

Les citoyens face aux nanotechnologies

« *Quand les technologies du XXI^e siècle convergeront, l'humanité pourra enfin, grâce à elles, atteindre un état marqué par la paix mondiale, la prospérité universelle et la marche vers un degré supérieur de compassion et d'accomplissement.* » Ces fortes paroles figurent dans le document officiel américain qui a lancé, en juin 2002, un vaste programme interdisciplinaire, richement doté en fonds fédéraux. Celui-ci est dénommé *Converging Technologies*, mais est plus connu sous le sigle NBIC, qui désigne la convergence entre nanotechnologies, biotechnologies, technologies de l'information et des sciences cognitives (1). C'est le premier de ces quatre ensembles de disciplines scientifiques et techniques, les nanotechnologies, qui en constitue la pointe avancée.

C'est le célèbre physicien américain Richard Feynman qui peut être considéré comme le père du projet nanotechnologique, lors de sa conférence « Il y a plein de place en bas », présentée en 1959 au California Institute of Technology ; Feynman (2) y soulignait qu'il serait bientôt possible d'envisager la manipulation de la matière à des fins humaines à l'échelle de la molécule, en opérant atome par atome. Le projet d'une ingénierie à l'échelle nanométrique était ainsi lancé.

Avec ce fameux « nanomonde », l'ingénierie opère désormais à l'échelle du nanomètre (milliardième de mètre), sur des éléments certes très petits au regard des objets de la vie courante (par exemple 30 000 fois plus petits qu'un cheveu), mais largement plus grands que les objets observés dans les grands accélérateurs de particules. Les capacités accrues de fabrication et de manipulation d'objets, du micron (millionième de mètre) au nanomètre, ouvrent donc des perspectives tout à fait exceptionnelles, y compris d'immenses potentiels d'applications.

Avant de dégager et de préciser les domaines d'applications et les questions éthiques liées à cette approche, interrogeons-nous sur la spécificité de ce domaine scientifique, habituellement présenté comme radicalement nouveau. Ce sont en fait les deux modes opératoires à l'origine du nanomonde qui représentent une vraie nouveauté aujourd'hui :

- un premier mode opératoire consiste à réduire des dispositifs « milli » ou « micrométriques » jusqu'à atteindre l'échelle nanométrique ; l'exemple souvent cité est celui des puces électroniques, dont les

tailles de plus en plus réduites sont le résultat de l'amélioration de technologies de fabrication du silicium.

- un autre mode opératoire consiste à aller du très petit vers le petit. Il s'agit de procédures qui manipulent atomes et molécules pour édifier des nanosystèmes complexes nouveaux, non naturels. Cette approche est rendue possible grâce à la création et au développement d'outils capables de rendre perceptible le millionième de millimètre, et de manipuler la matière à cette échelle. Ce mode repose sur la création de nouveaux instruments : les microscopes par effet tunnel à force atomique, l'électronique de haute résolution, ou encore les pinces optiques permettant de manipuler la matière, atome par atome.

Enfin, les nanotechnologies ouvrent de nouvelles possibilités, générant elle-même d'autres technologies génériques, que sont les biotechnologies et les technologies de l'information, elles-mêmes convergentes avec les sciences cognitives. Comme telles, ces nanotechnologies permettront de nouvelles applications, notamment dans le secteur de l'informatique médicale ou dans celui des nouveaux matériaux avec de nouvelles performances. Sur le plan politico-économique, remarquons que la sophistication des nanotechnologies rendra leur développement et leur utilisation possibles uniquement par des structures techno-industrielles lourdes, ce qui renforcera encore la concentration de grands groupes industriels, en particulier au travers des brevets.

Les nanotechnologies font sans aucun doute partie de ces vagues technologiques qui, comme celle de la biologie synthétique, détermineront notre futur.

I - Domaines d'applications des nanotechnologies

Les principaux domaines d'applications qui en pourraient en résulter sont les suivants :

Dans le domaine de la santé, de nombreux secteurs pourraient être concernés par les développements actuels et futurs de la médecine, en particulier des outils diagnostiques et thérapeutiques ; plusieurs champs d'application sont envisageables tant *in vitro* qu'*in vivo* :

- mise en œuvre de marqueurs fonctionnels pour une imagerie non invasive (non traumatisante),
- conception de nouveaux médicaments contenant des nanomatériaux et des nanosystèmes,
- délivrance de médicaments et de nouveaux outils pharmacologiques à des doses apparemment moins toxiques en raison de leur ciblage privilégié.

Dans le secteur de l'alimentation, en l'absence de tout étiquetage obligatoire, de tout débat public et de la moindre réglementation, des produits créés à l'aide des nanotechnologies sont en train de

"contaminer" la chaîne alimentaire. Les nanoparticules fabriquées, les nanoémulsions et les nanocapsules se retrouvent dans les pesticides agricoles, les aliments confectionnés industriellement, les emballages alimentaires et les matériaux en contact avec les aliments et les récipients de stockage. L'association Les Amis de la Terre a repéré 106 de ces produits actuellement en vente, mais il paraît certain qu'il ne s'agit que d'une petite fraction des produits déjà commercialisés.

Malgré tout cela, il n'y a, pour l'instant, aucune réglementation particulière concernant les nanotechnologies, ni aucun test exigé avant que des nanomatériaux soient utilisés dans les aliments, les emballages ou les produits agricoles.

D'une manière plus générale, les nanotechnologies menacent aussi le développement de l'agriculture et des modes d'alimentation durables. Il est à craindre qu'elles permettent d'accentuer le contrôle de l'agriculture mondiale et des systèmes alimentaires par de grandes entreprises multinationales. Cela aurait pour conséquence de réduire le pouvoir des paysans à contrôler eux-mêmes, localement, la production alimentaire, comme cela est déjà le cas pour les OGM.

Autres secteurs

Produits cosmétiques:

Depuis plusieurs années, l'industrie des produits cosmétiques utilise les nanotechnologies et incorpore des nanomatériaux dans ses produits. Du fait de leur très petite taille, les nanomatériaux peuvent développer des propriétés physiques et chimiques nouvelles. Des éléments nanométriques (nanoparticules organiques, oxydes métalliques TiO_2 ou ZnO) peuvent être également incorporés dans d'autres formulations cosmétiques : crèmes, poudres, parfums, shampooings, vernis à ongles, rouges à lèvres, dentifrices, etc.

Comme la mention de nanomatériaux sur l'étiquetage n'est pas obligatoire, à ce jour il est très difficile de dresser une liste exhaustive des produits cosmétiques qui en contiennent. Selon le Woodrow Wilson Institute, qui recense les produits contenant des nanomatériaux, il y aurait sur le marché une quarantaine de cosmétiques contenant des nanoparticules.

Emballages:

Les nanomatériaux peuvent aussi être incorporés aux emballages pour agir sur la conservation, la traçabilité et le recyclage des aliments. Ces nanopuces intégrées dans le conditionnement permettent de tracer l'évolution microbiologique des aliments au cours de leur vie et contribuent à leur surveillance sanitaire. Des dépôts en nanocouches sous forme de films peuvent constituer une protection contre l'humidité.

Autres matériaux :

De nouvelles microstructures dans le domaine des matériaux ont également pu être développées. A cette échelle, les propriétés physico-chimiques des matériaux peuvent se modifier. Par exemple, les nanotubes de carbone sont des assemblages d'atomes de carbone en forme de tubes de 2 à 100 nanomètres de diamètre et d'une longueur de l'ordre du micron. Très légers et résistants à la rupture tout en étant très souples, ils peuvent se comporter comme un métal mais également comme un semi-conducteur. Ils possèdent des propriétés mécaniques, optiques ou chimiques très particulières. Ce matériau est ainsi cent fois plus résistant et six fois plus léger que l'acier ; il a une conductivité thermique comparable à celle du diamant.

De nouveaux types de textiles, de peintures, des verres à vitre autonettoyants, des revêtements résistants à l'usure, des panneaux solaires et des composants électroniques, tels sont déjà les produits disponibles sur le marché.

En conclusion, environ 2 000 nanoparticules manufacturées sont d'ores et déjà commercialisées et on dénombre leur présence dans plus de 600 produits de consommation. Les nanomatériaux présents dans les produits de consommation sont généralement organisés ou englobés dans une matrice solide ou fluide.

II - Risques sanitaires identifiés

Dans ce nouveau domaine, de nombreux risques sanitaires peuvent se développer. Sont principalement visés les applications et les produits qui, au cours de leur fabrication, de leur utilisation ou de leur élimination, peuvent libérer des nanoparticules synthétiques (obtenues par synthèse de différents atomes ou composés chimiques). En raison de leur petite taille, les nanoparticules peuvent parvenir jusqu'aux structures les plus infimes des poumons, les alvéoles pulmonaires. C'est là que s'effectuent les échanges gazeux entre l'air que l'on respire et le sang. Les effets que les nanoparticules peuvent avoir sur ce système vital sont encore peu connus. Il semble qu'elles puissent provoquer des réactions inflammatoires et même des altérations du tissu pulmonaire comparables à la silicose (maladie due à une exposition à la poussière de silice) ou à l'asbestose (amiante), causées par la poussière fine de ces matériaux. Les connaissances actuelles en la matière, obtenues par expérimentation animale, portent sur un nombre très restreint de nanoparticules synthétiques (par exemple le carbone et l'oxyde de titane). Des études à partir de cultures cellulaires ont montré que les nanoparticules sont facilement absorbées et peuvent, suivant leur composition chimique, avoir des effets nocifs sur ces cellules. Des études sont aussi menées sur l'absorption possible de nanoparticules par la peau ; à ce jour, les connaissances acquises dans ce secteur

permettent *a priori* d'exclure toute absorption par une peau saine. D'autres travaux ont montré que les nanoparticules de polystyrène et d'oxyde de titane pouvaient passer dans le tube digestif et, de là, gagner le foie.

III - Problèmes éthiques

Ces nouvelles applications vont poser de nombreux problèmes éthiques.

Parmi ceux-ci, on peut citer :

La question de la traçabilité : si les nanoparticules échappent, du fait de leur taille, aux moyens de détection habituels, il serait imprudent de les introduire subrepticement dans l'environnement et le corps humain. Nous vivons déjà dans un monde où les nanomatériaux sont présents en quantité, mais la libération dans l'atmosphère de nanostructures nouvelles non biodégradables, par exemple les nanotubes de carbone, pourrait être une source de danger comparable à l'exposition à l'amiante ; un déficit d'outils de mesure adaptés à l'échelle nanométrique complique évidemment leur détection.

La question des effets biologiques et de la biodégradabilité : on ne connaît pas actuellement les effets que pourraient avoir d'éventuels nanovecteurs pharmacologiques sur les mécanismes physiologiques de l'organisme, notamment sur le passage à travers des barrières biologiques, telle la barrière entre le sang et le cerveau. Une faible biodégradabilité pourrait aussi poser ou majorer des problèmes de pollution écologique et de toxicité humaine.

La question des éventuelles « propriétés nouvelles » de la matière manipulée à l'échelle du nanomètre : le rapport surface/masse, plus important pour les systèmes moléculaires complexes à l'échelle nanométrique que pour les matériaux de plus grande taille, peut avoir des conséquences inconnues sur le plan de la réactivité biologique et chimique ; actuellement on ne connaît pas les effets secondaires d'éventuels changements de comportement de la matière. La radioactivité a été un exemple de l'impossibilité de prévoir les effets de changements de comportements de la matière avant de les avoir identifiés : la connaissance de ses effets n'a été que rétrospective. C'est la découverte même de ces « propriétés nouvelles » de la matière radioactive qui a permis sa traçabilité : tant qu'on ne les avait pas découvertes, on ne pouvait ni tracer, ni protéger.

Le contrôle du développement des nanotechnologies : l'effort mondial académique et industriel pour les nanosciences et nanotechnologies est estimé à 10,5 milliards de dollars, selon le rapport « Nanotechnology Realistic market assessment » de la BCC Research, publié en juillet 2006. Parmi les 4,6 milliards de dollars de dépenses publiques, les États-Unis y contribuent à hauteur de 35 % (soit 1,6

milliard de dollars environ), avec une proportion identique pour l'Asie, une contribution légèrement inférieure pour l'Europe soit 28 % (1,3 milliard de dollars) et seulement 2 % pour le reste du monde. Aux États-Unis, le niveau de dépenses du gouvernement en nanotechnologies s'approche aujourd'hui du milliard de dollars par an, ce qui en fait le plus grand projet scientifique sur fonds publics depuis le premier programme Apollo. Le ministère de la défense américain obtient la majeure partie de ce budget du gouvernement américain pour les nanos. Au moins trente-cinq pays ont un programme national de recherche sur les nanotechnologies.

Pratiquement toutes les entreprises parmi les cinq cents premières mondiales investissent dans la recherche et développement en nanotechnologies, accompagnées par des centaines de petites start-up.

Au niveau mondial, en 2006, si 10,5 milliards de dollars ont été consacrés à la Recherche et développement dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies, seulement 40 millions l'ont été à des fins de recherche sur les effets secondaires éventuels. En d'autres termes, **0,4% seulement des dépenses au niveau mondial ont été consacrées à la recherche sur les risques**, dont ceux pour la santé.

Actuellement on ne peut que constater le peu d'enthousiasme des biologistes, des toxicologues, des environmentalistes et des épidémiologistes à s'investir sur ces thématiques qui risquent de devenir un problème grave de santé.

La course aux brevets sur les produits et procédés nanotechnologiques, comme ce qui s'est passé pour les biotechnologies, peut se traduire par des monopoles sur les éléments de base, qui sont à l'origine de notre monde naturel dans son ensemble. Si les tendances actuelles continuent, les nanotechnologies vont concentrer encore plus le pouvoir économique dans les mains des multinationales.

On assiste au même phénomène que pour les débuts du nucléaire et des OGM, le débat public n'existe pratiquement pas.

IV- Recommandations

Les "nanos" semblent agréger des ingrédients pour le moins explosifs. Et pourtant, nous ne décelons pas à ce jour les signes d'une contestation large de la société.

Aujourd'hui, seuls des scientifiques, des associations et des organisations écologistes ont joué le rôle de lanceurs d'alerte (ETC au Canada, « Pièces et Main-d'œuvre » à Grenoble, Greenpeace et les Amis de la terre). Il est urgent de créer, à l'échelle locale et nationale, des commissions paritaires où les chercheurs, les industriels, les politiques et la société civile puissent se retrouver. Il est important de former les élus,

d'avoir un message positif porteur de vie et d'éviter de délivrer un discours anxiogène. Surtout, il faut associer l'environnemental et le social pour réussir tous ensemble, avec les citoyens.

Il paraît aussi urgent qu'une information suffisante soit disponible sur la redoutable propriété des nanosystèmes moléculaires qui sont capables de pouvoir traverser les barrières biologiques, notamment entre sang et cerveau, et d'être actuellement peu ou pas biodégradables, ce qui risque d'avoir, en dehors d'indications thérapeutiques précises, des conséquences majeures pour la santé. De plus il faudra donner la priorité à toutes les mesures nécessaires de protection des travailleurs au contact des nanomatériaux, et de confinement des lieux d'étude et de production de ces nanomatériaux. Devra être aussi prioritaire la recherche d'effets adverses, en privilégiant les études de toxicité à faible dose sur les personnes à vulnérabilité maximale, notamment les travailleurs au contact des nanomatériaux et qui pourraient avoir été exposés malgré les mesures de protection ; à titre de précaution, les femmes enceintes devraient être exclues de ces postes. Un suivi des fœtus et nouveau-nés devrait être réglementairement prescrit en cas de risque d'exposition professionnelle ou intempestive. La recherche sur l'animal des effets des nanoparticules doit être fortement développée, même pour les nanomatériaux sans caractère médical strict (par exemple les nanocosmétiques).

Actuellement, le cadre de la médecine du travail est impropre au contrôle de ces nouveaux produits. C'est pourquoi il sera nécessaire :

- dans le cadre de la médecine du travail et des comités « hygiène et sécurité » de sites, d'exiger de chaque laboratoire, équipe de recherche et lieu de production, la rédaction de guides des bonnes pratiques, ainsi que la mise en œuvre de procédures particulières de contrôle de la protection et de surveillance des personnels de la recherche et des industries manufacturant des produits nanométriques ;
- de favoriser les informations en réseaux des agences : celles de la biomédecine, AFSSAPS, AFSA, et celles de l'Institut de veille sanitaire. La plus grande attention devra être réservée au respect des principes associés tels que le respect de la vie privée, le consentement éclairé à l'administration ou à l'exposition à de nouvelles nanoparticules, l'équité d'accès à ces innovations, la protection des personnes. Cela permettra de créer une banque de données sanitaires. Dans ces agences, il faudra aussi identifier les conflits d'intérêts, afin de les réduire fortement et si possible les supprimer ;
- d'obliger les industriels à une information et un étiquetage visibles des produits contenant des nanoparticules créées intentionnellement pour que le consommateur puisse éventuellement en refuser l'usage ;

- de mettre en place une information effective du public et de la société en organisant des débats citoyens par essence contradictoires ; ils seront décentralisés au niveau des entités régionales et donneront lieu à des comptes rendus publics, complétés par les réponses des chercheurs et des industriels aux interrogations, espoirs et craintes émis lors de ces débats.

Conclusion :

il n'est pas question de remettre ici en cause globalement les nanotechnologies, ni de faire preuve d'un antiséisme aussi primaire que le scientisme. Le problème posé actuellement par les nanomatériaux est identique à celui des OGM : les intérêts à court terme des industriels passent avant la protection des citoyens et de l'environnement. Et donc, on commercialise avant d'avoir fait les études de sécurité indispensables. La responsabilité des politiques est sur ce point considérable, dans la mesure où les actuels règlements et lois sont totalement inadaptés aux particularités des nanomatériaux (ainsi, ces derniers échappent au règlement européen REACH, du fait de leur faible tonnage). Mais, pour faire bouger les politiques, la pression citoyenne est indispensable, là encore le rapprochement avec les OGM s'impose. Les problèmes posés par les nanotechnologies sont trop graves pour laisser aux seuls industriels le soin de les résoudre.

Pour en savoir plus:

(1) www.wtec.org/ConvergingTechnologies/

(2) Richard Feynman, « There is plenty of room at the bottom », discours à l'American Physical Society, Caltech, 29 Décembre 1959.

Alain Obadia, « Les nanotechnologies », rapport pour le Conseil économique et social, juin 2008 :

http://www.conseil-economique-et-social.fr/ces_dat2/2-3based/base.htm

« Effets des nanomatériaux sur la santé de l'homme et sur l'environnement », rapport pour l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail, juin 2006 :

<http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/367611898456453755693572842048/nanomateriaux.pdf>

Encadrés

Depuis quelque temps, un grand nombre de recherches scientifiques s'efforcent de rendre la vie « artificielle » elle aussi, et de couper le dernier lien qui maintient encore l'homme parmi les enfants de la nature. C'est le même désir d'échapper à l'emprisonnement terrestre qui se manifeste dans les essais de création en éprouvette (...) et je soupçonne que l'envie d'échapper à la condition humaine

expliquerait aussi l'espoir de prolonger la durée de l'existence fort au-delà de cent ans, limite jusqu'ici admise.

Cet homme futur, que les savants produiront, nous disent ils, en un siècle pas d'avantage, paraît en proie à la révolte contre l'existence humaine telle qu'elle est donnée, cadeau venu de nulle part (laïquement parlant) et qu'il veut pour ainsi dire échanger contre un ouvrage de ses propres mains. Il n'y a pas de raison de douter que nous soyons capables de faire cet échange, de même qu'il n'y a pas de raison de douter que nous soyons capables à présent de détruire toute vie organique sur terre. La seule question est de savoir si nous souhaitons employer dans ce sens nos nouvelles connaissances scientifiques et techniques, et l'on ne saurait en décider par des méthodes scientifiques. C'est une question politique primordiale que l'on ne peut guère, par conséquent, abandonner aux professionnels de la science ni à ceux de la politique.

Hannah Arendt, *La condition de l'homme moderne*, 1958, Paris, Calmann-Lévy, 1983.

Si la science classique est « la science de notre propre monde, au contact de l'expérience quotidienne, organisée pour une raison universelle et stable », la science contemporaine introduit une véritable rupture du point de vue de l'objet à connaître.

Gaston Bachelard, *Le nouvel esprit scientifique*, 1934, Paris, PUF, 2003.