

Questions éthiques soulevées par les nanotechnologies

Les développements récents des nanotechnologies (NT) ont suscité de grands espoirs, et il continue d'en aller ainsi : on considère, en effet, que les NT figurent parmi les technologies clés pour le développement futur du monde industrialisé [1,27]. L'attente de bénéfices économiques pour la collectivité a conduit à des investissements considérables en matière de recherche et développement (R&D), en Europe, aux Etats-Unis et dans d'autres parties du monde. Cependant, de façon assez surprenante, l'on sait bien peu de choses au sujet de l'impact des NT sur l'environnement et la santé humaine.

Bien entendu, ainsi qu'il ressort clairement de nos écrits [6, 13], ni le Groupe européen d'Ethique (GEE), ni moi-même n'avons l'intention de rejoindre ceux qui souhaitent bloquer le développement des NT parce qu'il existe des lacunes dans nos connaissances sur ces technologies. Toutefois, nous avons fait valoir qu'il est dans l'intérêt à long terme de toutes les parties concernées (y compris de l'industrie) de chercher à combler ces lacunes. En d'autres termes,

il est urgent de traiter d'importantes priorités en matière de recherche et d'information du public.

par **Göran HERMERÉN***

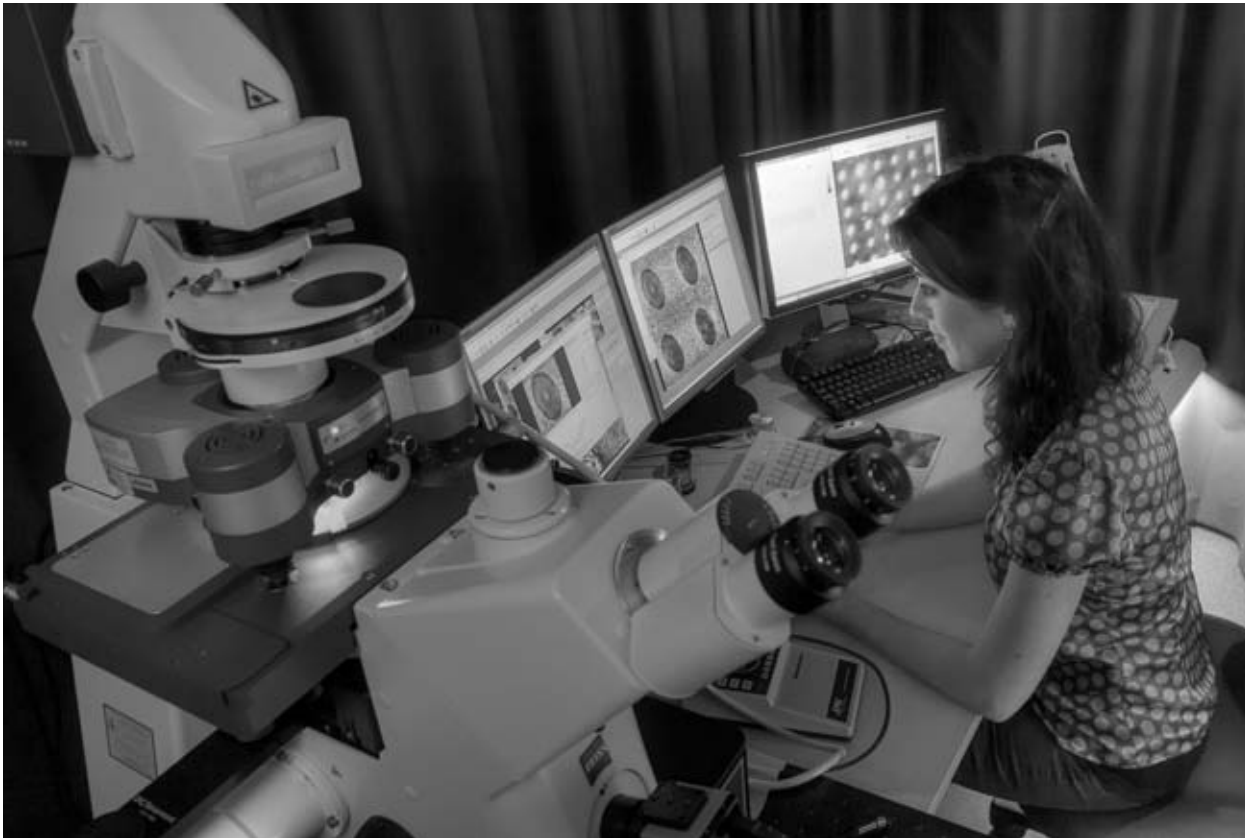
LA SITUATION ACTUELLE

Aujourd'hui, un nombre croissant de produits disponibles sur le marché contiennent des nano-particules (NP) ou sont produits au moyen de nanotechnologies (NT) (le terme de NT a un sens très large et fait référence à plusieurs technologies. Je vais donc utiliser systématiquement ce mot au pluriel, sauf si une NT particulière est visée). Ces technologies sont utilisées dans

l'industrie automobile, en aérospatiale, dans l'industrie chimique, dans l'industrie pharmaceutique, en médecine et en biotechnologie, dans les technologies de l'information et de la communication, ainsi que dans le secteur des produits cosmétiques et dans les industries alimentaires [25].

Le nombre et les domaines d'application des NT ne cessent d'augmenter, mais les études concernant leur

* Président du Groupe européen d'Ethique.



© Patrick Dumas/LOOK AT SCIENCES

« Ainsi qu'il ressort clairement du rapport du GEE et d'études similaires, des produits fondés sur les NT peuvent être utilisés pour le diagnostic et à des fins thérapeutiques, notamment pour une imagerie médicale améliorée, des labos miniaturisés, la production de nouveaux biomatériaux, une meilleure administration des médicaments, etc. ». *Développement d'un nano-dispositif permettant de détecter, notamment, les marqueurs biologiques de tumeurs cancéreuses. Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS, à Toulouse.*

impact sur la santé humaine et l'environnement restent à la traîne. Il existe encore des lacunes considérables... Des méthodes d'évaluation restent encore à développer. Et les consommateurs sont rarement informés quand ils achètent des produits fondés sur les NT. A cet égard, peu de choses sont intervenues depuis la publication du rapport du GEE sur la nanomédecine [6].

J'illustrerai d'abord l'impact potentiel (qu'il soit positif ou négatif) des produits fondés sur les NT sur la santé humaine, puis l'impact possible de ces mêmes produits sur l'environnement.

Pour ceux qui adoptent un point de vue écocentrique en matière d'éthique de l'environnement, la protection de l'environnement a une valeur en elle-même. Pour ceux qui adoptent un point de vue anthropocentrique, la protection de l'environnement peut avoir une valeur instrumentale, à tout le moins lorsqu'elle permet, directement ou indirectement, de protéger la santé humaine.

La santé humaine

Ainsi qu'il ressort clairement du rapport du GEE et d'études similaires, des produits fondés sur les NT peuvent être utilisés pour le diagnostic et à des fins théra-

peutiques, notamment pour une imagerie médicale améliorée, des labos miniaturisés, la production de nouveaux biomatériaux, une meilleure administration des médicaments, etc. [6]. Parmi les cibles thérapeutiques, citons le cancer métastatique, la réparation oculaire, la non-guérison des plaies chez les personnes âgées, des maladies infectieuses, l'arthrite, la réparation des tissus (Ruth Duncan) et la chirurgie orthopédique (Andrew McCaskie). Ruth Duncan a déjà écrit, en 2004 : « Au cours de la dernière décennie, des progrès remarquables ont été obtenus en matière de thérapeutiques hybrides et de systèmes d'administration des médicaments à l'échelle nanométrique. Un nombre croissant de produits ont déjà obtenu l'approbation de l'autorité réglementaire et sont supportés par un *pipeline* efficace de développement clinique. » [5]

Aujourd'hui, il y a une liste impressionnante de médicaments fondés sur les NT, à commencer par le Zinostatin et l'Adagen. En 2008, les thérapeutiques polymères approuvés ont représenté 5 milliards de dollars US, selon Ruth Duncan.

Des recherches passionnantes sont en cours, dans le monde entier. Par exemple, des cellules nerveuses cultivées sur des nano-câbles ont été disposées en ligne dans différentes directions, pour être étudiées. Des petites électrodes, susceptibles d'envoyer et de recevoir des



© Medi-Mation/SCIENCE PHOTO LIBRARY-COSMOS

« Les nanoparticules peuvent être absorbées dans le cerveau et les organes respiratoires ».

signaux, ont alors été placées directement dans le système nerveux central (SNC). Parmi les applications potentielles, citons le soulagement de la douleur chronique, le traitement de la maladie de Parkinson et la commande de prothèses (il s'agit de travaux de recherche menés au centre de recherche en neuro-nanoscience de Lund, en Suède).

Des nanoparticules de sélénure de cadmium ont été injectées à des souris. Lorsqu'elles sont exposées à la lumière ultraviolette, ces nanoparticules deviennent lumineuses. Elles peuvent s'infiltrer dans les tumeurs cancéreuses et ainsi aider les chirurgiens à éliminer ces cellules sans endommager les cellules saines – donc, sans les effets négatifs de traitements actuels tels que les rayons et, plus particulièrement la chimiothérapie.

Ce type de thérapie fondé sur les NT peut être également expérimenté sur des patients humains. Mais quand ? Quel en sera le coût ? Quels coûts seront pris en compte ? Comment ces coûts seront-ils estimés ? Ce traitement sera-t-il efficace ? Sera-t-il moins coûteux que d'autres traitements disponibles actuellement ou dans un avenir proche ? Qui pourra en disposer ? Qu'en est-il du risque d'effets toxiques et d'autres effets secondaires indésirables ? [17, 18]

Il existe également des applications potentiellement dangereuses, du fait de la propriété qu'ont les nanoparticules (NP) de pénétrer dans la peau et de passer la barrière hémato-encéphalique. Nous savons que les NP et les nanomatériaux peuvent être absorbés dans l'organ-

me par l'intermédiaire de la bouche, de la peau et *via* le système respiratoire. Il a été montré que les nanotubes de carbone produisent une réaction toxique lorsqu'ils atteignent les poumons en quantité suffisante [10].

Les « points quantiques » (on nomme ainsi les structures matérielles d'échelle nanométrique) sont facilement absorbés par la peau. Cependant, tous les « points quantiques » fabriqués industriellement ne peuvent être considérés comme un groupe uniforme de substances. Ils peuvent procurer des bénéfices sociaux et économiques considérables, tels que l'administration ciblée de médicaments et une imagerie biomédicale *in vivo*. Mais, sous certaines conditions, ils peuvent également présenter des risques pour la santé humaine et l'environnement [9].

Les nanoparticules peuvent être absorbées dans le cerveau et les organes respiratoires [17,18]. Il convient de préciser davantage dans quelle mesure cela peut avoir des effets néfastes pour la santé. Toutefois, les effets cardiovasculaires d'une exposition pulmonaire aux tubes de carbone à paroi simple ont déjà été étudiés [29].

Il y a lieu de penser que certains types de nanotubes de carbone entraînent des effets analogues à ceux de l'amiante, selon leur structure et leur longueur. Des études menées sur les rats ont montré que les nanoparticules peuvent être absorbées par le nez, puis être transportées vers le cerveau, où elles s'accumulent. Il reste à étudier davantage dans quelle mesure cela peut s'avérer dangereux pour la santé. Si les NP peuvent franchir la

barrière hémato-encéphalique, il semble possible qu'elles puissent aussi être absorbées par le fœtus, *via* le placenta.

Les NP dans les cellules peuvent interagir de diverses manières avec les différents composants qu'elles contiennent, tels que les mitochondries, ce qui pourrait avoir un impact sur la production d'énergie dans les cellules. L'impact potentiel sur la santé de ces interactions est jusqu'ici à peu près inconnu, mais l'on a observé que l'ADN mitochondrial était endommagé par l'exposition à des nanotubes de carbone [29].

On sait également peu de choses à propos de l'impact sur la santé des produits cosmétiques contenant des nanoparticules. Une nouvelle réglementation sur les cosmétiques entrera en vigueur à partir de 2012, et le règlement « *Novel Food* » est toujours en cours de révision (NDR : ce règlement concerne les ingrédients ou aliments dont la consommation dans l'Union européenne a été négligeable ou inexistante jusqu'à présent). Par ailleurs, la frontière entre les utilisations offensives et défensives des armes n'est pas toujours limpide, et les NT peuvent bien sûr être utilisées à des fins militaires. Mais, ce qui n'est guère étonnant, il n'est pas facile de trouver les résultats de recherches sur cette question.

Certains cas montrent, malheureusement, que des chercheurs étudiant les dangers pour la santé liés aux microfibres et souhaitant publier les résultats de leurs recherches ont pu rencontrer des difficultés avec l'industrie concernée, notamment lorsque cette publication était perçue comme mettant en péril la relation de leur université avec l'industrie [26]. Espérons que de tels incidents ne se reproduiront pas, notamment en ce qui concerne la recherche sur les dangers des nanomatériaux pour la santé.

Environnement

L'utilisation de produits NT peut avoir un effet positif sur notre environnement. Il en existe de nombreux exemples. Une question décisive est de savoir si les nanoparticules dans les nanomatériaux sont libres ou liées, et ce qui se produit lors de la fabrication et de la destruction des nanomatériaux (par exemple, en matière de traitement des déchets). Parmi les exemples, citons notamment les nanomatériaux issus d'oxydes métalliques, tels que les particules de dioxyde de zinc utilisées comme filtres à UV dans les crèmes solaires et comme additifs dans les peintures, ainsi que les molécules complexes de carbone utilisés dans les *toners* des photocopieurs.

Les nanomatériaux étant plus légers et plus résistants que les matériaux traditionnels, l'impact positif sur l'environnement résulte, notamment, de l'économie de matières premières que permet la miniaturisation. Les produits fondés sur les NT facilitent les économies d'énergie, en permettant des réductions de poids et l'optimisation des fonctions. Un autre exemple impor-

tant est l'amélioration de la purification de l'eau et de l'air grâce à l'utilisation de nanofiltres [3]. Soulignons, incidemment, que cela peut avoir aussi un impact sanitaire considérable, en particulier dans les pays en développement, car de nombreuses maladies sont transmises par des virus et des bactéries présentes dans l'air et dans l'eau.

A titre d'exemple, mentionnons également la réduction de la quantité de certaines matières dangereuses, telles que les nitrites [28], ou l'utilisation de traitements de surface anticorrosion fondés sur les NT. La protection de l'environnement peut également être améliorée grâce à l'utilisation de catalyseurs d'échelle nanométrique, tant dans des procédés industriels que dans les programmes de purification de l'eau [15,16].

Une approche au cas par cas est nécessaire, lorsque l'on veut évaluer les implications potentielles sur l'environnement et la santé humaine des procédés et produits fondés sur les NT. Les généralisations sont délicates et dangereuses, dans ce domaine. En d'autres termes, il sera difficile de trouver une réponse exacte et précise à des questions telles que : quel sera l'impact des NT sur l'utilisation de matières premières et d'énergie ? Pour répondre à cette question, les quantités d'énergie et de matières premières nécessaires à la production des produits NT doivent d'abord être évaluées, ce qui est rarement fait avec précision. En outre, il faut envisager différents scénarios politiques et économiques.

Mais il existe également des utilisations de produits fondés sur les NT qui sont potentiellement dangereuses. L'utilisation de NP dans les pesticides et dans des emballages alimentaires doit être étudiée. Des études ont été effectuées sur des micro-organismes et sur différentes sortes de poissons, afin d'examiner les effets des nanomatériaux sur l'environnement. Ces études montrent, par exemple, que la présence dans l'eau d'oxyde de titane à l'échelle nanométrique a des effets nocifs (même à une concentration relativement faible). De même, un accroissement du taux de mortalité a été démontré par des études comparant l'impact de nanoparticules d'argent à celui de particules d'argent à l'échelle micrométrique, pour une même concentration [25].

Des nanoparticules d'argent sont utilisées pour la confection de produits textiles tels que les chiffons pour astiquer, les vêtements de sport, les chaussettes et les chemises. A chaque lavage, bon nombre de ces particules d'argent sont dissociées et évacuées dans les eaux usées, ce qui peut constituer un problème pour l'environnement. En outre, la quantité d'argent disponible n'est pas infinie. Pour l'Allemagne, le besoin a été estimé à huit tonnes par an (base 2007), dont 1,1 tonne pour un usage sous la forme de NP [25].

Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour analyser plus en détail les risques liés aux nanomatériaux auxquels sont exposés l'homme et l'environnement. En particulier, il serait utile d'en savoir davantage sur la stabilité et la longévité de ces nanomatériaux, de savoir si les nanoparticules peuvent se dissoudre ou

s'agglutiner, si elles sont solubles dans l'eau, si elles interagissent – et, dans ce cas, de quelle manière – avec des surfaces, d'autres nanomatériaux ou des produits chimiques. Leurs propriétés sont-elles stables ou évoluent-elles, dans des contextes différents ? Nous savons que, dans les systèmes biologiques, les propriétés de surface peuvent changer lorsque l'environnement change...

VALEURS ET OBJECTIFS

Afin d'être en mesure d'identifier plus précisément les préoccupations que suscitent ces perspectives et de formuler des recommandations sur ce qu'il conviendrait de faire, des valeurs et des objectifs doivent être fixés avec le plus de précision possible, et les conflits immédiats et potentiels entre ces valeurs et objectifs doivent être clarifiés.

Je considère que les valeurs constituent ici la notion fondamentale ; les objectifs doivent donc leur être subordonnés. Les parties concernées poursuivent certains objectifs pour la simple raison qu'ils jugent utile – intrinsèquement ou instrumentalement – d'atteindre ces objectifs ou de s'en approcher. Si l'expression « valeurs » paraît trop abstraite et philosophique, la question essentielle peut être formulée ainsi : le défi fondamental est de clarifier ce que nous souhaitons obtenir et ce que nous voulons éviter, aussi bien à court terme qu'à long terme.

Dans ces conditions, quelles sont donc les valeurs pertinentes ? Heureusement, nous n'avons pas à inventer la roue ! Pour initier les débats politiques sur les problèmes soulevés par les technologies nouvelles et émergentes (telles que la biologie synthétique, les nanotechnologies et les technologies de l'information et de la communication), l'on peut partir des valeurs inscrites dans certains documents internationaux [11,12].

Je fais ici référence à divers documents des Nations Unies, en particulier à la déclaration sur les droits de l'Homme ainsi qu'aux « Objectifs du millénaire ». Sur la scène européenne, nous disposons de certains documents de même nature, qui seront décrits de manière plus précise dans la suite de cet article.

Ces documents présentent l'avantage d'avoir été discutés lors de débats publics et d'avoir été conçus de manière à obtenir un soutien politique. Leur inconvénient réside dans le fait qu'ils manquent de clarté et peuvent, donc, faire l'objet d'interprétations différentes. Mais le côté positif de cette imprécision est qu'elle rend possible un débat vivant, sur le sens et l'implication de ces documents ; à cet égard, l'imprécision en fait des documents vivants. Soit dit en passant, il en va de même pour les objectifs de la médecine [8].

Dans bon nombre de ces documents, la dignité humaine est considérée comme la valeur de base sur laquelle reposent tous les autres droits et valeurs. Dès lors, il n'est peut-être pas déplacé de faire des commentaires sur cette valeur – ainsi que sur la sécurité, qui, tant du

point de vue des industriels que de celui des consommateurs, est d'une importance primordiale.

La dignité humaine

La dignité humaine en est venue à jouer un rôle central dans de nombreuses déclarations et instructions internationales, notamment en matière de droits de l'Homme, et elle figure dans diverses déclarations européennes et internationales, en particulier la Déclaration universelle des droits de l'Homme des Nations Unies (1948), la Convention européenne de sauvegarde des droits de l'Homme et des libertés fondamentales (1950), la Convention sur les droits de l'Homme et la biomédecine du Conseil de l'Europe (1996) et la Charte des droits fondamentaux de l'Union européenne (2000).

Des plaintes – au demeurant justifiées – ont été émises à l'encontre de l'obscurité et de l'imprécision de la notion de dignité humaine, émanant notamment (mais pas seulement) de tenants de la doctrine utilitariste (NDLR : représentée notamment par Jeremy Bentham et John Stuart Mill) – ce qui n'est guère surprenant, puisque la dignité humaine puise ses racines dans la tradition philosophique de Kant, qui s'oppose explicitement à la pensée utilitariste. Une des idées sous-jacentes est qu'il existe des choses qui ont une valeur économique, que l'on peut acheter et vendre, mais qu'il existe aussi des choses auxquelles on ne peut pas fixer de prix : la vie humaine appartient à cette dernière catégorie.

La signification positive de la notion de dignité humaine est peut-être quelque peu obscure, mais ses conséquences sur le mode négatif sont plus claires. En d'autres termes, la dignité humaine est la base justifiant et protégeant certains droits, et il n'est pas bien difficile d'imaginer ce qu'elle interdit : l'eugénisme, l'esclavage, la discrimination, la stigmatisation, la commercialisation, le clonage reproductif et les traitements dégradants, notamment la traite des êtres humains et leur instrumentalisation.

Sécurité

La sécurité est une autre valeur importante, dans l'examen de l'impact des produits fondés sur les NT, qui est pertinente tant en ce qui concerne l'environnement que la santé humaine [1, 6, 18]. Il a été soutenu que de longs nanotubes de carbone biopersistants pouvaient conduire à des pathologies similaires à celles entraînées par les fibres d'amiant [19]. Le problème est le suivant : pouvons-nous concevoir et modifier des nanoparticules pour éviter des réactions toxiques ? Quels sont les niveaux de risque acceptables ? Quelles sont les meilleures méthodes pour évaluer la sécurité ? Dans

quelle mesure pouvons-nous généraliser les études toxicologiques existantes ? Un petit nombre seulement de nanoparticules spécifiques ont été étudiées, dans un nombre limité de systèmes de test ... et il n'est pas possible d'extrapoler ces résultats à d'autres matériaux.

Pour la *Food and Drug Administration* des Etats-Unis (FDA), la sécurité des patients est de la plus haute importance. Mais la sécurité n'est pas une question dont la réponse aurait un caractère manichéen (sûr ou pas sûr ?). Il s'agit plutôt d'une question de degré, de « plus ou moins ». Les normes de sécurité dépendent également des maladies et des groupes cibles étudiés dans le cadre d'essais cliniques. Il existe des lacunes dans nos connaissances. Les normes de sécurité ne sont pas éthiquement neutres. La sécurité a un prix, en termes de temps et d'argent : si les normes sont très ambitieuses, le progrès peut prendre plus de temps... et les thérapies peuvent être plus coûteuses.

Ce qui reste à faire en matière d'analyse éthique, c'est préciser ces valeurs, les mettre en rapport les unes avec les autres et clarifier leur importance relative – en particulier s'il existe des conflits entre elles et si nous sommes dans l'impossibilité de les respecter toutes.

INQUIÉTUDES

Compte tenu des tendances actuelles et des valeurs qui ont été décrites ci-dessus, il n'est pas de difficile de préciser certaines inquiétudes suscitées par les NT (et d'autres technologies nouvelles ou émergentes). Les controverses sur la nature de ces inquiétudes et sur leur hiérarchisation doivent être attribuées à des désaccords sur la description des tendances actuelles, sur les valeurs qui doivent être poursuivies et leur importance relative, ou sur les deux.

Je proposerai de traiter ici d'inquiétudes relatives à la santé humaine, à l'environnement, à la liberté des consommateurs et à la justice globale, pour n'en citer que quelques-unes dont l'importance est évidente. Cette liste ne prétend pas à l'exhaustivité. D'autres types d'inquiétudes sont d'ailleurs abordés dans le rapport du GEE [1,6]. Je me concentrerai, dans cet article, sur des inquiétudes qui sont (ou devraient être) d'une importance primordiale tant pour l'industrie que pour les consommateurs – et donc, au moins indirectement, pour les décideurs.

Le rapport du GEE proposait une approche fondée sur l'analyse du cycle de vie. Dans certaines phases du cycle de vie (qui comprend notamment la fabrication, l'utilisation, la mise en décharge, le recyclage...), un produit peut avoir un impact positif sur l'environnement, parce qu'il permet des économies de matières premières et d'énergie, et/ou parce qu'il est plus léger et plus résistant que les produits similaires fabriqués grâce aux technologies conventionnelles. Dans d'autres phases de son cycle de vie, le même produit peut avoir un impact négatif sur l'environnement, par exemple lorsqu'il s'agit

de prendre en charge la montagne de déchets et que les NP ont peut-être été dispersées dans l'eau ou dans l'air. Dans ces conditions, une analyse systématique du cycle de vie, pour chaque produit fondé sur les NT, ou, pour chaque catégorie de ces produits, donnerait une vision plus claire de l'impact de ce (genre de) produit sur l'environnement et sur la santé humaine.

Compte tenu de l'importance de la dignité humaine et de la sécurité, les lacunes dans nos connaissances concernant l'impact sur la santé des NP et des agglomérats de NP, est une source d'inquiétude évidente. Un accident mortel (ou une série d'accidents mortels) dans lequel des produits fondés sur les NT seraient impliqués serait à la fois une tragédie pour les personnes touchées et une catastrophe pour l'industrie. On ne saurait surestimer l'impact négatif de la couverture médiatique de tels événements tragiques. Nous devons donc en savoir plus sur ces questions, et, pour cela, nous devons faire davantage de recherche. Les aliments nouveaux, les applications dans le domaine médical ou dans le secteur des cosmétiques sont, à l'évidence, trois domaines d'inquiétude en matière de santé humaine et de bien-être.

Une préoccupation secondaire, propre à ces deux points et liée à la valeur de liberté du consommateur, se rapporte aux conditions nécessaires pour que ce dernier puisse arrêter ses choix en toute connaissance de cause. Afin d'être en mesure, s'ils le désirent, de choisir entre des produits basés sur les NT et d'autres produits, les consommateurs doivent avoir le moyen de savoir quels produits (denrées alimentaires, cosmétiques, voitures, lunettes...) contiennent des NP ou des agglomérats de NP. C'est rarement le cas, aujourd'hui. Bien entendu, il existe des problèmes pratiques d'étiquetage, qui doivent être examinés par les autorités compétentes. Mais si les valeurs mentionnées au début du présent paragraphe sont vraiment considérées comme importantes, des moyens de surmonter ou de réduire les obstacles pratiques seront alors trouvés.

Une inquiétude, d'une nature différente, est liée aux Objectifs du millénaire des Nations Unies et à des questions de justice sociale et globale. Le développement rapide de technologies nouvelles et émergentes telles que les NT, donnera-t-il naissance à une « fracture des nanos » – s'ajoutant à la « fracture numérique » –, qui contribuerait à accroître encore davantage le fossé existant entre les pays en développement et les pays développés ? En d'autres termes, ce développement se fera-t-il au profit de personnes déjà riches dans les pays déjà riches, en laissant à la traîne les pays les moins développés ?

Des recherches sur la manière dont le grand public perçoit les risques associés (notamment) aux technologies nouvelles et émergentes montrent que la distance géographique est un facteur important : les risques liés aux événements et aux personnes proches de nous retiennent plus notre attention et sont davantage susceptibles de donner lieu à de grands titres dans les médias. Les facteurs culturels jouent également un rôle important

dans la perception du risque. Cela a une incidence sur la perception des risques de différentes applications possibles des NT et de la biologie synthétique. Les différences de perception du risque entre les différents groupes ethniques et les cultures ont fait également l'objet de recherches [14, 21, 22].

Un point intéressant issu de la recherche sur la perception des risques par le public est qu'il existe, à ce niveau, non seulement des différences ethniques et culturelles, mais aussi des différences entre les sexes. Les hommes blancs d'âge moyen ont tendance à être plus optimistes sur les avantages et sur la possibilité de faire face aux dommages potentiels que les femmes appartenant au même groupe d'âge... Dans les cultures où les hommes d'âge moyen sont les décideurs, cela soulève des questions intéressantes sur les points de vue qui sont pris en compte et sur la manière dont ils le sont.

Soulignons, par ailleurs, que les médias jouent un rôle important dans la mise en forme de la perception du public.

RECOMMANDATIONS

Un bon nombre de recommandations mentionnées ci-après ne sont pas spécifiques aux NT, mais s'appliquent également à d'autres technologies nouvelles et émergentes, telles que les TIC (technologies de l'information et de la communication) et la biologie synthétique [7]. Mais ici, je me concentrerai sur la manière de traiter les inquiétudes soulevées par les NT. Evidemment, ces recommandations s'adressent à des intervenants très différents : la Communauté européenne et ses agences telles que l'EMA (*European Medicines Evaluation Agency*, Agence européenne des médicaments), les industries impliquées dans la R&D et la fabrication de produits fondés sur les NT, les organes législatifs des États membres, les consommateurs et leurs organisations représentatives, etc.

Une approche fondée sur le principe de précaution constitue-t-elle une solution ? Une telle approche doit être clarifiée, afin d'éviter des malentendus. Le principe de précaution suppose l'existence d'un risque, l'éventualité d'un préjudice et une incertitude scientifique sur la survenue effective de ce préjudice. Mais le principe de précaution ne signifie pas pour autant « ne rien faire », car cela peut également comporter des risques. Il n'exige pas non plus une situation à « risque zéro ». Aucun progrès ne serait possible, si cette exigence était prise au sérieux et appliquée strictement.

Certains pays ont pris différentes initiatives, comme l'Allemagne [25]. En France, un débat animé a eu lieu (co-organisé par Vivagora et le Centre Pompidou), qui a été stimulé par des contributions écrites [4] et par des réunions publiques. L'Union européenne (UE) a publié son Code de bonne conduite pour une recherche responsable en nanosciences et en nanotechnologies. *Via* le septième programme-cadre (PC7), l'UE soutient des

recherches approfondies dans ce domaine (Nano2Life et autres projets) incluant également les aspects éthiques, juridiques et sociaux (ELSI, *ethical, legal, and social issues*). Les règlements en matière d'aliments et de produits cosmétiques sont en cours de révision, mais davantage encore doit être fait au niveau international, car le marché des produits fondés sur les NT est de dimension mondiale.

Les rapports du Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (SCENHIR, *Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks*) ont insisté sur le fait que les méthodes disponibles pour l'évaluation des technologies et des risques doivent être développées davantage, en raison de nombreuses incertitudes et lacunes de connaissances dans ce domaine [23, 24]. Les méthodes de mesure doivent également être optimisées. La recherche sur les facteurs pertinents pour la perception et la hiérarchisation des risques mérite également d'être soutenue.

Dans l'évaluation des technologies, nous devons envisager une vaste gamme de variables d'effet, et pas seulement les variables économiques ou celles intéressant la sécurité. Il convient de développer une évaluation interdisciplinaire des technologies qui soit prospective et à long terme, et inclue un large éventail de variables d'effet à caractère social. Une telle évaluation des technologies devra également être menée dans les pays en développement, en prenant en compte l'impact potentiel des technologies nouvelles et émergentes sur les structures culturelles, sociales et économiques de ces pays.

Une réunion interdisciplinaire, tenue en 2007, a conclu à la nécessité de l'élaboration d'une batterie de tests, afin de déceler les propriétés particulièrement dangereuses, et au caractère essentiel de la recherche visant à mieux comprendre les multiples paramètres influant sur la toxicité des nanoparticules [2].

L'industrie doit-elle prouver que les produits sont sans danger (ou répondent à certaines normes de sécurité) avant que ceux-ci ne soient mis sur le marché ? Ou bien appartient-il aux consommateurs de démontrer que les produits ne sont pas sûrs ? Dans le rapport du GEE sur la nanomédecine, nous avons préconisé la première solution : nous avons défendu l'idée que cela serait conforme à l'approche de précaution que la Communauté européenne a soutenue dans d'autres contextes. La législation relative aux nouveaux produits alimentaires et la réglementation concernant les produits cosmétiques sont actuellement en cours de révision. Nous devons donc en attendre le résultat.

Dans ce domaine, la ligne de front en matière de R&D évolue rapidement, et le tableau en quatre générations, présenté dans certains scénarios futuristes [20], peut contenir beaucoup de battage publicitaire, ce qui pose, en soi, des questions éthiques. Mais il appelle également le développement et la révision de certaines définitions de base des nanomatériaux. Si la recherche sur les nanomatériaux se développe sur de nouvelles pistes,

et si de nouveaux types de nanomatériaux sont fabriqués, cela doit être traduit dans les définitions adoptées au plan juridique. S'il doit y avoir des règlements, ce qui en relève doit être clairement identifié – tant pour l'industrie que pour les consommateurs. En d'autres termes, les scientifiques, l'industrie et les organismes de réglementation doivent utiliser les mêmes mots en leur demandant le même sens, afin d'éviter de susciter des malentendus et de créer la confusion.

Dans les domaines de recherche connaissant un développement rapide, la législation est souvent prématurée et rapidement obsolète. Une autre possibilité est la mise sous surveillance (*monitoring*), qui peut être combinée avec l'adoption d'une législation. La mise sous surveillance est une solution plus souple, qui peut prendre en compte plus aisément des changements intervenus en matière de R&D. Mais elle soulève également des questions subtiles, par exemple : qui surveille les surveillants ?

La publication des résultats, tant positifs que négatifs, est essentielle pour accélérer les progrès et promouvoir la transparence. Mais la publication permet également d'empêcher que d'autres ne soient soumis à des risques inutiles, lors de recherches cliniques futures, et d'éviter la répétition des mêmes erreurs.

Que savons-nous déjà ? Que reste-t-il à découvrir ? Comme il existe non seulement des lacunes dans nos connaissances (points inconnus connus comme tels), mais peut-être également de l'ignorance sur l'ignorance (points inconnus non connus comme tels), il est difficile de répondre à ces questions de manière complète et exhaustive. Mais il est évident qu'il y a beaucoup à apprendre avant que des produits ne soient mis sur le marché, et que beaucoup plus de recherche est nécessaire, en particulier sur les aspects de sécurité des produits fondés sur les NT.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] ALLHOFF (F.) & LIN (P.), *Nanotechnology & Society. Current and Emerging Ethical Issues*, Springer, (eds) 2008.
- [2] BALBUS (J.) et al, *Meeting Report : Hazard Assessment for Nanoparticles – Report from an Interdisciplinary Workshop*. Environmental Health Perspectives 115 (11):1664-1659, 2007.
- [3] BELLONA (C.), DREWES (J.E.), *Viability of a low-pressure nanofilter in treating recycled water for water reuse applications : a pilot-scale study*. Water Research 41(17):3948-58, 2007.
- [4] BENOIT BROWAEYS (D.), *Les Meilleurs des nanomondes*, Buchet-Chastel, Paris, 2009.
- [5] DUNCAN (R.), *Nanomedicine in Action*, *Pharmaceutical Journal* 273:485-488, 2004.
- [6] *European Group on Ethics, Ethical aspects of nanomedicine*. Opinion No 21. European Commission, Brussels, 2007.
- [7] *European Group on Ethics, Ethical aspects of synthetic biology*. Opinion No 25. European Commission, Brussels, 2009.
- [8] FLEISCHHAUER (K.) & HERMERÉN (G.), *Goals of Medicine in the Course of History and Today*. A&W International, Stockholm, 2006.
- [9] HARDMAN (R.), *A Toxicological Review of Quantum Dots : Toxicity depends on Physicochemical and Environmental Factors*. Environmental Health Perspectives 114 (2):165-172, 2006.
- [10] HELLAND (A.) et al, *Reviewing the Environmental and Human Health Knowledge Base of Carbon Nanotubes*. Environmental Health Perspectives 115(8):1125-1131, 2007.
- [11] HERMERÉN (G.), *European values, ethics and law*, *Jahrbuch für Wissenschaft und Ethik*, 11, 5-40, 2006.
- [12] HERMERÉN (G.), *European values – and others*. The European Review, 16 (3):373-385, 2008.
- [13] HERMERÉN (G.), *Challenges in the evaluation of nano-scale research*, *Nanoethics*, (1):223-237, 2007.
- [14] MACGREGOR (D.G.), FINUCANE (M.L.), & GONZALEZ-CABAN (A.), *The effects of risk perception and adaptation on health and safety interventions*. In Martin, W.E., Raish, C. & Kent, B. (Eds.), *Wildfire Risk : Human Perceptions and Management Implications* (pp. 142-155). Washington, DC : Resources for the Future, 2008.
- [15] MACKENZIE (K.) et al, *Nano-Catalysts and Colloidal Suspensions of Carbo-Iron for Environmental Application*. Nanotech (1). Technical Proceedings of the 2007 NSTI Conference and Trade Show, chapter 7:639-642, 2007.
- [16] MACKENZIE (K.) et al, *Colloidal Activated Carbon and Carbo-Iron – Novel Materials for in situ Groundwater Treatment*. Global NEST Journal 10(1):54-61, 2008.
- [17] OBERDÖRSTER (G.) et al, *Nanotoxicology : An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles*. Environmental Health Perspectives. 113(7): 823-839, 2005.
- [18] OECD. *Safety of Manufactured Nanomaterials*. (<http://www.oecd.org/env/nanosafety>)
- [19] POLAND (C.A.) et al, *Carbon nanotubes introduced into the abdominal cavity of mice show asbestos-like pathogenicity in a pilot study*. Nat Nanotechnol. 3(7):423-428, 2008.
- [20] RENN (O.) And ROCCO (M.), *Nanotechnology Risk Governance*. International Risk Governance Council White Paper No. 2, 2006
- [21] SLOVIC (Paul), *Perception of Risk*. Earthscan, 2000.
- [22] SLOVIC (Paul) et al, *Affect, Risk and Decision Making*. Health Psychology 24 (4 Suppl) S35-40, 2005.
- [23] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR), *Opinion on the Appropriateness of existing methodologies to assess the potential risks associated with engineered and adventitious products of nanotechnologies*. EU Commission SCENIHR/002/05, 2005.

- [24] Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) Risk Assessment of Products on Nanotechnologies, 2009. (http://ec.europa.eu/health/ph_risk/cok-committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_023.pdf)
- [25] Umwelt Bundes Amt, Nanotechnik für Mensch und Umwelt. Chancen fördern und Risiken Mindern. Dessau-Rosslau, 2009.
- [26] WASHBURN (J.), University Inc. *The Corporate Corruption of Higher Education*. New York: Basic Books, 2006.
- [27] Woodrow Wilson International Center for Scholars, *The Project on Emerging Nanotechnologies*, 2009 (http://nanotech-project.org/inventories/consumer/analysis_draft)
- [28] ZHANG (H.) et al, *Synthesis of nanoscale zero-valent iron supported on exfoliated graphite for removal of nitrate*. Trans. Nonferrous Met. Soc. China 16(2006):345-349, 2006.
- [29] ZHENG (L.) et al, *Cardiovascular Effects of Pulmonary Exposure to Single-Wall Carbon Nanotubes*. Environmental Health Perspectives 115 (3): 377-382, 2007.