

Faut-il avoir peur des nanos ?

Francelyne Marano

Faut-il
avoir peur
des nanos ?

Dans le vif

BUCHET • CHASTEL

© Libella, Paris, 2016.
ISSN : 2427-6650
ISBN : 978-2-283-02932-9

« Serons-nous capables de choisir
les éléments de la technologie qui
améliorent la qualité de vie et
d'éviter ceux qui la détériorent ? »

DAVID BALTIMORE
Prix Nobel de physiologie,
1975

SOMMAIRE

| | |
|---|-----|
| Introduction | 11 |
| I. Qu'est-ce que le nanomonde ? | 17 |
| II. Les nanos sont partout | 43 |
| III. Les nanos sont-elles toxiques ? | 59 |
| IV. Nanomédecine et nanomédicaments : de la réalité à la fiction | 81 |
| V. Les nanos dans le débat public | 97 |
| Bibliographie | 113 |

INTRODUCTION

Le terme « nano » est aujourd'hui entré dans le langage courant ; lancé à la fin du xx^e siècle par des industriels qui voyaient ainsi la possibilité de développer puis de promouvoir des produits innovants, ce préfixe est dès lors considéré comme le *nec plus ultra* de la modernité. Se développent alors les nanomachines, les nanolaboratoires, les nanopuces, les nanomédicaments, la nanocosmétique et autres nanomatériaux constituant le nanomonde. Pourtant, à l'origine, ce terme, qui vient du grec ancien et signifie « nain, très petit », n'était utilisé par les scientifiques que pour exprimer le milliardième de mètre : « Le nanomètre est au mètre ce que la taille d'un nain de jardin est à la distance Terre-Lune. » Cette définition imagée a peut-être donné l'idée à des publicitaires suisses de lancer la mode de jouets minuscules appelés nanos qui ont fait fureur dans les cours de récréation !

Il faut dire que l'engouement pour les nanotechnologies débute bien avant cette émergence publicitaire. Dès les années 1950, un courant scientifique très actif mené par le monde de la

physique, de la chimie, de la science des matériaux et de l'électronique commence à explorer les propriétés de la matière à l'échelle nano, celle de l'infiniment petit, celle de l'atome. En effet, un minéral, comme un être vivant, est constitué d'atomes qui s'associent pour former des molécules de nature et de taille très variées, mais toujours à l'échelle nano. Ce sont ces molécules qui forment les briques fondamentales de la biosphère et de son incroyable diversité.

Pourquoi cette excitation des scientifiques, bientôt suivis par les industriels et les décideurs politiques, convaincus qu'ils ne devaient pas passer à côté d'une nouvelle révolution industrielle ? Parce qu'à cette échelle du nanomètre, les atomes possèdent des propriétés très particulières. Même dans un morceau de métal en apparence inerte, ils se déplacent : ils s'attirent, se repoussent, s'organisent en lignes, en cubes, en feuillets, en sphères, et ceci en fonction de la température et du milieu dans lequel ils se trouvent, qu'il soit liquide, solide ou gazeux. Tout un monde fascinant, le nanomonde, s'ouvre alors, riche en découvertes fondamentales décrites dans les meilleurs journaux scientifiques. En 1996, le prix Nobel est attribué à des chimistes américains – Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley –, pour leurs découvertes sur les capacités d'auto-organisation des atomes de carbone présents dans des nanoparticules naturelles, les fullerènes, et sur leur structure en ballon de football révélée par le microscope à effet tunnel (voir p. 17). Que des nanoparticules inorganiques puissent s'organiser comme le fait le monde vivant a nourri bien des fantasmes, dont certains relèvent

de la science-fiction ¹, les nanoparticules devenant des nanorobots tueurs capables de se reproduire à l'infini !

Il suffisait donc de domestiquer ces propriétés pour fabriquer des nanos aux applications les plus variées : dans l'électronique – pour augmenter la puissance des ordinateurs et des smartphones –, dans les nouveaux matériaux plus résistants et plus légers des raquettes de tennis et des véhicules automobiles, dans les traitements de surfaces autonettoyantes, dans les cosmétiques – pour protéger des UV –, dans les vêtements, les médicaments, l'alimentation... La liste est longue et tous les domaines industriels sont bouleversés par cette nouvelle révolution ! Fruit de la recherche fondamentale, les nanotechnologies se développent à une vitesse record sans que l'on ait vraiment réfléchi au monde qu'elles peuvent transformer. La course aux découvertes et aux brevets devient vite féroce. Les pays doivent s'organiser pour rester en tête. À la fin du xx^e siècle, les Américains attribuent les premiers des financements énormes aux nanosciences, suivis par les Européens et les Asiatiques – Japon, puis Corée du Sud, Chine et Inde. Quant à la France, elle se dote d'un réseau de laboratoires très performant, les C'Nano, qui regroupe tous les grands pôles scientifiques, et d'un centre international, Minatec, inauguré en 2006 à Grenoble.

Cependant, dès le lancement du projet, Minatec déclenche une contestation citoyenne

1. Comme par exemple dans le roman de Michael Crichton, *La Proie*, Robert Laffont, 2003.

très forte, portée par l'association grenobloise Pièces et main-d'œuvre, rapidement suivie par des prises de position plus ou moins radicales d'autres associations. La raison est évidente : dans la fièvre des découvertes scientifiques et le développement accéléré des applications, on a omis de répondre à des questions essentielles. Pourtant, dès le début de cet emballement, celles-ci ont été posées par des scientifiques, des toxicologues qui connaissent bien les particules et leurs effets sur la santé. Ken Donaldson, en 2004, et Günter Oberdörster, en 2005, sont les premiers à mettre en garde, dans des revues scientifiques de premier plan, sur le manque d'évaluation des risques de ces nouvelles technologies et sur la similitude de certaines nanoparticules manufacturées, c'est-à-dire fabriquées pour des applications commerciales, avec d'autres, dites non intentionnelles, dont ils connaissent bien les risques pour la santé : la silice, le noir de carbone, l'amiante, les particules atmosphériques. Ils donnent un nom à cette « nouvelle » toxicologie : la nanotoxicologie. Elle n'est pourtant pas si nouvelle, car elle s'appuie sur un solide socle de publications, dont certaines remontent au début du xx^e siècle. Certes, ces études épidémiologiques ou expérimentales ont été réalisées sur des particules souvent mal caractérisées, auxquelles sont exposés les travailleurs dans les mines et dans les ateliers de fabrication, ou les habitants des villes très polluées par le trafic, le chauffage et les fumées d'usines. Néanmoins, les données existent et il faut éviter de reproduire un scandale sanitaire comme celui de l'amiante ! Les propos

des toxicologues sont très raisonnables : le développement de nouveaux produits, surtout quand il concerne le consommateur, c'est-à-dire tout le monde, ne doit pas se faire sans garde-fou. Il faut impérativement évaluer les risques pour l'homme, mais également pour l'environnement.

D'autres questions se posent rapidement, plus philosophiques, plus éthiques. Ces nouveaux produits, présentés par les industriels comme étant révolutionnaires, sont-ils indispensables ? A-t-on prouvé leur utilité avant de les développer ? Certaines de ces applications ne vont-elles pas transformer l'homme ? Le concept d'« homme augmenté » apparaît alors, dont certaines applications potentielles, associées au transhumanisme, paraissent délirantes. Certes, les nanos ouvrent des perspectives extrêmement prometteuses dans le domaine médical, avec la mise au point de nouveaux médicaments plus efficaces et traitant spécifiquement l'organe malade, de nouveaux outils de diagnostic plus précis, de nouveaux systèmes pour réparer les organes lésés. Mais quelles sont les limites à donner à ces développements ?

En France, l'opinion publique ne commence à s'inquiéter de ces controverses qu'au début du XXI^e siècle. Des conférences citoyennes sont organisées. Cependant, c'est lors du Grenelle de l'environnement, en 2007, qu'un débat public est organisé à la demande d'associations telles que France Nature Environnement. Il devait permettre un échange entre tous les protagonistes – chercheurs, industriels, pouvoirs publics, associations –, dans le respect de chacun, et être

un exemple de démocratie participative. Ce fut tout le contraire, les militants les plus engagés criant au simulacre et empêchant, parfois par la force, la tenue de réunions. Le résultat n'a certainement pas permis au public de se faire une idée de la pertinence des arguments des uns et des autres et a laissé un goût très amer dans la bouche de certains chercheurs qui voulaient vraiment jouer le jeu du dialogue. Ces vives controverses se sont produites il y a maintenant plusieurs années. Elles se réactivent sporadiquement quand un nouvel événement médiatique les nourrit¹.

Alors, que faut-il penser de ces nanos ? Il est important, comme l'espérait le débat national, que le citoyen se forge sa propre opinion et puisse peser le pour et le contre, entre les développements apportant de réels progrès et les risques inutiles. C'est une vision de la démocratie qui demande le respect et l'écoute des arguments de chacun, sans anathème ni *a priori*, et que l'on aimerait voir se répandre.

1. Comme quand au début de l'année 2015, José Bové brandit dans une interview télévisée un paquet de bonbons aux nanos.

CHAPITRE I

QU'EST-CE QUE LE NANOMONDE ?

On connaît depuis longtemps la composition chimique de la matière et les lois qui la régissent. Pourtant, les scientifiques se sont intéressés assez tardivement à cette échelle nano, car ils manquaient d'outils pour l'aborder. Mais grâce aux avancées technologiques de la physique, comme l'invention du microscope électronique et, plus encore, du microscope à effet tunnel¹, les physiciens peuvent désormais « voir » les atomes et observer leur organisation dans la matière inorganique (voir l'encadré, p. 82).

Parallèlement, les chimistes ont progressé dans la connaissance des propriétés de minuscules morceaux de matière, les colloïdes, qui sont à l'échelle du nanomètre et se trouvent partout dans la nature : l'argile en suspension dans l'eau des rivières, les nanogouttelettes du lait, les pigments

1. Le microscope à effet tunnel, inventé en 1981 par Heinrich Rohrer et Gerd Binnig, déplace une pointe à la surface de la matière. Le courant électrique qui s'établit entre la pointe et l'atome permet de représenter cette surface et son organisation. Une variante est le microscope à force atomique, qui détecte l'attraction exercée par la pointe sur les atomes.

particulaires du vin rouge si importants pour son goût. Quand on réalise une mayonnaise ou une mousse au chocolat, on est loin d'imaginer que c'est une suspension colloïdale qui contient des nanoparticules ! Or la compréhension des propriétés de ces colloïdes et les observations à l'échelle atomique ont joué un rôle essentiel dans le développement d'un nouveau domaine de la connaissance, les nanosciences.

Dès le milieu du siècle dernier, des chercheurs en physique et en chimie accumulent des données sur les propriétés de la matière à l'échelle atomique. Mais c'est un appel lancé par le physicien américain Richard Feynman en 1959 qui aurait dû déclencher une prise de conscience sur le fabuleux potentiel du nanomonde. Il posa devant l'American Physical Society une question qui semblait alors complètement folle : « Pourquoi ne pourrait-on pas faire tenir toute l'*Encyclopædia Britannica* et ses vingt-quatre volumes sur une tête d'épingle ? » Cette interpellation à une assemblée de physiciens parmi les meilleurs de l'époque a été considérée comme une plaisanterie, mais elle cherchait à leur faire prendre conscience des potentialités de l'infiniment petit, à l'échelle du nanomètre. Selon Feynman, il fallait développer une « union sacrée », une alliance interdisciplinaire regroupant la physique, la chimie et la biologie, pour créer des outils capables de changer radicalement les technologies. Bien qu'il ait reçu, en 1965, le prix Nobel de physique pour ses travaux fondamentaux en chimie quantique, son appel

n'a pas été entendu, sans doute parce qu'il est arrivé trop tôt.

Il faut attendre ensuite plus de quinze ans pour que le concept de nanosciences émerge vraiment, et ce n'est qu'en 1974 que Norio Taniguchi, professeur à l'université de Tokyo, utilise pour la première fois le terme de « nanotechnologie », popularisé ensuite dans les années 1980 par K. Eric Drexler, ingénieur au Massachusetts Institute of Technology¹.

DE LA DIFFICULTÉ À TROUVER UNE DÉFINITION

Comment peut-on définir les nanoparticules utilisées pour les nanotechnologies ? Divers critères sont à prendre en compte (voir l'encadré, p. 22) :

- la taille nanométrique de l'objet ;
- sa nature artificielle, c'est-à-dire produite volontairement à des fins de recherche ou d'applications industrielles (nanoparticules manufacturées) ;
- les propriétés qui découlent de sa dimension nanométrique.

Cependant, cette question fait l'objet d'après discussions et c'est seulement le 11 octobre 2011 que la Commission européenne donne enfin la définition suivante : le nanomatériau est « un matériau naturel, formé accidentellement ou manufacturé, contenant des particules libres, sous forme d'agrégat ou sous forme

1. K. Eric Drexler, *Engins de création : l'avènement des nanotechnologies*, Vuibert, 2005.

d'agglomérat, dont au moins 50 % des particules, dans la répartition numérique par taille, présentent une ou plusieurs dimensions externes se situant entre 1 nm et 100 nm¹ ».

Elle inclut des nanomatériaux naturels et non intentionnels, c'est-à-dire les polluants des activités humaines comme les particules dues au trafic, aux incinérations, au chauffage ou aux fumées d'usines. Pourtant, certains experts souhaitent clairement les différencier des nanomatériaux manufacturés et leur réserver le terme de « particules ultrafines » : c'est une première controverse !

L'objectif affiché par la Communauté européenne est de fonder la définition sur les « connaissances scientifiques disponibles » ; or, il existe toujours de nombreuses lacunes et imprécisions dans les critères utilisés pour distinguer les nanomatériaux des autres. Cette difficulté de consensus entre experts et les rôles des lobbys industriels et associatifs, visant des objectifs différents, conduisent finalement à une définition *a minima*, avec une révision proposée en 2014 en « fonction des évolutions scientifiques ». Comme souvent dans les instances européennes, un groupe de travail a été mis en place en 2014 mais n'a pas encore statué. Il est en effet important de disposer d'un cadre précis pour permettre aux agences européennes et nationales de réglementer ! La Commission européenne indique dans sa recommandation

1. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:275:0038:0040:FR:PDF>

que « la définition visée devrait servir de référence pour déterminer si un matériau doit être considéré comme un “nanomatériau” aux fins de la législation et des politiques de l’Union et que la définition du terme “nanomatériau” dans la législation de l’Union se fonde uniquement sur la taille des particules constitutives du matériau, à l’exclusion de toute considération relative aux risques ou aux dangers qu’il peut présenter » ; ce qui laisse le consommateur sur sa faim ! De sorte que le texte a immédiatement provoqué une tempête de contestations venant aussi bien des associations que des experts. Il est certain que la valeur limite de 100 nm est arbitraire, de même que le pourcentage de 50 % de nanos dans un matériau. Seuls les industriels semblent ici satisfaits. Pour bien comprendre la polémique, d’un côté, les scientifiques et les ONG considèrent que les propriétés spécifiques des nanos ne s’arrêtent pas, comme par enchantement, à la valeur limite de 100 nm ni à un pourcentage donné dans le nanomatériau. Ils souhaitent que cette définition prenne en compte d’autres critères représentatifs de leurs propriétés. De l’autre, les industriels souhaitent une définition peu contraignante pour eux, ce qu’ils ont obtenu. Chacune des parties prenantes a donc avancé ses arguments et, comme souvent, le résultat n’est pas vraiment satisfaisant. Néanmoins, il faut reconnaître que la définition a fait bouger les choses et permis, par exemple, la mise en place en France en janvier 2013 de la déclaration obligatoire « des substances à l’état nanoparticulaire fabriquées, importées et mises sur le marché » (voir p. 109).

Questions de vocabulaire

Le *nanomètre* (nm) est une unité de mesure qui correspond à un milliardième de mètre (soit 10^{-9} m). C'est une dimension difficile à imaginer, comme tout ce qui touche à l'infiniment petit ou à l'infiniment grand. On approche de la taille des atomes qui se situe entre 0,1 nm et 0,4 nm, d'une molécule d'acide désoxyribonucléique (ADN) qui mesure 2 nm de diamètre, d'un virus qui varie entre 10 nm et 100 nm, alors que des bactéries mesurent 1 micromètre (μm) et que l'épaisseur d'un cheveu humain se situe entre 50 000 nm et 100 000 nm.

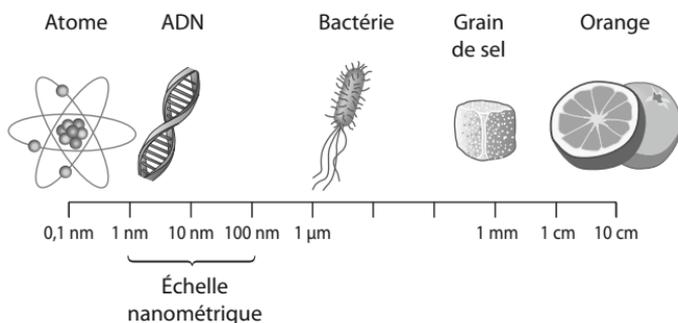
Les *nanosciences* étudient des phénomènes qui sont observés dans des objets dont la taille est de quelques nanomètres et dont les propriétés découlent spécifiquement de cette taille nanométrique.

Les *nanotechnologies* regroupent l'ensemble des techniques qui permettent de manipuler des objets dont la dimension est à l'échelle du nanomètre. Elles incluent la conception, la caractérisation, la production et l'application de structures, dispositifs et systèmes à l'échelle nanométrique, c'est-à-dire inférieur à 100 nm environ.

Les *nanomatériaux* sont essentiellement des structures produites grâce aux nanotechnologies. Leur caractéristique principale est qu'au moins une de leurs dimensions est inférieure à 100 nm. On y trouve des nano-objets – nanoparticules libres ou sous forme d'agrégats et d'agglomérats, des nanotubes, des nanofibres – et des matériaux dont la surface ou le cœur est nanostructuré.

Un *nano-objet* est un assemblage d'atomes dont au moins une des trois dimensions est à l'échelle

nanométrique. Alors qu'on devrait réserver le terme « nanoparticules » à des particules dont toutes les dimensions sont inférieures à 100 nm, on utilise de plus en plus ce terme pour désigner tous les nano-objets. Les physiciens des nanosciences sont plus précis et évitent cette généralisation qu'ils considèrent comme abusive. Cependant, nous allons la conserver par souci de simplification. La définition européenne emploie le terme de « nanomatériau » pour l'élargir à toutes les catégories des nano-objets et des matériaux nanostructurés. Il faut spécifier que l'on utilise le terme de « particule ultrafine » pour indiquer plutôt des particules issues de la pollution atmosphérique, qui ont un diamètre inférieur à 100 nm, alors que les nanoparticules désignent des matériaux manufacturés produits pour différentes applications.



Les dimensions des nanoparticules se situent entre 1 nm et 100 nm, selon la définition européenne. Les plus petites sont dix fois plus grosses qu'un atome, alors que les plus grosses sont dix fois plus petites qu'une bactérie. Elles sont 10 000 fois plus petites qu'un grain de sel et 1 million de fois plus petites qu'une orange.