

## Étudier et manipuler les nanostructures à l'échelle atomique et moléculaire

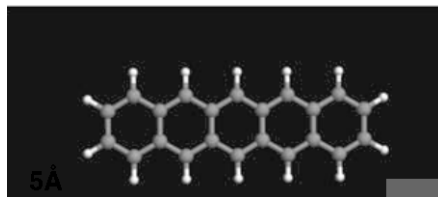
Anne-Sophie DUWEZ

University of Liège, Department of Chemistry, B6a Sart-Tilman, 4000 Liège, Belgium

<http://www.nanochem.ulg.ac.be>

Email: [asduwez@ulg.ac.be](mailto:asduwez@ulg.ac.be)

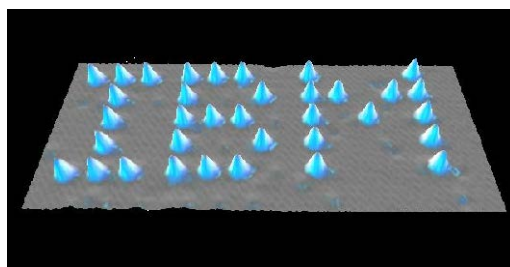
Les scientifiques ont longtemps rêvé de pouvoir travailler avec un seul atome ou une seule molécule. En 1952, Erwin Schrödinger écrivait qu'on ne pourrait jamais faire une expérience avec juste un électron unique, ni un atome ou une molécule uniques.<sup>1</sup> Avec l'invention du microscope à effet tunnel (STM) au début des années 80, et du microscope à force atomique (AFM) quelques années plus tard, ce rêve est devenu une réalité. Le STM était non seulement capable de "voir" les atomes et les molécules (Figure 1), mais également de les manipuler de manière individuelle quelques années plus tard. Les scientifiques peuvent maintenant jouer avec un seul atome, une seule molécule et même une seule liaison.



**Figure 1:** Image AFM d'une molécule de pentacène. Les cinq cycles carbonés sont résolus clairement et les liaisons carbone-hydrogène sont également visibles. Reproduite de L. Gross, F. Mohn, N. Moll, P. Liljeroth, G. Meyer. *The chemical structure of a molecule resolved by atomic force microscopy. Science* **2009**, 325, 1110.

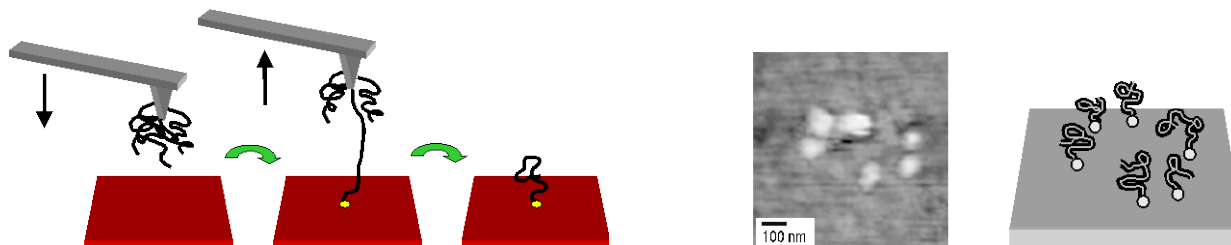
En 1990, Don Eigler et Erhard Schweizer de chez IBM Research positionnaient 35 atomes de xénon à l'aide de la pointe d'un STM sur une surface de nickel avec une précision atomique pour reproduire le logo d'IBM (Figure 2).<sup>2</sup> Bien que cet exploit ait été réalisé à l'époque à une température de 4K sous ultra-haut vide, de nombreux exemples de manipulation d'atomes et molécules individuels à température ambiante et en dehors du vide ont été rapportés depuis. Le

STM a inspiré une large gamme de techniques à sonde locale. À l'origine, le microscope à force atomique (AFM) était utilisé pour imager la topographie des surfaces, mais il peut également être utilisé pour modifier les surfaces et manipuler des atomes et molécules individuels.<sup>3</sup> En déposant, enlevant, ou modifiant le matériau de la pointe et ou de l'échantillon, il est possible d'écrire et lire de l'information sur et à partir de la surface. La spectroscopie de force sur molécule unique, qui consiste à piéger et étirer une seule molécule entre une pointe AFM et une surface, a permis de manipuler des chaînes polymères synthétiques et des biomolécules, comme les protéines ou l'ADN, dans l'eau, en milieu physiologique, ou dans des solvants organiques. Etant capable d'induire des interactions moléculaires par le biais de forces mécaniques, et de les suivre en temps réel et avec une résolution sub-nanométrique, la spectroscopie de force sur molécule unique a fourni des renseignements sans précédent sur la structure et le fonctionnement de nombreux systèmes moléculaires naturels ou synthétiques.<sup>4-6</sup>



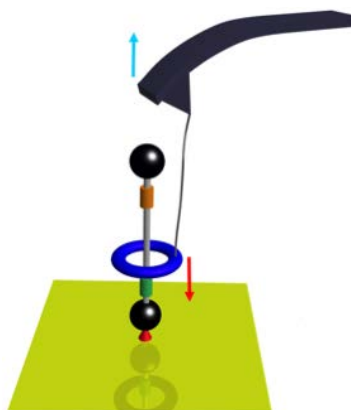
**Figure 2:** Positionnement de 35 atomes de Xenon, un par un, sur une surface de nickel pour reproduire le logo d'IBM. Reproduit de la ref. 2: *Nature* **1990**, 344, 524–526

À l'aide des techniques à sonde locale, il est en principe possible de construire n'importe quel type de structure moléculaire, mais la fabrication de machines nanométriques - capables de bouger, réaliser des calculs ou des tâches physiques - à partir d'atomes ou de molécules individuels est encore loin. Cette nouvelle idée d'inverser la façon dont les dispositifs sont faits est née dans les années 90 : plutôt que de partir d'une quantité énorme de matériaux et de les tailler à la plus petite dimension possible, pourquoi ne pas partir de quelques atomes ou molécules et les combiner pour en faire un dispositif avec le juste nombre d'espèces nécessaires?<sup>7</sup> La manipulation, la livraison ciblée de molécules et la possibilité d'ajouter une réaction chimique au contrôle positionnel est, bien évidemment, juste la première étape vers la fabrication moléculaire (Figure 3).<sup>8</sup> Pour reculer les frontières de ce domaine de recherche, les scientifiques ont besoin de continuer l'exploration fondamentale des entités uniques.



**Figure 3:** Livraison de molécules sur une surface, une par une, à l'aide d'une pointe AFM. A gauche: principe. A droite: image obtenue après le dépôt de 6 molécules. Reproduit de la ref. 8: *Nature Nanotech.* **2006**, 1, 122-125

La force, la dynamique et la fonction peuvent maintenant être sondées au niveau de la molécule unique, mais cette exploration d'entités uniques en est encore à ses balbutiements. Les physiciens sont impatients de savoir si les phénomènes observés à cette échelle obéissent aux lois que nous connaissons pour des ensembles d'entités, ou s'ils vont nous forcer à repenser notre compréhension de la physique. Les chimistes peuvent maintenant jouer avec des liaisons uniques, orienter les molécules et induire une réaction chimique entre des entités uniques. Les biologistes et les biophysiciens sont maintenant capables d'étudier à l'échelle de la molécule les processus impliqués dans les organismes vivants, comme la contraction des muscles, la division cellulaire, la réplication de l'ADN, les transports cellulaires... La plupart des informations exquises et détaillées sur la façon dont les machines biologiques opèrent ont été obtenues par des mesures directes effectuées sur des molécules individuelles<sup>9</sup> (Figure 4).



**Figure 4:** Mesure de la force générée par une seule molécule, prototype d'une machine moléculaire. Expérience de traction de l'anneau d'un rotaxane à l'aide d'un microlevier d'un AFM. La molécule est constituée d'un anneau enfilé autour d'un axe. Une "laisse" en polymère relie l'anneau au microlevier AFM. Ce dernier tire sur la laisse vers le haut (flèche bleue), mais l'anneau se déplace dans le sens inverse à celui de la force de traction (flèche rouge), générant une force contre la charge mécanique, effectuant ainsi un travail. Reproduit de la ref 9: *Nature Nanotech* **2011**, 6, 553-557.

Nous allons ici montrer pourquoi l'invention du microscope à effet tunnel il y a 30 ans, suivie de l'arrivée du microscope à force atomique 5 ans plus tard, ont été des événements cruciaux dans l'histoire des nanosciences et des nanotechnologies, et comment les techniques et outils récents dérivés de ces découvertes ont toujours aujourd'hui un impact énorme sur beaucoup de domaines de recherche.

1. E. Schrödinger. Are there quantum jumps ? *Br. J. Philos.* **1952**, p. 233.
2. D. M. Eigler and E. K. Schweizer. Positioning single atoms with a scanning tunneling microscope. *Nature* **1990**, 344, 524–526
3. Molecular Manipulation with Atomic Force Microscopy, Edited by N. Willet and A.-S Duwez Taylor & Francis group – CRC Press, Boca Raton, USA, 2011, 287 pages
4. C. Bustamante, Y. R. Chemla, N. R Forde, D. Izhaky. Mechanical processes in biochemistry. *Annu. Rev. Biochem.* **2004**, 73, 705-748.
5. Special issue. *Annu. Rev. Biochem.* **2008**, 77, 45-228
6. E. M. Puchner, H. E. Gaub. Force and function: probing proteins with AFM-based force spectroscopy. *Curr. Opin. Struct. Biol.* **2009**, 19, 605–614.
7. C. Joachim, L. Plevert, Nanosciences: The Invisible Revolution, World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2009, 200 pages
8. (a) A.-S. Duwez, S. Cuenot, C. Jérôme, S. Gabriel, R. Jérôme, S. Rapino, F. Zerbetto. Mechanochemistry: targeted delivery of single molecules. *Nature Nanotechnology* **2006**, 1, 122-125. (b) A.-S. Duwez. Molecular cranes swing into action. *Nature Nanotechnology* **2008**, 3, 188-189.
9. P. Lussis, T. Svaldo-Lanero, A. Bertocco, C.-A. Fustin, D. A. Leigh, A.-S. Duwez, A single synthetic small molecule that generates force against a load. *Nature Nanotechnology* **2011**, 6, 553-557.