

Les nanotechnologies, comment décider par temps de brouillard

Les nanotechnologies¹ suscitent un immense intérêt, déchainent les passions, et un débat public est même organisé pour la fin de l'année 2009, alors qu'un grand flou enveloppe le concept. Comment prendre des décisions en nageant en plein brouillard ?

La démarche que nous proposons au terme de notre mémoire de troisième année du Corps des Mines² consiste à poser des définitions claires, identifier les réalités industrielles, déduire les risques associés, et réfléchir à la meilleure façon de les prévenir en tenant compte de la faisabilité technique actuelle.

Les nanotechnologies, une imposture ?

Les nanotechnologies n'évoquent pas la même chose pour tous : le physicien pensera à des propriétés quantiques, le directeur de laboratoire verra un label rapportant des subventions, l'écologiste devinera une nouvelle poussière dangereuse, et le romancier sera inspiré par des nanorobots doués de vie. Certains soutiennent même que les nanotechnologies ne sont qu'une vaste supercherie, un relooking tendance des vénérables sciences des matériaux. En effet, la définition communément admise et donnée par la National Nanotechnology Initiative (NNI)³, à savoir la compréhension et la maîtrise de la matière à l'échelle du nanomètre (nm)*, permet d'y inclure presque toute la physique, la chimie et la biologie, puisque les molécules, briques essentielles de la matière, ont des dimensions de cet ordre. Et de fait dès l'origine les « nanos » s'apparentent à une vaste opération de communication brillamment orchestrée par les conseillers scientifiques américains pour remettre les sciences de la matière au cœur des subventions gouvernementales. Les industriels ne s'y sont d'ailleurs pas trompés, en jouant sur le label nano comme d'un synonyme de high-tech du petit. **Être ou ne pas être nano, ce n'est donc pas une question conceptuelle, mais une question de stratégie.** Un jour, les nanos ont le vent en poupe, et voici que fleurissent des Ipod Nano, des nanosomes ou même des voitures Tata Nano. Le lendemain, les nanos inquiètent, et



voilà que certains produits estampillés la veille nano ne le sont plus.

Un besoin de définitions restreintes

Alors, les nanos, un terme marketing de plus ? Il ne faut pas tomber dans l'excès inverse, car les nano-objets amènent une révolution conceptuelle qui ébranle les fondations réglementaires en matière de substances chimiques et qui doit structurer les définitions. On s'est en effet aperçu que les propriétés d'un édifice d'atomes pouvaient non seulement dépendre de sa structure chimique mais aussi de sa taille, dépendance qui apparaît de manière drastique à l'échelle nanométrique. Par exemple, les particules d'or changent de couleur avec leur diamètre à cause de l'effet plasmon : rouges à 5 nm, elles virent au vert à 50 nm avant de retrouver la couleur jaune de l'or massif à 100 nm. Nous proposons donc de limiter la notion de nano-objet à une structure possédant au moins une dimension comprise entre un et plusieurs centaines de nanomètres qui lui confère des propriétés physico-chimiques différentes de son homologue macroscopique. Cette définition permet de distinguer les nano-objets d'autres structures de la matière de taille nanométrique, et en premier lieu d'exclure les molécules dont la collection ou le degré de polymérisation n'apporte pas de changement de propriété : l'ADN par exemple n'est pas un nano-objet.

Les définitions approximatives de la NNI conduisent à inclure quasiment l'ensemble des procédés des matériaux dans les nanotechnologies. Afin d'en dégager la réelle spécificité, nous proposons de restreindre les nanotechnologies aux techniques de fabrication qui gravitent autour des nano-objets, et nous distinguons trois catégories : la synthèse chimique des nano-objets, leur incorporation dans des substances nanocomposites et leur utilisation dans des nanodispositifs.

Une première catégorie regroupe les procédés de synthèse des nano-objets de l'industrie chimique. Il s'agit de produire une substance en grande quantité, par exemple des nanotubes de carbone, avec le meilleur rendement et la plus grande pureté possibles. Les risques industriels posés sont classiques, que ce soit l'explosion des poudres, la toxicité et l'agressivité des produits pour le travailleur, ou la pollution, mais peuvent être bien suivis dans l'enceinte circonscrite de l'installation, moyennant des évolutions techniques et réglementaires.

Le deuxième groupe de procédés concerne l'incorporation de nano-objets dans des substances que nous qualifierons de nanocomposites. Les nano-objets sont dispersés ou synthétisés in situ dans la matrice ou en surface d'un solide, dans un liquide ou même un gaz, pour lui donner des propriétés intéressantes, comme inclure des nanotubes de carbone dans des plastiques pour les rendre conducteurs. Outre les risques industriels, se pose la problématique de la dissémination potentielle des nano-objets par les produits, et donc de l'exposition des consommateurs et des écosystèmes à des substances dont la toxicité est mal connue, problématique qui est plus délicate à gérer que le risque au travail.

Enfin, la dernière catégorie rassemble des techniques qui manipulent des quantités de matière extrêmement faibles avec une précision nanométrique. Elles permettent d'organiser la matière selon des architectures précises afin de créer des systèmes miniaturisés dans lesquels sont intégrés des nano-objets. Par exemple, l'électronique utilise actuellement des procédés de dépôt et gravure par lithographie optique de couches. On attend de plus une rupture apportée par des techniques contrôlant le positionnement spatial de nano-objets isolés, aussi bien pour des dispositifs électroniques que pour des applications médicales. Ces

technologies ne présentent pas de risques en soi, mais en décuplant les possibilités des Technologies de l'Information et la Communication, elles font craindre certaines dérives sociétales possibles, comme la surveillance totalitaire des individus.

Mythes et réalités des nanotechnologies

Après avoir identifié les nanotechnologies, interrogeons-nous sur leur portée concrète en termes d'applications. Logiquement, on s'attend à ce que les applications les plus industrialisées soient au cœur des débats. Il n'en est rien. En effet, certaines applications peu réalistes sont fréquemment évoquées, alors que d'autres font déjà l'objet d'une production industrielle mais sont occultées. **Il existe donc une disjonction entre la médiatisation des applications des nanotechnologies et la vraisemblance de leur concrétisation**, disjonction que nous allons visualiser par une matrice composée de quatre quadrants : les fantasmes, les bombes, les bourgeons et les icebergs. De la gauche vers la droite, nous allons de l'hypothétique au concret. Du haut vers le bas, du médiatique vers le furtif.

Les substances nanocomposites sont de véritables icebergs. La cosmétique incorpore massivement depuis une vingtaine d'années des nanoparticules d'oxyde de titane (TiO₂) dans les protections solaires. Les matériaux nanocomposites sont en fort développement, avec un champ d'applications variées : résines conductrices à nanotubes

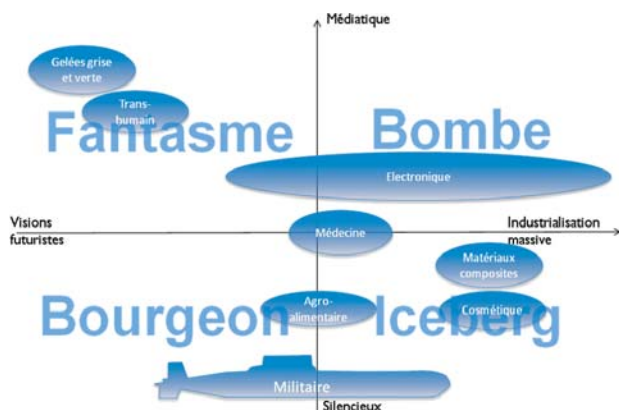
« Les industriels communiquent peu, car l'étiquette nano inquiète désormais le grand public et ils ne veulent pas devenir les cibles des antinanos les plus virulents. »

de carbone, nanoparticules d'argent pour revêtements antibactériens ou encore nanoparticules pour cellules photovoltaïques performantes. Enfin l'absence d'informations fiables est encore plus flagrante dans l'agroalimentaire comme le souligne l'AFSSA : « *il n'est cependant pas possible d'identifier les produits commercialisés relevant des nanotechnologies.* »⁴

Industrie pionnière et premier débouché des nanotechnologies, l'optoélectronique⁵ a fait un bond spectaculaire depuis 15 ans grâce à l'amélioration des techniques de gravure et dépôt qui ont permis la miniaturisation exponentielle des composants semi-conducteurs. L'intégration de nanostructures a permis également l'avènement de nouveaux dispositifs, tels que les vanes de spin utilisées dans les têtes de lecture de disques durs haute densité. D'autres concepts en revanche, comme l'ordinateur quantique ou le transistor à nanotube, restent à l'état de recherche amont. La nanomédecine fait naître de formidables espoirs. Certaines applications, comme l'utilisation de nanoparticules magnétiques pour la localisation de cellules cancéreuses, sont en cours de tests cliniques. On peut espérer diriger précisément un principe actif vers une cellule infectée avec des nanoparticules, ou à plus long terme fabriquer des rétines artificielles pour les malvoyants.

Très discrets, les militaires sont bien sûr des acteurs essentiels en nanotechnologies pour de multiples applications : batteries, capteurs, blindages, explosifs...

Les perspectives des nanodispositifs ont ouvert la voie aux spéculations les plus futuristes sur la convergence



entre nanotechnologie, biologie, informatique et sciences cognitives. Elles inspirent de nombreuses productions artistiques ou philosophiques. Citons notamment les gelées grises et gelées vertes⁶, à savoir des nano-robots pouvant se reproduire, à la frontière entre l'inerte et le vivant, ou encore la « smart dust », composée de milliards de capteurs permettant de faire de l'espionnage à grande échelle. Le potentiel transhumaniste de dispositifs biocompatibles décuplant les capacités de l'homme fait également couler beaucoup d'encre⁷. Cependant, les nanosystèmes actuels sont encore bien loin de cet aboutissement et certains indices scientifiques permettent même de douter de la faisabilité technique⁸ de telles innovations qui sont donc à classer actuellement parmi les fantasmes.

Des mythes encombrants...

Pourquoi les aspects hypothétiques et médiatiques sont-ils corrélés ? Premièrement, une technologie est d'autant plus médiatisée qu'elle est spectaculaire et contient une part de rêve, de science-fiction. Nanorobots vivants, cyber-humanité immortelle, la science se met à promettre d'exaucer les fantasmes millénaires de notre espèce. Nul étonnement donc que ces thèmes démiurgiques trouvent une large audience auprès du grand public comme auprès des intellectuels. De même les revues scientifiques les plus prestigieuses comme Nature ou Science préfèrent les exploits de laboratoire comme la téléportation quantique aux mises au point fastidieuses de la recherche industrielle. En outre, les différents acteurs s'expriment inégalement. Les « nanosceptiques » multiplient les communications⁹ pour sensibiliser le grand public. Ils ont acquis un soutien influent auprès des grandes instances éthiques et religieuses, inquiètes des dérives transhumanistes ou des nanorobots. En revanche, les industriels communiquent peu¹⁰, car l'étiquette nano inquiète désormais le grand public et ils ne veulent pas devenir les cibles des "antinanos" les plus virulents.

Evaluer le développement économique réel des nanotechnologies est donc bien difficile dans ce contexte de disproportion médiatique qui nous aveugle d'applications hypothétiques. Le débat citoyen se cristallise beaucoup autour des risques éthiques et sociétaux liés aux mésusages des applications, comme les implants cérébraux ou la menace Big Brother. Ces débats ne sont pourtant pas propres aux nanotechnologies, et nécessitent d'être traités dans un cadre plus général. En revanche les risques intrinsèques aux

nanotechnologies, à savoir la toxicité et l'écotoxicité des nano-objets, doivent clairement être exposés au débat public en raison de l'accroissement des substances nanocomposites dans notre quotidien.

...Et une réalité désarçonnant nos législations

Les nano-objets posent un problème aigu de fondement opérationnel de nos législations. Le concept de nano-objet est en effet relativement inconfortable du point de vue juridique, parce qu'un nano-objet ne peut pas être reconnu comme tel a priori, mais seulement lorsque des propriétés spécifiques à sa taille sont établies. Identiques en composition, mais différents en substance de leurs homologues macroscopiques, les nano-objets remettent de plus en question la classification des produits chimiques. Il n'y a plus l'or mais des variétés d'or. Le problème est d'autant plus épineux que les propriétés d'un nano-objet sont souvent influencées par son état de surface et donc potentiellement par son environnement.

Du point de vue de la mise en œuvre concrète, les réglementations se heurtent également aux difficultés techniques. La réglementation européenne Reach impose aux filières industrielles de mener les analyses toxicologiques de toute substance chimique en circulation. Cependant si Reach est théoriquement couvrant pour les nano-objets, le contenu méthodologique reste à construire. En effet, alors que la chimie structurale permet de prévoir la réactivité et la biodisponibilité d'une molécule, les modèles reliant ces facteurs aux caractéristiques d'un nano-objet ne sont actuellement pas établis. En outre, les protocoles expérimentaux existants ne sont pas toujours applicables aux nano-objets, car la plupart sont instables et s'agrègent facilement. En conséquence les résultats actuels manquent de représentativité.

Avec la multiplication de substances nano-composites, les risques sont non seulement sur le site de travail mais également véhiculés par les produits. Via l'article 37 du projet de loi de programmation relatif à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement, l'État s'attaque donc à la traçabilité des nano-objets en rendant obligatoire la déclaration administrative de la fabrication, l'importation ou la mise sur le marché de substances à l'état nanoparticulaire ou issues de nanotechnologies. Cependant la mise en œuvre du Grenelle risque de ne pas être efficace si elle n'est pas



coordonnée à l'échelle internationale, car les industriels auront des difficultés à obtenir ces informations de leurs fournisseurs à l'étranger qui n'ont pas cette contrainte.

De plus, les dispositions du Grenelle peuvent être mises en défaut par la contamination involontaire de produits via le cycle de vie et le recyclage des substances nanocomposites. Car si on en vient à devoir contrôler les compositions des produits manufacturés, force est de constater que les pouvoirs publics comme les entreprises seront démunis de moyens de caractérisation adéquats, la métrologie en matière de nano-objet étant balbutiante. Actuellement en effet, les analyses permettant de déterminer la composition exacte ne peuvent se faire qu'en laboratoire au moyen d'une combinaison d'instruments extrêmement coûteux ou de prototypes. Développer la filière de la métrologie des nano-objets est par conséquent un enjeu de tout premier plan à mettre d'urgence à l'ordre du jour.

Une voie à explorer : le confinement

Les volontarismes du Grenelle et de Reach sont concrètement subordonnés au rythme des progrès en métrologie et en toxicologie, qui peut demander des années. Dans cette course contre la montre, alors que les risques aigus seront bien couverts, les risques chroniques et les impacts de la pollution sur les écosystèmes le seront moins. Or l'acceptation du risque par les sociétés occidentales ne permet plus les scandales de la silicose ou de l'amiante.

Doit-on pour autant interdire sans discernement nano-objets et nanotechnologies au nom du principe de précaution ? Cette attitude radicale n'est pas raisonnable, tant certaines applications sont bénéfiques. Les filtres nanoporés par exemple peuvent permettre d'assainir l'eau à moindre coût et sauver des millions de vies. Alors, quelle mesure prendre qui puisse limiter les risques sanitaires et environnementaux à des niveaux de qualité acceptables ? La clef du succès repose sur la notion de confinement, aussi bien dans l'environnement de travail, que dans le design du produit lui-même. La mise en œuvre repose sur la méthode des « bandes de contrôle »¹¹, une échelle des risques toxicologiques qui permet de limiter l'exposition au travail à une substance en fonction des informations disponibles sur sa toxicité, l'absence d'information étant qualifiée de risque maximal. Une telle démarche pourrait être étendue au design du produit, du berceau à la tombe, en analysant l'intégralité de son cycle de vie. Elle présente l'avantage de tests relativement simples à mettre en place et donne un critère discriminant pour désigner les applications potentiellement dangereuses. En l'occurrence les applications à forte dispersion comme les agents phytosanitaires, les détergents domestiques et tout autre liquide ou aérosol destiné à la grande consommation devraient être dans un premier temps proscrites. Il en est de même pour les nano-aliments, pour qui le facteur d'exposition est maximal, et il ne serait pas inutile d'exiger des études environnementales pour les cosmétiques contenant du TiO₂, dont le facteur de dispersion est important.

Choisir les innovations prometteuses

Enfin les risques ne peuvent pas être appréciés en faisant abstraction des bienfaits. Nous devons statuer sur les applications des nanotechnologies au cas par cas et en fonction des bénéfices et des risques de chacune. Quantifier les bénéfices contient inéluctablement une part de subjectivité. Finançant une grande partie la recherche, les pouvoirs publics sont en mesure d'orienter les choix en matière d'applications des nanotechnologies. Choisir les personnes qui évalueront les bénéfices des nanotechnologies est un acte politique en soi. On peut envisager de faire choisir les citoyens, mais nous pensons que la création d'une autorité

administrative indépendante¹² serait la réponse la plus adaptée. Quelle que soit la méthode retenue, certains apports des nanotechnologies devraient remporter l'unanimité car ils répondent à des enjeux mondiaux, notamment dans l'énergie, l'assainissement des eaux ou encore les technologies de l'information et de la communication.

Conclusion

Il est actuellement impossible de lever totalement le brouillard qui enveloppe les nanotechnologies, mais nous pouvons déjà le limiter à nos lacunes scientifiques. Cela n'empêche pas d'agir et de prévenir les risques sans bloquer le développement de technologies prometteuses, en respectant la notion de confinement dans l'utilisation des nano-objets. Les actions à prendre doivent dépendre du rapport bénéfices /risques des différentes applications, et nous pensons que cette appréciation devrait être confiée à une autorité administrative indépendante.

Julie Dubois et François Rousseau,
ingénieurs des Mines

NOTE

¹ Le terme «nanotechnologie» fait référence au «nanomètre» (nm) qui signifie milliardième de mètre, c'est-à-dire un millième de «micromètre» (millionième de mètre).

² *Fascinantes nanotechnologies*, Julie Dubois et François Rousseau, 2009.

³ Programme fédéral américain dédié aux nanotechnologies depuis 2001.

⁴ Rapport de l'AFSSA *Nanotechnologies et nanoparticules dans l'alimentation humaine et animale*, mars 2009.

⁵ Environ 60% du chiffre d'affaire des nanotechnologies d'ici 10 ou 15 ans d'après *Societal Implications of Nanoscience and Nanotechnology* publié par la National Science Foundation (NSF), 2001.

⁶ Drexler, *Engines of Creation*, 1986 et Crichton, *Prey*, 2003.

⁷ Deux éminents membres de la NSF, Mihail Roco, haut conseiller pour les nanotechnologies et William S. Bainbridge, co-directeur de l'Information et des Systèmes Intelligents sont publiquement partisans de l'emploi des nanotechnologies pour améliorer l'Homme.

⁸ *Of Chemistry, Love and Nanorobots* de Richard Smalley (prix Nobel de chimie 1996).

⁹ Par exemple «De Toulouse à Gaza, les nanotechnologies ça sert à faire la guerre» par l'association grenobloise PMO connue pour ses virulentes critiques à l'encontre des nanotechnologies.

¹⁰ Notamment l'Oréal et Michelin, «Les nanotechnologies déjà condamnées», *Les Echos*, 14 Novembre 2006.

¹¹ Étudié par l'AFSSET et défendue avec succès par l'AFNOR à l'ISO.

¹² L'Académie des Sciences suggère une «Agence Nationale des Nanosciences et Nanotechnologies qui jouerait un peu le même rôle que l'IN2P3 pour la physique nucléaire et la physique des particules» dans un rapport publié en 2004.

La *Gazette de la Société et des Techniques* a pour ambition de faire connaître des travaux qui peuvent éclairer l'opinion, sans prendre parti dans les débats politiques et sans être l'expression d'un point de vue officiel. Elle est diffusée par abonnements gratuits. Vous pouvez en demander des exemplaires ou suggérer des noms de personnes que vous estimez bon d'abonner.

Vous pouvez consulter tous les numéros sur le web à l'adresse :
<http://www.annales.org/gazette.html>

RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS Dépôt légal mai 2009

La Gazette de la Société et des techniques

est éditée par les *Annales des mines*,
120, rue de Bercy - télédéc 797 - 75012 Paris
<http://www.annales.org/gazette.html>

Tél. : 01 42 79 40 84
Fax : 01 43 21 56 84 - mél : mberry@paris.ensmp.fr
N° ISSN 1621-2231.

Directeur de la publication : Pierre Couveinhes

Rédacteur en chef : Michel Berry

Réalisation : PAO - DPAEP - 4 B

Illustrations : Véronique Deiss

Impression : Royer



Liberté • Égalité • Fraternité

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE