

Les nanoparticules de synthèse et le principe de précaution

Une analyse éthique

Andreas Bachmann, Ethik im Diskurs

1. Introduction

La nanotechnologie est actuellement communément considérée comme l'une des technologies clés du XXI^e siècle. On lui attribue un potentiel énorme, non seulement du point de vue scientifique, mais aussi économique; elle est néanmoins encore assez peu connue du grand public. Cette méconnaissance est notamment due au fait qu'elle s'est développée, ces dernières années, de manière continue mais peu spectaculaire. Il n'y a pas eu d'avancée révolutionnaire ayant fait la une des journaux, ni d'incidents graves ou d'échecs retentissants.

Le problème que pose le développement de cette technologie est que l'on trouve sur le marché de plus en plus de nanoproducts sans que les consommateurs en soient conscients et sans que personne n'ait de vue d'ensemble sur ces produits dans la mesure où ils ne sont pas soumis à autorisation ni à étiquetage.

Cette situation pose problème en particulier parce que les premiers essais toxicologiques indiquent que les nanoparticules peuvent être nocives pour l'homme et pour l'environnement. Une évaluation éthique des risques liés à la fabrication et à l'utilisation de ces particules s'avère donc urgente.¹

Je vais soutenir la thèse selon laquelle il y a lieu que cette évaluation s'appuie sur le principe de précaution. Ce principe signifie que des mesures préventives appropriées, limitant la liberté de la recherche et des entreprises, se justifient lorsqu'une (nouvelle) technologie menace de causer un dommage grave et irréversible à l'homme et à l'environnement, et ceci même lorsque l'on ne dispose pas encore d'une analyse des risques scientifiquement fondée.

Il est incontestable qu'il existe des incertitudes et des lacunes scientifiques concernant les éventuels effets néfastes des nanoparticules. La recherche en matière de risques a toutefois progressé ces dernières années.² Elle est arrivée à un point où l'on peut faire une estimation provisoire du potentiel de risque, du moins pour certaines nanoparticules. Les premiers résultats de ces estimations suggèrent que les nanoparticules de synthèse, telles que les nanotubes et les buckyballs (fullerènes), présentent des risques importants pour la santé humaine et la préservation d'un environnement intact. Cette analyse ne fait toutefois pas l'unanimité. Certaines voix s'élèvent aussi pour dire que, bien que l'on puisse reconnaître quelques signes d'un danger potentiel de ces nanoparticules en particulier – ainsi que d'autres particules – pour l'homme et l'environnement, il n'y a néanmoins aucune raison de s'inquiéter sérieusement (cf. Brune et al. 2006:376). Je vais toutefois démontrer, en m'appuyant sur quelques études toxicologiques récentes, qu'il existe des indices laissant à penser que ce deuxième point de vue n'est pas raisonnable.

S'il est vrai que les nanoparticules de synthèse – du moins certaines d'entre elles – peuvent causer des dommages graves à l'homme et à l'environnement et que, de ce fait, l'application du principe de précaution se justifie, se pose alors la question des mesures préventives nécessaires. En fait, tout dépend de qui est exposé aux risques, et de quelle manière. Le problème se pose en termes différents selon qu'il s'agit de chercheurs manipulant, dans leurs laboratoires en milieu confiné, des quantités relativement faibles de nanoparticules, ou si ce

¹ L'auteur tient à remercier chaleureusement Ludwig K. Limbach, Luis Tiefenauer et Olivier Sanvido pour les informations complémentaires qu'ils ont fournies ainsi que pour leurs commentaires critiques.

² Vous trouverez des liens vers les articles les plus récents dans ce domaine sur le site de l'International Council on Nanotechnology ICON (http://icon.rice.edu/research_archive.cfm?mode=yearly&year=2006).

type de particules est fabriqué par tonnes dans des usines, ou encore si des tiers non concernés, par exemple des consommateurs, entrent en contact avec ces particules par le biais de nanoproducts. Suivant le type d'exposition au risque et selon qu'il s'agit de nanoparticules liées ou de nanoparticules non liées, les mesures à prendre conformément au principe de précaution diffèrent: il peut s'agir de mesures de précaution visant à minimiser le risque mais aussi d'interdictions. L'élément important est toutefois que ces mesures sont provisoires et qu'elles ne se justifient qu'au vu de l'état des connaissances scientifiques du moment. De nouvelles évaluations et des révisions, le cas échéant, doivent être effectuées si de nouvelles connaissances sur les risques mettent clairement en évidence que les dangers présentés par les nanoparticules de synthèse pour l'homme et l'environnement sont sensiblement différents de ce que l'on supposait jusqu'alors.

2. Qu'est-ce que des nanoparticules de synthèse et quelle est leur importance pour la nanotechnologie et la nanobiotechnologie?

Il n'existe jusqu'à présent pas de définition unanimement acceptée de la nanotechnologie. Dans le présent contexte, il suffit d'indiquer que cette technologie englobe trois aspects:

1. la taille: la nanotechnologie concerne des structures à l'échelle du nanomètre, qui va de 1 à 100 nm (1 nm correspond à un milliardième de mètre);
2. l'exploitation d'effets nouveaux se manifestant dans le domaine du nanomètre;
3. la fabrication et/ou la manipulation ciblée de structures à l'échelle nanométrique.

S'agissant de la taille, les matériaux à deux ou trois dimensions dans le domaine nanométrique jouent un rôle prépondérant dans la nanotechnologie. Ces matériaux – les nanoparticules – se distinguent par deux propriétés qui en font des éléments particulièrement intéressants pour de nouvelles applications et de nouveaux produits:

1. par rapport à leur volume, leur surface (par unité de masse) est supérieure à celle de particules non nanométriques du même matériau, ce qui leur confère une réactivité plus grande;
2. lorsqu'elles sont inférieures à 50 nm, les nanoparticules sont régies par les lois de la physique quantique et présentent par conséquent des effets quantiques.

Ces caractéristiques expliquent pourquoi un matériau peut avoir un comportement très différent dans le domaine nanométrique: il peut changer de couleur ou devenir tout à coup soluble ou conducteur. Par exemple: le dioxyde de titane nanométrique – au contraire du dioxyde de titane non nanométrique – est non seulement transparent mais il bloque aussi très efficacement les rayons UV, raison pour laquelle il est utilisé dans les crèmes solaires.³

Nous n'examinerons pas en détail ci-après toutes les nanoparticules, mais uniquement une classe particulière, celle des nanoparticules de synthèse (en anglais «engineered nanoparticles» ou «manufactured nanoparticles»). Les nanoparticules de synthèse se caractérisent par le fait qu'elles sont fabriquées dans un but bien précis; en d'autres termes, leurs propriétés spécifiques sont destinées à être utilisées à fins bien définies. Elles doivent être distinguées a) des nanoparticules générées par des processus de combustion naturels, tels que les feux de forêt, et b) des nanoparticules qui sont des produits secondaires involontaires résultant de processus de combustion induits par l'homme, par exemple lorsqu'il fume une cigarette.⁴

³ Le dioxyde de titane non nanométrique a également la capacité de bloquer les rayons UV; toutefois, il n'est pas transparent mais blanc.

⁴ Dans les cas a) et b) on parle en général plutôt de particules ultrafines (poussières fines), le terme «nanoparticules» étant utilisé en premier lieu pour désigner les nanoparticules de synthèse.

Les principales nanoparticules de synthèse à deux dimensions spatiales dans le domaine nanométrique sont les nanotubes. Ce sont des arrangements tubulaires d'atomes de carbone ayant un diamètre de quelques nanomètres. Les nanotubes sont considérés comme le matériau du futur en raison de leurs propriétés exceptionnelles. Ils sont en effet cent fois plus solides et cinq à six fois plus légers que l'acier, tout en étant flexibles et déformables; ce sont également d'excellents conducteurs de chaleur et d'électricité. Ils pourraient être utilisés, par exemple, pour la fabrication de microprocesseurs, d'affichages ou de senseurs, mais aussi en tant qu'accumulateurs d'hydrogène. Ils pourraient en outre bientôt trouver des applications dans de nombreux matériaux de construction, dans la construction aéronautique et automobile ainsi que dans les implants osseux et les articulations artificielles. Actuellement, ils sont déjà utilisés dans des balles de tennis et dans les raquettes de tennis extrêmement légères et stables ainsi que dans des piles.

Il existe toute une série de nanoparticules à trois dimensions spatiales dans le domaine nanométrique, en particulier:

- les Buckminsterfullerènes: ils sont nommés ainsi d'après l'architecte américain Buckminster Fuller, célèbre pour ses dômes géodésiques, et sont, avec le graphite et le diamant, la troisième forme de carbone pur. Il s'agit d'un groupe de molécules de carbone en forme de « cage », dont la principale est une molécule C_{60} ressemblant à un dôme géodésique. Cette molécule d'environ 1 nm de diamètre est aussi appelée « buckyball ». De tels fullerènes pourraient notamment être utilisés en tant que véhicules d'administration de médicaments, autrement dit pour transporter des substances actives jusqu'à la cible visée, ou dans des circuits électroniques;
- les points quantiques: ce sont des particules extrêmement petites de matériaux semi-conducteurs de forme pyramidale. Ils sont utilisés entre autres dans les écrans plats à haute résolution de télévision ou d'ordinateur, dans des piles très légères et de longue durée ou dans des systèmes laser d'un genre nouveau. En imagerie moléculaire, ils sont utilisés pour rendre visibles différentes molécules. Ils doivent cependant être pourvus à cet effet d'un revêtement approprié car leur cœur est généralement constitué de composés de métaux lourds toxiques, tels que le séléniure de cadmium;
- le noir de carbone (« carbon black »): il est déjà utilisé depuis un certain temps comme matière de charge pour renforcer les pneus en caoutchouc;⁵
- les oxydes de métaux, tels que le SiO_2 , le TiO_2 , l' Al_2O_3 , le ZnO , le Fe_2O_3 ou le Fe_3O_4 : ils peuvent être utilisés pour les applications les plus diverses, actuellement surtout pour améliorer des produits existants, tels que les cosmétiques, les crèmes solaires ou les emballages de denrées alimentaires;
- les métaux, tels que l'or ou l'argent: de par leur action antibactérienne, les nanoparticules d'argent sont utilisées en médecine pour éviter des infections (traitement des plaies, cathéters avec un revêtement en nanoargent, etc.); des tests sont en cours afin de déterminer si le nanoargent peut être utilisé pour le traitement de l'eau potable;
- les semi-conducteurs, tels que le tellure de cadmium (CdTe) ou l'arséniure de gallium (GaAs).

Les possibilités d'application mentionnées montrent déjà clairement l'importance des nanoparticules de synthèse pour la nanotechnologie en général et pour la nanobiotechnologie en particulier. Les nanoparticules de synthèse jouent un rôle capital en nanobiotechnologie, technologie qui associe la recherche sur des systèmes biologiques et non biologiques à l'échelle nanométrique avec comme objectif des applications dans de nombreux domaines. On attribue notamment un grand potentiel à la technique de délivrance « delivery ». L'idée à

⁵ Cependant, il s'agit là d'un sujet controversé, certains chercheurs considérant que le noir de carbone n'est pas une nanoparticule de synthèse.

la base de cette technique est aussi simple que séduisante. Elle consiste à utiliser les nanoparticules en tant que moyen de transport pour amener les substances actives les plus diverses très précisément à l'endroit désiré, où elles seront libérées de manière contrôlée. Actuellement des travaux intensifs en recherche médicale visent à développer des systèmes de délivrance de médicaments (« drug delivery »), qui permettraient de réaliser le vieux rêve de l'administration ciblée (« targeting »), en d'autres termes de faire un pas de plus en direction d'une utilisation très précisément ciblée des substances actives, assurant ainsi une meilleure sécurité et une plus grande efficacité des médicaments. Toutefois, on peut aussi imaginer d'utiliser cette technique dans d'autres domaines. Une fois mise au point, elle pourrait être appliquée au transport de vaccins, de pesticides, d'additifs dans les denrées alimentaires ou de substances toxiques dans des armes biologiques.

Les nanoparticules de synthèse présentent donc un grand potentiel d'application. Jusqu'où ce potentiel pourra-t-il être épuisé et combien de temps cela prendra-t-il? Ce sont là des questions auxquelles on n'a pas de réponse pour l'instant. Dans ce contexte, il est important de ne pas envisager uniquement les avantages mais aussi les risques liés à l'utilisation des nanoparticules de synthèse. Car sur le long terme, la nanotechnologie ne sera acceptée par la société que si les produits qui en sont issus sont non seulement considérés comme utiles, mais aussi comme sûrs. Du point de vue éthique, il est indiqué d'effectuer dès à présent, à un moment où la nanotechnologie n'en est qu'à ses débuts, une évaluation des risques des nanoparticules de synthèse. Car on prévoit déjà que de plus en plus de nanoproduits, dont on ne peut dire avec certitude s'ils sont ou non inoffensifs pour l'homme et l'environnement, arriveront sur le marché ces prochaines années.

Si l'on considère le potentiel de risque des nanoparticules de synthèse, il y a lieu de soulever trois aspects:

- 1) s'agissant des risques de ces particules pour l'homme et l'environnement, il existe encore de grandes incertitudes et des lacunes importantes dans les connaissances;
- 2) toutefois, les connaissances sur les risques se sont étoffées ces dernières années, surtout grâce à des études *in vitro* et *in vivo* qui permettent une estimation provisoire fondée sur des bases empiriques, et de ce fait prudente. Ces études montrent toujours plus clairement que certaines nanoparticules de synthèse du moins peuvent provoquer des dommages importants. En même temps, il ressort aussi clairement que l'on ne peut pas se cantonner à des affirmations générales mais qu'il faut analyser séparément chaque particule;
- 3) si l'on considère les caractéristiques essentielles des nanoparticules de synthèse, en particulier leur taille et le rapport entre la surface et le volume ainsi que la réactivité accrue qui y est associée, les résultats des études de risque déjà réalisées ne sont guère surprenants.

J'aimerais ci-après commenter ces trois aspects de manière plus détaillée, ceci surtout afin de dresser un panorama de ce que l'on sait déjà sur la base d'études scientifiques. Cet élément est important dans la mesure où l'application du principe de précaution ne peut se justifier que s'il existe des indices empiriques suggérant que les nanoparticules de synthèse peuvent effectivement causer des dommages graves.

Les nanoparticules se distinguent par leur surface importante par rapport au volume, synonyme d'une réactivité élevée. En règle générale plus une substance est réactive, plus elle est toxique. La prudence est toutefois de mise car, outre la surface, d'autres facteurs, tels que la taille, la forme, la structure superficielle ou la solubilité, sont susceptibles d'influencer la toxicité (cf. Brunner et al. 2006). On ne peut donc pas conclure qu'une particule est toxique du simple fait qu'il s'agit d'une nanoparticule. À l'inverse, il serait curieux, au vu des caractéristiques mentionnées, que des nanoparticules s'avèrent totalement inoffensives. Il faut raisonnablement partir du principe que ces particules présentent un risque potentiel et qu'il y a

lieu de les utiliser avec prudence ne serait-ce que pour cette raison, mais aussi parce qu'on ne peut pas extrapoler les effets des nanoparticules à partir des effets connus des mêmes substances dans les domaines micro- et macrométrique.

Il est toutefois important de se garder de généralisations précipitées. Il faut dans tous les cas examiner spécifiquement si les nanoparticules sont effectivement toxiques, et si oui, à quel degré.⁶ Les connaissances à cet égard sont très lacunaires: on ne sait pas avec certitude quelles nanoparticules peuvent être nocives pour l'homme et l'animal, et quelles sont les dimensions particulières et les doses qui entraîneraient ces effets.⁷ On en sait encore moins sur les effets que pourrait avoir une libération de nanoparticules dans l'environnement – sur les plantes, les microorganismes, les processus des écosystèmes – et ses répercussions sur la chaîne alimentaire. Aussi existe-t-il un large consensus sur la nécessité d'intensifier la recherche sur les risques dans ces domaines.

Cela ne signifie pas pour autant que nous nous trouvons dans une situation d'ignorance totale, bien au contraire: ces dernières années, nos connaissances concernant les risques présentés par les nanoparticules de synthèse se sont approfondies grâce au nombre croissant d'études toxicologiques. Bien que ces études n'apportent pas des réponses à toutes les questions, elles montrent néanmoins suffisamment clairement que les nanoparticules de synthèse – du moins certaines d'entre elles – sont à même de provoquer des dommages importants.

3. Risques⁸ des nanoparticules de synthèse pour l'homme et l'environnement: état des connaissances

3.1 Nanoparticules liées contre nanoparticules non liées

L'élément fondamental pour une analyse des risques présentés par les nanoparticules en général, et les nanoparticules de synthèse en particulier, est la différenciation entre nanoparticules fermement liées et nanoparticules non liées ou libres. Les nanoparticules liées sont solidement intégrées dans un support, donc isolées de l'environnement. On peut citer à titre d'exemple les matériaux ayant des propriétés autonettoyantes ou antiadhésives. Comme le dit Niels Boeing (Boeing 2005:35): certes, ce sont des nanoparticules qui confèrent de telles propriétés à ces matériaux, mais ces nanoparticules sont ancrées dans une matrice en matière synthétique et sont, de ce fait, inoffensives pour l'homme et l'environnement. Les nanoparticules non liées se comportent en revanche différemment. Elles peuvent interagir avec des cellules, provoquant ainsi des dommages. Ceci s'applique avant tout – mais pas uniquement – aux nanoparticules de synthèse, telles que les buckyballs et les nanotubes, qui ne sont pas liées dans une matrice.

Lorsqu'il sera question, dans ce qui suit, de nanoparticules de synthèse, il s'agira bien de ce type de particules libres ou non liées. Je pars du principe qu'elles présentent les caractéristiques supplémentaires suivantes:

⁶ Actuellement, on ne sait pas encore très bien si certaines particules ont des comportements similaires, et si oui, desquelles il s'agit, et s'il est possible de classer les nanoparticules en classes de risque qui permettraient, dans certains cas, de ne pas avoir à effectuer des contrôles individuels longs et coûteux.

⁷ Outre la catalyse de réactions chimiques non désirées, telles que la formation de radicaux libres, les effets toxiques concernent deux autres aspects: d'une part la libération et incorporation d'ions toxiques de particules incorporées (« release and incorporation of toxic ions from incorporated particles ») et, d'autre part, des effets mécaniques analogues à ceux des fibres d'amiante (« mechanical effects in analogy to asbestos fibres ») (Tiefenauer 2007:15).

⁸ Un risque particulier, qui ne sera pas développé ci-après, est le risque d'explosion. La réactivité superficielle plus élevée et le rapport accru entre la surface et le volume augmentent le risque d'explosion des nanopoussières (cf. Renn/Roco 2006:43).

- elles se trouvent sous une forme non agglomérée – sauf mention contraire – parce que c’est principalement sous cette forme qu’elles présentent un intérêt pour la nanotechnologie;
- elles n’ont pas de revêtement, pour autant que le revêtement constitue une mesure visant à réduire la toxicité qui serait présente en l’absence de revêtement;
- elles ne sont pas solubles ni biodégradables parce qu’elles pourraient sinon se dissoudre ou de dégrader avant de déclencher une réaction toxique.

Les particules bioactives de ce type sont susceptibles d’endommager les cellules de trois manières:

1. elles provoquent un stress oxydatif dans la cellule ou directement à la surface de celle-ci. Cela signifie, comme le dit Niels Boeing, que des radicaux libres, c’est-à-dire des molécules comportant un électron libre et qui sont de ce fait très réactives, se forment. Le résultat est que la concentration de calcium augmente dans la cellule, ce qui pourrait activer une transcription non désirée de gènes dans le noyau cellulaire. Les protéines ainsi transcrites peuvent provoquer des inflammations dans les tissus (Boeing 2005:37);⁹
2. des récepteurs sont activés au niveau de l’enveloppe cellulaire parce que des atomes de métal se détachent des nanoparticules. Les conséquences seraient les mêmes que dans le premier cas;
3. la nanoparticule est avalée telle quelle par la cellule et parvient, par exemple, dans les mitochondries, qui sont les usines des cellules. Le travail des mitochondries est sensiblement dérangé par la présence de ces particules (Boeing 2005:37).

3.2 Risques des nanoparticules de synthèse pour l’homme et l’animal

Examinons d’abord les risques que présentent les nanoparticules de synthèse pour la santé de l’homme et des animaux. En ce qui concerne les voies d’entrée des nanoparticules dans le corps humain ou de l’animal, les études *in vitro* et *in vivo* disponibles permettent de dresser le tableau suivant (cf. Borm et al. 2006):

- les nanoparticules peuvent entrer pratiquement sans restriction dans l’organisme. Elles peuvent parvenir dans la circulation par la respiration (poumon) et par le tractus digestif, puis atteindre à partir de là tous les organes (foie, rate, moelle osseuse, etc.);
- une controverse existe quant à l’absorption percutanée. Si la peau est intacte, ceci semble pratiquement impossible, mais on ne sait pas très bien ce qui peut se produire lorsque la peau est endommagée, par exemple par un eczéma. Il existe en outre certains indices suggérant que les nanoparticules pourraient passer à travers la peau et parvenir dans le système lymphatique et dans les ganglions;
- certaines nanoparticules peuvent, dans des conditions particulières, passer la barrière sang-cerveau;
- les nanoparticules peuvent parvenir directement dans le cerveau en passant par les fibres olfactives des muqueuses nasales; on ne sait toutefois pas comment elles se comportent dans le cerveau;
- les nanoparticules peuvent passer à travers les membranes des cellules et entrer dans le noyau cellulaire.

Même si l’on ne sait pas encore de manière précise comment les nanoparticules (insolubles) se comportent dans le corps humain, le fait qu’elles soient en mesure de se disperser dans le corps entier, d’interagir avec des cellules et de passer la barrière sang-cerveau, sont des raisons supplémentaires pour user de prudence et de précaution pour ce qui est de leur

⁹ Cf. à ce sujet Limbach et al. 2007.

utilisation. Certes, les nanoparticules naturelles, tout comme les nanoparticules de synthèse, ont tendance à s'agglomérer, en d'autres termes à former des agglomérats en grappe de raisin. Lorsque la taille des agrégats atteint ou dépasse un micromètre, leur réactivité diminue; ils sont en outre trop grands pour passer du poumon dans la circulation sanguine. Les effets toxiques liés à la faible dimension et à la réactivité élevée n'ont alors plus d'importance. Seulement voilà: les nanoparticules de synthèse ne peuvent le plus souvent remplir le but auquel elles sont destinées que si elles ne s'agglomèrent pas. On essaie donc généralement d'empêcher cette agglomération par un revêtement particulier, ce qui signifie bien évidemment que ces particules restent réactives et extrêmement mobiles, donc potentiellement toxiques (même si leur toxicité peut être réduite par le revêtement).

Des études toxicologiques *in vivo* n'ont jusqu'à présent été menées que chez des rats, des souris et des poissons. Ces études montrent néanmoins clairement que les nanoparticules de synthèse peuvent causer des dommages graves:

- différentes études ont montré que les fullerènes et les nanotubes entraînaient des états inflammatoires au niveau des poumons lorsqu'ils étaient inhalés à une certaine dose (élevée) (cf. Bottini et al. 2006, par exemple). Ceci s'applique toutefois aussi à des substances telles que l'or, le noir de carbone ou le TiO_2 ,¹⁰ qui sont normalement inoffensives mais qui, sous forme nanométrique, peuvent avoir un effet toxique;
- l'expérience bien connue – mais néanmoins controversée – d'Eva Oberdörster portant sur des achigans (perches noires d'Amérique) a révélé que l'absorption de buckyballs par ces poissons pouvait entraîner des dommages cérébraux sévères en l'espace de 48 heures (cf. Oberdörster 2004);
- une étude réalisée en 2006 (cf. Long et al. 2006) montre que la réactivité accrue du dioxyde de titane de taille nanométrique peut endommager les microglies ayant pour fonction de protéger le système nerveux central (stress oxydatif consécutif à la formation de radicaux libres);
- une étude chinoise plus récente (Chen et al. 2006) portant sur des souris a montré que les nanoparticules de cuivre induisaient des effets toxicologiques sévères et des atteintes importantes au rein, au foie et à la rate chez les souris expérimentales, alors que ceci n'était pas le cas avec des microparticules de cuivre. D'une manière générale, ces nanoparticules sont imputées à la classe toxique 3 (modérément toxique), à la différence du cuivre de taille micrométrique qui n'est pratiquement pas toxique. La toxicité était en outre liée au sexe: pour une masse de particules similaire, les souris mâles présentaient des manifestations toxiques plus importantes que les souris femelles.

Bien sûr, se pose ici la question de savoir si, et dans quelle mesure, ces résultats peuvent être extrapolés à l'homme. Il semble qu'une telle extrapolation puisse poser problème car le processus d'inhalation de particules fonctionne différemment chez le rat que chez l'homme et d'autres gros mammifères, par exemple: les rats semblent réagir de manière plus sensible mais être également à même de dégrader les particules plus rapidement grâce à un système immunitaire plus actif. Les quelques mesures directes effectuées chez l'homme ont toutefois montré que du moins certains groupes à risque, tels que les asthmatiques, réagissaient de manière plus sensible à des nanoparticules (libérées de manière non intentionnelle) que les personnes en bonne santé.

Différentes expériences *in vitro* sur des cellules humaines semblent en outre indiquer que les nanoparticules de synthèse, en particulier les nanotubes et les buckyballs, peuvent causer

¹⁰ « For poorly soluble, low-toxicity dusts such as titanium dioxide, smaller particles in the nanometer-size range appear to cause an increase for lung cancer in animals on the basis of particle size and surface area » (Schulte 2007:6).

des atteintes graves à la santé. Il s'est avéré qu'à une concentration donnée de buckyballs, 50 % des cellules de peau humaine en culture mourraient.¹¹

Des chercheurs de l'EMPA ont découvert en 2006 que les nanotubes pouvaient être particulièrement nocifs pour les cellules pulmonaires lorsqu'ils s'agglomèrent pour former de grandes aiguilles. Le biologiste cellulaire Peter Wick indique (EMPA-News 2/2006) que ces agglomérats ressemblent à des fibres d'amiante, tant par leur aspect que du point de vue de leur toxicité, et qu'il semble donc qu'ils ne soient pas totalement inoffensifs.

Enfin, il y a encore lieu de mentionner que les points quantiques (sans revêtement) présentent aussi des effets toxiques et qu'ils peuvent endommager les cellules. Ces effets sont dus au fait que leur noyau est constitué de composés de métaux lourds, tels que le sélénium de cadmium.¹²

En résumé, on peut affirmer que certains effets toxiques des nanoparticules de synthèse, telles que les buckyballs, les nanotubes ou les points quantiques, ont pu être mis en évidence dans des essais chez l'animal et sur des cellules humaines. On n'a toutefois pas encore pu déterminer de manière suffisamment claire dans quelle mesure ces particules peuvent avoir des effets nocifs sur la santé humaine. Sur la base des essais *in vitro* et *in vivo* déjà réalisés, on peut raisonnablement admettre qu'elles sont également dangereuses pour l'homme et qu'elles peuvent causer des dommages graves similaires à ceux mis en évidence chez l'animal et sur des cellules humaines en culture, surtout si elles pénètrent dans le corps en grandes quantités.¹³

3.3 Risques des nanoparticules de synthèse pour l'environnement

S'agissant des effets des nanoparticules de synthèse sur l'environnement, notamment de leur écotoxicité et des conséquences pour la chaîne alimentaire, on ne dispose encore que de peu de connaissances sûres. Certaines de ces connaissances sont néanmoins inquiétantes:

- une étude menée en 2005 a notamment montré que certaines nanoparticules d'argile qui sont déjà utilisées actuellement peuvent perturber la croissance des racines de certaines plantes (cf. Yang/Watts 2005);
- certains indices suggèrent une bioaccumulation des buckyballs; en d'autres termes, ils auraient tendance à s'accumuler dans l'organisme et à se concentrer de plus en plus par le biais de la chaîne alimentaire (cf. Locatelli et al. 2005:32);
- on sait que les nanoparticules ont tendance à s'agglomérer. Or, les agglomérats de particules telles que les buckyballs peuvent être toxiques (dans l'eau) pour les bactéries (cf. Borm et al. 2006, Locatelli et al. 2005:30);

¹¹ Si le revêtement est constitué de certaines molécules particulières, les buckyballs sont en revanche moins toxiques. Le revêtement empêche que les molécules d'oxygène et d'eau ainsi que les ions puissent interagir avec les radicaux des atomes de carbone dans les buckyballs.

¹² La cytotoxicité ne semble pas non plus pouvoir être totalement neutralisée par le revêtement. Se pose en outre la question de savoir ce qui se passe lorsque des points quantiques restent dans le corps et que leur revêtement se dégrade.

¹³ Un autre danger réside dans le fait que la surface totale et le nombre total des particules peuvent entraîner une surstimulation des macrophages – les cellules du système immunitaire qui mangent les corps étrangers – donnant lieu à une surcharge (« overload »).

Cette surcharge entraîne des réactions de stress pouvant induire une inflammation des tissus environnants. Ou pire encore: les macrophages se replient dans des tissus profonds et ne sont plus disponibles à l'endroit où ils devraient agir. Les particules qui arrivent ensuite ne sont alors plus éliminées et peuvent développer entièrement leur action réactive. D'autres agents qui pénètrent également dans l'organisme, notamment des bactéries, ne sont plus non plus attaqués efficacement (Swiss Re 2004:16).

Oberdörster et al. 2005:824 relèvent également. « The extraordinarily high number concentrations of NSPs per given mass will likely be of toxicologic significance when these particles interact with cells and subcellular components. Likewise, their increased surface area per unit mass can be toxicologically important if other characteristics such as surface chemistry and bulk chemistry are the same. »

- les nanoparticules d'argent, qui semblent inoffensives pour l'homme, peuvent être extrêmement toxiques pour les bactéries utiles et les organismes aquatiques (cf. Weiss 2006);
- le dioxyde de titane de taille nanométrique est hautement réactif: il génère des radicaux libres « excités » chimiquement, susceptibles de détruire des bactéries. C'est pourquoi certains experts s'inquiètent des effets de ces particules sur l'écologie des sols, au cas où elles parviendraient en grandes quantités dans l'environnement. Les mêmes inquiétudes existent en ce qui concerne la libération des buckyballs (cf. Locatelli et al. 2005:27);
- il est concevable que la petitesse des nanoparticules ait pour effet une mobilité accrue. Étant donné que les particules non liées sont en général très réactives, on peut s'attendre à ce qu'elles se lient à d'autres substances dans l'environnement, éventuellement aussi à des substances toxiques, et qu'elles puissent largement disperser ces dernières grâce à leur mobilité.¹⁴ L'évaluation de ce risque dépend non seulement de leur mobilité mais aussi de leur durée d'activité. Les premiers essais portant sur des nanoparticules contenant du fer ont montré qu'elles sont (ré)actives pendant plusieurs semaines, tant dans le sol que dans l'eau.

On pourrait avoir une idée plus précise des effets des nanoparticules de synthèse non liées sur les plantes, les microorganismes et les processus des écosystèmes si on les utilisait pour l'assainissement des sites contaminés en cas de pollution environnementale de surfaces importantes, comme cela se pratique déjà dans certains cas aux États-Unis. Le concept est le suivant:

Au lieu de pomper des eaux souterraines polluées et de les traiter à grands frais, des nanoparticules réactives pourraient être injectées dans le sol où elles transformeraient, par une réaction chimique, les polluants – par exemple des solvants organiques et des métaux lourds – en des substances inoffensives. Les nouveaux procédés nanotechnologiques sont basés sur l'utilisation de nanoparticules obtenues par synthèse qui ont, en raison de leurs petites dimensions particulières, une surface totale pouvant aller jusqu'à 1000 mètres carrés par gramme. Cette surface active peut réagir chimiquement avec certains contaminants toxiques dans le sol, les eaux souterraines et l'air, et les « neutraliser ». On teste actuellement des nanoparticules contenant de l'argent et ayant une action antibactérienne pour le traitement de l'eau potable. Des méthodes de nettoyage similaires sont également en discussion dans le contexte de la pollution liée aux procédés de fabrication et à certaines opérations industrielles. On présume que ce type de nanotechnologie favorise des procédés de fabrication industrielle respectueux de l'environnement dans la mesure où les effluents toxiques et d'autres produits secondaires formés au cours des processus sont détoxifiés grâce à des nanoparticules. (Swiss Re 2004:27).¹⁵

¹⁴ Les nanoparticules pourraient lier des polluants et les transporter à travers le sol. Si l'on admet que ces particules sont très mobiles en raison de leur dimension, des polluants pourraient être transportés à grande vitesse et en grandes quantités dans différentes couches du sol. Cela pourrait poser problème pour les engrais et les pesticides contenus dans le sol: leur mobilité est à vrai dire relativement limitée, mais ils pourraient néanmoins être transportés dans la terre sur de longues distances « sur le dos des nanoparticules ». Étant donné que certaines de ces particules sont très réactives, on peut imaginer différentes réactions avec des substances présentes dans l'environnement qui pourraient donner naissance à de nouveaux composés toxiques, le cas échéant (Swiss Re 2004:29).

¹⁵ Outre le traitement des eaux et la décontamination de sols pollués, on espère aussi progresser dans le domaine de la protection de l'environnement grâce au potentiel d'économies d'énergie que présentent la nanotechnologie et la nanobiotechnologie. Dans ce domaine, on pourrait voir de nouvelles cellules de combustible sous forme de nanotubes, des systèmes d'éclairage innovants ou des cellules solaires d'un genre nouveau qui, selon la vision qu'en ont les chercheurs, pourraient à l'avenir être vaporisées sur les bâtiments ou intégrées dans les vêtements (Swiss Re 2004:31), mais aussi de nouveaux procédés de fabrication nécessitant moins de matières premières et de matériaux de base et produisant moins de déchets toxiques (Swiss Re 2004:31). Il y a également lieu de mentionner les revêtements de surfaces utilisant des techniques nanométriques qui pourraient notamment remplacer les composés du chrome toxiques et difficiles à éliminer (cf. Swiss Re 2004:34).

Günter Oberdörster, un des plus éminents nanotoxicologues au plan mondial, est d'avis que, pour ce type d'application, il y aurait lieu de déterminer d'abord, dans des essais, si ces nanoparticules ne présentent aucun danger. En effet, des injections dans l'environnement effectuées sur de grandes surfaces pourraient avoir des effets lourds de conséquences sur la faune et la flore et, partant, aussi sur la chaîne alimentaire. Il met également en garde contre des espoirs immodérés dans ces techniques, car il n'est pas du tout certain que les nanoparticules en question soient suffisamment mobiles dans le sol ou dans l'eau pour pouvoir remplir l'objectif souhaité (cf. Oberdörster et al. 2005:825).

Bien qu'il existe encore de grandes lacunes dans les connaissances concernant l'écotoxicité des nanoparticules de synthèse, certains éléments disponibles permettent déjà de conclure que ce type de particules, surtout en grandes quantités, peut causer des dommages importants à l'environnement. Il semble donc indiqué, non seulement dans l'optique de la santé humaine mais en prenant aussi en considération son environnement naturel, d'utiliser les nanoparticules de synthèse avec précaution et prudence.

Qu'en est-il toutefois concrètement? Quelles sont les mesures à prendre pour protéger l'homme et l'environnement de manière appropriée contre les risques présentés par les nanoparticules de synthèse? Pour répondre à cette question, il y aurait lieu, à mon avis, d'appliquer le principe de précaution. D'une manière générale, ce principe peut être formulé comme suit: afin d'éviter des dangers qui menacent l'homme et l'environnement, l'État est habilité à prendre des mesures préventives appropriées, qui peuvent limiter la liberté des entreprises et de la recherche, même s'il n'existe aucune certitude scientifiquement fondée.

Cette formulation doit être commentée et précisée. Nous devons néanmoins vérifier auparavant les fondements éthiques ou le cœur éthique du principe de précaution et, dans ce contexte, considérer quelques questions fondamentales de l'éthique du risque. Il s'agira ensuite de déterminer les conditions générales d'application du principe de précaution et de présenter les deux grandes interprétations de ce principe (chap. 4). Ce n'est qu'une fois ces considérations préliminaires développées que l'on pourra traiter la question concernant l'impact que peut avoir concrètement le principe de précaution sur l'utilisation des nanoparticules de synthèse (chap. 5).

4. Les bases éthiques et les conditions d'application du principe de précaution

La problématique traitée par l'éthique du risque cherche à répondre à la question suivante: dans quelles conditions une personne peut-elle s'exposer elle-même et exposer d'autres personnes à un risque? (Cf. Bachmann et al. 2006, Hansson 2007, Rippe 2002, Rippe 2006 pour le développement qui suit). Les risques se caractérisent par deux variables: la probabilité et le dommage, ou l'ampleur du dommage. Pour déterminer un risque, il faut toujours tenir compte de ces deux variables et les associer. Par exemple, le risque d'être tué est associé à un dommage important. Nous ne pouvons le qualifier comme étant faible que si la probabilité de survenue de cet événement est extrêmement faible.

Le fait d'exposer autrui à un risque par ses agissements nécessite en principe une justification, parce qu'il en résulte, avec une certaine probabilité, un dommage. Cette justification est nécessaire indépendamment du fait que le dommage se produise ou non (et aussi indépendamment de l'ampleur du dommage). Par exemple, lorsqu'une personne circule à une vitesse très élevée dans un quartier d'habitation, elle agit mal du point de vue de la morale, car elle expose les enfants habitant ce quartier à un risque trop élevé. Ce comportement est également erroné si aucun enfant n'est blessé. De parler d'un « risque trop élevé » implique néanmoins déjà, qu'il n'est pas obligatoirement mal du point de vue de la

morale d'exposer d'autres personnes à un risque; cela peut même être autorisé et se justifier du point de vue éthique dans certaines conditions.

Il est dans l'intérêt de chacun d'accepter certains risques dans la mesure où certaines conditions sont remplies, ceci pour deux raisons. Tout d'abord, si les seules actions permises étaient celles qui n'exposent pas des tiers à un risque, il en résulterait un gel général des actions qui rendrait impossible toute cohabitation sociale – ce qui n'est pas dans l'intérêt de l'individu. Ceci explique aussi pourquoi certains critères relatifs à l'éthique du risque, par exemple le critère du Maximin et le critère du consentement, ne sont pas plausibles en tant que critères généraux d'une exposition au risque. Ces deux critères sont trop restrictifs si l'on considère que des critères éthiques devraient permettre une cohabitation sociale et son organisation. L'application du critère du Maximin équivaudrait à agir toujours de manière à éviter le dommage le plus important, ce qui rendrait pratiquement impossible toute action au quotidien. Il en va de même pour le critère du consentement: s'il fallait avoir le consentement d'autrui pour chaque action qui expose ce dernier à un risque, cela paralyserait totalement tous nos agissements.

Seulement voilà – et nous en arrivons ainsi à la deuxième raison – le fait d'exposer ou d'être exposé au risque est souvent une situation asymétrique. Se pose donc la question de savoir pourquoi celui qui est exposé à un risque sans en profiter devrait accepter cette situation alors que celui qui l'expose au risque n'est pas lui-même exposé à ce risque. La seule raison qu'il ait de le faire est que celui qui l'expose au risque adopte un certain comportement. Certes, la situation est toujours asymétrique, mais il est – en règle générale – dans son intérêt d'accepter ce risque en partant du principe que, dans d'autres situations, lui aussi expose d'autres personnes à un risque et qu'il a donc intérêt à ce que les autres l'acceptent également.

La condition cruciale est que ceux qui exposent d'autres à un risque prennent les mesures de précaution et de prudence appropriées. « Appropriées » signifie que ces mesures doivent diminuer, autant que cela s'avère possible dans la pratique, le risque auquel sont soumises les personnes exposées. « Possible dans la pratique » veut dire que ces mesures ne doivent pas être importantes et étendues au point de réduire à néant la liberté d'action. Elles doivent pouvoir s'intégrer dans la vie quotidienne. Si ces mesures ont été prises, on ne peut pas infliger un blâme moral à celui qui expose au risque au cas où un dommage viendrait néanmoins à se produire. Il existe en effet un « risque résiduel » acceptable du point de vue éthique: le dommage peut survenir même si celui qui expose au risque a pris les mesures de précaution appropriées. Si un dommage survient en raison du comportement imprudent de celui qui est exposé au risque, ce dommage ne peut pas être imputé à celui qui expose au risque. Celui qui est exposé au risque est alors le seul responsable – le dommage est de sa faute. Cependant, même si ceci ne doit pas être interprété comme une obligation morale d'agir avec prudence et précaution, celui qui est exposé a intérêt de se comporter de la sorte. S'il ne le fait pas, il agit à l'encontre de ses intérêts, ce qui n'est pas raisonnable, bien ce ne soit pas faux ou blâmable du point de vue de la morale.

Cependant, ce modèle de justification du risque ne fonctionne que si la probabilité de survenue d'un dommage ainsi que la nature du dommage et/ou son ampleur peuvent être déterminées de manière fiable – soit lorsqu'il s'agit de risques connus auxquels on peut se préparer. Car ce n'est que lorsque l'on dispose de suffisamment de connaissances scientifiques ou tirées de la pratique quotidienne concernant une situation à risque, que ceux qui y sont exposés peuvent prendre les mesures qui s'imposent pour diminuer ce risque et qu'il peuvent également contrôler si celui qui expose au risque a effectivement pris les mesures de précaution requises.

S'agissant de l'utilisation des nanoparticules de synthèse, cette condition n'est pas – ou que partiellement – remplie. Les risques qui y sont liés ne sont pas connus mais nouveaux. On ne sait pas très bien ce que ceux qui sont exposés au risque (surtout à l'extérieur des laboratoires de recherche) peuvent faire pour se préparer à ces risques ni quelles sont les mesures de

précaution que ceux qui exposent au risque devraient prendre pour éviter la survenue d'un dommage. Mais en même temps, nous ne sommes pas dans une situation d'ignorance totale, mais plutôt d'incertitude. Il existe des indices empiriques suggérant que du moins certaines nanoparticules de synthèse sont dangereuses et que le dommage potentiel peut être grave, mais on ne sait pas quels sont ces dommages, ni avec quelle probabilité ils pourraient survenir, dans quelles conditions, ni pourquoi. C'est justement pour de tels risques nouveaux, potentiellement liés à des dommages graves, que le principe de précaution est prévu.

Essayons de préciser ce que l'on entend par là. Il est indubitablement raisonnable, et aussi juste du point de vue de la morale, de prendre des précautions lorsqu'on s'expose au trafic routier: on devrait attacher sa ceinture afin de diminuer, pour soi-même, le risque d'atteinte à la santé, même si le risque d'accident est faible; on devrait adapter sa vitesse à la situation, afin de limiter au maximum le risque pour autrui (piétons, cyclistes). Dans cette optique, nous devrions éviter de faire des choses qui peuvent éventuellement entraîner un dommage ou qui augmentent la probabilité de survenue d'un dommage. Il s'agit là de mesures de prudence basées sur une vaste expérience ou sur des connaissances statistiquement fondées. Si ces mesures sont prises, le risque correspondant de causer un dommage à autrui est acceptable dans la mesure où l'action (par exemple rouler en voiture) est liée à des avantages qui compensent le risque, qui bien qu'amoindri, existe néanmoins toujours. Toutefois, ces mesures ne sont pas prévues pour des situations où règne une incertitude, mais pour des situations dans lesquelles on peut déterminer clairement ce qu'il faut faire pour se protéger et protéger autrui de risques inutiles.

Il ne s'agit néanmoins pas d'exiger une sécurité absolue et, partant, de réduire le risque à zéro. Le risque zéro ne peut pas être atteint et cela n'a donc aucun sens d'y lier une exigence de prudence. Le principe de précaution (au sens fort du terme) n'exige pas non plus que les partisans d'une technologie à risque doivent prouver qu'elle est absolument sûre pour qu'elle soit considérée comme admissible. Si cette exigence était effectivement posée, cela signifierait que le principe de précaution interdirait par principe les technologies, les produits et les comportements qu'il évalue parce qu'il n'existe jamais de sécurité absolue, donc pas de risque zéro. On ne pourrait alors plus autoriser, par exemple, des médicaments et des additifs alimentaires. Une telle exigence rendrait le principe de précaution dépourvu de tout sens.

Si l'on considère l'historique du principe de précaution (cf. Rippe 2002, Sandin 2007, Sunstein 2007), on comprend mieux son but. L'idée maîtresse est qu'en particulier en cas de menaces de dommages graves et irréversibles à long terme pour l'homme et l'environnement, l'absence de connaissances scientifiques sûres ne puisse pas constituer un motif pour empêcher l'État de prendre les mesures régulatrices appropriées afin d'éviter ou de diminuer les risques correspondants. Ou, pour employer une formulation positive: dans de tels cas, l'État a la légitimité – et même l'obligation, le cas échéant – de prendre les mesures préventives appropriées; cela signifie qu'il peut restreindre en conséquence la liberté des chercheurs et des entreprises. Le principe de précaution, qui était à l'origine avant tout destiné au domaine de la protection de l'environnement, a été depuis étendu à de nombreux autres domaines d'action importants pour la société.

Un point fait toutefois l'unanimité: des mesures étatiques se justifient en cas de menace de dommages même s'il n'existe pas (encore) de preuve scientifique concluante du risque, ceci pour autant qu'elles n'induisent pas des risques plus élevés que le risque visé par la mesure elle-même. Le principe de précaution s'applique donc à des situations où règne une incertitude. L'incertitude peut être considérée comme un certain type de risque, qui se caractérise par le fait que l'ampleur d'un dommage et sa probabilité de survenue, même si elles ne peuvent pas être entièrement calculées, peuvent néanmoins être estimées approximativement. Il existe trois sortes d'incertitudes: 1) l'ampleur du dommage est connue objectivement mais la probabilité ne peut être estimée que subjectivement; 2) la probabilité est connue objectivement mais l'ampleur du dommage ne peut être estimée que

subjectivement; 3) la probabilité tout comme l'ampleur du dommage ne peuvent être estimées que subjectivement.

La classification des risques liés aux nanoparticules de synthèse en l'état actuel des connaissances scientifiques dépend de ce que l'on entend par « subjectif » et « objectif ». L'approche la plus sensée est de présupposer un continuum qui va de purement subjectif à purement objectif. Sont purement subjectives des estimations totalement arbitraires de la probabilité et du dommage; sont en revanche purement objectives, des estimations de la probabilité et du dommage effectuées depuis le point d'Archimède (d'une « perspective divine »). Appréhendés de cette manière, les calculs de risque ne sont ni purement objectifs ni purement subjectifs. On s'approche le plus près du pôle purement objectif dans des situations comportant des dommages et des avantages pour lesquelles la probabilité peut être calculée mathématiquement. Il y a lieu de souligner que cette forme forte d'objectivité n'est pas identique à ce que l'on désigne par « risque objectif » en sciences naturelles car, dans ce domaine, les estimations du risque sont fondées sur des valeurs empiriques et des probabilités statistiques. Dans le meilleur des cas, il s'agit d'une approximation de ce que l'on entend ici par « objectivité pure ». Si l'on considère les risques liés aux nanoparticules synthétiques dans ce contexte, il est clair qu'elles doivent actuellement être classées dans le troisième type d'incertitude. Ceci ne signifie pas que l'évaluation des risques qui y sont liés soit subjective au sens d'arbitraire. Nous ne nous trouvons pas dans une situation d'ignorance totale dans laquelle les scénarios de risque sont purement hypothétiques. Mais simultanément, nous ne disposons pas encore des connaissances suffisantes pour évaluer les risques avec une « objectivité » scientifique. La situation se caractérise plutôt par le fait qu'il existe des preuves empiriques et des indices suggérant que les nanoparticules de synthèse peuvent être dangereuses pour l'homme et l'environnement. Toutefois ces preuves sont à un tel point lacunaires que nous ne sommes pas encore en mesure de calculer les risques avec la fiabilité requise (comme c'est le cas notamment lors de demandes d'autorisation de nouveaux médicaments – exemple qui montre en même temps que fiabilité n'est pas synonyme d'infaillibilité ou de sécurité absolue).

Il existe un consensus sur le fait que le principe de précaution ne doit être appliqué que dans une situation d'incertitude. La question de savoir si ce principe doit s'appliquer à tous les dommages potentiels ou uniquement à certains d'entre eux qui seraient graves et irréversibles suscite en revanche une controverse. Dans l'exposé qui suit, je pars de la deuxième hypothèse: en d'autres termes, le principe de précaution n'exige pas une attitude générale d'aversion du risque; il est uniquement destiné à certains cas, à certaines espèces de risques inconnus: des cas d'incertitude scientifique qui comportent des menaces de dommages importants ou graves. C'est uniquement dans de telles situations que l'État doit, conformément au principe de précaution, prendre des mesures préventives appropriées afin d'éviter la survenue de ces dommages.

Après avoir clarifié ce que l'on entend par incertitude, se pose la question de ce que signifient des dommages sérieux, ou graves, et irréversibles. Je ne peux pas répondre de manière concluante à cette question. Je peux simplement dire que la signification du mot « dommage » a une composante descriptive et une composante évaluative ou normative. Du point de vue descriptif, un dommage peut être décrit, ce qui signifie aussi que l'on peut déterminer si un dommage est survenu ou non. Du point de vue évaluatif, le dommage se rapporte à un point de référence positif, à un état souhaitable et digne de protection d'une personne, d'une chose ou d'un système (par exemple d'une entreprise ou d'un écosystème), qui est modifié de manière négative en cas de dommage. De ce point de vue, un dommage serait une déviation négative, donc à éviter, par rapport à un état souhaitable ou digne de protection. Les questions centrales sont alors de savoir ce que sont des états (ou des « biens ») souhaitables ou dignes de protection, et comment déterminer la grandeur ou l'ampleur d'un dommage. Ces questions nécessitent que l'on examine en détail si un dommage peut être

déterminé objectivement, en d'autres termes, dans le présent contexte, indépendamment des désirs et des convictions, ou seulement subjectivement, donc uniquement par rapport à des désirs et des convictions, et que l'on examine ensuite s'il existe des valeurs objectives pouvant servir de critère pour mesurer un dommage et son ampleur. Je ne répondrai pas à ces questions, qui font par ailleurs l'objet de controverses. Dans un nombre relativement grand de cas, nous sommes d'accord sur ce que pourrait être un dommage, et nous nous accordons aussi sur son ampleur. Nous sommes d'accord que des effets néfastes d'un produit issu de la technologie sur la santé (humaine) – quoi que l'on entende par santé – constituent un dommage et que, selon les conséquences qu'il entraîne, l'atteinte à la santé peut être relativement faible, plus importante ou grave, le dommage le plus grave étant le décès d'une personne. S'agissant des atteintes à l'environnement, les critères sont peut-être moins clairs, mais là aussi les avis concordent dans l'ensemble pour définir ce qu'est un dommage et son ampleur. Il n'en faut pas plus dans ce contexte. En effet, on peut ainsi affirmer avec bonne conscience que l'atteinte potentielle des nanoparticules de synthèse à la santé et à l'environnement est grave, du moins dans le pire des cas, même si elle n'est pas catastrophique.

Pour résumer, il y a lieu de souligner une fois encore que le principe de précaution ne repose pas uniquement sur l'hypothèse de menaces graves et irréversibles. Un autre élément tout aussi important est que le calcul de la probabilité de survenue d'un dommage ne puisse être effectué ni avec exactitude de manière scientifique (statistique) ni en se basant sur nos connaissances de tous les jours, même s'il existe de premiers indices et preuves qui permettent de donner des indications relativement peu spécifiques concernant la probabilité. Ce n'est que lorsque ces deux conditions sont réunies que le principe de précaution s'applique. Sa thèse principale est alors la suivante: dans ces conditions – lorsqu'il existe des indices empiriques de dommages potentiels graves et que certaines hypothèses provisoires et prudentes concernant la probabilité de survenue semblent plausibles – un comportement averse au risque est non seulement raisonnable mais nécessaire du point de vue éthique. Toutefois, que signifie un « comportement averse au risque »?

Dans la littérature, beaucoup sont d'avis que cela revient à une sorte de critère du Maximin (cf. Sandin 2007:102s.). En adoptant le point de vue de la priorité donnée au plus mauvais pronostic, il s'agirait toujours, dans des situations d'incertitude, de prendre une décision qui évite le dommage éventuel le plus important – et ce indépendamment de la probabilité de survenue ainsi que des avantages potentiels. Cette manière de ne pas prendre en compte la probabilité et les avantages peut se justifier pour des scénarios catastrophes, notamment lorsqu'un grand nombre de personnes est touché comme dans le cas de l'accident le plus grave imaginable susceptible de survenir dans une centrale nucléaire. Toutefois, l'exemple des nanoparticules de synthèse montre que le principe de précaution ne peut pas être mis sur le même plan que le critère du Maximin si l'on admet que les dommages potentiels seront certes graves mais non catastrophiques, et que, selon les expositions, leur probabilité (présumée) de survenue varie également.

5. Précaution lors de l'utilisation de nanoparticules de synthèse

L'usage veut que l'on distingue entre une interprétation au sens faible et une interprétation au sens fort du principe de précaution (cf. Rippe 2002). Toutes deux se rapportent à des dommages potentiels graves dont la probabilité de survenue ne peut pas encore être établie scientifiquement de manière fiable (même s'il existe des indices empiriques tant pour les dommages que pour leur probabilité de survenue). Ces deux interprétations proposent néanmoins des mesures de précaution dont la portée est différente.

L'interprétation au sens fort du terme souligne trois points:

- A) *le fardeau de la preuve est renversé*: ce n'est pas à l'État mais au partisan d'une nouvelle technologie à risque (producteur) d'apporter la preuve de son innocuité (comme c'est le cas dans le domaine des médicaments et des additifs alimentaires);
- B) *l'accent est mis sur la non-connaissance*: le principe de la démontrabilité scientifique est refusé. Les interrelations écologiques et biologiques sont trop complexes pour qu'elles puissent être entièrement expliquées par les moyens mis à disposition par la science;
- C) *dans le doute, il faut s'abstenir*: toute activité susceptible d'entraîner (à long terme) des dommages graves pour l'environnement ou l'homme doit être interdite.

L'interprétation au sens faible du terme se distancie de la manière suivante de ces trois points:

- A) *le fardeau de la preuve est maintenu*: selon la règle générale d'après laquelle dans le doute on privilégie la liberté, l'État ne peut réglementer (par des interdictions) que lorsqu'il a la preuve de la dangerosité d'une technologie ou d'un produit;
- B) *une analyse approfondie des risques doit être effectuée*: une telle analyse a pour but de déterminer scientifiquement les risques d'une technologie – la probabilité et l'ampleur des dommages;
- C) *il faut agir tout en prenant des précautions*: même si l'on n'a pas la preuve scientifique de l'innocuité d'une technologie, il est permis de la développer. Toutefois, l'État a le droit et/ou le devoir d'imposer aux partisans de cette technologie des mesures de précaution minimisant les risques.

C'est essentiellement la nature de l'exposition des personnes concernées qui dictera si, du point de vue d'une gestion éthique responsable des risques liés aux nanoparticules de synthèse, il y a lieu d'appliquer le principe de précaution fort ou le principe de précaution faible. On distingue ici quatre groupes: 1) les chercheurs; 2) les collaborateurs d'ateliers de production dans lesquels des nanoparticules de synthèse sont fabriquées et utilisées en grandes quantités; 3) les tiers non concernés, en particulier les consommateurs de produits contenant des nanoparticules de synthèse non liées – ou dans le cas de maladies, les patients; 4) l'environnement (l'eau, l'air, le sol, les eaux souterraines, etc.).

Ad 1

Étant donné que l'on ne peut guère faire des affirmations générales concernant la toxicité des nanoparticules de synthèse, il est utile de partir d'un exemple pour lequel on dispose déjà de preuves en ce qui concerne le risque potentiel. Admettons – et certains indices le suggèrent déjà – que les nanotubes non enduits et non liés, en particulier sous forme d'agrégats, peuvent présenter un danger important pour la santé humaine, qui touche – si nous partons du principe que les tiers non concernés n'y sont pas exposés – uniquement les personnes participant directement à la recherche. Ceci signifie qu'il est raisonnable ou sage, et aussi dans l'intérêt de celles-ci de prendre les mesures de prévention nécessaires. Toutefois, cela ne se justifierait pas d'obliger les chercheurs à prendre de telles mesures s'ils s'exposent à ce risque de manière autonome, donc volontairement et en étant informés. En effet, vu sous l'angle de l'autonomie, on peut s'exposer soi-même à n'importe quel type de risque pour autant que cela soit fait de manière informée et que des tiers non concernés ne soient pas mis en danger. Mais, en même temps, il n'y a pas lieu de présumer que les chercheurs se considèrent comme des cobayes. Ils doivent donc veiller eux-mêmes à se protéger aussi bien que possible des dangers éventuels, notamment grâce à des systèmes hermétiques. Certes, il s'agit là de mesures préventives, qui n'ont cependant rien à voir avec le principe de précaution: il s'agit avant tout de minimiser les risques touchant sa propre personne.

Toutefois ces mesures doivent être prises de telle manière que des tiers non concernés (à l'extérieur des laboratoires de recherche) entrent le moins possible pas en contact avec les nanoparticules de synthèse utilisées à des fins de recherche, ce qui pourrait les exposer à un

risque d'atteinte à la santé. C'est là que le principe de précaution entre en jeu. Tant que, même dans le cas le plus grave, seules de faibles quantités sont susceptibles d'être libérées et que l'on peut par conséquent admettre que la probabilité d'un dommage grave est extrêmement faible, le principe de précaution faible s'avère approprié: la recherche et le développement peuvent et doivent être poursuivis mais il faut prendre des mesures pour garantir que le risque encouru par des tiers non concernés soit minime.

Ad 2

Comment évaluer d'un point de vue éthique la situation des collaborateurs de grandes entreprises dans lesquelles des nanoparticules de synthèse sont produites en grandes quantités ou utilisées pour la fabrication de produits¹⁶? Dans ce cas, on ne peut pas admettre sans autre que les collaborateurs sont exposés à ces produits de leur plein gré et en étant informés.¹⁷ Par ailleurs, la définition de valeurs limites ne se justifie pas au vu de l'état actuel des connaissances en médecine du travail et en toxicologie, d'autant moins qu'il n'existe aucune méthode de mesure standardisée. Aussi une production ou une utilisation de masse n'est-elle admissible que si les travailleurs ne sont exposés à aucun risque d'atteinte à leur santé, ou alors à un risque très faible. Est-ce actuellement le cas? On ne peut pour l'heure répondre à cette question. On se demande surtout si les méthodes standard visant à limiter l'exposition, notamment les mesures de protection technique, telles que l'utilisation d'appareils confinés, les mesures organisationnelles, telles que la minimisation du temps d'exposition, et les mesures de protection personnelle, telles que les vêtements de protection et les appareils respiratoires (cf. Suva 2006), sont suffisantes pour permettre d'exclure des atteintes graves à la santé. On a en outre des doutes quant à la protection offerte par l'état actuel de la technologie de filtration qui pourrait ne pas offrir des garanties suffisantes.¹⁸ Si ces doutes devaient s'avérer justifiés, beaucoup d'éléments parlent en faveur de l'adoption du principe de précaution fort, en particulier du point C: en partant de la priorité donnée au pronostic le plus mauvais, la production et l'utilisation de masse de nanoparticules de synthèse telles que les nanotubes devraient être abandonnées momentanément, car elles pourraient porter gravement atteinte aux travailleurs, et ceci même si certains indices laissent à penser que la probabilité

¹⁶ « Thousands of tons of silica, alumina and ceria, in the form of ultrafine abrasive particle mixtures that include Nanoparticles, are used each year in slurries for precision polishing of silicon wafers. (...) The manufacture of Fullerenes could soon match the engineered metal oxide Nanoparticles in production quantities, with the Kitakyushu plant (Mitsubishi, Japan) estimating an annual production of 1500 tons of C₆₀ by 2007. Other manufacturing facilities also anticipate increased production of fullerenes, and therefore the sum production could be several thousands of tons of fullerenes by 2007. (...) The worldwide production capacity for single-wall and multi-wall carbon nanotubes is estimated to be about 100 tons in 2004, increasing to about 500 tons in 2008 (...) Although current production of engineered nanomaterials is small, it is evident that production rates will accelerate exponentially in the next few years » (Borm et al. 2006).

¹⁷ On pourrait objecter à cela que les travailleurs de l'entreprise – dans la mesure où celle-ci n'agit pas de manière totalement irresponsable – connaissent les risques éventuels liés à leur activité et que, par ailleurs, personne n'est obligé de travailler dans une usine qui fabrique des nanoparticules de synthèse. Il y a donc, dans ce cas, absence de contrainte et information des collaborateurs. Cette objection est exacte dans la mesure où 1) chaque travailleur a l'option pratique (et pas seulement théorique) de changer de travail s'il estime que les risques sont trop élevés, et dans la mesure où 2) il est effectivement informé sans idées préconçues et de manière complète sur les risques qu'il encourt effectivement. Toutefois il ne me paraît pas très réaliste de supposer que ces conditions soient toujours remplies. On ne peut donc pas simplement laisser entendre que l'absence de contrainte et l'information des collaborateurs est une réalité.

¹⁸ Les masques faciaux n'offrent ici qu'une faible protection. Seule une filtration de tout l'air de l'installation permettrait de supprimer les particules. De telles installations sont toutefois très coûteuses et difficilement applicables pour l'épuration de l'air de bâtiments d'une certaine importance, du moins en l'état actuel de la technique. (...) La manipulation des nanoparticules doit probablement s'effectuer de manière analogue à celle de certains organismes biologiques ou à celle des substances radioactives. Des mesures de protection adéquates, telles qu'une boîte à gants adaptée aux nanotechnologies, devront vraisemblablement encore être développées en fonction des éventuels dangers (Swiss Re 2004:33f.).

d'une telle atteinte est plutôt faible alors que les avantages liés aux nanoparticules de synthèse sont grands. Pour l'instant, l'interdiction pourrait être levée a) s'il ressortait de la recherche en matière de risques que le potentiel de danger de ces nanoparticules est plus faible que ce que l'on avait supposé et b) si l'on pouvait vraiment garantir que les travailleurs ne sont pas exposés à un risque d'atteinte à la santé, ou alors à un risque très faible. De plus, il faut veiller à ce que, dans des conditions normales, ce type de nanoparticules ne puisse pas parvenir en grandes quantités dans l'environnement, c'est-à-dire dans l'eau, dans l'air, dans le sol ou dans les eaux souterraines.¹⁹

Ad 3

D'une part, il y a la fabrication industrielle de nanoparticules de synthèse et, d'autre part, la question de savoir si de telles particules peuvent être utilisées dans des produits, et si oui, sous quelle forme. Comme je l'ai dit plus haut, ce qui est problématique c'est avant tout l'utilisation des nanoparticules de synthèse non liées. Dans ce contexte, se pose alors la question de la répartition du fardeau de la preuve. Faut-il maintenir l'interprétation au sens du point A du principe de précaution faible ou serait-il plus approprié de renverser le fardeau de la preuve comme le prévoit le point A du principe de précaution fort? Étant donné le risque potentiel, du moins de certaines nanoparticules de synthèse, et les indices scientifiques déjà disponibles, le renversement de la preuve exigé par le principe de précaution fort semble se justifier ne serait-ce que pour les produits contenant des nanoparticules de synthèse non liées, donc notamment tous les produits utilisant la technique de délivrance (« delivery »), à savoir des nanoparticules de synthèse telles que les fullerènes, les dendrimères ou les nanoparticules d'or. D'un point de vue éthique, ce type de produits – en particulier dans les domaines de la nanomédecine, des nanopesticides et de la « nanofood » – nécessite une autorisation. Ils devraient être soumis à une procédure d'essais déterminée, contrôlée par les autorités compétentes, au cours de laquelle le producteur aurait à démontrer leur innocuité. Ces nanoproduits doivent être traités comme des médicaments.

Ceci ne signifie pas – il y a lieu de le répéter – qu'il faut une preuve absolue de la sécurité des produits. Les critères qui devraient être remplis pour que la preuve soit considérée comme ayant été apportée devraient être définis spécialement pour les nanoproduits. On peut imaginer des conditions plus ou moins sévères. Un monitoring serait en outre nécessaire après l'autorisation de mise sur le marché afin de surveiller les effets sur le long terme. Il est clair que cette démarche présuppose d'une part une protection des brevets efficace, et qu'elle aurait par ailleurs probablement une incidence non négligeable sur le coût des produits concernés. Toutefois, ces considérations économiques doivent passer après les réflexions éthiques exposées ci-dessus.

Les nanoparticules de synthèse utilisées dans les produits déjà commercialisés sont la plupart du temps fixées dans un support, un exemple étant les nanotubes dans les raquettes de tennis; ces particules sont, de ce fait, isolées de l'environnement et ne présentent pas les mêmes risques que les particules non liées. Toutefois, ceci n'est vrai que tant qu'elles sont

¹⁹ Selon Oberdörster, les nanoparticules non liées pourraient parvenir dans l'environnement de différentes manières: 1) « Some [manufactured nanomaterials] are and others will be produced by the ton, and some of any material produced in such mass quantities is likely to reach the environment from manufacturing effluent or from spillage during shipping and handling ». 2) « They are being used in personal-care products such as cosmetics and sunscreens and can therefore enter the environment on a continual basis from washing off of consumer products ». 3) « They are being used in electronics, tires, fuel cells, and many other products, and it is unknown whether some of these materials may leak out or be worn off over the period of use ». 4) « They are also being used in disposable materials such as filters and electronics and may therefore reach the environment through landfills and other methods of disposal ». [Seraient également compris dans ces matériaux les emballages de denrées alimentaires contenant des nanoparticules.] 5) « Scientists have also found ways of using nanomaterials in remediation. Although many of these are still in testing stages (...) dozens of sites have already been injected with various nanomaterials, including nano-iron » (Oberdörster et al. 2005:825).

effectivement ancrées dans une matrice. Se pose alors la question de savoir ce que deviennent les nanocomposants lorsque les équipements et les matériaux sont éliminés. Il n'existe pas encore de concept pour leur recyclage ou leur réutilisation. S'il s'avérait que ces nanoapplications se décomposent à la fin de leur cycle de vie (Boeing 2005:36), les nanoparticules de synthèse liées seraient-elles libérées en entraînant un risque pour l'homme et l'environnement? D'où l'importance de faire progresser la recherche sur les cycles de vie des produits concernés.

Certes, les produits déjà disponibles qui contiennent des nanoparticules de synthèse liées ne devraient pas être retirés du marché dans la mesure où les quantités de particules qu'ils contiennent sont trop faibles pour qu'elles entraînent des dommages importants au cas où elles seraient libérées. (Ou pour dire les choses différemment: le risque – ou la probabilité d'un tel dommage – est tellement faible qu'il devient acceptable.) La notification de ces produits devrait néanmoins être obligatoire, et il y aurait lieu d'exiger de la part des producteurs un concept d'élimination clair, qui indique de quelle manière les produits sont recyclés et ce qu'il advient des nanoparticules de synthèse qu'ils contiennent.²⁰ Dans ce domaine, c'est donc le principe de précaution faible qui s'applique. Les nanoproducts peuvent continuer à être fabriqués et distribués, dans la mesure où ils contiennent les quantités requises de nanoparticules, mais ce uniquement à certaines conditions: ils devront être soumis à une notification obligatoire et des analyses scrupuleuses du risque et du cycle de vie devront être réalisées surtout dans l'optique de leur élimination, ceci afin de garantir que les quantités de nanoparticules non liées libérées soient aussi faible que possible. Une déclaration obligatoire devrait en outre s'appliquer à tous les produits (commercialisés) contenant des nanoparticules de synthèse. Différentes raisons parlent en faveur d'une telle obligation: d'une part, il existe dans ce cas une obligation d'informer le consommateur et, d'autre part, la déclaration est une mesure qui développe la confiance.

Ad 4

La libération de nanoparticules de synthèse dans l'environnement dans le but de détoxifier des sols contaminés ou des eaux souterraines polluées devrait être interdite jusqu'à nouvel ordre. À cet égard, les points C et A du principe de précaution fort sont déterminants: une libération de ce type, surtout en grandes quantités, pourrait causer un dommage important aux animaux, aux plantes et à des écosystèmes tout entiers. Dans le doute, le mot d'ordre est donc ici de s'abstenir²¹. Les choses ne changeraient que si l'on apportait la preuve scientifique qu'il n'y a pas de menace de dommages graves,²² ou que ces dommages peuvent être évités, et que l'objectif visé par la libération de ces particules peut véritablement être atteint.²³

²⁰ Les producteurs devraient tout au moins participer à la recherche nécessaire dans ce domaine. Une telle participation est importante et se justifie pour la raison suivante: « Effluent from nanomanufacturing processes, use of nanoparticle-containing substances such as sunscreens, and disposal of nanomaterial-containing products, will inevitably lead to increasing quantities of engineered nanomaterials in water systems. If we cannot track these materials, it will be almost impossible to determine how benign or harmful their presence is. The (...) challenge therefore is to develop instruments that can track the release, concentration and transformation of engineered nanomaterials in water systems (including liquid-based nanotechnology consumer products), within the next five years » (Maynard et al. 2006).

²¹ « Dans le doute » est un élément important, parce que nous ne savons pas si ce dommage grave se manifesterait vraiment. Il n'existe que quelques indices suggérant que cela pourrait arriver, mais l'estimation de la probabilité s'avère dans ce cas particulièrement difficile parce qu'incertaine. La thèse développée est que ces indices sont suffisants pour justifier une interdiction momentanée.

²² En d'autres termes, la probabilité qu'un tel dommage survienne est tellement faible que le risque – soit le produit de la probabilité et du dommage ou de l'ampleur du dommage – peut être considéré comme acceptable.

²³ Dans toute cette discussion, le point B du principe de précaution fort ne joue aucun rôle. Toute le monde s'accorde pour dire que l'ampleur du dommage et la probabilité de survenue peuvent également être déterminées de manière scientifique dans l'optique des effets des nanoparticules sur les écosystèmes, même si ceci n'est pas encore possible à l'heure actuelle.

Les nanoparticules de synthèse pourraient aussi parvenir dans l'environnement en étant libérées lors du lavage – par exemple à partir de cosmétiques ou de vêtements – ou si elles sont utilisées directement dans certains équipements tels que les machines à laver, sous forme de nanoparticules non liées. Un exemple qui a déclenché une violente controverse aux États-Unis est celui du nanoargent (cf. Weiss 2006). L'Agence américaine pour la protection de l'environnement (EPA) a décidé fin 2006 que les fabricants de produits contenant des nanoparticules d'argent (non liées) devaient apporter la preuve scientifique que ces particules ne présentaient aucun risque pour l'homme ni – surtout – pour l'environnement. Cette réglementation concerne toute une série de produits, qui vont des désodorisants d'atmosphère aux semelles de chaussures spéciales en passant par les récipients en plastique pour stocker les denrées alimentaires. L'EPA vise toutefois en particulier une machine à laver de Samsung, dans laquelle des nanoparticules d'argent non liées sont utilisées pour éliminer les germes du linge sans employer d'eau chaude ni d'agent de blanchiment. Les nanoparticules d'argent utilisées dans ces équipements ont une action antimicrobienne²⁴ et sont en mesure de détruire les germes et les bactéries. Toutefois, si elles parviennent – sous forme de particules non liées – dans l'environnement, il existe un risque qu'elles détruisent des bactéries utiles et des organismes aquatiques. Les produits qui prétendent pouvoir tuer des germes, et qui justifient cette propriété par l'utilisation de nanoargent, sont considérés par l'EPA comme des pesticides, soit comme des produits ayant une composante antiparasitaire, et sont donc soumis à autorisation.

C'est la première fois, à notre connaissance, qu'une autorité a appliqué le principe de précaution fort, en particulier le point A, soit le renversement du fardeau de la preuve, à une nanoparticule de synthèse. Le renversement du fardeau de la preuve se justifie-t-il vraiment dans ce cas? La réponse est oui. Si de grandes quantités de nanoparticules d'argent non liées devaient parvenir dans l'environnement, le danger existe que ces particules tuent des bactéries utiles et des organismes aquatiques, causant ainsi un dommage important. Bien entendu, il s'agit ici d'une présomption et non d'une certitude scientifiquement fondée. Mais cette présomption n'est pas purement hypothétique: elle se fonde sur une base empirique, la connaissance des effets antibactériens de l'argent. C'est pourquoi le renversement du fardeau de la preuve est justifié.

En résumé, on peut dire que, du point de vue éthique, une réglementation aussi uniforme que possible au plan international de l'utilisation des nanoparticules de synthèse s'impose. Cette réglementation devrait être axée sur le principe de précaution. Une telle démarche aurait deux conséquences: tout d'abord une intensification de la recherche en matière de risques, en prenant aussi en considération les mesures de sécurité requises. Ensuite, un ralentissement du développement et de la mise sur le marché de nouveaux produits contenant des nanoparticules de synthèse non liées. Ceci ne signifie pas que la nanotechnologie sera désavantagée de manière inadmissible par rapport à d'autres technologies. Il s'agit plutôt de réagir de manière appropriée aux risques présentés par cette technologie. L'aspect déterminant est le suivant: s'il existe des motifs raisonnables de supposer que les nanoparticules de synthèse peuvent porter gravement atteinte à l'homme et à l'environnement, il est justifié de renverser le fardeau de la preuve et d'exiger que les fabricants apportent la preuve que les nanoparticules (libres) contenues dans leurs produits sont inoffensives.

²⁴ On savait déjà depuis des millénaires que l'argent avait une action antiseptique. Cet effet est encore renforcé par le nanoargent. De par ses propriétés antibactériennes, l'argent nanométrique joue un rôle de plus en plus important, principalement pour empêcher les infections, notamment dans le domaine du traitement des plaies mais aussi de l'hygiène hospitalière (instruments chirurgicaux et cathéters enduits de nanoparticules d'argent).

Bibliographie

- Bachmann Andreas, David Badri, Esther Brunner, Reto Cueni, Alessandro Danieli, Patrick P. Eberhard, Gerald Hess, Laurent Lerf, Benjamin Rath, Klaus Peter Rippe, Bernhard Rom, Tamara Rügger, Nora Schmid, Thomas Schmidt, Annette Schulz-Baldes, Dominik Tasnady, Ariane Willemsen (2006), « Elemente der Risikoethik », http://www.ethikdiskurs.ch/umweltethik/Elemente_Risikoethikpdf.pdf.
- Boeing, Niels (2005), « Unsichtbare Gefahr », in: *Technology Review* 11 novembre 2005, p. 32-42.
- Borm, Paul JA, David Robbins, Stephan Haubold, Thomas Kuhlbusch, Heinz Fissan, Ken Donaldson, Roel Schins, Vicki Stone, Wolfgang Kreyling, Jürgen Lademann, Jean Krutmann, David Wahrheit, Eva Oberdörster (2006), « The Potential Risks of Nanomaterials: a Review carried out for ECETOC », <http://www.particleandfibretoxicology.com/content/3/1/11>.
- Bottini, Massimo, Shane Bruckner, Konstantina Nika, Nunzio Bottini, Stefano Bellucci, Andrea Magrini, Antonio Bergamaschi, Tomas Mustelin (2006), „Multi-walled carbon nanotubes induce T lymphocyte apoptosis“, in: *Toxicology Letters* 160, p. 121-126.
- Brune, H., H. Ernst, A. Grunwald, W. Grünwald, H. Hofmann, H. Krug, P. Janich, M. Mayor, W. Rathgeber, G. Schmid, U. Simon, V. Vogel, D. Wyrwa (2006), *Nanotechnology. Assessment and Perspectives*, Berlin/Heidelberg.
- Brunner, Tobias J., Peter Wick, Pius Manser, Philipp Spohn, Robert N. Grass, Ludwig K. Limbach, Arie Bruinink, Wendelin J. Stark (2006), „In Vitro Cytotoxicity of Oxide Nanoparticles: Comparison to Asbestos, Silica, and the Effect of Particle Solubility“, in: *Environmental Science & Technology* 40/14, p. 4374-4381.
- Chen, Zhen, Huan Meng, Genmei Xing, Chunying Chen, Yuliang Zhao, Guang Jia, Tiancheng Wang, Hui Yuan, Chang Ye, Feng Zhao, Zhifang Chai, Chuanfeng Zhu, Xiaohong Fang, Baocheng Ma, LijunWan (2006), „Acute toxicological effects of copper nanoparticles in vivo“, in: *Toxicology Letters* 163, p. 109-120.
- EMPA-News 2/2006, <http://www.empa.ch/plugin/template/empa/1030/48763/---/l=1>.
- Hansson, Sven Ove (2007), “Risk”, in: *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, <http://plato.stanford.edu/entries/risk/>.
- Limbach, Ludwig K., Peter Wick, Pius Manser, Robert N. Grass, Arie Bruinink, Wendelin J. Stark (2007), „Exposure of Engineered Nanoparticles to Human Lung Epithelial Cells: Influence of Chemical Composition and Catalytic Activity on Oxidative Stress“, in: *Environmental Science & Technology* 41/11, p. 4158-4163.
- Locatelli, Sandrine, Carole Nicollet, Jean Charles Guibert, Manuela Denis (2005), „Potential Risks of Nanotechnologies“, Part 3 of the 4th Nanoforum Report, www.nanoforum.org.
- Long, Thomas C., Navid Saleh, Robert T. Tilton, Gregory V. Lowry, Bellina Veronesi (2006) “Titanium Dioxide (P25) Produces Reactive Oxygen Species in Immortalized Brain Microglia (BV2): Implications for Nanoparticle Neurotoxicity”, in: *Environmental Science & Technology* 40/14, p. 4346-4352.
- Maynard, Andrew D., Robert J. Aitken, Tilman Butz, Vicki Colvin, Ken Donaldson, Günter Oberdörster, Martin A. Philbert, John Ryan, Anthony Seaton, Vicki Stone, Sally p. Tinkle, Lang Tran, Nigel J. Walker, David B. Wahrheit (2006), “Safe handling of nanotechnology”, in: *Nature* 444, p. 267-269.
- Oberdörster, Günter, Eva Oberdörster, Jan Oberdörster (2005), “Nanotechnology: An Emerging Discipline Evolving from Studies of Ultrafine Particles”, in: *Environmental Health Perspectives* 113/7, p.823-839.
- Oberdörster, Eva (2004), “Manufactured nanomaterials (fullerenes, C60) induce oxidative stress in the brain of juvenile largemouth bass”, in: *Environ. Health Perspect.* 102, p.1058-1062.

- Renn, Ortwin, Mike Roco (2006), White Paper on Nanotechnology Risk Governance, http://www.irgc.org/irgc/_b/contentFiles/IRGC_white_paper_2_PDF_final_version.pdf.
- Rippe, Klaus Peter (2002), „Vorsorge als umweltethisches Leitprinzip“, <http://www.ethikdiskurs.ch/umweltethik/Vorsorgeprinzip.pdf>.
- Rippe, Klaus Peter (2006) “Ein Vorrang der schlechten Prognose? Zu den ethischen Grundlagen des Vorsorgeprinzips“, in: *Neue Zürcher Zeitung*, 30 décembre 2006.
- Sandin, Per (2007), „Common-Sense Precaution and Varieties of the Precautionary Principle“, in: Tim Lewens (ed.), *Risk. Philosophical Perspectives*, London/New York, p. 99-112.
- Schulte, Paul A., Fabio Salamanca-Buentello (2007), “Ethical and Scientific Issues of Nanotechnology in the Workplace”, in: *Environmental Health Perspectives* 115/1, p. 5-12 (accessible sur Internet à l’adresse <http://www.ehponline.org/members/2006/9456/9456.pdf>).
- Scientific Committee on Emerging and Newly-Identified Health Risks SCENIHR (2007), „Opinion on the Appropriateness of the Risk Assessment Methodology in accordance with the technical Guidance Documents for new and existing Substances for assessing the Risks of Nanomaterials“, http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihhr/docs/scenihhr_o_004c.pdf.
- Shelley, Toby (2006), *Nanotechnology. New promises, new dangers*, London, New York. (dt. Nanotechnologie. Neue Möglichkeiten – Neue Gefahren, Berlin 2007.)
- Sunstein, Cass R. (2007), *Gesetze der Angst. Jenseits des Vorsorgeprinzips*, FfM.
- Suva (2006), « Nanoparticules et santé au travail », http://www.suva.ch/fr/nanopartikel_an_arbeitsplaetzen.pdf.
- Swiss Re (2004), *Nanotechnologie. Kleine Teile – grosse Zukunft?* <http://www.swissre.com>
- Tiefenauer, Louis (2007), “Magnetic Nanoparticles as Contrast Agents for Medical Diagnosis”, in: Tuan Vo-Dinh (ed.), *Nanotechnology in biology and medicine: methods devices, and applications*, Boca Raton, FL.
- Weiss, Rick (2006), „EPA to regulate Nanoproducts sold as germ-killing“, in: *The Washington Post*, 23 novembre 2006.
- Yang, Ling, Daniel J. Watts (2005), “Particle surface characteristics may play an important role in phytotoxicity of alumina nanoparticles“, in: *Toxicology Letters* 158, p. 122-132.