



Fascinantes nanotechnologies: au-delà des grandes peurs, des grands doutes et des grands espoirs

Julie Dubois, François Rousseau

► To cite this version:

Julie Dubois, François Rousseau. Fascinantes nanotechnologies: au-delà des grandes peurs, des grands doutes et des grands espoirs. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2009. <hal-01785085>

HAL Id: hal-01785085

<https://minesparis-psl.hal.science/hal-01785085v1>

Submitted on 4 May 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



ÉCOLE DES MINES
DE PARIS

1E1 [560]
MINES ParisTech
BIBLIOTHÈQUE
60, boulevard St-Michel
75272 PARIS CEDEX 06

Fascinantes nanotechnologies

**Au-delà des grandes peurs, des grands
doutes et des grands espoirs**

Julie Dubois et François Rousseau (PO2006)

23/08/2009

RESUME : DE FASCINANTES TECHNOLOGIES

Les nanotechnologies (« nano » veut dire que nous parlons de dimension de l'ordre du nanomètre, soit le milliardième de mètre) font appel à des notions de physique poussées, comme l'effet plasmon, l'effet tunnel, ou la spintronique. On pourrait penser que ces concepts théoriques et ardues ont un effet repoussant et dissuasif sur le profane, mais force est de constater qu'au contraire, c'est un sujet qui passionne. Et nécessairement, ces technologies étant extrêmement complexes, ces passions génèrent des discours imprécis ou incorrects. (Chapitre I)

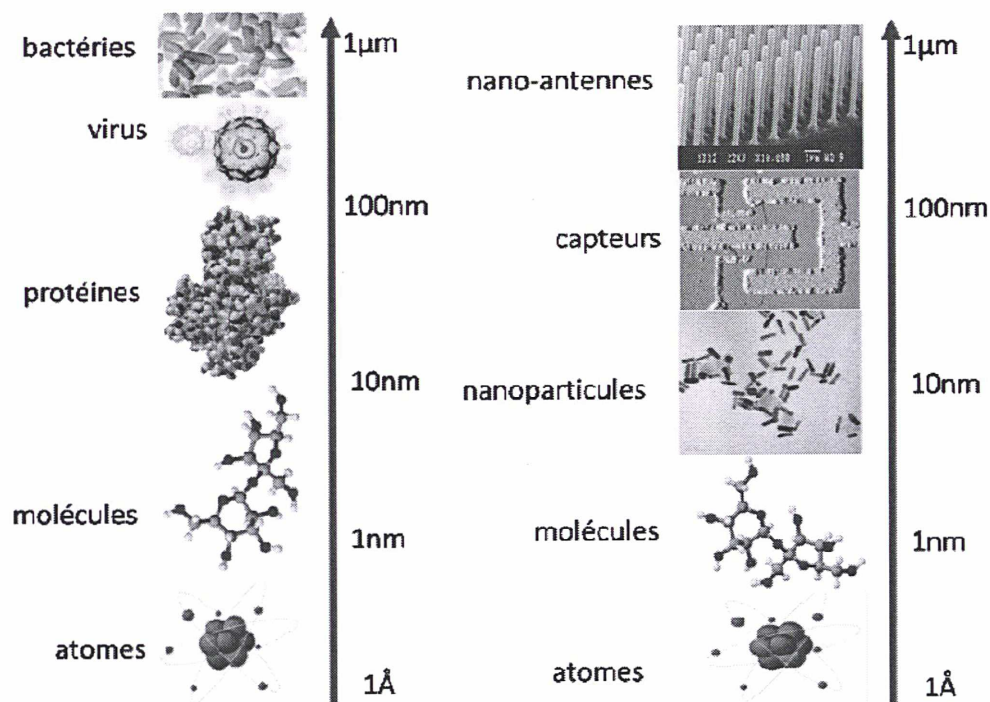


Figure 1 : échelles comparées pour les structures naturelles et celles issues des nanotechnologies

La définition communément adoptée par les agences publiques pour la recherche se fonde exclusivement sur l'échelle de taille nanométrique. Cette définition pauvre et trop large a accommodé un temps tous les acteurs du sujet, chercheurs, industriels, institutionnels et même

De fascinantes technologies

opposants, qui voyaient dans ce label « valise », un terme médiatique pratique pour attirer l'attention et les crédits. En vérité elle nous conduit à une impasse à force de regrouper des objets et des procédés complètement hétéroclites, en particulier en empêchant toute réflexion cohérente en matière de réglementation et d'évaluation des risques. (Chapitre II)

Nous proposons donc de restreindre le champ des nanotechnologies en nous reposant sur le concept central qu'est le nano-objet. (Chapitre III)

Un nano-objet est une structure de la matière dont une ou plusieurs de ces dimensions est ou sont de l'ordre nanométrique et lui confère(nt) des propriétés physico-chimiques différentes de son homologue macroscopique.

De là découle la catégorisation des nanotechnologies, à savoir des procédés de fabrication relatifs aux nano-objets et qui se répartissent en trois groupes :

- Les synthèses chimiques de nano-objets
- Les synthèses de matériaux nano-composites
- L'intégration de nano-objets dans des nano-dispositifs ou nanotechnologies de positionnement.

Nous pouvons ainsi redéfinir le périmètre économique des nanotechnologies et de leurs applications. On s'aperçoit alors qu'il est difficile d'appréhender quantitativement la réalité industrielle (Chapitre IV) et que notre perception est faussée par une distorsion médiatique de la concrétisation d'une application : nous sommes en présence soit de fantasme, soit d'iceberg (Chapitre V). La conséquence la plus importante est que nous avons du mal à évaluer l'imminence des risques industriels et toxicologiques due à l'apparition de ces nouvelles substances chimiques que sont les nano-objets.

Fascinantes nanotechnologies

En matière de risques chimiques, la question fondamentale n'est pas de savoir si les nano-objets sont dangereux, (cette question se pose pour toute substance chimique), mais plutôt de savoir si nos réglementations et leurs mises en œuvre sont opérationnelles face à de telles structures complexes, dont le comportement se trouve à mi-chemin entre les molécules et les poussières. Nous verrons que les réglementations demandent non seulement un ajustement conceptuel mais nécessitent d'urgence une remise à niveau complète des protocoles toxicologiques et de l'instrumentation de mesure. (Chapitre VI)

En conséquence nous proposons en l'état actuel des connaissances de piloter le développement des applications des nanotechnologies sur le principe du confinement par design. D'un point de vue institutionnel, un certain nombre d'associations et d'ONG réclament un changement de mode de gouvernance des choix scientifiques et techniques, argumentant que l'intérêt économique prend systématiquement le pas sur d'autres préoccupations citoyennes comme l'éthique et l'écologie. Il est clair que les institutions actuelles pourraient répondre aux différentes problématiques des nanotechnologies, mais elles ont besoin de coordination à l'échelle la plus large possible, de légitimité citoyenne et surtout d'une composante exécutive qui puisse mettre réellement en œuvre le suivi des nano-objets artificiels sur le marché et dans l'environnement. (Chapitre VII)

Mythes et légendes des nanos

Les nanotechnologies ont beau être un sujet extrêmement technique et extrêmement concret puisqu'elles s'intéressent à la manipulation de la matière dans l'infiniment petit (à savoir le milliardième de mètre), elles sont l'objet d'un débat qui largue bien souvent les amarres de la réalité pour naviguer dans le monde de la fable, des croyances et des mythes.

Certes le *Nautilus* sillonnait *vingt mille lieux sous les mers* plus de trente ans avant le premier sous-marin à propulsion mixte, et Hergé envoyait Tintin et ses compagnons sur la Lune en 1954 alors que Saturne V ne décollait que 15 ans plus tard de Cap Canaveral. De même les nanotechnologies furent au départ et restent encore en grande partie un sujet de science-fiction. Mais de manière étonnante, le débat actuel n'est plus capable de discerner les faits réels des possibles imaginés, et les décisions en matière de nanotechnologies reposent généralement sur des croyances et des spéculations.

1959 Feynman le visionnaire

La légende des nanotechnologies commence par un défi. Celui que le prix Nobel de physique Richard Feynman lance en 1959 à la communauté scientifique lors de sa célèbre conférence « *There is plenty of room at the bottom* »¹, ou encore « il existe un potentiel fabuleux dans l'infiniment petit ». Faisant le constat que le monde du vivant était capable de s'organiser à des échelles moléculaires, Feynman propose d'essayer de manipuler et ordonner les molécules et les atomes individuellement, comme des objets macroscopiques.

Pour mieux comprendre, il faut se replacer dans le contexte de cette conférence. La biologie moléculaire faisait des bonds spectaculaires, notamment avec la découverte de la codification du génome sur les

¹ **Feynman, Richard.** There is plenty of room at the bottom.
www.its.caltech.edu.

bases de l'ADN par Watson et Crick en 1953. Les techniques physiques de l'époque ne permettaient quant à elles d'obtenir des précisions que de quelques microns. Alors que l'ADN offrait un exemple biologique à la possibilité de stocker de l'information à l'échelle moléculaire, l'humanité consignait encore son savoir dans d'immenses bibliothèques et les tout premiers ordinateurs construits prenaient l'espace de plusieurs salles.

"Up to now, we have been content to dig in the ground to find minerals. We heat them and we do things on a large scale with them, and we hope to get a pure substance with just so much impurity, and so on. But we must always accept some atomic arrangement that nature gives us. We haven't got anything, say, with a « checkerboard' » arrangement, with the impurity atoms exactly arranged 1,000 angstroms apart, or in some other particular pattern."^{2,3}

On retrouve dans le discours de Feynman les grandes lignes de l'ambition des nanotechnologies, qui seront dénommées ainsi en 1974 par le Professeur Norio Taniguchi de l'université des sciences de Tokyo. Ordonner la matière dans l'infiniment petit pour miniaturiser, en particulier tout ce qui est du domaine du traitement de l'information, mais également pour créer de nouveaux matériaux, de nouveaux dispositifs grâce à la physique spécifique de ces échelles :

"When we get to the very, very small world---say circuits of seven atoms---we have a lot of new things that would happen that represent completely new opportunities for design. Atoms on a small scale behave like nothing on a large scale, for they satisfy the laws of quantum mechanics. So, as we go down and fiddle around with the atoms down there, we are working with different laws, and we can expect to do

² Ibid.

³ Jusqu'à présent, nous sommes satisfaits de creuser dans le sol pour trouver des minéraux. On les réchauffe et on les traite à l'échelle macroscopique, et on espère en tirer une substance pure, avec exactement tel taux d'impureté, etc. Mais on doit toujours faire avec tel arrangement atomique que la nature nous donne. Nous n'avons par exemple rien avec un arrangement en damier, avec les impuretés exactement séparées de 1000 angströms, ou dans un autre schéma particulier.

different things. We can manufacture in different ways. We can use, not just circuits, but some system involving the quantized energy levels, or the interactions of quantized spins, etc. "

Au fur et à mesure qu'il avance dans son discours vers des horizons de plus en plus lointains, Richard Feynman laisse de côté la question du comment faire, reconnaissant que pour la plupart il n'existe encore pas l'ombre du début de solutions techniques à son époque. Il est cependant convaincu qu'il est tout à fait plausible d'atteindre un tel niveau de maîtrise de la matière, tout simplement parce que selon lui les principes physiques ne s'y opposent pas.

"The principles of physics, as far as I can see, do not speak against the possibility of maneuvering things atom by atom. It is not an attempt to violate any laws; it is something, in principle, that can be done; but in practice, it has not been done because we are too big."^{4,5}

« *There is plenty of room at the bottom* » s'inscrit en cela dans la croyance du physicien pour qui rien n'est techniquement impossible du moment qu'on ne viole pas les lois fondamentales. Mais le savoir-faire humain peut-il réellement atteindre de telles limites ? Et peut-on réaliser de tels exploits non pas une fois dans un laboratoire, mais des milliards de milliards de fois sur les chaînes industrielles ?

⁴ Lorsque l'on atteint des échelles vraiment petites – par exemple des circuits faits de sept atomes – de nombreuses nouveautés surviennent et représentent des opportunités totalement nouvelles pour le design. Les atomes ne se comportent comme rien d'autre à échelle macroscopique, car ils obéissent aux lois de la mécanique quantique. Donc, lorsqu'on descend dans les échelles jusqu'à faire du bricolage avec les atomes, on travaille avec des lois différentes, et on peut s'attendre à différentes choses. On peut fabriquer de différentes façons. On peut utiliser non seulement des circuits mais des systèmes utilisant les quantifications des niveaux d'énergie ou les interactions des spins quantifiés, etc.

⁵ D'après ce que je peux voir, les principes de la physique ne se prononcent pas contre la possibilité de manipuler la matière atome par atome. Ce n'est pas une tentative de violer une loi de la physique ; c'est une chose qui peut en principe être faite ; mais en pratique, elle n'a pas été réalisée car nous sommes trop gros.

Les premiers jalons de la mise en œuvre du programme de Richard Feynman furent l'invention du microscope à effet tunnel (STM pour Scanning Tunneling Microscope) en 1981 par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer d'IBM, qui reçurent le Prix Nobel de physique en 1986, suivi par l'invention du microscope à force atomique (AFM pour Atomic Force Microscope) par Binnig, Quate and Gerber en 1986. Ces outils ouvraient la voie à l'investigation de la matière à l'échelle du nanomètre mais également à la manipulation d'objets uniques. En effet, ces microscopes observent au moyen d'une pointe très fine qui se déplace à la surface de l'objet à cartographier. Cette pointe peut également servir à déplacer des objets. Dans les années 90, soit trente ans après la conférence de Feynman, les premiers déplacements individuels d'atomes font sensation dans le monde de la recherche (voir Figure 2). Mais il s'agit là d'une technique de laboratoire extrêmement peu reproductible et donc non transférable actuellement au monde de l'industrie.

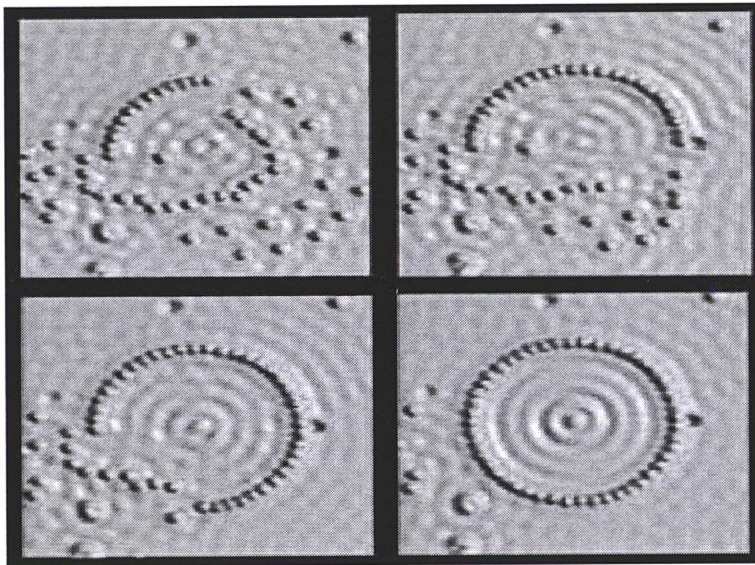


Figure 2 : Manipulation individuelle d'atomes de fer (sorte de pics sur l'image STM) sur une surface de cuivre par la pointe d'un STM pour obtenir un cercle

permettant l'émergence de fonction d'onde confinées (sorte de vaguelettes à l'intérieur du cercle). Source : IBM⁶.

1980 Les prophéties

Ces avancées technologiques spectaculaires ouvrent la voie aux prophètes, avec de manière prégnante la question de la convergence, c'est-à-dire de l'hybridation des systèmes biologiques et cognitifs avec des dispositifs artificiels électroniques et informatiques. En 1986, Eric Drexler publie *Engines of Creation : the coming era of nanotechnology*⁷ dans lequel il s'interroge sur les potentialités ultimes des nanotechnologies et annonce l'avènement de nano-robots capables d'autoréplication. Il est suivi par nombre d'auteurs de science-fiction, tels que Michael Crichton avec *Prey*⁸. Les scénarii apocalyptiques imaginent le contrôle des individus par l'injection de nano-objets dans le corps humain, ou la destruction de la planète par une société de nano-robots intelligents et vivants.

D'un autre côté, les courants transhumanistes⁹ voient dans les nanotechnologies un moyen d'amélioration de l'Homme. Que ce soit dans le téléversement de la conscience dans une réalité virtuelle (donc l'immortalité de l'âme), la régénération du corps humain, ou plus prosaïquement des membres surpuissants et des capteurs décuplant les perceptions humaines, les nano-dispositifs biocompatibles feraient des miracles.¹⁰

Comme le remarque le philosophe Jean-Pierre Dupuy, les nanotechnologies deviennent alors le véhicule de la démesure,

⁶ Crommie et al. Confinement of Electrons to Quantum Corrals on a Metals Surface. Science. 1993.

⁷ Drexler, Eric. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. 1986.

⁸ Crichton, Michael. *Prey*. 2002.

⁹ Les transhumanistes sont les partisans de l'amélioration de l'Homme par la technologie.

¹⁰ Wikipedia. transhumanism.

l'instrument par lequel l'homme rêve d'asseoir sa domination sur le monde, en s'emparant du don suprême, celui d'insuffler de vie¹¹.

« En arrière-fond de tout « paradigme » scientifique, il y a ce que Karl Popper appelait un « programme métaphysique de recherches » – ensemble non « testable » de propositions que l'on tient pour vraies sans chercher à les remettre en cause, cadre théorique qui limite le type de questions que l'on pose, mais en donne aussi l'inspiration première. Le paradigme « nano » procède de la même métaphysique que les sciences cognitives. Celle-ci peut se dire ainsi : tout dans l'univers, donc la nature, la vie et l'esprit, est machine informationnelle, dite encore algorithme. (...) Une fois admise une telle vision du monde, il n'y a qu'un pas pour en arriver à former le projet de se rendre maître de ces machines, d'abord en les simulant et en les reproduisant (naissance de l'intelligence, puis de la vie artificielles), ensuite en intervenant sur elles à la manière de l'ingénieur (biotechnologies, technologies cognitives, etc.). »

Eric Drexler ou les transhumanistes évoluaient en pleine science-fiction avec les nanorobots ou l'homme augmenté, et encore actuellement, leurs visions nous semblent peu réalistes même à moyen terme. Néanmoins, ces prophéties ont fortement marqué les esprits, au point d'influencer encore actuellement certains programmes de recherche. Drexler a fondé pour sa part l'Institut Foresight. De hauts responsables de la National Science Foundation¹² américaine sont de notoriété publique des militants transhumanistes convaincus et ont participé activement au lancement du grand programme américain de subvention des nanotechnologies dans les années 2000, la National Nanotechnology Initiative, qui dispose chaque année de centaines de millions de dollars. Leur rapport *Converging Technologies for Improving Human*

¹¹ Dupuy, Jean-Pierre. Quand les technologies convergeront.

¹² La National Science Foundation (NSF) est un organisme américain chargé de distribuer des centaines de millions de dollars pour subventionner la recherche américaine.

Performance ne fait pas mystère sur la finalité transhumaine qu'ils voient à travers le développement des nanotechnologies et propose même tout une démarche concrète pour y parvenir.¹³

"Examples of payoffs may include improving work efficiency and learning, enhancing individual sensory and cognitive capabilities, revolutionary changes in healthcare, improving both individual and group creativity, highly effective communication techniques including brain-to-brain interaction, perfecting humanmachine interfaces including neuromorphic engineering, sustainable and "intelligent" environments including neuro-ergonomics, enhancing human capabilities for defense purposes, reaching sustainable development using NBIC tools, and ameliorating the physical and cognitive decline that is common to the aging mind."

2000 L'Eldorado

Dans les années 80, les nanotechnologies restent encore du domaine de la prospective, même en laboratoire. Mais l'explosion de la micro-électronique dans les années 90 et 2000 donne une certaine crédibilité à la faisabilité technique des nanotechnologies.

D'un côté la marche inexorable de la miniaturisation des semi-conducteurs, la célèbre loi de Moore (réduction de la taille par deux tous les 18 mois), se trouve validée jusqu'à ces dernières années, atteignant maintenant des tailles de transistor de quelques dizaines de nanomètres. (Figure 3)

¹³ Roco and Bainbridge. *Converging Technologies for Improving Human Performance*. s.l. : NSF, Juin 2002.

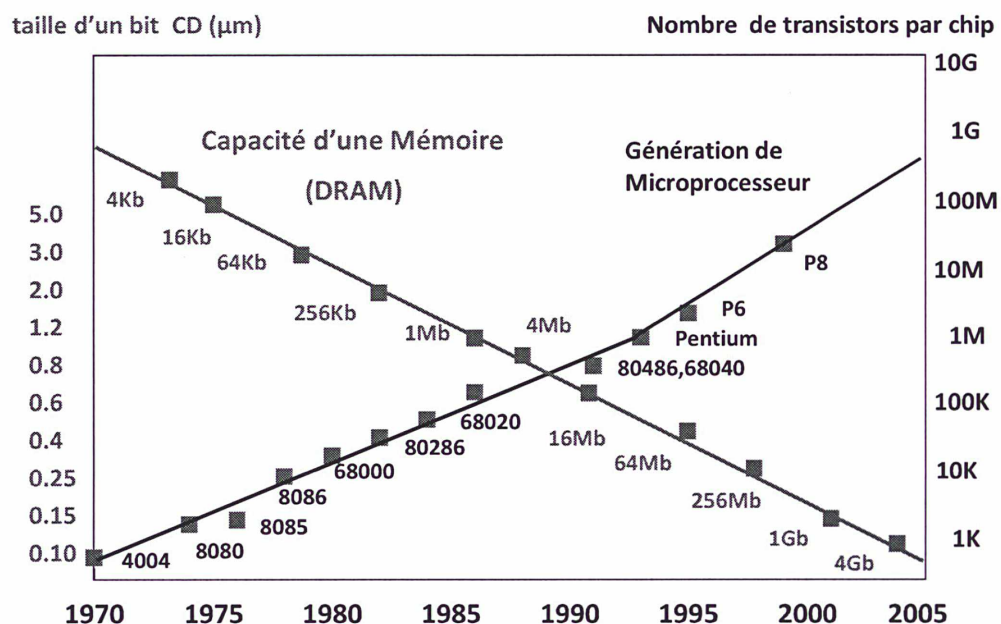
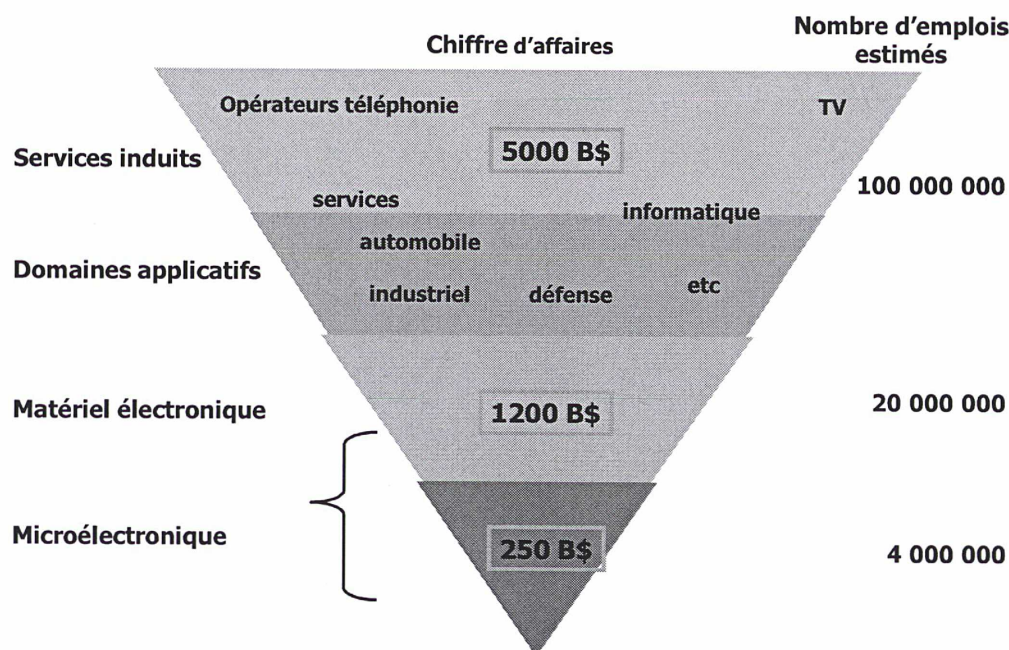


Figure 3 : La loi de Moore, illustrée par la réduction de la taille des transistors et mémoires et simultanément l'augmentation du nombre de transistors, de capacités de stockage et de puissance des processeurs. Source : Intel

De l'autre, la découverte de la spintronique et la magnétorésistance géante par Albert Fert et Peter Grünberg en 1988 sont mises en application de manière fulgurante dans les composants électroniques, et sont notamment à l'origine des têtes de lecture des disques durs actuels, et bientôt des mémoires de disques durs (les fameuses MRAM).



24

Figure 4 : L'électronique comme levier économique : pyramide des chiffres d'affaires des secteurs applicatifs de la microélectronique. Source : L. Gouzènes, ST Microelectronics

L'immense impact économique de la micro-électronique (Figure 4), et particulièrement au moment de la bulle internet des années 2000, donne un exemple concret aux plus pragmatiques pour extrapoler les potentialités économiques incroyables des nanotechnologies appliquées à de multiples secteurs. Elles deviennent alors synonymes d'Eldorado. Des conseillers scientifiques avisés incitent les pouvoirs publics à soutenir massivement la recherche dans le domaine autour des années 2000. La National Nanotechnology Initiative américaine est notamment fondée dans ce but^{14,15}, talonnée de près par les plans gouvernementaux

¹⁴ **NNI.** <http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>.
www.nano.gov. [Online]

¹⁵ **NNI budget.** *National nanotechnology Initiative FY 2009 Budget & highlights.* 2009.

des autres grandes puissances ne voulant pas se laisser distancer. Les nanotechnologies apparaissent comme le tournant technologique du 21^{ème} siècle à ne surtout pas manquer sous peine de perdre son rang de puissance mondiale. Les motivations ne sont pas très objectives :

*« Ces politiques de recherche volontaristes ont été initiées et amplifiées par des discours promotionnels et futuristes, principalement exotériques (circulant à l'extérieur du champ scientifique). On les désigne par "hype" dans le monde anglo-saxon. Les thèmes de la "convergence" et de la "révolution" y ont été abondamment diffusés sans que leur pertinence soit évaluée. »*¹⁶

Mais s'ensuit une véritable « course aux nanos », avec une explosion littérale des budgets de recherche alloués au domaine (Voir Tableau 1). Les Etats-Unis, le Japon et l'Europe sont bien sûr concernés, mais la fièvre des investissements gagne également les puissances émergentes, la Chine, l'Inde et la Russie. En dix ans, les crédits alloués aux nanotechnologies ont été multipliés de dix à vingt fois. Ils représentent des parts importantes de l'effort consenti à la recherche : dans le 7^{ème} programme cadre de recherche et de développement (PCRD) de l'Union Européenne, les nanotechnologies absorbent par exemple un dixième de l'ensemble du budget prévu.

¹⁶ Klein, Etienne, Grinbaum, Alexei and Bontems, Vincent. *Les débats sur les nanosciences : enjeux pour le CEA*. s.l. : DSM-LARSIM, 2007.

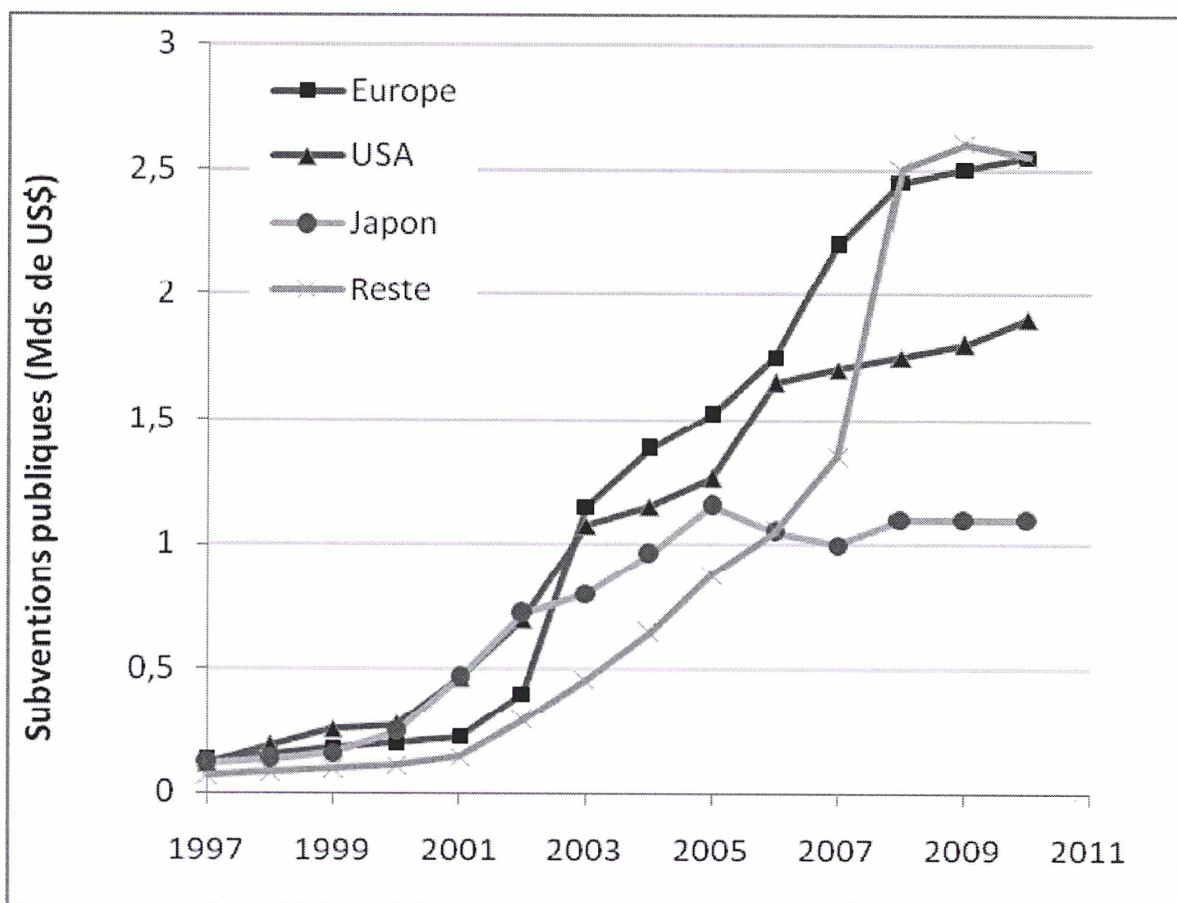
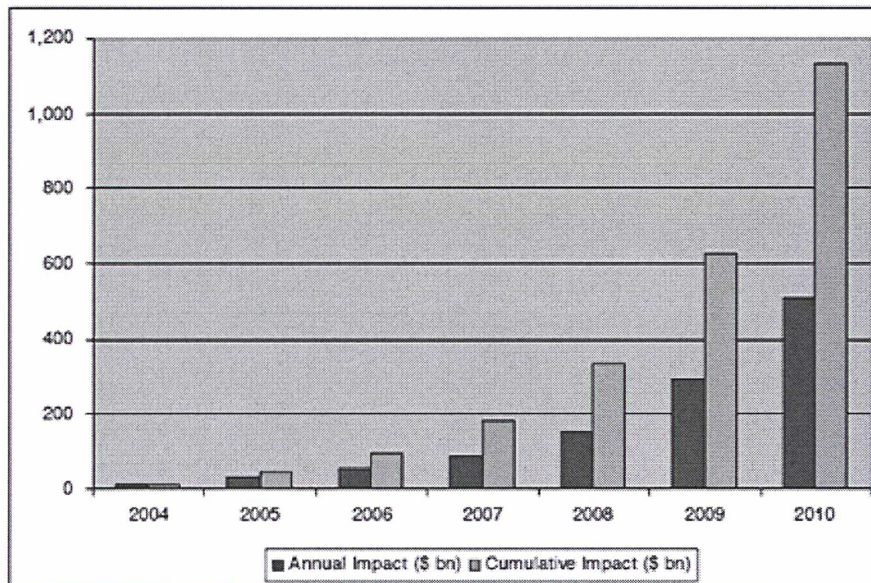


Tableau 1 : Montants des programmes publics (en milliards de dollars) pour les nanotechnologies depuis 1997. Sources : (11), (12), (13), (9)

L'effort public devait être récompensé au centuple par un marché mondial de plus de 1000 milliards de dollars en 2010, selon les estimations de la NNI en 2001. Les cabinets de conseil renchérissent les années suivantes : en 2004 par exemple, le cabinet de conseil Lux Research évaluait le marché des nanotechnologies en 2014 à 2600 milliards de dollars dans son rapport intitulé *Sizing Nanotechnology's Value Chain* (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Rodney Slater, secrétaire aux transports des Etats-Unis (1997-2001), réaffirme en 2008 que le marché engendré par les nanotechnologies tournerait à « 2000 milliards de dollars pour 2015 ».

EXHIBIT 2: LATEST NANOTECH IMPACT ESTIMATES - \$1 TRILLION BY 2010



Source: Lux Research, January 2005

Figure 5 : Estimations euphoriques de l'impact économique des nanotechnologies pour 2010 en 2005 par le cabinet Lux Research.

L'image d'Eldorado est restée imprimée de manière durable dans les discours des pouvoirs publics. Ainsi les nanotechnologies sont notamment réapparues dans les discours politiques comme des bouées de sauvetage providentielles au pire de la crise financière. En témoigne cette déclaration du vice-premier ministre russe Sergueï Ivanov en décembre 2008 à la chaîne russe Россия :

« Les nanotechnologies permettront à l'économie russe de surmonter les conséquences de la crise financière mondiale. (...) Une utilisation plus active des nanotechnologies à l'époque où le monde entier traverse une crise financière permettra à l'économie nationale d'atteindre un niveau plus élevé et d'économiser les ressources énergétiques, y compris du pétrole et du gaz »

L'adhésion des pouvoirs publics du monde entier au début des années 2000 est frappante et relève d'un véritable mythe créé autour des nanotechnologies, car elle se fonde sur des estimations économiques inconsistantes. Pour un industriel, imaginer les innovations capables d'être sur le marché cinq ans plus tard et prévoir le chiffre d'affaires associé comporte une grande part de subjectivité et d'inconnu ; on peut donc plus que douter de la fiabilité des prévisions chiffrées faites à plus de dix ans sur les débouchés de technologies émergentes vastes et de périmètre inconnu. De plus comment l'évaluation est-elle faite ? Quelle fraction de la valeur totale d'un produit fini contenant des nano-objets retient-on ?

Plus généralement les nanotechnologies sont citées comme une solution miracle à tous les problèmes humains dans le discours des autorités, comme le dénonce le philosophe Jean-Pierre Dupuy¹⁷ :

« Le rapport américain de la National Science Foundation (NSF) par lequel j'ai commencé, et dont le titre complet est « Converging Technologies for Improving Human Performances », bat sans doute tous les records. Il ne promet pas moins à terme que l'unification des sciences et des techniques, le bien-être matériel et spirituel universel, la paix mondiale, l'interaction pacifique et mutuellement avantageuse entre les humains et les machines intelligentes, la disparition complète des obstacles à la communication généralisée – en particulier ceux qui résultent de la diversité des langues –, l'accès à des sources d'énergie inépuisables, la fin des soucis liés à la dégradation de l'environnement. »

Les nanos sont un monde de démesure. Et à la démesure des enthousiasmes qu'ils s'inspirent répondent en contrepoint la démesure des peurs qu'ils suscitent.

2005 L'apocalypse

¹⁷ Dupuy, Jean-Pierre. *Quand les technologies convergeront.*

Toute innovation technologique s'accompagne d'inconvénients, que ce soit des risques industriels et sanitaires, des problèmes de ressources premières et énergétiques, des bouleversements socio-économiques ou des questions éthiques ou géopolitiques. En conséquence, une technologie émergente suscite souvent des oppositions et des inquiétudes et Les nanotechnologies sont loin d'être en reste, quels que soient les discours euphoriques des apôtres des nanos. Les inquiétudes sont d'autant plus exacerbées qu'elles s'appuient sur de grandes peurs collectives, archétypes de menaces légendaires ou de mythes apocalyptiques, et les inquiétudes peuvent s'enflammer jusqu'à la psychose ou le rejet passionné et violent de certains collectifs.

Par rapport aux risques sanitaires que peuvent potentiellement poser les nanoparticules, le traumatisme séculaire des grandes pandémies joue très certainement un rôle dans les réactions très défensives dont on peut être témoin en Europe par exemple. D'autant plus que l'arrivée des nanoparticules sur la scène médiatique fait suite à une série de scandales sanitaires (prion de la vache folle, amiante, radiations), d'épidémies (VIH, SRAS ou H5N1) et bien sûr à la polémique sur les OGM, qui remet au premier plan la menace de l'ennemi mortel invisible pouvant nous infecter et nous détruire. On ne peut que se féliciter de la prise de conscience des incertitudes sur les risques toxicologiques des nanoparticules et la volonté de prévenir les problèmes de santé au travail ou les pollutions environnementales. Mais les nano-objets subissent une certaine stigmatisation au regard du peu de cas qu'on a pu faire d'autres substances chimiques utilisées en masse et s'étant finalement avérées nocives (pesticides, bactéricides, fongicides, détergents ou même médicaments). L'expression de cette disproportion est représentée par les dispositions prévues par le Grenelle de l'environnement (article 37 du projet de loi de programme relatif à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement) :

« L'utilisation des substances à l'état nanoparticulaire ou d'organismes contenant des nanoparticules ou issues de nanotechnologies fera l'objet d'un débat public organisé au plan national avant fin 2009. L'État se

donne pour objectif que, dans un délai de deux ans qui suit la promulgation de la présente loi, la fabrication, l'importation ou la mise sur le marché de substances à l'état nanoparticulaire ou d'organismes contenant des nanoparticules ou issues de nanotechnologies fasse l'objet d'une déclaration obligatoire, relative notamment aux quantités et aux usages, à l'autorité administrative ainsi qu'une information du public et des consommateurs. Une méthodologie d'évaluation des risques et des bénéfices liés à ces substances et produits sera élaborée. L'État veillera à ce que l'information due aux salariés par les employeurs soit améliorée sur les risques et les mesures à prendre pour assurer leur protection. » (Texte n° 144 2 transmis à l'Assemblée nationale le 10 février 2009)

Il s'agit donc d'appliquer les mêmes principes de contrôle que pour les OGM, mais étendus cette fois-ci à l'ensemble des filières industrielles, et pas uniquement à des filières sensibles comme l'alimentation ou le médicament ! Combien de molécules chimiques aujourd'hui employées dans l'industrie sont déclarées aux consommateurs dans les produits de tous les jours ? Rien de surprenant donc à ce que Philippe Hubert, directeur de la prévention des risques chroniques à l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), s'étonne qu'on s'inquiète à ce point de la contamination aérienne des nanoparticules artificielles en comparaison au peu de cas qui est fait des millions de poussières présentes dans l'air que nous respirons chaque jour.

Certaines fictions apocalyptiques des romanciers prophétiques tels que Michael Crichton se basent d'ailleurs sur ce thème séculaire de l'ennemi invisible, comme le souligne Philip Ball, ancien éditeur de Nature - au sujet du roman Prey tout d'abord :

« It is junk, of course - albeit with the compelling, page-turning quality that just about any popular thriller must attain - and the science is frankly sometimes terrible. But dissecting the scientific flaws is beside the point; Prey would not have been successful if it did not tap into

existing currents of fear, and what could be more scary than a foe we cannot even see?»^{18.19}

Dans la lignée des scandales technologiques comme Tchernobyl renaît le mythe de l'apprenti-sorcier. Les nanotechnologies subissent de plein fouet la crise de confiance de la société moderne dans la Science. Confrontés à l'immense potentiel des nanotechnologies, rêvé ou chimérique, certains intellectuels dénoncent un véritable péché de démesure (au sens de l'ubris grecque), démesure qui conduit inéluctablement à la catastrophe dans la tragédie antique. L'opprobre est jeté sur les chercheurs. Le philosophe Jean-Pierre Dupuy accuse la communauté scientifique de tenir un double langage peu honnête²⁰:

« Lorsqu'il s'agit de vendre son produit, les perspectives les plus grandioses sont agitées à la barbe des décideurs. Lorsque les critiques, alertés par tant de bruit, soulèvent la question des risques, on se rétracte : la science que nous faisons est modeste. »

Il utilise l'existence d'affirmations contradictoires sur les nanotechnologies pour conclure gravement :

« La question de la responsabilité de la science est devenue beaucoup trop grave pour qu'on laisse le soin d'en débattre aux seuls scientifiques »

pastichant ainsi la célèbre phrase de Clemenceau. Comparer les nanotechnologies à un sujet aussi funeste que la Grande Guerre - un autre traumatisme collectif - ne peut qu'entretenir l'image négative des

¹⁸ Ball, Phillip. Nanotechnology in the firing line.

¹⁹ Ce sont des âneries bien sûr – en dépit de l'impérieux besoin de passer à la page suivante suscité par tout bon thriller populaire – et le niveau scientifique est parfois catastrophique. Mais déceler les failles scientifiques est hors sujet ; Prey n'aurait pas été aussi couronné de succès s'il n'avait pas mis le doigt sur des courants de peurs existants, et qu'est-ce qui pourrait être plus effrayant qu'un ennemi qu'on ne peut même pas voir ?

²⁰ ibid

nanotechnologies. De même Bernadette Bensaude-Vincent, présidente de Vivagora, déplore que les chercheurs « *refusent de prendre leurs responsabilités en n'anticipant pas les conséquences de leurs découvertes* ». Le collectif grenoblois Pièce et Main d'œuvre, manifestement mal informés sur la rémunération des chercheurs, va encore plus loin dans son accusation²¹ :

« Si leur conscience n'était stérilisée par la cupidité²² et la vanité, les chercheurs se mettraient en grève illimitée contre la société de la domination et de la marchandise qui s'enfle de leurs trouvailles. Leurs feintes protestations, "je ne fais que de la recherche fondamentale, ses applications ne me concernent pas" les désignent comme de dangereux irresponsables. »

La pression croissante de l'opinion envers les scientifiques est réelle et s'étend depuis les sphères traditionnelles confrontées aux problèmes éthiques comme la biologie et la médecine, à des domaines plus « durs » comme la physique et la chimie. Ainsi le CEA a créé en 2007 le LARSIM, laboratoire de philosophie des sciences, dont une des missions est de réfléchir aux choix scientifiques du CEA. Plus généralement, une partie des crédits accordés aux nanotechnologies par les pouvoirs publics sont consacrés à l'étude de l'impact socio-économique et permet de financer des comités de réflexion sur l'accompagnement du développement raisonné des nouvelles technologies.

Enfin l'enthousiasme trop appuyé des pouvoirs publics à l'égard des perspectives économiques des nanotechnologies a exacerbé la suspicion de collusion entre pouvoir politique et industriel au détriment des intérêts des citoyens. Les nanotechnologies se sont attirées les foudres de mouvements aux revendications plus larges, altermondialistes, anticapitalistes et décroissants, teintées de revendications parfois plus

²¹ PMO. Rendez-nous notre objet d'aliénation favori ! Ou pourquoi la technologie est le problème. <http://www.piecesetmaindoeuvre.com>.

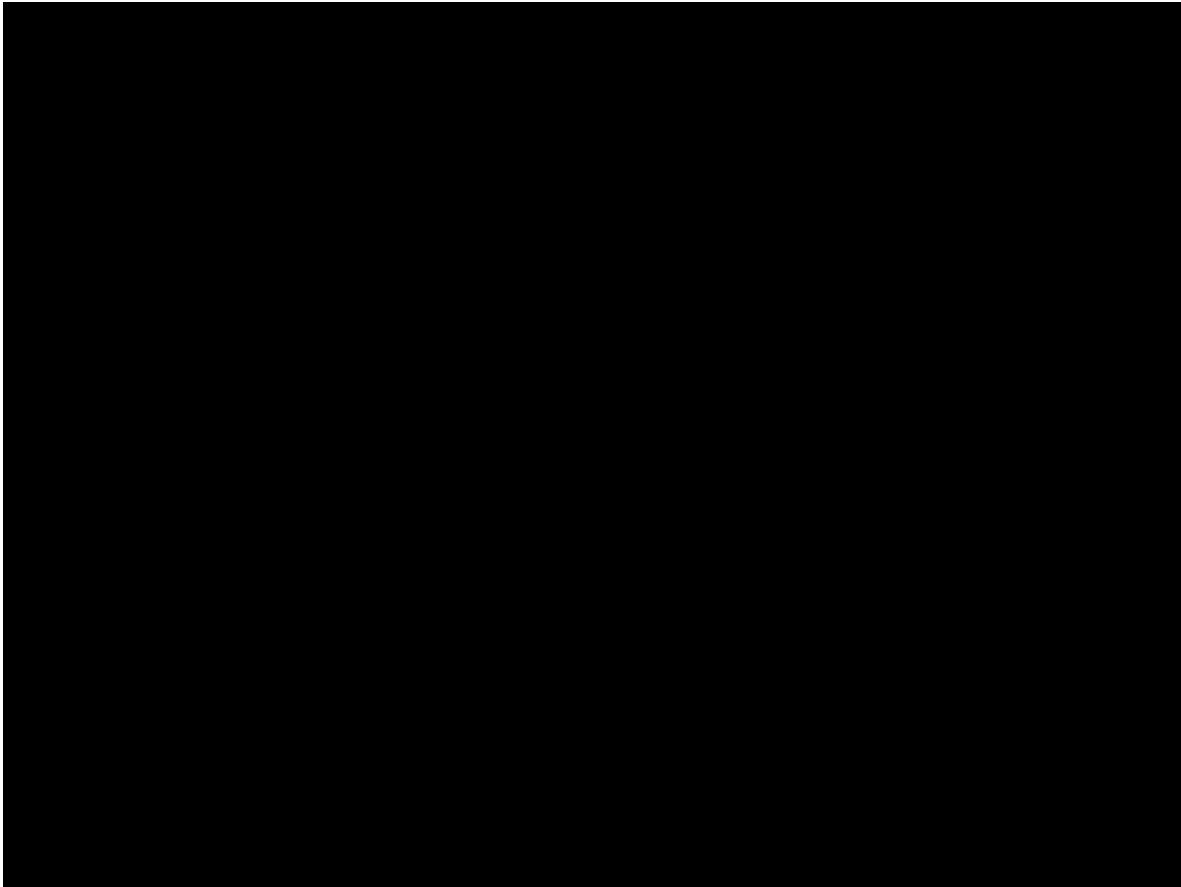
²² Il est de notoriété publique que ceux qui s'engagent dans la recherche le font pour les salaires fabuleux que prodigue le CNRS !

locales, comme celles des collectifs grenoblois anti-MINATEC²³. Ils voient en elles le symbole du complot inféodé au grand capital : « *sciences serviles pour industries totalitaires* » comme les qualifie Pièce et Main d'œuvre (PMO), le collectif grenoblois. Leur vision anti-technologiste est très bien exposée dans leur communiqué *Rendez-nous notre objet d'aliénation favori ! Ou pourquoi la technologie est le problème*²⁴. Selon eux, la fuite en avant de la technologie est l'instrument des puissants pour assujettir les peuples, en les contraignant à la consommation des produits technologiques et en les surveillant grâce aux technologies de l'information et de la communication :

« Non seulement "l'innovation" technologique ne fait en rien progresser la justice, la morale et la préservation de la planète, mais elle constitue l'arme des puissants pour éliminer les obstacles à leur empire. La fin est dans les moyens comme le fruit est dans le germe. Ainsi se croisent la fuite en avant du système technicien et la soif de domination de la caste dirigeante. Union monstrueuse dont le fruit est cette société du contrôle total qui rendra bientôt impossible toute contestation. »

²³ MINATEC est le complexe scientifique européen basé à Grenoble dédié aux nanotechnologies ; il regroupe des organismes publics comme des grandes entreprises de hautes technologies.

²⁴ PMO. Rendez-nous notre objet d'aliénation favori ! Ou pourquoi la technologie est le problème. . <http://www.piecesetmaindoeuvre.com>.



Les nanotechnologies sont d'autant plus redoutées des technophobes qu'elles sont la base de l'augmentation des puissances des ordinateurs et donc du traitement de l'information : elles permettraient la réalisation du Big Brother de Georges Orwell.

La contestation n'est pas uniquement le fait des plus extrêmes, preuve que le malaise est profond : le collectif Fondation Sciences Citoyennes du professeur Jacques Testart partage également un sentiment de détournement de la recherche^{25,26} :

²⁵ Fondation Sciences Citoyennes. Recherche et innovation : pour une évaluation par les citoyens. *ECOREV*, 783. mai 29, 2008

²⁶ Survivre aux nanotechnologies ? Giga-questions, nano-visions et citoyenneté. *Note n°3*

« Nous avons voulu répondre à la prise en main de l'appareil de recherche par des lobbies techno-industriels, avec pour conséquences la polarisation des moyens sur des innovations rentables à court terme aussi bien que la mise en danger des hommes et de l'environnement par la dissémination de technologies aux effets insuffisamment éprouvés »

En conséquence la légitimité des pouvoirs publics est contestée. Ces associations réclament plus de transparence dans les décisions et plus de participations citoyennes. Ont-ils été entendus avec l'ouverture du débat public pour la fin de 2009 en France ? En dépit du sentiment d'être ignorés que conservent certains citoyens, l'opinion publique a une influence sur les décisions des pouvoirs publics, comme l'a montré le moratoire sur les OGM.

Les leçons de l'Histoire

Les philosophes ont coutume de dire qu'on ne tire pas de leçons de l'Histoire. Bien souvent, l'Histoire offre des exemples très similaires à des situations qui semblent nouvelles, mais faute de mémoire, les mêmes erreurs sont répétées. Les nanotechnologies se démarquent-elles des anciennes « nouvelles technologies » ?

Patrick Fridenson, directeur d'études à l'EHESS et spécialiste de l'histoire des entreprises et du travail dans les pays développés, nous a permis de mettre le cas des nanotechnologies en perspective avec d'autres nouvelles technologies.

D'une façon générale, suite à une grande foi dans la science, on est passé à un doute caractéristique qui a marqué le plus lourd que l'air, l'électricité, la chimie, l'automobile, le nucléaire, l'informatique, présent même chez les scientifiques comme le témoigne cette citation d'Arago au sujet du chemin de fer :

« On rencontrera dans les tunnels une température de 8° Réaumur en venant d'en subir une de 40 à 45. J'affirme sans hésiter que dans ce passage subit, les personnes sujettes à la transpiration seront

incommodées, qu'elles gagneront des fluxions de poitrine, des pleurésies, des catarrhes. »

Certaines peurs ont une dimension religieuse, comme on a pu le constater avec la pilule contraceptive au Japon, et il est difficile de ne pas faire un rapprochement avec la peur du transhumanisme amenée par les nanotechnologies.

L'Histoire montre que le parti de la rupture technologique l'a toujours emporté, tôt ou tard. L'Etat fait de la politique, il est donc soucieux des craintes des citoyens, il met en place un conseil où la société civile est représentée, des outils de contrôle, des barrières réglementaires contre les excès redoutés par la population, comme l'a montrée au 19^{ème} siècle la décision de déplacer les usines à gaz²⁷ pour les installer dans des sites sans danger. C'est à la fois de cet encadrement public et de la compétition scientifique et technique que viennent des innovations qui débouchent sur des solutions durables permettant de réduire les risques et d'améliorer la sécurité.

Conclusion

De manière frappante, les nanotechnologies sont sujettes à des discours très affirmatifs sur leur développement alors qu'elles se trouvent aux frontières de la connaissance scientifique et généralement bien au-delà de la maîtrise technique actuelle.

Nos actions actuelles sont guidées par nos rêves, nos croyances et nos peurs. Mais qu'en est-il de la réalité ? Quelles sont les applications réalisables et les risques imminents ? Et avant toute chose que recouvre réellement le terme de nanotechnologies ? Nous proposons de démontrer dans les chapitres suivants que notre perception des nanotechnologies est actuellement brouillée, aussi bien par les mythes

²⁷ Elles servaient à fournir l'électricité pour l'éclairage urbain, et trois se trouvaient dans Paris intra-muros, notamment avenue Trudaine et rue Poissonnière.

que par l'imprécision du champ couvert par les nanotechnologies et le manque de données économiques.

Une terminologie bien vague

L'imposture nano ?

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 nano-robots doués de vie.

Certains crient à l'imposture, soutenant que les nanotechnologies ne sont qu'une vaste supercherie, un toilettage tendance des vénérables sciences des matériaux. Il ne s'agirait donc que d'un regroupement informe de thématiques hétéroclites afin d'attirer des fonds publics et il n'y aurait en aucun cas de révolution nano. C'est notamment le point de vue sans concession de Greenpeace²⁸ :

*"Nanotechnology is really a convenient label for a variety of scientific disciplines which serves as a way of getting money from Government budgets. As a natural extension of the micromechanical and MEMS research that begun in the 1960s, nanoscience is hardly 'new' as such; rather, 'nano' can be viewed as a useful tag with which to boost funding"*²⁹

Alors, les nanos, une véritable révolution ou un terme marketing de plus ?

²⁸ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*,. s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003.

²⁹ Nanotechnologie est une étiquette vraiment pratique pour une multitude de disciplines scientifiques qui sert comme moyen d'obtenir de l'argent des budgets gouvernementaux. Si on les considère comme une extension naturelle de la micromécanique et de la recherche sur les MEMS qui ont débuté dans les années soixante, les nanosciences sont à peine « nouvelles » ; « nano » doit plutôt être vu comme une étiquette pour stimuler les subventions.

Des définitions par la taille insatisfaisantes

Analysons la définition communément admise et donnée par la NNI (National Nanotechnology Initiative) des nanotechnologies³⁰ :

*"Nanotechnology is the understanding and control of matter at dimensions between approximately 1 and 100 nanometers, where unique phenomena enable novel applications. Encompassing nanoscale science, engineering, and technology, nanotechnology involves imaging, measuring, modeling, and manipulating matter at this length scale."*³¹

La dimension ressort dans cette définition comme le critère essentiel. Cependant maîtriser la matière à l'échelle du nanomètre est-il vraiment spécifique et révolutionnaire ? Aucunement.

On peut en réalité inclure sous ce critère presque toute la physique, la chimie et la biologie, puisque les molécules, briques essentielles de la matière, ont des dimensions de cet ordre. Nous serions même tous des Monsieur Jourdain des nanotechnologies ! Faire la lessive, réaliser une mousse au chocolat ou monter une mayonnaise, voici la création de belles structures micellaires nanométriques ! De même, les doreurs se découvrent nano-technologistes (une feuille d'or a une épaisseur de 125 nm en moyenne) !

De même la nature crée des nanostructures à loisir : patte adhésive du Gecko, nacre des coquilles, surface autonettoyante du nénuphar. C'est même l'organisation du vivant en organites de quelques dizaines ou

³⁰ **NNI.** <http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>.
www.nano.gov.

³¹ La nanotechnologie est la compréhension et le contrôle de la matière à des dimensions comprises typiquement entre 1 et 100 nanomètres, à une échelle où des phénomènes uniques permettent de nouvelles applications. Englobant les sciences, l'ingénierie et la technologie de l'infiniment petit, la nanotechnologie inclut l'imagerie, la mesure, la modélisation et la manipulation de la matière à cette échelle.

centaines de nanomètres qui permet à la cellule de fonctionner. Avec une définition aussi large que celle proposée par la NNI, les mêmes défenseurs de la révolution « nano » banalisent le concept de manière paradoxale et absurde: « *La nanotechnologie dans la nature* » dit le rapport « La nanotechnologie, L'innovation pour le monde de demain » édité par la commission européenne³².

Du côté des innovations de pointe, cette définition très large permet de réunir sous une même bannière des industries très différentes. SAGEM définit son activité de polissage basse rugosité des miroirs destinés aux grands télescopes comme une nanotechnologie³³. Olmix a mis au point l'amadeite, matériau composé d'une structure d'argile modifiée par des extraits d'algues verte intercalés entre les feuillets d'argile³⁴. La start-up COLCOM synthétise quant à elle des dendrimères³⁵ de lysine pour l'industrie pharmaceutique.

Quel intérêt à chapeauter des disciplines et des techniques ne présentant aucune cohérence entre elles avec un néologisme ? Au final, les nanotechnologies de la NNI sonnent bien creux, et il est tentant de chercher une explication de nature financière. 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. Etre ou ne pas être « nano », ce n'est donc pas une question conceptuelle, mais une question de stratégie.

Le préfixe nano, le « must have » du chercheur

³² **Schulenburg, Mathias.** *La nanotechnologie L'innovation pour le monde de demain.* s.l. : Commission Européenne, DG Recherche, 2004.

³³ **Boutin, Xavier.** micro et nanotechnologies à SAGEM. *club micro-nanotechnologies.* [Online] <http://www.clubnano.asso.fr/regions/sagem/index.html>.

³⁴ **Olmix.** amadeite. *Olmix.* <http://www.olmix.com/fr/spip.php?article12>.

³⁵ Un dendrimère est l'équivalent d'un polymère mais à chaîne ramifiée.

Symptomatique de l'effet stratégique, le rapport de l'académie des sciences et l'académie des technologies de 2004³⁶ rebaptise à peu près tout le vocabulaire des sciences de la matière en « nano-machin ». Tout n'est plus que « nanosciences », « nanochimie », « nanophysique », « nanomagnétisme », « nano-moteur moléculaire », « nanosystèmes quantiques », etc.

L'hypertrophie du concept de nanotechnologies est devenue inévitable lorsque que ce terme acquiert au début des années 2000 un caractère d'instrument de politique scientifique publique. Les budgets de recherche des grandes puissances industrialisées et des grands pays émergents croissent exponentiellement dans les années 2000 (Tableau 1).

Mais il ne faut pas être dupe, ce n'est pas un effort de recherche exceptionnel qui est consenti, car les budgets globaux de recherche publics dans les pays développés n'augmentent pas en part de PIB, tout comme le nombre de chercheurs. C'est bien une réorientation des thèmes de recherches des laboratoires qui est visée. Et comme le concept de nanotechnologies n'avait pas été défini clairement à l'avance dans ces politiques de recherches, un grand nombre de chercheurs des sciences de la matière ont tout simplement renommé leurs études en les étiquetant « nano » pour pouvoir prétendre à leur crédit de recherche.

Le même constat est fait dans le rapport du LARSIM :

« Le nombre d'articles usant du préfixe « nano » double tous les 19 mois. En outre, si le terme « nano » se propage dans toutes les disciplines, il est cependant prématuré d'en conclure que l'on assiste à l'émergence d'un nouveau champ interdisciplinaire. En effet, la vitesse fulgurante de propagation dans certaines disciplines, en chimie en particulier, ne peut s'expliquer par le seul développement de nouvelles

³⁶ Académie des sciences et Académie des technologies. *Nanosciences Nanotechnologies*. avril 2004.

recherches : elle signifie plutôt que de nombreux chercheurs se reconvertissent dans les nanos en adoptant tout simplement ce vocabulaire pour présenter les recherches qu'ils menaient déjà auparavant. »³⁷

Les responsables de la start-up COLCOM, qui fait des dendrimères de lysines, nous ont d'ailleurs confiés que le choix de se déclarer « nanotech » était essentiellement motivé par la meilleure visibilité de ce terme vis-à-vis des institutionnels et des financiers par rapport à « dendrimères ».

Certains ont été renommés à raison : colloïdes, couches minces, d'autres sont bien trop généralistes pour être intégrés : chimie structurale, physique quantique.

Le graphique suivant présente en ordonnées logarithmiques le nombre d'organismes scientifiques en physique depuis 1988, et parmi eux, ceux concernant les sciences des matériaux, les nanotechnologies (sous-catégorie des sciences des matériaux) et les bio-nanotechnologies (sous-catégorie des nanotechnologies). On constate l'explosion exponentielle du nombre d'institutions s'étant converties au label « nano », les faisant passer d'une dizaine en 1988 à environ 10000 par an en 2006 : la moitié des organismes en sciences des matériaux et près d'un dixième de toute la physique porte maintenant sur les nanotechnologies.

³⁷ Klein, Etienne, Grinbaum, Alexei and Bontems, Vincent. *Les débats sur les nanosciences : enjeux pour le CEA*. s.l. : DSM-LARSIM, 2007.

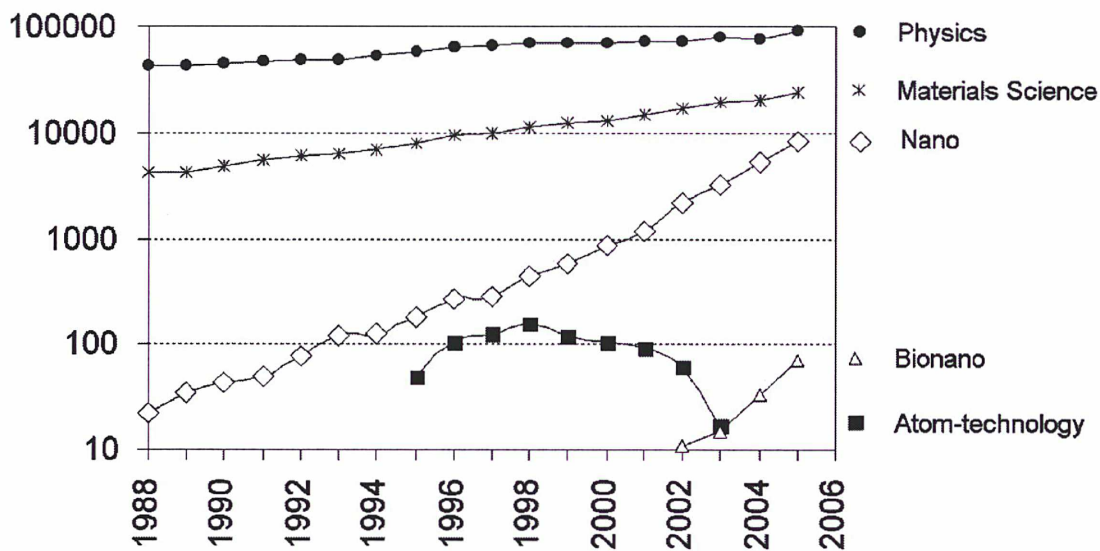


Figure 7 : nombre d'institutions scientifiques se rapportant à différentes thématiques de la physique. Source : J. Schummer, The global institutionalization of nanotechnology research: A bibliometric approach to the assessment of science policy, *Scientometrics*, 70: 3, 2007, 675.

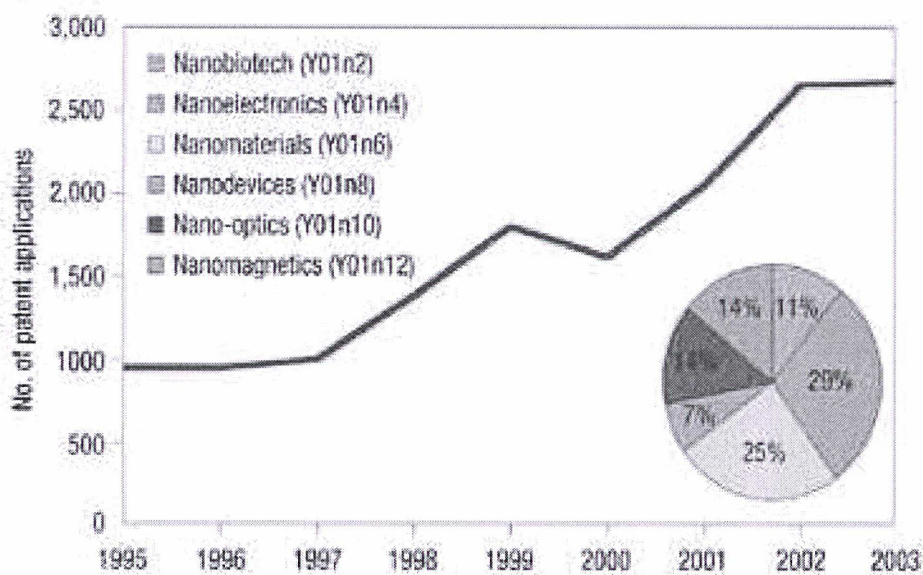


Figure 8 : nombre de brevets déposés

en nanotechnologies. Source : Who is winning the global nanorace ?

Angela Hullmann, responsable de programme des nanosciences et nanotechnologies de la direction research de la commission européenne.³⁸

Un label marketing pour les industriels

Que les nanotechnologies soient avant tout un terme de promotion, les industriels ne se sont pas trompés. Synonyme dans l'esprit du consommateur de « high-tech du petit », le préfixe « nano » a fleuri un peu partout : Ipod Nano, nanosomes des crèmes l'Oréal les voitures Tata Nano ou même l'anti-virus Panda Nanoscan.

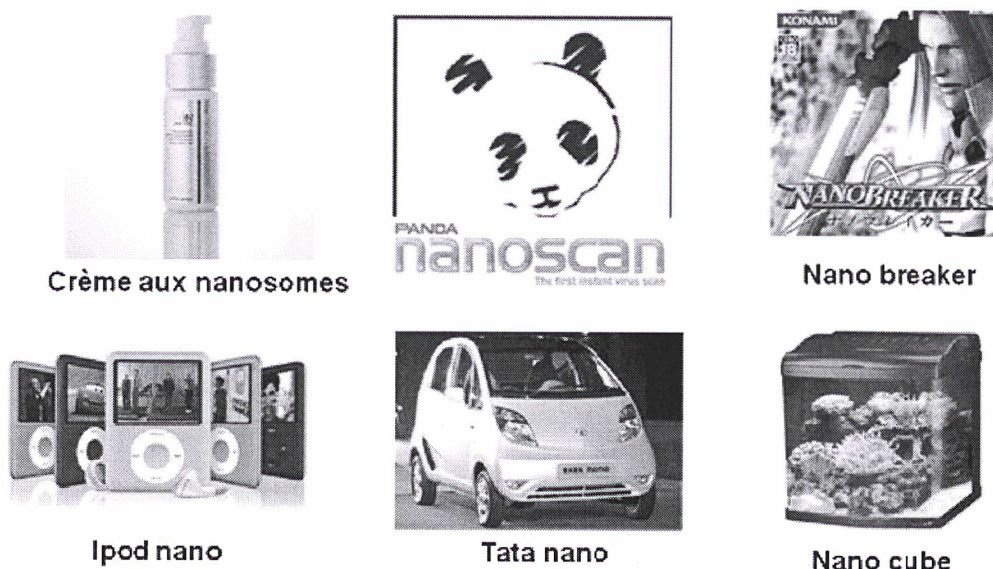


Figure 9 : Quelques exemples de produits « nano »

Et tant pis si ces produits n'ont rien de nanométrique ! Certains produits comme le détergent « Magic Nano » en Allemagne ont même défrayé la

³⁸ Who is winning the global nanorace? Hullmann, Angela. 2006, Nature Nanotechnology 1, pp. 81-83.

chronique³⁹. Ils ont contribué à entretenir la confusion et la suspicion autour des nanoparticules, alors qu'ils n'en contenaient pas.

La mode passe en 2005. Les « nanos » inquiètent, et voilà que certains produits estampillés « nanos » ne le sont soudain plus⁴⁰. Michelin inclut des particules de silice dans ses pneus verts, afin de leur donner une plus grande longévité. Michelin affirme qu'il n'existe en aucun cas dans le pneu de particule de silice nanométrique, ni même à une quelconque étape du processus de fabrication ou dans le cadre du cycle de vie du pneu. Toutefois, la maîtrise du produit dont Michelin fait preuve relève de sa capacité à structurer la silice à l'échelle nanométrique. Les propriétés anti-usure et de réduction de la résistance au roulement viennent d'une intégration réussie entre de la silice nanostructurée et le caoutchouc. Michelin ne chercherait-il pas à diminuer ses mérites et perdre l'étiquette « nano, pour ne pas tomber sous le coup d'une réglementation trop contraignante ? De même, les grandes marques de cosmétiques vantaient, il y a quelques années les mérites des crèmes aux nanosomes aux travers de campagnes publicitaires aux heures de grande écoute. Le terme de nanosome a complètement disparu depuis.

Un « buzz » retentissant

L'opération séduction autour des nanotechnologies a tellement bien fonctionné que le thème connaît un succès retentissant auprès de ce que nous appellerons la « société civile », c'est-à-dire les personnes qui ne sont pas spécialistes du sujet technique : politiques, journalistes, intellectuels, artistes, militants associatifs ou encore simples citoyens. Plus de 10 millions de pages sont référencées par Google pour la requête « nanotechnology », et plus de 75 millions pour « nano » ! En comparaison, le moteur de recherche trouve 40 millions résultats pour

³⁹ Ce produit (ne contenant en réalité pas de nanoparticules) a été responsable de complications respiratoires chez une centaine de personnes.

⁴⁰ Les Echos. « Les nanotechnologies déjà condamnées ? ». *Les Echos*. 2006.

« genetically modified organism » (OGM), près de 10 millions pour « nuclear fusion » (fusion nucléaire), et plus de 32 millions pour « Global warming » (réchauffement climatique). Les nanotechnologies sont donc bien un des thèmes scientifiques majeurs retenu par le « grand public ». Si en effet nous comparons le nombre d'entrées sur Google avec celles de Google scholar, qui est uniquement consacré aux publications scientifiques, le ratio entre pages est sensiblement plus grand pour ces thèmes, que pour des sujets de recherche tout aussi importants mais peu médiatisés (comme « neurone » (neurone) par exemple, qui pourtant est un terme extrêmement générique). Une analyse du type de résultat sur le terme « nano » montrerait de plus que le nombre imposant d'entrées par rapport aux autres termes est dû à l'utilisation marketing des industriels que nous avons évoquée dans le paragraphe précédent.

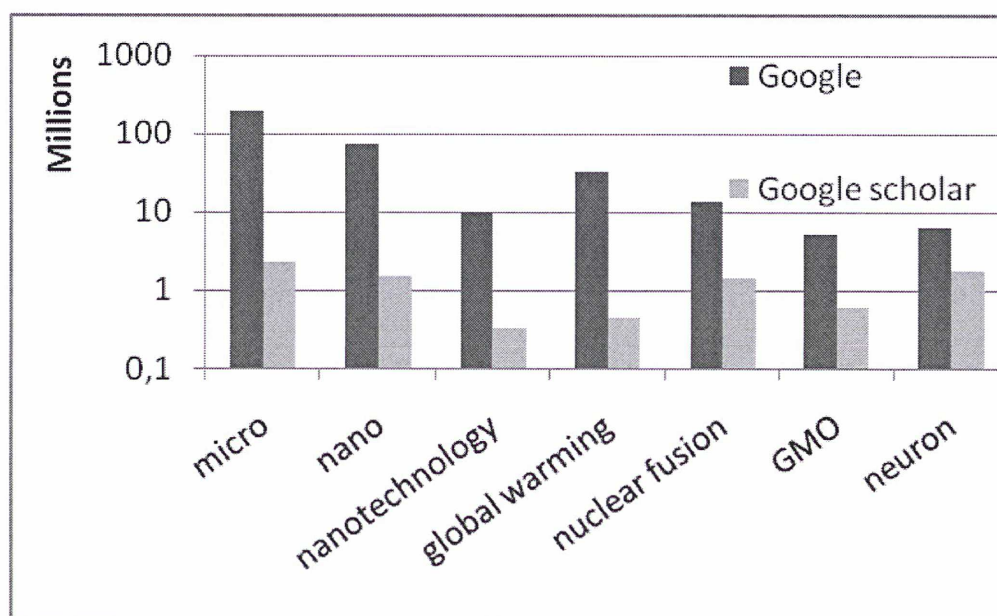


Tableau 2 : nombres de pages internet trouvées pour quelques termes scientifiques en mars 2009. Source : Google et Google Scholar

La démocratisation d'un thème déjà bien vague chez les experts scientifiques ne pouvait qu'empirer la confusion, les amalgames et les illusions. Difficile en effet de se représenter les dimensions quand on parle de nanomètre, c'est-à-dire de milliardième de mètre, soit environ

dix mille fois plus petit qu'une cellule humaine. Pour beaucoup, « nanotechnologies » se résume à un synonyme de high-tech du petit.

« Le grand public identifie en général les « nanos » à un nouveau domaine, assez flou, d'entités minuscules et imperceptibles, dont la prolifération éventuelle suscite des inquiétudes : "Small is infectious" (Petit implique pathogène). »⁴¹

Des innovations de pointe sont donc amalgamées avec les nanotechnologies : c'est le cas par exemple des puces à ADN, des dispositifs RFID (Radio Frequency Identification, un dispositif de transmission d'information sans contact), ou encore des fameux MEMS (Micro Electro-Mechanical Systems, des systèmes mécaniques micrométriques, soit 1000 fois plus gros qu'un nanomètre). En témoigne de manière symptomatique un article enthousiaste de La Dépêche du Midi⁴² :

« En attendant, les start-up Nano poussent comme des champignons dans la sphère toulousaine: Nanotimes, Innopsys, Urodelia, Nanobiotix, MarionTechnologies (à Varilhes), Neosens, Picometrics, Novamems ou encore NANOMEPS »

Sur les neuf entreprises citées, quatre entrent effectivement dans le champ des nanotechnologies : Marion Technologies, Nanomeps (production de nanoparticules), Nanobiotix (application médicale de nanoparticules) et Nanotimes (logiciel de simulation des caractéristiques physiques de nano-objets). Les activités de Picometrics, à savoir l'analyse par détection de fluorescence, seraient plutôt à classer dans la métrologie. Quant aux quatre autres entreprises, elles n'ont rien de

⁴¹ Klein, Etienne, Grinbaum, Alexei and Bontems, Vincent. *Les débats sur les nanosciences : enjeux pour le CEA*. s.l. : DSM-LARSIM, 2007.

⁴² **Venzal, Martin and Aguilar, Michel.** Toulouse pépinière des nanotechnologies. *La dépêche du Midi*. 29/03/2005

« nano », Innopsys, Urodelia étant tournées vers la biotechnologie et Neosens, Novamems travaillant sur des MEMS.

Désorientés dans ce vaste amalgame, certains citoyens établissent des liens avec le nucléaire et les OGM. En résultent naturellement des rejets violents de la part de certains militants, comme cette déclaration de guerre du collectif Opposition Grenobloise aux Nécrotechnologies⁴³, concentré de tout l'amalgame qui règne autour des nanotechnologies :

« Petites explications sur les nanos : manipulation de la matière vivante et inerte à l'échelle de l'atome, comme dans un jeu de lego elles permettent de créer de nouveaux matériaux et de nouvelles molécules. A l'échelle de l'infiniment petit, elles réunissent physique nucléaire, biologie moléculaire, chimie et électronique dans de joyeuses préparations. Fini les OGM, vive les OAM ! Organisme Atomiquement Modifié que concoctent nos chers chercheurs. »

Le concept d'Organismes Atomiquement Modifiés est scientifiquement d'une absurdité abyssale, puisque tout être vivant échange en permanence des atomes avec son environnement et transforme à chaque instant des molécules en d'autres molécules. Ajoutons à cela que des mutations génétiques naturelles surviennent à chaque réplication du matériel génétique et peuvent entraîner la modification des protéines que nous synthétisons. Mais le terme d'OAM est un véritable trait de génie pour qui souhaite durablement ternir l'image des nanotechnologies auprès d'un public profane en attente d'informations.

Pourquoi faut-il restreindre le champ des nanos ?

Le citoyen d'aujourd'hui a davantage l'envie et les moyens de s'informer de ce qui se passe au niveau politique, géopolitique, économique, scientifique, etc. C'est en particulier le cas pour les nanotechnologies :

⁴³ **Opposition Grenobloise aux Nécrotechnologies.** Minatech : qui arrêtera le progrès ? *rebellyon.info*. mars 22, 2007.
<http://rebellyon.info/article3357.html>.

les citoyens recherchent les informations afin de se forger un avis éclairé. Mais cette tâche est très difficile tant les informations sont contradictoires et portent sur des aspects différents. Et à sa grande déception, le citoyen consciencieux, après de nombreuses lectures, restera sur des incertitudes gigantesques. Les « nanos » sont-elles une réalité depuis 20 ans ou sont-elles les technologies de demain ? Les risques qu'elles présentent concernent-ils plutôt la santé ou les libertés individuelles ? Les effets quantiques qui apparaissent à l'échelle nanométrique et qui sont l'essentielle raison d'être des nanotechnologies sont-ils à craindre davantage que des propriétés classiques ? Y a-t-il des nanos dans la nature ?

Ces incertitudes sont liées au fait que le mot « nano » est un fourre-tout guère plus précis que « petite chose » et qu'il regroupe des concepts fondamentalement différents, les périmètres changeant suivant les auteurs. A titre d'illustration, vouloir parler d'une façon générale des « nanos » n'a pas plus de sens que de vouloir parler d'une façon générale de la chimie, qui se rapporte aussi bien à l'activité des grands groupes industriels comme BASF qu'à la photosynthèse ou à la corrosion.

Les « nano-machins » fleurissent allégrement dans les rapports, avec des significations fluctuantes, ce qui favorise les amalgames, comme le montre la conclusion du rapport du Comité Consultatif National d'Éthique :

« En conclusion la question éthique de l'usage des nanomatériaux peut se décliner sous deux modes. L'un qui est celui de la question philosophique de l'homme-machine, soulevée par les nanosystèmes, toujours menaçante pour le respect de la personne. Cette question importante au plan des idées ne doit pas actuellement cacher la deuxième beaucoup plus urgente qui est celle de l'intrusion souterraine

de nanoparticules (...) Ne réduisons pas les nanosciences aux nanotechnologies. »⁴⁴

Il est impossible de dire des choses intelligentes sur les « nanos » sans définir les choses dont on parle, différencier les principales catégories et les traiter séparément. Or nous ne pouvons plus nous contenter d'un concept vague depuis que label « nano » est sorti de son caractère d'instrument de politique scientifique. D'autres acteurs réclament de participer aux orientations des nanotechnologies, comme le souligne Greenpeace :⁴⁵

«both precautionary principle and industry advocates agree that there is time to create dialogue and consensus that could prevent the kind of confrontations occurring that plagued the development of biotechnology»⁴⁶

Il est clair que le Débat Public organisé pour la fin 2009 risque de partir à vau l'eau si nous conservons des concepts aussi flous. Car il y a une dimension politique à définir. Comme le signale Benoit Croguennec, représentant de l'AFNOR au groupe de travail de l'ISO sur les nanotechnologies, l'absence de réglementation internationale en matière de nanotechnologies laisse aux instances de normalisation la responsabilité d'organiser et d'encadrer ce

⁴⁴ **Comité Consultatif National d'Éthique pour les Sciences de la Vie et de la Santé.** *Questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé.* 2007.

⁴⁵ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices.*, s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003.

⁴⁶ A la fois les défenseurs du principe de précaution et ceux de d'industrie s'accordent pour dire qu'il y a du temps pour mettre en place un dialogue et atteindre un consensus qui pourrait éviter le genre de confrontations qui ont empoisonné le développement des biotechnologies.

nouveau champ industriel en proposant un cadre souple et normatif capable de satisfaire les exigences économiques mais également les aspirations des pays développés au développement durable. De même restreindre les concepts de nano-objets et nanotechnologies, c'est en effet exclure les uns de subventions, priver d'autres d'une tribune publique pour exposer leurs revendications et imposer aux derniers des contraintes réglementaires dont ils se seraient bien passés. Il est néanmoins indispensable de trancher sur la question, car en l'état, il est impossible de construire des réglementations claires et efficaces sur un label « nano » aussi incohérent. Or les citoyens exigent un développement responsable des technologies aux pouvoirs publics, et particulièrement en matière de protection contre les risques sanitaires et environnementaux.

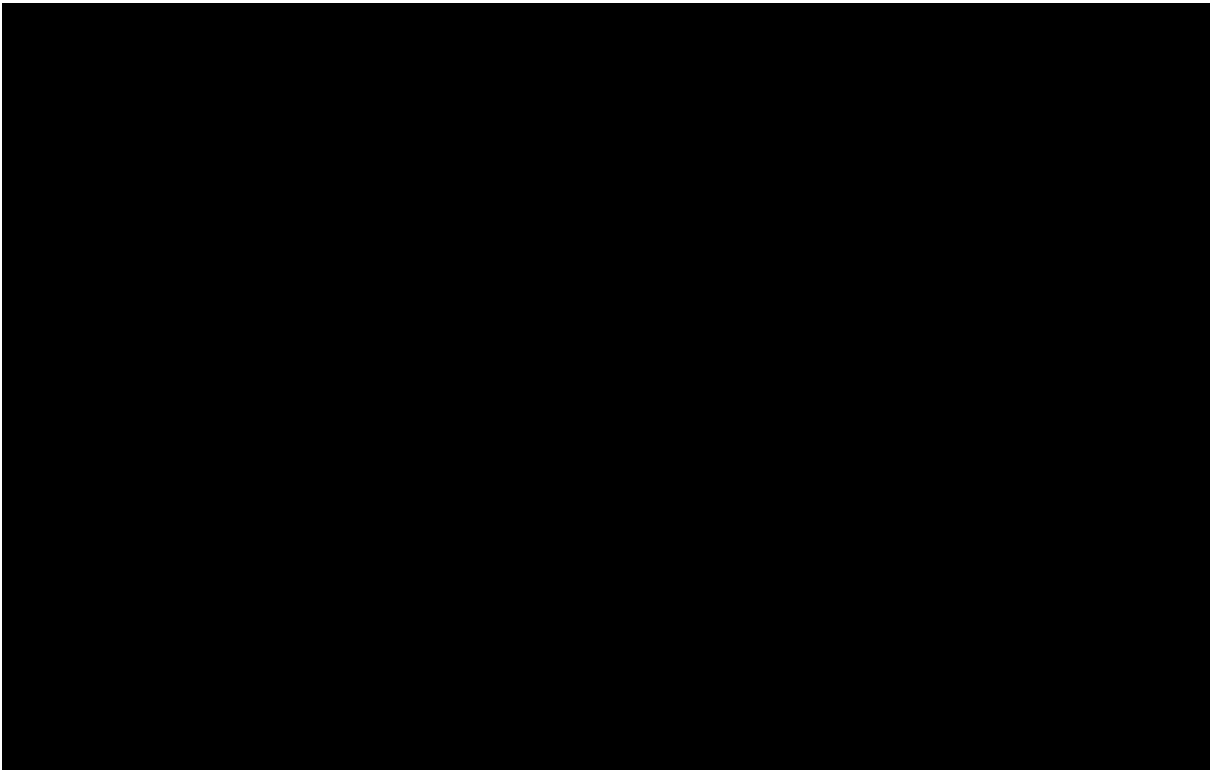
Des définitions restreintes

Quels sont les concepts qu'on retrouve couramment dans le mot valise « nano » : nano-objets, nanoparticules, couches minces, matériaux nanostructurés, matériaux nano-composites et nanotechnologies ? Dans ce chapitre, nous leur donnerons un sens et une restriction propres à mettre en lumière la véritable idée novatrice enfouie dans les nanotechnologies, à savoir que la taille d'une structure de la matière détermine ses caractéristiques physico-chimiques.

Les nano-objets : la taille influence les propriétés

Les nano-objets amènent une véritable révolution conceptuelle en chimie : on s'est en effet aperçu que les propriétés physico-chimiques d'un édifice d'atomes dépendaient non seulement de sa structure chimique, mais qu'elles pouvaient également dépendre de sa taille, et que cette dépendance apparaissait de manière drastique à l'échelle nanométrique. En voici trois exemples phares.

Les particules d'or changent de couleur avec leur diamètre à cause d'un phénomène de résonance des électrons de surface appelé effet plasmon qui déplace leur spectre d'absorption de la lumière. Rouges à 5 nm, elles virent au vert à 50 nm avant de retrouver la couleur jaune de l'or massif à 100 nm (Figure 10). Les maîtres verriers du Moyen-âge exploitaient déjà ces nanoparticules pour la coloration des vitraux des cathédrales.



Le nanotube de carbone est une molécule en forme de tube dont les parois sont constituées d'un réseau hexagonal d'atomes de carbone. Il peut être donc considéré comme le repliement cylindrique d'un plan de graphène (Figure 11), dont la dimension caractéristique est le diamètre, le graphène pouvant inversement être considéré comme un nanotube au diamètre infini. Contrairement au graphène qui est un semi-métal et un plan conducteur, le nanotube de carbone est soit métallique soit semi-conducteur en fonction de sa chiralité, et est un fil quantique avec une structure de bandes de conceptions différentes de celles du graphène.⁴⁷ Les nanotubes de carbone sont d'excellents conducteurs électriques et thermiques, et permettent de faire des transistors extrêmement sensibles, qui pourraient être utilisés dans des détecteurs de gaz ou de molécules biologiques. Etant de plus très résistants, ils sont de manière inattendue à l'origine de la dureté légendaire des épées de Damas.

⁴⁷ *Electronic and transport properties of nanotubes.* **al, Charlier et.** April-June 2007, Reviews of modern physics 79.

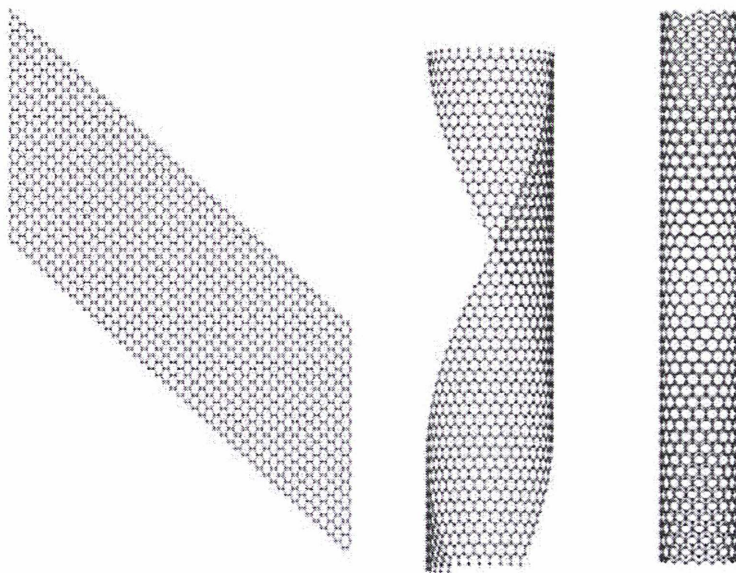


Figure 11 : schéma du repliement théorique d'une feuille de graphène (à gauche) sur elle-même pour obtenir un nanotube de carbone (à droite)

Enfin, une vanne de spin est un empilement de couches ferromagnétiques et non magnétiques de quelques nanomètres. Un sandwich d'une couche de cuivre entre deux couches de cobalt constitue par exemple une vanne de spin. La résistance électrique d'une telle structure varie avec le champ magnétique extérieur qui lui est appliqué : c'est le phénomène de magnétorésistance qui est dû à la dépendance des conductivités par rapport au spin des électrons de conduction (ceux qui se déplacent et qui créent le courant électrique). Cependant, la magnétorésistance disparaît dès que l'épaisseur du « sandwich » dépasse quelques centaines de nanomètres. La magnétorésistance, découverte par les prix Nobel 2007 Albert Fert et Peter Grünberg, a notamment permis le développement de disques durs de haute densité qu'on retrouve dans nos ordinateurs.

Un nano-objet est 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.

Parmi les nano-objets, on trouve certaines couches minces (une dimension nanométrique, et des propriétés différentes liées à cette épaisseur nanométrique). C'est par exemple le cas des cellules solaires en couche mince. L'absorption du photon dans la couche intrinsèque crée des charges électriques (appelées paire « électron – trou ») qui doivent pouvoir ensuite migrer jusqu'aux bornes de la cellule. Ceci n'est possible que si l'épaisseur de cette couche intrinsèque est suffisamment petite, de l'ordre de la centaine de nanomètres. Néanmoins, cette sous-catégorie « couches minces » mérite d'être traitée à part car les techniques et les risques qui s'y rapportent n'ont probablement rien à voir avec les objets qui ont deux ou trois dimensions nanométriques. On trouve par exemple une couche mince de dioxyde de titane sur les vitres auto-nettoyantes de Saint-Gobain. Une couche mince ne risque pas d'être inhalée directement comme une poudre, il faudrait au moins dégrader l'objet initial (en le perçant par exemple) mais ce risque peut également exister en dégradant un bloc macroscopique. Par opposition, les nano-objets autres que les couches minces seront appelés « nanoparticules ».

Des objets déclassés

La définition énoncée en gras, très proche de celle de l'AFNOR et l'ISO^{48,49}, nous permet d'exclure de la catégorie nano-objet d'autres structures de la matière de taille nanométrique par la méthode suivante. Prenons un objet potentiellement candidat et essayons de lui trouver son homologue macroscopique en agrandissant par la pensée les dimensions caractéristiques de l'objet, jusqu'à l'infini s'il le faut. Reprenons nos précédents exemples pour illustrer notre propos : l'homologue macroscopique d'une nanoparticule d'or est un cristal d'or aux dimensions de plusieurs centaines de nanomètres, l'homologue du

⁴⁸ **ISO/TS 27687:2008(E).** Nanotechnologies - Terminology and definitions for nano-objets - Nanoparticles, nanofibre and nanoplate. 2008.

⁴⁹ **AFNOR.** Nanotechnologies : la normalisation voit les choses en grand. *ENJEUX*.

nanotube, à savoir le plan de graphène, est obtenu en agrandissant le diamètre à l'infini, et l'homologue d'une vanne de spin serait l'empilement identique de couches mais d'épaisseurs très supérieures au micron.

Intuitivement l'existence d'un homologue macroscopique induit que l'objet candidat ne soit pas limité par son motif structural : une molécule non polymère, l'éthanol par exemple, n'a pas d'homologue macroscopique et n'est pas un nano-objet. Pour appuyer dans ce sens, notons que les propriétés chimiques d'une mole de ces molécules sont identiques à celle de la molécule seule. S'il existe un homologue macroscopique à l'objet candidat, nous devons vérifier s'il y a des différences de propriétés physico-chimiques entre les deux. Des polymères et des dendrimères dont le degré de polymérisation, et donc la taille, n'apporte pas de changement de propriété sont donc à exclure des nano-objets. C'est notamment le cas de l'ADN et de la plupart des protéines.

Parmi les objets déclassés des nano-objets se trouvent les structures souvent qualifiées de matériaux nano-structurés. Les matériaux nano-structurés sont des matériaux organisés à l'échelle nanométrique. Certaines structures comme les micelles existent depuis longtemps et sont le résultat d'interactions entre molécules hydrophobes et hydrophiles (Figure 12). Les bulles de savon en sont un bon exemple, la structure résultant de la minimisation des répulsions. Ces structures existent dans la nature (la micelle de caséine est un composant clé du lait) et peuvent également être synthétisées (copolymères à bloc d'Arkema, ou tout simplement une mayonnaise).

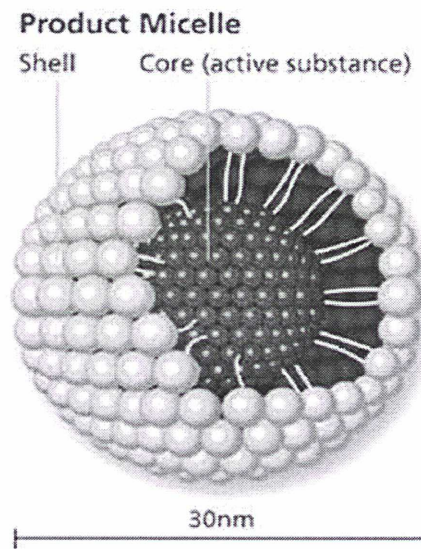


Figure 12 : Micelle (source : Georgia Tech Research Institute)

D'autres structures correspondent à des matériaux hétérogènes, comme l'amadéite d'Olmix, ou les contenants de dentifrices inspirés de la nacre. Ces matériaux présentent des propriétés macroscopiques particulières (résistance, imperméabilité aux gaz, absorption de certaines molécules), mais à la base, ils ne sont pas faits de nano-objets aux propriétés singulières.

Ces matériaux nano-structurés sont systématiquement inclus dans le mot valise « nanos ». Cependant nous souhaitons les exclure du champ des nanotechnologies lorsqu'ils ne présentent pas des propriétés physico-chimiques originales, parce que dans ce cas ils ne posent généralement pas de problèmes en termes de substance chimique.

Quelques subtilités problématiques

Comme on le voit, la définition d'un nano-objet ne repose pas stricto-sensu sur une limite de taille : en effet la dimension à partir de laquelle les variations de propriétés apparaissent dépend de la composition chimique, et même de la forme de l'objet. Derrière cette notion de

dimension se cache de plus une notion de continuum des propriétés physico-chimiques. Les changements de propriétés n'apparaissent généralement pas brutalement quand on descend en taille, comme le montre le spectre de couleur par lequel les nanoparticules d'or passent lorsqu'elles augmentent de diamètre (Figure 10).

Un grand nombre de nanoparticules ne sont pas stables, elles ont tendance à s'agréger pour diminuer leur énergie de surface. De même, elles ne sont souvent pas solubles dans n'importe quel liquide. Pour les stabiliser, les chimistes modifient leur surface, soit en greffant des molécules, soit en les « emballant » dans une micelle de surfactant.

Un nano-objet est donc généralement une substance complexe, avec une composition hétérogène en surface qui peut amener de nouvelles propriétés.

Non seulement la fonctionnalisation de surface, mais également l'environnement modifie souvent les propriétés du nano-objet. L'effet plasmon (c'est-à-dire le comportement des électrons de surface) d'une nanoparticule d'or est naturellement très sensible à l'environnement de la particule (solvant, greffage) et on observe très facilement des changements de couleur des particules lorsqu'on les transfère d'un solvant à un autre, car leur pic d'absorption de la lumière est déplacé.

Nous le verrons ultérieurement, toutes ces subtilités intrinsèques au concept de nano-objets posent un problème aigu de fondement opérationnel de nos législations.

Les nanotechnologies autour des nano-objets

Comment dégager la spécificité des nanotechnologies tant les acteurs qui s'en réclament représentent des secteurs industriels complètement hétéroclites ? Pour ne pas verser dans l'excès évoqués au chapitre II et inclure ainsi tous les procédés des matériaux, nous proposons de restreindre les nanotechnologies aux techniques de fabrication qui gravitent autour des nano-objets, et nous distinguons trois catégories en fonction du savoir-faire qu'elles représentent.

Les synthèses chimiques de nano-objets

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 avec le meilleur rendement et la plus grande pureté possibles.

Les nano-objets font partie des produits chimiques à haute valeur ajoutée, dont le volume de production ne dépasse pas la dizaine de milliers de tonnes par an, et souvent bien en deçà. Comme nous l'a signalé Jean-Marc Corpart, directeur du Département nanotubes de carbone chez ARKEMA⁵⁰, la production industrielle de nanotubes de carbone est actuellement limitée par la capacité des réacteurs actuels. Celle-ci ne dépasse pas quelques dizaines de tonnes par an pour les nanotubes multiparois (MWNT) et quelques kilogrammes pour les nanotubes monoparoi (SWNT)⁵¹. L'objectif annoncé par les grands groupes chimiques est de parvenir à augmenter la capacité des réacteurs à quelques centaines voire le millier de tonnes par an, afin de réduire les coûts de production. Il est intéressant de comparer ces chiffres avec les volumes de la chimie industrielle (300 000 à 500 000 tonnes/an) ou les « commodities » (produits de base) - plus du million de tonnes/an -, pour se rendre compte que l'exposition réelle des populations aux nanotubes est en vérité extrêmement faible.

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.

⁵⁰ ARKEMA. *Graphistrength*. [Online] 2009. <http://www.graphistrength.com/>.

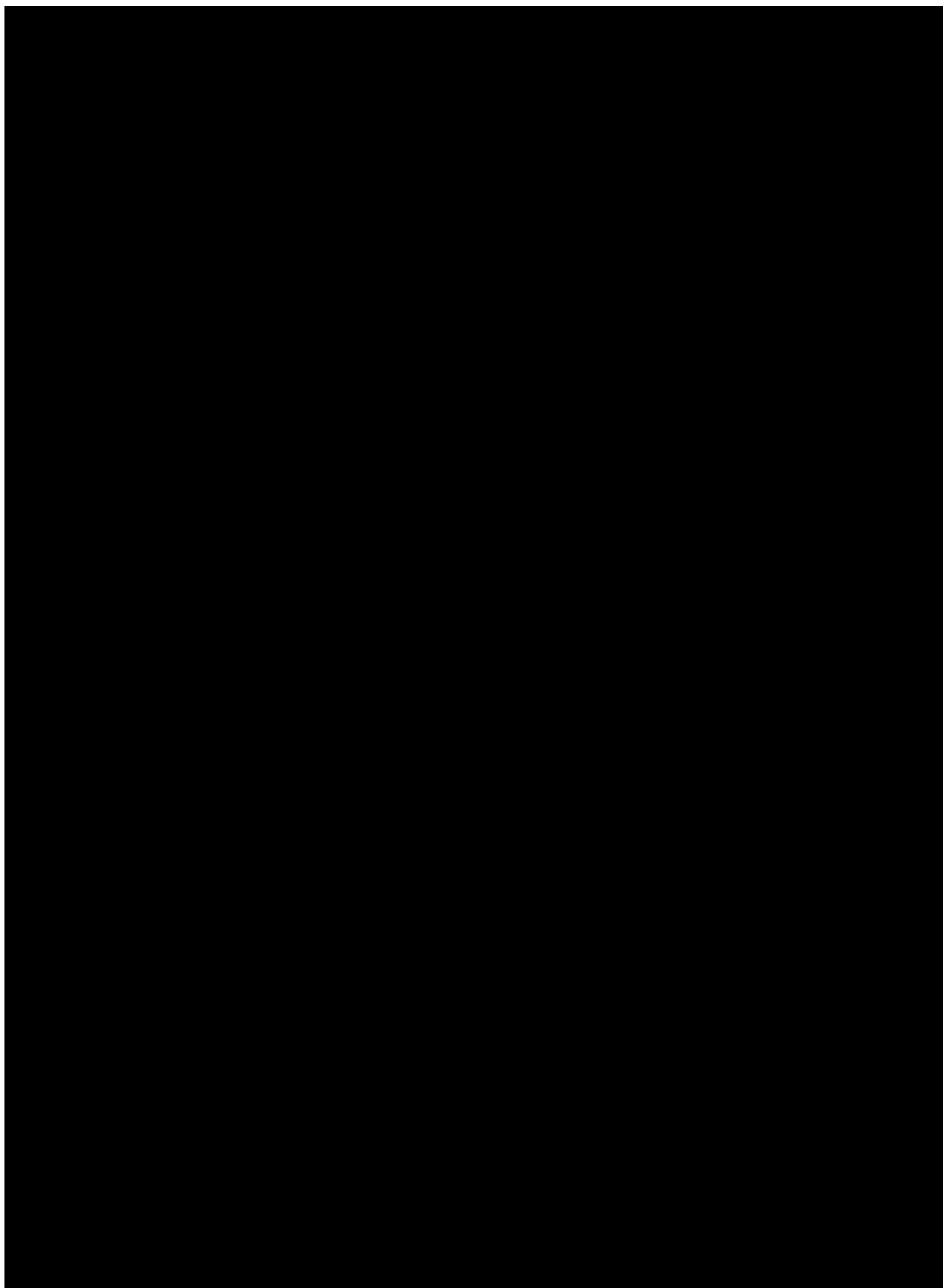
⁵¹ Les nanotubes multiparois sont en fait constitués de plusieurs tubes emboîtés les uns dans les autres comme des poupées russes, tandis que les nanotubes monoparoi ne sont constitués que d'un seul tube.

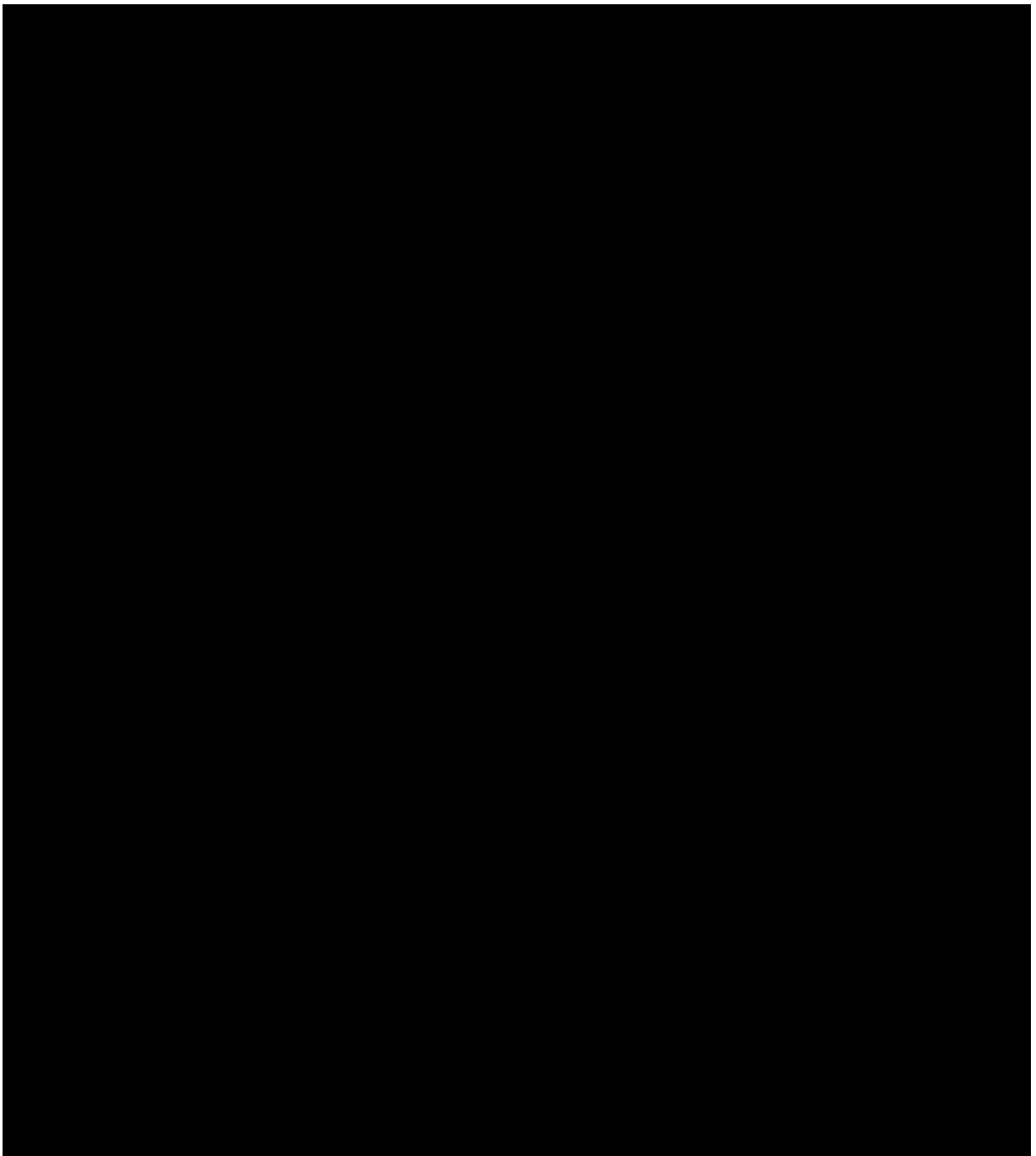
L'incorporation dans des substances nano-composites

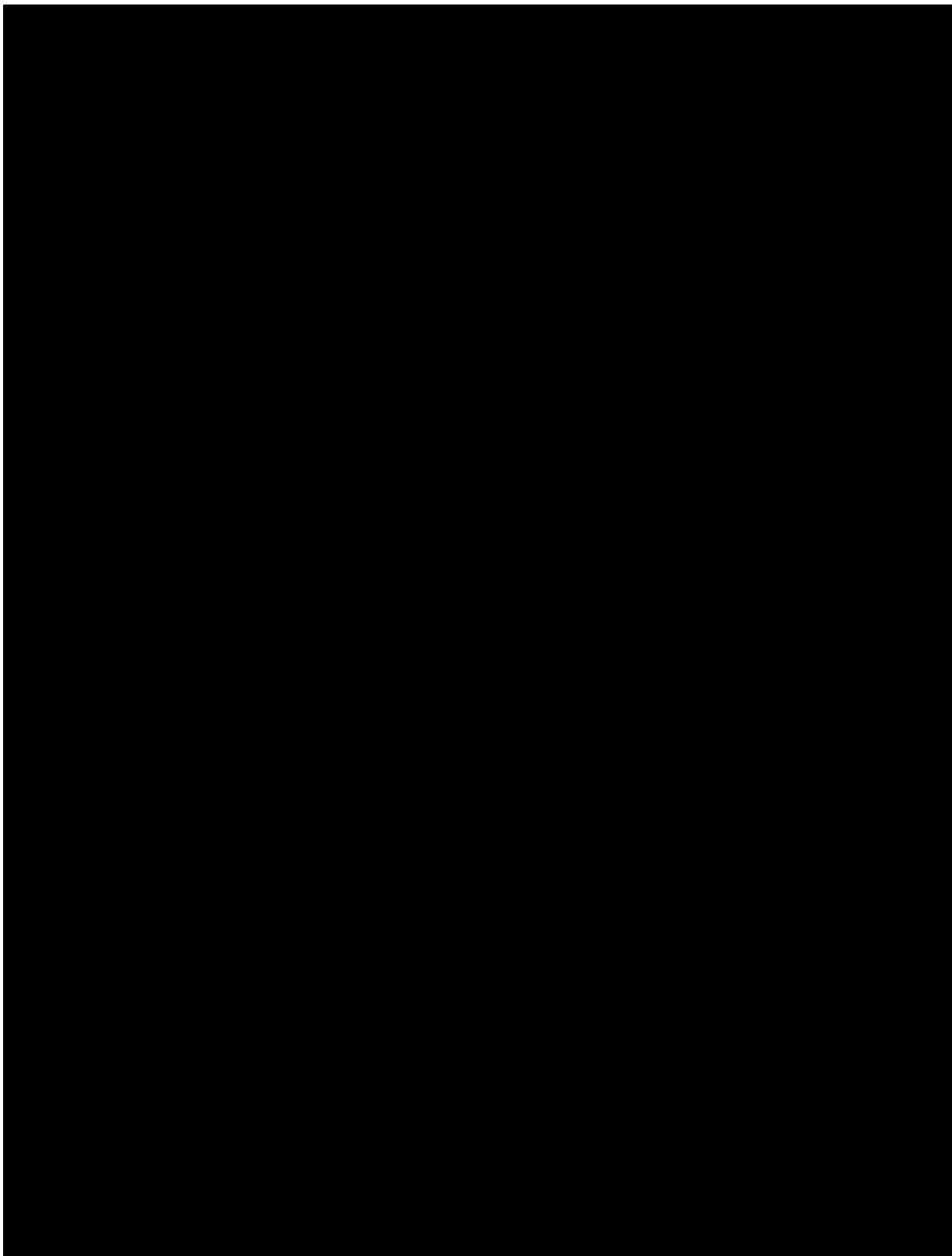
Le deuxième groupe de procédés concerne l'incorporation de nano-objets dans des substances que nous qualifierons de « nano-composites ». Les nano-objets sont dispersés ou synthétisés in situ dans la matrice ou en surface d'un solide, dans un liquide ou même un gaz, pour lui donner des propriétés intéressantes. Les techniques diffèrent peu de celles des additifs classiques, et offrent un champ d'innovation varié : revêtements pour l'aéronautique, verres autonettoyants, cosmétiques...

Pour revenir à l'exemple des nanotubes fabriqués par la société ARKEMA, ceux-ci sont justement destinés à substituer le noir de carbone dans de nombreux matériaux nano-composites. Ils apportent des propriétés de conductivité électrique et thermique à des thermoplastiques et des élastomères, et des propriétés mécaniques à des thermodurcissables. Les marchés concernés sont les revêtements pour l'automobile et l'aéronautique, notamment par leur client Nanoledge.

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.







Un certain nombre de nano-objets, dont notamment le nanotube de carbone, réclament d'autres procédés pour être positionnés dans des dispositifs, car ils ne peuvent pas être sculptés dans le matériau support. Une seconde génération de techniques est donc très attendue sur ce sujet, mais elle reste actuellement en gestation dans les laboratoires⁵³. Ce verrou technologique majeur est l'une des principales causes du retard de transfert technologique de l'ensemble des dispositifs utilisant des objets uniques, comme les transistors à nanotube suspendu (Figure 16).

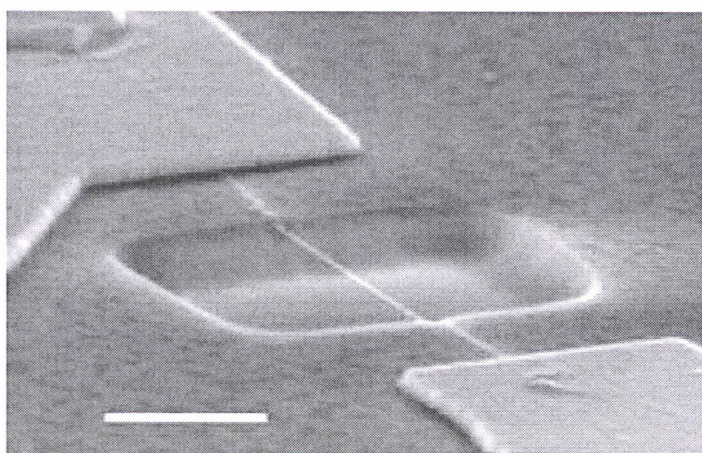


Figure 16 : Transistor à nanotube unique suspendu

Enfin, on peut également parler de « nanotechnologies de dispositifs » pour les « systèmes embarqués », comme les nanoparticules utilisées à des fins médicales, qui fonctionnalisées par les marqueurs adéquats et par les principes actifs, sont capables de cibler les cellules infectées ou cancéreuses et administrer précisément le médicament.

⁵³ **Derycke et al.** Carbon nanotube electronics.

Ces technologies ne présentent pas de risque en soi, mais en décuplant les possibilités des TIC et de la médecine, elles pourraient rendre des dérives sociétales possibles.

Ne pas confondre nanotechnologies avec...

Chaque catégorie de nanotechnologies répond, nous l'avons déjà évoqué, à des problématiques de savoir-faire différentes et s'adresse à des applications et des industries disjointes. Cependant le dénominateur commun se trouve dans la maîtrise de la matière : les nanotechnologies sont essentiellement des technologies de fabrication. Or on assimile trop souvent les nanotechnologies à d'autres domaines de pointe.

Le fait de recentrer les nanotechnologies sur les procédés impliquant des nano-objets nous permet d'écarter les sciences des matériaux qui structurent la matière effectivement au niveau nanométrique sans créer de nano-objet et donc de ne pas les inclure dans des problématiques de réglementation chimique.

Nous tenons également à bien séparer les biotechnologies des nanotechnologies, en ce sens que manipuler du vivant demande un certain nombre de précautions supplémentaires. Quant à la convergence bio-nanotechnologies, peu évidente d'ailleurs car il s'agit de deux échelles différentes (micromètre contre nanomètre), il faut effectivement l'inscrire sous les procédures déontologiques de la bioéthique.

Enfin, il faut impérativement dissocier les nanotechnologies, qui concernent la matière, de leurs applications, et en particulier des technologies de l'information et de la communication. En effet les nanotechnologies apportent les solutions techniques pour fabriquer un composant, tandis que les TIC imaginent le principe d'un dispositif pour qu'il réponde à une certaine fonction. Or on fait souvent l'amalgame, et

tout particulièrement pour les fameux RFID⁵⁴ (Radio Frequency Identification).

Bilan

Le schéma suivant récapitule l'ensemble des définitions que nous avons proposées au long de ce chapitre. Nous distinguons donc dans les structures de la matière :

Les nano-objets, dont la taille conditionne la propriété chimique par rapport à son homologue macroscopique. Deux sous-catégories se distinguent, les couches minces nano et les nanoparticules.

Les matériaux nano-composites : solide, liquide ou gaz contenant des nano-objets dispersés comme additifs.

Les matériaux nano-structurés : matériaux dans lesquels la matière est organisée à l'échelle nanométrique, mais sans faire de nano-objet. Un très grand nombre de structures naturelles et artificielles le sont. Nous ne les considérons pas comme faisant partie des nanotechnologies.

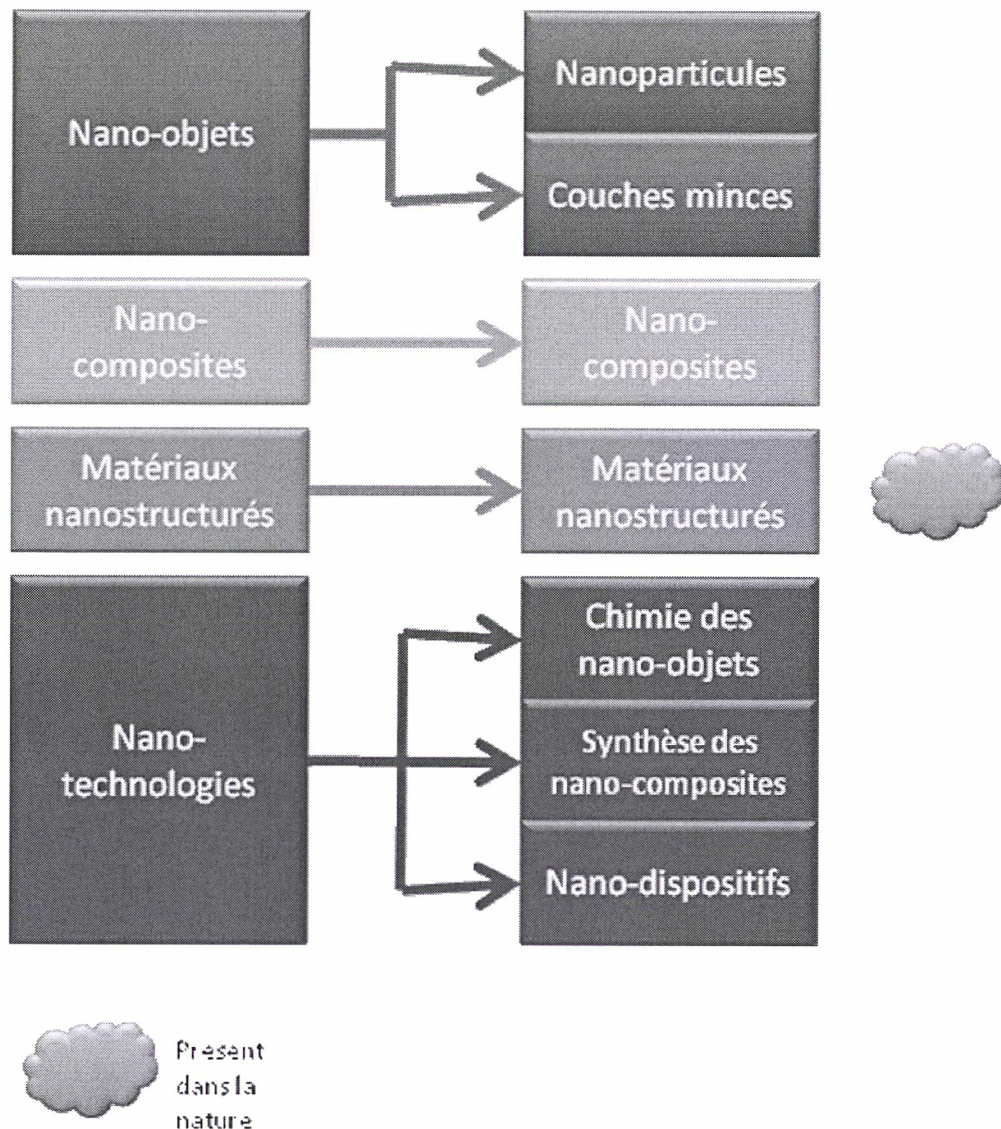
Nous restreignons les nanotechnologies aux procédés de fabrications utilisant des nano-objets :

Les synthèses par voie chimique de nano-objet.

Les synthèses de matériaux nano-composites.

⁵⁴ Un RFID est une petite étiquette qui cumule trois fonctions : un mécanisme produisant de l'énergie (sous forme de courant induit) quand elle traverse un champ magnétique, une mémoire avec un processeur et une antenne. Ainsi, quand cette étiquette passe près d'un lecteur émettant un champ magnétique, elle est activée et échange des données avec le lecteur. Un RFID peut exister à toute taille, en l'occurrence elle généralement inférieure au millimètre. C'est par exemple le principe du passe Navigo de la RATP.

Les nanotechnologies de dispositifs, parmi lesquelles on distingue les procédés de lithographie et dépôt et les techniques de positionnement d'objet unique.



Note : il se pourrait par exemple que les éruptions volcaniques produisent des nano-objets sous forme de noir de carbone mais cela reste à vérifier ; dans ce schéma récapitulatif, nous nous sommes limités aux connaissances avérées.

Comme nous le décrivions dans le chapitre I, les nanotechnologies font l'objet d'un véritable mythe de l'Eldorado, les pouvoirs publics de tous les pays adhérant d'une manière générale aux perspectives d'un marché en croissance exponentielle atteignant des milliers de milliards de dollars autour de 2015. Pourtant les estimations mirobolantes avancées sont peu solides, car elles sont effectuées à long terme (typiquement les cabinets de conseils prédisaient en 2004 les perspectives pour 2010 et 2015) sur des technologies émergentes. Certes les nanotechnologies offrent des horizons extrêmement vastes en terme d'applications et de secteurs, mais elles exigent en même temps un bagage scientifique de haut niveau pour comprendre ne serait-ce qu'une seule thématique, et pour pouvoir juger de la pertinence et de la faisabilité d'une innovation. Le tout combiné à l'enthousiasme des politiques publiques sur les « nanos », le secteur risque d'offrir une nouvelle occasion de bulle financière, à l'instar de la bulle spéculative sur internet.

Un manque de remontée du terrain

Contrairement à ce que laissent croire les estimations des cabinets de conseils, il est en réalité extrêmement difficile de faire remonter des informations chiffrées fiables au sujet des nanotechnologies. Comme nous l'a confié Françoise Roure, les instruments statistiques des pouvoirs publics sont quasiment inexistant dans la matière. En effet il n'existe pas de réglementations exigeant des entreprises la déclaration de l'utilisation de nanotechnologies, et ces entreprises auraient de plus beaucoup de difficulté à faire une telle évaluation étant donné le flou qui règne actuellement sur le terme nano.

Par conséquent, les pouvoirs publics s'appuient essentiellement sur des données indépendantes faites soit par les cabinets de conseils comme Lux Research ou Bcc, ou par des ONG, comme ETC group ou Greenpeace. Mais on peut s'interroger alors sur les sources, les méthodes et les critères économétriques employés par ces organismes,

qui ne sont pas toujours adéquats. Qu'ils soient partisans ou opposants aux nanotechnologies, ces organismes ont généralement tendance à exagérer l'ampleur et le degré de concrétisation des nanotechnologies et de leurs applications.

Pour Michael Berger, de Nanowerk, depuis que la National Science Foundation a déclaré, en 2001 que le marché des nanotechnologies serait de 1000 milliards de dollars en 2015, on assiste à une véritable surenchère des sociétés de conseil ou d'investissement, qui gonflent les chiffres du marché des nanotechnologies en y agglomérant celui des produits incorporant des nanocomposants. Ainsi, la société Lux Research estime qu'en 2010, le marché des nano-objets devrait peser 3,6 milliards de dollars, et le « marché total des nanotechnologies » 1500 milliards de dollars. La société Cientifica estime de son côté que les semi-conducteurs représentent la moitié des 2950 milliards de dollars du marché des nanotechnologies en 2015, tout en précisant que ce marché ne relève pas que des seuls nanocomposants, mais des produits dans lesquels ils sont insérés, c'est-à-dire de l'ensemble des produits électroniques.

Le site « The project on emerging technologies »⁵⁵ s'est lancé dans l'exercice délicat de recenser l'ensemble des produits commercialisés qui se réclamaient des nanotechnologies, afin de pouvoir mettre à disposition des consommateurs une liste de consultation, mais également fournir une sorte de baromètre du développement des applications des nanotechnologies. Comme ils le soulignent, la tâche est extrêmement délicate car leur méthodologie n'est pas basée sur des données objectives mais sur des déclarations positives. D'une part ils se basent uniquement sur les informations disponibles sur internet, donc potentiellement parcellaires et inexacts. Des produits issus de nanotechnologies peuvent donc échapper à cette base pour peu qu'il n'en soit pas fait mention sur internet. D'autre part ils ne sont pas en

⁵⁵ **nanotechproject.** <http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>.
<http://www.nanotechproject.org/>. 2008.

mesure de faire des contre-expertises nécessaires pour vérifier si un produit est véritablement nano ou non :

*"Finally, there are some products included which producers allege are "nano," but which may not be. We have made no attempt to verify manufacturer claims about the use of nanotechnology in these products, nor have we conducted any independent testing of the products. We have tried to remove most of these, but some have undoubtedly slipped through."*⁵⁶

En miroir de la brume qui règne sur l'impact économique des nanotechnologies, on observe la même opacité quand on s'intéresse à la ventilation des crédits de recherche sur les différentes thématiques des nanotechnologies. Laurent Gouzènes, directeur de programme de recherche à ST Microelectronics et ancien responsable de P3N (programme Nanosciences, Nanotechnologies Nanosystèmes), le programme de subventions de l'agence nationale de Recherche (ANR), nous a répondu qu'il était quasiment impossible d'extraire de telles statistiques même à l'échelle de la France, pour deux raisons : de par la complexité des systèmes de financement de la recherche, et parce que la frontière du domaine nano est floue avec la chimie, la métrologie, la biologie etc. Il est regrettable de constater que de telles données ne sont pas compilées ni rendues publiques, car on a un peu l'impression que les pouvoirs publics investissent à l'aveugle et ne sont pas en mesure de donner des indications claires de leurs efforts financiers aux investisseurs privés. Néanmoins nous avons pu reconstituer des informations partielles via les listes de projets sélectionnés et financés par l'ANR au cours des dernières années (

⁵⁶ Finalement, il y a des produits, même parmi ceux que les producteurs présentent comme nano, qui peuvent ne pas en être. Nous n'avons fait aucune tentative pour vérifier ce que les producteurs affirment sur l'utilisation des nanotechnologies dans leurs produits, pas plus que nous n'avons conduit de tests indépendants de leurs produits. Nous avons essayé d'en enlever la plupart, mais sans aucun doute certains sont passés au travers des mailles du filet.

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Etudes théoriques	5	7	4	4	2
Nano-objets	10	6	8	5	5
Nano-composite	2	5	5	0	2
Nano-dispositifs	28	22	14	16	17
Autres structures nanométriques	17	18	8	11	2
Equipement	4	1	2	0	2
Métrologie	8	11	9	2	5

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Chimie	7	10	9	9	5
Matériaux	7	9	6	6	1
Biologie/ médecine	12	9	5	2	4
Opto-électronique	34	32	22	14	10
Nano-mécanique	4	1	3	4	0
Toxicologie/ Impact sociétaux			3	2	1

Tableau 3). Malheureusement les montants des financements ne sont pas toujours communiqués. L'ANR finance exclusivement des projets de recherche fondamentale, et on remarque une nette prédominance de la nano-opto-électronique (deuxième tableau), correspondant aux technologies de dispositifs (premier tableau) dans les études retenues

par l'ANR. Il est intéressant de noter que peu de projets portant sur la fabrication et l'étude de nouvelles nanoparticules ou de matériaux nano-composites sont sélectionnés. Nous y reviendrons.

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Etudes théoriques	5	7	4	4	2
Nano-objets	10	6	8	5	5
Nano-composite	2	5	5	0	2
Nano-dispositifs	28	22	14	16	17
Autres structures nanométriques	17	18	8	11	2
Equipement	4	1	2	0	2
Métrologie	8	11	9	2	5

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Chimie	7	10	9	9	5
Matériaux	7	9	6	6	1
Biologie/ médecine	12	9	5	2	4
Opto-électronique	34	32	22	14	10
Nano-mécanique	4	1	3	4	0
Toxicologie/ Impact sociétaux			3	2	1

Tableau 3 : Répartition des projets de recherche financé par l'ANR dans le cadre du programme P3N depuis 2005. Le premier tableau recense les projets en fonction de leur typologie : nanotechnologies de catégorie 1, 2, 3, procédés relatifs à des structures nanométriques non « nano-objet » (micelle, molécules biologiques etc.), équipement, métrologie. Le second tableau classe les projets selon leur discipline scientifique.

Cette statistique est celle résultant du périmètre du programme nano à l'ANR, et n'inclut pas les autres projets nanos financés dans les programmes chimie, biologie, etc.

Source : ANR - délégation nano"

Des investisseurs trop pressés

Dès 2002, The Economist dénonce ces nanoenthousiastes qui poussent à la bulle financière en « *recklessly setting impossibly high expectations for the economic benefits.* »^{57 58}.

En effet les perspectives économiques défendues par les cabinets de recherche comme par les grands programmes d'orientation scientifique négligeaient les verrous technologiques et minimisaient ainsi le temps de retour sur investissement. Par exemple la NNI en 2001 prévoyait pour 2010 un marché important dans le médical, alors que par nature ce secteur demande des constantes de temps de développement de plus de 15 ans ! Cela n'empêchait pas Mihail Roco, haut conseiller de la National Science Foundation, de déclarer : « *Early payoffs will come in computing and pharmaceuticals.* » D'autres l'ont suivi, comme Alexander Huw Arnall dans le rapport de Greenpeace⁵⁹ :

« *the first real nanotechnology products are starting to appear in the semiconductor industry – to increase storage densities on microchips –*

⁵⁷ *Trouble in nanoland. The Economist.* 5 décembre 2002.

⁵⁸ Fixant imprudemment des espérances de profits économiques impossibles à atteindre.

⁵⁹ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*, s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003.

and in the pharmaceutical industry to improve drug targeting and diagnostic aids. »⁶⁰

nous verrons plus loin que les applications pharmaceutiques des nanotechnologies sont encore à un stade de gestation, certes très prometteur. Un rapport de Cientifica intitulé fort à propos « Where has my Money gone » fait état en 2006 du retard constaté des retombées effectives des grands programmes d'investissement dans les nanotechnologies⁶¹. Il souligne les déceptions prévisibles des investisseurs pressés face à la lenteur des sciences de la matière :

« Putting money into R&D never produces immediate results, the reason that most venture capitalists will never fund a company without some proof of concept. Our analysis of research spending shows that the vast majority of funding is earmarked for basic science. A typical research to product cycle is seven years with the majority of researchers remaining hazy about any commercial applications of their work. »⁶²

En effet, le rapport met en lumière les facteurs inhérents aux nanotechnologies qui empêchent le développement fulgurant espéré, contrairement aux applications informatiques qui présentent un tout autre profil industriel. Les verrous technologiques majeurs sont

⁶⁰ Les premiers véritables produits nanotechnologiques commencent à apparaître dans l'industrie des semi-conducteurs – pour augmenter les capacités de stockage sur les micropuces – et dans l'industrie pharmaceutique pour améliorer le ciblage des médicaments et les aides au diagnostique.

⁶¹ Where has my Money gone? Government Nanotechnology funding and the \$18 billion pair of pants. s.l. : Cientifica, January 2006.

⁶² Injecter des fonds dans la R&D ne produit jamais de résultats immédiats, c'est la raison pour laquelle les capitaux risqués ne financeront jamais une entreprise sans une sorte de preuve du concept. Nos analyses des dépenses de recherche montrent que la vaste majorité des financements est affectée aux sciences fondamentales. L'ordre de grandeur de durée entre la phase de recherche et la phase de production est typiquement de sept ans, avec la majorité des chercheurs restant flous sur la moindre application commerciale de leur travail.

nombreux, les secteurs concernés (chimie, électronique, médecine...) sont généralement très capitalistiques, le recours aux sciences fondamentales est fréquent, le personnel doit être de très haute qualification et si possible en même temps pluridisciplinaire. Rien à voir avec le paysage d'entreprises de service que représente internet ! A notre avis, cette différence structurelle a paradoxalement sauvé les nanotechnologies d'une bulle spéculative qui aurait pu s'enclencher à la suite de la bulle internet. En effet, les nanotechnologies ont bénéficié d'un investissement privé comparable en ordre de grandeur aux investissements publics, alors que des milliers de milliards de dollars de masse de capitaux privés circulent sur les marchés financiers, capitaux qui s'étaient mobilisés sur les technologies internet autour des années 2000. Si bulle spéculative il y a, il ne s'agit que d'une bulle spéculative du public, somme toute bien limitée. C'est très certainement la nature des nanotechnologies, qui nécessitent des investissements long terme et risqués, qui ont dissuadé les fonds spéculatifs de se lancer dans la surenchère aux « nanos ».

Un paysage entrepreneurial adéquat ?

Comme le souligne Jean-Eric Wegrowe, co-directeur du fond capital-risque « Nanodimension » et professeur et chercheur à l'Ecole Polytechnique, investir dans les start-up de nanotechnologie demande une expertise scientifique très pointue. La veille technologique en matière de nanotechnologies est un métier en soi, nous a-t-il confié, car la plupart des véritables informations relatives à la recherche opérationnelle sont souvent inaccessibles au profane, perdues dans les compte-rendus de conférences, tandis que les grandes revues scientifiques se préoccupent plutôt de la recherche fondamentale. A ce titre, des structures comme l'OMNT (Observatoire des Micro et Nano Technologies) se mettent en place pour aider les entreprises et les investisseurs français à s'y retrouver.

L'interaction entre les mondes financier et scientifique à un tel niveau d'expertise nécessite l'apparition de structures hybrides telles que

Nanodimension, capable d'apporter des compétences pointues dans les deux domaines. Elles peuvent servir d'intermédiaire pour les hedge-funds plus importants mais plus généralistes, et apportent un conseil en management de l'innovation à des entrepreneurs provenant bien souvent du milieu académique et donc peu expérimentés en gestion et finance d'entreprise. Les petites structures spécialisées comme « Nanodimension » sont typiques de ce mouvement des « business angels » de très hautes technologies, mais ne sont pas le seul modèle envisageable. De grandes institutions financières préfèrent créer des départements entièrement dédiés aux nanotechnologies. Mais le phénomène le plus caractéristique provient des grandes entreprises du secteur des hautes-technologies comme IBM, Bell labs ou Intel, qui jouent maintenant le rôle de financier pour les start-up. En effet, ces entreprises ont entamé un mouvement d'externalisation massive de leur R&D, qui leur permet non seulement de limiter les coûts, mais également de partager le risque avec le monde financier lorsqu'ils investissent sur une nouvelle technologie, et in fine de ne racheter que les start-up pertinentes et profitables. Car les grands groupes restent les décideurs du secteur, comme le remarque Françoise Roure : en définitive ce sont eux qui décident de l'entrée ou de la sortie d'une innovation, et les innovations en nanotechnologies nécessitant généralement un investissement capitalistique lourd, ils restent des acteurs incontournables. Dans certains secteurs, l'arrivée d'une innovation peut totalement remettre en cause le modèle économique établi et susciter une forme de résistance de la part des grands groupes en place. La question peut par exemple se poser pour les thérapies contre le cancer. Les nouvelles méthodes de ciblage à base de nanoparticules comme celle développée par le professeur Naomi Halas dans les années 1990 pourraient apporter de tels bénéfices en termes d'effets secondaires et de taux de rémission qu'elles pourraient totalement supplanter les chimiothérapies classiques, qui constituent un business très lucratif pour les acteurs du marché.

Ce mouvement de désengagement des grandes entreprises dans la recherche appliquée force l'implication de la sphère financière dans le

développement des nanotechnologies. Mais ces nouveaux acteurs sont par nature moins à même d'évaluer les réels débouchés économiques des innovations car il peut leur manquer un certain nombre d'éléments contextuels (normes, compatibilité avec d'autres procédés, acceptation des clients...) que les grands groupes, destinataires finals des start-up, possèdent. D'autant que comme le souligne Françoise Roure, un brevet ne suffit pas, il faut une agrégation de brevets pour aboutir à une innovation.

Cette situation favorise donc quelque part les risques de bulle spéculative, par manque de discernement. Un certain nombre d'éléments sont pour Jean-Eric Wegrowe des symptômes avant coureurs de cette bulle spéculative. Il cite notamment le foisonnement de start-up dans les étapes « périphériques » du process - comme les logiciels de CAO ou les instruments de laboratoire (microscopes, spectromètres...) - qui se multiplient alors que les technologies de fabrication se font attendre. On peut également appuyer son analyse en revenant sur les projets financés par l'ANR (

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Etudes théoriques	5	7	4	4	2
Nano-objets	10	6	8	5	5
Nano-composite	2	5	5	0	2
Nano-dispositifs	28	22	14	16	17
Autres structures nanométriques	17	18	8	11	2
Equipement	4	1	2	0	2
Métrologie	8	11	9	2	5

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Chimie	7	10	9	9	5
Matériaux	7	9	6	6	1
Biologie/ médecine	12	9	5	2	4
Opto-électronique	34	32	22	14	10
Nano-mécanique	4	1	3	4	0
Toxicologie/ Impact sociétaux			3	2	1

Tableau 3), qui se concentrent sur l'innovation dans les nano-dispositifs plutôt qu'en chimie des nano-objets et matériaux nano-composites, pourtant a priori plus simples à développer et tout aussi prometteurs en terme d'applications. Quand on décortique de plus la ligne des applications « nano-dispositif », de nombreux projets concernent des dispositifs particuliers, parfois très amonts, alors que peu de projet concerne le développement et l'amélioration des procédés de fabrication en eux-mêmes. Un grand nombre d'acteurs des nanotechnologies auraient donc une perception erronée des véritables enjeux technologiques qui bloquent le développement économique.

Un développement par étapes de complexité

Le rapport du cabinet BBC⁶³, plus raisonnable que ceux de Lux Research, estime que le marché global des nanotechnologies tournerait aux alentours des 25.2 milliards de dollars en 2011 (à comparer avec les 1000 milliards prévus par la NNI). Selon BCC, le domaine le plus prolifique est de loin celui des nanoparticules et nano-composites, avec 86% du marché total. Les outils pour les nanotechnologies, comme les

⁶³ **McWilliams, Andrew.** *NANO31B*. s.l. : BCC research, July 2006.

instruments de nano-lithographies, représenteraient 10% du marché et les nano-dispositifs 4% (Figure 17).

Loin des annonces de la NNI, nous adhérons donc à la thèse du développement des nanotechnologies par étapes de complexité telle qu'elle est présentée dans le rapport CEA-ALCIMED de 2004⁶⁴ (Figure 15) En dehors de l'électronique, qui reste l'industrie pionnière en matière de nanotechnologies, tous les autres secteurs apparaîtront suivant leur degré de complexité : la chimie des nano-objets et des nano-composites en premier lieu, puis la médecine, les systèmes énergétiques, les capteurs biologiques etc.

⁶⁴ **CEA-ALCIMED.** *Nanotechnologies : prospective sur la menace et les opportunités au service du combattant*, Avril 2004. avril 2004.

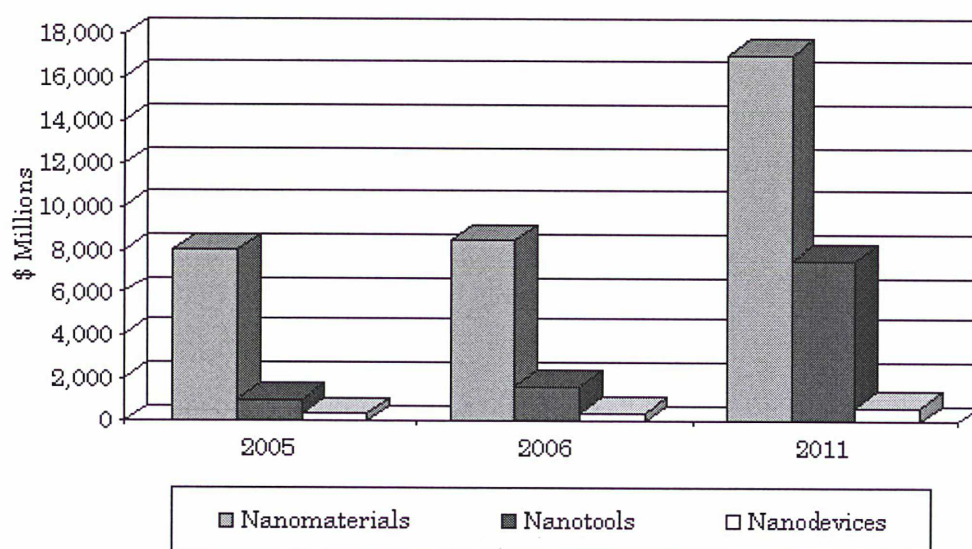


Figure 17 : Marché des nanotechnologies, segmenté entre les « nanomatériaux » (i.e. nanoparticules et nano-composites), les outils des nanotechnologies et les nanodispositifs. Source : Bcc research, 2006

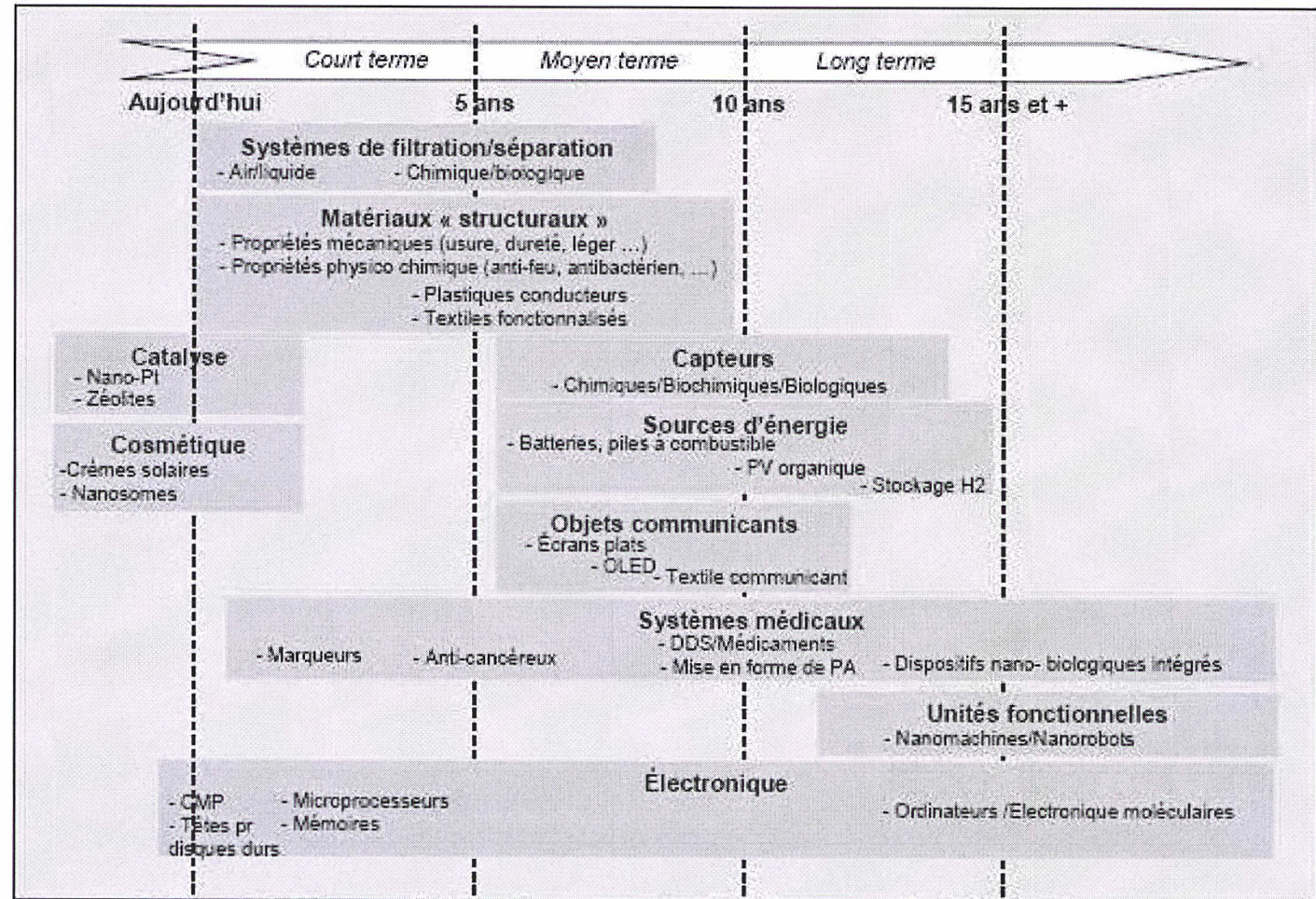


Figure 8 : Temps de développement attendus pour les différents axes de recherche en nanotechnologies

Figure 18 : Calendrier prévisionnel des applications des nanotechnologies.

Source : Nanotechnologies : prospective sur la menace et les opportunités au service du combattant, CEA - ALCIMED, 2004

La distorsion médiatique

Les applications des nanotechnologies : faits médiatiques et réalité des faits

Certaines applications des nanotechnologies sont fréquemment évoquées alors qu'elles sont incertaines et irréalisables à moyen terme. Parallèlement, d'autres débouchés sont occultés alors qu'ils font déjà l'objet d'une production industrielle. **Il existe donc une disjonction essentielle entre la médiatisation des applications des nanotechnologies et la vraisemblance de leur concrétisation.** Pour mieux visualiser cette distorsion, nous introduisons une matrice contenant quatre quadrants. De la gauche vers la droite, nous allons de l'hypothétique au concret. Du haut vers le bas, du médiatique vers le furtif.



Remplissons maintenant la matrice en analysant les applications des catégories de nanotechnologies définies plus haut. On s'attendrait à remplir principalement les cases « bourgeon » et « bombe », puisque ce qui est hypothétique et lointain ne devrait pas susciter un grand intérêt,

alors que ce qui est imminent, de grande ampleur, devrait être au cœur des discussions. Ce n'est pas ce qu'on observe.

Les matériaux nano-composites dans l'industrie

Véritable iceberg, l'industrie des matériaux nano-composites, et avec elle la synthèse des nano-objets, est pourtant en pleine explosion avec des applications extrêmement variées. Le développement des nanoparticules de toute sorte, métallique, oxyde, polymère, multicouches, terre rare, est d'ailleurs un sujet de recherche prolifique de la chimie inorganique.

Certaines applications sont le prolongement d'anciens savoir-faire comme l'incorporation de nanoparticules ayant des propriétés optiques (couleur, fluorescence, bandes d'absorption particulière...) dans des matrices de verre ou de polymères.

Certains nano-objets ont des propriétés catalytiques, comme les couches minces d'oxyde de titane (TiO_2) recouvrant les vitres auto-nettoyantes de Saint-Gobain qui peuvent détruire les salissures organiques qui se déposent.

D'autres nano-objets sont utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques ou thermo-électriques des matériaux, comme les nanotubes de carbones, appelés à remplacer le noir de carbone dans les résines, par exemple dans les revêtements antistatiques pour l'aéronautique (Nanoledge). Au plus fort de la mode des « nanos », les nanotubes ont été intégrés dans des raquettes de tennis ou les cadres de vélos pour le sport de haut niveau.

Certaines nanopoudres sont compactées pour fabriquer des prothèses de hanche céramique ou des filtres nanoporés pour l'assainissement de l'eau (voir notamment les travaux de l'équipe du professeur Jean-Yves Bottero du CEREGE).

Contrairement à ce que pourrait faire penser la notoriété exacerbée des nanotubes de carbone, les nano-objets les plus employés sont les

nanoparticules d'oxyde et les nanoparticules métalliques, et comme le montre les estimations de Lux Research, le marché mondial des nanoparticules reste relativement modeste, même avec les prévisions optimistes pour 2010.

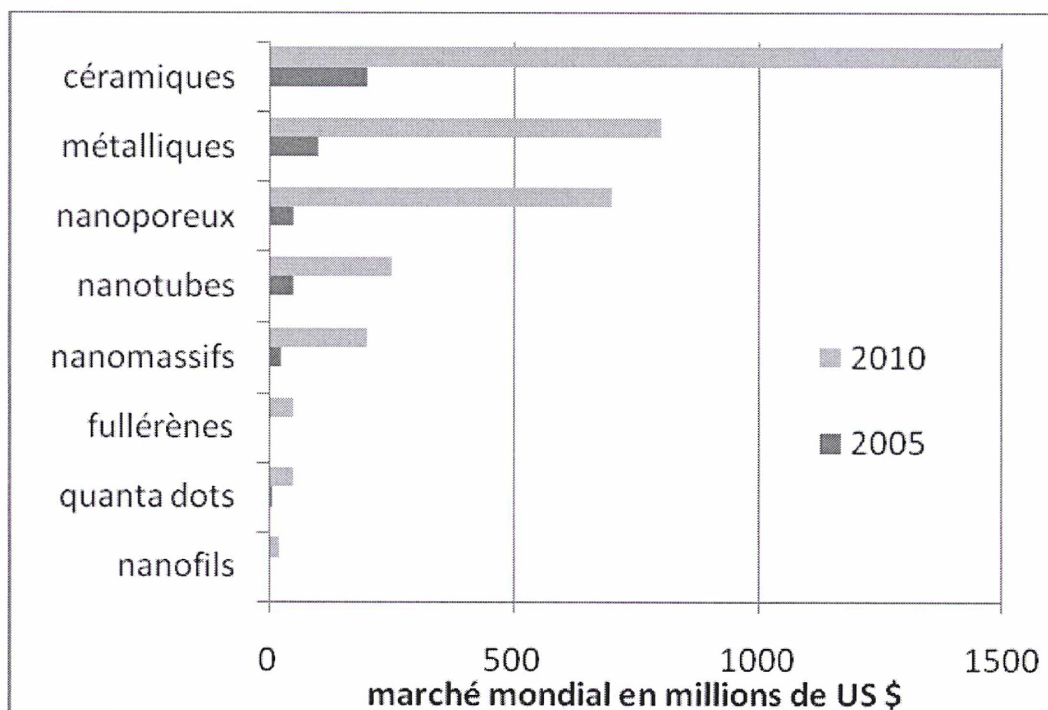


Figure 19 : Estimation en 2005 du marché mondial des nanoparticules par catégories (en millions de dollars). Source : Lux Research

Les cosmétiques

Un peu à part dans les matériaux nano-composites, l'industrie de la cosmétique incorpore depuis une vingtaine d'années des nanoparticules de d'oxyde de titane (TiO_2) dans les protections solaires, certaines crèmes de jour et anti-rides, pour leur absorption des UV. Selon Anne Dux, Directrice des Affaires Scientifiques et Réglementaires de la fédération des entreprises de la beauté (Febea), elles sont actuellement le seul agent filtrant efficace pour les protections solaires de haut grade. L'oxyde de titane macroscopique absorbe sur toute la gamme des

longueurs d'onde, ce qui le rend opaque, alors que sous forme de nanoparticules de diamètre entre 10 et 50 nm, il n'absorbe plus que dans les UV et donc devient transparent. Calibrées vers 60nm, ces particules présentent de plus une bonne dispersion dans le solvant sans pénétration dermique selon Thierry Chopin de Rhodia,⁶⁵. Anne Dux nous a de plus confirmé que les nanoparticules de TiO₂ étaient formulées sous forme d'agrégats de quelques microns, et que ces agrégats ne perdaient pas les propriétés optiques des nanoparticules libres mais que leur taille empêchait toute pénétration dans les cellules de la peau.

Au sujet de l'activité photo-catalytique de l'oxyde de titane, c'est-à-dire la capacité de l'oxyde de dégrader les molécules organiques en présence de lumière, des traitements de surface silice-alumine permettent d'enrober le cœur des nanoparticules de TiO₂ et de bloquer cette activité potentiellement agressive pour la peau⁶⁶. Ceci permet d'exclure pour les nanoparticules utilisées en cosmétique la toxicité des nanoparticules de TiO₂ nues évoquée par Rick Weiss⁶⁷:

*« And tests show that they are highly reactive, generating chemically "hot" free radicals that can literally burn up bacteria. That has some experts worrying about impacts on soil ecology if the particles are released. »*⁶⁸

D'autres nanoparticules d'oxyde telles que les oxydes de zinc sont à l'étude pour venir remplacer l'oxyde de titane. Certains oxydes de fer seraient employés comme pigments dans les produits de maquillage. Des études sont menées sur l'hydroxyapatite qui aurait la capacité de

⁶⁵ Académie des sciences et Académie des technologies. Nanosciences Nano-technologies. avril 2004.

⁶⁶ ibid

⁶⁷ **Weiss.** For Science, Nanotech Poses Big Unknowns. *Washington post*. 1er Février 2004.

⁶⁸ Et les tests montrent qu'elles sont très réactives, générant des radicaux libres 'brûlants' qui peuvent littéralement griller une bactérie. Cela provoque l'inquiétude de certains experts sur l'impact sur l'écologie du sol si les particules sont libérées.

reconstituer l'émail. Anne Dux nous a indiqué qu'il s'agissait actuellement des seules utilisations de nano-objets dans la cosmétique française. En effet, les nanoparticules de silice utilisées notamment dans les dentifrices, ne sont pas considérées par la Febea comme des nano-objets, car elles ne posséderaient pas de propriétés particulières par rapport à la silice normale. Ces particules sont employées pour leurs propriétés granulométriques. Cependant une étude publiée par le professeur Koutzenov de l'Institut de l'acier et des alliages de Russie, montre que les nanoparticules de silice de taille comprise entre 20 et 40 nm présentaient des caractéristiques optiques similaires aux nanoparticules d'oxyde de titane sans les problèmes de toxicité photocatalytique, ce qui les rendaient bonnes candidates pour l'utilisation dans des crèmes solaires⁶⁹. Par ailleurs les nano-micelles, tels que les fameux nanosomes de l'Oréal, utilisés pour encapsuler des principes actifs et les administrer aux cellules du derme par fusion de ces vésicules avec la paroi cellulaire, ne sont pas non plus des nano-objets au sens de la définition mentionnée plus avant. Par contre la technique représente une avancée considérable pour la cosmétique. Enfin le Colipa (syndicat professionnel européen de l'industrie cosmétique) a recommandé aux industries de la beauté de ne pas utiliser de fullerènes ni de nanotubes de carbone dans leur produits.

Les cosmétiques représentent l'un des secteurs les plus importants en termes d'application des nanoparticules. C'est de plus un secteur extrêmement soucieux de son image auprès des consommatrices. Si au moment de l'euphorie « nano », de nombreuses publicités vantaient les mérites des crèmes aux « nanosomes », on constate aujourd'hui une certaine discrétion à ce sujet.

Grand flou sur l'agro-alimentaire

⁶⁹ **Quenez, Nicolas.** <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/58906.htm>. www.bulletins-electroniques.com. [Online] mai 05, 2009.

« In our opinion, this is one technology [nanotechnology] that will have profound implications for the food industry, even though they're not very clear to a lot of people », ⁷⁰

déclare Jozef Kokini, Department Chair et Directeur du Rutgers' Center⁷¹ for Advanced Food Technology. Pourtant peu de grands industriels de l'agro-alimentaire s'aventurent à clamer haut et fort l'emploi de nano-objets, du moins en Europe, et il y a fort à parier que pour un domaine aussi sensible que l'alimentation, les nanotechnologies essuient le même refus de la part des consommateurs que les OGM. Et en vérité il règne un vaste mystère sur l'état du marché mondial de la nano-alimentation et des produits phytosanitaires. Comme le signale le rapport de l'AFSSA dans son rapport de mars 2009⁷², il est très difficile de faire la part des mythes et des réalités dans le domaine de l'agro-alimentaire, et tout particulièrement au sujet de l'utilisation de nano-objets dans l'alimentation humaine.

La difficulté majeure est encore une fois imputable à la définition trop vague des nanotechnologies, qui conduit de nombreux acteurs à qualifier de « nano » des innovations qui structurent la matière sans créer pour autant de nano-objets aux propriétés exotiques, mais au contraire en utilisant des formes d'organisations tout à fait courantes. Dans le rapport d'ETC Group, *Down on the farm*⁷³, rapport qui fait référence, se trouve en annexe 2 une liste de brevets portant sur les nano-aliments et les emballages. Nous avons essayé de confronter le descriptif de ces brevets avec notre définition de nano-objets et nano-emballages.

⁷⁰ Selon nous, c'est une technologie [nanotechnologie] qui aura de profondes implications dans l'industrie agro-alimentaire, même si ce n'est pas clair pour un grand nombre de gens.

⁷¹ Le Rutgers' Center est un institut du New-Jersey qui réfléchit à la politique de l'Etat en matière de santé.

⁷² **AFSSA.** Nanotechnologie et nanoparticules dans l'alimentation humaine et animale. mars 2009.

⁷³ **ETC Group.** *Down on the farm.*

Sur les 34 brevets détaillés en annexe, dont 8 concernaient l'emballage, 25 les additifs alimentaires et la biodisponibilité, et un seul les procédés de transformation agroalimentaires, 18 ne concernent absolument pas à nos yeux des nano-objets (dont 17 pour les additifs alimentaires), car ils faisaient clairement référence à des nano-micelles ou des protéines. Nous avons identifié clairement 4 brevets faisant mention de nano-objets (un seul dans les nano-aliments) et nous manquons d'éléments pour nous prononcer sur 12 des 33 brevets. Certains brevets font véritablement l'impression d'être plus proches des médecines traditionnelles que de l'innovation technologique, comme cette nanopoudre de plume de canards et autres oiseaux de basse-cour proposée par des chinois :

Zhang Liwen China
Food Additive, Bidelivery
CN1439768A
2003-09-03

« Nano feather powder and its processing method and use: A nano-class feather down powder used as the functional and health-care additive of food, feed cosmetics, medicine, or chemical fibres is prepared from the feather down of duck, goose, birds, etc through water washing, screening, shearing pulverizing, immersing in alcohol, centrifugal drying, microwave oscillating, quick cooling, low-temp pulverizing and sieving. Its advantages are no loss of active components, high specific surface area, molecular activity and affinity to human body and higher health-care effect. »⁷⁴

⁷⁴ La nanopoudre de plume, son mode de fabrication et son utilisation : une nano-classe de plumes réduites en poudre utilisée comme additif fonctionnel et bon pour la santé de la nourriture, des cosmétiques, des médicaments ou des fibres chimiques, est préparé à partir de plumes de canard, d'oie, d'oiseaux, etc. grâce à un lavage à l'eau, un tri, une pulvérisation, un trempage dans l'alcool, un séchage par centrifugation, une oscillation micro-onde, un refroidissement rapide, une pulvérisation basse température et un tamis. Ses avantages : pas de perte de composant actif, une grande surface active, une activité et une affinité moléculaire pour le corps humain et de plus grands effets pour la santé.

Parmi les brevets d'additif ou de bio assimilation que nous avons rejetés se trouvent un grand nombre d'innovations sur les techniques d'encapsulation dans des vésicules lipidiques, comme l'illustre également cet extrait du rapport de Nanoforum⁷⁵ :

*"The Israeli Company Nutralease, utilise Nano-sized Self-assembled Liquid Structures (NSSL) technology to deliver nutrients in nanosized particles to cells. The particles are expanded micelles (hollow spheres made from fats, with an aqueous interior) with a diameter of approximately 30 nm. The nutrients or "nutraceuticals" are contained within the aqueous interior. Nutraceuticals that have been incorporated in the carriers include lycopene, beta-carotene, lutein, phytosterols, CoQ10 and DHA/EPA. The Nutralease particles allow these compounds to enter the bloodstream from the gut more easily, thus increasing their bioavailability."*⁷⁶

Or les micelles, vésicules lipidiques, ou lysosomes, sont des structures typiques de l'interaction des corps gras avec l'eau, qu'on retrouve notamment dans l'eau savonneuse, et constituent la base de l'architecture cellulaire : une cellule est une grosse vésicule lipidique contenant de l'eau, avec à l'intérieur tout un tas de petites vésicules qui compartimentent la cellule et transportent les molécules.

Nous n'adhérons donc pas aux déclarations très affirmatives et alarmistes de certaines ONG comme les Amis de la Terre qui s'appuient

⁷⁵ **Joseph, Tiju and Morrison, Mark.** *Nanotechnology in Agriculture and Food*. s.l. : Institute of Nanotechnology, May 2006

⁷⁶ L'entreprise israélienne Nutralease utilise une technologie de structures liquides auto-assemblées nanométriques pour délivrer des nutriments dans des particules nanométriques à des cellules. Les particules sont des micelles élargies (des sphères creuses faites de graisse avec un intérieur aqueux) avec un diamètre d'environ 30 nm. Les nutriments ou 'nutricaments' sont contenus dans l'intérieur aqueux. Les nutricaments qui ont été incorporé dans les porteurs incluent le lycopène, le bêta-carotène, la lutéine, le phytostérol, CoQ10 et DHA/EPA. Les particules Nutralease permettent à ces composés de passer plus facilement des intestins dans le sang, et donc d'augmenter leur biodisponibilité.

sur des estimations encore une fois surévaluées et hasardeuses d'analystes économiques⁷⁷ :

« Le Helmut Kaiser Consultancy Group, un analyste en faveur de la nanotechnologie, suggère qu'il existe maintenant plus de 300 nano-produits alimentaires disponibles sur le marché mondial. Il estime que le marché mondial de la nanonourriture valait 5,3 milliards de dollars en 2005, et passera à 20,4 milliards de dollars en 2010. Il prédit que la nanotechnologie sera utilisée dans 40% de l'industrie alimentaire d'ici à 2015. »

En bon accord avec le rapport de l'AFSSA qui reste plus prudent⁷⁸, il nous semble que les véritables applications de nano-objets dans l'agro-alimentaire restent pour l'instant cantonnées aux laboratoires, les emballages et réfrigérateurs anti-bactériens, qui sont recouverts en surface de nano-particules d'argent, étant une exception majeure. Pour aller à l'encontre de la psychose semée par des ONG comme les Amis de la Terre, qui pensent que des centaines de nano-aliments se trouvent en rayon de nos grandes surfaces, on peut rappeler que les mises sur le marché de substances destinées à l'alimentation font l'objet de procédures d'autorisations spécifiques. De même les produits phytosanitaires sont soumis à des règles d'autorisations.

⁷⁷ **Miller and Kinnear.** Les amis de la terre. 11 08, 2008.
<http://www.mondialisation.ca/index.php?context=va&aid=10824>).

⁷⁸ **AFSSA.** *Nanotechnologie et nanoparticules dans l'alimentation humaine et animale.* mars 2009.

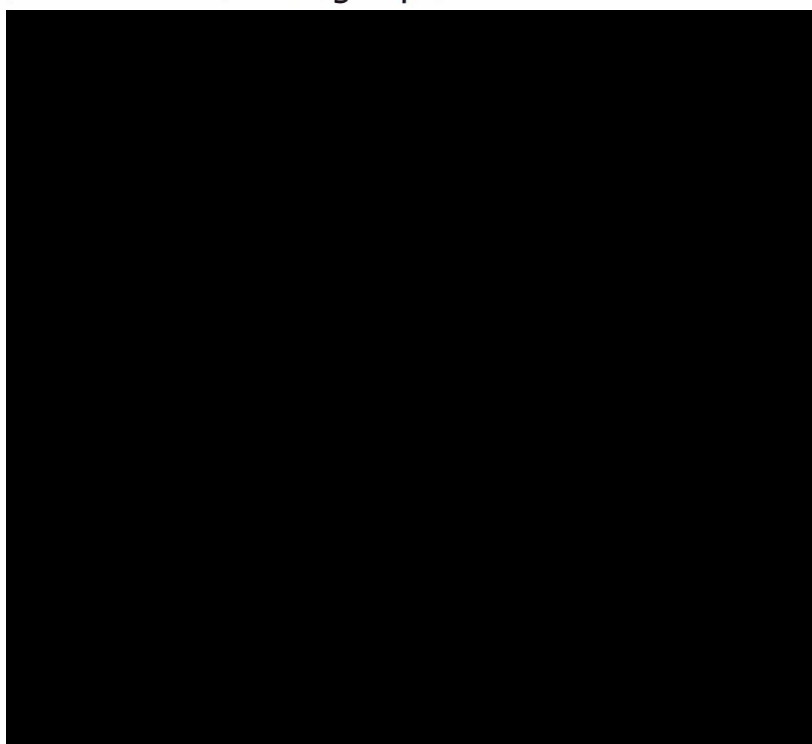


Figure 20 : Un réfrigérateur Samsung aux parois recouvertes de nanoparticules d'argent bactéricides. Source : <http://ww2.samsung.co.za/silvernano/silvernano/refrigerator.html>

L'électronique, un secteur pleinement engagé dans les nanotechnologies.

Industrie pionnière et premier débouché des nanotechnologies, l'optoélectronique a fait un bond spectaculaire grâce à l'amélioration des techniques de gravure et dépôt qui ont permis la miniaturisation exponentielle des composants semi-conducteurs. Première industrie manufacturière au monde devant l'automobile, l'électronique connaît une forte croissance au niveau mondial (environ 10 % par an), même si elle subit actuellement la crise économique de plein fouet. En 2007, près

de 500 milliards de puces ont été fabriquées pour un chiffre d'affaires total de 260 milliards de dollars, et le marché mondial des systèmes électroniques utilisant des nanotechnologies approche les 1600 milliards de dollars⁷⁹. L'électronique soutient des marchés colossaux, que ce soit la téléphonie mobile, l'électronique de la bureautique, ou encore l'électronique embarquée dans l'automobile ou l'aéronautique. D'après Denis Blanc, directeur de freescale France, l'emploi de l'électronique embarquée permet des progrès considérables dans la sécurité et la consommation des véhicules. Pour Frédéric Hannyer de ST Microélectronique, les débouchés de l'électronique sont encore loin d'être tous explorés. Par exemple en rendant nos bâtiments « intelligents », c'est-à-dire disposant d'un système de contrôle électronique, on pourrait en réguler la consommation énergétique.



⁷⁹ Conseil Economique et Social. *Les Nanotechnologies*. 2008.

Cependant, la course à la miniaturisation des composants pousse le secteur à une forte compétition sur les prix et un besoin d'investissement en recherche et développement et en infrastructures toujours plus important, ce qui rogne les gains de productivité et amène inéluctablement la concentration industrielle. Laurent Gouzènes, directeur projets R&D et affaires publiques de ST Microelectronics, nous a confié que le prix d'une usine doublait tous les 5 ans en moyenne et que moins de 7 fonderies seraient capables de disposer du milliard de dollars pour passer à la génération des transistors 32 nm et wafers de 300mm. Les défis auxquels fait face actuellement le secteur donne une bonne idée des contraintes que posent la mise en œuvre de telles techniques sur le plan industriel.

L'avènement de nouvelles applications, grâce à l'intégration de nanostructures originales, peut permettre d'ouvrir de nouveaux débouchés. En spintronique, l'utilisation de structures type vannes de spin a permis le développement des têtes de lecture de disques durs haute densité, mais promet des applications prochaines dans les sources hyperfréquences et les mémoires MRAM commandées uniquement en courant. En optique, diodes laser et laser à cascade quantique sont également des exemples spectaculaires de la multitude d'applications des nanotechnologies de troisième catégorie.

La recherche amont sur les sujets de nano-optoélectronique foisonne d'idées et de concepts passionnants mais souvent encore bien loin des possibilités industrielles. L'ordinateur quantique par exemple n'est qu'un rêve de laboratoire. Tous les développements autour de l'électronique moléculaire, voire biologique, et en premier lieu l'utilisation des nanotubes de carbone dans les circuits, supposent la maîtrise de ce que nous avons appelé dans le chapitre précédent la seconde génération de nanotechnologies de positionnement, c'est-à-dire les techniques de positionnement d'objet isolé. Tant que ces techniques ne sont pas maîtrisées, les fabuleux capteurs moléculaires et les transistors à nanotubes resteront des prototypes de laboratoires.

Cependant, comme l'a démontré la spintronique découverte il y a à peine vingt ans, les blockbusters peuvent exister en physique. Nous ne développerons pas plus en détails ces domaines qui font l'objet d'ouvrages techniques particulièrement riches et didactiques.

Avec l'électronique, de multiples applications des nanotechnologies se retrouvent dans notre quotidien. Cependant compte tenu de son importance, le secteur passe relativement inaperçu, comme banalisé. Qui se soucie vraiment des milliards de transistors nanométriques contenu dans un téléphone portable de dernière génération ? Qui s'émerveille devant un pointeur laser ? Quel politique s'est soucié des conséquences de la crise sur ST Microelectronics plutôt que sur l'industrie automobile ?

Les perspectives médicales

La nano-médecine fait naître de formidables espoirs. Jean-Marc Grognet, à la DGCIS, identifie trois secteurs bénéficiant des retombées des nanotechnologies, à savoir le diagnostic, la thérapeutique et la réhabilitation fonctionnelle⁸⁰.

Les nanoparticules sont devenues des outils majeurs en matière de recherche fondamentale et de compréhension des mécanismes biologiques et des dysfonctionnements. La vectorisation d'une nanoparticule vers une molécule cible a déjà fait ses preuves dans les méthodes d'imagerie, ces particules optiquement actives étant utilisées comme marqueurs à la place de chromophores protéiques. L'imagerie par nanoparticules est d'ailleurs une thématique majeure des projets de biologie financés par le programme P3N de l'ANR (

⁸⁰ **Grognet, Jean-Marc.** Nanotechnologies : des sciences de l'information à la pharmacologie. *Thérapie*. 2008, Vol. 63 , 1.

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Etudes théoriques	5	7	4	4	2
Nano-objets	10	6	8	5	5
Nano-composite	2	5	5	0	2
Nano-dispositifs	28	22	14	16	17
Autres structures nanométriques	17	18	8	11	2
Equipement	4	1	2	0	2
Métrologie	8	11	9	2	5

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Chimie	7	10	9	9	5
Matériaux	7	9	6	6	1
Biologie/ médecine	12	9	5	2	4
Opto-électronique	34	32	22	14	10
Nano-mécanique	4	1	3	4	0
Toxicologie/ Impact sociétaux			3	2	1

Tableau 3). Un autre axe de travail porte sur les « puces laboratoires », c'est-à-dire des dispositifs nano-micro-électroniques capables d'effectuer à partir d'une quantité infime de liquide biologique un grand nombre de tests chimiques. De telles puces pourraient également servir au

screening de médicaments. Ces systèmes pourraient apporter des gains de temps, de liquide de départ et d'argent importants.

En matière de thérapie, nous excluons en cohérence avec notre définition des nano-objets les techniques d'encapsulation des principes actifs dans des micelles organiques. Ces méthodes, empruntées selon Anne Dux à la cosmétiques, sont cependant extrêmement prometteuses, même si le nombre de médicaments actuellement disponible reste extrêmement faible, comme le souligne Jean-Marc Grognet⁸¹. Différentes méthodes sont actuellement développées pour traiter les cellules cancéreuses avec des nanoparticules activables par champ magnétique, laser, rayon X ou encore ultrason⁸². Des molécules de « ciblage » sont greffées sur la surface des nanoparticules et amènent ainsi les particules à se concentrer dans les cellules à traiter. Tandis que les thérapies classiques du cancer sont généralement nocives pour tout ou parties des cellules saines de l'organisme, l'utilisation de nanoparticules permet donc de n'exercer l'action du traitement que lorsqu'elles sont fixées aux cellules cancéreuses, et donc d'avoir des effets secondaires beaucoup plus limités. Ce domaine prometteur et très actif a vu la naissance de start-up telles que Nanobiotix⁸³, Bind, ou MagForce Nanotechnologies⁸⁴, et certaines nanoparticules sont actuellement en phase de test cliniques. Plus généralement, on peut espérer greffer sur une même nanoparticule des antigènes reconnaissant des cellules infectées, des virus ou des bactéries, et le ou les principes actifs à administrer et parvenir ainsi à une vectorisation des médicaments, permettant une posologie micro voire nanodosée extrêmement efficace car complètement ciblée.

⁸¹ **Couvreur, P and Vauthier, C.** Nanotechnology: intelligent design to treat complex disease. *Pharm Res.* 2006, Vol. 23 (7), 1417-1450.

⁸² Perrier, Jean-Jacques.

<http://www.vivantinfo.com/index.php?id=151>. *www.vivantinfo.com*. 11 23, 2006.

⁸³ **nanobiotix.** <http://www.nanobiotix.com/>.

⁸⁴ **magforce.** <http://www.magforce.de/>.

Enfin les dispositifs électroniques miniaturisés pourraient pallier les insuffisances fonctionnelles d'un patient. Des équipes travaillent à des systèmes capables de délivrer les doses de principes actifs aux patients, plus discrètes et confortables, plus efficaces que les systèmes actuels. De telles puces pourraient notamment être employées pour la régulation du taux d'insuline chez les diabétiques^{85,86}. Dans un autre domaine et à plus long terme, l'utilisation de dispositifs électroniques biocompatibles peut permettre de pallier à la déficience de tout un organe. On pense notamment à fabriquer des rétines artificielles pour les malvoyants.

Contrairement aux annonces précipitées de la NNI, les thérapies à base de nanoparticules ont cependant de nombreuses années devant elles avant de sortir effectivement sur le marché, comme il est d'ailleurs prévisible dans un tel secteur au temps de développement très long. Il semble également que la recherche en matière d'applications médicales des nanotechnologies soient essentiellement portée par le secteur public et de petites start-up, dont les moyens de financements sont infimes par rapport à ceux dont sont capables les grands groupes pharmaceutiques, comme le souligne Claudine Picard. Sanofi-Aventis par exemple ne s'est pas lancé dans l'aventure de la nanomédecine, mais pratique de la veille stratégique comme elle l'explique. En revanche, un département de Sanofi s'intéresse aux conséquences toxicologiques des nanoparticules.

Les fantasmes

Les perspectives de la nanoélectronique et des nano-bio-technologies ont ouvert la voie aux spéculations les plus futuristes sur la convergence entre nanotechnologie, biologie, informatique et sciences cognitives. Elles jouissent d'une forte audience, font l'objet de livres, de films et de réflexions largement diffusés. Le monde d'une transhumanité

⁸⁵ LaVan, D., MacGuire, T. and Langer, R. Small scale systems for in-vivo drug delivery. *Nature Biotechnology*. 2003, Vol. 21/10, 1171-1178.

⁸⁶ **Santini, JT, Cima, ML and Langer, R.** A controlled-release microship . *Nature*. 1999, Vol. 397 (6717), 335-8.

cybernétique a inspiré par exemple le célèbre manga Ghost in Shell⁸⁷ adapté au cinéma en 1995. De même ces perspectives suscitent de vives réactions dans la communauté intellectuelle et les instances morales. Par exemple, dans un article du nouvel économiste⁸⁸ du 22/01/2009 consacré à la franc-maçonnerie on peut lire :

« Le « Droit humain » a ainsi travaillé sur la protection sociale et la création d'un cinquième risque ou encore les nano-technologies. Un thème auquel s'est attaché aussi le Grand Orient de France, pour en conclure que cette technologie « présentait sans doute plus d'inconvénients que d'avantages » »

La gelée grise

Parmi ces projections à long terme, la plus médiatique est vraisemblablement la « gelée grise », dénomination qui désigne une prolifération de nano-robots s'auto-répliquant, qui pourrait aboutir à l'extinction de la vie sur Terre si par exemple ces nano-robots consommaient toute la matière disponible sur la planète. Le père de cette fiction catastrophe est Eric Drexler⁸⁹, mais elle a par la suite été reprise avec succès, notamment par l'auteur américain Michael Crichton⁹⁰.

⁸⁷ Shirow, Masamune. *Ghost in Shell*. 1989.

⁸⁸ Bouaziz, Franck. jeudi 22 janvier 2009, Le nouvel Economiste n°1490.

⁸⁹ Drexler, Eric. *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. 1986.

⁹⁰ Crichton, Michael. *Prey*. 2002.

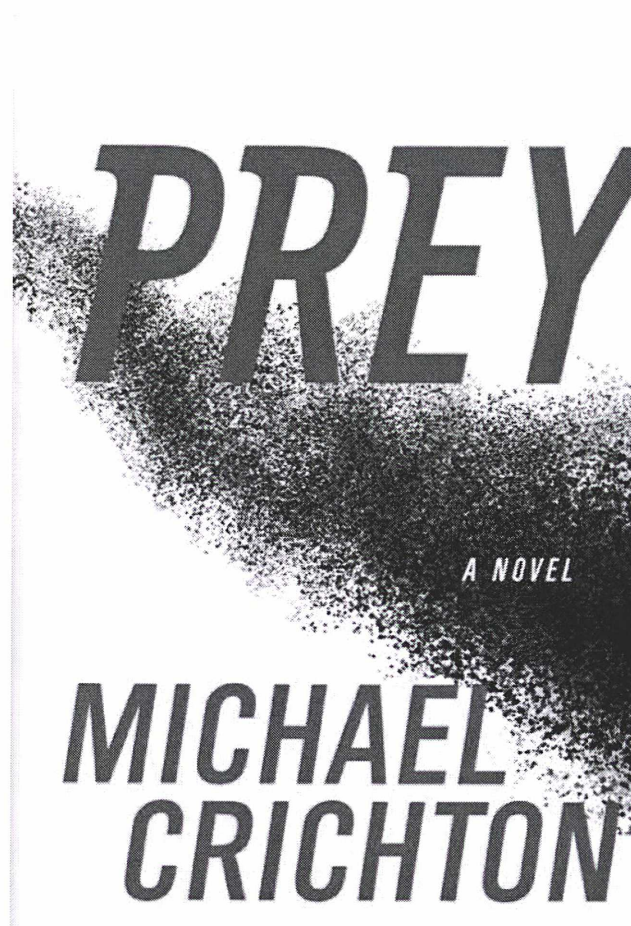


Figure 22 : couverture du roman de Michael Crichton *Prey*

Elle a connu une grande popularité suite à l'intervention du prince Charles agitant le spectre de cette catastrophe, ce qui a fait le sujet de l'article *Brave new world or miniature menace ? Why Charles fears grey goo nightmare*⁹¹. Alarmé par la lecture de *The Big Down*⁹² publié par l'ONG environnementale canadienne ETC group, le prince Charles a demandé à la Royal Academy of Engineering et à la Royal Society de réfléchir aux « énormes risques environnementaux et sociaux » posés par les nanotechnologies.

⁹¹ **The Guardian.** Brave new world or miniature menace? Why Charles fears grey goo nightmare. 29 avril 2003

⁹² **ETC Group.** *The Big Down*. Janvier 2003

Le monde scientifique a en grande majorité réfuté la possibilité de réaliser de tels nano-robots, parfois avec une certaine irritation. Crichton n'est pas le seul à être vertement critiqué. Le Prince Charles n'est pas ménagé par Sir Harold Kroto, prix Nobel de chimie 1996, qui s'irrite que le Prince parle de sujets qu'il ne connaît pas :

*« It shows a complete disconnection from reality. He should take a degree in chemistry, or at least talk to someone who understands it, rather than reading silly books. »*⁹³

Moins virulent mais tout aussi clair, l'auteur du rapport de Greenpeace *Future Technologies, Today's Choices* Alexander Huw Arnall⁹⁴ rappelle qu'il ne s'agit que de science fiction étant donné les blocages technologiques existants :

*« Notice that none of these applications deal with the far more distant but highly publicized prospect of replicator robots or the so-called 'general assembler' – a nanomachine which would produce anything desired given the right raw-materials, and which formed some of the ideas behind Michael Crichton's novel, Prey. These applications are currently a long way off due to the difficulties involved in engineering chemical building blocks, information management, and systems design ».*⁹⁵

⁹³ Cela montre une déconnexion totale de la réalité. Il devrait faire des études de chimie, ou au moins parler avec quelqu'un qui a des notions, plutôt que de lire des livres idiots.

⁹⁴ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*,. s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003

⁹⁵ Remarquez qu'aucune de ces applications n'a à voir avec les bien plus distants mais très médiatisés robots répliqueurs ou l'assembleur général – une nanomachine qui pourrait produire tout ce qu'on voudrait si on lui fournissait les matières premières, qui est à la base de certaines des idées qui sous-tendent le roman de Michael Crichton, *Prey*. Ces applications sont pour l'instant très éloignées à cause des difficultés liées à l'ingénierie des structures chimique, du management de l'information et du design des systèmes.

Greenpeace dénonce d'ailleurs le battage publicitaire entourant les nano-robots auxquels on prête d'innombrables capacités :

« Nanobots and other nanoscale devices: this area can be accredited with receiving the most severe hype, where headlinegrabbing predictions include curing cancer, eliminating infections, enhancing our intelligence, and even making us immortal. »^{96,97}

Sur la même longueur d'onde, Otilia Saxl, directrice et fondatrice de l'Institute of Nanotechnology au Royaume-Uni, pense qu'il faudra au moins 25 ans avant que de minuscules machines se déplacent dans nos artères pour les nettoyer.

Des argumentations précises viennent de toutes parts décrédibiliser le concept de nano-robots se reproduisant. La plus frappante et la plus construite vient de Richard Smalley, prix Nobel de chimie 1996 (avec Harold Kroto précédemment cité et Robert Curl pour la découverte des fullerènes). Il explique que le manipulateur d'atomes dont on aurait besoin aurait des « doigts trop collants » car à cette échelle la matière est très adhérente du fait des forces de Van der Waals et de l'établissement des liaisons chimiques, et des « doigts trop gros » à cause des effets stériques et du nombre limité de liaisons que peut faire un atome⁹⁸. Dans le rapport des académies des Sciences et des Technologies de 2004⁹⁹, deux autres obstacles sont signalés: l'alimentation en énergie et les réactions chimiques trop lentes pour l'utilisation industrielle que Crichton imagine.

⁹⁶ *ibid*

⁹⁷ Les nanorobots et autres appareils nanométriques : ce domaine peut être accrédité de recevoir le plus grand battage médiatique, où parmi les prédictions des gros titres on trouve la guérir le cancer, éliminer les infections, augmenter notre intelligence, et même nous rendre immortel.

⁹⁸ **Smalley, Richard E.** Of Chemistry, Love and Nanobots. *Scientific American*. 2001, pp. 76-77.

⁹⁹ Académie des sciences et Académie des technologies. *Nanosciences Nanotechnologies*. avril 2004.

Le rapport Greenpeace¹⁰⁰ ajoute qu'on ne sait toujours pas faire d'intelligence artificielle :

*« It seems fair to assume that any futuristic nanobots would have to be imbued with a reasonable degree of AI. (...) Many researchers now feel that the goal of mimicking the human ability to solve problems and achieve goals in the real world (the so-called 'strong AI') is neither likely nor desirable because a long series of conceptual breakthroughs is required. »*¹⁰¹

Ces objections ne découragent pas les partisans de l'avènement des nano-robots et la polémique enflé. Le philosophe Jean-Pierre Dupuy n'est pas satisfait par les arguments de Smalley¹⁰² :

« À ceux qui affirment étourdiment que le programme de Drexler « violerait les lois de la physique », il est trop facile à ce dernier de répliquer que dans ce cas, la vie elle-même violerait les lois de la physique ! »

Certes, le vivant a réussi l'exploit de créer des organismes capables de se reproduire. Mais pour les imiter, il faut renoncer à des caractéristiques de la gelée grise traditionnelle¹⁰³ :

« En acceptant de travailler à une échelle plus grande (typiquement l'acide aminé), beaucoup plus lentement et surtout au prix d'une

¹⁰⁰ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*,. s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003.

¹⁰¹ Il semble raisonnable de supposer que tout robot futuriste devrait être doté d'un niveau raisonnable d'IA (intelligence artificielle). (...) Beaucoup de chercheurs ont désormais le sentiment que le but d'imiter la capacité humaine à résoudre des problèmes et atteindre des buts dans le monde réel (ce qu'on appelle 'l'IA forte') n'est ni probable ni souhaitable car une longue série de percées conceptuelles sont nécessaires.

¹⁰² **Dupuy, Jean-Pierre.** *Quand les technologies convergeront.*

¹⁰³ Académie des sciences et Académie des technologies. *Nanosciences Nano-technologies.* avril 2004.

complexité qui dépasse infiniment celle de toutes les machines humaines, la nature a réussi cet exploit. »

La gelée verte

Ces remarques amènent à parler d'une autre fiction, inspirée de la première : la gelée verte. La gelée verte résulterait de la convergence des nanotechnologies et des biotechnologies, ce qui présente l'avantage de pouvoir réutiliser les avancées du monde du vivant sans avoir besoin de tout réinventer. Mais l'aboutissement de nos technologies est extraordinairement éloigné de la complexité des technologies du vivant, et pour l'instant on ne peut imaginer qu'une très faible contribution humaine, comme par exemple insérer un gène dans une bactérie pour l'amener à produire une substance, ce qui ne relève pas des nanotechnologies mais du génie génétique. De plus, le vivant a ses limites, il utilise une chimie particulière et ne peut pas utiliser ou transformer toute matière première, et son énergie limitée l'empêche de travailler « suffisamment vite pour les process industriels ».

Le transhumanisme

Un autre résultat possible de la convergence des nanotechnologies et des sciences du vivant est le transhumanisme qui consiste à utiliser des dispositifs biocompatibles pour décupler les capacités de l'Homme. Cette fiction a d'autant plus de poids médiatique que 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'Homme¹⁰⁴. L'armée américaine ne cache pas non plus son enthousiasme pour le transhumanisme ; elle a

¹⁰⁴ **Roco and Bainbridge.** Converging Technologies for Improving Human Performance. s.l. : NSF, Juin 2002.

d'ailleurs créé le *Center for Soldier Nanotechnologies* au MIT qu'elle a doté de 50 millions de dollars, avec des intentions très claires ¹⁰⁵ :

*« Imagine the psychological impact upon a foe when encountering squads of seemingly invincible warriors protected by armour and endowed with superhuman capabilities, such as the ability to leap over 20-foot walls. »*¹⁰⁶

La philosophie des transhumanistes consiste de manière générale à employer toute technologie disponible pour s'abstraire des limites naturelles de l'Homme : capacités intellectuelles et physiques, douleur, maladie, mort, emprisonnement de l'esprit dans l'enveloppe charnelle... Les nanotechnologies et leur convergence avec les sciences cognitives ne sont pas les seules à susciter l'intérêt des transhumanistes : la génétique et la pharmaceutique sont certainement encore plus prometteuses à court terme (voir notamment le site de Humanity+)¹⁰⁷. Bien sûr la cyberhumanité de *Ghost in the shell*¹⁰⁸ ou l'immortalité sont des rêves encore inatteignables. Cependant pour ce qui concerne des objectifs moins exigeants, comme l'augmentation des capacités intellectuelles et physiques, la limite devient beaucoup plus floue : le dopage est-il ou non du transhumanisme ? Pour quelle utilisation et de quelle manière la rétine artificielle devient-elle de l'augmentation de capacité ? A quel instant la thérapie génique basculera dans le transhumanisme ?

Placer le curseur éthique est d'autant plus problématique que les moyens pour parvenir à la transhumanité rejoignent ici ceux de la

¹⁰⁵ **Magnanti, Thomas L.** Army selects MIT for \$50 million institute to use nanomaterials to clothe, equip soldiers. *MIT*. [Online] mars 2002. <http://web.mit.edu/newsoffice/2002/isn.html>.

¹⁰⁶ Imaginez l'impact psychologique sur un ennemi quand il rencontrerait un escadron de guerriers apparemment invincibles protégés par une armure et dotés de capacités surhumaines, comme le pouvoir de sauter des murs de six mètres.

¹⁰⁷ **Wikipedia.** transhumanism. [Online]

<http://en.wikipedia.org/wiki/Transhumanism>

¹⁰⁸ **Shirow, Masamune.** *Ghost in Shell*. 1989.

médecine utilisés pour redonner à des individus malades ou handicapés les mêmes capacités que les valides. Comme le souligne très justement Jean-Marc Grognet, de la DGCIS, dans *Nanotechnologies : des sciences de l'information à la pharmacologie*¹⁰⁹:

« Il ne faut pas aborder de façon excessivement innocente la notion de réhabilitation fonctionnelle. Toute intervention n'est pas nécessairement éthique ou acceptée par le patient ou son entourage. Le comité consultatif national d'éthique s'est penché il y a quelques années sur l'implantation de cochlées artificielles chez les enfants sourd (CNNE : Avis sur l'implant cochléaire chez l'enfant sourd pré lingual, avis 44, 1^{er} décembre 1994). Il apparaît très vite que lorsque l'on sera capable de connecter des dispositifs électroniques sur des organes la tentation sera grande de l'utiliser également pour disposer d'une fonction plus puissante voire une fonction non disponible à ce jour. »

Les pouvoirs publics ont très tôt été conscients de cette problématique éthique posée notamment par les nanotechnologies appliquées à la médecine. Dès 2004, L'office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et techniques a rendu un certain nombre de recommandations touchant les aspects éthique, social et économique de la nano-médecine¹¹⁰.

Le transhumanisme pouvant regrouper des choses très différentes, il est difficile d'en discuter la faisabilité technique d'une façon générale. Mais les applications les plus mises en avant et les plus craintes sont aussi les plus éloignées techniquement et requièrent un aboutissement encore loin d'être atteint par les nanotechnologies. On peut d'ailleurs remarquer que les mêmes inquiétudes avaient émergé avec l'apparition

¹⁰⁹ **Grognet, Jean-Marc.** Nanotechnologies : des sciences de l'information à la pharmacologie. *Thérapie*. 2008, Vol. 63 , 1

¹¹⁰ **Lorrain, JL and Raoul, D.** Nanosciences et progrès médical, Enquête de l'OPECST. *senat*. [Online] 2004. <http://www.senat.fr/rap/r03-293/r03-2093.html>.

des biotechnologies il y a vingt ans. Nous les classons donc parmi les fantasmes.

Le smart dust

On peut considérer que le père du "Smart dust" est Kristofer Pister, professeur d'électronique à Berkeley et CTO et co-fondateur et directeur technique de Dust inc., entreprise qui commercialise des réseaux de capteurs sans fil¹¹¹ pour surveiller ou contrôler des paramètres : températures, pressions, corrosion, humidité, lumière, vibrations, etc. Pour l'instant, ces capteurs sont macroscopiques (de l'ordre du centimètre) et leur allure n'a rien de futuriste.

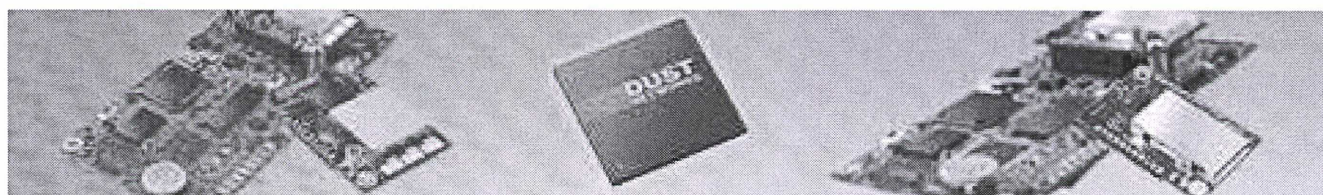


Figure 23: Produits commercialisés par Dust Inc. Source : <http://www.dust-inc.com/products/>

Tout cela semble bien rustique comparé à l'inquiétant mythe du « Smart dust » : une poussière constituée de minuscules capteurs recueillant diverses informations et pouvant potentiellement servir d'espions invisibles. Pourtant, Kristofer Pister pense qu'il est tout à fait possible de miniaturiser ces capteurs de manière drastique et un premier pas semble avoir été démontré en laboratoire par l'équipe d'Alex Zettl (Université de Berkeley) qui a réussi en 2007 à mettre au point une « nanoradio » à partir d'un nanotube de carbone chargé¹¹².

¹¹¹ <http://www.dust-inc.com/>

¹¹² Jensen et al. Nanotube Radio. *Nano Letters* 7 (11). 2007, pp. 3508-3511.

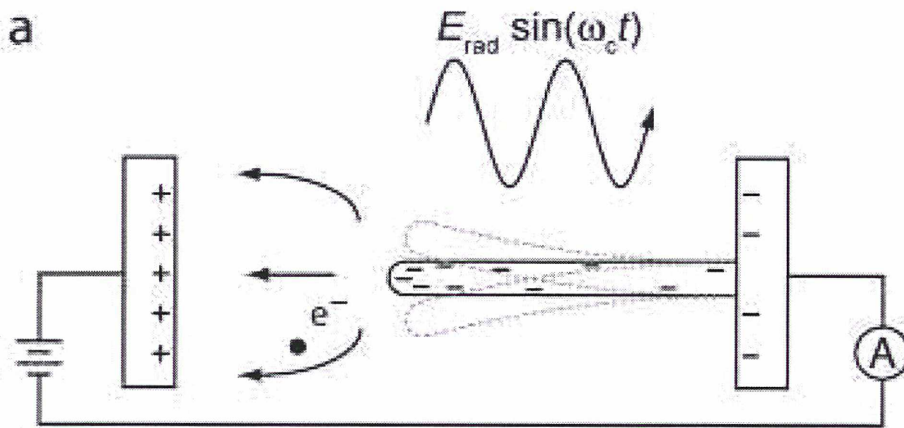


Figure 24 : schéma d'une radio à nanotube. Source : K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zettl. Nanotube Radio. Nano Letters 7 (11), 3508-3511 (2007) (58)

Cependant, plusieurs percées devront être réalisées avant d'aboutir à des réseaux de minuscules capteurs communiquant sans fil. Il faudra être capable de reproduire ce que permet la technologie actuelle à des échelles au moins cent fois inférieures, et il faudra sûrement trouver des alternatives à la complexité des dispositifs actuels. Les auteurs de l'article le reconnaissent :

« *It becomes more difficult to engineer functional complexity as the device shrinks.* »¹¹³

L'article "*Smart dust*": nanostructured devices in a grain of sand publié par Michael J. Sailor et Jamie R. Link¹¹⁴ fait le bilan des défis techniques pour y parvenir. Quatre domaines sont retenus : réaliser des mesures, traiter les données, communiquer et placer les particules de poussière comme on le souhaite. Aux quatre problèmes mentionnés précédemment, il faut certainement en ajouter un cinquième : l'alimentation électrique. En effet, les capteurs devront avoir l'énergie nécessaire pour communiquer. Dans le cas d'une pile standard, l'énergie

¹¹³ Cela devient plus difficile de concevoir la complexité fonctionnelle au fur et à mesure que les dimensions de l'appareil sont réduites

¹¹⁴ **Sailor, M.J. and Link, J.R.** "Smart dust": nanostructured devices in a grain of sand. *Chemical Communications*. vol. 11 2005, p. 1375

est grossièrement proportionnelle au volume de la pile, et donc et donc la réduction de l'échelle ne permettra plus d'alimenter l'émetteur¹¹⁵. De plus, on ne sait plus faire de pile traditionnelle à cette échelle.

Les applications militaires

Enfin tout en bas de la matrice, les militaires se font les champions de la discrétion¹¹⁶ quant à l'utilisation qu'ils souhaitent faire des nanotechnologies. La défense américaine investit dans la recherche des sommes importantes¹¹⁷ :

« En 2005, le domaine militaire absorbe un quart des financements de la National Nanotechnology Initiative (NNI) avec une dotation de près de 300 millions de dollars par an. »

De même les Russes témoignent d'un intérêt tout particulier pour les applications militaires des nanotechnologies. Ainsi lors d'une réunion de la commission gouvernementale pour les hautes technologies et les innovations le 16 janvier 2009, Sergueï Ivanov, le vice-premier ministre russe, a déclaré

¹¹⁵ On appelle r le facteur d'échelle. Si on assimile l'émetteur à une antenne, il émet un champ électromagnétique d'amplitude proportionnelle à l'inverse de la distance $1/r$. L'énergie à fournir à l'émetteur est proportionnelle au carré du champ, donc elle doit être proportionnelle à r^2 pour que l'amplitude du champ reste inchangée à une distance r . L'énergie stockée dans la pile est proportionnelle au volume de celle-ci, soit r^3 . Le changement d'échelle pose donc un problème de stockage d'énergie quand r décroît trop.

¹¹⁶ Si on entend peu parler d'eux, les militaires communiquent néanmoins quelquefois. En France, la DGA a évoqué ses options en matière de nanotechnologies lors de l'audition de son Conseiller Scientifique devant l'OPCST le 7 Novembre 2006, ainsi que lors de présentations publiques comme celle effectuée aux journées Nanomicrotechnologies du 5 Février 2009 (au CNRS).

¹¹⁷ **Durieux, Chef d'escadron.** Vertige de l'infiniment petit: enjeux des nanotechnologies.

« Des travaux sont en cours sur l'utilisation des nanotechnologies pour les besoins du complexe militaire et industriel russe et sur la production de systèmes d'armements, de matériel de guerre et spécial. Nous avons déjà des résultats tangibles. Nous allons non seulement poursuivre ce travail, mais le financer intégralement. »

Les budgets de la défense française (via la Délégation Générale pour l'Armement, DGA) consacrés aux nanotechnologies s'élèvent quant à eux à environ 10 à 15 millions d'euros par an, soit environ 10% des sommes allouées à la recherche civile. Argumentant sur ce ratio, Pascal Maigné et Philippe Masclet, responsables de domaine scientifique à la DGA que nous avons rencontrés, considèrent que le poids relatif du militaire dans les nanotechnologies « bien qu'il reste modeste, peut servir de levier pour développer des technologies duales ». Ils n'en demeurent pas moins des acteurs incontournables. Le fait que le laboratoire d'Albert Fert, prix Nobel de physique et découvreur de la spintronique, soit un laboratoire mixte entre le CNRS et Thales, grande entreprise d'électronique de défense, n'est pas tout à fait anodin, même symboliquement.

Toutes les catégories de nanotechnologies sont susceptibles d'apporter de nouvelles applications militaires. Certaines poudres pourraient devenir de puissants explosifs. En effet, la surface des grains de poudre est directement liée à la rapidité de la réaction et à l'énergie stockée ; la contrôler permettrait de mieux contrôler les phénomènes de combustions ou de découpler la puissance explosive d'une poudre¹¹⁸. Les matériaux nano-composites pourraient améliorer les blindages, les gilets pare-balles, les peintures mais également la capacité des batteries électriques. L'électronique de défense est un domaine prometteur, que ce soit dans les capteurs, l'électronique de puissance ou l'électronique embarquée. Ainsi l'équipe d'Albert Fert travaille sur l'utilisation des

¹¹⁸ Pour une quantité d'un matériau donné, plus les grains de poudre sont petits, plus la surface totale des grains est grande.

vannes de spin pour générer des sources hyperfréquences, composant central de l'électronique de missile de Thales.

Le rapport CEA – ALCIMED¹¹⁹ affirme que les apports des nanotechnologies dans le domaine militaire concerneront essentiellement la protection, le soutien et la mobilité du combattant, via l'amélioration du textile (pour lui donner des propriétés antibactériennes, de résistance aux impacts ou aux rayonnements), le développement des capteurs chimiques et biologiques, l'amélioration des batteries et du rendement des cellules photovoltaïques. Cette orientation est largement défendue par le livre blanc de la Délégation Générale pour l'Armement¹²⁰.

Par nature, les militaires ne peuvent pas communiquer sur toutes leurs activités, et chacun se doute que leur intérêt pour les nanotechnologies ne se borne pas à la protection, au soutien et à la mobilité du combattant. Cette vision est cohérente avec celle de RAND (think tank américain) exprimée par Scott Pace dès 1989. Ce dernier voit un potentiel des nanotechnologies dans les poudres

« nanotechnology enhancements to cruise missiles and ballistic missiles could allow them to destroy their targets with conventional explosives »^{121 122}

et dans les progrès des TIC

*« The flood of data from world-wide sensors could be culled more efficiently to look for truly threatening activities ».*¹²³

¹¹⁹ **CEA-ALCIMED.** Nanotechnologies : prospective sur la menace et les opportunités au service du combattant, Avril 2004. avril 2004.

¹²⁰ **Pace, Scott.** *Military Implications of Nanotechnology.* s.l. : Foresight Institute, 1989.

¹²¹ **Pace, Scott.** *ibid*

¹²² Les progrès apportés par les nanotechnologies aux missiles de croisière et aux missiles balistiques pourraient leur permettre de détruire leurs cibles avec des explosifs conventionnels.

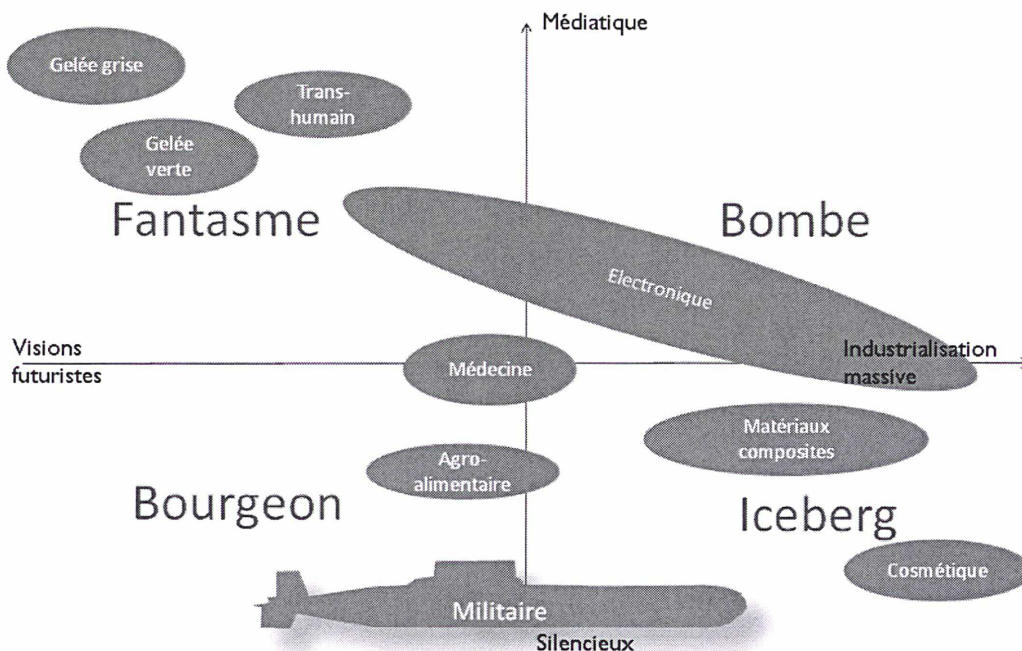
Mais en l'absence d'information, on ne peut faire que des spéculations. Celles faites par André Gsponer, directeur de l'ISRI¹²⁴, sont particulièrement inquiétantes : les progrès de l'électronique et des poudres permettraient de bien meilleurs détonateurs pour les armes nucléaires, et annonceraient l'arrivée des « *armes de destruction massive de quatrième génération* »¹²⁵.

Pourquoi une médiatisation en opposition de phase avec la réalité industrielle ?

¹²³ Le flot de données provenant des capteurs du monde entier pourraient être filtré plus efficacement pour rechercher les activités véritablement menaçantes

¹²⁴ ISRI : Independent Scientific Research Institute basé à Genève – nous n'avons pas réussi à trouver davantage d'informations sur ses membres et son activité.

¹²⁵ **Gsponer, André.** From the Lab to the Battlefield? Nanotechnology and Fourth-Generation Nuclear Weapons. *Disarmament Diplomacy*. Novembre 2002.



Pourquoi la matrice se remplit-elle de façon si contre-intuitive ? Pourquoi les aspects « hypothétiques » et « médiatiques » sont-ils corrélés ? Premièrement, un phénomène est d'autant plus médiatisé qu'il est spectaculaire, et une technologie est d'autant plus spectaculaire qu'elle incorpore une part de science-fiction. Ceci n'est pas nouveau. Ainsi, il y a trente ans, lorsque le grand public a découvert le laser, il était volontiers associé à des armes fabuleuses plutôt qu'au découpage des tôles. Nano-robots vivants, cyber-humanité immortelle, la science se met à promettre d'exaucer les fantasmes millénaires de notre espèce. Nul étonnement donc que ces thèmes trouvent une large audience au travers de la production artistique grand public.

Sans surprise non plus l'éventualité de tels programmes démiurgiques fournit une matière tangible de réflexion à la philosophie et la religion. Le monde de la publication scientifique n'échappe pas non plus à cette asymétrie médiatique. Les revues scientifiques les plus prestigieuses

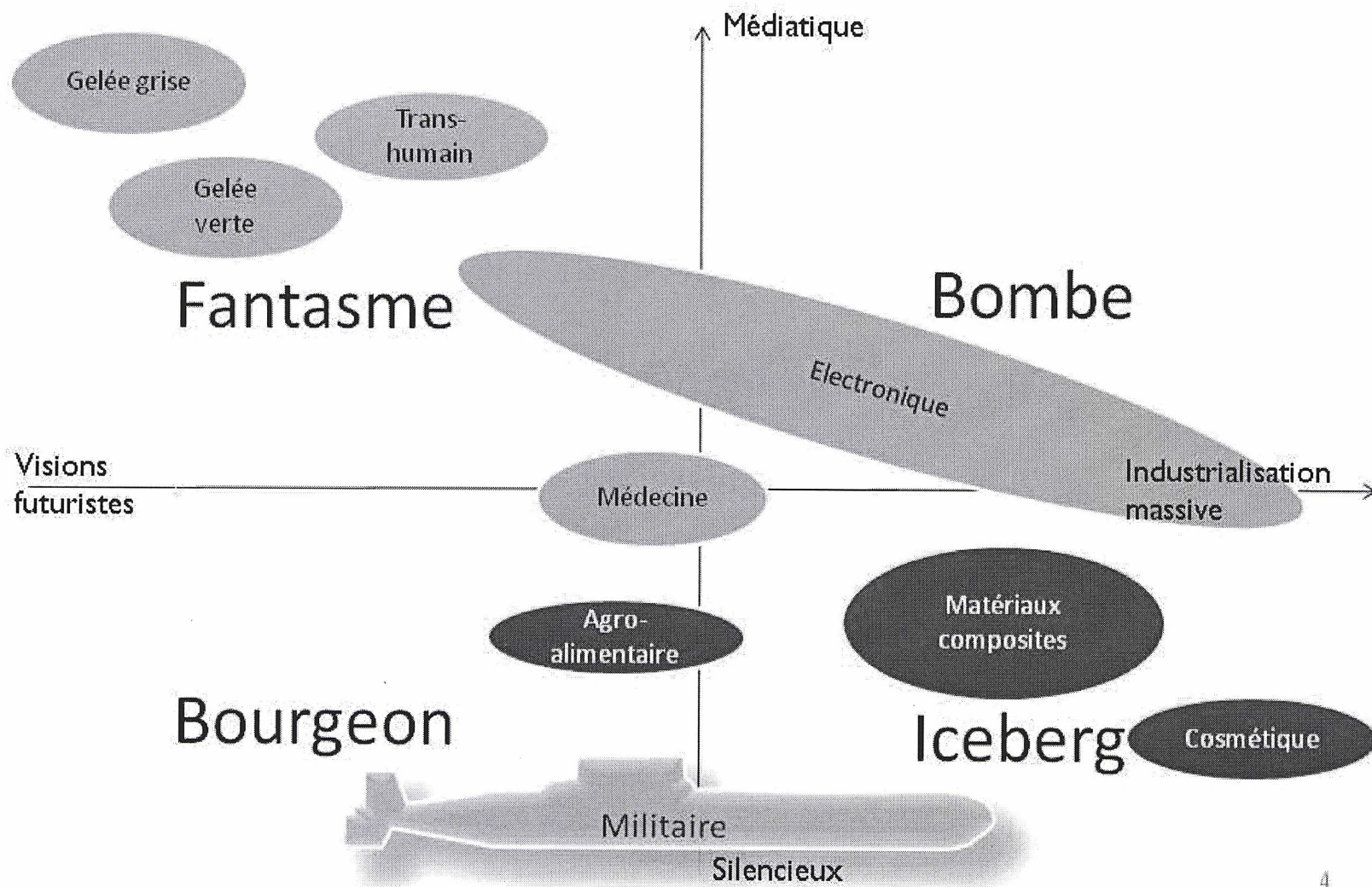
comme *Nature* ou *Science* se régalaient d'exploits de laboratoires comme la voiture moléculaire ou la téléportation quantique, tandis qu'est reléguée au second plan l'optimisation fastidieuse de procédés pour les rendre reproductibles en industrie. Elles contribuent donc à véhiculer une image faussée de l'avancement réel des technologies.

Un deuxième phénomène renforce la distorsion médiatique : les différents acteurs s'expriment inégalement. Les militants « anti-nano » multiplient les communications pour sensibiliser le grand public. Ils ont acquis un soutien influent auprès des grandes instances éthiques et religieuses, inquiètes des dérives potentielles du transhumanisme ou des nano-robots.

En revanche, les industriels communiquent peu, car l'étiquette « nano » fait désormais peur au grand public et ils ne veulent pas devenir les cibles des nano-sceptiques les plus virulents.

Les risques

Cette disproportion médiatique pose problème car elle éclipse les véritables enjeux des nanotechnologies, en nous aveuglant de débouchés hypothétiques et d'importants débats éthiques et sociétaux. Or les nanotechnologies ne sont pas toutes pour demain, certaines sont déjà une réalité aujourd'hui, et nous devons prendre position sur les applications qui posent les risques les plus imminents. Et actuellement la plus grande incertitude plane sur la toxicité et l'écotoxicité des nano-objets alors qu'ils vont être employés de manière massive dans une multitude de matériaux. Avant de développer davantage le sujet des risques toxicologiques et écotoxicologiques, nous allons rapidement évoquer les risques d'autre nature et expliquer pourquoi nous ne souhaitons pas nous attarder plus longuement sur leur cas.



Les risques systémiques et apocalyptiques

Ces risques sont présentés en vert dans la matrice.

Comme nous l'avons montré au chapitre précédent, la gelée verte, la gelée grise, le smart dust et le transhumanisme relèvent du fantasme. Pour les applications relevant de ce quadrant, la faisabilité technique est mise en doute par le monde scientifique, et la réalisation concrète prendra au minimum encore de longues années.

S'il reste intéressant d'aborder certaines questions qui présentent un intérêt philosophique, les questions soulevées sont théoriques, elles ne concernent que des risques hypothétiques et à long terme. Elles peuvent servir de matière aux romanciers ou aux philosophes, mais elles ne doivent pas peser sur les moyens alloués à la prévention des risques concrets et imminents.

Les risques dérivés

Ces risques sont présentés en jaune dans la matrice.

Un risque socio-économique ?

L'un des reproches fait aux nanotechnologies concerne son impact sur l'économie et l'emploi, en particulier dans les pays du Tiers-Monde. Comme les matières plastiques en leur temps, les matériaux nanocomposites peuvent réellement entraîner de grands bouleversements sur le marché des matières premières, marché dont dépend l'économie de certains pays en développement. Ces craintes sont ainsi formulées dans le rapport *Principles for the Oversight of Nanotechnologies and Nanomaterials* résultant de la collaboration de 44 ONG nationales et internationales¹²⁶ :

¹²⁶ **44 ONG signataires.** *Principles for the Oversight of Nanotechnologies and Nanomaterials*. 2007.

Fascinantes nanotechnologies

« they may disrupt markets for existing commodities with potentially devastating consequences for the economies of commodity dependent developing countries (i.e., the poorest countries). »¹²⁷

On s'attend à ce qu'ils puissent se substituer notamment à des matériaux qui pose des problèmes d'approvisionnement, comme l'ITO (Indium Tin Oxyde), un oxyde transparent conducteur incontournable utilisé dans les systèmes opto-électroniques (par exemple les cellules solaires), et qui est actuellement source d'inquiétude car les ressources mondiales d'indium s'épuisent. Mais comme le souligne le député européen vert Caroline Lucas dans un article du Guardian, au-delà de remplacer des matériaux rares ou dangereux, il faut aussi s'interroger sur l'impact économique et social de ces transitions technologiques¹²⁸ :

« Policymakers must not fall for this doublespeak, and must ask the right questions about nanotech's social and environmental impacts: its effects on employment (if we can replace copper with carbon nanotubes, for example, what will be the future of those in Zambia who depend on the copper industry?) »¹²⁹

Il est également justifié de se demander si les bienfaits apportés par les nanotechnologies profiteront à tous, et pas seulement aux industriels et aux citoyens des pays riches. En particulier, il est toujours regrettable de constater que les lois impitoyables du capitalisme empêchent le

¹²⁷ Ils pourraient perturber les marchés pour les matières premières existantes avec potentiellement des conséquences dramatiques pour les économies des pays en voie de développement dépendant des matières premières (donc les pays les plus pauvres).

¹²⁸ **Lucas, Caroline.** We must not be blinded by science. *The Guardian*. 12 juin 2003

¹²⁹ Les hommes politiques ne doivent pas s'enthousiasmer pour ce double langage et doivent poser les vraies questions sur les impacts sociaux et environnementaux des nanotechnologies : ses effets sur l'emploi (si on peut remplacer le cuivre par des nanotubes de carbone par exemple, que sera l'avenir des zambiens qui dépendent de l'industrie du cuivre ?)

développement d'innovations profitables à de nombreuses populations dans le besoin. Pourra-t-on s'assurer par exemple que les filtres nanoporés pour l'assainissement de l'eau pourront effectivement être industrialisés ?

On peut de surcroît craindre que surgissent des confrontations entre intérêt général et propriété intellectuelle, comme cela s'est produit dans le domaine de la pharmacutique, qui feraient de certaines innovations une rente pour une minorité et les rendraient inaccessibles aux pays en voie de développement :

« Nanotechnology can only be made available to the poor and to developing countries if the technology remains open to use. If ownership of molecules is allowed, the nanotechnology techniques for the precise manipulation of atoms open up a whole new terrain for private ownership. As with genetic engineering where genes have become controlled by patents. »^{130,131}

Toutes ces interrogations sont légitimes, mais elles méritent une réflexion et des actions dépassant largement le cadre des « nanos ». Elles sont en effet fondamentalement liées au modèle même de notre système économique et remettent en cause la loi du marché par rapport aux questions de solidarité et de répartition des richesses. Les problèmes évoqués sont anciens et rencontrés dans bien d'autres domaines. Ainsi, le développement de la trithérapie n'a pas beaucoup profité aux séropositifs du Tiers-Monde, bien qu'ils soient les plus nombreux.

¹³⁰ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*,. s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003.

¹³¹ Les nanotechnologies peuvent uniquement être rendues disponibles aux pauvres et aux pays en voie de développement si leur utilisation reste ouverte. Si la propriété des molécules est autorisée, les techniques nanotechnologiques pour la manipulation précise des atomes ouvrent tout un nouveau terrain pour la propriété privée. Comme pour le génie génétique où les gènes sont devenus contrôlés par des brevets.

Fascinantes nanotechnologies

Philip Ball, ancien éditeur de la revue scientifique *Nature* doute qu'il soit pertinent de traiter ces problèmes dans le cadre réduit des nanotechnologies :

« more difficult questions (...) have been raised: who is doing this, and why, to what end, and for whose benefit? Scientists do not feel comfortable addressing these things, while businesses have sometimes been more actively unwilling to hear them. On the other hand, I am not really sure that they are issues that can be addressed adequately from within the, in this context, narrow scope of nanotechnology. »^{132,133}

Ces problèmes socio-économiques n'ont rien d'intrinsèque aux nanotechnologies, ils sont directement liés à notre modèle économique, l'économie de marché. Ils ne pourront être résolus que par l'adoption d'un modèle alternatif, ce qui requiert un changement de mentalité et de politique profond. Philippe Chemin, de la Direction Générale pour la Prévention des Risques, qui suit le dossier des nanotechnologies depuis qu'il a émergé à l'OCDE en 2005, propose de revoir notre tendance à systématiquement assimiler l'innovation technologique à un progrès pour l'humanité, et d'envisager de ne développer les nanotechnologies qu'au strict minimum, quand elles répondent à un besoin impérieux pour lequel n'existe aucun moyen de substitution. En d'autres termes, il s'agit de remettre en cause notre modèle de société productiviste-consumériste, dans laquelle l'innovation technologique joue à la fois le rôle de moteur en créant ex-nihilo de nouveaux besoins, de moyen de répondre aux exigences matérielles toujours croissantes de l'humanité, et plus récemment de pallier aux dégâts causés par cette même

¹³² **Ball, Phillip.** Nanotechnology in the firing
<http://nanotechweb.org/cws/article/indepth/18804>

¹³³ Des questions plus difficiles ont été soulevées : qui fait ça, pourquoi, dans quel but, et pour le bénéfice de qui ? Les scientifiques ne sont pas à l'aise pour s'atteler à ça, tandis que les hommes d'affaire parfois font de leur mieux pour ne pas les entendre. D'un autre côté, je ne suis pas vraiment sûr que ce soient des problèmes qui puissent être abordés de façon pertinente, dans ce cas, dans le cadre limité des nanotechnologies.

consommation exponentielle. Modèle que nous exportons dans le monde entier en essayant de répondre aux problèmes des populations des pays en développement par la technologie. Ceci rejoint un grand débat du 21^{ème} siècle : la décroissance de la production et de la consommation de biens matériels dans les pays développés. Si nous pensons personnellement que décroissance et progrès technologique ne sont pas nécessairement en opposition frontale, mais peuvent apporter des solutions complémentaires aux problèmes créés par le réchauffement climatique et l'épuisement des ressources (par exemple par des panneaux solaires beaucoup plus performants !), nous rejoignons Philippe Chemin sur le fait que la technologie, et en l'occurrence les nanotechnologies, ne pourront pas résoudre tous les problèmes de l'humanité. Encore une fois, cette question dépasse largement le cadre des nanotechnologies (il concerne en outre les biocarburants, le nucléaire, la remise en cause du modèle de croissance économique, etc.) et à nos yeux il convient de le mettre au cœur des débats politiques seul et dans son intégralité.

Les risques de mésusage des applications

Les RFID bénéficieront beaucoup des nanotechnologies. Leur multiplication, la baisse des coûts de fabrication et leur miniaturisation fait légitimement craindre une menace de type Big Brother. En effet, on imagine déjà des façons de contourner les obstacles techniques, et certaines entreprises travaillent sur l'implantation chez l'homme.

L'énergie récupérée par le RFID étant faible (et intuitivement proportionnelle à sa surface), sa portée d'émission est limitée, *« toutefois la limitation à deux mètres de capacités de lecture est surmontable par la prolifération de lecteurs »* selon la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL). Des essais d'implantation chez l'homme ont déjà été réalisés sur une vingtaine de

Fascinantes nanotechnologies

personnes, et d'après Matthew Cossolotto, porte-parole d'Applied Digital Solutions cité par l'AFNET¹³⁴,

« L'implantation est effectuée par une légère piqure qui n'est pas douloureuse et la puce peut-être retirée à n'importe quel moment par une incision également bénigne. »

Aux Etats-Unis, des associations de citoyens comme CASPIAN (Consumer Against Supermarket Privacy Invasion) et l'EPIC (Electronic Privacy Information Center) sont très attentives à ces menaces contre leur vie privée. En France, la CNIL recommande que les données concernant les objets soient considérées comme des données personnelles et qu'on puisse librement désactiver ces étiquettes dans certains cas.

Néanmoins il ne faut pas faire l'amalgame avec les nanotechnologies : tout comme le transistor, le dispositif RFID existe à toute taille, et notamment à des tailles invisibles à l'œil nu mais supérieures au micromètre. Il est essentiel de bien faire cette distinction conceptuelle, parce qu'on ne peut pas traiter correctement les problèmes posés par les unes en les attribuant aux secondes. Les inquiétudes concernant les RFID et autres objets assimilables sont tout à fait légitimes, mais elles se focalisent sur les nanotechnologies alors que les dérives évoquées ont déjà été soulevées par des innovations antérieures, ce qui signifie que la cause est plus large. Les libertés individuelles sont d'ailleurs autant menacées par le développement des réseaux sociaux sur internet comme facebook que par les RFID, et il est logique que ce soit à la CNIL que revienne l'étude de ce dossier plus général.

Autre exemple de risque dérivé : les applications militaires. Comme nous l'avons expliqué au chapitre précédent, les nanotechnologies pourraient servir à améliorer les bombes à hydrogène. Néanmoins, les armes de destruction massives ne sont pas propres aux nanotechnologies, et d'ailleurs aucune de celles existant actuellement (nucléaire, chimique ou

¹³⁴ AFNET. <http://www.afnet.fr/home.html>.

biologique) n'en utilise. Ce risque ne doit donc pas peser sur le développement général des nanotechnologies, et s'il serait rassurant qu'une action soit entreprise pour empêcher leur utilisation dans des armes de destruction massive, il vaudrait mieux par exemple étendre le protocole de Genève.

Les risques propres, toxicologiques et écotoxicologiques, sous-estimés ?

Ces risques sont présentés en rouge dans la matrice.

Comme nous l'avons montré au chapitre précédent, la réalité industrielle à court terme hors électronique concerne les matériaux, les cosmétiques, éventuellement l'agro-alimentaire. Or ces applications sont concernées par un risque intrinsèque aux nano-objets utilisés : leur toxicité. L'industrialisation en fait un risque important, et ce risque étant propre aux nano-objets, il est tout à fait pertinent de le mettre au premier plan de l'ordre du jour dans la réflexion sur les risques engendrés par les nanotechnologies.

Les études actuelles montrent que la toxicité des nanoparticules est un sujet sérieux et incontournable. L'équipe de Chiu-Wing Lam du Wyle Laboratories à Houston a ainsi conclu que les nanotubes de carbone

« can be more toxic than quartz, which is considered a serious occupational health hazard in chronic inhalation exposures. »^{135,136}

De nombreuses études sont menées sur les nanotubes de carbone à cause de leur forme de fibre, forme capable d'entraîner les mêmes

¹³⁵ Chiu-Wing Lam, John T. James, Richard McCluskey, and Robert L. Hunter. Pulmonary Toxicity of Single-Wall Carbon Nanotubes in Mice 7 and 90 Days. *Oxford Journals*. Septembre 26, 2003.

¹³⁶ « pourraient être plus toxiques que le quartz, qui est considéré comme un risque professionnel très sérieux en cas d'exposition à des inhalations chroniques ».

Fascinantes nanotechnologies

pathologies que l'amiante. Une étude récente¹³⁷ sur des nanotubes introduits dans la cavité abdominale de rats montre la possibilité d'induire des inflammations et des lésions comme l'amiante. Agnes Kane et Robert Hurt font le point sur l'ensemble des études toxicologiques portant sur les nanotubes de carbone¹³⁸ ; mettant de même en avant le risque « fibre » des nanotubes, ils ne se hâtent pas de conclure de manière trop alarmiste en faisant remarquer que les conditions expérimentales toxicologiques sont extrêmes par rapport à l'exposition normale des consommateurs et des travailleurs.

Le Washington Post du 1^{er} février 2004¹³⁹ fait l'inventaire d'un grand nombre d'études toxicologiques sur différents nano-objets dont les conclusions pointent du doigt la nocivité et la capacité à passer les barrières biologiques de certaines nanoparticules. Les travaux de l'équipe de Gunter Oberdörster sont notamment évoqués^{140,141} :

*« Inhaled particles do not always stop at the lungs. Experiments by University of Rochester toxicologist Gunter Oberdörster showed that nanoparticles can make their way from a rat's throat into its brain, apparently via the nasal cavities and olfactory bulb. »*¹⁴²

¹³⁷ **C.A. Poland et al.** Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *nature nanotechnology*. July 2008, Vol. 3, 423-428.

¹³⁸ **Kane, Agnes and Hurt, Robert.** The asbestos analogy revisited. *nature nanotechnology*. July 2008, Vol. 3, 378-379.

¹³⁹ **Weiss.** For Science, Nanotech Poses Big Unknowns. *Washington post*. 1er Février 2004

¹⁴⁰ **Oberdörster et al.** translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicology*. 16, 2004 June, Vols. (6-7), 437-445.

¹⁴¹ **Elder et al.** translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environ Health Perspect*. 114, 2006 August, Vol. 8, 1172-1178.

¹⁴² Les particules inhalées ne s'arrêtent pas toujours aux poumons. Des expériences menées à l'université de Rochester par le toxicologiste Gunter Oberdörster ont montré que les nanoparticules pouvaient migrer de la

Il ne faut cependant pas conclure de manière générale que les nano-objets sont tous dangereux. En effet, les propriétés quantiques, qui s'expriment dans les nano-objets, ne sont pas plus à craindre que les propriétés des molécules classiques. C'est un point que rappelle Philip Ball qui a été l'éditeur de *Nature* pendant dix ans¹⁴³ :

*« Let's not forget that many people, if they know anything about quantum physics at all, have acquired the notion that it is deeply strange, a weird, ghostly world profoundly different from our own. The idea has been widely put about that we simply don't understand that world, and that this makes it almost impossible to predict what nanosystems might do. »*¹⁴⁴

Les nano-objets n'ont a priori rien de plus dangereux ou de plus sûr que les molécules classiques, mais comme toutes nouvelles substances chimiques, il faut donc se préoccuper des risques industriels, sanitaires et environnementaux des secteurs de la chimie et des matériaux nanocomposites. C'est également le sujet prioritaire pour Greenpeace¹⁴⁵ :

« the application of nanotechnology to computerisation is less likely to cause concern than those practices which might lead to the release of

gorge d'un rat jusqu'à son cerveau, apparemment via les cavités nasales et le bulbe olfactif.

¹⁴³ **Ball, Phillip.** Nanotechnology in the firing line.

<http://nanotechweb.org/cws/article/indepth/18804>

¹⁴⁴ N'oublions pas que beaucoup de gens, s'ils savent quoi que ce soit sur la physique quantique, ont intégré la notion que c'est profondément étrange, un monde bizarre et fantomatique complètement différent du nôtre. L'idée a été largement répandue que simplement nous ne comprenons pas ce monde, et que cela rend quasi-impossible de prédire ce qu'un nanosystème peut donner.

¹⁴⁵ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*,. s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003

Fascinantes nanotechnologies

*nanoparticles into the environment, such as the disposal of nanobased composites ».*¹⁴⁶

Consacrer plus d'efforts à la toxicologie et à l'écotoxicologie est encore la recommandation de Colvin, directeur du Center for Biological and Environmental Nanotechnology^{147,148} :

*« It is critical that more organisations and people devote time and money to these questions. This requires a change in the current climate: of the [US\$710 million in funding for the NNI in the fiscal year 2003, less than [US\$500,000 is devoted to the study of environmental impact. It is difficult to convince scientists, or funding managers, to support environmental impact studies. The immediate payback for research that demonstrates ways of using nanomaterials to cure disease, for example, is greater than the reward for uncovering that a nanomaterial may cause disease. »*¹⁴⁹

¹⁴⁶ L'application des nanotechnologies à la fabrication d'ordinateurs est moins à craindre que les pratiques pouvant aboutir l'épandage de nanoparticules dans l'environnement, tels que la génération de déchets nanocomposites.

¹⁴⁷ Le CBEN est basé à Houston ; son but est le développement de nanomatériaux pour mettre au point de nouvelles technologies médicales ou environnementales.

¹⁴⁸ **Colvin, Vicky.** *Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News*. s.l. : U.S. Department of Energy, 2002.

¹⁴⁹ Il est essentiel que plus d'organisations et de personnes consacrent du temps et de l'argent à ces questions. Cela requiert un changement de la tendance générale : sur les 710 millions de dollars de financement de la NNI pour l'année fiscale 2003, moins de 500000 dollars ont été alloués aux études d'impact environnemental. Il est difficile de convaincre les scientifiques et les financiers de la nécessité de cette étude d'impact. Le retour immédiat pour une recherche montrant des moyens d'utiliser des nanomatériaux pour soigner des maladies par exemple est meilleur que la récompense pour révéler qu'un nanomatériau pourrait causer des maladies.

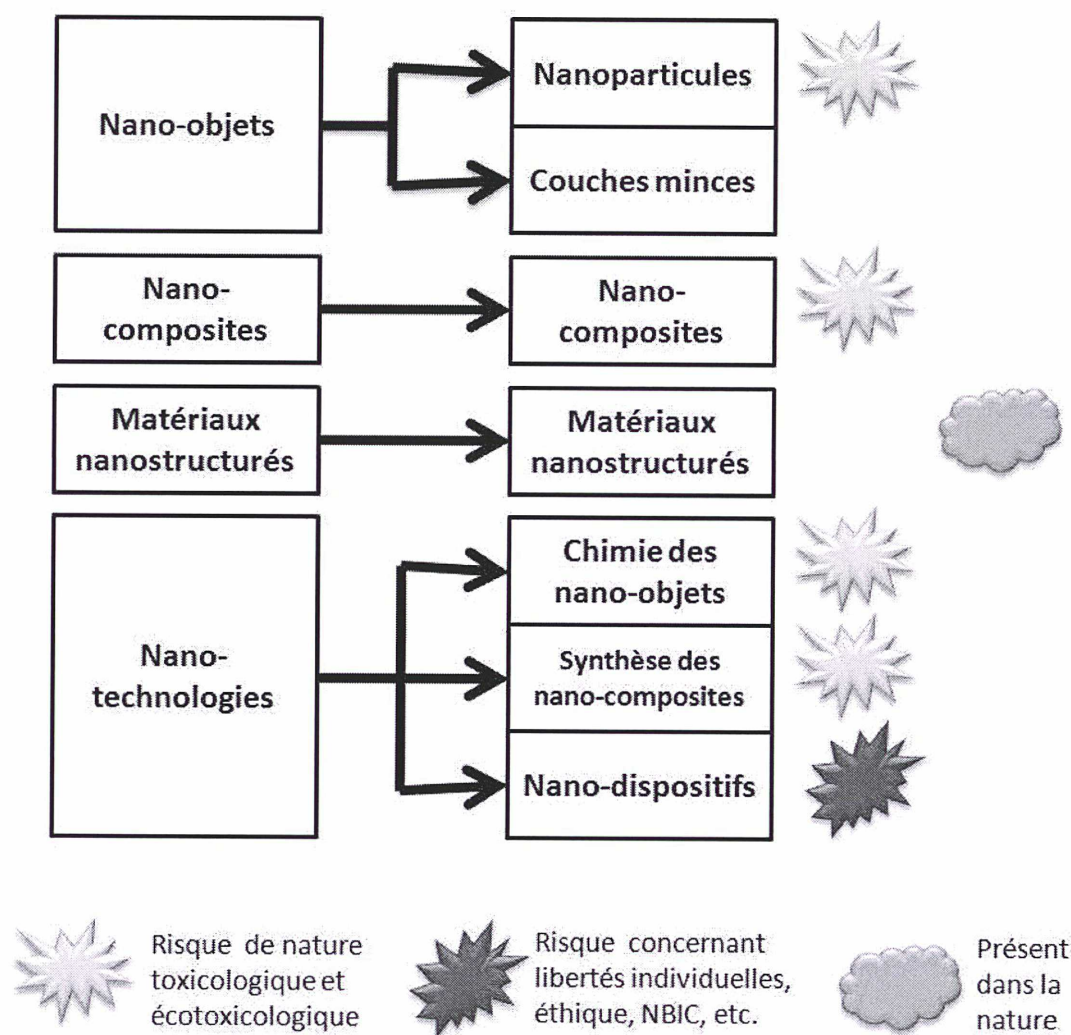
Il ajoute que cet effort est indispensable pour obtenir la confiance des citoyens :

« hard data on the environmental effects of nanomaterials could go a long way to building the public's trust. »¹⁵⁰

Ces risques étant identifiés comme « les risques majeurs des nanotechnologies », quelles mesures peut-on prendre pour les prévenir sans entraver totalement le développement de ces technologies prometteuses ? Nos réglementations en matière de produits chimiques sont-elles capables de prendre en charge de telles substances complexes et hybrides ? Quelles sont les mises à niveau en terme techniques et juridiques ?

¹⁵⁰ Des données solides sur les effets environnementaux des nanomatériaux pourraient fortement contribuer à bâtir la confiance du public.

Fascinantes nanotechnologies



Quelles réglementations chimiques ?

Les législations traditionnelles déjà en place sont-elles suffisantes pour l'arrivée des nanotechnologies, ou faut-il mettre en place de nouvelles structures ? Cette interrogation est soulevée en 2004 par le conseil de recherche économique et social anglais dans son rapport *The Social and Economic Challenges of Nanotechnology*¹⁵¹ :

*« There is an emerging debate between those who believe that the rapid growth of nanotechnology defined in its broader sense will have strongly positive economic benefits, and those who on the grounds of environmentalism and social equity seek to slow or halt the development of nanotechnology. This debate is anchored in current applications. [Also] at issue is whether the existing regulatory framework for food, drugs, cosmetics, and workplace and environmental safety is sufficiently robust to incorporate any special features of nanoparticles, or whether new structures need to be set in place. »*¹⁵²

Dans son rapport de Juin 2008, l'AFSSET nous rappelle l'état limité, voire alarmant de nos moyens en termes de maîtrise du risque des nano-objets et des matériaux nano-composites¹⁵³ :

¹⁵¹ **UK Economic and Social Research Council.** The Social and Economic Challenges of Nanotechnology. 2004.

¹⁵² Il y a un débat émergent entre ceux qui croient que la croissance rapide des nanotechnologies définie dans son sens le plus large apportera de grands bénéfices économiques et sur qui sur les bases de la protection de l'environnement et par soucis d'équité sociale cherchent à ralentir ou à stopper le développement des nanotechnologies. Ce débat est ancré dans les applications actuelles. Aussi se pose la question de savoir si la réglementation existante pour l'alimentation, les médicaments, les cosmétiques et le lieu de travail et la préservation de l'environnement est assez robuste pour tenir compte de toutes les particularités des nanoparticules, ou si de nouvelles structures doivent être mises en place.

¹⁵³ **AFSSET.** Les nanomatériaux, Sécurité au travail. 2008.

- « - un manque évident d'outils métrologiques fiables pour caractériser efficacement l'exposition des travailleurs et des populations riveraines,*
- une connaissance encore incomplète des effets des nanomatériaux sur la santé de l'homme,*
 - un nombre très faible de méthodes pour évaluer l'exposition à un poste de travail,*
 - les questions qui subsistent concernant l'efficacité des équipements de protection individuels pour l'ensemble des nanomatériaux (autres que le noir de carbone) et en conditions réelles d'utilisation.*
 - Seules quelques entreprises fournissent des informations dans leurs fiches de données de sécurité sur les propriétés spécifiques des nanomatériaux ou des conseils sur les mesures de protection à prendre pour limiter une exposition éventuelle aux nanoparticules. Il en est de même avec les laboratoires de recherche universitaire. »*

Nous ne savons donc que très peu de chose sur la dangerosité de ces nouvelles substances chimiques que sont les nano-objets, d'autant qu'ils présentent un comportement hybride entre les molécules classiques (propriétés spécifiques) et les poussières ultra fines (tendance à l'agrégation). Leurs propriétés exotiques très souvent dues à des phénomènes quantiques ne les rendent pas nécessairement plus dangereuses qu'une molécule nouvelle ; cependant il convient d'examiner si les dispositions réglementaires relatives aux nouvelles substances mises sur le marché résistent à la complexité apportée par les nano-objets.

La question de la définition opérationnelle

Actuellement les questions de définitions se trouvent sous la responsabilité des instances de normalisations, AFNOR pour la France,

ISO pour le cadre international. Comme nous l'avons évoqué au chapitre II et III, les définitions sont stratégiques car elles permettent de délimiter le champ d'application de la réglementation, et donc d'inclure ou d'exclure telle ou telle industrie de l'obligation de se soumettre à une nouvelle contrainte. Or si le concept de nano-objet que nous avons proposé au chapitre III nous permet d'ores et déjà d'écarter un certain nombre d'activité du champ des nanotechnologies, il pose tout de même des problèmes aigus 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. Comme nous l'avons évoqué au chapitre III, la réalité d'un nano-objet est complexe. Il n'y a pas une nanoparticule d'or mais des nanoparticules d'or. En effet, il ne suffit pas de considérer la taille pour qualifier un nano-objet, d'autres paramètres entrent en compte, et notamment son état de surface. Une nanoparticule d'oxyde de titane est capable de photolyser les graisses ; recouverte d'une coquille d'alumine ou de silice, elle ne présente plus de danger. Comme le souligne Denis Bortzmeyer, à ARKEMA, il est indispensable qu'il y ait une segmentation fine de la norme, sans quoi on aboutira à un vaste amalgame entre toutes les formes de nanoparticules de même composition chimique (en volume).

Autre difficulté, il se cache le plus souvent derrière la notion de nano-objet l'idée de continuum de la propriété physique. Reprenons l'exemple des nanoparticules d'or qui présente un effet plasmon. Cet effet apparaît en fait progressivement au fur et à mesure que le diamètre de la particule diminue, ce qui se traduit par un changement de couleur progressif des particules qui passent par toutes les couleurs de l'arc en ciel entre 100nm et 5nm. A quel diamètre décréter que la particule est

un nano-objet ou non est une question d'appréciation. Sans compter qu'il faut bien comprendre que les effets de confinement n'apparaissent pas à la même taille suivant la composition chimique. On ne peut donc pas simplement décréter que les particules qui sont en dessous de 100 nm sont des nano-objets.

Reach

(Registration, Evaluation, and Authorisation of Chemicals) et la question de la toxicologie

Du point de vue de la mise en œuvre concrète, les réglementations se heurtent également aux difficultés techniques.

Qu'est-ce-que Reach ?

La réglementation européenne Reach (Règlement (CE) n° 1907/2006, adoptée le 18 décembre 2006) impose aux filières industrielles de documenter les analyses toxicologiques de toute substance chimique en circulation sur le marché communautaire. Il s'agit de combler le déficit de connaissances des risques environnementaux et sanitaires sur des substances chimiques qui représentent la très vaste majorité des tonnages produits et mis sur le marché : ainsi 30 000 produits, sur les 100 000 existants sur le marché communautaire devront être enregistrés dans les 11 prochaines années auprès de la nouvelle agence européenne des produits chimiques créée à cet effet (ECHA pour European Chemicals Agency). Auparavant, seules les substances mises sur le marché après 1981 faisaient l'objet d'une notification préalable, ce qui représente moins de 10% des substances commercialisées. Pour plus d'efficacité la charge de la preuve est renversée : désormais, c'est aux producteurs de substances et non plus aux autorités publiques de prouver que les risques liés aux substances qu'ils produisent sont valablement maîtrisés.

Par rapport à la réglementation existante, le règlement REACH introduit donc le concept de l'enregistrement, pour lequel toute industrie doit

fournir les informations pertinentes lui permettant d'assurer une gestion sûre de ou des utilisations de la substance. Par ailleurs les substances particulièrement problématiques, CMR 1&2 (Cancérigène, Mutagène, Repro-toxique de classe 1 et 2), PBT (Persistante, Bioaccumulable, Toxique) et vPvB (très Persistante, très Bioaccumulable) sont maintenant soumises à autorisation de mise sur le marché. Enfin une procédure de restriction est prévue pour permettre la gestion des risques non couverts et interdire le cas échéant une substance quel que soit son usage.

Nano-Reach ?

L'enregistrement et la classification d'une substance prévus dans Reach prennent en compte la forme ou l'état physique dans lequel elle est mise sur le marché. Ainsi le nickel et la poudre de nickel (grains de moins de 1 mm) sont enregistrés sous deux appellations différentes. Reach est donc théoriquement couvrant pour les nano-objets. Seulement, l'arrivée des nano-objets risque de faire littéralement exploser la mise en œuvre de la réglementation, car les caractéristiques autres que la composition chimique, telles que la forme du nano-objet ou son état de surface, prennent pour les nano-objets une importance prépondérante.

Colvin, directeur du Center for Biological and Environmental Nanotechnology, souligne cette différence fondamentale avec la chimie traditionnelle :

« We're so keyed in to the composition of the substance when we think of toxicology, but on the nanoscale the [particle] size and surface chemistry will probably be the most important feature. That's an interesting paradigm shift. » ^{154,155}

¹⁵⁴ **Colvin, Vicky.** *Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News*. s.l. : U.S. Department of Energy, 2002.

¹⁵⁵ Nous sommes tellement attachés à la composition d'une substance quand on pense à la toxicologie, mais à l'échelle nanométrique, la chimie

La mise en pratique de l'application de Reach risque d'être beaucoup plus compliquée que pour les substances classiques. Le problème vient essentiellement du fait qu'actuellement on ne dispose pas de modèle reliant les caractéristiques d'un nano-objet à sa toxicité et sa capacité de translocation membranaire, contrairement à une molécule chimique classique dont on peut prévoir le comportement grâce à la chimie structurale. En particulier, comme le souligne les toxicologues du CEA Frédéric Taran et Rémy Maximilien, on n'a pas déterminé de paramètre prédominant qui détermine la réactivité d'un nano-objet. Certes, comme le rappelle le Comité de Prévention et de Précaution en 2006¹⁵⁶ la toxicologie des particules n'est pas une science nouvelle. Cependant, elle est elle-même en pleine évolution. En effet, la tendance des dernières années consistait à classer toutes les nanoparticules sous une seule catégorie, considérant que la taille était le seul paramètre important car elle conditionnait la traversée des membranes biologiques. Ceci a permis d'établir des courbes reliant l'imperméabilité des parois biologiques par rapport à la taille de la particule. (Figure 25).

de la taille et la surface de la particule joueront probablement le rôle le plus important. C'est une intéressante révolution conceptuelle.

¹⁵⁶ **Comité de Prévention et de Précaution.** *Nanotechnologies, nanoparticules. Quels dangers? Quels risques?* s.l. : MEEDDAT, 2006.

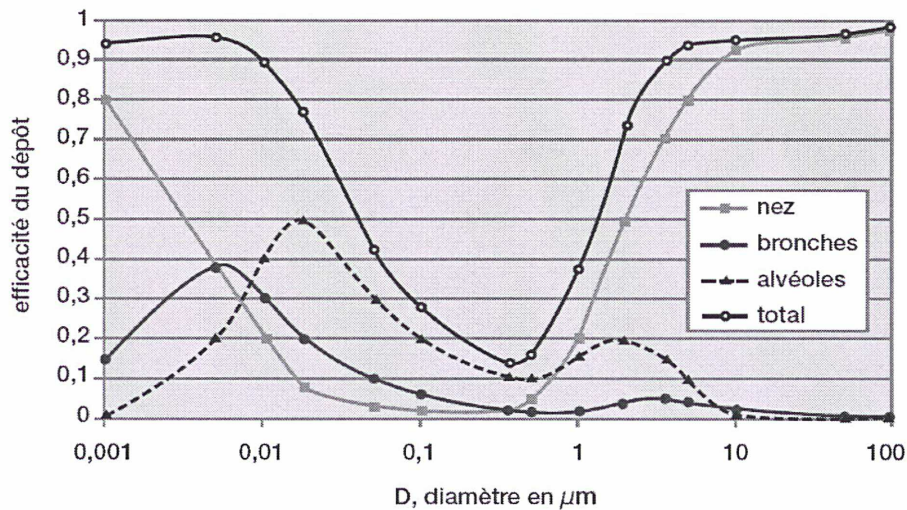


Figure 3. Courbes donnant l'efficacité du dépôt des particules dans différentes parties de l'appareil respiratoire en fonction de leur dimension (d'après le modèle de la Commission Internationale de Radioprotection [4-5]).

Figure 25 : Efficacité du dépôt des particules dans différentes parties de l'appareil respiratoire en fonction de leur dimension. Source : Commission Internationale de Radioprotection

Cependant les spécialistes reviennent actuellement sur cette prépondérance simpliste du facteur taille, et réintroduisent d'autres paramètres. Sur l'appareil respiratoire par exemple six paramètres influents sur l'effet pathogène d'une particule ont été distingués :

la **taille**, qui détermine les modalités de pénétration et de déposition dans les voies aériennes ;

la **forme**, avec comme pour l'amiante l'effet «fibre», qui peut apparaître indépendamment de la composition chimique ;

la structure cristalline ;

la composition chimique de cœur ;

la composition chimique de surface ;

la **biopersistance**, assimilée au temps de rétention dans l'appareil respiratoire, paramètre utilisé dans le classement des fibres minérales synthétiques.

De manière générale, on observe une multiplication des caractéristiques pouvant influencer les propriétés physico-chimiques d'un nano-objet et la liste varie en fonction de chaque substance. Pour un nanotube de carbone par exemple, on a notamment besoin de notifier le nombre de parois, la chiralité, le diamètre, la longueur, le mode de fabrication, le nombre de défauts, le surfactant, et comme les nanotubes ne peuvent pas être préparés avec des caractéristiques fixées, il sera probablement nécessaire de préciser les dispersions de tous ces paramètres pour un lot de nanotubes.



Figure 26 : Des daphnies, petits crustacés zooplanctoniques mesurant de un à cinq millimètres et malheureux cobayes des expériences de toxicologie environnementale. Source Encarta.

La distorsion médiatique

Nous ne possédons pas de modèles permettant d'établir l'influence de chaque paramètre sur la réactivité d'un nano-objet et il est fort probable que celle-ci soit le résultat d'une combinaison non séparable de deux ou plusieurs paramètres. De plus la réactivité d'un nano-objet n'est pas toujours reliée à sa propriété physico-chimique spécifique : si les nanoparticules d'oxyde de titane peuvent convertir l'énergie du rayonnement ultra-violet qu'elles absorbent pour détruire les molécules organiques (phénomène de photo-catalyse qui crée un stress oxydatif sur les organismes vivants), les nanoparticules de silice ne le peuvent pas. Or en l'absence actuelle de paramètres pertinents permettant d'identifier des familles de produits ayant des ressemblances de comportement, nous en sommes réduits à faire des études au cas par cas.

Par conséquent, on risque d'observer une explosion du nombre de substances à déclarer, car on ne pourra pas regrouper facilement les produits de différentes entreprises sous la même dénomination (dénomination dont le seul intérêt dans Reach est bien de relier une substance à ses caractéristiques toxiques). Ceci renforcera le phénomène d'« esquive » : un grand nombre de nano-objets et de matériaux nano-composites sont produits dans de faibles tonnages, inférieurs à la limite d'enregistrement de 1 tonne par an, un grand nombre de productions est donc susceptible de passer au travers du dispositif Reach. De plus, l'échéancier d'enregistrement prévoit un étalement suivant la masse de production, les substances produites à plus de 1000 tonnes/an devant être enregistrées avant fin 2010, celles produites à plus de 100 tonnes/an avant 2013 et les substances produites à plus d'une tonne/an avant 2018. Ceci fait craindre à certains responsables d'administration ou d'ONG le risque qu'on découvre trop tard les dangers de tels ou tels nano-objets. Comme le souligne David Vernez, Adjoint au Chef de Département Expertises en Santé Environnement-Travail, si les nanoparticules de TiO_2 , le cérium et de silice sont produites autour de 100 000 tonnes par ans, la médiane des tonnages pour les nano-objets se situe plutôt aux alentours de 750 T/an. Si Reach est théoriquement couvrant, les pouvoirs publics sont

conscients que des aménagements doivent être effectués pour la rendre efficace en termes de protocoles toxicologiques. C'est d'ailleurs pour cela qu'un groupe Nanoreach a été constitué.

La mise en pratique : le défi de la toxicité

Depuis la prise de conscience des risques sanitaires que pouvaient présenter les nano-objets, les grands programmes gouvernementaux consacrent une partie des fonds destinés aux nanotechnologies à la recherche toxicologiques. En conséquence les publications scientifiques se multiplient et nous renvoyons nos lecteurs à quelques ouvrages faisant le point sur l'état de l'art actuel¹⁵⁷. Le problème est que le consensus scientifique n'est souvent pas établi. Par exemple pour la question de la pénétration dans la peau des nanoparticules d'oxyde de titane utilisées dans les cosmétiques, les études menées par les industriels concluent qu'il n'y a pas de pénétration :

*« La peau serait une barrière solide pour empêcher les particules d'atteindre l'organisme. (...) Quelques études, difficiles à mener et souvent conduites par des laboratoires de l'industrie chimique ou pharmaceutique (Beiersdorf, BASF, Merck...), ont été réalisées. Sur une quinzaine, seules trois ou quatre ont constaté une faible pénétration au-delà de la première couche de la peau (cinq micromètres) mais jamais au-delà de l'épiderme, selon une synthèse récente parue dans Critical Reviews of Toxicology »*¹⁵⁸

Mais quelques études indépendantes montrent le contraire d'après Greenpeace, et le groupe Nanowerk reste sceptique quant à l'innocuité

¹⁵⁷ **Hervé-Bazin, Benoît and Ambroise, Denis.** *Les nanoparticules: Un enjeu majeur pour la santé au travail ?* s.l. : Institut national de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, 2007

¹⁵⁸ Larousserie, David. Quatre questions sur les nanotechnologies. *Sciences et Avenir*. Avril 2007.

des nanoparticules enrobées¹⁵⁹. Certaines études seraient-elles erronées ? Y aurait-il de la mauvaise foi de la part de certaines parties ? Pas nécessairement, car les conditions d'expérimentation ou l'état des nanoparticules ont pu être différentes entre les différentes publications et aboutir à des résultats différents – comme nous l'avons dit précédemment, l'état de surface d'une nanoparticule joue très probablement un rôle déterminant dans sa capacité à traverser une membrane. L'impact des conditions d'expérimentation est particulièrement flagrant dans le stress oxydatif des nanoparticules sur les micro-organismes comme l'explique Jean-Yves Bottero dans une conférence de l'OMNT¹⁶⁰ :

« Pour les micro-organismes (bactéries par exemple), les effets semblent peu importants si les chercheurs utilisent des milieux nutritifs riches en molécules diverses (acides-aminés, glucose). On observe des effets toxiques si les expériences sont faites sans milieux nutritifs. Quelles que soient les nanoparticules (carbone, métaux), les mécanismes de la toxicité semblent être la production d'espèces très oxydantes à base d'oxygène. Ces molécules à base d'oxygène sont d'ailleurs utilisées pour rendre potables les eaux de surface ou les eaux souterraines. Elles ont comme propriétés à la fois d'oxyder des molécules dangereuses pour la santé mais aussi de tuer virus et bactéries. Les études montrent que pour les nanoparticules carbonées (C60 essentiellement), les quantités toxiques sont autour du mg/L d'eau. Par contre pour les oxydes on se situe plutôt au-dessus de 10 mg/L. »

Comme le souligne Philippe Hubert, directeur du pôle risques chronique à l'INERIS, un des facteurs majeurs de la toxicité des nano-objets est leur rôle potentiel de cheval de Troie, c'est-à-dire leur capacité adsorber des substances chimiques présentes dans les milieux où ils sont

¹⁵⁹ **Nanowerk.** Does coating nanoparticles make them safe(r) for cosmetics? *nanowerk*. [Online] octobre 30, 2007.

¹⁶⁰ **OMNT.** *Etat de la recherche sur les effets des nanoparticules sur la santé et l'environnement*. 2008

préparés et utilisés (atmosphère, milieu de culture cellulaire...) en raison de la grande réactivité de surface qui caractérise les nanoparticules indépendamment de leur composition initiale. Ainsi les nanotubes de carbone sont de très bons collecteurs de dérivés aromatiques (benzène, phénols etc.) particulièrement connus pour leurs propriétés mutagènes ; or en les absorbant à leur surface, les nanotubes concentrent de facto ces molécules et ce qui peut ainsi augmenter les risques de cancer au niveau des cellules.

On comprend toute l'importance des conditions expérimentales et la subtilité de l'impact des nano-objets sur les organismes vivants. Les études expérimentales essaient de se rapprocher des conditions réelles d'exposition d'un individu à une substance, mais ne le peuvent pas toujours faute d'informations sur de multiples paramètres, comme le souligne Agnes Kane et Robert Hurt¹⁶¹.

D'un autre côté, les protocoles existants pour les molécules classiques ne sont pas toujours applicables en matière de nano-objets, car ces derniers sont souvent instables et s'agrègent facilement. Et ils sont souvent bien frustes. Typiquement dans le cas des études in vivo, on dilue le produit dans l'atmosphère d'une cage à rats ou dans un aquarium contenant un écosystème idéal composé d'algues, de crustacés et de poissons. Or la plupart des nano-objets ont spontanément tendance à venir se coller aux parois des enceintes ou à s'agréger, et pénètrent difficilement dans les organismes. Les expérimentateurs sont alors obligés soit d'injecter directement les nano-objets dans la trachée ou par voie intraveineuse, mais les conditions expérimentales ne sont pas réalistes, soit de faire subir des traitements aux nano-objets pour les rendre stables dans l'air ou dans l'eau, mais alors les industriels peuvent rejeter les conclusions des études en argumentant que la substance testée n'est pas celle qu'ils produisent. De plus comme nous l'ont précisé Frédéric Taran et Rémy Maximilien, dans

¹⁶¹ Kane, Agnes and Hurt, Robert. The asbestos analogy revisited. *nature nanotechnology*. July 2008, Vol. 3, 378-379.

les expérimentations il y a encore un certain nombre de verrous technologiques à dépasser, entre autres réussir à créer des aérosols stables de nanoparticules et améliorer les techniques d'imagerie et de marquage.

La toxicologie des nanoparticules est donc dans un état de recherche en défrichage, au sens où les modèles permettant d'établir l'influence des paramètres sur la réactivité d'un nano-objet ne sont pas établis et que les protocoles expérimentaux ne sont pas standardisés. Ce qui signifie que pour Reach, le contenu méthodologique des analyses à mener reste à construire. On peut néanmoins s'appuyer sur l'expertise et la méthodologie développées dans le cadre des études sur la pollution atmosphérique et les poussières fines et ultra-fines. C'est donc sans surprise que l'INERIS, et notamment le département des risques chroniques dirigé par Philippe Hubert, se trouve en première ligne de l'étude de la toxicologie des nanoparticules.

Grenelle et la question de la traçabilité

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'Etat 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. Au-delà du problème de sémantique qui pousserait à étiqueter tous les produits contenant de l'électronique, la mise en œuvre du Grenelle risque de ne pas être efficace si elle n'est pas coordonnée à l'échelle internationale.

Vers une AIEA des nanos ?

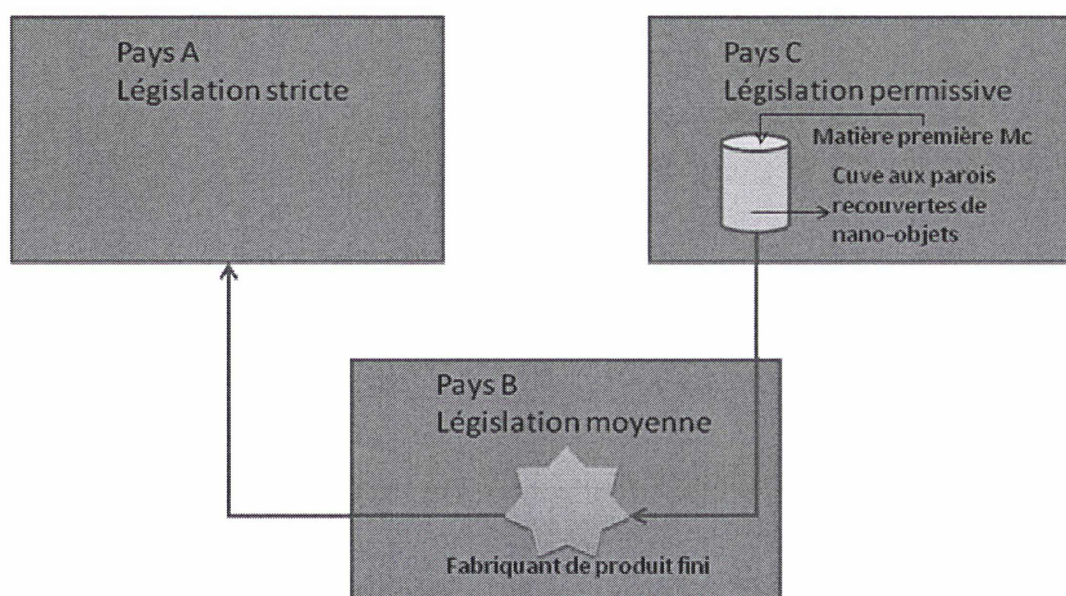
En matière de législation, la tendance européenne est très conservatrice comparée aux autres régions du monde, on accorde en Europe une plus grande importance à la précaution. Le fameux « principe de

précaution » est notamment perçu de façon très négative aux Etats-Unis, il incarne pour eux l'échec des OGM face à l'obscurantisme, ou comment se priver des bienfaits du progrès technique sans raison rationnelle¹⁶². Au-delà du problème philosophique de savoir si les Européens ont tort ou raison, nous prévoyons des problèmes dus au différentiel de législation.

En effet, on devine aisément la résultante si la France adopte une législation imposant aux industriels des protocoles contraignants, des tests de non-toxicité longs à réaliser, et une grande traçabilité alors que d'autres pays choisissent des législations beaucoup plus permissives. Les industriels vont délocaliser. A minima leurs installations de recherche et développement car le « coût de la précaution » est perçu comme particulièrement lourd s'il s'agit d'un nano-objet qui in fine ne sortira peut-être jamais du laboratoire. Mais éventuellement également la production pour économiser sur le « coût de protection des travailleurs » ou le « coût des réglementations environnementales » auquel s'ajoutera un gain sur le coût de la main d'œuvre. L'industrie pharmaceutique installée dans la région de Bhopal et continuant à polluer les eaux des rivières de manière scandaleuse en est un exemple. Cette configuration constitue un double échec : un échec sanitaire et un échec économique.

¹⁶² A ce sujet, on peut par exemple lire que « the European Union wants to eliminate all risks from daily life and replace science with speculation » (l'Union Européenne veut éliminer tous les risques de la vie quotidienne et remplacer la science par des spéculations) dans l'article *Precaution Is for Europeans* paru dans *The New York Times* le 18 Mai 2003.

La distorsion médiatique



Le différentiel de législations est une lacune dans la prévention des risques qui concerne également les pays où la législation est la plus stricte, ce que nous illustrons dans l'exemple fictif suivant. Prenons trois pays A, B et C avec des législations concernant la prévention des risques toxicologiques des nano-objets différentes : dans A elle est stricte, dans B elle est moyenne et dans C elle est permissive. Dans le pays C, un petit fournisseur collecte une matière première agro-alimentaire Mc qui est stockée dans une cuve. Cette cuve a une paroi recouverte de nano-objets qui lui donne la propriété d'être bactéricide. Le fournisseur n'a pas connaissance de la présence de ces nano-objets, qui de toute façon ne font pas l'objet d'une législation particulière dans le pays C. Or, des nano-objets sont relargués dans Mc lors du stockage. Le produit Mc est vendu à un client dans le pays B ; celui-ci l'utilise pour réaliser un produit fini qu'il vend notamment dans le pays A. La métrologie systématique des produits d'importation étant impossible car trop complexe et trop coûteuse, les consommateurs du pays A ingéreront des nano-objets malgré l'existence d'une législation sensée les protéger.

Enfin, les réglementations sont mises en défaut avec la globalisation du marché et la disparition de l'intermédiation du produit, via notamment les transactions sur internet qui échappe bien souvent à tout contrôle. Une illustration concrète nous est fournie par la cosmétique, dont le marché est mondial, mais dont les réglementations restent locales. En la matière l'Union Européenne est la région la plus stricte, et le secteur de la cosmétique est le premier secteur industriel à s'être doté d'une réglementation concernant les nanomatériaux depuis le 24 mars 2009. Cependant avec les ventes par internet, il est clair que le marché n'est pas contrôlé même sur le territoire européen.

Les différentiels de législation sont à l'origine de risques sanitaires, pour les pays aux législations plus permissives en premier lieu mais également pour les autres, et des risques économiques. S'il est utopique de souhaiter la création d'une agence en charge des nanotechnologies ayant une légitimité internationale, il convient néanmoins de remarquer que ces risques seront d'autant plus réduits qu'un grand nombre de pays adoptera des législations apportant un niveau de précaution équivalent. Une impulsion dans ce sens pourrait être donnée sous la forme de normes ISO, qui auraient l'avantage de déjà posséder une légitimité internationale.

Les filières involontaires et la question de la dissémination

Même si la traçabilité des nano-objets était entièrement maîtrisée sur toute la filière de production et de commercialisation, le dispositif du Grenelle pourrait rapidement être mis en défaut par les voies de dissémination involontaire au cours des cycles de vie des produits. En effet, le dispositif s'arrête à la mise sur le marché, mais ne prend pas en compte le devenir du produit. Le problème est particulièrement évident pour toute substance nano-composite liquide ou gazeuse, et il soulève des inquiétudes justifiées de la part d'ONG telles que ETC group,

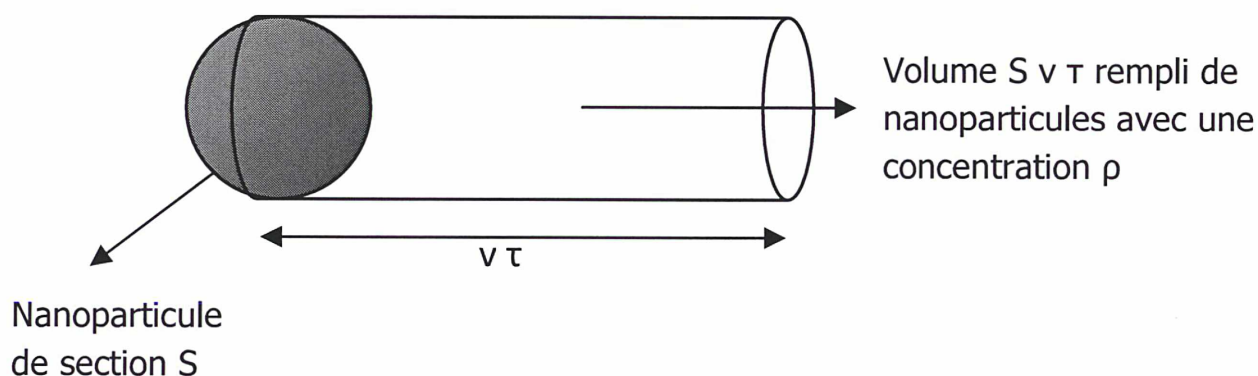
notamment sur toutes les applications potentielles dans le domaine phytosanitaire¹⁶³.

Mais le problème est également d'actualité en ce qui concerne les produits de beauté contenant des nanoparticules, notamment les crèmes solaires à haut degré de protection à base de nanoparticules de TiO_2 . Si en effet ces nanoparticules ne pénètrent pas la peau, elles sont bien dispersées dans l'eau de baignade (mer, rivière, piscine) et comme nous l'a confirmé la Febea (Fédération des Entreprises de la Beauté), aucune étude n'a été menée à ce jour sur le devenir de ces particules dans l'environnement. Ce problème de dispersion aqueuse est un véritable point d'achoppement

La question de la dissémination des nanoparticules dans l'environnement est un débat essentiel. On admet généralement l'idée que les nanoparticules sont instables et s'agrègent facilement, ce qui devrait minimiser leur impact dans l'environnement. L'agrégation des particules est en effet un mécanisme physique incontournable à haute densité de particule, et modifie le spectre granulométrique d'un nuage de particules dans le temps, et donc lorsqu'un nuage de particules se diffuse, également dans l'espace. Si un nuage de nanoparticules est produit en un point, par exemple par une activité mécanique d'usinage, la combinaison entre l'agrégation et la diffusion fera que statistiquement les particules « fines » disparaîtront au fur et à mesure qu'on s'éloigne du point d'émission au profit de particules plus grosses qui seront le résultat d'une accréation des petites particules. L'agrégation est d'autant plus forte que la densité de particules est importante, si bien que paradoxalement plus un nuage de nanoparticules est initialement dense, plus les nanoparticules au cours du temps s'agrègent en même temps qu'elles se diffusent, et moins on a de chance de rencontrer de petites nanoparticules.

¹⁶³ . **ETC Group.** *Down on the farm.*

On peut fournir une justification de ce phénomène à partir d'un modèle très fruste. Ce sont les « collisions » entre nanoparticules qui peu à peu produisent des agrégats de plus en plus gros, et donc réduisent le nombre de nanoparticules. Le nombre de collisions N subies par une nanoparticule de vitesse v et de surface S pendant une durée T dans un environnement où la concentration en nanoparticules ρ est grossièrement donné par la formule $N = \rho S v T$ (on néglige la vitesse et la surface des autres nanoparticules).



Pour un nombre de collisions N fixé (phénomène d'agrégation équivalent), on voit que le temps typique d'agrégation des nanoparticules T est proportionnel à l'inverse de la concentration $1/\rho$.

Le Comité de Prévention et de Précaution donne des valeurs chiffrées de ce phénomène :

« Pour donner un ordre de grandeur, pour des particules identiques, pour lesquelles le phénomène est le moins intense, il faut 33 minutes pour diviser par 2 la concentration numérique d'un aérosol ayant 10^6 particules/cm³, 20 secondes pour une concentration de 10^8 particules/cm³. Le spectre granulométrique d'un aérosol ultrafin ne peut être considéré comme stationnaire si la concentration numérique est trop élevée. En raison de ce phénomène de coagulation, du nombre élevé de particules dans l'aérosol atmosphérique (de 10^3 à 10^6 particules

par cm³), la présence dans l'environnement (en dehors des milieux de travail) de nanoparticules non fixées est peu probable »¹⁶⁴

Jean-Yves Bottero souligne de plus que les nanoparticules sont généralement très réactives et auront de fortes probabilités de « se coller » à d'autres matériaux :

« Ainsi ces nanoparticules peuvent transporter par unité de masse des quantités importantes de contaminants reconnus (Arsenic, pesticides, hydrocarbures volatiles, médicaments...). Néanmoins, si elles peuvent « porter » sur leur surface des quantités importantes de contaminants répertoriés, leur migration vers la ressource en eau, en particulier souterraine, semble extrêmement limitée. Si leur surface est réactive pour les contaminants connus elle l'est aussi pour les matériaux du sol et du sous-sol (argiles, quartz, calcaire... matières organiques). Les nanoparticules semblent vite bloquées dans leur transfert et restent dans le sol sans atteindre la nappe phréatique. »

On pourrait donc penser que les pollutions environnementales aux nanoparticules resteront donc extrêmement localisées. C'est sans compter sur les méthodes de fonctionnalisation et d'enrobage que les chimistes développent précisément dans le but de stabiliser les suspensions colloïdales de nanoparticules dans les solvants, méthodes qui sont typiquement nécessaires au développement de liquides nanocomposites et qui relancent donc la possibilité de dissémination étendue

L'autre enjeu de la traçabilité est la fin de vie des produits nanocomposites. D'une part dans leur dégradation : qu'advient-il des nano-objets lorsqu'on les incinère ? Jean-Marc Corpart d'ARKEMA nous a indiqué que les nanotubes de carbone se consumaient parfaitement vers 500°C sous oxygène, mais qu'en est-il des nanoparticules d'oxydes dont les températures de fusion sont beaucoup plus importantes ? D'autre part le recyclage des matériaux pose un véritable défi à la traçabilité car

¹⁶⁴ **Comité de Prévention et de Précaution. Nanotechnologies, nanoparticules. Quels dangers? Quels risques?** s.l. : MEEDDAT, 2006.

ils remettent en circulation des polymères contenant des nano-objets de manière non contrôlée.

La faille de la métrologie

Toutes ces fuites du système du Grenelle poseraient des problèmes limités si la réelle faille ne se trouvait dans les moyens de mesure. Car si on en vient à devoir contrôler les compositions des produits manufacturés, 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 est par conséquent un enjeu de tout premier plan à mettre d'urgence à l'ordre du jour.

Les appareils quantitatifs

Le rapport Nanosafe de Juin 2008^{165,166} s'intéresse aux nanoparticules en suspension dans l'air.

La sensibilité de la mesure est limitée par le bruit ambiant, constitué de l'ensemble des particules contenues dans l'air, naturelles ou d'origine anthropique. La figure ci-dessous donne quelques ordres de grandeur typiques du nombre de particules contenus dans des atmosphères plus ou moins purifiées : plus de 200 millions de particules en zone urbaine et encore 100 000 dans un bloc opératoire!

¹⁶⁵ **Nanosafe.** *Is it possible to easily measure the engineered nanoparticles at workplaces?* juin 2008.

¹⁶⁶ Recherches dans les domaines de la production et de l'utilisation sécurisées des nanomatériaux ; Applications aux nouvelles technologies de l'énergie. *Voyage de presse CEA Grenoble.* novembre 5, 2008.

Classe d'empoussièrement:
nombre de particules de 0.5 micron dans un cube de 33cm

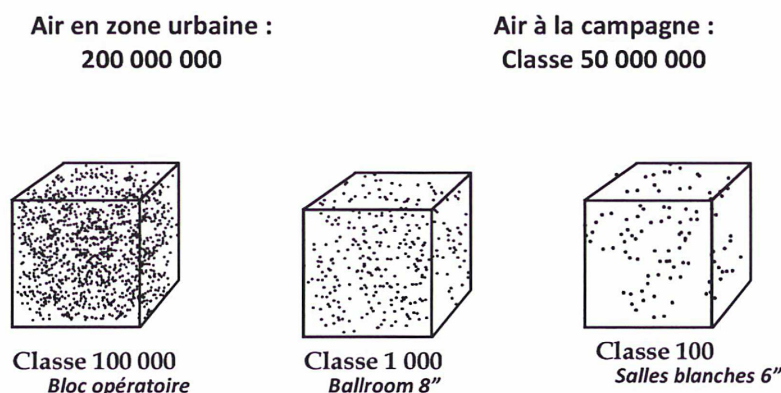


Figure 27 : Quelques ordres de grandeur du nombre de poussières contenues dans l'atmosphère pour différents milieux, mesuré par la classe d'empoussièrement. Typiquement il y a environ 100 000 poussières de 500nm par cube de 33cm pour l'air d'une salle de bloc opératoire, et les classes 1000 et 100 correspondent aux salles blanches des industries de semi-conducteurs. Source : Aspec (association pour la prévention et l'étude de la contamination)

Pour mesurer la quantité de particules dans l'air, plusieurs instruments sont à disposition sur le marché, mais donnent une mesure « globale » basée sur une grandeur physique^{167, 168}:

¹⁶⁷ **Comité de Prévention et de Précaution.** Nanotechnologies, nanoparticules. Quels dangers? Quels risques? s.l. : MEEDDAT, 2006.

¹⁶⁸ Recherches dans les domaines de la production et de l'utilisation sécurisées des nanomatériaux ; Applications aux nouvelles technologies de l'énergie. *Voyage de presse CEA Grenoble*. novembre 5, 2008.

La masse totale (microbalance)

La surface totale (mesure de la charge électrostatique totale)

Le nombre de particule (diffusion de la lumière)

Les mesures sont simples mais très difficiles à interpréter car elles ne donnent qu'une mesure quantitative globale. Il faut donc généralement étalonner la mesure par rapport à la nanoparticule recherchée, mesurer le bruit de fond, constamment vérifier les fluctuations du bruit de fond etc. De plus il est difficile de comparer les résultats des mesures fondées sur des techniques différentes. Les trois grandeurs, masse, surface et nombre ne privilégient en effet pas les mêmes fenêtres de particules.

Dans le cas d'un spectre étendu, la fonction de distribution en masse représente les plus grosses particules. Les particules les plus fines qui ont des masses négligeables, bien que leur nombre puisse être important, sont mal prises en compte. Au contraire, ce sont les particules les plus grosses qui ne sont pas prises en compte dans la mesure du nombre. La mesure de la surface prend mal en compte les deux extrémités du spectre, les plus fines et les plus grosses qui ont des parts relatives faibles dans la surface totale des particules.

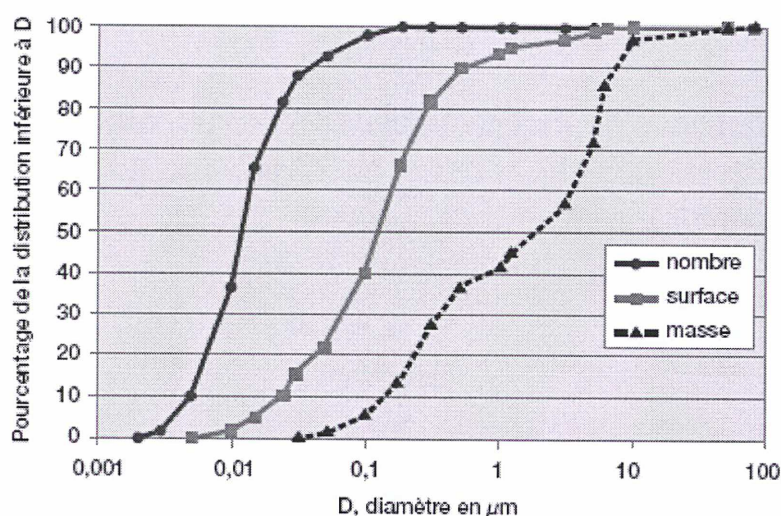


Figure 28 : Représentation du spectre granulométrique d'un même aérosol de type urbain avec des courbes cumulatives des fonctions de distribution en nombre, surface et masse.

Les prototypes qualitatifs

Une technique de mesure fait l'objet d'un programme de développement conjoint entre l'INERIS et le CEA et est basé sur la spectroscopie laser à plasma (LIPS, Laser Induced Plasma Spectroscopy). Un laser très énergétique bombarde la surface d'un matériau pour en sublimer et ioniser la matière qui émet alors un spectre d'émission que l'on peut analyser pour détecter les raies des constituants élémentaires. Selon Philippe Hubert, directeur du pôle risques chroniques de l'INERIS, cette méthode permettrait des analyses en temps réel. L'INERIS développe de plus un « nano-bench », banc d'essai pour mesurer le relargage de nano-objets par des matériaux nano-composites.

Plusieurs métrologues, parmi lesquels René Fillit, de l'Ecole des Mines de Saint-Etienne, et Philippe Hubert de l'INERIS, nous ont fait état de leur grande inquiétude sur le fait que le secteur industriel de la métrologie était quasiment inexistant en France. Si les grandes industries des matériaux avaient besoin d'instruments maintenant capables de voir et de mesurer à l'échelle submicronique, elles avaient le plus souvent recours aux compétences d'un laboratoire de recherche, soutenant au maximum une collaboration ou une thèse CIFRE pour construire un prototype adéquat, nous a confié René Fillit. Lui-même travaille sur les microscopes dans les rayons X et dans l'infra-rouge. Il n'y a que peu de transfert réel de technologie depuis les laboratoires jusqu'à l'industrialisation. Une des raisons principales est que peu d'industriels osent se lancer dans la production et la commercialisation d'instruments coûtant au moins 100 000 € pièce avant d'avoir des perspectives concrètes de marché et un carnet de commande rempli. On peut ajouter que le domaine de la métrologie n'est pas porté à son juste niveau en

matière de recherche fondamental, comme le montre le nombre de projets financés par l'ANR somme toute relativement modeste (

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Etudes théoriques	5	7	4	4	2
Nano-objets	10	6	8	5	5
Nano-composite	2	5	5	0	2
Nano-dispositifs	28	22	14	16	17
Autres structures nanométriques	17	18	8	11	2
Equipement	4	1	2	0	2
Métrologie	8	11	9	2	5

Année	2005	2006	2007	2008	2009
Chimie	7	10	9	9	5
Matériaux	7	9	6	6	1
Biologie/ médecine	12	9	5	2	4
Opto-électronique	34	32	22	14	10
Nano-mécanique	4	1	3	4	0
Toxicologie/ Impact sociétaux			3	2	1

Tableau 3).

Ce n'est pas le cas dans d'autres pays, beaucoup plus conscients du marché que peuvent représenter les appareils de mesures. Le fait que le Japon pilote le groupe de travail sur la normalisation de la mesure à l'ISO n'a rien d'anodin mais procède d'une logique commerciale, nous indique Benoit Croguennec de l'AFNOR. De même les anglo-saxons et les allemands ne sont pas en reste sur le marché de l'instrumentation et risquent de verrouiller très rapidement le marché. Or qui contrôle l'instrument de mesure contrôle la norme, souligne l'AFNOR.

Comme le fait remarquer Philippe Hubert de l'INERIS, si l'intendance ne suit pas Grenelle restera un vœu pieux. Il fait par là référence au cas des réglementations sur l'amiante qui demandaient aux entreprises du bâtiment de mesurer le taux d'amiante contenu dans l'air des maisons sans se poser la question de savoir comment une entreprise normale était en mesure de le faire.

Le confinement « safe and sustainable by design »

Le volontarisme du Grenelle et de Reach sont concrètement subordonnés au rythme des progrès en métrologie et en toxicologie, qui peuvent demander des années. Dans cette course contre la montre, les risques chroniques et les impacts de la pollution sur les écosystèmes seront les moins bien couverts. 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. Et comme l'explique Philippe Ball, il est impensable d'interdire strictement une substance parce qu'elle est toxique¹⁶⁹:

¹⁶⁹ **Ball, Phillip.** Nanotechnology in the firing line.
<http://nanotechweb.org/cws/article/indepth/18804>.

*"Yet every undergraduate chemistry lab in the country is stacked with lethal compounds: safe handling is part and parcel of chemical research. And the technological world is full of poisons: there is arsenic in every CD player"*¹⁷⁰.

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 » étudié par l'AFSSET et défendue avec succès par l'AFNOR à l'ISO, 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. La protection au travail est une préoccupation maintenant bien intégrée dans nos pays occidentaux. Arkema a mis en place une chaîne de production sur son site et sur celui de ses clients totalement hermétique pour les nanotubes de carbone. Les nanotubes sont de plus conditionnés en poudre de plusieurs centaines de microns (typiquement 400µm à 500µm pour le transport, afin d'éviter l'aspect pulvérulent d'une poudre de nanotubes.

Une telle démarche pourrait être étendue au design du produit, du berceau à la tombe, en analysant l'intégralité de son cycle de vie. L'étude du cycle de vie du produit a été bien intégrée par certaines entreprises. Par exemple Arkema étudie le relargage par abrasion de ses résines contenant des nanotubes de carbone.

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

¹⁷⁰ Alors tout laboratoire de chimie pour étudiant dans le pays est rempli de composants mortels : une manipulation sûre fait partie de la recherche en chimie. Et le monde technologique est plein de poisons : il y a de l'arsenic dans chaque lecteur de CD.

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 des « 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 TiO_2 , dont le facteur de dispersion est important.

De plus, d'un point de vue technique, la notion de confinement n'est pas extrêmement difficile à mettre en œuvre. Comme le souligne le Docteur Daniel Bloch, médecin du travail au CEA Grenoble¹⁷¹ (78):

« on ne sait pas grand-chose de leur toxicité, il n'est pas facile de les mesurer dans les ambiances de travail, mais les moyens techniques existent pour s'en protéger efficacement. »

« Contrairement à une idée largement répandue, un filtre à particules ne se comporte pas comme une passoire qui retiendrait les grosses particules et laisserait passer les petites. La théorie de la filtration établit en effet que l'efficacité d'un filtre est minimale aux alentours de 200-400 nanomètres et qu'elle augmente régulièrement à mesure que la dimension des particules diminue. Cette théorie est vérifiée par l'expérience depuis un certain temps jusqu'à des dimensions aussi petite que 20 nm. Très récemment, des recherches menées dans le cadre du programme européen NANOSAFE 2 (dont le CEA assure l'animation) ont apporté des résultats qui confirment que la théorie de la filtration reste vérifiée jusqu'à 5 nanomètres. Dans le cadre de ce programme, d'autres tests portant sur les équipements de protection cutanée donnent des indications sur les tenues et les gants les plus efficaces. »

Nous voyons donc comment le principe de confinement peut être mis en application avec des mesures techniques faciles à mettre en

¹⁷¹ **OMNT.** Etat de la recherche sur les effets des nanoparticules sur la santé et l'environnement. 2008.

œuvre malgré les lacunes en matière de toxicologie. A ce sujet, le rapport Nanosafe¹⁷² (82) donne des premières recommandations sur la protection à utiliser au travail en présence des nanoparticules.

¹⁷² First results for safe procedures for handling nanoparticles. octobre 2008.

Quelles institutions pour piloter ?

« 21st-Century acceptance model calls for technological innovations to be received on a voluntary basis where the perceptible usefulness of new technology products are balanced against associated risks that are shown to be manageable. »^{173,174}

Les risques ne peuvent pas être appréciés en faisant abstraction des bienfaits. Nous devons statuer sur les applications des nanotechnologies au cas à 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. Déterminer les bénéfices des nanotechnologies est un acte politique en soi, comme le souligne Brice Laurent, chercheur en sociologie à l'Ecole des Mines. Il travaille notamment sur les modes de participation citoyenne dans le cadre des nanotechnologies et du débat public qui s'organise à leur sujet fin 2009.

Les processus classiques des choix technologiques sont remis en cause, nous l'avons vu au chapitre I, notamment à cause des scandales de l'amiante et des OGM. Les nanotechnologies font l'objet d'une expérimentation inédite dans laquelle les pouvoirs

¹⁷³ **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*,. s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003.

¹⁷⁴ Le modèle d'acceptation du 21^{ème} siècle commande que les innovations technologiques soient reçues sur des bases volontaires où l'utilité perceptible des produits de nouvelles technologies sont mis en balance avec les risques associés dont on sait qu'ils sont gérables.

publics cherchent de nouvelles formes institutionnelles pour orienter leur développement.

Quel modèle de participation citoyenne ?

Comme le montre Brice Laurent dans son étude du cas grenoblois¹⁷⁵, le recours au débat public n'est pas un processus simple. L'appel à la participation peut être construit de façon différente par différents acteurs. Il distingue trois grands modèles de débat :

La conférence pédagogique : les scientifiques experts et compétents, convaincus d'agir pour le bien de l'humanité, viennent éclairer l'homme de la rue des bienfaits de leurs recherches. Le débat public sert à rassurer et à convaincre le citoyen qui reste complètement passif.

La simulation de démocratie : le débat public est une simagrée de démocratie pour donner un semblant de légitimité à la décision des puissants et des chercheurs, ignorant en réalité les préoccupations des citoyens. Y participer serait se compromettre et le rôle du citoyen est alors de proposer une critique sociale indépendante des discussions organisées.

Le développement constructif : chercheurs, industriels, autorités, ONG et simples citoyens analysent les projets et confrontent leurs points de vue pour construire une « orientation citoyenne de la science et du développement industriel »

¹⁷⁵ **Laurent, Brice.** Engaging the public in nanotechnology? Three visions of public engagement. *presented at Center for Nanotechnology in society. University of California.* Juillet 16, 2007.

C'est à l'évidence le troisième modèle qu'il faudrait tenter d'établir. Reste à savoir comment organiser la table ronde, qui inviter et quels pouvoirs conférer. Voici quelques modèles actuellement testés.

Le Grenelle, ou la négociation entre lobbies

De nombreuses ONG telles que Fondations Sciences Citoyennes, Vivagora, Greenpeace ou encore France Nature Environnement, réclament de pouvoir entrer à la table de négociation des choix technologiques et industriels, qui étaient réservées auparavant aux acteurs économiques, aux pouvoirs publics et aux experts scientifiques. Le Grenelle de l'environnement comme le débat public essaie de répondre à leurs revendications, en conviant également les collectivités locales et les syndicats. Ce partage de la gouvernance marque certainement un tournant à l'anglo-saxonne avec la reconnaissance du poids des lobbies ; pour certains il permettrait une légitimité et une transparence aux yeux des citoyens que les parlementaires auraient perdues. Néanmoins le nostalgique de la cité athénienne pourra rester sur sa faim quant à la représentativité démocratique d'une telle assemblée élitiste et lobbyiste. De plus les négociations comme le Grenelle de l'environnement ne remplissent pas de rôle pédagogique.

Nanoforum, prémisse du débat public

Nanoforum a été lancé à l'instigation de la direction générale de la santé et préfigure le débat public en s'inscrivant de manière encore plus marquée dans l'implication du citoyen. Comme l'analyse Dab et al.¹⁷⁶:

¹⁷⁶ **Dab et al.** Risques et bénéfices des nanotechnologies : le besoin de nouvelles formes de débat social, Premier bilan du « Nanoforum » du CNAM. 2009.

« Le fait de s'appuyer sur des formes innovantes de participation de la société civile, qui soient susceptibles de contribuer à fonder la confiance des différents acteurs concernés, peut véritablement contribuer au renouvellement des formes traditionnelles de participation et de débat public en matière santé environnementale. »

Cependant Nanoforum n'a aucun pouvoir, pas même de recommandation :

« d'une part, expérimenter un lieu permanent de débat sur les risques et les bénéfices attendus des nanotechnologies, d'autre part, ne pas faire du Nanoforum un processus aboutissant à des recommandations ; plusieurs participants étant d'avis que la problématique était bien trop jeune et les incertitudes bien trop grandes pour qu'une démarche participative puisse aboutir à une position construite. »

Les arguments avancés par Nanoforum pour se défaire d'une responsabilité de recommandation sont tout de même troublants, puisqu'ils sont également valables pour le débat public. En définitive les pouvoirs publics se retrouveraient de nouveaux seuls face à leurs responsabilités et leurs incertitudes ?

La convention citoyenne, pouvoir total aux citoyens

Fondation Sciences Citoyennes va plus loin et propose « une convention de citoyen »^{177, 178}:

« Il s'agissait donc de construire, à partir des savoirs juridique et sociologique sur les expériences de participation, une méthodologie pour que des gens ordinaires puissent faire valoir leurs opinions auprès des élus afin que, armés de cet outil, ceux-ci puissent apprécier toutes les facettes d'une innovation avant d'en promouvoir l'usage.

*Il est utopique de croire que tous les citoyens souhaitent ou puissent accéder pleinement à une information de qualité sur les innovations. Nous avons défini un cadre procédural pour aider au choix libre et éclairé d'un groupe de citoyens, choisis selon une méthode rigoureuse et transparente, et pour que leurs orientations soient exprimées dans les meilleures conditions possibles quant à la qualité de l'information reçue (objective, complète...) et à celle de la réflexion (maturation des savoirs, échanges, ...). On se devait de décrire la procédure dite de convention de citoyens assez précisément pour fournir les principes de son encadrement mais sans rigidité pour ménager son évolution et son adaptation à des contextes variés. La convention de citoyens combine une **formation préalable** (où les citoyens étudient) avec une **intervention active** (où les citoyens interrogent) et un **positionnement collectif** (où les citoyens discutent en interne puis avisent). »*

Cette sorte de « tribunal pour technologie » va jusqu'au bout du concept de la souveraineté du peuple et de son unité (tout

¹⁷⁷ **Fondation Sciences Citoyennes.** Recherche et innovation : pour une évaluation par les citoyens. *ECOREV*, 783. mai 29, 2008.

¹⁷⁸ Survivre aux nanotechnologies ? Giga-questions, nano-visions et citoyenneté. *Note n°3*.

comme les jurés d'une cour d'assises) puisqu'elle délègue le pouvoir législatif à une assemblée de citoyens pris au hasard. Cette convention de citoyens propose de plus un modèle profondément anti-élitiste, pour s'abstraire du modèle lobbyiste.

une institution centralisatrice et exécutive

En dehors d'une éventuelle participation citoyenne en consultation ou en légalisation effective sur les options à prendre au sujet des applications des nanotechnologies, se pose la question de la création d'un organisme « spécial nano ». Alain Fontaine, de C'Nano¹⁷⁹, a souligné lors des conférences micro nano technologies de février 2009 cette nécessité de convergence d'organismes d'horizons différents pour se coordonner. Le besoin d'une instance centralisatrice se fait notamment sentir en toxicologie, car les programmes se multiplient dans le domaine mais d'une façon peu coordonnée. Actuellement c'est l'OCDE qui a pris l'initiative de partager l'effort entre les différentes nations participantes et de collecter les données. La France par exemple s'est déclarée volontaire pour les nanoparticules de silice et d'oxyde de titane, tandis que le Royaume-Uni s'est engagé sur les nanoparticules de cérium.

De surcroît cette institution devrait pouvoir être dotée des moyens nécessaires pour exécuter et contrôler les décisions en matière d'autorisations ou d'interdiction de nano-objet. Elle devrait donc pouvoir développer des instituts de nano-métrie.

¹⁷⁹ Centres de compétences régionaux destinés à structurer la recherche fondamentale en nanosciences. Ils ont pour rôle de fédérer et d'animer la communauté de la recherche fondamentale en nanosciences dans une zone géographique donnée par différentes actions : définir des priorités, coordonner les actions des laboratoires, faciliter leur accès aux infrastructures, organiser de rencontres scientifiques, former, communiquer au grand public.

Il faudrait donc trouver un organisme présentant les critères suivants :

Transversalité et centralisation des données, si possible à l'échelle internationale

Réactivité face à un domaine en pleine effervescence

Légitimité aux yeux du citoyen, transparence

Capacité de réglementation et de contrôle

Les instances de normalisations ?

Comme le souligne Benoît Croguennec de l'AFNOR, le pouvoir normatif est capable d'instaurer des barrières de protection complémentaires et parfois même plus efficaces que des brevets et ce à des échelles internationales. En l'absence de réglementation, c'est la norme qui définit le cadre du développement d'un secteur économique. L'importance stratégique de la normalisation a été bien comprise par l'ensemble des acteurs, et si les travaux normatifs de l'ISO (International Standard Organisation) se font sur la base du volontariat, ils sont loin d'être dénués d'enjeux politique, comme nous l'a confié Benoît Croguennec. Ainsi le comité technique ISO/TC 229 relatif aux nanotechnologies est présidé par le Royaume Uni et regroupe quatre groupe de travail dont l'animation a été attribuée de manière politique par zone géographique : « terminologie et nomenclature » pour les canadiens, « mesurage et caractérisation » pour les Japonais, « santé, sécurité et environnement » pour les Américains et « spécifications des matériaux » pour les Chinois. L'ISO apparaît actuellement être quasiment la seule instance de concertation internationale sur les nanotechnologies. Il se trouve que le comité européen de normalisation (CEN) a créé un comité technique (CEN/TC 352) sur les nanotechnologies en 2005, dans un

contexte de collaboration avec l'ISO (accord de Vienne), pour permettre la reprise des normes développées, ce qui signifie, conformément aux accords européens, la transposition à l'identique des normes en normes européennes nationales, notamment française. Le CEN/TC 352 travaille de plus en concertation avec la commission européenne pour l'adéquation des normes issues de l'ISO et du CEN avec la réglementation communautaire. Malgré son mode de législation transnational peu commun (il ne passe pas par l'autorité étatique) les institutions de normalisation ont une incidence non négligeable sur la réalité industrielle. Cependant elles ne sont pas représentatives de tous les acteurs de la société, car les consommateurs, même si ils sont en droit de participer aux commissions de normalisation et sont consultés par l'AFNOR, sont rarement représentés à l'ISO. Par conséquent, les normes sont essentiellement faites par les industriels et les pouvoirs publics.

Une autorité administrative indépendante ?

A l'instar d'autres problématiques comme l'énergie nucléaire ou la protection des libertés individuelles, les nanotechnologies se prêtent mal à être traitées directement par l'administration classique. En effet, l'administration a peu d'indépendance face au pouvoir politique, a une lenteur de fonctionnement inhérente à sa structure, et manque de transparence et de légitimité dans son dialogue avec les citoyens ou les groupements d'intérêts. On peut donc prévoir qu'elle aura du mal à imposer des mesures préventives quand les pouvoirs politiques verront dans les nanotechnologies un formidable potentiel économique, que ses réactions arriveront tardivement alors que les nanotechnologies sont en pleine effervescence et apportent des nouveautés chaque année, et qu'elle sera toujours perçue par les citoyens comme étant de mèche avec le pouvoir politique, et donc indigne de confiance.

Dans le cas de l'énergie nucléaire ou de la protection des libertés individuelles, la réponse qui a été apportée sont la création d'Autorités Administratives Indépendantes (AAI), qui selon le Conseil d'Etat sont des « organismes administratifs qui agissent au nom de l'État et disposent d'un réel pouvoir, sans pour autant relever de l'autorité du gouvernement ». Cette structure nous semble présenter des avantages dans le cas des nanotechnologies. Une assemblée collégiale avec des membres provenant de divers horizons (chercheurs, industriels, représentants d'ONG, parlementaires, conseillers d'Etat, etc.) lui assurerait la légitimité auprès de tous et les compétences transversales pour pouvoir intervenir, l'indépendance permettant une rapidité d'action.

Une instance de consultation ?

D'autres réponses ont été imaginées. Dans le rapport conjoint de l'Académie des Sciences et l'Académie des Technologies est encouragée la création d'une « *Agence Nationale des Nanosciences et Nanotechnologies – appelons-la A3N – qui jouerait un peu le même rôle que l'IN2P3 pour la physique nucléaire et la physique des particules.* »

La justification est que cette structure serait

*« la seule capable (...) de faire émerger une réelle complicité entre disciplines toujours rivales, seule capable de réaliser des investissements importants bien ciblés. »*¹⁸⁰

Le Conseil Economique et Social propose lui de laisser l'opportunité des actions au pouvoir politique, mais de créer un observatoire européen afin de fournir à ces derniers des

¹⁸⁰ **Académie des sciences et Académie des technologies.**
Nanosciences Nanotechnologies. avril 2004.

informations fiables sur lesquelles ils puissent baser leurs décisions¹⁸¹.

Un Haut Comité aux Nanotechnologies, à l'instar du Comité Consultatif National d'Éthique pour les Sciences de la Vie et de la Santé, pourrait être créé avec un rôle consultatif, afin de réfléchir et de proposer des solutions aux problèmes éthiques posés par les nanotechnologies car « *contrôler les conséquences des avancées de la science et de la technologie est une responsabilité qui engage la société dans son ensemble, et qui ne peut pas être simplement laissée aux seuls acteurs économiques ou associatifs* »¹⁸², ou scientifiques. Il pourrait être consulté par saisine de différents organismes ou institutions gouvernementales, ou par auto-saisine.

L'Agence Européenne des Produits Chimiques (ECHA pour European Chemicals Agency) peut naturellement obtenir une légitimité pour intervenir à l'échelle de l'Union Européenne sur les problèmes toxicologiques et écotoxicologiques posés par les nanomatériaux. En effet, l'ECHA est une agence communautaire créée en 2006 dont le rôle est notamment : de gérer les procédures d'enregistrement, d'évaluation, d'autorisation et de restriction relatives aux substances chimiques, afin d'assurer la cohérence au niveau de l'Union européenne ; de fournir aux États membres et aux institutions de la Communauté les meilleurs conseils techniques et scientifiques possibles sur les questions relatives aux produits chimiques relevant du règlement REACH ; de mettre à la disposition du public des informations sur les produits chimiques. S'il est décidé d'étendre ses compétences pour les produits chimiques aux nanomatériaux, elle pourra agir à

¹⁸¹ **Conseil Economique et Social.** *Les Nanotechnologies.* 2008.

¹⁸² **Comité Consultatif National d'Éthique pour les Sciences de la Vie et de la Santé.** *Questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé.* 2007

l'échelle de l'Union Européenne, évitant ainsi partiellement les inconvénients d'une action à l'échelle nationale développés au chapitre précédent.

Quelle que soit la solution retenue, il est essentiel que les décideurs puissent s'appuyer sur un collège d'experts complémentaires et de représentants de la société civile. Les nanotechnologies sont un vaste domaine qui regroupe des technologies totalement différentes dont la compréhension ne peut pas être le fait d'une seule personne. Les nanotechnologies ont des enjeux considérables et parfois contradictoires, notamment pour l'économie et la santé publique, et il est important que les décisions ne soient pas le fait de l'influence d'un seul lobby.

Il est indispensable de développer une métrologie opérationnelle, pour pouvoir facilement, à grande échelle et à faible coût détecter les nano-objets, les identifier et les quantifier. En effet, quel que soit le processus retenu pour établir une législation, celle-ci ne deviendra effective que lorsqu'il sera possible d'effectuer des contrôles pour pouvoir déceler les infractions et les sanctionner. Le développement de la métrologie est donc une priorité, et des moyens en conséquence doivent lui être alloués.

Remerciements

Nous tenons ici à remercier sincèrement et chaleureusement notre pilote de mémoire, le Professeur Claude Riveline, qui nous a suivis toute cette année avec une grande attention et un infini dévouement, nous avons beaucoup apprécié sa disponibilité et sa réactivité. Il a notablement contribué à améliorer la qualité de notre travail. Les conseils qu'il nous a prodigués nous ont non seulement servi pour ce mémoire mais nous seront encore très utiles dans la suite de notre carrière.

Nous remercions également la direction des Corps Techniques de l'Etat et l'Ecole des Mines grâce à qui nous avons pu nous intéresser à ce sujet au cours de cette année. Nous souhaitons aussi remercier tout particulièrement Jean-Marc Grognet de la DGCIS et Michèle Rousseau du MEEDDAT qui nous ont indiqué des voies intéressantes à explorer, qui nous ont guidés dans nos recherches et nous ont aidés à rencontrer des acteurs importants des nanotechnologies.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui ont accepté de nous consacrer un peu de leur temps, d'échanger avec nous et de nous faire profiter de leur expertise sur notre sujet pendant notre période d'investigation, ainsi que celles qui nous ont fait parvenir leurs commentaires sur la note de dix pages que nous avons rédigée courant mars 2009 ou qui se sont déplacées pour notre soutenance, et dont la liste figure ci-dessous.

Alain Costes directeur du LAAS de 1984 à 1996, missionné
par N. Sarkozy pour le développement des
nanotechnologies au pôle de Toulouse

La distorsion médiatique

Alexei Grinbaum	chercheur au laboratoire de recherche sur les sciences de la matière du CEA
Anne Dux	directrice des Affaires Scientifiques et Réglementaires de la FEBEA
Aurélié Bray	chef de la division développement industriel et technologique à la DRIRE Midi-Pyrénées
Benoit Croguennec	chef de projet nanotechnologies à l'AFNOR
Bernadette Bensaude-Vincent	professeur en histoire et philosophie des sciences, membre du comité d'éthique du CNRS et présidente de Vivagora
Bernard Dubuisson	conseiller scientifique du DGA
Brice Laurent	ingénieur des mines en thèse sur la participation du public dans les nanotechnologies comme problème politique.
Christian Collette	directeur de la recherche chez ARKEMA
Christian Desmoulins	président du directoire d'Actia Group
Claire Tutenuit	déléguée générale d'Entreprises pour l'Environnement
Claude Imauven	directeur général adjoint du pôle produits pour la construction à Saint-Gobain
Claudine Picard	Directeur Scientifique du site Sanofi-Aventis R&D de Toulouse
Daniel Bloch	médecin du travail au CEA
Daniel Marzin	directeur du laboratoire de toxicologie de l'Institut Pasteur de Lille
Denis Blanc	directeur général de Freescale France
Denis Bortzmezyer	directeur des partenariats, division R&D chez ARKEMA
Didier Roux	directeur de la R&D et de l'innovation chez Saint-Gobain

François Tardif	co-directeur du projet Nanosafe 2
Françoise Roure	présidente de section au CGIET et vice-présidente du groupe de travail sur la nanotechnologie de l'OCDE
Frédéric Hannoyer	directeur de recherche chez STMicroelectronics
Frédéric Schuster	coordinateur pour Nanosafe 2
Frédéric Taran	Chef du laboratoire de marquage au carbone 14 - chercheur en nanotoxicologie au CEA
Hubert Virlet	adjoint au chef de la division développement industriel et technologique à la DRIRE Rhône-Alpes
Jacques Janssens	Directeur administratif du site Sanofi-Aventis R&D de Toulouse
Jacques Lukasik	directeur scientifique chez Lafarge
Jacques Testart	président de Fondation Sciences Citoyennes et père du bébé éprouvette
Jean Therme	directeur de la Recherche Technologique au CEA, directeur du CEA de Grenoble, membre de l'Académie des Technologies
Jean-Eric Wegrowe	co-directeur de Nanodimension, professeur chargé de cours à l'Ecole Polytechnique et chercheur au LSI
Jean-Marc Corpart	directeur du Département Nanotubes de carbone chez Arkema
Jean-Marc Grognet	sous-directeur industrie de la santé, de la chimie et des nouveaux matériaux à la DGCIS
Jean-Pierre Dupuy	philosophe et professeur à l'Ecole Polytechnique et à l'université de Stanford, membre de l'Académie des Technologies
Jean-Yves Bottero	directeur du Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences et de

La distorsion médiatique

l'Environnement

Kai Schierholz	directeur technique de Nanoledge
Laurent Gouzènes	directeur de programme de recherche à ST Microelectronics et ancien responsable de P3N (programme Nanosciences, Nanotechnologies Nanosystèmes)
Marie-Christine Blandin	Sénatrice membre de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
Martin Guespereau	directeur général de l'AFSSET
Michel Callon	professeur de sociologie à l'Ecole des Mines
Michèle Rousseau	directrice, adjointe au commissaire général du MEEDDAT
Nicholas Deliyankis	physicien et membre de "Nano- & Converging Sciences and Technologies" de la Commission Européenne
Odile Gauthier	directrice de l'eau et de la biodiversité au MEEDDAT
Olivier Peyrat	directeur général de l'AFNOR
Pablo Libreros	ancien chef du bureau des substances et préparations chimiques au MEEDDAT
Pascal Maigné	responsable du domaine scientifique « Micro et Nano Electronique » à la DGA
Pat Mooney	président de l'ETC group
Patrick Fridenson	directeur d'études à l'EHESS, spécialiste de l'histoire des entreprises et du travail dans les pays développés
Philippe Chemin	direction générale de la prévention des risques au MEEDDAT
Philippe Hubert	directeur des risques chroniques à l'INERIS

Philippe Malbranche	directeur adjoint du programme énergie solaire au CEA
Philippe Masclet	responsable du domaine scientifique Matériaux et Chimie à la DGA
Pierre Couveinhes	ingénieur général des mines
Rémy Maximilien	médecin et toxicologue au CEA
René Fillit	chercheur à l'Ecole des Mines de Saint-Etienne
Stéphane Renard	président du Club Nano-Micro technologies
Xavier Boutin	SAGEM, vice-président du club Nano-micro Technologies

Bibliographie

1. **Feynman, Richard.** There is plenty of room at the bottom. *www.its.caltech.edu*. [Online] 1959.
<http://www.its.caltech.edu/~feynman/plenty.html>.
2. **Crommie et al.** Confinement of Electrons to Quantum Corrals on a Metals Surface. *Science*. 1993.
3. **Drexler, Eric.** *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology*. 1986.
4. **Crichton, Michael.** *Prey*. 2002.
5. **Wikipedia.** transhumanism. [Online]
<http://en.wikipedia.org/wiki/Transhumanism>.
6. **Dupuy, Jean-Pierre.** *Quand les technologies convergeront*.

7. **Roco and Bainbridge.** *Converging Technologies for Improving Human Performance.* s.l. : NSF, Juin 2002.
8. **NNI.** <http://www.nano.gov/html/facts/whatIsNano.html>.
www.nano.gov. [Online]
9. **NNI budget.** *National nanotechnology Initiative FY 2009 Budget & highlights.* 2009.
10. **Klein, Etienne, Grinbaum, Alexei and Bontems, Vincent.** *Les débat sur les nanosciences : enjeux pour le CEA.* s.l. : DSM-LARSIM, 2007.
11. **Cientifica.** *The Nanotechnology Opportunity Report.* s.l. : Cientifica, June 2008.
12. —. *Where has my Money gone? Government Nanotechnology funding and the \$18 billion pair of pants.* s.l. : Cientifica, January 2006.
13. **Roco, M.C.** *Government Nanotechnology Funding: An International Outlook .* s.l. : National Science Foundation, June 2003.
14. **Ball, Phillip.** Nanotechnology in the firing line. [Online]
<http://nanotechweb.org/cws/article/indepth/18804>.
15. **PMO.** Rendez-nous notre objet d'aliénation favori ! Ou pourquoi la technologie est le problème. .
<http://www.piecesetmaindoeuvre.com>. [Online]

16. **Fondation Sciences Citoyennes.** Recherche et innovation : pour une évaluation par les citoyens. *ECOREV*, 783. mai 29, 2008.
17. —. Survivre aux nanotechnologies ? Giga-questions, nano-visions et citoyenneté. *Note n°3*.
18. **Greenpeace.** *Future Technologies, Today's Choices*,. s.l. : Alexander Huw Arnall, 2003.
19. **Schulenburg, Mathias.** *La nanotechnologie L'innovation pour le monde de demain*. s.l. : Commission Européenne, DG Recherche, 2004.
20. **Boutin, Xavier.** micro et nanotechnologies à SAGEM. *club micro-nanotechnologies*. [Online]
<http://www.clubnano.asso.fr/regions/sagem/index.html>.
21. **Olmix.** amadéite. *Olmix*. [Online]
<http://www.olmix.com/fr/spip.php?article12>.
22. **Académie des sciences et Académie des technologies.** *Nanosciences Nanotechnologies*. avril 2004.
23. *Who is winning the global nanorace?* **Hullmann, Angela.** 2006, *Nature Nanotechnology* 1, pp. 81-83.
24. **Les Echos.** « Les nanotechnologies déjà condamnées ? ». *Les Echos*. 2006.
25. **Venzal, Martin and Aguilar, Michel.** Toulouse pépinière des nanotechnologies. *La dépêche du Midi*. 29/03/2005, pp.

<http://lpcno.insa-toulouse.fr/npds/modules/lpcno/Presse/Nanomeps.htm>.

26. Opposition Grenobloise aux Nécrotechnologies.

Minatech : qui arrêtera le progrès ? *rebellyon.info*. [Online] mars 22, 2007. <http://rebellyon.info/article3357.html>.

27. Comité Consultatif National d’Ethique pour les Sciences de la Vie et de la Santé. *Questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé*. 2007.

28. Electronic and transport properties of nanotubes. **al, Charlier et.** April-June 2007, *Reviews of modern physics* 79.

29. ISO/TS 27687:2008(E). *Nanotechnologies - Terminology and definitions for nano-objets - Nanoparticles, nanofibre and nanoplate*. 2008.

30. AFNOR. Nanotechnologies : la normalisation voit les choses en grand. *ENJEUX*.

31. ARKEMA. *Graphistrength*. [Online] 2009. <http://www.graphistrength.com/>.

32. Derycke et al. Carbon nanotube electronics.

33. nanotechproject.

<http://www.nanotechproject.org/inventories/consumer/>.
<http://www.nanotechproject.org/>. [Online] 2008.

34. Trouble in nanoland. **The Economist**. 5 décembre 2002.

35. **McWilliams, Andrew.** *NAN031B.* s.l. : BCC research, July 2006.

36. **CEA-ALCIMED.** *Nanotechnologies : prospective sur la menace et les opportunités au service du combattant,* Avril 2004. avril 2004.

37. **Weiss.** For Science, Nanotech Poses Big Unknowns. *Washington post.* 1er Février 2004.

38. **Quenez, Nicolas.** <http://www.bulletins-electroniques.com/actualites/58906.htm>. *www.bulletins-electroniques.com.* [Online] mai 05, 2009.

39. **AFSSA.** *Nanotechnologie et nanoparticules dans l'alimentation humaine et animale.* mars 2009.

40. **ETC Group.** *Down on the farm.*

41. **Joseph, Tiju and Morrison, Mark.** *Nanotechnology in Agriculture and Food.* s.l. : Institute of Nanotechnology, May 2006.

42. **Miller and Kinnear.** Les amis de la terre. [Online] 11 08, 2008.
<http://www.mondialisation.ca/index.php?context=va&aid=10824>).

43. **Conseil Economique et Social.** *Les Nanotechnologies.* 2008.

44. **Grognat, Jean-Marc.** Nanotechnologies : des sciences de l'information à la pharmacologie. *Thérapie*. 2008, Vol. 63 , 1.
45. **Couvreux, P and Vauthier, C.** Nanotechnology: intelligent design to treat complex disease. *Pharm Res*. 2006, Vol. 23 (7), 1417-1450.
46. **Perrier, Jean-Jacques.**
<http://www.vivantinfo.com/index.php?id=151>.
www.vivantinfo.com. [Online] 11 23, 2006.
47. **nanobiotix.** <http://www.nanobiotix.com/>. [Online]
48. **magforce.** <http://www.magforce.de/>. [Online]
49. **LaVan, D., MacGuire, T. and Langer, R.** Small scale systems for in-vivo drug delivery. *Nature Biotechnology*. 2003, Vol. 21/10, 1171-1178.
50. **Santini, JT, Cima, ML and Langer, R.** A controlled-release microchip . *Nature*. 1999, Vol. 397 (6717), 335-8.
51. **Shirow, Masamune.** *Ghost in Shell*. 1989.
52. **Bouaziz, Franck.** jeudi 22 janvier 2009, Le nouvel Economiste n°1490.
53. **The Guardian.** Brave new world or miniature menace? Why Charles fears grey goo nightmare. 29 avril 2003.
54. **ETC Group.** *The Big Down*. Janvier 2003.

55. **Smalley, Richard E.** Of Chemistry, Love and Nanobots. *Scientific American*. 2001, pp. 76-77.
56. **Magnanti, Thomas L.** Army selects MIT for \$50 million institute to use nanomaterials to clothe, equip soldiers. *MIT*. [Online] mars 2002.
<http://web.mit.edu/newsoffice/2002/isn.html>.
57. **Lorrain, JL and Raoul, D.** Nanosciences et progrès médical, Enquête de l'OPECST. *senat*. [Online] 2004.
<http://www.senat.fr/rap/r03-293/r03-2093.html>.
58. **Jensen et al.** Nanotube Radio. *Nano Letters* 7 (11). 2007, pp. 3508-3511.
59. **Sailor, M.J. and Link, J.R.** "Smart dust": nanostructured devices in a grain of sand. *Chemical Communications*. vol. 11 2005, p. 1375.
60. **Durieux, Chef d'escadron.** Vertige de l'infiniment petit: enjeux des nanotechnologies.
61. **Pace, Scott.** *Military Implications of Nanotechnology*. s.l. : Foresight Institute, 1989.
62. **Gsponer, André.** From the Lab to the Battlefield? Nanotechnology and Fourth-Generation Nuclear Weapons. *Disarmament Diplomacy*. Novembre 2002.
63. **44 ONG signataires.** *Principles for the Oversight of Nanotechnologies and Nanomaterials*. 2007.

64. **Lucas, Caroline.** We must not be blinded by science. *The Guardian*. 12 juin 2003.
65. **AFNET.** <http://www.afnet.fr/home.html>. [Online]
http://www.afnet.fr:8080/afnet/portail/news/06_off-shore/384_off.
66. **Chiu-Wing Lam, John T. James, Richard McCluskey, and Robert L. Hunter.** Pulmonary Toxicity of Single-Wall Carbon Nanotubes in Mice 7 and 90 Days. *Oxford Journals*.
Septembre 26, 2003.
67. **C.A. Poland et al.** Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study. *nature nanotechnology*. July 2008, Vol. 3, 423-428.
68. **Kane, Agnes and Hurt, Robert.** The asbestos analogy revisited. *nature nanotechnology*. July 2008, Vol. 3, 378-379.
69. **Oberdörster et al.** translocation of inhaled ultrafine particles to the brain. *Inhal Toxicology*. 16, 2004 June, Vols. (6-7), 437-445.
70. **Elder et al.** translocation of inhaled ultrafine manganese oxide particles to the central nervous system. *Environ Health Perspect.* 114, 2006 August, Vol. 8, 1172-1178.
71. **Colvin, Vicky.** *Responsible Nanotechnology: Looking Beyond the Good News*. s.l. : U.S. Department of Energy, 2002.

72. **UK Economic and Social Research Council.** *The Social and Economic Challenges of Nanotechnology.* 2004.

73. **AFSSET.** *Les nanomatériaux, Sécurité au travail.* 2008.

74. **Comité de Prévention et de Précaution.**
Nanotechnologies, nanoparticules. Quels dangers? Quels risques? s.l. : MEEDDAT, 2006.

75. **Hervé-Bazin, Benoît and Ambroise, Denis.** *Les nanoparticules: Un enjeu majeur pour la santé au travail ?*
s.l. : Institut national de sécurité pour la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles, 2007.

76. **Larousserie, David.** Quatre questions sur les nanotechnologies. *Sciences et Avenir.* Avril 2007.

77. **Nanowerk.** Does coating nanoparticles make them safe(r) for cosmetics? *nanowerk.* [Online] octobre 30, 2007.

78. **OMNT.** *Etat de la recherche sur les effets des nanoparticules sur la santé et l'environnement.* 2008.

79. **Comité de Prévention et de Précaution.**
Nanotechnologies, nanoparticules. Quels dangers? Quels risques? s.l. : MEEDDAT, 2006.

80. **Nanosafe.** *Is it possible to easily measure the engineered nanoparticles at workplaces?* juin 2008.

81. —. Recherches dans les domaines de la production et de l'utilisation sécurisées des nanomatériaux ; Applications aux

nouvelles technologies de l'énergie. *Voyage de presse CEA Grenoble*. novembre 5, 2008.

82. —. *First results for safe procedures for handling nanoparticles*. octobre 2008.

83. **Laurent, Brice**. Engaging the public in nanotechnology? Three visions of public engagement. *presented at Center for Nanotechnology in society. University of California*. Juillet 16, 2007.

84. **Dab et al**. Risques et bénéfices des nanotechnologies : le besoin de nouvelles formes de débat social, Premier bilan du « Nanoforum » du CNAM. 2009.

Table des matières

MYTHES ET LEGENDES DES NANOS	5
1959 FEYNMAN LE VISIONNAIRE	5
1980 LES PROPHETIES	9
2000 L'ELDORADO	11
2005 L'APOCALYPSE	17
LES LEÇONS DE L'HISTOIRE	24
CONCLUSION	25
UNE TERMINOLOGIE BIEN VAGUE	27
L'IMPOSTURE NANO ?	27
DES DEFINITIONS PAR LA TAILLE INSATISFAISANTES	28
LE PREFIXE NANO, LE « MUST HAVE » DU CHERCHEUR	29
UN LABEL MARKETING POUR LES INDUSTRIELS	33
UN « BUZZ » RETENTISSANT	34
POURQUOI FAUT-IL RESTREINDRE LE CHAMP DES NANOS ?	37
DES DEFINITIONS RESTREINTES	41
LES NANO-OBJETS : LA TAILLE INFLUENCE LES PROPRIETES	41
DES OBJETS DECLASSES	44
QUELQUES SUBTILITES PROBLEMATIQUES	46
LES NANOTECHNOLOGIES AUTOUR DES NANO-OBJETS	47
<i>Les synthèses chimiques de nano-objets</i>	<i>48</i>
<i>L'incorporation dans des substances nano-composites</i>	<i>49</i>
<i>La fabrication de nano-dispositifs</i>	<i>50</i>
NE PAS CONFONDRE NANOTECHNOLOGIES AVEC	54
BILAN	55

La distorsion médiatique

UN MANQUE DE REMONTEE DU TERRAIN	57
DES INVESTISSEURS TROP PRESSES	62
UN PAYSAGE ENTREPRENEURIAL ADEQUAT ?	64
UN DEVELOPPEMENT PAR ETAPES DE COMPLEXITE	67
LA DISTORSION MEDIATIQUE	71
LES APPLICATIONS DES NANOTECHNOLOGIES : FAITS MEDIATIQUES ET REALITE	
DES FAITS	71
<i>Les matériaux nano-composites dans l'industrie</i>	72
<i>Les cosmétiques</i>	73
<i>Grand flou sur l'agro-alimentaire</i>	75
<i>L'électronique, un secteur pleinement engagé dans les nanotechnologies.</i>	80
<i>Les perspectives médicales</i>	83
LES FANTASMES.....	86
<i>La gelée grise</i>	87
<i>La gelée verte</i>	92
<i>Le transhumanisme</i>	92
LE SMART DUST.....	95
LES APPLICATIONS MILITAIRES.....	97
POURQUOI UNE MEDIATISATION EN OPPOSITION DE PHASE AVEC LA REALITE INDUSTRIELLE ?	100
LES RISQUES	103
LES RISQUES SYSTEMIQUES ET APOCALYPTIQUES.....	105
<i>Ces risques sont présentés en vert dans la matrice.</i>	105
LES RISQUES DERIVES	105
<i>Un risque socio-économique ?</i>	105
<i>Les risques de mésusage des applications</i>	109
LES RISQUES PROPRES, TOXICOLOGIQUES ET ECOTOXICOLOGIQUES, SOUS-ESTIMES ?	111
LA QUESTION DE LA DEFINITION OPERATIONNELLE	118

REACH (REGISTRATION, EVALUATION, AND AUTHORISATION OF CHEMICALS)	
ET LA QUESTION DE LA TOXICOLOGIE	120
<i>Qu'est-ce-que Reach ?</i>	120
<i>Nano-Reach ?</i>	121
<i>La mise en pratique : le défi de la toxicité</i>	126
GRENELLE ET LA QUESTION DE LA TRAÇABILITE	129
<i>Vers une AIEA des nanos ?</i>	129
<i>Les filières involontaires et la question de la dissémination..</i>	132
LA FAILLE DE LA METROLOGIE	136
<i>Les appareils quantitatifs</i>	136
<i>Les prototypes qualitatifs</i>	139
LE CONFINEMENT « SAFE AND SUSTAINABLE BY DESIGN »	141
QUELLES INSTITUTIONS POUR PILOTER ?	145
QUEL MODELE DE PARTICIPATION CITOYENNE ?	146
<i>Le Grenelle, ou la négociation entre lobbies</i>	147
<i>Nanoforum, prémisse du débat public</i>	147
<i>La convention citoyenne, pouvoir total aux citoyens</i>	149
UNE INSTITUTION CENTRALISATRICE ET EXECUTIVE	150
<i>Les instances de normalisations ?</i>	151
<i>Une autorité administrative indépendante ?</i>	152
<i>Une instance de consultation ?</i>	153
REMERCIEMENTS	156
BIBLIOGRAPHIE	160