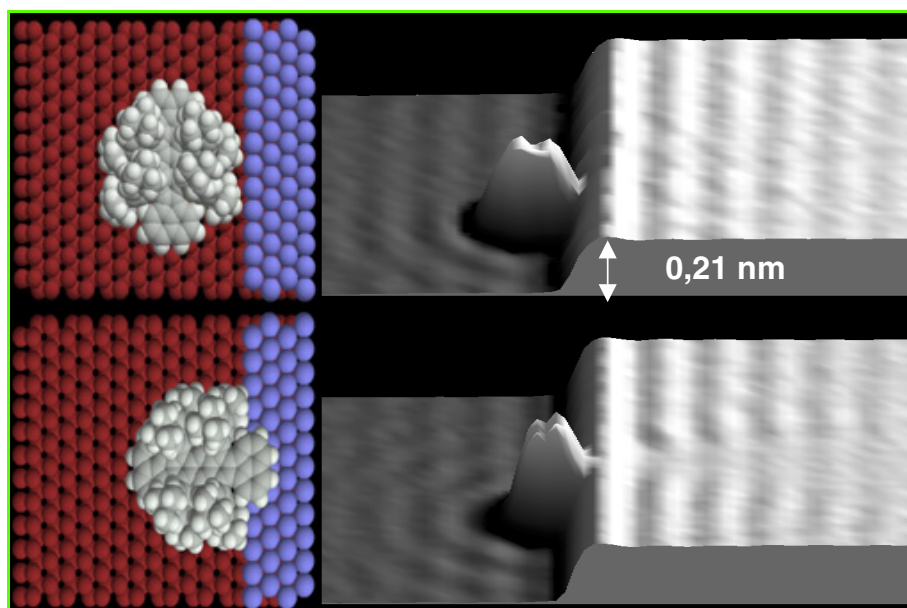


Figure 6 - Structure à l'échelle atomique de la jonction surface/lander [11].

L'extrémité du « lander » est amenée au contact électronique avec la terrasse supérieure de la marche monoatomique (atomes bleus). Le régime des ondes électroniques de surface en est alors modifié, par rapport à la position du « lander » indiquée sur l'image du haut avec les pieds parallèles à la marche. La molécule est manipulée par la pointe du STM, pour passer de la conformation du haut à la conformation du bas.

que la translation, la reptation, le pivotement, la rotation... On peut ainsi citer le rotor moléculaire [14] (figure 8), la charrette à bras moléculaire (figure 1) et les « landers » (figure 6).

Une difficulté est la flexibilité structurale de la plupart de ces molécules. Ainsi, une molécule très élaborée de type « lander » peut se déformer considérablement une fois adsorbée. Elle épouse la forme du bord d'une marche atomique, une aptitude qui rappelle les « montres molles » de Salvador Dali !

Détecter le mouvement des pièces mobiles de ces véritables molécules-machines reste très difficile, car les techniques de type STM n'ont pas encore une résolution temporelle suffisante. Tout au plus, dans le cas du rotor, on peut faire la distinction entre « rotor immobile » (le détail de sa structure interne étant visible) et « rotor en rotation » (il apparaît alors comme une image floue, moyennée par le mouvement). Un aboutissement important serait la réalisation d'un moteur moléculaire rotatif, tournant en continu dans un sens déterminé, et dont les dimensions hors tout seraient de l'ordre du nanomètre. L'effort de synthèse sera certainement important. Le véritable défi est par ailleurs l'alimentation en énergie, et surtout la détection d'un tel mouvement.

Il existe enfin un problème fondamental : le mouvement doit-il être traité comme celui d'un objet classique ou d'un objet quantique ? Lorsque la molécule est **très** grosse (cas de l'ATP synthase), le mouvement est celui d'un objet classique avec une direction d'ensemble, perturbée cependant par le mouvement brownien. Mais avec les molécules beaucoup plus petites considérées ici, les phénomènes quantiques déterminant la structure chimique de la molécule et l'interaction molécule/surface s'invitent dans la définition du mouvement. Heureusement, adsorbée sur une surface, une molécule devient un objet semi-classique dans ses comportements mécaniques.

Conclusion : molécules-machines complexes et machines autonomes

Au fur et à mesure que la complexité des molécules-machines augmentera, il deviendra de moins en moins nécessaire et possible de remonter au macroscopique pour suivre chaque étape de leur fonctionnement. Problème technologique redoutable, il faudra cependant maîtriser l'interface homme/molécule, au moins pour suivre le résultat final. Cette étape ne pourra être franchie qu'avec le développement d'une technologie à l'échelle atomique ouvrant la voie à un échange d'information multicanal avec la molécule-machine, avec une précision meilleure que 0,05 nm, tout en préservant pour

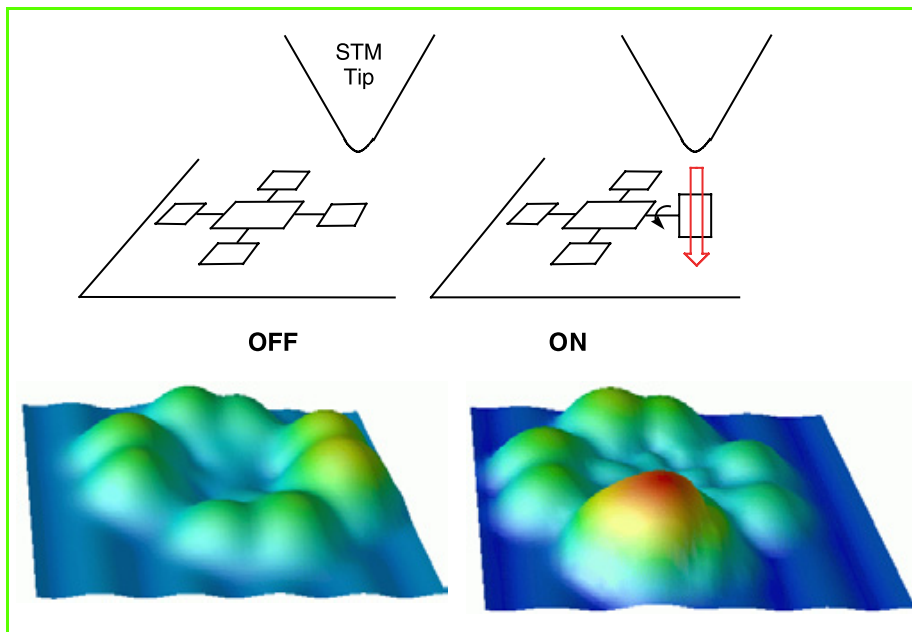


Figure 7 - Porphyrine à pieds et commutation moléculaire.

En haut : schéma montrant les deux positions possibles de l'un des « pieds » correspondant à un état OFF (non passant) et à un état ON (passant). En bas : images STM calculées correspondant à cet effet de commutation [12].

certaines machines la richesse des comportements quantiques intramoléculaires.

Cette exploration a déjà commencé pour les machines à calculer. Actuellement, on cherche par exemple la meilleure architecture possible pour intégrer une unité de calcul à l'intérieur d'une seule molécule. Diverses solutions sont à l'étude. Il s'agit par exemple de faire ressembler la molécule à un circuit électronique, ou de jouer sur les interférences quantiques intramoléculaires apparaissant lors du processus de transfert d'électrons, pour obtenir une fonction logique binaire.

Il est même des molécules-machines qui n'ont pas besoin d'être en relation permanente avec un utilisateur macroscopique. Un premier exemple a récemment été obtenu par la synthèse d'un automate en charge de la médication moléculaire : il peut détecter la présence de plusieurs types de molécules-marqueurs, effectuer le diagnostic et enfin délivrer le médicament approprié [5]. En un mot, il remplace ainsi le médecin, le laboratoire d'analyse médicale, le pharmacien et l'infirmière !

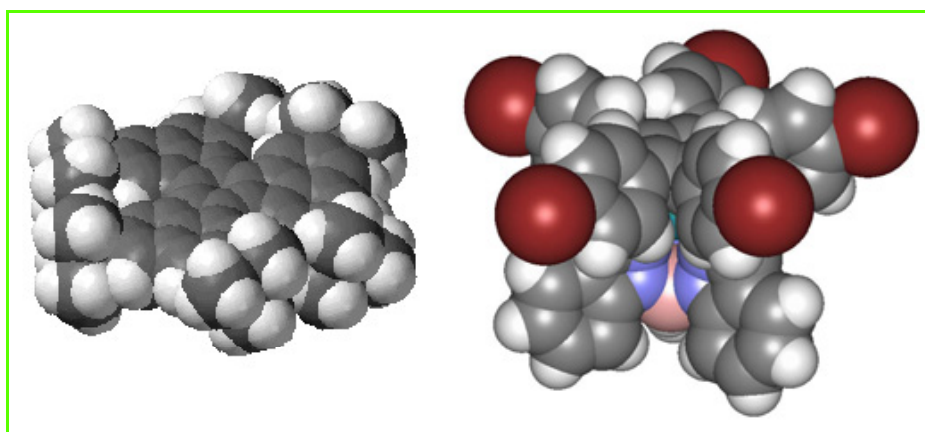


Figure 8 - Rotors moléculaires.

A gauche : basé sur un décacyclène substitué, le rotor est emboîté avec ses voisins sur une surface [14a]. A droite : basé sur un complexe en « tabouret de piano », le rotor est lié de façon covalente au trépied (stator) [14b].

Références

- Voir la série des rapports « Arago » de l'Observatoire Français des Techniques Avancées (OFTA), 1 rue Descartes, 75005 Paris (<http://perso.wanadoo.fr/ofta>) : *Électronique moléculaire*, **1988** ; *Nanotechnologies et micromachines*, **1992**, *Nanocomposants et nanomachines*, **2001**.
- Sites web : <http://www.cemes.fr>, rubrique « enseignants », <http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/docs/plaq.nanomonde.pdf>
- [1] Voir par exemple <http://www.baclesse.fr/cours/fondamentale/4-division-cellulaire/divis-2.htm>
- [2] Eigler D., Schweizer E.K., *Nature*, **1990**, *344*, p. 524.
- [3] Gimzewski J.K., Joachim C., *Science*, **1999**, *283*, p. 1683.
- [4] Voir le débat entre R. Smalley et E. Drexler dans *Chem. Eng. News*, **2003**, *81*, p. 37.
- [5] Benenson Y., Gil B., Ben-Dor U., Adar R., Shapiro E., *Nature*, **2004**, *429*, p. 423.
- [6] Jimenez-Bueno G., Rapenne G., *Tetrahedron Letters*, **2003**, *44*, p. 6261.
- [7] a) Aviram A., *J. Am. Chem. Soc.*, **1988**, *110*, p. 5687 ; b) Wu R., Schumm J.S., Pearson D.L., Tour J.M., *J. Org. Chem.*, **1996**, *61*, p. 6906.
- [8] Joachim C., Gimzewski J.K., Aviram A., *Nature*, **2000**, *408*, p. 541.
- [9] Rosei F., Schunack M., Jiang P., Gourdon A., Laegsgaard E., Stensgaard I., Joachim C., Besenbacher F., *Science*, **2002**, *296*, p. 328.
- [10] a) Frayssé S., Coudret C., Launay J.-P., *Eur. J. Inorg. Chem.*, **2000**, p. 1581 ; b) Dulic D., Van der Molen S.J., Kudernac T., Jonkman H.T., De Jong J.D., Bowden T.N., Van Esch J., Feringa B.L., Van Wees B.J., *Phys. Rev. Lett.*, **2003**, *91*, Art. 207402.
- [11] Moresco F., Gross L., Alemani M., Rieder K.H., Tang H., Gourdon A., Joachim C., *Phys. Rev. Lett.*, **2003**, *91*, Art. 36601.
- [12] a) Moresco F., Meyer G., Rieder K.H., Tang H., Gourdon A., Joachim C., *Phys. Rev. Lett.*, **2001**, *86*, p. 672 ; b) Loppacher C., Guggisberg M.,

- Pfeiffer O., Meyer E., Bammerlin M., Luthi R., Schlittler R., Gimzewski J.K., Tang H., Joachim C., *Phys. Rev. Lett.*, **2003**, *90*, Art. 66107.
- [13] Joachim C., Gimzewski J.K., *Chem. Phys. Lett.*, **1997**, *265*, p. 353.
- [14] a) Gimzewski J.K., Joachim C., Schlittler R.R., Langlais V., Tang H., Johannsen I., *Science*, **1998**, *281*, p. 531 ; b) Carella A., Jaud J., Rapenne G., Launay J.-P., *Chem. Comm.*, **2003**, p. 2434.

**Christian Joachim**

est directeur de recherche* et anime le Groupe Nanosciences (GNS)

**J.-P. Launay****Jean-Pierre Launay**

est professeur à l'université Paul Sabatier et à l'Institut Universitaire de France*.

C. Joachim

est professeur à l'université Paul Sabatier et à l'Institut Universitaire de France*.

* CEMES, CNRS, 29 rue Jeanne Marvig, 31055 Toulouse Cedex 4.
Tél. : 05 62 25 78 35/32. Fax : 05 62 25 79 99.
Courriels : joachim@cemes.fr, launay@cemes.fr
<http://www.cemes.fr/GNS>



PUBLICATION
RÉGIE PUBLICITAIRE
EDITION
FINANCEMENT

Depuis 1988

Les Editions D'Ile de France

Expérience, la différence

www.edif.fr

Notre société est spécialisée dans l'édition d'annuaires et de revues professionnelles pour sociétés savantes, associations d'anciens élèves d'écoles d'ingénieurs, fédérations professionnelles,...

Notre présence depuis plus de 17 ans dans un secteur d'activités en mutation permanente, la transparence de nos résultats régulièrement positifs depuis la création de notre société, la fidélité de nos partenaires éditoriaux sont autant de preuves du professionnalisme de notre équipe et constituent de fait notre meilleure « carte de visite ».

Notre atout majeur, et c'est aussi notre spécialité, est de vous garantir la gratuité de vos ouvrages papiers en contrepartie de l'exclusivité de la régie publicitaire entièrement assurée par notre service commercial.

Editions D'Ile de France

102, avenue Georges Clémenceau • 94700 Maisons-Alfort

Tél. : 33 1 43 53 64 00 • Fax : 33 1 43 53 48 00

e-mail : edition@edif.fr

Régisseur exclusif
de la Revue **l'ACTUALITE CHIMIQUE**