

Jean-Michel Sallese

LES NANOTECHNOLOGIES

*Deuxième édition mise à jour
3^e mille*

*Que
sais-je?*

À lire également en **Que sais-je ?**

COLLECTION FONDÉE PAR PAUL ANGOULVENT

Didier Sicard, *L'Éthique médicale et la Bioéthique*, n° 2422.

Yves Gingras, *Histoire des sciences*, n° 3495.

Pierre Delort, *Le Big Data*, n° 4027.

Primavera De Filippi, *Blockchain et cryptomonnaies*, n° 4141.

Dragi Karevski, *La Physique quantique*, n° 4254.

Aurélien Jean, *Les Algorithmes*, n° 4264.

*À Baya, Yoanna, Marion
À Loris, Nicola et Ada*

Ce livre ne peut être reproduit ni utilisé à des fins
d'entraînement de systèmes d'intelligence artificielle.

La fouille de textes et de données est interdite
conformément à l'article 4(3) de la Directive (UE) 2019/790.

ISBN 978-2-7154-3989-4

ISSN 0768-0066

Dépôt légal – 1^{re} édition : 2022
2^e édition mise à jour : 2026, avril

© Que sais-je ?/Presses Universitaires de France, 2026
170 bis, boulevard du Montparnasse, 75014 Paris

Introduction

Au cours du séminaire annuel organisé à Caltech (California Institute of Technology, États-Unis) le 29 décembre 1959, l'éminent et charismatique physicien Richard Feynman surprenait son public en posant une question déconcertante : « Pourquoi ne pourrions-nous pas écrire les vingt-quatre volumes de l'*Encyclopædia Britannica* sur une tête d'épingle¹ ? » Dans son discours d'introduction intitulé « There's plenty of room at the bottom » (« Il y a plein de place au fond »), le Prix Nobel imaginait des applications extraordinaires de systèmes réalisés à très petite échelle, là où la dimension des machines frôlerait celle d'un amas de quelques centaines d'atomes, s'efforçant de démontrer qu'en principe rien ne s'y opposait, si ce n'est la maîtrise technologique. Méthodiquement, le conférencier invitait son auditoire à le suivre dans cet univers inhabituel et fascinant qu'est la physique, et imaginait des solutions pour produire et reproduire des objets réduits à l'extrême, de manière parfaitement contrôlée, au point que l'information écrite dans tous les livres existants tiendrait dans un grain de poussière. Il était convaincu que l'on pouvait « fabriquer de minuscules calculatrices, avec de minuscules câbles, de minuscules éléments ». Visionnaire, il ajoutait : « En l'an 2000, lorsqu'ils se tourneront vers le passé, ils se demanderont pourquoi il a fallu attendre 1960 pour prendre cette direction. »

1. R. Feynman, « There's plenty of room at the bottom », *Engineering and Science Caltech Magazine*, Pasadena, Caltech, 1960.

De l'avis des historiens et des scientifiques, ce séminaire fondateur introduisit pour la première fois la notion, encore vague, de *nanotechnologie*. Un discours d'autant plus insolite qu'il fut prononcé en 1960, alors que rien ne laissait présager l'émergence de cette technologie futuriste et de ce qu'elle engendrerait quarante ans plus tard. Le 25 octobre 1984, après plus de vingt ans, et conforté par les avancées de la science, Feynman réitérera son séminaire sous le titre « Minuscules machines ».

Les perspectives d'une technologie qui manipulerait la matière à l'échelle moléculaire et atomique sont immenses. Imaginez que l'on puisse réaliser sur mesure une entité de quelques milliardièmes de mètres seulement, et définir précisément sa composition et sa géométrie à cette échelle. On pourrait exploiter des propriétés physiques de la matière qui ne se manifestent pas à notre échelle macroscopique. C'est là une richesse qui invite à la créativité et à l'innovation. En effet, depuis un quart de siècle, les nanotechnologies n'ont cessé d'évoluer pour conquérir pratiquement tous les domaines des sciences et des techniques. Elles ont bousculé la science et bouleversé en profondeur notre société à travers, par exemple, les technologies de l'information, les biotechnologies et la médecine contemporaine. Son expansion est rapide et ses applications changent notre mode de vie. Souvent ignoré, cet essor des nanotechnologies est intimement lié à celui de la microélectronique, un secteur qui a connu une évolution sans précédent depuis un demi-siècle et qui est considéré comme la troisième révolution industrielle, tandis qu'une quatrième révolution industrielle, basée sur l'hyperconnectivité, le Big Data et à présent l'intelligence artificielle, se précise déjà.

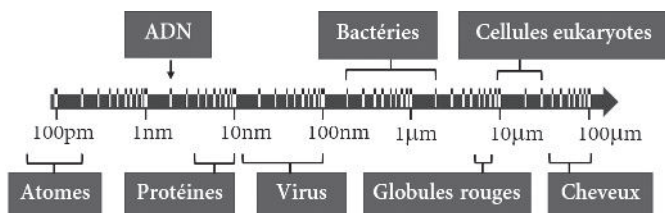
Depuis, les enjeux économiques et stratégiques sont tels que plusieurs nations, parmi lesquelles Taïwan, la Corée du Sud, le Japon, la Chine et les États-Unis, ont mis en place des programmes ambitieux focalisés sur une recherche à long terme pour encourager et soutenir les nanotechnologies et leurs déclinaisons. Entre histoire et découvertes, nous allons voir comment ces technologies fascinantes qui maîtrisent l'infiniment petit ont évolué au cours du temps, et ce qu'elles ont à nous apporter.

CHAPITRE PREMIER

Nanotechnologie, art et nature

La notion de nanotechnologie est relativement intuitive, mais de manière rigoureuse la nanotechnologie se définit comme la science qui maîtrise et exploite les propriétés insolites de la matière à l'échelle du nanomètre. Le nanomètre représente un milliardième de mètre et, hormis les technologues et scientifiques pour qui ce nanomètre est tangible, cette unité est souvent abstraite. Concrètement, le diamètre d'un cheveu ou l'épaisseur d'une feuille de papier mesurent à peu près cent mille nanomètres ! À peu de chose près, le mètre est au nanomètre ce que la distance Terre/Lune est à la dimension de ce « Que sais-je ? ». Plus proches de nous, citons comme exemples d'univers nanométriques celui des virus et de certaines bactéries, de la double hélice d'ADN et des fameuses nanoparticules, souvent synonymes d'inquiétude pour notre santé et l'environnement. La figure 1 donne un aperçu des ordres de grandeur d'entités présentes dans la nature. Nous allons donc explorer un monde inaccessible à nos sens, celui de l'infiniment petit, le monde des atomes, des molécules et des « objets » imperceptibles à notre échelle.

Fig. 1. – Quelques ordres de grandeur
que l'on rencontre dans la nature



Avant de nous plonger dans le cœur du sujet, soulignons qu'il faudra attendre 1974 pour que le terme « nanotechnologie » soit prononcé pour la première fois lors d'une conférence. Il revient à Norio Taniguchi, professeur à l'université des sciences de Tokyo. Par ce terme, il évoquait alors une technologie particulière, celle de la microélectronique et de ses procédés de fabrication singuliers. Comme nous le verrons, la microélectronique occupera une place fondamentale dans l'essor et la diversification des nanotechnologies au sens large.

I. – La nanotechnologie, une « science » du passé

Que diriez-vous si vous appreniez qu'il y a presque deux mille ans, les Romains avaient déjà des notions empiriques de ce qui s'apparente à une nanotechnologie ? Qu'ils savaient fabriquer des objets en exploitant les propriétés de la matière à l'état nanométrique ? Il a fallu attendre la fin du ^{xx}e siècle pour que les travaux d'archéologues et de chimistes apportent les preuves que l'homme exploitait déjà une forme primitive de nanotechnologie. Prenons comme exemple la célèbre coupe romaine de Lycurgue, apparemment datée du

iv^e siècle de notre ère. Cette coupe en verre, qui s'inspire du récit de l'*Illiade* et dépeint une scène mythologique où Dionysos l'emporte sur Lycurgue, est une œuvre capitale qui témoigne d'une maîtrise remarquable des verriers de cette époque. La coupe de Lycurgue n'est pas qu'esthétique, elle révèle également une singularité qui fait toute sa richesse : de couleur verte lorsque la lumière ambiante s'y réfléchit, elle prend une teinte rouge lorsque la lumière la traverse. Cette propriété surprenante, connue sous le nom scientifique de « dichroïsme », s'explique par la présence de nanoparticules, et non par des pigments tels que des métaux et des oxydes métalliques qui étaient largement utilisés pour colorer le verre. Animés par leur désir de percer ce mystère, quelques chercheurs se lancent dans l'aventure. Les premières analyses quantitatives sur des fragments de verre remontent au milieu du xx^e siècle, mais le dichroïsme résistait aux intrusions des scientifiques et ne dévoilait toujours pas son secret. Ce n'est qu'en 1990 que Barber et Freestone¹ parviennent enfin à identifier, pour la première fois et grâce à la microscopie électronique, la présence de nanoparticules de 50 à 100 nanomètres dispersées dans la matrice de ce verre (notons qu'au xix^e siècle, le physicien anglais Michael Faraday comprit que les dimensions nanométriques des particules étaient la cause de ces effets optiques). Le mystère allait bientôt être résolu : une analyse complémentaire au moyen de rayons X mit en évidence des nanoparticules d'alliages d'or et d'argent dispersées. Ce n'est pas la couleur de l'or ou de l'argent qui donne la teinte à la coupe, mais la dimension des

1. D.J. Barber, I.C. Freestone, « An investigation of the origin of the colour of the Lycurgus cup by analytical transmission electron microscopy », *Archaeometry*, New York, Wiley, vol. 32, 1990, p. 33-45.