



Octobre 2006

LES NANOTECHNOLOGIES, UN CHANGEMENT DE CIVILISATION ?

Claude Broussolle

Selon la National Science Foundation « *les nanotechnologies vont entraîner un changement de civilisation* ». Se prononcer sur le degré de vraisemblance d'une telle affirmation est difficile car si ces technologies sont effectivement porteuses d'une évolution majeure dans tous les secteurs de production, personne n'est actuellement en mesure d'évaluer correctement les avantages et les risques potentiellement considérables qui leur sont associés. Par ailleurs, on peut se demander comment la société va réagir aux anticipations qui sont faites à ce sujet. D'ores et déjà, les perspectives ouvertes par ces recherches suscitent des réactions parfois vives. Peut-on éviter un rejet du public comparable à celui que l'on connaît pour les organismes génétiquement modifiés ? sachant que « *les nanotechnologies émergent dans un espace presque dénué de règles et de politiques* ».

L'étude comprend trois parties. La première se propose de répondre à la question : « Qu'est-ce-que les nanotechnologies ? ». La seconde concerne leurs utilisations actuelles et prévisibles. Dans la troisième partie, l'analyse des inquiétudes engendrées par l'émergence des nanotechnologies conduit à évoquer « *l'effacement de la frontière entre l'inerte et le vivant* » auxquelles elles sont susceptibles de conduire.

I – QU'EST-CE-QUE LES NANOTECHNOLOGIES ?

Les nanosciences et nanotechnologies doivent leur nom au fait que l'on peut aujourd'hui observer et manipuler des objets à l'échelle atomique, c'est-à-dire au niveau le plus minuscule qui soit accessible. Un nanomètre est égal à un millionième de millimètre soit 30000 à 50000 fois moins que le diamètre d'un cheveu, dix fois la taille d'un atome ; celle de notre ADN est de dix nanomètres. Quant aux protéines, elles font vingt nanomètres. Les industries de pointe utilisent déjà des nanoparticules dont la dimension évolue entre dix et cent nanomètres.

En opérant à cette échelle, on parvient à produire de nouveaux matériaux qui permettent d'envisager des ruptures technologiques majeures dans pratiquement tous les secteurs de production, depuis l'agriculture jusqu'à l'industrie spatiale en passant par la

pharmacie et la médecine. En agissant au niveau des atomes et des molécules, on peut modifier les caractéristiques de la matière qui acquiert ainsi des propriétés nouvelles.¹

Contrairement aux procédés traditionnels qui consistent à travailler sur des populations de molécules, la nouvelle démarche consiste à manipuler les atomes un par un et à les assembler pour construire les molécules qui seront à la base de nouveaux matériaux.

Ces nanomatériaux se présentent sous forme de particules libres ou fixes, de fibres ou de tubes (nanotubes de carbone²), de cristaux ou de lamelles.

Enfin et surtout, comme le souligne B. BENSAUDE-VINCENT³, les chimistes n'ont pas jusqu'ici traité les molécules comme des machines ou dispositifs susceptibles d'accomplir certaines fonctions. Dans les nanotechnologies, chaque unité de matière devient un dispositif au service d'une information et d'une performance. Les matériaux ne seront plus, comme dans le passé, une contrainte à laquelle les industries utilisatrices devront s'adapter. La matière ne sera plus traitée comme un support passif sur lequel on imprime des formes. L'information de la forme ne viendra plus de l'extérieur. Elle émergera car elle est une potentialité inhérente au matériau considéré.

Dans la mesure où observation et manipulation s'effectuent au niveau de l'atome, les différences entre chimie, biologie et physique s'estompent. L'approche est multidisciplinaire et les technologies utilisées convergent. C'est ce que l'on appelle la convergence NBIC (nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information, sciences cognitives). On considère d'ailleurs que les nanotechnologies sont d'inspiration biologique. Une cellule peut, en effet, être envisagée comme une association de nanorobots qui oeuvrent ensemble pour leur survie en assemblant la matière pièce par pièce grâce aux briques de base que sont le code génétique et les protéines⁴. La cellule possède un système d'architecture et d'organisation de la matière (autoassemblage, autoréplication...) que l'on cherche à imiter pour élaborer de nouveaux matériaux. Le vivant sert de modèle car il fonctionnalise chaque unité existante. L'acide ribonucléique (ARN) transporte l'information, le ribosome, complexe d'une vingtaine de nanomètres de diamètre, lit le programme fourni par un ARN messager et assemble des acides aminés, etc..., des protéines et des enzymes sont capables d'engendrer des mouvements de translation ou de rotation. De même une molécule peut transporter des électrons, servir d'interrupteur, mais aussi compter, comme dans de nombreux projets où la matière est utilisée, comme calculateur.⁵

Dans la mesure où, à l'image du vivant, le modèle de construction des nanotechnologies est ascendant (Approche bottom up⁶ et non pas descendant (Approche top down), les propriétés des briques de base et celles de leurs combinaisons peuvent être

¹ L'or dont la couleur est jaune devient rouge lorsqu'il est sous forme de nanoparticules. Les verres teintés contiennent des nanoparticules d'or rouges.

² Une filiale du groupe japonais Mitsubishi prévoit de fabriquer plus de 1500 tonnes par an de nanotubes d'ici la fin de la décennie.

³ Bernadette BENSAUDE-VINCENT – « Se libérer de la matière ? » - INRA Editions 2004, p. 35

⁴ Académie des Sciences Académie des Technologies Nanosciences Nanotechnologies Editions Tec et Doc 2004, p. 428

⁵ On en est au stade où le spin de l'électron (le fait qu'il tourne dans un sens ou dans l'autre) est traité comme une unité d'information. Telle est la base du projet d'un ordinateur quantique où l'on transforme la matière en information.

⁶ B. BENSAUDE-VINCENT donne l'exemple suivant : une coquille d'ormeau est fabriquée directement, matière et forme simultanément. Il n'y a donc pas d'abord production de matériaux de base (briques), puis assemblage (mortier) mais élaboration simultanée des composants qui s'assemblent. Le génome renferme le plan d'ensemble et les cellules sont programmées pour l'exécuter.

inconnues de celui qui les conçoit et, par conséquent, imprévisibles, d'où l'impossibilité d'établir une liste exhaustive des risques possibles.

Les nanosciences et nanotechnologies constituent d'ores et déjà un marché mondial considérable estimé à 700 milliards de dollars en 2008, 1000 milliards avant 2015 se répartissant comme suit : plus de 50% pour l'informatique, environ 30% pour les matériaux et de l'ordre de 17% pour les sciences de la vie.

Selon J.P DUPUY et F. ROURE⁷, le soutien public aux nanotechnologies représentait 3.5 milliards de dollars en 2003.

Dans les pays membres de l'Union Européenne, 800 milliards d'Euro ont été dépensés, se répartissant comme suit : Allemagne 250 millions, France 180, Royaume-Uni 130, etc... La dépense publique japonaise s'est élevée à 810 millions d'Euro, celle des Etats-Unis à 1070. Les autres pays ont fait un effort budgétaire de 510 millions d'Euro (Chine, Brésil, Inde, Israël, Corée du Sud, Taïwan en particulier).

En France, les entreprises développant des nanomatériaux sont aussi bien des grands groupes tels que EADS, Rhodia, Michelin, Atofina, Saint Gobain, Air Liquide ou SNECMA que des P.M.E (DGTEC, Alchimex, Inanov, etc...).

II – LES UTILISATIONS ACTUELLES ET PREVISIBLES DES NANOTECHNOLOGIES

Les nanotechnologies n'en sont qu'à leur début et n'ont pas encore donné leurs pleines mesures. Néanmoins et sans être exhaustif, on peut déjà citer un certain nombre de réalisations.

- ✓ Les nanotubes de carbone qui sont beaucoup plus résistants que l'acier et six fois plus légers, servent déjà, par exemple, à renforcer les raquettes de tennis et les balles de golf ;
- ✓ Les spécialistes des revêtements et de l'imprimerie travaillent sur des peintures électrostatiques qui changent de couleur quand on les alimente en courant électrique ;
- ✓ L'industrie cosmétique fabrique des nanoparticules sous forme de principes actifs qui pénètrent dans l'épiderme pour améliorer la tenue des rouges à lèvres, améliorer les vernis à ongles, filtrer les rayons ultra-violets, etc... On peut, également, citer l'usage de nanoparticules dans les produits d'entretien et les assouplissants.
- ✓ Saint Gobain fabrique des vitrages autonettoyants. Le dépôt gras qui se forme sur le verre et colle les poussières est décomposé par les rayons du soleil et rendu hydrophile ce qui permet à la pluie de nettoyer le vitrage.
- ✓ Les vitrages « *électrochromes* » comportent une couche sensible dont on peut régler la tension. Quand la température s'élève, la fenêtre s'obscurcit pour limiter la pénétration des rayons du soleil ;
- ✓ Les chercheurs du MIT ont développé une méthode qui empêche la formation de buée sur une vitre ;
- ✓ Le produit Intac protège les tissus de certaines tâches : les saletés perlent à la surface sans s'incruster dans les fibres. Elles peuvent donc aisément être enlevées avec de l'eau.
- ✓ Etc...

⁷ Jean-Pierre DUPUY - Françoise ROURE Les nanotechnologies : Ethique et prospective industrielle. Tome 1. Conseil Général des Mines, Conseil Général des Technologies de l'Information. Tome 1 2004, p. 7 et 8.

En fait, les applications potentielles des nanosciences couvrent toutes les activités. Leur impact sera considérable dans différents domaines avec J.P DUPUY et F. ROURE, on peut citer :

1. Les technologies de l'information et de la communication

Les nanotechnologies sont au cœur des technologies de l'information et de la communication. Grâce à elle, on conçoit des transistors (le transistor à un électron est peut-être pour demain ?) et des mémoires plus performantes ainsi que des écrans souples en nanomatériaux.

«Selon une vision prospective, d'ici 2024, un ordinateur individuel serait 8000 fois plus puissant que ceux de 2004 ou coûterait, pour la même puissance que celle disponible en 2004, seulement quelques 20 cents et tiendrait dans le volume d'un bouton de manchette »

2. Les technologies de l'énergie

Plusieurs apports fondamentaux sont prévus pour la contribution aux économies d'énergie. Ils concernent l'isolation, le transport, le rendement de l'éclairage aussi bien que l'énergie renouvelable (cellules solaires photovoltaïques) et celle qui est « embarquée » sur des mobiles (piles à combustibles, solides à potentiel de stockage de l'hydrogène). D'une manière générale, il sera possible d'optimiser les convertisseurs d'énergie à tous les niveaux nécessitant des structures fines d'éclairage et d'énergie.

3. Les technologies médicales et neurotechnologiques

Ces technologies concernent la chirurgie, l'ingénierie tissulaire, les implants bioactifs et biocompatibles, les matériaux biomimétiques, le traitement thermique ciblé de cellules tumorales, la confection de valves cardiaques, l'aide au diagnostic précoce des maladies et les neuroprothèses.

Des percées majeures sont espérées grâce aux nanotechnologies. Le rapport de l'Académie des Sciences donne, comme exemple, la vectorisation des médicaments. On peut diriger sélectivement des nanoparticules injectées par voie veineuse vers le foie. Grâce à leur faible taille, elles sont libres de se mouvoir dans tous les organes mais elles sont rapidement et sélectivement capturées par les cellules macrophages du foie. Si ces nanoparticules sont porteuses de molécules actives pour traiter, par exemple, des tumeurs, on peut ainsi acheminer des charges médicamenteuses plus importantes que si on avait dû les diluer dans tout l'organisme, et de plus, préserver d'autres organes du contact de ces molécules qui peuvent être toxiques. En d'autres termes, on augmente les doses du principe actif dans les organes ciblés et on se prémunit des effets secondaires indésirables sur les autres organes.

L'Académie des Sciences cite un autre grand domaine prometteur : la synthèse des tissus biocompatibles. En effet, on pense pouvoir insérer des nanomatériaux dans les tissus vivants après les avoir rendu biocompatibles de façon à leur permettre de s'insérer dans l'architecture du vivant ; ou bien encore créer des substrats pour activer la régénération des cellules. On peut, ainsi, sur le long terme, réaliser la reconstitution de tissus nerveux détruits et lutter ainsi contre certaines maladies (maladie de Parkinson, d'Alzheimer,...) ou régénérer la rétine.

4. Les échotechnologies

Les nanotechnologies sont d'ores et déjà utilisées pour créer des réseaux de capteurs qui peuvent détecter et identifier des agents chimiques ou bactériologiques pratiquement dès leur arrivée dans un environnement donné. Elles peuvent, également, être utilisées pour le marquage des produits et contribuer à la réduction de la production de déchets dans l'industrie.

Les nanotechnologies et le développement durable

Les nanotechnologies s'inscrivent dans le cadre d'une miniaturisation et d'une dématérialisation croissante des techniques. A ce titre, elles concernent le développement durable. En effet, la maîtrise des structures à l'échelle nanométrique permet d'envisager la création de matériaux plus facilement recyclables, voire dégradables, la mise au point de procédés de fabrication plus doux occasionnant moins de rejets industriels et réalisant des économies d'énergie.

5. Les technologies de sécurité

On retrouve, dans cette catégorie, un certain nombre de nanotechnologies déjà citées :

- ✓ Les capteurs implantables dans l'environnement pour détecter la présence d'agents chimiques ou biologiques,
- ✓ Les capteurs implantés sous la peau et permettant à chacun une meilleure connaissance de son état de santé donc favorisant la prévention des maladies et, éventuellement, laissant à chacun la possibilité de s'administrer des médicaments : insuline, médicaments anti-douleur, etc...

Concernant la sécurité, au sens le plus habituel du terme, on peut citer les capteurs qui permettent l'identification d'individus : personnes condamnées, astreintes à rester dans un périmètre défini, lutte contre le terrorisme, etc... Actuellement, la technique permet de réaliser des RFID (radio frequency identification). Il s'agit de transpondeurs qui répondent à un signal en envoyant, par exemple, un code d'identification. Ils sont associés à des capteurs. Le dispositif dont la dimension est de l'ordre du millimètre peut-être placé dans un vêtement. Il est utilisé pour marquer des humains, des animaux, des objets.

Dans cet ordre d'idées, on peut également signaler une entreprise qui fournit un GPS miniaturisé, couplé à des capteurs biologiques situés sur une personne. A tout moment, l'abonné peut savoir où se trouve le porteur du boîtier et quel est son état de santé. Ce dispositif assure la surveillance d'un malade, la (relative) sécurité d'une personne dans une région où les enlèvements sont fréquents, le suivi d'individus dangereux, etc...

A cette liste, il convient d'ajouter ce qu'il est convenu d'appeler « la poussière intelligente ». Ce concept, cité par l'Académie des Sciences⁸, a été développé aux U.S.A. à la fin des années 1990. Il s'agissait de miniaturiser un objet contenant :

- ✓ des capteurs divers et peut-être un jour des caméras rudimentaires,
- ✓ un ordinateur avec son système d'exploitation,
- ✓ un système d'émission-réception,
- ✓ une source de puissance.

⁸Op. cit. p. 432

On atteint, actuellement, la taille d'un cachet d'aspirine mais on peut aller vers des tailles millimétriques rien qu'en utilisant les technologies disponibles.

Cette technique peut rendre de grands services pour la surveillance de zones hostiles ou d'accès difficile. Elle peut faciliter l'interface homme-machine en collant sur le corps des « grains » qui captent les déplacements. On peut envisager une « poussière ingérable » et qui sera ensuite éliminée pour diagnostiquer, soigner sans traumatiser un malade.

Les risques liés à ces techniques sont évidemment de possibles atteintes à la vie privée et à la liberté individuelle. « Comment être sûr qu'un grain de poussière tapi quelque part ne nous épie pas ? ».

III – RISQUES, INCERTITUDES ET VISION DU FUTUR

Enumérer les utilisations actuelles et prévisibles des nanotechnologies, c'est établir la liste des avantages qu'elles présentent, abstraction faite des risques potentiels qui leurs sont associés et qui sont loin d'être négligeables.

Il s'agit, essentiellement, des risques sanitaires, des atteintes aux libertés individuelles auxquels certains ajoutent des risques qui relèvent de la science fiction et qui seraient liés à l'existence de robots devenus incontrôlables et capables de détruire la biosphère.

En fait, les questions soulevées par les nanotechnologies vont au-delà des deux premières séries de risques et conduisent à s'interroger sur le changement de civilisation qu'entraîneraient les nanotechnologies si l'on en croit la National Science Foundation.

Comme le souligne J.P. Dupuy et F. Roure, il existe un consensus des experts sur l'imprévisibilité des propriétés des nanoparticules fabriquées ou naturellement présentes dans l'environnement. Dans ces conditions, il est impossible de prétendre à l'exhaustivité des risques. Ils ajoutent que la relation du risque à la responsabilité est traditionnellement assurée par l'expression et la démonstration d'une faute ce qui implique une responsabilité de nature subjective. Mais au principe de responsabilité subjective pourrait se substituer celui de la responsabilité objective faisant du risque, et non pas de la faute, le fondement de la responsabilité. La nanoerreur caractériserait la notion de responsabilité sans faute.

Evoquons successivement les différentes catégories de risques :

Les risques sanitaires :

Ils sont de différents ordres :

- ✓ l'accumulation dans la chaîne alimentaire, puis dans les organes, de nanoparticules non détruites par l'organisme,
- ✓ des effets nocifs de type amiante⁹. On redoute la pollution de l'air par des milliards de nanoparticules ou leur concentration en des points sensibles,
- ✓ l'éventualité d'interactions de nanoparticules conduisant à des dysfonctionnements,
- ✓ la dissémination de toxiques chimiques qui seraient utilisés dans la fabrication des nanoobjets.

⁹ Déjà deux millions de salariés américains sont exposés aux nanoparticules sur leurs lieux de travail et ce nombre devrait doubler rapidement

Signalons qu'une étude récente, réalisée aux U.S.A., suggère que les nanotubes de carbone sont solubles dans l'eau, donc facilement ingurgitables par l'homme ou les animaux. Par-ailleurs, une enquête tendrait à montrer que des nanotubes de carbone avalés par des poissons pouvaient endommager les cellules de leur cerveau.

Dans son rapport, l'Académie des Sciences estime, en parallèle à ces opinions, qu'on peut trouver excessives mais qu'on ne peut ignorer, la nécessité, comme pour toute nouvelle technologie, d'évaluer de façon rationnelle leurs bienfaits et leurs inconvénients.

Les atteintes aux libertés :

L'impact des nanotechnologies de l'information sur les libertés individuelles et le respect de la vie privée peut être considérable. C'est d'ailleurs moins la technologie proprement dite qui est en cause que le détournement de son usage. Si les avantages qu'apportent de nouveaux produits informatiques (accessibilité à de nombreuses informations, bénéfices pour la santé, sécurité dans de nombreux domaines) sont reconnus, des critiques parfois violentes sont émises concernant de possibles atteintes à la vie privée (RFID implantable, capteur GPS miniature, « *poussière intelligente* »). L'usage de ces technologies de l'information et de la communication devra faire l'objet de réflexion voire de régulation. Dans certains cas, la solution ne dépendra pas de l'Etat mais résultera d'accords internationaux.

L'existence de robots incontrôlables : la « gelée grise » :

Le risque évoqué par certains est celui de nanorobots construits à l'échelle moléculaire et qui, à l'image de ce que l'on observe dans le monde du vivant, seraient capables de se reproduire. Ces nanorobots dont la prolifération échapperait à tout contrôle constitueraient la « *gelée grise* » et pourraient alors détruire l'humanité en dévorant la biosphère « contrairement au fonctionnement du vivant qui est en quelque sorte une *gelée grise* autorégulée ». Pour les scientifiques, cette perspective relève largement de la science-fiction.

Au-delà des risques réels ou supposés engendrés par les nanotechnologies se posent, plus fondamentalement les problèmes que soulève la possibilité d'augmenter les capacités physiques et mentales de l'homme. Marius REES cité par J.P. DUPUY, s'exprime ainsi : « *la nouveauté la plus importante est que les êtres humains eux-mêmes sont désormais capables de changer. Au cours des derniers millénaires, le caractère de l'homme, son physique, n'ont guère changé Mais dans les cent prochaines années, avec des médicaments ciblés, des modifications génétiques et peut-être l'implantation de micro-ordinateurs dans le cerveau, l'être humain pourrait commencer à changer* ».

En effet, les possibilités entrevues aujourd'hui, de la technisation de la substance même de l'être humain, y compris dans ses fonctions supérieures, par la création de prothèses greffées sur les tissus biologiques effacent nombre de distinctions entre le naturellement développé et le fabriqué. « *L'effacement des frontières se fait en faveur d'une naturalisation de la technique et d'une artificialisation de la nature... la frontière entre l'inerte et le vivant s'efface au profit d'une sorte de continuum, comme si les fonctions complexes du vivant émergeaient peu à peu de la matière*¹⁰ ».

¹⁰ B. BENSUADE – VINCENT. Cf cit. p. 64

CONCLUSION

Dans la perspective d'une concurrence généralisée, la notion de progrès change totalement de signification.

Luc FERRY écrit à ce sujet : «Dans le monde de la technique, c'est-à-dire, désormais, dans le monde tout entier puisque la technique est un phénomène sans limites, planétaire, il ne s'agit pas de dominer la nature ou la société pour être plus libre et plus heureux, mais de maîtriser pour maîtriser, de dominer pour dominer. Pourquoi ? pour rien justement, ou plutôt, parce qu'il est tout simplement impossible de faire autrement étant donné la nature des sociétés de part en part animées par la compétition, par l'obligation absolue de progresser ou de périr ¹¹» .

Cette réflexion désabusée justifie, néanmoins, s'il en est besoin, l'effort que la France doit faire en faveur des nanotechnologies afin de maintenir sa compétitivité dans la concurrence mondiale. Cette justification ne saurait toutefois suffire pour éviter dans le grand public le développement d'une inquiétude diffuse, le sentiment d'un doute pouvant mettre en cause le développement des nanosciences et nanotechnologies.

L'impact de celles-ci sur la société n'est pas encore mesurable. Il sera certainement considérable. Or, à la veille des mutations que cette révolution scientifique et industrielle laisse entrevoir, le débat politique et éthique s'engage à peine sur sa finalité, ses avantages et ses risques. *«L'enjeu est celui des limites qu'une société, à un moment donné de son évolution, souhaite fixer pour rendre le cheminement de la recherche et de la technologie acceptable et, par conséquent, effectivement appropriable par les citoyens qui la composent ¹² ».*

Le texte que vous venez de lire est une reprise revue et complétée d'une conférence organisée par le Groupe FUTUROUEST à Brest le 02 Mars 2006.

www.futuroouest.com

¹¹ Luc FERRY « Apprendre à vivre ». Plan 2006 p. 243

¹² J.P. DUPUY – F. ROURE. Cf. cit. p. 23