



Département de la Recherche,
des Technologies et
du Développement durable

Paris, le 24 Juillet 2007

PREPARATION DU GRENELLE DE L'ENVIRONNEMENT

Etat des lieux de la question des nanotechnologies et de leurs liens avec l'environnement¹

Introduction

Quelle sera l'ampleur de la révolution technologique liée à la découverte puis à la maîtrise du nanomonde ? Si les nanotechnologies sont déjà présentes dans notre vie quotidienne (crèmes solaires, pneumatiques, vitrocéramiques, peintures automobiles...), si les applications aujourd'hui envisagées pour les nanotechnologies semblent considérables dans des domaines aussi stratégiques que la santé, l'environnement, les transports, les nouvelles technologies de l'information... nul ne peut prétendre aujourd'hui pouvoir deviner l'impact futur des nanotechnologies sur notre société. Qui aurait pu prévoir le développement des ordinateurs individuels et leur place actuelle dans notre vie au moment de l'invention du transistor en 1947 ou même du premier microprocesseur en 1971 ?

La question des nanotechnologies est passée en quelques années d'un enjeu de développement technologique et de compétitivité économique relevant de « l'économie de la connaissance » et de la maîtrise des technologies les plus avancées, à une problématique plus globale conduisant à nous interroger non seulement sur leur impact sur la santé et l'environnement, mais aussi sur le rôle du développement technologique dans l'avenir des sociétés.

¹ Cette note a été rédigée par Jean-Luc Pujol (CAS) et Philippe Rossinot (CAS) qui se sont inspirés de deux notes de veille du Centre d'analyse stratégique (« Nanotechnologies : anticiper pour gérer les risques », septembre 2006, Dominique Namur, et « L'évaluation participative des choix technologiques : aide à la décision dans le champ des nanotechnologies ? », juin 2007, Sébastien Miller et Jean-Luc Pujol, juin 2007, ainsi que d'une note de la DPPR (pour la partie relative aux actions menées par la puissance publique).

La présente note s'efforce de définir ce que l'on entend actuellement par nanotechnologies, et envisage ses principales applications ainsi que les perspectives ouvertes par la recherche. Elle aborde ensuite la question des risques qui leur sont associés ainsi que la nécessaire anticipation de ceux-ci. Elle présente enfin les actions menées par la puissance publique pour prévenir les risques sanitaires et environnementaux associés aux nanotechnologies ainsi que l'état du débat sur le sujet.

1. Une problématique technologique, économique et sociale en évolution

1.1. Les perspectives

Le marché mondial des nanotechnologies était estimé à 40 milliards d'Euros en 2001. Il pourrait atteindre plus de 700 milliards d'Euros en 2008, puis 1 000 milliards entre 2010 et 2015.

L'effort de recherche est focalisé :

- en nanoélectronique, sur des composants plus petits, plus rapides, moins coûteux et moins consommateurs d'énergie à partir de matériaux différents (carbone) ;
- en médecine et en biologie, sur le traitement des tumeurs, les implants et les prothèses biocompatibles, les vecteurs de médicaments pour une thérapeutique plus ciblée et sur des capteurs très sensibles pour des traces infimes à vocation de sécurité sanitaire et de santé publique ;
- en cosmétique sur les crèmes solaires et les traitements de la peau ;
- en matériaux et chimie, sur des matériaux nanostructurés aux performances accrues, sur des catalyseurs pour l'industrie chimique (et potentiellement ses évolutions qualifiées de « chimie verte ») et l'énergie et sur des revêtements « nano-modifiés » offrant des propriétés particulières.

1.2. Un univers aux contours imprécis

Pour cerner la question du lien entre nanotechnologies et environnement, il faut d'abord identifier le champ couvert par ces « nanotechnologies ». Sur ce point, on est confronté à deux difficultés :

- la dénomination « nanotechnologies » a fait son chemin dans l'opinion publique. Elle couvre, quoi qu'en disent les scientifiques experts, un champ certes subjectif mais qui est un support désigné du débat actuel. Les différents rapports acceptent visiblement cette désignation floue mais ont en général souci de segmenter les problèmes.
- le champ des nanotechnologies est une construction récente, improprement délimitée : les programmes scientifiques de « revitalisation » de la recherche en biotechnologies et technologies des matériaux ont « inventé » cette bannière afin de désigner (et financer) un ensemble de technologies ouvrant à la compétitivité technologique de demain. Afin d'émarger aux crédits affectés à cet axe technologique, tous les laboratoires ont baptisé « nanotechnologies » les activités qui, à des titres divers, pouvaient relever de cet axe de financement : biologie moléculaire, génétique, vecteurs médicaux à des échelles infra membranaires, structuration de la matière à l'échelle de l'atome...

Aussi imprécis qu'il soit, le concept global de nanotechnologies a fait son chemin : il conduit dorénavant, avant de traiter de toute question relative à ce sujet, à devoir trouver le point commun de cette vaste notion d'une part, et à chercher à traiter les questions qui se posent non pas d'un point de vue global mais en fonction des applications concernées.

Prenant en compte l'avancement des nombreuses actions internationales visant à définir, à identifier et à caractériser les nanotechnologies, on retiendra en particulier vis-à-vis des questions environnementales deux axes de développement :

- il s'agit de technologies et substances permettant la structuration de la matière à des échelles de quelques nanomètres, pour lesquelles les enseignements de la chimie et de la physique montrent que les substances et matériaux acquièrent à ces échelles des propriétés physiques, chimiques, électromagnétiques et biologiques en rupture avec les propriétés des échelles supérieures, interdisant donc de les déduire par extrapolation ou généralisation. C'est d'ailleurs là que résident à la fois l'intérêt majeur de ces technologies mais aussi la difficulté de gérer les risques qui leur sont associés ;
- la maîtrise de la matière à ces échelles correspond à des potentialités très importantes en termes de miniaturisation, de dématérialisation, et de valeur additionnelle pour les technologies de l'électronique, de la cognition et de l'informatique : cet univers technologique et industriel a des enjeux technico économiques (dans des domaines civils et militaires) tels que les conséquences sur la société ne peuvent être éludées. Les diverses formes de gouvernances de la société en général et de la recherche en particulier sont amenées à en tenir compte et, depuis quelques années, les sciences sociales et humaines ont d'ores et déjà commencé à s'approprier ces questions .

2. Les risques liés aux nanoparticules

Alors que certaines applications sont sur le point d'arriver au stade commercial, les risques associés aux nanotechnologies restent encore mal connus. Les interrogations à leur sujet sont en effet multiples, qu'il s'agisse des processus de production, de transport, de stockage ou de la stabilité dans le temps de ces produits, comme du danger potentiel qu'ils peuvent faire peser sur la santé humaine ou sur l'environnement. Ces incertitudes sont autant de défis pour l'action publique. Après la publication d'un rapport britannique en 2004², les pays développés (Canada, France³, États-Unis) séparément ou au sein d'un groupe de travail de l'OCDE ont donc entrepris de recenser les risques potentiels des nanotechnologies et ont engagé une réflexion sur les modalités de leur encadrement. L'enjeu est double : dans un souci de prévention et de précaution, il faut approfondir les études d'impact et instaurer des processus d'implication des citoyens concernant les développements de ce secteur.

2.1. Des propriétés physico-chimiques prometteuses mais encore mal connues.

En raison de leur très petite taille, les nanoparticules peuvent présenter des propriétés physico-chimiques totalement originales⁴. Une première caractéristique est leur forte réactivité. De façon générale, à volume total identique, celle-ci sera d'autant plus élevée, notamment avec les tissus biologiques, que leur taille individuelle est petite (rapport surface/volume élevé). Une seconde caractéristique est liée à l'instabilité de leurs propriétés physico-chimiques, selon leur milieu. Pour les plus fines, les forces d'interaction augmentent lorsque la dimension diminue. Ainsi, des nanoparticules introduites dans un gaz ou dans des solutions liquides vont s'agglutiner ou absorber des substances chimiques en suspension, modifiant leurs propriétés initiales. À l'inverse, la dispersion par usure des nanoparticules incluses dans des supports (peinture, pneumatiques...) est peu connue. Au total, il semble impossible de dresser un modèle standard : chaque nanoparticule engendre des effets (notamment toxicologiques) spécifiques, et la réponse biologique croît avec leur surface et leur longueur. En conséquence, les enseignements issus des industries et technologies micrométriques classiques pourront être difficilement extrapolés aux nanoparticules. Les modèles toxicologiques usuels ou ceux admis pour l'étude des substances chimiques sont inadaptés pour en

² Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties, Royal Society & Royal Academy of Engineering, juillet 2004. <http://www.nanotec.org.uk/finalReport.htm>. Ce rapport recommande un examen d'innocuité complet en préalable à toute commercialisation

³ Nanotechnologies, nanoparticules : quels dangers ? quels risques ?, Comité de la prévention et de la précaution (CPP), juin 2006 ; http://www.ecologie.gouv.fr/IMG/pdf/Nanotechnologies_juin_2006.pdf

⁴ Les nanomatériaux : effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement, Afsset, juillet 2006 ; <http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/367611898456453755693572842048/nanomateriaux.pdf>

évaluer l'impact sanitaire ou les risques environnementaux. Or, les recherches spécifiques aux nanoparticules font actuellement défaut. Leur toxicité vis-à-vis des espèces végétales et animales est notamment pratiquement inconnue : il n'existe pas suffisamment de données fondamentales ou historiques ni de méthodologies ou de protocoles de bioessais adaptés. En ce qui concerne leur circulation dans l'environnement, les connaissances actuelles sont très pauvres, notamment handicapées par des recherches industrielles confidentielles et cloisonnées.

2.2. Le confinement au niveau de la production et de l'utilisation : une question pour les acteurs industriels et les pouvoirs publics

Le confinement efficace des nanoparticules dans les entreprises soulève trois questions. La première concerne la nature du procédé de fabrication. Les nanoparticules peuvent être créées, soit par réduction de la taille de microsystèmes existants (méthode top down), soit par création de structures ad hoc à l'échelle atomique (méthode bottom up). La seconde est relative au volume produit et à l'agent producteur. D'un côté, les structures spécialisées (laboratoires, start-up technologiques) produisent de faibles volumes selon l'approche bottom-up ou une fabrication en circuit fermé. De l'autre côté, les tonnages les plus importants sont issus des secteurs matures (chimie, pharmacie...) dans des installations conventionnelles. Les techniques de traitement maîtrisées (centrifugation, ultrafiltration) y sont coûteuses et surtout limitées aux liquides (méthodes de filtrage de l'air peu efficaces). La dernière question porte sur le cycle de vie du produit. La fabrication, le conditionnement, le transport, l'incorporation et l'élimination des nanoparticules sous forme de poudre engendrent un risque de dispersion élevé (aérosols, "explosions de poussière" par électricité statique...), à la différence des solutions liquides ou de l'usage de matrices de liants. Les salariés employés dans ces filières risquent d'être les premiers exposés au stade de la fabrication, mais bien sûr, aussi lors du transport, de la mise en oeuvre et du traitement des déchets⁵.

2.3. Des risques potentiels diffus pour le consommateur...

Les consommateurs sont susceptibles de subir deux types d'expositions⁶ : une directe, au contact de produits incorporant des nanomatériaux (pharmacie, cosmétiques, emballages alimentaires, textiles...), risque dont ils peuvent être informés, l'autre indirecte, via les nanoparticules se retrouvant dans l'environnement. L'intrusion dans l'organisme peut emprunter les voies respiratoires (vapeurs de cuisine, aérosols, détergents, peintures, gaz d'échappement, air conditionné...), digestive (boissons, additifs alimentaires, médicaments à ingérer...) ou sous-cutanée (produits injectables)⁷. Toutefois, au niveau cutané, les études disponibles semblent invalider une absorption significative au-delà du derme humain sain, à l'exception des follicules pileux.

Plus les particules sont petites, plus la quantité absorbable et la profondeur de pénétration dans le corps sont élevées. À partir du sang, certaines nanoparticules insolubles peuvent se distribuer dans le corps et s'accumuler dans des organes (poumons, coeur, reins, intestins, estomac, foie et rate) voire s'affranchissent des barrières de protection (transplacentaire, hémato-encéphalique,...). Dans l'organisme, les nanoparticules sont difficilement éliminées. Les modalités de passage et de migration des nanoparticules dans l'organisme restent encore mal connues. À ce jour, il est impossible d'identifier un éventuel effet cancérigène ou un risque pour le système immunitaire, ni d'affirmer l'innocuité.

⁵ "Les nanoparticules. Connaissances actuelles sur les risques et les mesures de prévention en santé et en sécurité du travail", Études et Recherches, IRSST, février 2006 ; <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-455.pdf>.

⁶ (6) Pour une présentation exhaustive de l'aspect sanitaire, cf. "Les effets à la santé reliés aux nanoparticules", Études et Recherches, IRSST, mars 2006. <http://www.irsst.qc.ca/files/documents/PubIRSST/R-451.pdf>

⁷ Mais certaines particules aériennes ultrafines (jusqu'à 100 nm) sont déjà identifiées comme dangereuses pour la santé humaine (rejets des moteurs diesel), ou d'un usage insuffisamment réglementé (dioxine de titanium).

2.4. ... comme pour l'environnement

La diffusion de nanoparticules manufacturées dans l'environnement, liée au cycle de vie des nanomatériaux, peut contaminer l'air, le sol, les eaux de surface ou souterraines et les organismes vivants. Mais les modèles de dispersion admis pour les substances chimiques sont inapplicables. Les déchets traités dans les filières classiques (incinération), l'utilisation en système ouvert de produits industriels incluant des nanoparticules (pneumatiques, pesticides...) ou des sites de production en désuétude constituent donc des sources potentielles de diffusion aérienne à longue distance très difficilement évaluables et contrôlables.

Les études existantes⁸ sur la capacité de dégradation des nanoparticules et sur la stabilité de leurs propriétés sont rares et parfois déroutantes. La mobilité et la persistance dans les milieux sédimentaires et aqueux sont très vraisemblables et fonctions des propriétés du milieu comme de celles des particules. De plus, la tendance des nanoparticules à s'agglutiner et à fixer d'autres particules (métaux lourds, pesticides..) favorise le transport de polluants peu mobiles, pourrait modifier leurs propriétés et accélérer leur migration dans les couches profondes du sol et les nappes phréatiques. Le cycle naturel de l'eau pourrait même accélérer ces mutations et cette dispersion.

La contamination des écosystèmes terrestres et aquatiques n'est aussi pas à exclure, bien qu'actuellement pratiquement inconnue. Faune et flore pourraient être affectées, de façon différenciée, par assimilation cellulaire directe par les différents organismes, ou indirectement en raison des polluants adsorbés à la surface ou dans la structure des nanoparticules. Enfin, les études existantes montrent que certaines nanoparticules franchissent les membranes cellulaires, elles sont donc potentiellement bioaccumulables.

En l'absence d'une élimination, une absorption par la flore ou la faune constituerait alors une entrée dans la chaîne alimentaire.

2.5. Un cadre spécifique à développer...

Sur le plan législatif, les textes français et européens actuels ne fixent pas de valeurs limites d'exposition aux nanoparticules. L'évaluation des substances chimiques – en particulier dans le nouveau règlement européen Reach - se fait sans considération spécifique de la taille des particules. Par ailleurs, le faible tonnage de production ou l'incorporation à un produit manufacturé dispensent de l'obligation d'évaluation. Aux États-Unis, la Food and Drug Administration n'a pas doté les nanoparticules d'une réglementation spécifique, ou n'en distingue pas explicitement les différentes variétés (nanotubes). La seule exception notable concerne la loi relative à la recherche et au développement des nanotechnologies pour le XXI^e siècle, votée en 2003. En l'absence de réglementation publique, la législation risquerait d'apparaître "en creux" par la jurisprudence et les assurances qui, indirectement, conditionneraient le développement des applications à travers les clauses des contrats.

L'application du principe de précaution supposerait de prendre des mesures de protection a priori face à des risques potentiels dont la science est incapable de confirmer ou non l'existence. Un financement public défaillant des études toxicologiques pourrait également faire craindre une partialité des résultats, concentrerait les compétences chez les grands acteurs et reporterait l'essentiel du risque d'innovation sur les PME. Enfin, ces carences pourraient cristalliser les débats éthiques de la communauté scientifique⁹.

⁸ Elles concernent notamment le comportement environnemental des fullerènes. Voir la base de données de l'International Council on Nanotechnology et du Center for Biological and Environmental Nanotechnology de l'université de Houston (Texas) ; <http://icon.rice.edu/advancedsearch.cfm> . Une synthèse de ces travaux est prévue en 2007. Une autre base disponible émane du National Institute for Occupational Safety and Health ; <http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/>

⁹ "Pour une évaluation normative du programme nanotechnologique", J.-P. Dupuy, Annales des Mines, février 2004.

Dans ce contexte, une bonne gestion des risques paraît nécessaire. Cette gestion comprend deux volets interdépendants : l'aspect technique (mesures de protection physique, normes et règles de sécurité) des nanotechnologies, et les enjeux pour la société. L'International Risk Governance Council¹⁰ préconise d'édicter des règles pour tout, des produits issus des technologies de première génération (produits à structure passive), aux propriétés physiques relativement maîtrisables et à faible impact social¹¹. Pour l'OCDE¹², cette approche est insuffisante : les nanotechnologies de première génération portent déjà en germe des problèmes éthiques et sociaux soulevés par les nanotechnologies des générations suivantes. C'est pour cela que la France, au sein de l'OCDE, milite pour une prise en compte explicite de la sécurité au niveau de la production et au long du cycle de vie des produits, la création d'indicateurs statistiques, ainsi que pour un dialogue dépassant la seule coordination commerciale ou réglementaire, incluant les pays non membres de l'OCDE et élargi aux aspects d'éthique et d'utilité sociale des nanotechnologies.

2.6. ... à partir de consensus techniques et de veille active

Le contenu du volet technique fait l'objet d'un début de consensus international, notamment sur l'exposition professionnelle, qui pourrait être réduite par des processus de production et des équipements adaptés (robotisation, filtrage, systèmes clos, captage à la source des poussières, conditionnement des nanoparticules et des déchets sous forme liquide ou au sein de liants, installations inondables, protections individuelles, etc.). Cependant, ces mesures nécessitent d'identifier les sources de dispersion des nanoparticules à toutes les étapes de la fabrication et d'améliorer la connaissance toxicologique des différents matériaux.

3. Les actions en cours pour répondre à ces questions¹³

3.1. Les actions menées par la puissance publique pour prévenir les risques sanitaires et environnementaux

Les actions menées ont été élaborées dans un groupe inter-services (DGS, DGT, DPPR, au début, rejointes par DGRI et DGAL). L'affaire de l'amiante est dans toutes les mémoires et oriente l'action publique des ministères du travail et de la santé.

Dès 2004, les pouvoirs publics se sont préoccupés des risques sanitaires et sociaux inhérents aux nanomatériaux et aux nanotechnologies. Le ministère chargé de l'environnement a saisi le CPP (Comité de la Prévention et de la Précaution) en 2004 a rendu son rapport en mai 2006. Dès le début de l'année 2005, le ministère chargé du travail avait initié un projet de saisine de l'AFSSET (Agence Française de Sécurité Sanitaire environnementale et du Travail), qui s'est concrétisé par une première saisine interministérielle (environnement, santé, travail) de cette agence en septembre 2005 pour avoir un état des connaissances des dangers et des risques sanitaires. L'AFSSET a rendu son rapport en juillet 2006. Une deuxième saisine de l'AFSSET en juin 2006 met l'accent sur l'évaluation des risques pour les chercheurs et les travailleurs en vue d'obtenir un avis et des recommandations pour la protection de la santé de ces personnes proportionnés aux risques ainsi évalués. Le rapport est attendu pour la fin de l'année 2007. Une troisième saisine a pour objet l'évaluation des risques liés aux nanomatériaux en population générale et à l'égard des consommateurs, pour tout leur cycle de vie y compris l'usure, la destruction, le stade de déchet, le recyclage. Cette évaluation sera

¹⁰ Fondée en 2003 à l'initiative du gouvernement suisse, l'International Risk Governance Council, est une organisation indépendante, regroupant des représentants du gouvernement, de l'industrie et du milieu universitaire, dont la mission consiste à améliorer la capacité d'anticipation et de gestion des risques systémiques et globaux du gouvernement.

¹¹ Nanotechnology, Risk Governance, O. Renn et M.Roco eds., International Risk Governance Council (IRGC), white paper n°2, juin 2006 ; http://www.irgc.org/irgc/b/contentFiles/IRGC_white_paper_2_PDF_final_version.pdf

¹² Proposed OCDE Activities on Nanotechnologies within the Context of the CSTP, DSTI/STP(2006)35, OCDE, Séoul, oct. 2006 (draft).

¹³ Ce paragraphe est extrait d'une note de la DPPR.

d'abord simplifiée compte tenu des difficultés métrologiques, des incertitudes sur le danger et du peu de connaissance sur le lien dose effet.

Le ministère chargé de la santé a saisi l'AFSSA (Agence Française de Sécurité Sanitaire des Aliments) pour la surveillance des aliments et des eaux de consommation et l'AFSSAPS (Agence Française de Sécurité Sanitaire des produits de santé) pour la surveillance des médicaments, dispositifs médicaux et cosmétiques (notamment ceux contenant du TiO₂). L'Institut de veille sanitaire (InVS) a également inscrit ce thème à son programme 2007.

Un séminaire Intergouvernemental, organisé en octobre 2006, a permis une information sur l'action gouvernementale des différents départements ministériels et de formuler des recommandations.

L'IReSP (Institut de Recherche en Santé Publique) a accepté de coordonner les efforts entre l'Inserm, l'InVS et le CEA (Commissariat à l'Energie Atomique) pour mettre en place une cohorte prospective de suivi épidémiologique des chercheurs et travailleurs exposés. Elle s'inscrit dans le cadre de la cohorte multi-risque/multi-secteur COSET¹⁴ qui vient de démarrer. L'étude de faisabilité de l'inclusion de sujets potentiellement exposés aux nanomatériaux se déroulera en 2007 afin de déposer un dossier à l'ANR en 2008.

La France participe également activement aux travaux engagés dans le cadre de l'OCDE. Cette organisation a créé deux groupes de travail : l'un relatif aux nanomatériaux manufacturés (dans le cadre du Comité des produits chimiques), l'autre à la nanotechnologie (dans le cadre du Comité de la politique scientifique et technologique).

La France vient de participer, sous l'égide du Forum intergouvernemental sur la sécurité chimique (FISC) à l'élaboration d'une proposition pour un débat sur le sujet de la nanotechnologie et des nanomatériaux lors de sa VI^{ème} Session en 2009.

3.2. Recommandations relatives aux questions sociétales, éthiques et légales

Le CPP (Comité de la Prévention et de la Précaution) rappelle que les bénéfices directs et indirects du développement des nanotechnologies pour la société et l'individu sont actuellement imprévisibles. Dès qu'ils pourront être appréhendés, ces bénéfices devront être systématiquement mis en rapport avec les risques qu'ils peuvent engendrer.

Le COMETS (Comité d'Ethique pour les Sciences du Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS) a exprimé un avis sur les « Aspects éthiques associés au développement de ces nanotechnologies ».

Le CCNE (Comité Consultatif National d'Ethique pour les sciences de la vie et de la santé) a prononcé un avis sur les questions éthiques posées par les nanosciences, les nanotechnologies et la santé.

3.3. Résultats de la prévention des risques sanitaires et environnementaux

Les rapports de l'AFSSET et du CPP en juillet 2006 affirment que le peu de connaissances existantes suffisent néanmoins pour dire que les nanomatériaux peuvent constituer un danger pour la santé de l'homme et que des études complémentaires métrologiques, toxicologiques et épidémiologiques s'imposent. D'ailleurs, le CCNE (Comité Consultatif National d'Ethique pour les sciences de la vie et de la santé) le confirme dans son avis sur "Les nanosciences, les nanotechnologies et la santé" (février 2007) : "la redoutable propriété ambivalente des nanosystèmes moléculaires conçus par l'homme, de pouvoir traverser les barrières biologiques, notamment entre sang et cerveau, et d'être actuellement peu ou pas biodégradables, [...] risque d'avoir, en dehors d'indications thérapeutiques précises, des conséquences majeures pour la santé".

¹⁴ *COhorte pour la Surveillance Épidémiologique en milieu de Travail*

Les rapports préconisent la mise en place d'un comité scientifique indépendant de veille et d'alerte sur les risques sanitaires et sociaux de la nanotechnologie et des nanomatériaux manufacturés. Cette entité, qui prendra le nom d'Observatoire, en cours de constitution, devrait être rattaché au Haut Conseil de Santé Publique. Il sera chargé d'une veille réactive large, sur toutes les questions de toxicologie et d'écotoxicologie ainsi que sur les impacts juridiques, économiques et sociaux liés aux nanotechnologies et nanomatériaux. Il pourra lancer des alertes auprès des pouvoirs publics, pointer les manques dans la recherche et chercher à combler ces manques. Il travaillera en étroite liaison avec l'ANR (Agence Nationale de la Recherche).

Pour que se développe la recherche sur les risques, l'ANR lance annuellement des appels à projets dans le cadre du plan national santé environnement (PNSE) et dans le cadre du plan santé au travail (PST 2005-2009). Depuis 2005, trois projets toxicologiques, trois projets métrologiques et un projet socio-éthique ont été retenus.

Les recommandations du Séminaire intergouvernemental d'octobre 2006 portent sur les points suivants : Création d'un Observatoire de veille scientifique sur les risques sanitaires, environnementaux et sociaux liés aux nanomatériaux et nanotechnologies ; Acquisition de la connaissance de la réalité de la production, la fabrication, la distribution et l'utilisation de nanomatériaux... en France ; Protection des travailleurs et des chercheurs ; Considérations des aspects réglementaires (nationaux et européens), sociétaux et éthiques (Forum permanent, Débat national).

Lors du débat organisé à la Cité des sciences et de l'industrie, des 19 et 20 mars 2007, le ministre de l'Industrie a annoncé notamment la mise en place d'un Portail Internet (réflexion en cours). Les associations (France Nature environnement, Vivagora, Fondation Sciences citoyennes...) demandent à être plus associées à l'élaboration des programmes d'action des pouvoirs publics. La création du Nano-Forum permanent est en cours : son but est d'organiser des réunions périodiques gratuites (mensuelles ou bimestrielles) au CNAM (Conservatoire National des Arts et Métiers) avec des scientifiques, des industriels, des journalistes et des usagers. Une large diffusion des débats seraient faite.

Dans le cadre du groupe de travail nanomatériaux manufacturés de l'OCDE, la France (en l'occurrence la DPPR) a constitué puis mis à jour le document faisant le point sur l'état en France de la réponse des autorités à la question des risques et des impacts des nanotechnologies et nanomatériaux. Ce groupe réuni pour la seconde fois à Berlin en avril 2007 a validé le programme de travail proposé, formé de six projets :

- 1 Développement d'une base de données de l'OCDE sur les recherches en sécurité sanitaire et environnementale ;
- 2 Stratégies de recherche sur la sécurité sanitaire et environnementale des nanomatériaux manufacturés ;
- 3 Essais de sécurité sur un échantillon représentatif de nanomatériaux manufacturés ;
- 4 Nanomatériaux manufacturés et lignes directrices pour les essais ;
- 5 Coopération sur les dispositifs volontaires et programmes réglementaires ;
- 6 Coopération en matière d'évaluation des risques et de mesure de l'exposition.

La France est impliquée dans tous les projets à l'exception du n° 5. Pour cela, elle a nommé des experts de la DGS, de l'INRIS et de l'AFSSET. Le groupe de travail Nanotechnologie, formé quant à lui en mars dernier, a pour objet le développement responsable de la nanotechnologie. La France a obtenu que les aspects sociétaux, éthiques et juridiques soient pris en compte.

3.4. Résultats relatifs aux questions sociétales, éthiques et légales

La France a tenté, sans succès, par la voie du Parlement européen, un amendement au règlement REACH visant à introduire un considérant sur la nécessité de porter une attention particulière sur les nanomatériaux.

Dans son avis « Prendre en compte les aspects sociétaux », le CPP (Comité de la Prévention et de la Précaution) recommande de mettre en place un « observatoire sociétal » du développement, de la production et de l'usage des nanotechnologies afin d'interroger l'utilité sociale des nanotechnologies et la nécessité de leur production pour la société dans différents domaines d'application connus et envisagés ; d'inciter les organismes de recherche à développer des programmes sur les implications sociales et éthiques des nanotechnologies ; d'organiser l'implication des populations concernées (travailleurs, usagers, riverains, consommateurs) dans cette observation et ce suivi des nanotechnologies : développer des démarches participatives (débat public, conférences de citoyens...); de prendre toutes les initiatives permettant d'organiser des débats locaux en les intégrant aux initiatives nationales et internationales ; de sensibiliser les chercheurs et personnels de laboratoire aux enjeux sociétaux et éthiques. Il recommande par ailleurs d'« Elaborer un dispositif national réglementaire en cohérence avec les recommandations de la Commission européenne : en l'état actuel du droit, toute une série de réglementations existantes paraît potentiellement applicable aux nanoparticules, mais aucune ne les vise spécifiquement, ce qui en rend la mise en œuvre très aléatoire et exige l'adoption rapide de mesures assurant un développement responsable des nanoparticules. ».

Le COMETS (Comité d'Ethique pour les Sciences du Centre National de la Recherche Scientifique - CNRS) recommande de promouvoir une vigilance éthique, de participer activement à la concertation entre les parties intéressées (industriels, associations de consommateurs, associations de malades, ONG...), d'inclure l'éthique dans carrières chercheurs (formation initiale, continue, évaluation, projets recherche...) d'élaborer des guides éthiques pour les chercheurs, d'ouvrir des espaces éthiques dans les centres de recherche, de stimuler les chercheurs en sciences humaines pour nanosciences, d'instaurer des procédures de repérage et d'arbitrage des conflits d'intérêts et de transparence des sources de financement dans les projets conjoints CNRS/Industrie, de présenter les bienfaits attendus sans occulter les méfaits possibles, de mettre l'accent sur les conséquences pour l'homme et ne pas se limiter aux enjeux économiques et industriels, de prendre en considération le très long terme et d'identifier les fantasmes, et enfin de mettre en place des instances de dialogues et participer aux débats citoyens.

Le CCNE (Comité Consultatif National d'Ethique pour les sciences de la vie et de la santé) recommande une étude rigoureuse avant de songer à la commercialisation d'un produit ; de ne pas poser de contraintes éthiques pour la recherche fondamentale. Ceci suppose par contre une responsabilisation des acteurs de la recherche avec l'élaboration d'un cahier de bonnes pratiques. Il faut aussi introduire une réflexion éthique sur la stratégie de recherche ; de développer spécifiquement la nano-métrie et de rendre obligatoire dans les appels à projets les études primaires sur les effets sur la santé et l'environnement avec une évaluation a posteriori ; de soumettre les nano-produits destinés à la santé aux lois de bioéthique et aux règlements des agences françaises et européennes ; d'initier des débats publics avec des panels de citoyens formés, des chercheurs et des experts sociaux, économiques, médicaux et environnementaux et d'en diffuser très largement les comptes-rendus.

4. Le débat sur les nanotechnologies...

4.1. Un débat qui dépasse largement les seules questions d'environnement

L'émergence des nanotechnologies a d'ores et déjà suscité de **nombreux débats en France comme à l'étranger**. Les premiers questionnements datent, aux Etats-Unis, de la fin des années 1990 : les premières visions, catastrophistes ou fantasmagiques, notamment celle évoquant l'hypothèse d'un développement autonome des robots, phagocytant le monde vivant dans une concurrence vers le carbone et les ressources, ont fortement marqué l'histoire.

En France, les premières décisions de R & D dans le domaine des nanotechnologies ont été prises alors qu'elles étaient encore inconnues du grand public. Il faut attendre 2003 pour que le débat sorte de la confidentialité aux Etats-Unis et en Europe, au Royaume-Uni d'abord avec le rapport de la *Royal society*. Les discussions portent alors **sur la gouvernance de cette révolution technologique (en particulier dans le domaine des risques) et sur ses apports à la compétition économique**. Dans le contexte de la Stratégie de Lisbonne, le sujet a perdu son caractère uniquement scientifique pour être associé à certains enjeux économiques et sociaux majeurs. Il est de ce fait devenu très « inclusif », car concernant l'avenir de la société, au risque de couvrir un champ trop vaste.

4.2. Un débat marqué par les craintes éthiques et sociales

Alors que se dessine la convergence entre nanotechnologies, biotechnologies, informatique et sciences cognitives (NBIC) et la convergence industrielle potentielle correspondante, des craintes relatives au maintien de l'intégrité humaine individuelle¹⁵ ou sociale (régression des libertés, renforcement des inégalités) et à la perte de contrôle des technologies liées à la mise en oeuvre de ces technologies se font jour. Elles reposent pour une part sur des malentendus, telle que les assimilations abusives par la littérature fantastique, les controverses entre experts sur la dangerosité potentielle des nanotechnologies, ou un discours très mobilisateur vers la technoscience¹⁶. Ces craintes pourraient attiser une attitude de défiance vis-à-vis de la science, préjudiciable à son évolution¹⁷, dans un contexte déjà marqué par les controverses autour des OGM ou du clonage... Pour tenter d'y remédier, le Royaume-Uni, les États-Unis et le Danemark¹⁸, ont débattu des questions éthiques et sociales relatives aux nanotechnologies à travers des ateliers ou des conférences de consensus dès 2004; jusqu'à récemment, ces questions l'ont moins été dans l'espace public de l'Union européenne, et notamment en France¹⁹.

Un élément de contexte doit retenir l'attention : **ces débats sur les nanotechnologies s'appuient sur les acquis des précédents débats « historiques »** sur les biotechnologies, le nucléaire, les OGM, et avec le souci d'éviter les erreurs du passé. Ceci conduit, d'une part, à une forme de recyclage des outils, des argumentaires, des postures et des recommandations, d'autre part à une volonté forte d'innovation tant sur la conduite des débats que sur leur finalité et débouchés.

Sceptiques face à cette « économie des promesses » que portent les visions linéaires du progrès, les citoyens peuvent préférer, comme le révèle, entre autres, une étude américaine²⁰, **percevoir clairement les risques et les bénéfices des développements annoncés. A ce sujet, une différence importante par rapport aux OGM destinés à l'agriculture, dont les bénéfices annoncés concernaient le champ (résistance aux ravageurs, aux herbicides) et non l'assiette,**

¹⁵ Converging Technologies for Improving Human Performance. Nanotechnology, Biotechnology, Information Technology and Cognitive Science, M.C. Roco & W.S. Bainbridge eds., NSF/DOC-sponsored report, National Science Foundation (NSF), juin 2002 ; <http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/>

¹⁶ Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology, E. Drexler, Ed. Anchor Books, 1986; <http://www.foresight.org/EOC/>

¹⁷ Voir par exemple l'opposition suscitée par l'ouverture en 2006 du Minatoc à Grenoble avec le mouvement "Pièces et Main-d'oeuvre" ; www.piecesetmaindoeuvre.com

¹⁸ Respectivement au sein de la Royal Society & Royal Academy of Engineering, du Lokia Institute et de l'université du Wisconsin, du Danish Bard of Technology. Aux États-Unis, la NSF consacre, depuis 2004, 1 % du financement dédié aux nanotechnologies aux questions éthiques.

¹⁹ Notamment, "Nanosciences - Nanotechnologies", Rapport sur la science et la technologie, n° 18, Académie des technologies, Académie des sciences, Éd. Tec & Doc Lavoisier, avril 2004 ; http://www.academie-sciences.fr/publications/rapports/rapports_html/RST18.htm

²⁰ *What drives public acceptance of nanotechnology?*, S. C. Curall et al., Faculty of Engineering Sciences, University College London; London Business School ; George Mason University, Department of Physics and Astronomy and Baker Institute for Public Policy, Department of Psychology, Rice University, USA. Etude menée sur plus de 5 000 américains concluant à une opinion relativement neutre par rapport aux nanotechnologies et à la nécessité d'explicitier les risques/bénéfices des technologies comme éléments d'un débat non « polarisé ».

tient au fait que les citoyens sont directement concernés par les atouts potentiels des nanotechnologies. L'étude américaine précitée de S. C. Curall constate une neutralité dans la perception, tout comme l'Eurobaromètre de juin 2006 qui indique que plus de la moitié des européens sont plutôt favorables aux nanotechnologies. **Cette filière démarre donc avec un important capital de confiance.** Cependant, le décalage entre la connaissance réelle des risques et les perceptions véhiculées par les médias pourrait engendrer des tensions, voire des crises. En particulier, alors que les recherches commencent à intégrer les propriétés des nanoparticules passives, et spécialement des nanoparticules solides non solubles, la société civile redoute d'une part des insuffisances de décision (le scénario « amiante » est présent dans les esprits) et les dérives pouvant résulter de la convergence des technologies nano et bio,

4.3. L'état des préoccupations

Du côté de la prise de conscience, par la société comme par les pouvoirs publics, des problématiques liées aux nanotechnologies, la France a comblé son retard, comme le montre l'imposante bibliographie fournie lors des débats de la Cité des Sciences en mars 2007 : de nombreux rapports ont été publiés, globalement convergents, qui n'ont pas craint d'élargir les saisines initiales aux enjeux éthiques et sociaux. Dans le même temps, des initiatives variées de débats ont été prises au niveau européen (nanodialogue, nanologue etc.).

Si l'on cherche à clarifier le débat, une accumulation collective de points d'entrée semble se dessiner dans laquelle certains amalgames ou approximations ont de moins en moins cours. Ainsi, il fait consensus que :

- les nanoparticules et nano dispositifs ont des propriétés en rupture (et non prévisibles) avec celles de la matière à des échelles supérieures : cela permet de parler de propriétés ambivalentes notamment dans les applications médicales, mais surtout de pointer le nécessaire investissement souvent au cas par cas sur les évaluations toxicologiques et écotoxicologiques nécessaires ainsi que sur l'étude des voies d'exposition des populations ;
- la caractérisation est actuellement insuffisante pour que les dispositifs de protection « ajustés » puissent être proposés : une attitude maximaliste de précaution est donc nécessaire en l'absence de connaissances plus précises sur une filière particulière ;
- le monde industriel, loin de pouvoir traiter cette question à la légère, doit prendre à son compte la précaution, sous peine de risquer en retour de graves déboires économiques ou de voir sa responsabilité engagée en cas d'incident. De ce point de vue, le « nano inside », un temps vu comme un atout marketing, devient une vulnérabilité pour l'image des produits.

4.4. Une prise de conscience européenne mais aussi locale de la nécessité de débattre

Ces sujets sont aussi pris en compte au niveau international, que ce soit dans les groupes de travail à l'OCDE ou dans des processus plus informels²¹ visant à **promouvoir un développement responsable des nanotechnologies par une bonne coopération entre pays.** Ce dialogue international important, qui touche aussi les instances de normalisation, la recherche en métrologie, les programmes d'étude sur les risques, et dans lesquels la France prend dorénavant une part active, se déroule de façon peu visible mais tout en faisant rapidement progresser les choses. Il pointe en particulier le besoin de *risk assessment* en matière d'environnement, de santé, et l'absence de faits robustes généralisables relativement au comportement des substances.

Du côté européen, les conclusions du Conseil du 27 septembre 2004 proposent un « safe, sustainable, responsible and socially acceptable » développement des nanotechnologies, et des **décisions concrètes ont été prises, avant même que le débat public n'ait pris de l'ampleur,** notamment pour mieux connaître les risques associés aux nanoparticules (programme Nanosafe par exemple). Un séminaire prospectif européen de la DG Recherche en 2004 « converging technologies for a diverse Europe » réunissant des experts européens pluridisciplinaires (en particulier des

²¹ L'*International Dialogue on Responsible Research and Development of Nanotechnology*, Alexandria, Virginia, United States, 17-18 June 2004, qui réunissait 26 pays en a constitué le point de départ.

sciences humaines et sociales) avait noté l'inadaptation du cadre réglementaire actuel, quelles que soient ses composantes (impacts, échanges, propriété intellectuelle, nomenclature).

Parallèlement à cette internationalisation du débat, on assiste aussi à sa « localisation ». De nombreux dispositifs participatifs sont ainsi organisés sur une base territoriale : autour de Minatec dans l'agglomération grenobloise bien sûr, mais aussi en régions Ile-de-France et Midi-Pyrénées. Le rapport *Démocratie locale et maîtrise sociale des nanotechnologies*²², commandé par la communauté de communes de l'agglomération grenobloise, constate ainsi que les débats sur les choix scientifiques sont maintenant revendiqués à l'échelle locale, alors que les questionnements de cette nature s'étaient jusqu'à présent déroulés à l'échelle nationale. Cette multiplication des initiatives fait que le débat « parisien » de la Cité des Sciences s'est positionné comme « méta-débat » faisant le point sur ces multiples expériences.

Ces craintes nécessitent que soit diffusée une information claire sur les dispositifs de gouvernance des risques, sur les évaluations, les possibilités de choix et la destination des fonds publics. **Si on fait l'hypothèse que le décalage entre ce qui est connu et ce qui est craint donne aux acteurs l'impression d'être dépossédés de leur capacité d'action, alors il faut inclure la notion même d'évaluation participative dans le processus de formation et d'information permanent des citoyens.** La démocratie participative, pour peu qu'elle soit correctement articulée avec la des nanotechnologies démocratie représentative, trouve ici un point d'application intéressant et légitime.

La profusion actuelle des débats appelle une clarification de la stratégie des pouvoirs publics en matière d'évaluation participative: quels que soient les choix faits en la matière, il est au minimum nécessaire que les tenants et aboutissants du débat sur les nanotechnologies puissent être présentés clairement aux citoyens (chronologie, décisions prises, positions des acteurs), en raison des nombreuses implications sociales qu'elles sont susceptibles d'avoir demain. Pour le reste, le domaine des nanotechnologies n'échappe pas aux questions qui se posent pour toutes les évaluations participatives : quel niveau est pertinent (faut-il centraliser les débats ou les rapprocher du niveau local) ? Quelle structure publique doit accueillir de tels débats (CNDP, en raison de son expertise, OPECST sur le modèle du DBT) ? Quel type de régulation les pouvoirs publics souhaitent-ils mettre en œuvre : une régulation de la recherche sur le modèle de celle mise en œuvre dans le domaine du vivant ? Ou une régulation sur le modèle mis en place par la loi *Informatique et liberté* ? Enfin, se pose la question du bon dimensionnement de cette procédure au regard de son coût éventuel en termes d'allongement des délais de prise de décision. La réponse à ces questions, quel que soit le champ concerné, conditionne largement le succès, pour les pouvoirs publics, de l'évaluation participative.

5. Conclusion

De ce développement des nanotechnologies, qui étonne par son ampleur et qui inspire de la crainte à certains, découle trois recommandations : une priorité forte doit être accordée à la recherche sur les nanotechnologies afin que notre économie soit bien placée dans la compétition mondiale ; en parallèle, nous devons mettre en place les structures, les régulations, les recherches et la veille nécessaires pour prévenir les dangers qui pourraient résulter de leur utilisation ; enfin, une réflexion particulière doit être menée sur la gouvernance.

Au-delà des enjeux sanitaires, les nanotechnologies soulèvent également des questions éthiques et philosophiques : la transformation de l'humain, la création artificielle et incontrôlable de la vie, le changement profond pouvant affecter les libertés. Le Conseil général des Mines²³ recommandait ainsi que s'organise un espace de dialogue entre chercheurs et acteurs de la société civile. Instaurer une forme de "démocratie participative" sur les nanotechnologies et ses applications est une démarche préconisée par beaucoup d'acteurs. Initiée par la Royal Society, elle est notamment reprise dans les

²² *Démocratie locale et maîtrise sociale des nanotechnologies. Les publics grenoblois peuvent-ils participer aux choix scientifiques et techniques ?*, Rapport de la Mission pour La Métro, Rapport Final, 22 septembre 2005.

²³ Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle, J.-P. Dupuy et F. Roure, Paris, Conseil Général des Mines, Conseil Général des Technologies de l'Information, 8 novembre 2004.

<http://www.cgm.org/themes/deveco/develop/nanofinal.pdf>

objectifs de la Commission européenne. Pour la France, le rapport du Comité de prévention et de la précaution fut un point de départ pour un processus multiforme d'initiatives visant à répondre à ces préoccupations. Un peu de clarification pourrait être nécessaire. Plutôt qu'une multitude de réunions dispersées ou qu'un débat ponctuel, un débat régulier et continu sur les nanotechnologies, éventuellement sous l'égide de la Commission nationale du débat public, pourrait être recherché.