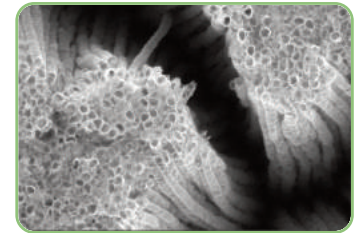


# Nanomatériaux

## Quel impact sur la santé et l'environnement ?

De la nanotechnologie vouée au développement durable (réduire la quantité de matière et d'énergie pour fabriquer toutes nos machines) aux nanotechnologies «fourre-tout» et partout, ou comment est-on passé de l'espoir d'un monde plus économe des ressources de la planète à la crainte d'une nouvelle «plaie» toxico et écotoxicologique...



Faisceaux de nanotubes de TiO<sub>2</sub>  
(©Argonne National Laboratory)

De la silice nanométrique dans le ketch-up pour l'épaissir, des nanoparticules de dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) dans les produits cosmétiques pour augmenter leur brillance... Ils sont partout ! Plus de 1 000 produits incorporant des nanomatériaux ou fabriqués au moyen de nanotechnologies sont aujourd'hui vendus dans le commerce : vêtements, produits cosmétiques, crèmes solaires, shampoings, dentifrices, traitements capillaires, anti-douleurs ou contre l'acné, produits de ménage et de jardin, produits alimentaires, produits et accessoires du secteur automobile, produits électroniques... Même nos chers animaux de compagnie ne sont pas oubliés avec l'arrivée sur le marché «*du lit le plus avancé technologiquement*» : il «*reste propre et tue les bactéries naturellement*». Nos chers bambins sont aussi dans la ligne de mire : ils ont en effet droit à leur tétine, biberon, brosse à dents et autres nounours antibactériens... sans oublier les sucreries ! Un petit bonbon au dioxyde de titane ? Sérieusement, une étude<sup>1</sup>, menée par des chercheurs de l'Université d'Arizona, vient de

montrer que les enfants étaient plus exposés que les adultes à ces nanoparticules parce que les sucreries, bonbons et autres chewing-gum sont les produits qui en contiennent le plus ! Question : doit-on s'alarmer de ce constat ? Plus exactement, que connaît-on des effets des nanoparticules sur la santé humaine, animale et environnementale ?

Réponse : Ne sait pas. En effet, «*on dispose de peu de données sur la toxicité des nanoparticules manufacturées* (on sait en revanche que «*la fraction nanoparticulaire de la pollution de l'air aggrave certaines maladies cardio-respiratoires*»...), comme le souligne très bien un rapport de l'Ineris, Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques<sup>2</sup>. Il est légitime de questionner une éventuelle toxicité et écotoxicité dans la mesure où «*plus la matière est divisée en petites particules, plus la surface où se produisent les interactions biologiques est grande*», poursuit l'Institut. Et ce n'est pas tout : «*il faut comprendre le rôle de la nature chimique, la forme, la capacité à franchir les barrières (par exemple pulmonaire et hémato-encéphalique), la pénétration cellulaire, le devenir dans*

*l'organisme (accumulation, élimination), etc.*» de ces infiniment petites particules. Et d'expliquer «*une substance peut être inerte à l'échelle micrométrique et induire un effet à l'échelle nanométrique*». Ce que l'INRS, Institut National de Recherche et de Sécurité, précise en ces termes : «*À de telles dimensions, la matière acquiert des propriétés inattendues et souvent totalement différentes de celles des mêmes matériaux à l'échelle micro ou macroscopique. Les nanotechnologies conduisent donc à l'élaboration de matériaux dont les propriétés fondamentales (chimiques, mécaniques, optiques, biologiques, etc.) peuvent être modifiées : il convient alors de les considérer comme de nouveaux produits chimiques*»<sup>3</sup>.

Tout est dit.

Nous aborderons les différents risques toxico et écotoxicologiques avec le toxicochimiste André Picot. Avant cela, Christian Joachim, pionnier de la nanotechnologie, nous expliquera comment les «*batailles d'influence, l'argent et la compétition*» ont doublement détourné la nanotechnologie, d'une part de son objet initial : la manipulation des atomes, et, d'autre part, de son projet originel : l'écotechnologie. ■

1 - «Titanium Dioxyde Nanoparticles in Food and Personal Care», Alex Weirt et al., Environment Science & Technology, 2012

2 - «Accompagner l'innovation pour un développement durable. Cahier d'acteur sur le développement et la régulation des nanotechnologies», Ineris, octobre 2009

3 - «Les nanomatériaux», INRS, juin 2009

**Interview****Christian Joachim**

# «De la nanotechnologie aux nanotechnologies «fourre-tout»»

**Pionnier de la nanotechnologie, Christian Joachim est directeur de recherche au CNRS dans le groupe Nanosciences au Centre d'élaboration de matériaux et d'études structurales (CEMES) à Toulouse.**

## **Qu'est-ce que la nanotechnologie, comment est-elle née et dans quel but ?**

La nanotechnologie consiste en la construction atome par atome (et/ou molécule par molécule) de nano-dispositifs ou de nano-machines capables de fonctionner comme des grands. Ces constructions sont maîtrisées à l'atome près. C'est ce que l'on appelle l'approche ascendante de la technologie, mais sans avoir à reconstruire un matériau pour réaliser les pièces de ces machines (voir encadré ci-contre). En ce qui concerne la naissance de la nanotechnologie, je dirais qu'elle en a connu deux : une naissance politique répondant à une demande sociétale issue des années 60, et une naissance presque sans s'en apercevoir, «naturelle», répondant à une interrogation technique issue des progrès de la miniaturisation des composants électroniques lancée à la fin des années 50. Ces deux naissances se sont ensuite rejointes.

Pour sa première naissance, dans les années 1980, la nanotechnologie en devenir offrait un espoir à tous ceux qui se sentaient soucieux de l'avenir de la planète. Il devenait en effet évident qu'il faudrait un jour réduire la quantité de matière et d'énergie consommée pour fabriquer nos machines. Pourquoi alors ne pas les construire avec le moins d'atomes possible ? Une cible intéressante était (et est toujours) la microélectronique. Par exemple, pour fabriquer le microprocesseur d'un micro-ordinateur, il faut de nos jours 240 kg d'énergie fossile, 22 litres de produits chimiques et 1 500 litres d'eau. La fabrication d'une seule petite clé USB nécessite 250 litres d'eau et de nombreux produits chimiques polluants. Une écotechnologie ouvrait donc la possibilité de libérer l'industrie de l'utilisation massive des matériaux pour la faire entrer dans une ère de développement durable,

plus économe des ressources de la planète. Le deuxième Sommet de la Terre en juin 1992 a renforcé cet espoir de produire un jour des machines et des matériaux durables, respectueux de l'environnement associés à leur clef de biocompatibilité. Des politiques américains se sont emparés du bébé afin de le faire grandir, mais sans maîtriser les lobbies se penchant sur le berceau.

La deuxième naissance est née d'une interrogation : une toute petite molécule pourrait-elle jouer le rôle d'un interrupteur électrique ? Autrement dit, est-il possible de réduire un composant électronique à une seule molécule ? Commencées dès le milieu des années 1970, les recherches du chimiste américain Ari Aviram, des laboratoires de recherche T. J. Watson d'IBM, portaient sur ces molécules. Un peu plus tard, le chimiste américain Forrest Carter du Naval Research Laboratory, NRL, imagine de diminuer la taille non seulement des composants, mais du circuit électronique tout entier à une seule molécule. Ces projets donnaient l'espoir de transformer la microélectronique en «nanoélectronique» moléculaire. L'invention du microscope à effet tunnel <sup>1</sup> en 1981 capable d'imager un seul atome ou une seule molécule déposée sur une surface, et surtout la découverte en 1989 que la pointe de ce microscope permet également de les manipuler un par un, a ouvert l'étude expérimentale des circuits électroniques construits atome par atome et des molécule-machines.

Il y a donc au début des années 1990 un très beau bouillon de culture. Nous étions peu nombreux, mais la recherche progressait. En plus, ces deux naissances étaient accompagnées par une autre aventure : le génie génétique. Des chercheurs rêvaient de programmer des bactéries pour donner naissance à une «Biotique» chère à J. de Rosnay. ● ● ●

<sup>1</sup> - Invention qui a valu le prix Nobel de physique aux physiciens allemand et suisse Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, en 1986



Par exemple, Kevin Ulmer alors directeur de la recherche de la société Genex (Californie), envisageait de faire fabriquer des circuits électroniques moléculaires, à base de protéines par des bactéries programmées génétiquement.

Ce bouillon de culture aurait dû suivre son cours. Mais il en fut tout autrement : un autre processus s'est mis en place au milieu des années 1990, une incroyable opération politique mêlant bataille d'influence, argent et compétition, qui a fait bifurquer la nanotechnologie en l'écartant de son objet initial : les molécule-machines, et de son projet originel : l'écotechnologie, pour emprunter une voie toute différente et se transformer en «nanotechnologies» et se faire happer par la technosphère américaine, puis mondiale (voir encadré p. 10). De nos jours, les «nanotechnologies» ne concernent presque plus la construction atome par atome de nano-machines, mais plutôt toutes les techniques permettant de fabriquer de «petits objets» avec une précision de fabrication de l'ordre du nanomètre, quand bien même elles mettent en jeu des milliards de milliards d'atomes, et non plus quelques-uns.

### **D'où l'extrême confusion qui règne au sujet des nanotechnologies que vous qualifiez de «fourre-tout»...**

Elles concernent en effet de nombreux secteurs d'activité. La liste est longue, on met le préfixe nano partout !

Même dans nos Universités, l'offre de formation n'est pas claire. Un étudiant qui suit un master de nanotechnologie va se retrouver avec un enseignement de la microélectronique alors qu'il s'attendait à apprendre la manipulation de la matière atome par atome. Inversement, cet étudiant se retrouve à apprendre la manipulation atome par atome alors qu'il voulait faire de la microélectronique.

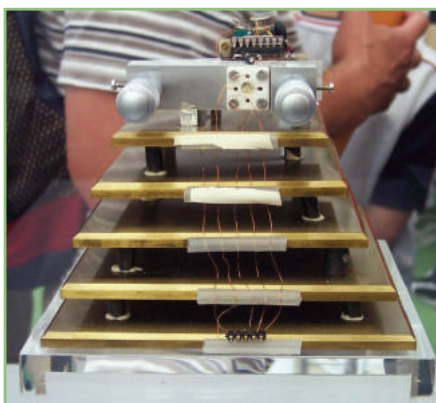
De même, au niveau de la nomenclature, on est passé du terme «matériaux nanostructurés» dans lesquels la structure élémentaire est faite de molécules ou d'agrégats composés d'un grand nombre d'atomes au terme «nanomatériaux». Le préfixe «nano» a été passé devant le mot «matériaux» pour avoir un bel effet, une sorte de critère de modernité. On introduit ainsi une grande confusion entre la taille du morceau de matière désigné et la précision de fabrication de ce morceau de matière. Il y a désormais une explosion de termes en ce sens : nanotechnologies d'emballage, nanolessive, nanofood... tout cela parce que certains adjuvants contiennent des particules de moins de 100 nanomètres.

Le TiO<sub>2</sub> (dioxyde de titane), par exemple, dont on parle beaucoup, est souvent utilisé dans l'agroalimentaire : les pâtisseries, confiseries, etc., mais également dans les peintures, papier, plastiques, céramiques, médicaments, dentifrices, crème solaire, résines de synthèse, etc. ●●●

## **Approche descendante et approche ascendante**

L'approche descendante des nanotechnologies, c'est la réduction en taille (la miniaturisation), par exemple des dispositifs électroniques de taille submicronique ou de la micromécanique. Dans l'approche ascendante, on remonte en taille à partir des atomes, soit en retrouvant l'échelle des nanomatériaux, soit en incarnant, par exemple, une fonction calcul ou mécanique dans une seule molécule. La première voie ascendante retrouve la miniaturisation puisqu'un matériau est de nouveau fabriqué avant d'être retaillé pour réduire la taille des pièces ou du dispositif.

La deuxième voie ascendante est apparue après l'invention du microscope à effet tunnel devenu outil. Ce microscope permet de toucher avec sa petite pointe un seul atome à la fois et de le déplacer à volonté, et d'édifier un atome après l'autre, des architectures atomiques, de les «monumentaliser» jusqu'à ce qu'elles incarnent chacune une na-



*Un microscope à effet tunnel  
(© w:nl:user:MADe)*

nomachine minuscule capable de fonctionner comme une grande. C'est une approche ascendante de la construction d'un dispositif, qui prend à contre-pied la miniaturisation et les nanomatériaux.

Supposons, par exemple, que l'on veuille fabriquer un seul cube de silice un million de fois plus petit qu'un grain de sable, c'est-à-dire qui mesurerait un nanomètre de côté, soit un milliardième de mètre. Pour construire ce nanocube, il faut assembler un par un avec le microscope à effet tunnel une soixantaine d'atomes : c'est une technologie ascendante. Dans l'approche ascendante «nanomatériaux»,

on synthétisera d'abord un petit solide fait de milliard de nanocubes, puis on détruira tout ce solide en ne conservant à la fin qu'un seul nanocube. Dans l'approche descendante de la miniaturisation, il faudrait enlever directement 100 milliards d'atomes d'un grain de sable pour fabriquer le même nanocube à partir d'un cube d'un centimètre de côté.

●●●  
**Justement ces nanomatériaux, qui seraient présents dans plus de 1 000 produits comprenant vêtements, produits cosmétiques, crèmes solaires, shampoings, dentifrices, produits ménagers et d'entretien, produits alimentaires<sup>2</sup>, suscitent aujourd'hui beaucoup de craintes en terme de santé et d'environnement. Faut-il effectivement en avoir peur, alors que tant de données manquent sur leur éventuelle toxicité et impact sur l'environnement ?**

L'Union européenne finance le programme «Nanosafe» pour établir une base de données sur la dangerosité des matériaux fabriqués avec des nanoparticules rebaptisés «nanomatériaux». Différentes études ont été mises en place également par l'INRS (Institut National de Recherche et de Sécurité), l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), l'Afssaps... La demande de réglementation sur la production et l'utilisation des nanoma-

tériaux, notamment ceux fabriqués à partir de nanoparticules, est en effet de plus en plus forte dans les pays occidentaux.

Les nanoparticules entrant dans la composition de ces nanomatériaux inquiètent car une fois ingérées, elles pourraient atteindre les alvéoles les plus profondes des poumons, franchir les barrières biologiques (cérébrale ou intestinale) et passer dans le sang plus facilement que des particules plus grosses. Elles inquiètent aussi d'un point de vue environnemental. Les nanoparticules d'argent, par exemple, qui sont présentes dans les biens de consommation : la question s'est posée aux États-Unis dès 2007 à cause d'un lave-linge qui en utilisait pour désinfecter le linge. Si l'action antibactérienne de l'argent est connue de longue date, les effets de ces nanoparticules sur ceux qui porteraient les vêtements ainsi lavés ou sur les micro-organismes, ne le sont pas. ●●●

2 - «Nanotechnologies : ce qui se vend», Jean-Marc Manach, octobre 2009, à cette adresse : <http://www.internetactu.net/2009/10/06/nanotechnologies-ce-qui-se-vend/>

## Une affaire de détournement

*Tout est parti des États-Unis.*

*Jun 1992 : la fibre écologiste d'Al Gore a tant vibré que, de retour du deuxième Sommet de la Terre (Rio de Janeiro), il organise une audition au Sénat des meilleurs spécialistes américains sur le thème des «nouvelles technologies pour un développement durable». Parmi les personnalités auditionnées : Eric Drexler, ingénieur, auteur de «Engins de création : l'avènement des nanotechnologies», en 1986. Son discours, expliquant que le contrôle molécule par molécule de la construction d'une machine peut devenir une technologie plus propre et plus efficace que toutes les écologies connues, convainc l'auditoire, ce d'autant plus qu'il signale fort à propos que les Japonais ont dégagé d'importants financements pour la manipulation des atomes. Les industries électroniques japonaise et coréenne affichent une très belle santé qui donne des sueurs froides aux États-Unis. Il faut sauver la recherche scientifique américaine ! Le président Bill Clinton confie cette lourde tâche à son vice-président Al Gore, qui rend ses conclusions en août 1994 dans un rapport intitulé «Science in the National Interest». Et là, nulle trace de développement durable ! Les nanotechnologies sont soudain devenues cruciales, non pour le développement durable de la planète, mais pour l'avenir immédiat de la microélectronique, de l'industrie chimique et de l'industrie pharmaceutique. Que s'est-il passé ? Devant l'importance de l'enjeu que représentait la réorganisation de la recherche américaine - et des fonds qui allaient de pair - un lobby industriel est monté au créneau pour influencer sur le contenu du rapport. Il n'a fait qu'une bouchée d'Eric Drexler et du groupe de pression «pro-développement durable». Ce lobby industriel est mené par Mihail Roco (à la tête*

*de la division Ingénierie de l'Agence nationale de la science américaine, NSF), qui fait partie de ceux qui sont persuadés que l'approche technologique descendante, c'est-à-dire la voie de la miniaturisation, est la seule valable. Pour lui, les nanotechnologies englobent toutes les technologies de miniaturisation qui touchent de plus ou moins près à l'échelle du nanomètre. Début 1997, il est contacté par Tom Kalil, conseiller du président Clinton pour les questions économiques, en vue d'évaluer les retombées économiques éventuelles des nanotechnologies. Se met alors en place un groupe de travail qui, au bout de deux années d'efforts, aboutira sur la création de la National Nanotechnology Innovation, NNI, le 11 mars 1999. Trois mois après, une nouvelle audition est organisée par la Chambre des représentants, où intervient notamment Richard Smalley (Prix Nobel de chimie en 1996 pour la découverte des fullerènes). Il va prendre une telle place qu'un troisième groupe de pression se met en place autour de lui. Il prend soin, dans toute ses interventions, de choisir des problèmes importants et bien connus du grand public, comme la lutte contre le cancer ou les ressources en énergie, pour les relier aux nanomatériaux, donc aux nanotechnologies. La NNI couvre désormais toute la science des matériaux sans distinction, la microélectronique, les nouveaux carburants et jusqu'aux biotechnologies...*

*Bill Clinton annonce officiellement la création du programme NNI le 21 janvier 2000. Aucun pays ne résistera à cette définition américaine des nanotechnologies. Et le monde devint nano...*

*Plus de détails : «Nanosciences, la révolution invisible», Christian Joachim et Laurence Plévert.*



Les nanoparticules rejetées par les moteurs diesel (plus de dix millions de particules d'un diamètre inférieur à 100 nanomètres par centimètre cube) ou par les grillades de barbecue font déjà l'objet de mises en garde.

Ainsi, les nanomatériaux composés de nanoparticules ou de nanotubes de carbone doivent faire l'objet d'une surveillance accrue, tout comme il en va d'un grand nombre de produits chimiques et biochimiques. Quelque 100 000 composés chimiques sont employés couramment dans les pays industrialisés, et l'on ne connaît la toxicité que d'environ un tiers d'entre eux<sup>3</sup>. De même, on ne connaît pas les dangers des fibres céramiques réfractaires qui ont remplacé les fibres d'amiante comme isolant thermique dans les garnitures de freins, les pots catalytiques ou l'isolation de fours et de chaudières. On ne connaît pas non plus exactement les risques des fibres de carbone présentes dans les raquettes de tennis, les coques de bateau et les vélos, ainsi que des fibres para-amides, dont le diamètre est mille fois plus large qu'un nanotube de carbone.

Ce que je veux dire par là, c'est qu'il ne faut pas que les nanoparticules et les nanotubes de carbone deviennent l'arbre qui étouffe la nanotechnologie. On est en pleine réémergence de cette vieille croyance occidentale que «plus c'est petit, plus c'est méchant». Cette association est fautive. C'est l'image de Merlin qui, pour battre la sorcière, se transforme en virus. Une expérience a été faite avec le TiO<sub>2</sub> sur les algues de mer : si on n'excède pas trop en concentration, elles continuent à pousser. Ce qui n'est pas le cas si on en met 100 fois ou 1000 fois plus. C'est une question de dosage.

On a mis des siècles à éliminer nos peurs quand on a pu voir les bactéries et les virus, grâce à l'invention des microscopes optiques et électroniques. Voilà que l'on remet une couche de peurs après l'invention d'un nouveau microscope, le microscope à effet tunnel. Mais que les nanomatériaux font partie de la génération de ces morceaux de matière accessible avec ces bons vieux microscopes optiques et électroniques.

### **Vous dites que nanomatériaux et nanoparticules ne sont pas forcément synonymes de danger, quel intérêt présentent-ils ?**

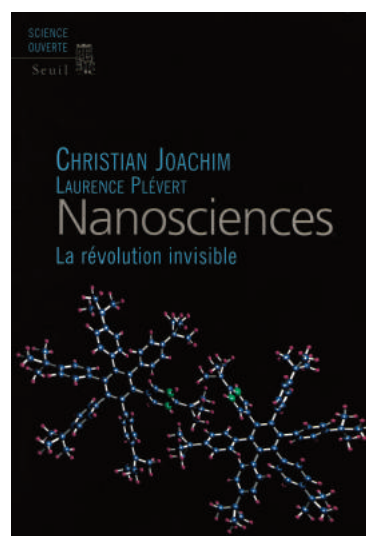
Certaines nanoparticules doivent certainement être utilisées avec précaution, tout comme certaines molécules de «synthèses» ou certaines molécules «naturelles». Certaines nanoparticules sont inoffensives et d'autres très utiles. Une particule sphérique de cinq nanomètres de diamètre peut contenir quelques milliers d'atomes, et donc transporter une substance thérapeutique. Les nanoparticules sont, on

<sup>3</sup> - « Ignorance toxique », Mohamed Larbi Bouguerra, *Le Monde diplomatique*, juin 2002

l'a vu, capables de franchir la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau, c'est pourquoi elles offrent un formidable intérêt médical. Elles pourraient, associées à des médicaments, traiter plus efficacement les tumeurs cérébrales par exemple, qui sont difficiles à soigner à ce jour. De nombreux médicaments anti-cancéreux ne passent en effet pas la barrière hémato-encéphalique.

D'autres nanoparticules sont aussi développées pour atteindre des cellules. Les nanoparticules pourraient servir à repérer les cellules cancéreuses. Imaginons-les dotées d'un système de reconnaissance : elles agiraient comme des «têtes chercheuses» pour se fixer sur les cellules malades, où elles libèreraient le principe actif. Elles pourraient aussi contenir un amas métallique qui, excité par un laser, chaufferait et détruirait les cellules malades. Il serait dommage de se priver de ces formidables avancées médicales.

Notons pour terminer que la belle aventure des matériaux nanostructurés (les fameux nanomatériaux) prend ses racines dans la science des matériaux avec une chimie du solide bien maîtrisée utilisant force de techniques de caractérisation comme les microcopies optiques et électroniques conjugués aux déterminations structurales par Rayon X. Comme souhaitée lors du bouillon de culture «nano» du début des années 90, l'invention du microscope à effet tunnel a ouvert une aventure différente de celle des nanomatériaux : il n'est pas nécessaire de remonter à l'échelle des nanomatériaux pour construire un dispositif ou les pièces d'une machine. La molécule est la machine. À nous d'inventer les outils de nano-communication pour poursuivre cette nouvelle aventure. ■



#### En savoir plus

- «Nanosciences : la révolution invisible», Christian Joachim et Laurence Plévert, Éd. du Seuil, 2008

**Interview**

André Picot

# «Des nanoparticules aux nanomatériaux : quels risques pour la santé et l'environnement ?»

**André Picot est toxicochimiste, directeur de recherche honoraire du CNRS et président de l'Association Toxicologie-Chimie, ATC Paris.**

**Quel est le problème ?**

Depuis la nuit des temps, nous sommes en contact avec des nanoparticules, que ce soit en respirant l'air marin riche en chlorure de sodium nanométrique (le sel), ou en s'étouffant, pris dans un vent de sable riche en nanoparticules de silice cristalline. Alors, quels sont les véritables risques de ces nanoparticules ?

Assurément très variés, comme dans le cas des molécules chimiques classiques. Il y a quelques effets bénéfiques, comme l'air marin si salubre à nos bambins ! Par contre, les tornades sahariennes peuvent être mortelles, comme j'ai pu le constater à Colomb-Béchar.

Actuellement, les véritables risques commencent seulement à apparaître avec certains matériaux nanométriques élaborés par l'Homme.

Ces matériaux sont de plus en plus nombreux, ils se retrouvent partout dans notre vie quotidienne, par exemple de l'alimentation, à nos soins corporels... et, bien entendu, sans que nous en soyons informés !!

À titre d'exemple, le marché mondial des nanomatériaux est estimé actuellement à 500 milliards de dollars ; son doublement est prévu en 2015. Pour les industriels, qui pourraient s'en plaindre ?

En 2004, la Royal Society britannique estimait : «*Tant que les impacts environnementaux des nanoparticules ne sont pas connus, il faudrait éviter de les répandre partout*».

De sages recommandations, mais parfaitement utopiques !!

Si l'on prend le cas du nanoargent (utilisé sous le nom d'argent colloïdal comme bactéricide puissant), dont plus de 500 tonnes /an sont produites dans le monde, la majorité se retrouve éliminée dans les milieux aquatiques, où ils ne se privent pas de fortement perturber les bactéries des sta-

tions d'épuration. Actuellement, aucune recommandation ne prend en compte cette pollution... On nage dans l'irrationnel total.

**Les dangers pour la santé des nanoparticules : de réelles interrogations**

Depuis quelque temps, les nanoparticules libérées par les activités industrielles créent des soucis à l'Homme et à son environnement. Ainsi en 1952, le smog qui s'était abattu sur Londres tua des milliers de personnes. Or, l'agent causal principal était des particules dites ultra fines et nanométriques, libérées par les sites industriels. Durant cette tragédie nationale, il fut constaté qu'en plus des redoutables pathologies respiratoires, des atteintes cardiovasculaires pouvaient entraîner des issues fatales.

En milieu du travail, divers accidents mortels peuvent maintenant être attribués aux nanoparticules. Il en va ainsi de la fièvre des fondeurs de zinc, dont la mort subite était restée incompréhensible.

**Comment expliquer les effets toxiques des nanoparticules ?**

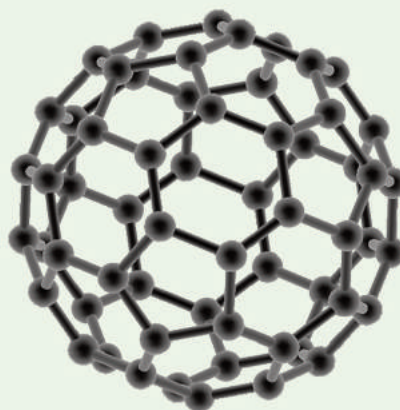
Pour tenter de comprendre comment les nanoparticules agissent sur les organismes vivants, il faut se rappeler ce qu'est un nanomètre ! Un nanomètre (nm) correspond à un milliardième de mètre ( $10^{-9}$  soit 0, 000 000 001 mètre), ce qui signifie qu'un nanomètre est au mètre, ce que le diamètre d'une orange est à celui de la Terre.

Une cellule vivante, comme celle des alvéoles pulmonaires (dénommées pneumocytes), mesure en moyenne 1 000 nanomètres soit un micromètre). On peut facilement imaginer qu'une nanoparticule n'aura aucun mal à se faufiler ●●●

## Classement OCDE des nanomatériaux

*Fullerènes (C60) ; Nanotubes de carbone feuillet simple (SWCNTs) ; Nanotubes de carbone multi feuillets (MWCNTs) ; Nanoparticules d'argent ; Nanoparticules de fer ; Noir de carbone ; Dioxyde de titane ; Oxyde d'aluminium ; Oxyde de cérium ; Oxyde de zinc ; Dioxyde de silicium ; Polystyrène ; Dendrimères ; Nanoargile.*

*Source : «Cahier d'acteur sur le développement et la régulation des nanotechnologies».*



*Molécule de fullerène C60*

●●●

entre deux pneumocytes d'une alvéole pulmonaire et se retrouver ainsi dans le sang, véhiculée par le capillaire qui enlace l'alvéole pulmonaire. Une fois dans le sang, par des mécanismes similaires, la nanoparticule franchira la barrière hémato-encéphalique qui protège le cerveau, mais aussi le placenta qui assure l'alimentation du fœtus.

Une fois admis qu'après avoir pénétré dans l'organisme par la voie respiratoire, la peau ou la voie digestive, les nanoparticules peuvent se répartir partout et vont pouvoir interagir sur divers sites biologiques.

Sans entrer dans les détails, les nanoparticules peuvent intervenir d'un point de vue réactivité comme des éléments chimiques classiques. Ainsi, au niveau cellulaire, ces nanoparticules peuvent agir comme des catalyseurs de réactions d'oxydation. Cette agression oxydante (aussi dénommée stress oxydant) va entraîner une accélération du vieillissement cellulaire, qui pourra en final aboutir, par exemple, à un processus neurodégénératif ou à un cancer.

Dans la réalité, qu'observe-t-on chez l'Homme ? Dès l'entrée dans les poumons, certaines nanoparticules peuvent entraîner des inflammations qui aboutiront à diverses pathologies chroniques, comme l'asthme, voire des cancers. Des études épidémiologiques sont déjà en cours.

Par ailleurs, certaines nanoparticules, augmentant la viscosité sanguine, pourront entraîner des accidents cardiovasculaires. Pour l'instant, pas de données sur leur impact sur la reproduction...

### Quels effets des nanoparticules sur l'environnement ?

Actuellement, on ne dispose pratiquement pas d'éléments de réponse. Ces nanoéléments et ces nanomatériaux ne sont certainement pas totalement inoffensifs. Malheureusement, on manque de recul.

Néanmoins, il apparaît que les animaux à sang froid (poissons, batraciens, etc.) sont particulièrement sensibles à certains nanoéléments, comme le nanoargent, un biocide très efficace.

### Quel avenir nous réserve le monde «enchanté» des nanotechnologies ?

Il faut l'avouer, personne n'est en mesure d'apporter la moindre réponse scientifique... sinon des profits tous azimuts !

Pour commencer, aucun règlement n'est actuellement appliqué dans l'Union européenne pour les nanoparticules. Néanmoins, elle va commencer prochainement à imposer un étiquetage pour les produits cosmétiques ; mais, pour l'instant, rien n'est prévu en agroalimentaire.

En réalité, l'espoir d'une « nanotechnologie verte » n'est pas pour demain, on ne peut que le regretter ! En affaires, le monde de « l'argent » n'est certainement pas à l'échelle nanométrique !! ■

#### Quelques lectures conseillées

- [Le site de l'Association Toxicologie-Chimie](http://atctoxicologie.free.fr) : <http://atctoxicologie.free.fr>

- «Les nanoparticules : un enjeu majeur pour la santé au travail», Benoît Hervé-Bazin, Éd. EDP-Sciences, 2007

- «Inventons une nanoscience toxicochimique», André Picot, ATC, 2010

- «Les nanoparticules : quels impacts sur notre santé ?», Géraldine Briand et André Picot, Environnement technique, tome 299 p. 54 à 56, septembre 2010

- «Le nanoargent : une nouvelle carrière pour l'argent ?», ATC, 2010

- «Les nanosciences - Tome 4, Nanotoxicologie et nanoéthique», Marcel Lahmani, Francelyne Marano, Philippe Houdy, Éd. Belin, 2010