CHRONOSCIENCES

Philip Moriarty

Les nanotechnologies

edp sciences

Philip Moriarty

Les nanotechnologies

Que sont les nanotechnologies et comment impacteront-elles nos vies ? Nanorobots, nanosondes, nanogènes… la liste est longue.

C'est bien souvent au travers de la science-fiction que le grand public en a d'abord entendu parler, suscitant nombre de questionnements : des nuées de nanomachines finiront-elles par envahir le monde ou bien ne nous apporteront-elles finalement rien de plus que des crèmes solaires améliorées ? Comme le montre cet ouvrage, la réalité scientifique des nanotechnologies est tout aussi fascinante que la meilleure science-fiction qui en est inspirée !

Dans ce livre, Philip Moriarty nous présente les principaux thèmes et concepts scientifiques qui caractérisent ce domaine, notamment les forces interatomiques et intermoléculaires, l'imagerie à l'échelle de l'atome unique, le confinement quantique, l'auto-assemblage, la machinerie moléculaire et le nanomagnétisme. L'auteur présente également les résultats d'études scientifiques révolutionnaires, telles que des images au microscope à balayage de « paysages » atomiques et moléculaires, qui donnent un aperçu à la fois concret et intuitif de ce qu'est le monde nanoscopique.

Philip Moriarty travaille dans les domaines de l'enseignement, de la recherche, de l'engagement public et de la rédaction d'ouvrages de vulgarisation scientifique. Il est professeur de physique à l'université de Nottingham depuis 2005. Ses travaux portent sur de nombreux thèmes d'actualité dans le domaine des nanosciences, et plus particulièrement sur l'imagerie, la spectroscopie et la manipulation d'atomes et de molécules uniques.

ISBN : 978-2-7598-3467-9

9 782759 834679 >

edp sciences
www.edpsciences.org

Les nanotechnologies

CHRONOSCIENCES

Les nanotechnologies

Philip Moriarty

Traduit de l'anglais par Alan Rodney

edp sciences

ChronoSciences

Collection destinée à un large public qui invite le lecteur à découvrir de façon très complète, mais abordable, un sujet ou une thématique précise.

« Dans la même collection »

L'Intelligence artificielle, Margaret A. Boden, 2021
La Théorie quantique, John Polkinghorne, 2021
Les Marées, David George Bowers et Emyr Martyn Roberts, 2021
L'Anthropocène, Erle C. Ellis, 2021
L'Odorat, Matthew Cobb, 2021
Le Changement climatique, 2022
Les Énergies renouvelables, 2022
L'Écologie, Jaboury Ghazoul, 2022
Le Temps, Jenann Ismael, 2022
La Physique, Sidney Perkowitz, 2022
La Théorie des nombres, Robin Wilson, 2023
Les Ondes, Mike Goldsmith, 2023
Les Insectes, Simon Leather, 2023
Les Virus, Dorothy H. Crawford, 2023
L'Arctique, Klaus Dodds et Jamie Woodward, 2023
Les Récifs coralliens, Charles Sheppard, 2023

Nanotechnology: a very short introduction was originally published in English in 2022. This translation is published by arrangement with Oxford University Press.

© Philip Moriarty, 2022.
© Pour la traduction française, EDP sciences, 2024.

Composition et mise en page : Desk (www.desk53.com.fr)
Imprimé en France

Papier : 978-2-7598-3467-9 – Numérique : 978-2-7598-3468-6

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés, réservés pour tous pays. La loi du 11 mars 1957 n'autorisant, aux termes des alinéas 2 et 3 de l'article 41, d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective », et d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation intégrale, ou partielle, faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (alinéa 1er de l'article 40). Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Table des matières

Préface 7

1. Bienvenue à NanoPut 12

2. Le quantum, confiné 32

3. Abattre pour reconstruire 67

4. Chaque « it » à partir d'un bit 99

5. Les nanomachines 123

6. Les nanobots sont-ils bientôt à nos portes ? 141

Lectures supplémentaires 153

Sources et crédits des illustrations 158

Index 160

Préface

« nano, /ˈnanəʊ/. Du verbe grec signifiant "comment attirer des financements pour la recherche" ».

Je me considère ouvertement comme un nanoscientifique autoproclamé, mais j'avoue avoir un faible pour la définition ironique de *nano* proposée par George Smith, professeur émérite de matériaux à l'université d'Oxford, qui figure ci-dessus en exergue. Le cynisme de Smith met en lumière une question essentielle qui se pose à toute introduction à la science et à la technologie concernant l'infiniment petit : les plus sceptiques soutiendraient que les nanotechnologies ne sont rien d'autre que de la chimie avancée, de la physique de la matière condensée et/ou de la science des matériaux en action, et que le préfixe « nano », désormais omniprésent, est davantage un outil de marketing astucieux qu'un descripteur scientifique. Comme le dit Kevin Kelleher avec perspicacité dans son article *Here's why nobody's talking about nano-tech anymore* [Voici pourquoi plus personne ne parle de nanotechnologies], publié dans le magazine *Time* en octobre 2015 :

> « De toutes les modes et manies d'investissement de ces dernières décennies, aucune n'a eu autant de conséquences que l'engouement pour les actions en bourse des nanotechnologies. Il y a dix ans, les investisseurs en capital-risque se

bousculaient pour dénicher des investissements, les start-ups portant le mot "nano" dans leur nom prospéraient et quelques fonds nanotechnologiques avaient même été lancés dans l'espoir de suivre un secteur en plein essor.

Et aujourd'hui ? Plus personne sur le marché boursier ne s'enthousiasme pour l'expression "nanotechnologies". »

Les spécialistes des nanosciences eux-mêmes sont blasés par la mode du « nanohype[1] ». Peu après que l'on m'a demandé d'écrire ce livre, un article scientifique sur le graphène, matériau miracle s'il en est (voir chapitre 3), a été publié dans la prestigieuse revue *ACS Nano* de l'American Chemical Society, sous le titre brillamment mordant de *Will any crap we put into graphene increase its electrocatalytic effect?* [N'importe quelle saleté introduite dans le graphène augmente-t-elle son effet électrocatalytique ?] (L. Wang, Z. Sofer, et M. Pumera, *ACS Nano* 14, 21 (2020)).

Depuis sa création à la fin des années 1970, début des années 1980, le monde des nanosciences s'est montré trop enclin à faire des promesses exagérées quant à l'applicabilité dans le monde réel de découvertes à la fois fondamentales et tout à fait banales dans ce domaine. Parallèlement, le préfixe « nano » a été accolé à une variété impressionnante de noms et de verbes, souvent dans le but de donner à un article ou à une proposition de subvention un éclat et *un vernis* qui conviennent à la mode : nanoparticules, nanotubes, nano-agrégats, nanobulles, nanopuces, nanocubes, nanoguitares[2], nanohacking, nanosculptures, nanomédecine, nanoélectronique, nanobiotech, nanocouches et même une famille de nanovégétaux (nanochoux, nanobrocoli,

1. Néologisme basé sur les mérites superlatifs et exagérés.

2. La nanoguitare est une guitare microscopique ciselée, développée par Dustin W. Carr en 1997, dans le laboratoire de nanofabrication de l'université de Cornell (Ithica, NY – USA).

nanochoux-fleurs et nanocarottes – ça existe, je ne plaisante pas) ont tous été inventés et utilisés dans des comptes-rendus scientifiques et/ou *science-fiction populaire* sur les progrès des nanotechnologies. Et cette liste n'est certainement pas exhaustive. (On pourrait même dire qu'il ne s'agit que d'un échantillon nanoscopique.)

Dans *Nanohype* (Ed. Prometheus Books, 2006), David Berube cite le sénateur américain Ron Wyden s'exprimant lors des auditions pour le *21st Century Nanotechology Research and Development Act* (qui a été promulgué par le président George W. Bush en décembre 2003) :

> « Aujourd'hui, dans le monde de la science, la plaisanterie consiste à dire que tout le monde fait des travaux en nanotechnologie. Tout comme dans les années 1990, tout le monde mettait point.com après les titres, tout le monde met nano devant sa science. »

Ainsi, même il y a deux décennies, nous avions apparemment entendu plus qu'il ne fallait le mot à la mode, « nano ». On peut donc raisonnablement se demander si les nanotechnologies ne sont rien d'autre que de la poudre aux yeux et des miroirs microscopiques. S'agit-il seulement d'un battage médiatique, d'une hyperbole et d'un orgueil démesuré ? Ou y a-t-il quelque chose de plus substantiel dans l'invisible ? Les milliards de livres, de dollars et d'euros (insérez la devise de votre choix) investis par les gouvernements du monde entier, les instituts de recherche en nanotechnologie qui ont été créés pratiquement du jour au lendemain et la croissance exponentielle des revues scientifiques dont le titre comporte le mot « nano » pourraient-ils tous être un canular ?

Ce livre de la collection *ChronoSciences* présente les arguments en faveur de la nanotechnologie face à tout ce cynisme. Quelles que soient les critiques que l'on peut à juste titre formuler sur l'utilisation abusive de ce préfixe, la science

et la technologie à l'échelle nanométrique – et nous verrons en détail ce que cela signifie en pratique – n'en sont pas moins des domaines de recherche et de R&D exceptionnellement passionnants, novateurs et, dans le meilleur des cas, révolutionnaires. Une grande partie du monde qui nous entoure, y compris la quasi-totalité de la technologie informatique du XXIe siècle, fait appel à la science et à l'ingénierie à l'échelle du nanomètre.

Du fondamental aux pratiques, de la mécanique quantique la plus ésotérique au rebond des balles de tennis, les nanotechnologies sous-tendent aujourd'hui la façon dont nous sondons et contrôlons la matière d'une manière qui aurait été inconcevable il y a seulement une génération. Ce texte est ma tentative de saisir l'essence de l'échelle nanométrique, d'expliquer pourquoi les nanosciences sont différentes des disciplines scientifiques traditionnelles, mais aussi un amalgame de celles-ci, et de mettre en lumière certains des domaines de recherche les plus fascinants dans ce domaine. Ceux-ci vont de la manipulation informatique de la matière à la limite de la simple liaison chimique au développement de nanomachines qui doivent leur fonctionnement à l'exploitation par les nanoscientifiques des principes de conception de la nature.

Dans un domaine qui évolue aussi rapidement que les nanotechnologies, je ne peux donner qu'un aperçu de l'état de l'art au moment où j'écris ces lignes. Je me suis efforcé de rendre les exemples aussi actuels que possible.

En tant que lecteur assidu de la série anglaise *Very Short Introduction*, j'ai été ravi de recevoir une invitation de Latha Menon, Senior Commissioning Editor chez Oxford University Press (OUP), à rédiger un texte sur les nanotechnologies. C'était il y a quatre ans. Je remercie sincèrement Latha et sa collègue Jade Dixon, rédactrice en chef du projet chez

OUP, pour leur immense patience face à mes dépassements de délais pendant toute cette période. Les révisions et les commentaires de Latha ont été indispensables tout au long de cette période, à la fois pour trouver le bon ton pour le livre et pour éliminer mes volubiles divagations, manifestement hors sujet. Cet ouvrage se devait d'aller à l'essentiel aussi rapidement que possible – ce qui n'est pas mon fort – et les révisions et suggestions de Latha et de Jade ont été inestimables pour réduire le volume de mes écrits. Je suis également très reconnaissant aux évaluateurs anonymes du projet de livre comme de la version finale du manuscrit pour leurs commentaires et conseils très utiles.

Philip Moriarty

Nottingham, mars 2022

1

Bienvenue à NanoPut

Les nanoputiens constituent une famille de molécules anthropomorphes conçues et créées par Stephanie H. Chanteau et James M. Tour du *Centre for Nanoscale Science and Technology* de l'université de Rice (Houston, Texas). Elles offrent une démonstration remarquable du contrôle admirable des éléments atomiques et moléculaires de notre Univers devenu aujourd'hui possible. L'un des membres de cette famille, le « NanoKid », est représenté sur la figure 1. Mesurant seulement deux nanomètres, il est presque exactement 100 000 000 fois plus petit que les Lilliputiens de six pouces de haut dans l'intemporel *Les Voyages de Gulliver* de Jonathan Swift. Ou, pour replacer cela dans un contexte plus immédiat, le point qui ponctue la fin de cette phrase fait environ 150 000 NanoKids de large. Non seulement microscopique, mais nanoscopique, chacun des atomes du NanoKid a été mis en place par le biais de réactions synthétiques choisies sur la base de ce que l'on peut décrire comme un plan moléculaire ; des milliards et des milliards de nanoputiens identiques émergent de la soupe chimique.

Tout aussi impressionnant, les moitiés supérieure et inférieure du squelette moléculaire du NanoKid ont été synthétisées séparément, puis « cousues » ensemble à la taille ; c'est un monstre de Frankenstein à l'échelle nanométrique.

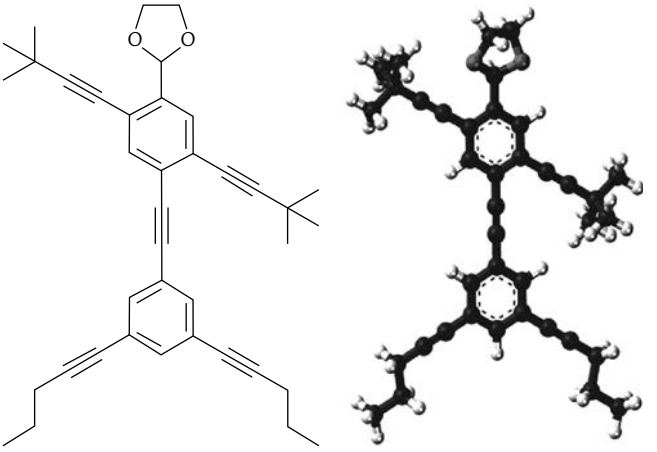


Fig. 1 « NanoKid », l'une des familles de molécules nanoputiennes synthétisées par Stephanie H. Chanteau et James M. Tour du Center for Nanoscale Science and Technology de l'université de Rice (Houston, Texas). Un modèle de liaison chimique est représenté à gauche et la structure moléculaire correspondante à droite, dans laquelle les atomes de carbone, d'hydrogène et d'oxygène sont représentés par des sphères noires, blanches et grises, respectivement.

Il s'agit là d'une fabuleuse prouesse de synthèse chimique, qui exploite une approche que certains ont baptisée « chirurgie moléculaire ». Pourtant, de nombreux détracteurs des nanotechnologies affirment que, aussi impressionnants que soient le NanoKid et ses frères et sœurs, il n'y a pas grand-chose de vraiment nouveau ici. Les nanotechnologies ne sont-elles pas en réalité de la chimie déguisée ? Ne s'agit-il pas simplement des nouveaux habits de l'empereur en modèle réduit ? Le battage médiatique ne l'emporte-t-il pas sur la science ?

Mon objectif dans ce livre est de couper court à l'hyperbole, de me concentrer sur les principes scientifiques fondamentaux au cœur des nanosciences et de montrer, malgré

les critiques (parfois valables) des opposants, que les nanotechnologies sont nouvelles, passionnantes et différentes. Non seulement nous pouvons imager et positionner avec précision des atomes individuels, mais l'état de l'art en matière de nanotechnologie implique également le ciblage par ordinateur de liaisons chimiques uniques au sein d'une molécule individuelle. Il s'agit d'un niveau de contrôle qui, il y a seulement quelques décennies, semblait être un objectif impossible à atteindre. En outre, ces avancées scientifiques sont de plus en plus souvent transposées en avancées technologiques (et *vice versa*) dans une liste toujours plus longue de produits allant des crèmes solaires aux ordinateurs portables, des purificateurs d'eau aux balles de golf, et de cellules photovoltaïques aux tissus intelligents qui ne se tachent jamais. Comme nous allons le voir, les développements en matière de nanotechnologies méritent parfois le battage médiatique qu'ils suscitent.

Avant d'entamer notre visite guidée du nanomonde, nous devons toutefois définir ce que nous entendons par les termes « nanotechnologies » et « nanosciences ». Cela semble être un point de départ tout à fait approprié, mais il s'avère particulièrement difficile d'établir une définition universellement acceptée des nanotechnologies. Le préfixe « nano » fait référence à un nanomètre (nm), soit 10^{-9} m. Cela correspond à la moitié d'un NanoKid ou, pour utiliser une mesure comparative plus générale, si le diamètre d'une bille était d'un nanomètre, la Terre aurait un diamètre d'environ un mètre. Une feuille de papier a une épaisseur d'environ 100 000 nanomètres, ce qui constitue une autre comparaison commode. Les nanosciences, quant à elles, impliquent l'étude de structures et de dispositifs dont le diamètre peut être considérablement supérieur à 1 nm. Comment choisir alors les limites supérieures (et même inférieures) de taille pour distinguer les nanosciences et les nanotechnologies des