



Ministère du Travail, des Relations sociales, de la Famille, de la Solidarité et de la Ville  
Ministère de la Santé et des Sports  
Haut Commissaire à la Jeunesse

CONCOURS EXTERNE ET INTERNE POUR LE RECRUTEMENT  
D'INGENIEUR DU GENIE SANITAIRE  
ANNEE 2010

Lundi 12 avril 2010  
13 h 30 à 18 h 30

(Horaire métropole)

EPREUVE COMMUNE – durée : 5 heures – coefficient : 4

Rédaction d'une note de synthèse à partir d'un dossier ayant trait à la santé et à l'environnement

**IMPORTANT :** Les candidats sont priés de vérifier le nombre de pages et la numérotation des documents joints.

---

**SUJET**

A partir de la documentation jointe, vous rédigerez une note de synthèse pour votre supérieur hiérarchique mettant en évidence les risques pour la santé et pour l'environnement posés par les nanotechnologies.

Documents fournis : 9 - pages : 103

<b><u>Documents joints :</u></b>	<b>pages</b>
<b><u>Document n° 1</u></b> « Les nanomatériaux : effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement » Synthèse – Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail Juillet 2006 (6 pages)	3 à 8
<b><u>Document n° 2</u></b> « Nanotechnologies et nanoparticules dans l'alimentation humaine et animale » Agence française de sécurité sanitaire des aliments Mars 2009 (26 pages)	9 à 34
<b><u>Document n° 3</u></b> « Survivre aux nanotechnologies ? » Fondation Sciences Citoyennes Octobre 2006 (33 pages)	35 à 67

**Document n° 4**

« Filtration des nanoparticules : un problème de taille ? »  
Institut National de Recherche et de Sécurité  
2<sup>ème</sup> trimestre 2008 (7 pages)

68 à 74

**Document n° 5**

« Nanotechnologies : oser mettre en débat les finalités, par Bernadette Bensaude... »  
Le Monde - 18 février 2010 (3 pages)

75 à 77

**Document n° 6**

« Particules ultra-fines et santé au travail ~ sources et caractérisation de l'exposition »  
Institut National de Recherche et de Sécurité  
2<sup>ème</sup> trimestre 2005 (18 pages)

78 à 95

**Document n° 7**

« Le débat public sur les nanotechnologies n'a pas fait bouger les positions »  
Le Monde - 24 février 2010 (2 pages)

96 à 97

**Document n° 8**

« Les nanotechnologies suscitent autant d'espoir que d'inquiétude... »  
Le Figaro – 25 février 2010 (2 pages)

98 à 99

**Document n° 9**

« Les citoyens face aux nanotechnologies »  
Association ATTAC – avril 2009 (4 pages)

100 à 103



Juillet 2006

## **I Les nanomatériaux : présentation**

Les nanomatériaux manufacturés, objets du présent rapport sont des matériaux constitués de particules issues d'un procédé de fabrication spécifique, de taille nanométrique, c'est-à-dire pour schématiser de taille inférieure à 100 nm, ils se différencient des particules ultra fines d'origine naturelle ou provenant d'une combustion comme les particules issues des moteurs diesel. Toutes les grandes familles de matériaux sont concernées (métaux, céramiques, carbones, polymères, silicates, etc.). Ces nouveaux matériaux présentent des caractéristiques différentes par rapport aux mêmes matériaux à l'échelle macroscopique ou micrométrique. Il devient possible d'obtenir des matériaux apportant notamment des propriétés mécaniques, électriques, magnétiques, optiques ou catalytiques particulières.

De très nombreux secteurs industriels sont concernés par le développement de nanomatériaux pour de multiples applications dont certaines sont d'ores et déjà en phase de production industrielle. C'est le cas notamment des nanotubes de carbone, dont la structure est cent fois plus résistante et six fois plus légère que l'acier, ainsi que des nanoparticules de dioxyde de titane utilisées dans le secteur des cosmétiques, des nanoparticules de silice pour les pneumatiques ou encore la cérine comme additif de carburant. Les nanomatériaux peuvent être développés notamment pour apporter une fonction autonettoyante ou antiadhésive sur une surface, augmenter la dureté d'un matériau, améliorer la résistance au frottement, améliorer la qualité des textiles, etc. On remarque la présence de nanomatériaux dans les secteurs de l'environnement, de l'énergie, du textile, de la chimie, des cosmétiques, de la santé, de l'automobile, du bâtiment, etc.

Le développement et les niveaux de production des nanomatériaux manufacturés devant s'étendre et s'intensifier dans les prochaines années, la question de leur éventuel impact sanitaire se pose dès aujourd'hui.

## **II Toxicité des nanomatériaux pour l'homme**

Peu de données sont actuellement disponibles sur la toxicité des nanomatériaux manufacturés, notamment à cause du faible nombre d'études menées à ce jour, d'un recul peu important sur cette nouvelle forme d'exposition et de la grande diversité des nanoparticules produites. Toutefois, des effets délétères ont été mesurés, notamment chez l'animal dans un cadre expérimental.

Outre les facteurs liés à l'exposition (voies d'exposition, importance et durée) et à l'organisme exposé (susceptibilité individuelle, interaction avec les composants biologiques, évolution dans l'organisme), des effets spécifiques aux nanoparticules liés à leurs propriétés physico-chimiques peuvent être mis en évidence. L'impact de ces propriétés physico-chimiques sur la toxicité est peu connu, néanmoins, les études disponibles permettent de relever un certain nombre de facteurs susceptibles d'être impliqués dans les effets toxicologiques des nanoparticules manufacturées : la taille, l'aire et la réactivité de surface, le nombre, la composition chimique, la forme, la solubilité, la capacité à former des agrégats ou des agglomérats, le traitement de surface et la structure, notamment.

Plusieurs voies d'exposition peuvent être distinguées pour l'étude de la toxicité des nanoparticules : l'inhalation, le contact cutané et l'ingestion. Les données disponibles à ce

jour montrent que certaines particules insolubles peuvent franchir les barrières de protection, se distribuer dans l'organisme et s'accumuler dans plusieurs organes, principalement suite à une exposition par inhalation ou par ingestion.

Les études disponibles concernent essentiellement les fullerènes, les nanotubes de carbone, ainsi que les nanoparticules inorganiques (dioxyde de titane, or colloïdal, sélénium, trioxyde d'arsenic, oxyde de zinc, zinc).

En ce qui concerne les fullerènes, on ne relève qu'une étude chez le rat montrant une toxicité par voie intrapéritonéale entraînant des dommages dans le rein mais pas de toxicité par voie orale.

Les études toxicologiques sur les nanotubes de carbone concernent essentiellement les nanotubes de carbone monofeuillet et montrent une toxicité respiratoire mais pas d'effet lors d'une exposition cutanée.

Les études toxicologiques portant sur les nanoparticules inorganiques montrent une toxicité par voie respiratoire en rapport avec la surface administrée et concernent principalement le dioxyde de titane. Il est intéressant de remarquer que certaines études montrent une diminution de la toxicité générale ou de la cytotoxicité de l'or colloïdal, du sélénium ou du trioxyde d'arsenic sous forme nanoparticulaire. Pour les aspects cutanés, les études faites sur le dioxyde de titane dans diverses formulations de filtres solaires ne montrent pas d'absorption au-delà du derme sur de la peau saine chez l'homme.

### **III Risques sanitaires des nanomatériaux**

#### **III.1 Détection des nanoparticules**

La métrologie constitue une étape clé dans la connaissance et la maîtrise du risque lié aux nanoparticules. Elle doit permettre de caractériser un certain nombre de propriétés physiques et chimiques des nanoparticules. Ainsi, les outils métrologiques doivent permettre d'obtenir leur dénombrement, et préciser leurs propriétés morphologiques, chimiques (composition) et physico-chimiques (charge de surface).

La principale difficulté liée à la détection des nanoparticules dans l'air réside dans la distinction entre les particules d'origine naturelle et anthropique. Les méthodes de mesures ne permettant pas cette distinction réalisent des mesures dites « non spécifiques ». Dans le cas contraire, il s'agit de mesures « spécifiques ». Une troisième catégorie de méthodes réalise une détection indirecte par traçage (après marquage préalable des particules). Actuellement, il n'existe pas de technique polyvalente : il est généralement nécessaire d'utiliser plusieurs appareils en fonction du paramètre recherché. D'autre part, il existe peu de techniques disponibles sur le marché, la plupart restant « de laboratoire ». Enfin, toutes les techniques ne permettent pas de réaliser des mesures en temps réel. Ainsi, il n'existe pas à l'heure actuelle de techniques de mesure permettant de mesurer l'ensemble des paramètres pertinents et d'être utilisées en pratique de routine pour la surveillance des ambiances de travail. Elles nécessiteront d'être validées par des protocoles standardisés.

En ce qui concerne la détection des nanoparticules manufacturées dans les eaux, si les mesures en laboratoire ou au niveau de la production sont bien maîtrisées, les difficultés

restent importantes lorsqu'il s'agit de prélèvements dans le milieu naturel (distinction entre les particules naturelles et manufacturées), et notamment pour ce qui concerne l'échantillonnage.

## V Conclusions

En conclusion, la question principale est de savoir si les nanoparticules manufacturées ont une toxicité particulière susceptible d'entraîner des impacts sanitaires. Pour répondre à cette question, il paraît indispensable de multiplier les études toxicologiques et de mesurer l'exposition des personnes, en particulier dans le milieu professionnel. C'est un préalable nécessaire à l'établissement d'une législation spécifique aux nanoparticules manufacturées. Il est ainsi important dans une première étape d'améliorer la connaissance des produits et de leur disponibilité. Il est préconisé à cette fin la création d'un observatoire décisionnel ayant un rôle de coordination pour assurer notamment la connaissance des produits et de l'ensemble des travaux toxicologiques et épidémiologiques réalisés dans ce domaine. Des mesures spécifiques doivent être prises pour évaluer l'efficacité des moyens de protection individuels et collectifs, connaître le comportement des aérosols et mesurer le relargage des nanoparticules après intégration dans une matrice.

Ainsi des mesures sont préconisées dans les domaines suivants :

- connaissance des nanoparticules et des nanomatériaux ;
- coordination de la recherche ;
- détection des nanoparticules ;
- toxicologie, épidémiologie, caractérisation des expositions humaines et évaluation des risques sanitaires ;
- moyens de protection individuels et collectifs ;
- normalisation et réglementation ;
- formation et information.



AGENCE FRANÇAISE  
DE SÉCURITÉ SANITAIRE  
DES ALIMENTS

## **Nanotechnologies et nanoparticules dans l'alimentation humaine et animale**

---

**Mars 2009**

## **Contributions**

---

### **Comités d'experts spécialisés**

- Additifs, arômes et auxiliaires technologiques,
- Alimentation animale,
- Matériaux au contact des denrées alimentaires,
- Microbiologie,
- Nutrition humaine
- Résidus et contaminants chimiques et physiques .

### **Rapporteurs membres de CES :**

- M. Michel Etienne, INRA - Saint-Gilles
- M. Jean-François Gérard, UMR CNRS Ingénierie des Matériaux Polymères INSA Lyon
- Mme Barbara Gouget, CEA Saclay
- M. Jean-Pierre Jouany, INRA - Clermont Theix
- M. Maris Pierre, Afssa-Fougères
- M. Alain Mimouni, CTCPA Paris
- M. Daniel Ribera, Bio-Tox Bordeaux
- M. Joël Scher, ENSAIA Vandoeuvre les Nancy

### **Agence française de sécurité sanitaire des aliments :**

- M. Mostafa Ould Elhkim (coordinateur),
- M. Jean Marc Frémy,
- Mme Nathalie Arnich,
- Mme Caroline Boudergue,
- Mme Sabine Houdart,
- M. Renaud Lailier,
- Mme Marie-Christine Favrot
- Mme Marie-Hélène Loulergue



L'Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa) a été saisie le 26 juin 2006 par la Direction générale de la santé (DGS) afin de déterminer s'il existe aujourd'hui des produits relevant de sa compétence contenant des nanoparticules (notamment aliments destinés à l'homme ou l'animal, matériaux et objet destinés à entrer au contact de ces denrées), d'établir la liste des catégories de produits concernés, de quantifier leur utilisation et de procéder à une évaluation bénéfice/risque.

Cette saisine s'inscrit dans le cadre d'une consultation de l'ensemble des agences de sécurité sanitaire, chacune dans son domaine de compétence.

Une saisine du 2 août 2006 demandait l'extension de cette expertise au domaine des eaux destinées à la consommation humaine. Cet aspect particulier a fait l'objet d'un rapport de l'Afssa en février 2008<sup>1</sup>. Le présent rapport complète donc cette évaluation dans les domaines de l'alimentation humaine et animale.

Il a été élaboré sur la base d'une recherche bibliographique et d'une consultation des comités d'experts spécialisés :

- Additifs, arômes et auxiliaires technologiques,
- Alimentation animale,
- Matériaux au contact des denrées alimentaires,
- Microbiologie,
- Nutrition humaine,
- Résidus et contaminants chimiques et physiques.

L'Afssa a par ailleurs consulté deux organisations interprofessionnelles: l'Association Nationale des Industries Alimentaires (ANIA) et *Plastics Europe France*.

## Chapitre I : Contexte général

Diverses organisations ou instances scientifiques ont proposé des définitions couvrant les champs des nanotechnologies, nanoparticules et nanomatériaux<sup>2</sup>.

Pour le présent rapport, sont pris en considération les nouveaux matériaux, structures, dispositifs, substances faisant intervenir des particules ou structures primaires dont au moins une dimension est de l'ordre de 100 nanomètres ou moins. Les substances nanoparticulaires ainsi produites peuvent présenter des propriétés physiques et chimiques différentes de celles des substances non nanoparticulaires, liées notamment à une aire surfacique plus importante.

Ces propriétés nouvelles, ainsi que les modifications de comportement des substances qui en découlent, sont l'objet de recherches et de développements dans des domaines industriels très divers. Dans le champ de l'alimentation humaine et animale, les applications envisageables des

---

<sup>1</sup> Les nanoparticules manufacturées dans l'eau (février 2008). Agence française de sécurité sanitaire des aliments (Afssa) <http://www.afssa.fr/Documents/EAUJX-Rq-Nanoparticules.pdf>

<sup>2</sup> A noter la récente publication ISO/TS 27687:2008, *Nanotechnologies – Terminology and definitions for nano-objects – Nanoparticle, nanofibre and nanoplate*

nanotechnologies concernent les matériaux au contact des aliments, les agents antimicrobiens, le développement de biosensors, les ingrédients/nutriments, les arômes, les agents texturants ...

Si l'essentiel de ces applications est encore à l'état de projets de recherche, certains développements feraient déjà l'objet de commercialisation, bien qu'il soit difficile d'objectiver dans bien des cas la réalité commerciale, comme indiqué dans le présent rapport.

Les propriétés particulières des nanoparticules sont à l'origine d'interrogations sur de possibles risques pour l'environnement et pour l'homme. Afin d'apporter des éléments de réponse à ces interrogations, des travaux et réflexions ont été engagés par diverses instances au niveau national et international ; ces travaux portent en particulier sur l'état des connaissances générales, les besoins de recherche et d'acquisition de données, l'adéquation ou l'adaptation des dispositifs réglementaires actuels, notamment dans le champ alimentaire.

Ainsi peuvent être cités les travaux de la FDA<sup>3</sup>, de l'US EPA<sup>4</sup>, de l'Afsset<sup>5</sup>, de la FSA<sup>6</sup>, de la FSAI<sup>7</sup>, du BfR<sup>8</sup> et du RIKILT/RIVM<sup>9</sup>.

Au niveau communautaire, notamment de la DG SANCO, sont à noter les documents suivants :

- Plan d'action européen 2005-2009 sur nanosciences et nanotechnologies (adopté en juin 2005)
- Rapport du Parlement européen sur la mise en œuvre du Plan d'action (septembre 2007)
- Soutien dans le cadre du 7<sup>ème</sup> PCRD à la sécurité des nanotechnologies
- Communication de la Commission sur les aspects réglementaires des nanotechnologies en juin 2008 (revue de l'adéquation des réglementations actuelles aux nanotechnologies)
- Travaux du SCENIHR (EC non-food Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks) : en mars 2006 Opinion sur l'adéquation des méthodologies existantes pour évaluer les risques potentiels associés aux nanotechnologies ; en mars 2007 Opinion sur l'adéquation aux nanomatériaux des lignes directrices et guides techniques actuels pour l'évaluation des risques des substances nouvelles et substances existantes ; en janvier 2009, Opinion sur évaluation des risques des produits issus des nanotechnologies<sup>10</sup>

<sup>3</sup> FDA, 2007. Nanotechnology. A Report of the U.S. Food and Drug Administration Nanotechnology Task Force <http://www.fda.gov/nanotechnology/taskforce/report2007.pdf>

<sup>4</sup> US EPA (U.S. Environmental Protection Agency), 2007. Nanotechnology White Paper. Science Policy Council, Washington D.C., EPA100/B-07/001

<sup>5</sup> Les nanomatériaux : Effets sur la santé de l'homme et sur l'environnement (2006). Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset).

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

Nanomatériaux et sécurité au travail : Agents physiques, nouvelles technologies et grands aménagements (2008). Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset).

<http://www.afsset.fr/upload/bibliotheque/258113599692706655310496991596/afsset-nanomateriaux-2-avis-rapport-annexes-vdef.pdf>

<sup>6</sup> FSA (Food Standard Agency) and CSL. July 2008 Final Report Assessment of Current and Projected Applications on Nanotechnology for Food Contact Materials in relation to Consumer Safety and Regulatory Implications

<sup>7</sup> idem

<sup>8</sup> BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung) 2008 Wahrnehmung der Nanotechnologie in der Bevölkerung

BfR 2007. Nanotechnology: Health and environmental risks of nanomaterials – Research Strategy

[http://www.bfr.bund.de/cm/290/nanotechnology\\_health\\_and\\_environmental\\_risks\\_of\\_nanomaterials\\_research\\_strategy\\_final\\_version.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/290/nanotechnology_health_and_environmental_risks_of_nanomaterials_research_strategy_final_version.pdf)

<sup>9</sup> RIKILT (RIKILT – Institute of Food Safety, Wageningen UR) and RIVM (National Institute of Public Health & the Environment; Center for Substances and Integrated Risk Assessment), 2007. Health impact of nanotechnologies in food production. 1-91.

Report 2007.014. <http://lx1.library.wur.nl/way/beslanden/clc/1865470.pdf>

<sup>10</sup> Risk assessment of Products of nanotechnologies. January 2009 Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks (SCENIHR) [http://www.flex-news-food.com/files/EFSA.nanotechnologies\\_18.02.09.pdf](http://www.flex-news-food.com/files/EFSA.nanotechnologies_18.02.09.pdf)

- Opinion de l'AESA (Autorité Européenne de Sécurité des Aliments) du 10 février 2009 « Opinion of the Scientific Committee on the Potential Risks arising from Nanoscience and Nanotechnologies on Food and Feed Safety <sup>11</sup>.

Les conclusions de l'ensemble ces réflexions soulignent l'insuffisance des données disponibles pour évaluer les risques associés aux nanoparticules dans l'alimentation en lien avec leurs propriétés particulières, et la nécessaire adaptation des méthodologies d'évaluation actuellement appliquées aux risques liés aux substances chimiques :

- insuffisance des études permettant d'analyser la toxicité par voie orale, la plupart des informations disponibles dérivant de la toxicité par inhalation ;
- besoin de méthodes pour la détection, quantification, suivi de ces nanoparticules dans les différentes matrices (pour approcher l'exposition) et dans l'organisme (pour la toxicocinétique notamment) ;
- modification des effets barrières à la pénétration des particules dans le corps et à leur circulation dans les organes.

Dans le champ de compétence de l'Afssa, la problématique des nanotechnologies est susceptible de concerner les médicaments à usage vétérinaire, les produits phytosanitaires, les produits relevant des nanotechnologies intentionnellement utilisés en alimentation humaine et animale, et l'exposition par voie alimentaire de nanoparticules présentes dans l'environnement.

Après consultation de l'Agence nationale du médicament vétérinaire (ANMV) et de la Direction du végétal et de l'environnement (DiVE) il apparaît qu'aucun médicament vétérinaire ou produit phytosanitaire relevant des nanotechnologies n'a été soumis à autorisation à ce jour en Europe.

De nombreuses lacunes subsistent sur la possibilité des nanoparticules à entrer dans la chaîne alimentaire comme contaminants de l'environnement : l'acquisition de données sur le comportement des nanoparticules dans les divers compartiments de l'environnement, ainsi que le développement de méthodes de détection et de quantification en routine dans l'environnement et les matrices alimentaires constituent un préalable à toute réflexion sur une éventuelle exposition de l'homme à travers la chaîne alimentaire.

---

<sup>11</sup> EFSA : The Potential Risks Arising from Nanoscience and Nanotechnologies on Food and Feed Safety<sup>1</sup>. 2009. Scientific Opinion of the Scientific Committee (Question No EFSA-Q-2007-124a)  
[http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific\\_Opinion/sc\\_op\\_ej958\\_nano\\_en.0.pdf?ssbinary=true](http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific_Opinion/sc_op_ej958_nano_en.0.pdf?ssbinary=true)

## **Chapitre II : Tentative d'inventaire des produits issus des nanotechnologies dans l'alimentation humaine et animale**

Dans le cadre de cet exercice, la démarche mise en œuvre pour tenter d'identifier des produits relevant des nanotechnologies s'est développée dans plusieurs directions :

- un point de situation sur les limites du cadre réglementaire actuel dans le champ alimentaire
- une recherche bibliographique et la consultation de plusieurs sites « d'inventaires » sur Internet
- la consultation de l'industrie au travers des interprofessions<sup>12</sup> de l'agroalimentaire pour mieux cerner la réalité du terrain.

### **2.1. Un encadrement réglementaire qui ne permet pas d'identifier les produits issus des nanotechnologies**

Certaines catégories de produits/ingrédients font l'objet d'un encadrement réglementaire prévoyant une autorisation préalable subordonnée à une évaluation des risques à travers l'expertise d'un dossier industriel. Il n'est cependant pas possible d'identifier les produits commercialisés relevant des nanotechnologies à partir de notifications ou d'autorisations existantes en l'état actuel de l'ensemble de la réglementation dans le champ alimentaire.

En effet, les exigences actuellement prévues ne caractérisent pas la notion de taille particulière (a *fortiori* nanoparticulaire) comme un critère sensible et déterminant de l'autorisation.

Pour les substances réglementées, l'examen des dispositifs actuels d'autorisation au regard de la question des nanotechnologies permet de dégager les éléments suivants :

Selon la réglementation communautaire<sup>13</sup> relative aux *additifs alimentaires pour alimentation humaine* (actuellement en révision), seuls les additif (édulcorants, colorants, conservateurs, etc...) préalablement autorisés et inscrits sur les listes officielles, après évaluation du risque, peuvent être utilisés. Les études d'innocuité nécessaires pour une demande d'autorisation de mise sur le marché d'un additif alimentaire couvrent tous les aspects de la toxicocinétique, du métabolisme, de la toxicologie et de la tolérance chez l'homme. Des critères spécifiques de pureté des additifs peuvent être repris dans des directives<sup>14</sup> complémentaires. Parmi ces critères, il n'est pas usuel de renseigner la taille des particules. Pour quelques produits seulement (cellulose microcristalline, carraghénane, gomme arabique,...) la taille des particules fait l'objet de critères réglementaires spécifiques. Ainsi, peut être relevé l'exemple de la cellulose *microcristalline* dont la taille des particules ne doit pas être inférieure à 5  $\mu\text{m}$  (et pas plus de 10 % des particules ne doivent avoir une taille inférieure à 5  $\mu\text{m}$ ).

<sup>12</sup> ANIA, Plastics Europe France, FP2E, SAUR, SUEZ, Véolia Environnement.

<sup>13</sup> Directive 89/107/CEE, harmonisation dans la CE, en matière d'additifs, établie sur la base de critères généraux décrits dans la directive. Directive 94/35/CE modifiée concerne les édulcorants ; Directive 94/36/CE concerne les colorants ; Directive 95/2/CE modifiée concerne les additifs alimentaires autres que les colorants et les édulcorants.

<sup>14</sup> Directives 95/31/CE, 95/45/CE et 96/77 relatives aux critères de pureté applicables aux additifs alimentaires.

Aucun produit présenté comme issu des nanotechnologies ou de taille nanoparticulaire n'a jusqu'alors été évalué en tant qu'additif ou auxiliaire technologique<sup>15</sup>. Mais il convient de noter que des substances peuvent avoir été autorisées comme des additifs ou auxiliaires technologiques sous une forme conventionnelle et être depuis développées, commercialisées et utilisées dans l'alimentation sous forme nanoparticulaire sans obligation de nouvelle notification, évaluation ou autorisation préalable. Le dioxyde de silice (SiO<sub>2</sub>) est autorisé comme additif alimentaire (E 551) mais des silices de taille nanométrique sont utilisées depuis longtemps dans l'alimentation pour leurs propriétés rhéologiques sous le même numéro d'additif (silices précipitée et silices pyrogénées par exemple). Il en est de même pour le dioxyde de titane (TiO<sub>2</sub>) autorisé comme additif alimentaire (E171).

Le champ des arômes *alimentaires* est régi par un dispositif réglementaire communautaire, en cours de révision lui aussi. Ce dispositif prévoit l'évaluation des substances aromatisantes mais n'envisage pas explicitement de prise en compte de la taille particulaire ou le développement de dispositif complexe de type encapsulation.

*Concernant la situation des compléments alimentaires ou de l'enrichissement des aliments*, à la difficulté précédemment évoquée s'ajoute l'absence actuelle de liste positive exhaustive de substances autorisées.

Le champ d'application du règlement (CE) n°258/97 relatif aux *nouveaux aliments ou ingrédients alimentaires* concerne entre autres «les aliments et ingrédients alimentaires auxquels a été appliqué un procédé de production qui n'est pas couramment utilisé, lorsque ce procédé entraîne dans la composition ou dans la structure des aliments ou des ingrédients alimentaires des modifications significatives de leur valeur nutritive, de leur métabolisme ou de leur teneur en substances indésirables». Le dispositif d'évaluation de la sécurité d'emploi des nouveaux aliments avant leur autorisation au cas par cas est très complet, notamment sur les aspects toxicologiques, toxicocinétiques et nutritionnels, à moins d'avoir démontré l'équivalence en substance avec un produit conventionnel. Cette réglementation dans sa formulation en vigueur peut recouvrir les développements de nanotechnologie dans les denrées alimentaires. Aucun aliment ou ingrédient n'a cependant jusqu'alors fait l'objet d'une évaluation au titre de l'approche « Novel Food » du fait d'une production sous forme nanotechnologique.

Ce règlement est en cours de révision. Dans le dernier projet dont l'Afssa a eu connaissance, il serait précisé de manière plus explicite qu'il s'appliquerait aux aliments relevant d'un nouveau procédé de production, *tel que les nanotechnologies et nanosciences*, lorsque ce procédé de production donne lieu à des changements significatifs dans la composition ou la structure de l'aliment qui affectent sa valeur nutritive, son métabolisme ou le niveau de substances indésirables. Si cette précision paraît intéressante, les modalités de mises en œuvre (comment s'assurer de l'absence de changements sans évaluation d'études dédiées ?) et l'articulation entre ce texte « Novel Food » et les textes

---

<sup>15</sup> Auxiliaires technologiques = réglementation nationale

régissant les additifs, arômes, compléments alimentaires et enrichissement n'apparaissent pas encore très claires au regard des développements possibles dans le champ alimentaire.

Dans le champ du *conditionnement au contact de l'aliment*, des difficultés similaires sont rencontrées. La réglementation communautaire permet d'encadrer l'autorisation d'emploi de substances entrant dans les matériaux au contact des aliments, cependant les matériaux intelligents ou actifs, qui constituent la niche privilégiée d'applications potentielles des nanotechnologies, sont évoqués dans une réglementation cadre sans déclinaison à ce jour de modalités particulières d'évaluation.

Dans le dispositif réglementaire actuel, le développement des nanotechnologies dans le champ alimentaire s'avère en conséquence beaucoup plus difficilement contrôlable que dans le champ des médicaments (qui prévoit une évaluation bénéfique/risque de chaque préparation et de ses composants, dans son conditionnement de commercialisation).

Ce n'est que tout récemment, dans le contexte général des diverses réflexions engagées sur les nanotechnologies, que l'AESA a explicitement considéré l'évaluation de certains produits au regard de la taille nanoparticulaire :

- Hydrosol d'argent : en réponse à une demande de la Commission, l'AESA a adopté le 26 novembre 2008 une opinion scientifique (rendue publique le 17 décembre 2008) évoquant l'insuffisance des données pour l'évaluation des nanoparticules d'un hydrosol d'argent au titre de la directive 2002/46/EC relative aux compléments alimentaire (voir paragraphe 2.2).
- Lycopène synthétique : l'AESA précise, dans son avis du 10 avril 2008, que les trois formulations évaluées en tant que « Nouvel aliment » ne correspondent pas à la définition de nanoparticules (voir paragraphe 2.2)
- Nitrite de titane (TiN) nanoparticulaire : évalué par l'AESA comme additif dans du polyéthylène téréphtalate (PET) pour bouteille au contact d'aliments liquides (opinion du 27 novembre 2008 rendue publique le 16 décembre 2008) (voir paragraphe 2.2).

## **2.2. Alimentation humaine**

L'inventaire des produits issus de cette nouvelle technologie est essentiellement le fruit de données provenant de moteurs de recherche scientifiques et publics incluant la littérature grise. Parmi les sites consultés peuvent notamment être cités : « Nanotechnology consumer products Inventory<sup>16</sup> », « Project on emerging nanotechnologies de Woodrow Wilson International Center for Scholars<sup>17</sup> », « Nanotechnologies for Food and Beverages (2007)<sup>18</sup> ».

Cette étude s'est focalisée sur les structures nanométriques délibérément produites ou utilisées pour des propriétés nouvelles (nanoparticules manufacturées) et non sur les structures existant naturellement à l'échelle nanométrique (cristal, micelle par exemple) ou sur les contaminants.

---

<sup>16</sup> <http://www.nanotechproject.org/>

<sup>17</sup> [www.nanotechproject.org](http://www.nanotechproject.org)

<sup>18</sup> <http://www.researchandmarkets.com/reports/357299>

Dans le champ de la nutrition, la diversité des produits relevés sur Internet, associant souvent des allégations de santé ou une meilleure biodisponibilité au concept de nanotechnologie, paraît relever d'un positionnement d'accroche commerciale plus souvent que d'une réalité technologique ou de mise sur le marché, sans vérification possible toutefois. A cet égard, il est intéressant de noter que les interrogations grandissantes au niveau international sur les risques liés aux nanotechnologies se sont traduites par la disparition de la référence à ces technologies sur certains supports de communication ; ces évolutions pourraient conduire à ne pas déclarer le caractère nanoparticulaire de certains ingrédients.

Selon l'ANIA et les premières réflexions au sein du CIAA, le champ des nanotechnologies ne peut actuellement être considéré comme une réalité commerciale pour ce qui concerne les denrées elles-mêmes, mais il est l'objet de recherches et de développements dans certains secteurs comme l'encapsulation, les matériaux de conditionnement ou de revêtement de surface. La faiblesse des techniques de détection et de caractérisation, le manque de données toxicologiques par voie orale, les impacts possibles sur l'absorption, ainsi que les possibles évolutions réglementaires et les interrogations qui leurs sont liées sont autant d'éléments conduisant à un positionnement prudent des industries agroalimentaires vis-à-vis de formulations de denrées intégrant les nanotechnologies.

Si les consultations de sites Internet font apparaître de nombreux produits présentés comme relevant des nanotechnologies, la réalité commerciale de tels produits dans l'alimentation n'est pas vérifiable, à l'instar des conclusions des investigations d'autres instances européennes (AESA, Agence Irlandaise<sup>19</sup> ou BfR<sup>20</sup> par exemple).

Quelques exemples illustratifs sont présentés ci-après.

#### **Cas du Lycopène**

Le lycopène (E 160d) extrait de tomates est autorisé en tant que colorant alimentaire à la dose maximale de 100 mg/kg. Le lycopène obtenu de sources naturelles a été évalué au niveau européen par le Scientific Committee on Food (SCF, 1989) et au niveau international par le Joint FAO/WHO expert committee on food additives (JECFA) (WHO, 1978). Aucun de ces deux comités n'avaient alors pu établir de dose journalière admissible (DJA) pour le lycopène. Toutefois l'emploi de ce lycopène extrait de tomates en tant que colorant alimentaire avait été considéré comme acceptable à condition que l'exposition liée à cet emploi ne diffère pas significativement de celle liée à la consommation des aliments en contenant naturellement.

Par la suite, d'autres usages du lycopène ont été développés pour ses propriétés anti-oxydantes et ont fait l'objet d'évaluations successives en Europe en tant que nouvel ingrédient (selon la procédure réglementaire « Novel food ») : lycopène obtenu par fermentation à partir de *Blakeslea Trispora* sous forme de suspension huileuse contenant de l' $\alpha$ -tocopherol, lycopène issu l'oléorésine concentrée

---

<sup>19</sup> Food Safety Authority of Ireland

<sup>20</sup> Bundesinstitut für Riskobewertung, Allemagne

extraite de tomates, lycopène obtenu sous forme cristalline par synthèse chimique et intégré dans 3 formulations (deux poudres et une dispersion).

Plusieurs avis ont été rendus sur ces produits à la fois par l'Afssa (notamment avis du 8 janvier 2007, avis du 30 avril 2008) et l'AESA (« opinion on safety of synthetic lycopene » 10 avril 2008).

L'AESA a ainsi établi en 2008, sur la base des dernières études toxicologiques, une DJA de 0,5 mg/kg pc/jour applicable en principe au lycopène de toutes sources, cohérente avec la DJA établie par le JECFA en 2006 pour certaines sources.

Les préoccupations/interrogations exprimées jusqu'alors par l'Afssa sur ces diverses sources de lycopène concernent essentiellement les biodisponibilités comparées de ces diverses sources en lien notamment avec leur composition isomérique et les effets matrices de leurs formulations, les usages allégués et les risques liés à une exposition excessive du consommateur, ainsi que les questionnements sur un possible effet promoteur du lycopène à niveau d'apport élevé dans un contexte d'exposition à des cancérigènes environnementaux.

Concernant l'évocation de la nature nanoparticulaire du lycopène, régulièrement recensée comme telle sur divers sites Internet, les précisions suivantes peuvent être apportées :

- Dès 2005, le lycopène issu de la synthèse chimique par BASF a fait l'objet d'une notification GRAS (Statut « Generally Recognized As Safe ») par la FDA <sup>21</sup> comme ingrédients de diverses denrées alimentaires commercialisées aux USA. Les documents accessibles évoquent une microencapsulation de particules de lycopène, sans qu'il puisse être clairement établi si le lycopène en question est sous forme « conventionnelle » ou nanoparticulaire.
- Une publication de BASF (Wegmann *et al.*, 2002)<sup>22</sup> présente une méthode analytique pour caractériser le lycopène nanoparticulaire ; sur son site, BASF<sup>23</sup>, a indiqué que le lycopène synthétique dispersible sous forme de nanoparticules augmentait sa biodisponibilité, mais les études correspondantes ne sont cependant pas accessibles.
- Dans son dernier avis du 10 avril 2008 sur la sécurité du lycopène synthétique (Nouvel ingrédient déposé par BASF pour trois formulations) l'AESA rappelle les observations formulées par les États membres sur le fait que le lycopène synthétique est souvent considéré comme le premier ingrédient commercialisé sous forme nanoparticulaire. L'avis de l'AESA souligne cependant que selon le pétitionnaire, les formulations présentées ne tombent pas sous la terminologie de nanoparticules. Le *Lycopène 10 %* et le *Lycopène 10 CWD dispersible dans l'eau froide* et le *Lycopène en dispersion dans l'huile* sont constitués de poudres de granulométrie supérieure à 100 micromètres, à base de particules de lycopène de 300 nanomètres environ, recouvertes d'une matrice de gélatine et sucrose.

<sup>21</sup> Notification de la FDA, Agency Response Letter GRAS Notice No. GRN 000119, CFSAN/Office of Food Additive Safety, April 7, 2005. Disponible à l'adresse : <http://vm.cfsan.fda.gov/~rdb/opa-g119.html>

<sup>22</sup> Wegmann J., Krucker M., Bachmann S., Fischer G., Zeeb D., Lienau A., Glaser T., Runge F., Lüddecke E., and Albert K. (2002), Characterization of lycopene nanoparticles combining solid-state and suspended-state NMR spectroscopy. *J Agric Food Chem.* 18: 50(26):7510-7514

<sup>23</sup> [www.corporate.basf.com/en/innovationen/felder/nanotechnologie](http://www.corporate.basf.com/en/innovationen/felder/nanotechnologie)



Ce principe serait utilisé en Australie dans un pain enrichi en acides gras oméga-3 issus d'huile de poisson encapsulés, pour une libération au niveau de l'estomac, permettant de masquer le goût de poisson des oméga-3 ajoutés<sup>26</sup>.

Diverses technologies d'encapsulation sont au stade de recherche ou de développement telles que : micelles nanoparticulaires d'acide alpha lipoïque pour une meilleure solubilité et biodisponibilité ; technologie NLC (Nanostructural Lipid Carrier) permettant l'incorporation sous forme de colloïdes de bêta-carotène dans des systèmes dispersibles aqueux ; technologie NSSL (Nano-sized Self-assembled Structured Liquids)<sup>27</sup>, qui fait appel à des micelles d'un diamètre d'environ 30 nanomètres pour le transport de substances hydrophobes encapsulées comme les phytostérols, le lycopène, la  $\beta$ -carotène, la lutéine ou encore des coenzymes Q10 (ou ubiquinone).

Une huile de canola<sup>28</sup>, enrichie en phytostérols libres encapsulés dans des micelles formées grâce au procédé NSSL, serait commercialisée avec l'allégation d'une réduction optimisée du taux de cholestérol.

D'autres recherches sont menées par exemple sur des nanoparticules à cœur lipidique (Relkin *et al.* 2007)<sup>29</sup>, sur des nanocapsules comme les lipoprotéines de jaune d'œuf (gouttelettes d'huile entourées de films de protéines et de lécithines), sur la gomme d'Acacia comme support naturel d'encapsulation (Francis Thévenet<sup>30</sup>, 2006) ou encore sur des nanotubes à base d'alpha-lactalbumine (protéine du lait) de diamètre de 20 nm et de cavité de 8 nm<sup>31</sup>.

Les nanocapsules pourraient être vectorisées (adressage intelligent) et ne libérer les molécules transportées qu'au niveau de l'organe cible.

Une part importante des applications alléguées pour les produits alimentaires est en relation avec un renforcement des effets nutritionnels escomptés, que ce soit par une meilleure absorption, une modification de solubilisation, de cinétique de diffusion ou une vectorisation vers des organes cibles... L'influence de la taille des particules d'une poudre sur l'absorption et la biodisponibilité est bien connue et largement développée notamment dans le champ du médicament. Cependant les modifications notoires de comportement dans l'organisme évoquées pour des nutriments ou des substances actives nanoparticulaires imposent une attention toute particulière pour les évaluations de risques associées. En effet, au-delà de l'impact potentiel de telles modifications sur les caractéristiques toxicologiques des substances (voir chapitre 3), ce sont tous les référentiels d'apports nutritionnels qui sont susceptibles d'être affectés : une quantité donnée de nutriment nanoparticulaire ne paraît pas pouvoir être rapprochée, sans étude préalable approfondie, d'une dose nutritionnelle de référence établie pour une forme « conventionnelle ».

---

<sup>26</sup> La description du produit est disponible à l'adresse : Ronald J.Versic, "Flavor Encapsulation: An Overview," sur Internet . <http://www.rtdodge.com/flovrvw.html> (16 juillet 2004). Cité dans le rapport : ETC Group releases Down on the Farm : The Impact of Nano-Scale Technologies on Food and Agriculture (2004).

<sup>27</sup> [www.nutrelease.com](http://www.nutrelease.com)

<sup>28</sup> appellation canadienne d'une variété de Colza

<sup>29</sup> Relkin P. Jung JM., Ollivon M. Structure Behaviour of Fat Globules in Protein-Stabilised Emulsions and Impact On Vitamin Stability (AgroParisTech, CNAM, INRA). Travaux présentés au congrès «Second International Symposium on the Delivery of Functionality in Complex Food Systems», University of Massachusetts, Amherst, MA. du 8 au 10 octobre 2007.

<sup>30</sup> Thévenet F. (2006). Gomme d'Acacia, support naturel d'encapsulation en alimentaire. Colloïdes Naturels International (CNI). Symposium, ENSIA, MASSY « nano et microencapsulation : du laboratoire au produit fini ».

<sup>31</sup> Richard S. (2007). Nanotechnologie des promesses de taille. RIA 683, p. 37.

Cet exemple du lycopène, ingrédient classiquement associé au développement des nanotechnologies en agroalimentaire, illustre parfaitement les difficultés rencontrées pour identifier précisément la présence d'ingrédients sous forme nanoparticulaire dans les denrées alimentaires et pour en faire l'évaluation.

**Cas de l'hydrosol d'argent :**

En réponse à une demande de la Commission, l'AESA a adopté le 26 novembre 2008 une opinion scientifique (rendue publique le 17 décembre 2008) sur l'évaluation d'un hydrosol d'argent au titre de la directive 2002/46/EC relative aux compléments alimentaire. L'AESA a été interrogée sur la sécurité et la biodisponibilité de cette présentation : suspension colloïdale aqueuse de particules d'argent de 0,8 nanomètre. L'AESA a estimé que les données produites par le pétitionnaire étaient insuffisantes pour caractériser le risque de cette forme nanoparticulaire (insuffisance des données toxicologiques et absence de données de biodisponibilité). Il a été considéré qu'en l'état actuel, les données et connaissances sur l'ion argent ne pouvaient pas être utilisées pour établir la sécurité d'emploi de l'hydrosol d'argent.

**Thé vert :** une entreprise chinoise commercialiserait un thé, présenté comme riche en sélénium et fabriqué selon un procédé breveté, qui permettrait la formation d'une poudre de thé de granulométrie inférieure à 100 nanomètres. Ce produit revendique une meilleure biodisponibilité des substances bénéfiques pour la santé présentes dans le thé.

**Substituts de repas à base de soja et de protéines végétales :** ces produits présentés comme relevant des nanotechnologies, sont essentiellement disponibles par correspondance sur site Internet.

**Compléments alimentaires :** de nombreux compléments alimentaires présentés comme relevant de nanotechnologies sont commercialisés notamment aux USA, avec diverses allégations santé ou s'appuyant sur une meilleure biodisponibilité. Cette situation est identifiée comme préoccupante par des groupes consommateurs aux USA, les compléments alimentaires n'étant pas évalués par la FDA pour leur sécurité et leur efficacité avant mise sur le marché, contrairement aux médicaments<sup>24</sup>.

**Encapsulation :** l'encapsulation sous forme nanoparticulaire fait l'objet de recherche et de développement, dans le champ des arômes notamment mais aussi de diverses autres substances ou nutriments, à des fins de modification organoleptique, de protection de molécules fragiles (ex : protection contre l'humidité et l'oxygène ; Hambleton *et al.*, 2007)<sup>25</sup> ou de contrôle de la libération dans l'aliment ou l'organisme.

---

<sup>24</sup> article scheduled for the Feb. 9 online issue of Chemical & Engineering News, American Chemical Society' weekly newsmagazine.

<sup>25</sup> Hambleton A. Debeaufort F. Voilley A. (2007). Encapsulation in Emulsion Based-Edible Of Aroma Active Compound For Its Protection Against Moisture And Oxygen. (ENSBANA) Travaux présentés au congrès « Second International Symposium on the Delivery of Functionality in Complex Food Systems », University of Massachusetts, Amherst, MA. du 8 au 10 octobre 2007.

## **2.3. Matériaux au contact des denrées alimentaires (MCDA)**

Dans le domaine des MCDA certaines propriétés nouvelles et spécifiques ne peuvent être atteintes que par l'assemblage maîtrisé de briques élémentaires nanométriques (monomères, polymères, nanoparticules/nanotubes, nanoclusters, etc...), communément dénommées NBB (NanoBuilding Blocks). Ainsi, pour les MCDA, les nanoparticules sont rarement en contact direct avec l'aliment mais généralement enrobées dans des liants ou matrices polymère pour former des nanocomposites ou revêtements.

L'utilisation de nanoparticules dans les MCDA peut conférer aux matériaux des propriétés particulières : renfort, transparence, solidité, effet barrière, protection UV .... avec les objectifs suivants <sup>32</sup> :

- augmentation des propriétés barrière (CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O) des matériaux existants
- substitution de structures multicouches par un nanomatériau (intérêt en termes de recyclabilité<sup>33</sup> ou plus généralement, de respect de l'environnement)
- modification des propriétés de surface par nanostructuration (généralement par addition de nanoparticules) et obtention de propriétés interfaciales telles que :
  - résistance à la rayure ;
  - contrôle de la mouillabilité (surfaces hyper-hydrophobes) ;
  - surfaces auto-nettoyantes (par effet photocatalytique) ;
  - caractère antimicrobien.

La littérature est abondante dans le domaine des nanomatériaux, notamment pour les applications antibactériennes ou de matériaux barrières qui ont fait l'objet d'importants efforts de recherche et de développement industriels ces dernières années.

Les références d'une dizaine de produits industriels impliquant l'exploitation des nanotechnologies ont été relevées dans la littérature : revêtement de réfrigérateur, emballages, planche de coupe, film, voire produits de nettoyage. Toutefois, dans ce domaine également, la distinction précise entre stade avancé de développement/recherche ou commercialisation/utilisation effective de produits en Europe dans les industries agroalimentaires reste difficile (absence d'enregistrement, de déclaration, insuffisance d'information fiable).

### **Matériaux antimicrobiens**

Des applications antimicrobiennes se sont principalement développées avec des nanoparticules métalliques (argent, zinc, cuivre essentiellement) ; l'utilisation de l'ion argent apparaît la plus fréquente. Les matrices d'oxydes de métaux sont introduites au sein de divers matériaux (polymère, fibres textiles, papier). La libération de substances biocides pourrait être contrôlée par différents

<sup>32</sup> Fink D., Rojas-Chapana J., Petrov A., Tributsch H., Friedrich D., Küppers U., Wilhelm M., Yu Appel P., Zrineh A. (2006), 'The Artificial Ostrich Eggshell Project: Sterilizing Polymer Foils for Food Industry and Medicine', *Solar Energy Mater. & Solar Cells*, 90, 1458.

<sup>33</sup> Un matériau multi-couches est généralement constitué de plusieurs polymères différents. Cette variété de matière rend difficile le recyclage usuellement spécifique d'un type de polymère. La nanotechnologie permettrait de réduire le nombre de couches jusqu'à une seule couche de polymère tout en conservant les mêmes propriétés de sélectivités.

processus tels que la modification du rapport silice/biocide, l'ajout d'additifs (alkylsilane) qui changent la porosité ou encore l'ajout de substances formant un complexe avec les biocides<sup>34</sup>.

Les revendications avancées par les industriels lors du développement et de la commercialisation de tels revêtements recouvrent la modification des propriétés physico-chimiques des surfaces afin de faciliter le nettoyage, la limitation de l'adhésion des souillures, la limitation et le développement de biofilms bactériens et l'inhibition ou l'élimination des bactéries sur les surfaces ou les aliments au contact avec ces matériaux.

Parmi les applications retrouvées sur Internet, évocatrices de nanomatériaux antimicrobiens, peuvent être cités:

- des films transparents commercialisés depuis 2005 dans lesquels des nanoparticules d'argent sont incorporées (Kodak) ;
- des réfrigérateurs dont la cuve intérieure est constituée de plastique enrichi en nanoparticules d'argent (LG Electronics et Samsung) ;
- un buvard contenant des zéolites pour les barquettes alimentaires afin de limiter la prolifération bactérienne et absorber les exsudats de la viande, allongeant ainsi la limite de conservation de 1 à 3 jours ;
- un matériau en polyuréthane contenant des particules d'argent (100 mg/100 cm<sup>2</sup>) libérant 70 ppm d'ions Ag, associant de la chlorhexidine. (Landsdown, 2006)<sup>35</sup>.

L'AESA a rendu en 2005 des avis sur des formulations d'argent (Zéolite notamment) destinées à être introduites dans des matières plastiques au contact alimentaire. Ces avis scientifiques n'évoquent pas le caractère nanoparticulaire des composés évalués (voir annexe).

Si l'argent est connu pour ses propriétés antimicrobiennes, le mode d'action des nanoparticules d'argent, particulièrement au sein de matériaux comme des polymères, est cependant encore mal connu. Il existe peu d'études fiables et elles sont parfois contradictoires.

### **Matériaux barrières**

L'intérêt de ces nanomatériaux (ou plus simplement des nanocomposites issus de l'addition de nanoparticules de fort facteur de forme – rapport entre plus grande et plus faible dimension) réside dans leur capacité à donner des effets de tortuosité (figure 1.a.) et à modifier la perméabilité aux gaz et aux vapeurs, emprisonnés dans un labyrinthe en zigzag. Cet effet est en effet combiné avec des orientations en nanofeuillets perpendiculairement aux chemins de diffusion.

<sup>34</sup> Haufe H. , Thron A., Fiedler D., Mähltig B., Böttcher H. (2005). Biocidal nanosol coatings, Surface Coatings International Part B : Coatings transaction, 88, B1, 55-60.

<sup>35</sup> Landsdown ABC., (2006). Silver in health care . antimicrobial effects and safety use. Curr. Probl. Dermatol., 33, 17-34.

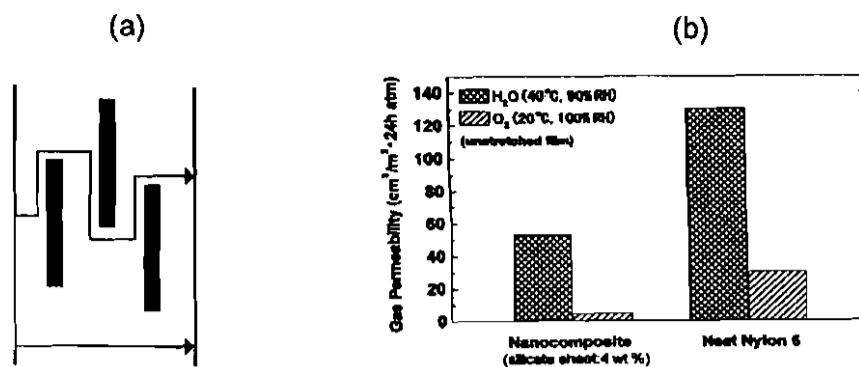


Figure 1 (a) Schéma de principe de la modification de tortuosité dans les chemins de diffusion à travers une membrane de polymère modifiée par des nanofeuillets (facteur de forme élevé) ; (b) Perméabilité à l'oxygène de films de polyamide 6 et d'un nanocomposite PA6 – argile de type montmorillonite organophile (4% en pds)<sup>36</sup>.

Divers types de polymères ont été modifiés par des nanoparticules (essentiellement des nanofeuillets d'argiles organophiles, c'est-à-dire modifiés avec des ammoniums quaternaires porteurs de groupements organiques permettant la compatibilité avec la matrice polymère par exemple C<sub>18</sub>, phényle, etc...) (figure 1.b.). Ces polymères modifiés sont soit conventionnels soit biodégradables (polyacide lactique (PLA) ou polycaprolactone (PCL)). On trouve également des revêtements qui pourraient répondre aux fonctions conventionnelles (imprimabilité, comportement mécanique) mais aussi à des propriétés supplémentaires comme la perméabilité...<sup>37</sup>. L'intérêt de modifier la perméabilité des polymères réside en l'augmentation de la durée de conservation des aliments. Bayer a ainsi développé un film de polyamide contenant des nanoparticules de silice (Durethan®), avec amélioration des propriétés barrière et mécanique du film.

Des travaux de recherche sont par ailleurs menés sur l'association de nanoparticules d'argiles et d'amidon de blé pour la fabrication de papiers au contact des aliments capable d'absorber le gaz carbonique (Université de Montpellier II)<sup>38</sup>.

### Matériaux intelligents

Des applications incluant des nanotechnologies sont développées dans le cadre des matériaux intelligents. On entend par matériau intelligent, tout composant ou objet conçu pour développer une interaction avec l'aliment ou son environnement immédiat, permettant de suivre les conditions de conservation (ex : couple temps/température) ou de détecter certaines substances indicatrices de la qualité microbiologique ou organoleptique d'une denrée alimentaire.

Parmi les applications développées, on trouve des systèmes de détection basés sur la mise en œuvre de nanoobjets ou nanoparticules. Des bio-indicateurs miniaturisés sont d'ores et déjà en cours de développement pour détecter rapidement *in situ* (sans transfert d'échantillons au laboratoire) des contaminants, des toxines ou des agents pathogènes dans l'aliment. Ces outils sont incorporés directement dans l'emballage contenant l'aliment et ainsi permettent de suivre l'évolution de la qualité du produit pendant le transport, le stockage voire jusqu'au au moment de la consommation.

<sup>36</sup> Yasue K., Katahira S., Yoshikawa M., Fujimoto K., (2000). In-Situ Polymerization Route to Nylon 6-Clay Nanocomposites', Chap. 6, in 'Polymer-Clay Nanocomposites', Wiley & Sons Ed., Ed. T.J. Pinnavaia, G.W. Beall.

<sup>37</sup> Burgentzle D. (2003). Nouvelles formulations thermoplastiques ou réactives de revêtements nanocomposite à base de silicates lamellaires, Thèse INSA Lyon.

<sup>38</sup> L'USINE NOUVELLE du 04/05/2006, n° 3008, 1 / p43.

Quelques exemples d'applications ou de développements peuvent être cités:

- le système BioSwitch® développé par le TNO (Netherland Organisation for Applied Scientific Research) initialement pour des emballages actifs. Il consiste à relarguer un agent antimicrobien à lorsque la charge microbienne devient trop importante (l'amylase sécrétée par les bactéries dégrade la capsule de biopolymère permettant de libérer la substance biocide) ;
- la technologie de la «langue électronique» développée par Kraft Food, en lien avec les universités américaines du Connecticut et de Rutgers. Elle consisterait en un capteur qui change de couleur par réaction à la présence, de l'ordre d'une partie par trillion, de substances issues de pathogènes ou de la dégradation de la denrée ;
- un biocapteur développé aux Etats-Unis qui détecterait *Listeria monocytogenes* en moins de 24 heures ;
- un capteur d'arômes intégré à l'étiquette qui changerait de couleur en fonction du degré de maturité des fruits (vire du rouge au jaune en passant par l'orange, éventail qui correspond à un fruit croquant, ferme ou juteux).

### **Matériaux biodégradables**

Les nanotechnologies peuvent être employées dans les MCDA pour améliorer le caractère biodégradable des polymères.

Ainsi, Ray et Bousmina (2005)<sup>39</sup> expliquent que l'introduction de nanoparticules de montmorillonite dans le PLA accélère sa dégradation enzymatique par diminution de la cristallinité (une structure amorphe est plus facile à dégrader). De plus, cette dégradation enzymatique serait renforcée par l'effet catalytique de certains groupements portés par les ammoniums quaternaires des montmorillonites modifiées.

### **Données pertinentes dans l'évaluation du risque matériau en contact**

Le seul exemple d'évaluation européenne de dossier industriel clairement identifié comme relevant des nanotechnologies est le Nitrite de titane (TiN) nanoparticulaire pour usage comme additif dans du polyéthylène téréphtalate (PET) pour bouteille au contact d'aliments liquides : l'AESA dans son opinion du 27 novembre 2008 (publiée le 16 décembre 2008) a estimé qu'en l'absence de toute migration à travers les simulants conventionnels et les modèles de diffusion, il n'était pas requis de données toxicologiques pour cette application.

---

<sup>39</sup> Ray SS. and Bousmina M. Biodegradable polymers and their nanolayered silicate nanocomposites : In greening the 21<sup>st</sup> century materials world. Progress in Materials Science 50 (2005) 962-1079

De manière générale, il apparaît nécessaire pour l'évaluation de telles applications MCDA d'être vigilant sur :

- le vieillissement et le cycle de vie des nanomatériaux considérés,
- les mécanismes potentiels de contamination de l'aliment par les nanoparticules, qui peuvent s'envisager autrement que par une migration classique de type fickienne,
- la possible migration d'additifs utilisés dans le procédé de préparation des nanomatériaux (par exemple migration des ammoniums quaternaires présents initialement sur les argiles organophiles de nanocomposites) ;
- l'adaptation aux nanomatériaux d'un niveau de migration théorique à partir duquel des études toxicologiques seraient requises,
- l'induction lors du processus d'élaboration des matériaux d'effets d'interface exacerbés (adsorption aux interfaces des additifs, mécanismes de dégradation des additifs, des liants/résines polymères, composés néoformés etc...).

## **2.4. Alimentation animale**

Rien ne permet d'exclure le développement futur de nanotechnologies appliquées à l'alimentation animale à des fins nutritionnelles ou zootechniques. Les interrogations légitimes en terme de sécurité sanitaire, au-delà de la démonstration de l'efficacité, rejoindraient celles formulées pour l'alimentation humaine (toxicologiques, cinétiques notamment).

A ce jour, la seule application recensée de nanotechnologies en alimentation animale concerne le développement d'argiles. Les argiles ont fait l'objet de travaux de recherches<sup>40, 41, 42, 43</sup>, y compris chez l'homme pour réduire la toxicité des aflatoxines. Le principe des adsorbants de toxines est basé sur le fait que la taille du complexe «argile-toxine» formé ne permet plus à cette dernière d'être absorbée dans le tractus digestif. Ainsi, une part importante des toxines ingérées est donc excrétée dans les fécès ce qui limite non seulement leur effet délétère sur les animaux mais aussi le transfert de ces toxines ou de leurs métabolites dans les produits animaux (lait, viande, œufs,...).

Un produit à base d'argiles<sup>44</sup>, recensé comme appartenant au domaine des nanotechnologies, a pu être identifié en alimentation animale. Ce produit commercialisé notamment aux Etats Unis et en Asie en tant que prémélange d'additifs par la société OLMIX n'a pas été évalué jusqu'alors en France ou au niveau communautaire.

Il s'agit d'un produit constitué d'une structure cristalline sous forme d'empilement lamellaire, résultant d'une transformation de la structure d'une argile, la bentonite/montmorillonite, avec des extraits

---

<sup>40</sup> Wang JS. *et al.* Short-term safety evaluation of processed calcium montmorillonite clay (NovaSil) in humans. (2005). *Food Addit Contam.* 22(3):270-9.

<sup>41</sup> Evans Afriyie-Gyawu (2004). Safety and efficacy of NOVASIL Clay as a dietary supplement to prevent aflatoxicosis. Doctor of Philosophy (PhD) Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University.

<sup>42</sup> Afriyie-Gyawu E. *et al.* (2005). Chronic toxicological evaluation of dietary NovaSil clay in Sprague-Dawley rats. *Food Addit Contam.* 22(3):259-69.

<sup>43</sup> Wiles M., Huebner H., Afriyie-Gyawu E., Taylor R., Bratton G., Phillips T. (2004). Toxicological evaluation and metal bioavailability in pregnant rats following exposure to clay minerals in the diet. *J Toxicol Environ Health A.* 11;67(11):863-74.

<sup>44</sup> Feed. Mix. (2006). *The International Journal On Feed, Nutrition and Technology*, 14, 3, 1-3.

d'algues vertes (ulvanes). L'espace inter-lamellaire entre deux feuillets d'aluminosilicate, d'environ 1 nanomètre, serait élargi à 10 nanomètres par réaction avec les ulvanes. En éclatant la structure de l'argile et en intercalant les extraits d'algues vertes entre les feuillets, les propriétés physiques de l'argile sembleraient être renforcées. La société revendique l'efficacité de ce produit dans la captation de l'humidité et des toxines. Plus l'espace entre ces feuillets est grand, plus le matériau peut absorber des composés comme les mycotoxines et autres toxines alimentaires de grande taille.

En l'absence d'évaluation de ce produit, il ne peut être statué sur son efficacité sur les mycotoxines. Néanmoins, ce type d'application soulève plusieurs types de questions qui méritent d'être étudiées, notamment :

- du fait de leur pouvoir adsorbant élevé, leur permettant de capter les mycotoxines, ces produits sont susceptibles d'interagir avec des micronutriments (vitamines, oligoéléments...) de l'aliment, voire d'en diminuer la biodisponibilité, avec un risque de déséquilibre de la ration pour l'animal,
- la présence potentielle dans les argiles de contaminants naturels de type métaux lourds, dioxines.

Le dispositif réglementaire européen actuel d'évaluation/autorisation des additifs pour l'alimentation animale n'envisage pas de distinction particulière des produits au regard de leur taille particulière. Comme pour les additifs à usage humain, le cadre réglementaire actuel ne permet donc pas de distinguer le développement nanoparticulaire d'un additif « conventionnel » déjà évalué et autorisé par ailleurs, et donc de s'assurer de son innocuité.

Le cas des argiles est singulier car l'apparition sur le marché européen de tels produits en alimentation animale a fait émerger l'inadéquation de la réglementation actuelle des additifs : il n'existait pas jusqu'alors d'additif autorisé ayant pour objectif l'atténuation d'effets toxiques liés à la contamination des matières premières par des mycotoxines ; le règlement (CE) n°1831/2003 relatif aux additifs destinés à l'alimentation animale ne comporte pas par ailleurs de groupe fonctionnel, dans la catégorie des additifs technologiques, permettant l'utilisation de telles allégations.

Des réflexions sont en cours au niveau de la Commission européenne pour créer une nouvelle catégorie pour ces additifs, afin d'encadrer réglementairement leur mise sur le marché.

Sollicitée en appui technique sur l'opportunité de cette évolution réglementaire, l'Afssa a souligné dans son avis du 30 octobre 2008 la nécessité de porter une attention particulière aux produits « détoxifiants » de mycotoxines relevant de nouvelles technologies, nanotechnologies notamment.

Une simple argile (Bentonite/Montmorillonite) autorisée comme additif en alimentation animale en tant que liant (E 558) et une argile intégrée dans une technologie complexe relevant de nanotechnologie devraient faire l'objet d'une évaluation et d'une autorisation distinctes.



## Chapitre III : Données toxicologiques disponibles

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, d'étude épidémiologique publiée portant sur l'exposition et les risques sanitaires liés aux nanoparticules, à l'exception de celles réalisées avec les particules ultra fines (Englert N 2004<sup>45</sup>, Oberdörster G 2005<sup>46</sup>). Elles mettent principalement en évidence une toxicité pulmonaire chronique à type de maladies obstructives respiratoires ; les risques cardio-vasculaires et les risques de cancers sont peu ou pas documentés (Delfino RJ 2005<sup>47</sup>).

Plusieurs rapports ou publications donnent une synthèse des travaux de la littérature sur la toxicité des nanoparticules (NIOSH<sup>48</sup>, BfR 2007<sup>49</sup>, FDA 2007<sup>50</sup>, SCENHIR 2007a<sup>51</sup>, Donaldson K et al. 2005, 2006<sup>52</sup>, Oberdörster G et al. 2005). L'Afssset a rendu 2 rapports, en 2006 et en 2008, sur la toxicité des nanomatériaux dans l'environnement et au travail. L'AESA (2009)<sup>53</sup>, la FSA<sup>54</sup> et la FSAI (2008)<sup>55</sup>, le RIKILT/ RIVM (2007)<sup>56</sup> ont rendu des rapports orientés vers les risques liés aux nanotechnologies dans l'alimentation.

Il n'est pas dans les objectifs de ce rapport de procéder à une nouvelle revue de la toxicité des nanoparticules. A titre indicatif quelques publications et travaux illustratifs peuvent être mentionnés.

La toxicité des nanoparticules sur des cultures de cellules humaines ou animales a été largement étudiée mais les doses utilisées sont généralement très supérieures aux expositions humaines potentielles.

<sup>45</sup> Englert N., 2004 1. Fine particles and human health – a review of epidemiological studies. *Toxicol Lett* 149 (1-3): 235-42

<sup>46</sup> Oberdörster G, Oberdörster E, Oberdörster J., 2005. Nanotoxicology: an emerging discipline evolving from studies of ultrafine particles. *Environ Health Perspect.* 113(7):823-39

<sup>47</sup> Delfino RJ, Sioutas C, Malik S, 2005. Potential role of ultrafine particles in associations between airborne particle mass and cardiovascular health. *Environ Health Perspect* 113(8): 934-46

<sup>48</sup> NIOSH Approaches to Safe Nanotechnology

<http://www.cdc.gov/niosh/topics/nanotech/safenanano/healthconcerns.html>

<sup>49</sup> BfR 2007. Nanotechnology: Health and environmental risks of nanomaterials – Research Strategy

[http://www.bfr.bund.de/cm/290/nanotechnology\\_health\\_and\\_environmental\\_risks\\_of\\_nanomaterials\\_research\\_strategy\\_final\\_version.pdf](http://www.bfr.bund.de/cm/290/nanotechnology_health_and_environmental_risks_of_nanomaterials_research_strategy_final_version.pdf)

<sup>50</sup> FDA, 2007. Nanotechnology. A Report of the U.S. Food and Drug Administration Nanotechnology Task Force

<http://www.fda.gov/nanotechnology/taskforce/report2007.pdf>

<sup>51</sup> SCENIHR 2007a (Scientific Committee on Emerging or Newly-Identified Health Risks), 21-22 June 2007. 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, at

[http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihr/docs/scenihr\\_o\\_010.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_010.pdf)

<sup>52</sup> Donaldson K, Tran L, Jimenez LA, Duffin R, Newby DE, Mills N, MacNee W, Stone V, 2005. Combustion-derived nanoparticles: a review of their toxicology following inhalation exposure. *Part Fibre Toxicol* 1(2):2-10.

Donaldson K. 2006. Resolving the nanoparticles paradox. *Nanomed.* 1(2):229-34.

<sup>53</sup> EFSA : The Potential Risks Arising from Nanoscience and Nanotechnologies on Food and Feed Safety1. 2009. Scientific Opinion of the Scientific Committee (Question No EFSA-Q-2007-124a)

[http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific\\_Opinion/sc\\_op\\_ei958\\_nano\\_en\\_0.pdf?ssbinary=true](http://www.efsa.europa.eu/cs/BlobServer/Scientific_Opinion/sc_op_ei958_nano_en_0.pdf?ssbinary=true)

<sup>54</sup> FSA (Food Standard Agency) and CSL July 2008 Final Report Assessment of Current and Projected Applications on Nanotechnology for Food Contact Materials in relation to Consumer Safety and Regulatory Implications

<sup>55</sup> FSAI (Food Safety Authority of Ireland), 2008. The Relevance for Food Safety of Applications of Nanotechnology in the Food and Feed Industries. 1-82. [http://www.fsa.ie/publications/reports/Nanotechnology\\_report.pdf](http://www.fsa.ie/publications/reports/Nanotechnology_report.pdf).

<sup>56</sup> RIKILT (RIKILT – Institute of Food Safety, Wageningen UR) and RIVM (National Institute of Public Health & the Environment; Center for Substances and Integrated Risk Assessment), 2007. Health impact of nanotechnologies in food production. 1-91. Report 2007.014. <http://lx1.library.wur.nl/way/bestanden/cic/1865470.pdf>

Certaines nanoparticules peuvent traverser et/ou altérer les membranes plasmiques, nucléaires et mitochondriales, induire une peroxydation lipidique et la génération d'espèces réactives de l'oxygène elle-même à l'origine d'un stress oxydatif pouvant altérer des protéines et l'ADN ( Hong 2006<sup>57</sup> ; Xia 2006<sup>58</sup> ; Beck-Speier 2005<sup>59</sup> ; Lewinski *et al.* 2008<sup>60</sup> ; Stone 2007<sup>61</sup> ; Hussain *et al.*, 2005<sup>62</sup>).

Il n'existe pas actuellement de test de référence *in vitro* permettant de prédire les effets toxiques potentiels des nanoparticules, en particulier la génotoxicité pour laquelle les études donnent des résultats contradictoires (Balbus *et al.* 2007<sup>63</sup>) (Landsiedel 2008<sup>64</sup> ; Kim 2008<sup>65</sup> ; Gonzales 2008<sup>66</sup>).

Les études expérimentales sur animaux de laboratoire portent essentiellement sur la toxicité par inhalation de particules ultra-fines et plus rarement de nanoparticules manufacturées. Après administration par voie respiratoire (principalement instillation intra-trachéale), certaines nanoparticules peuvent passer dans la circulation sanguine et se distribuer dans de multiples organes notamment les reins, les testicules, le thymus, les poumons, le foie, le cerveau (Kwon 2008<sup>67</sup> ; Yu 2007<sup>68</sup>). Les effets toxiques pulmonaires observés après instillation respiratoire de nanotubes de carbone sont les plus documentés et de type inflammation, granulomes épithélioïdes et fibrose (Donaldson 2005 ; Oberdörster 2005<sup>69</sup> ; Lam C W 2004<sup>70</sup>).

<sup>57</sup> Hong, S., Leroueil, P. R., Janus, E. K., Peters, J. L., Kober, M. M., Islam, M. T., Orr, B. G., Baker, J. R., Jr. and Banaszak Holl, M. M. 2006. Interaction of polycationic polymers with supported lipid bilayers and cells: nanoscale hole formation and enhanced membrane permeability. *Bioconjug Chem* 17 (3): 728-34.

<sup>58</sup> Xia T, Kovochich M, Brant J, Hotze M, Sempf J, Oberley T, Sioutas C, Yeh JI, Wiesner MR, Nel AE. 2006. Comparison of the abilities of ambient and manufactured nanoparticles to induce cellular toxicity according to an oxidative stress paradigm. *Nano Lett.*;6(8):1794-807.

<sup>59</sup> Beck-Speier I, Dayal N, Karg E, Maier KL, Schumann G, Schutz H, Semmler M, Takenaka S, Steltmaier K, Bors W, Ghio A, Samet JM, Heyder J. 2005. Oxidative stress and lipid mediators induced in alveolar macrophages by ultrafine particles. *Free Radic Biol Med*: 15;38(8):1080-92.

<sup>60</sup> Lewinski N, Colvin V, Drezek R. 2008. Cytotoxicity of nanoparticles. *Small*. 4(1):26-49

<sup>61</sup> Stone V, Johnston H, Clift MJ. 2007. Air pollution, ultrafine and nanoparticle toxicology: cellular and molecular interactions. *IEEE Trans Nanobioscience*;6(4):331-40.

<sup>62</sup> Hussain SM, Hess KL, Gearhart JM, Geiss KT, Schlager JJ. 2005. In vitro toxicity of nanoparticles in BRL 3A rat liver cells. *Toxicol In Vitro*. 2005 Oct;19(7):975-83.

<sup>63</sup> Balbus JM, Maynard AD, Colvin VL, Castranova V, Daston GP, Denison RA, Dreher KL, Goering PL, Goldberg AM, Kulinowski KM, Monteiro-Riviere NA, Oberdörster G, Ormnn GS, Pinkerton KE, Ramos KS, Rest KM, Sass JB, Silbergeld EK, Wong BA. 2007. Meeting report: hazard assessment for nanoparticles--report from an interdisciplinary workshop. *Environ Health Perspect*;115(11):1654-9.

<sup>64</sup> Landsiedel R, Kapp MD, Schulz M, Wiench K, Oesch F, 2008 Nov 11. Genotoxicity investigations on nanomaterials: Methods, preparation and characterization of test material, potential artifacts and limitations-Many questions, some answers. *Mutat Res*. [Epub ahead of print]

<sup>65</sup> Kim, Y. S., Kim, J. S., Cho, H. S., Rha, D. S., Kim, J. M., Park, J. D., Choi, B. S., Lim, R., Chang, H. K., Chung, Y. H., Kwon, I. H., Jeong, J., Han, B. S. and Yu, I. J. 2008. Twenty-eight-day oral toxicity, genotoxicity, and gender-related tissue distribution of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. *Inhal Toxicol* 20 (6): 575-83.

<sup>66</sup> Gonzalez, L., Lison, D. and Kirsch-Volders, M. 2008. Genotoxicity of engineered nanomaterials: A critical review. *Nanotoxicology* 2 (4): 252 - 273.

<sup>67</sup> Kwon, J. T., Hwang, S. K., Jin, H., Kim, D. S., Minai-Tehrani, A., Yoon, H. J., Choi, M., Yoon, T. J., Han, D. Y., Kang, Y. W., Yoon, B. I., Lee, J. K. and Cho, M. H. 2008. Body distribution of inhaled fluorescent magnetic nanoparticles in the mice. *J Occup Health* 50 (1): 1-6.

<sup>68</sup> Yu, L. E., Yung, L.-Y. L., Ong, C.-N., Tan, Y.-L., Balasubramaniam, K. S., Hartono, D., Shui, G., Wenk, M. R. and Ong, W.-Y. 2007. Translocation and effects of gold nanoparticles after inhalation exposure in rats. *Nanotoxicology* 1 (3): 235-242.

<sup>69</sup> Oberdörster G, Maynard A, Donaldson K, Castranova V, Fitzpatrick J, Ausman K, Carter J, Karn B, Kreyling W, Lai D, Olin S, Monteiro-Riviere N, Warheit D, Yang H; ILSI Research Foundation/Risk Science Institute Nanomaterial Toxicity Screening Working Group, 2005. Principles for characterizing the potential human health effects from exposure to nanomaterials: elements of a screening strategy. *Part Fibre Toxicol*. 6;2:8

<sup>70</sup> Lam CW, James JT, McCluskey R, Hunter RL, 2004. Pulmonary toxicity of single-wall carbon nanotubes in mice 7 and 90 days after intratracheal instillation. *Toxicol Sci* 77(1):126-34

Les particules sont retrouvées dans les mêmes organes après administration par voie intra-veineuse et pourraient même traverser la barrière placentaire (De Jong 2008<sup>71</sup> ; Sadauskas 2007<sup>72</sup> ; Tsuchiya, 1996<sup>73</sup> ; Semmler-Behnke *et al* 2007<sup>74</sup> ; Singh 2006<sup>75</sup>).

Les caractéristiques physico-chimiques des nanoparticules ne sont cependant pas décrites précisément dans les études actuellement disponibles dans la littérature alors qu'elles sont essentielles pour comprendre leur toxicité.

### **3.1. Propriétés des nanoparticules, interaction avec la matrice alimentaire**

Les propriétés fonctionnelles des nanoparticules dépendent essentiellement de leurs caractéristiques physico-chimiques : taille, forme (nanotubes, feuillets, sphères, agrégats, bâtons ...), composition chimique et solubilité, structure cristalline ou non, charge de surface, surface par unité de masse... (Nel 2006<sup>76</sup>).

Dans le domaine agroalimentaire, des applications intéressantes (formation de micelles, d'émulsions...) peuvent être envisagées du fait de la très grande surface et de la réactivité des nanoparticules ; en revanche, les phénomènes d'agglomération, d'adsorption, d'interaction avec les bio-polymères de la matrice alimentaire, de catalyse des réactions d'oxydation peuvent être à l'origine d'effets encore mal maîtrisés. En particulier, le vieillissement des particules peut favoriser leur aggrégation et l'agglomération et conduire à des modifications de propriétés au sein de la matrice alimentaire et des tissus biologiques. Les nanoparticules peuvent également réagir avec les protéines, les lipides, les carbohydrates, les acides nucléiques, les ions et minéraux, l'eau dans la matrice alimentaire (Lynch 2006<sup>77</sup> et 2008<sup>78</sup>).

### **3.2. Toxicocinétique des nanoparticules après administration par voie orale**

Il n'y a pas aujourd'hui de méthode validée et applicable en routine permettant de détecter, quantifier et caractériser les nanoparticules dans les matrices alimentaires ni dans les liquides biologiques ou les tissus.

---

<sup>71</sup> De Jong, W., Hagens, W., Krystek, P., Burger, M., Sips, A. and Geertsma, R. 2008. Particle size-dependent organ distribution of gold nanoparticles after intravenous administration. *Biomaterials* 29 (12): 1912-1919.

<sup>72</sup> Sadauskas, E., Wallin, H., Stoltenberg, M., Vogel, U., Doering, P., Larsen, A. and Danscher, G. 2007. Kupffer cells are central in the removal of nanoparticles from the organism. *Part Fibre Toxicol* 4: 10.

<sup>73</sup> Tsuchiya, T., Oguni, I., Yamakoshi, Y. N. and Miyata, N. 1996. Novel harmful effects of [60]fullerene on mouse embryos in vitro and in vivo. *FEBS Lett* 393 (1): 139-45.

<sup>74</sup> Semmler-Behnke, M., Fertsch, S., Schmid, O., Wenk, A. and Kreyling, W. 2007. Uptake of 1.4 nm versus 18nm Gold particles by secondary target organs is size dependent in control and pregnant rats after intratracheal or intravenous application. *Proceedings of Euro Nanoforum - Nanotechnology in Industrial Applications*: 102-104.

<sup>75</sup> Singh, R., Pantarotto, D., Lacerda, L., Pastorin, G., Klumpp, C., Prato, M., Bianco, A. and Kostarelos, K. 2006. Tissue biodistribution and blood clearance rates of intravenously administered carbon nanotube radiotracers. *Proc Natl Acad Sci U S A* 103 (9): 3357-62.

<sup>76</sup> Nel, A., Xia, T., Madler, L. and Li, N. 2006. Toxic potential of materials at the nanolevel. *Science* 311 (5761): 622-7.

<sup>77</sup> Lynch, I., Dawson, K. A. and Linse, S. 2006. Detecting cryptic epitopes created by nanoparticles. *Sci STKE* 2006 (327): pe14.

<sup>78</sup> Lynch, I. and Dawson, K. A. 2008. Protein-nanoparticle interactions. *Nano Today* 3 (1-2): 40-47.

On ne connaît pas précisément les modifications que subissent les nanoparticules dans le tube digestif, en particulier si elles restent libres ou si elles s'agrègent, si elles adsorbent des bio-molécules présentes dans la matrice alimentaire ou elles sont transformées par les enzymes digestifs (Cedervall 2007<sup>79</sup> ; Simon 2008<sup>80</sup>). Ces modifications des nanoparticules peuvent influencer leur charge de surface, leur hydrophobicité ou leur lipophilie, leur diffusion dans le mucus et l'eau et leur transport cellulaire et paracellulaire. L'absorption des nanoparticules pourrait entraîner celles de bio-molécules adsorbées à leur surface. Dans les liquides biologiques, l'interaction des nanoparticules avec les protéines pourrait favoriser le franchissement des membranes cellulaires et nucléaires (Hong 2006<sup>81</sup>). Certaines nanoparticules passent à travers la barrière digestive essentiellement par transcytose à travers les entérocytes ou les cellules M des plaques de Peyer, avec une vitesse inversement proportionnelle à leur taille (Hillyer JF 2001<sup>82</sup>) Des études suggèrent que les nanoparticules pourraient provoquer une inflammation du tractus digestif (Lomer 2002<sup>83</sup>).

Dans la littérature, la distribution des nanoparticules après ingestion orale, est très différente d'un modèle à l'autre et selon les nanoparticules. Après absorption digestive, certaines nanoparticules sont éliminées dans les fèces et dans l'urine (Nefzger M 1984<sup>84</sup>) et d'autres pénétreraient dans la circulation portale et le foie ou dans le système lymphatique. Le foie et la rate seraient des organes cible, mais certaines nanoparticules sont retrouvées dans les reins, le poumon, la moelle osseuse et le cerveau. (Jani *et al.* 1990<sup>85</sup> et 1994<sup>86</sup>, Wang 2007<sup>87</sup>)

### **3.3. Toxicité *in vivo* par administration orale**

Seules quelques études ont abordé la toxicité des nanoparticules après ingestion orale ; ces études ont été menées essentiellement avec des métaux ou des oxydes de métal comme le sélénium, le cuivre et le zinc. Quelques exemples sont donnés en illustration :

**Nanoparticules de Zinc ou d'oxyde de Zinc :** dans une étude de toxicité aiguë par gavage chez la souris, comparant des particules de zinc de 58 nm et de 1 µm , en solution et en dose unique de

<sup>79</sup> Cedervall, T., Lynch, J., Lindman, S., Berggard, T., Thulin, E., Nilsson, H., Dawson, K. and Linse, S. 2007a. Understanding the nanoparticle-protein corona using methods to quantify exchange rates and affinities of proteins for nanoparticles. *Proc Natl Acad Sci U S A* 104 (7): 2050-2055.

<sup>80</sup> Simon, P. and Jøner, E. 2008. Conceivable interactions of biopersistent nanoparticles with food matrix and living systems following from their physicochemical properties. *Journal of Food and Nutrition Research* 47 (2): 51-59.

<sup>81</sup> Hong, S., Leroueil, P. R., Janus, E. K., Peters, J. L., Kober, M. M., Islam, M. T., Orr, B. G., Baker, J. R., Jr. and Banaszak Holl, M. M. 2006. Interaction of polycationic polymers with supported lipid bilayers and cells: nanoscale hole formation and enhanced membrane permeability. *Bioconjug Chem* 17 (3): 728-34.

<sup>82</sup> Hillyer, J. F. and Albrecht, R. M. 2001. Gastrointestinal persorption and tissue distribution of differently sized colloidal gold nanoparticles. *J Pharm Sci* 90 (12): 1927-36.

<sup>83</sup> Lomer, M. C., Thompson, R. P. and Powell, J. J. 2002. Fine and ultrafine particles of the diet: influence on the mucosal immune response and association with Crohn's disease. *Proc Nutr Soc* 61 (1): 123-30.

<sup>84</sup> Nefzger, M., Kreuter, J., Voges, R., Liehl, E. and Czok, R. 1984. Distribution and elimination of polymethyl methacrylate nanoparticles after peroral administration to rats. *J Pharm Sci* 73 (9): 1309-11.

<sup>85</sup> Jani, P., Halbert, G. W., Langridge, J. and Florence, A. T. 1990. Nanoparticle uptake by the rat gastrointestinal mucosa: quantitation and particle size dependency. *J Pharm Pharmacol* 42 (12): 821-6.

<sup>86</sup> Jani, P., McCarthy, D. and Florence, A. T. 1994. Titanium dioxide (rutile) particle uptake from the rat GI tract and translocation to systemic organs after oral administration. *International journal of pharmaceutics* 105 (2): 157-168.

<sup>87</sup> Wang, J., Zhou, G., Chen, C., Yu, H., Wang, T., Ma, Y., Jia, G., Gao, Y., Li, B., Sun, J., Li, Y., Jiao, F., Zhao, Y. and Chai, Z. 2007. Acute toxicity and biodistribution of different sized titanium dioxide particles in mice after oral administration. *Toxicol Lett* 168 (2): 176-85.

5g/kg.pc (Wang *et al.* 2006<sup>86</sup>), une inflammation du tube digestif a été observée pour les 2 types de particules avec pour les nanoparticules, une mortalité attribuée à leur agrégation. Les signes cliniques les plus sévères à type de léthargies, vomissements, diarrhées, anémie et atteinte rénale ont été observées avec les nanoparticules, mais une atteinte hépatique est observée pour les microparticules de zinc.

Dans la deuxième étude (Wang *et al.* 2008<sup>89</sup>), les mêmes auteurs ont comparé la toxicité de nanoparticules d'oxyde de Zinc de 20 et 120 nm et du matériau conventionnel, en dose unique de 1 à 5g/kg.pc. Cette étude confirme la complexité des effets toxiques observés : effets non dose-dépendants au niveau de l'estomac, du foie, de la rate ; effets plus sévères avec les nanoparticules de 120nm qu'avec les nano particules de 20 nm et qu'avec le matériau conventionnel ; effets sur le pancréas avec les seules nanoparticules de 20 nm.

**Nanoparticules de dioxyde de titane ( TiO<sub>2</sub> ) :** plusieurs études montrent des résultats contradictoires. Jani *et al.* (1994) n'observent pas de toxicité après une administration quotidienne pendant 10 jours de particules de TiO<sub>2</sub> de 500 nm. Warheit *et al.* (2007)<sup>90</sup> montrent des résultats similaires avec une seule administration de nanoparticules de TiO<sub>2</sub> de 140 nm à des doses variant de 175 à 5000 mg/kg pc. Au contraire, Wang *et al.* (2007)<sup>91</sup> observent une toxicité hépatique, rénale et cardiaque avec des nanoparticules de TiO<sub>2</sub> mais les anomalies biologiques et histologiques varient avec la taille des nanoparticules (25, 80 et 155nm).

**Nanoparticules de Sélénium :** deux études de toxicité subaiguë et aiguë (Zhang *et al.* 2001<sup>92</sup>, 2005<sup>93</sup>) ont montré chez la souris que, en administration à la dose de 6 mg/kg pc./jour pendant 1 ou 12 jours, le sélénite a une toxicité plus importante que les nanoparticules de sélénium, toxicité qui se traduit par un retard de croissance et une atteinte hépatique. Ces résultats ont été confirmés par une étude de Jia *et al.* (2005)<sup>94</sup> avec une administration subchronique (13 semaines), à dose croissante (2 à 5 mg/kg) dans l'alimentation, de nanoparticules de sélénium (20 et 60nm) et de sélénite.

**Nanoparticules d'argent :** une étude de Kim *et al.* (2008)<sup>95</sup> de toxicité subchronique (28 jours) chez les rats par voie orale de nanoparticules de 60nm, montre que les anomalies des paramètres

---

<sup>86</sup>Wang B., Feng WY., Wang TC., Jia G., Wang M., Shi JW., Zhang F., Zhao YL., Chai ZF. (2006). Acute toxicity of nano- and micro-scale zinc powder in healthy adult mice. *Toxicol Lett.* Feb 20;161(2):115-23. Epub 2005 Sep 13.

<sup>89</sup> Wang, B., Feng, W. Y., Wang, M., Wang, T. C., Gu, Y. Q., Zhu, M. T., Ouyang, H., Shi, J. W., Zhang, F., Zhao, Y. L., Chai, Z. F., Wang, H. F. and Wang, J. 2008. Acute toxicological impact of nano- and submicro-scaled zinc oxide powder on healthy adult mice. *Journal Of Nanoparticle Research* 10 (2): 263-276.

<sup>90</sup>Warheit DB, Hoke RA, Finlay C, Donner EM, Reed KL, Sayes CM. 2007. Development of a base set of toxicity tests using ultrafine TiO<sub>2</sub> particles as a component of nanoparticle risk management. *Toxicol Lett.* 2007 Jul 10;171(3):99-110. Epub 2007 Apr 27.

<sup>91</sup> Wang, J., Zhou, G., Chen, C., Yu, H., Wang, T., Ma, Y., Jia, G., Gao, Y., Li, B., Sun, J., Li, Y., Jiao, F., Zhao, Y. and Chai, Z. 2007. Acute toxicity and biodistribution of different sized titanium dioxide particles in mice after oral administration. *Toxicol Lett* 168 (2): 176-85.

<sup>92</sup> Zhang, J. S., Gao, X. Y., Zhang, L. D. and Bao, Y. P. 2001. Biological effects of a nano red elemental selenium. *Biofactors* 15 (1): 27-38.

<sup>93</sup> Zhang, J., Wang, H., Yan, X. and Zhang, L. 2005. Comparison of short-term toxicity between Nano-Se and selenite in mice. *Life Sci* 76 (10): 1099-109.

<sup>94</sup> Jia, X., Li, N. and Chen, J. 2005. A subchronic toxicity study of elemental Nano-Se in Sprague-Dawley rats. *Life Sci* 76 (17): 1989-2003.

<sup>95</sup> Kim, Y. S., Kim, J. S., Cho, H. S., Rha, D. S., Kim, J. M., Park, J. D., Choi, B. S., Lim, R., Chang, H. K., Chung, Y. H., Kwon, I. H., Jeong, J., Han, B. S. and Yu, I. J. 2008. Twenty-eight-day oral toxicity, genotoxicity, and gender-related tissue distribution of silver nanoparticles in Sprague-Dawley rats. *Inhal Toxicol* 20 (6): 575-83.

biologiques hépatiques sont les seuls signes de toxicité alors que des particules d'argent sont détectées dans tous les organes analysés incluant le cerveau.

**Nanoparticules de cuivre** : la toxicité aiguë de nanoparticules (23,5 nm), de microparticules (17 micromètres) et d'ions cuivre solubles a été comparée (Chen *et al.* 2006<sup>96</sup>) ; la toxicité des ions cuivre est la plus élevée et celle des microparticules la plus faible. Des anomalies, doses dépendantes, sont observées dans le foie, le rein et la rate avec les nanoparticules. Meng (2007)<sup>97</sup> relie la toxicité orale des nanoparticules de cuivre à leur très haute réactivité de surface.

En dehors des études avec des nanoparticules dérivées de métaux, l'administration unique du fullerène polyalkylsulfuré par voie orale (Chen *et al.*, 1998<sup>98</sup>) n'entraînerait pas de toxicité ; ceci peut s'expliquer par une absence d'absorption des fullerènes qui formeraient des agrégats dans le tractus digestif.

De même, il n'a pas été objectivé de toxicité subchronique (42 jours) avec un nanocomposite d'argile ajouté dans l'alimentation de poulets (Shi *et al.* 2006<sup>99</sup>), ni de toxicité aiguë chez le rat avec des nanoparticules de chitosan amphilyque (Yoksari et Chirachanchai, 2008<sup>100</sup>) Enfin, aucune toxicité n'a été observée après l'administration d'une dose unique (1; 25 ou 5 mg/kg pc) de nanotubes de carbone (Carrero-Sanchez, 2006<sup>101</sup>), mais ces résultats restent à confirmer au vu des résultats de toxicocinétique et de toxicité des nanotubes de carbone *in vivo* après inhalation.

En conclusion, les études de toxicité des nanoparticules par voie orale sont lacunaires, le plus souvent limitées à des conditions d'ingestion par gavage sur une période courte ; les caractéristiques physico-chimiques des nanoparticules testées et leur interaction avec la matrice alimentaire sont insuffisamment documentées. Les quelques résultats rapportés sont souvent discordants et ne permettent pas de conclure à un effet dose, à un effet taille, à une relation entre les caractéristiques physico-chimiques de la particule et la toxicité. Les rares données de toxicocinétique montrent que le tube digestif puis tous les organes sont des cibles potentielles des nanoparticules.

---

<sup>96</sup> Chen, Z., Meng, H., Xing, G., Chen, C., Zhao, Y., Jia, G., Wang, T., Yuan, H., Ye, C., Zhao, F., Chai, Z., Zhu, C., Fang, X., Ma, B. and Wan, L. 2006. Acute toxicological effects of copper nanoparticles *in vivo*. *Toxicol Lett* 163 (2): 109-20.

<sup>97</sup> Meng H, Chen Z, Xing G, Yuan H, Chen C, Zhao F, Zhang C, Zhao Y. 2007. Ultrahigh reactivity provokes nanotoxicity: explanation of oral toxicity of nano-copper particles. *Toxicol Lett* 10;175(1-3):102-10.

<sup>98</sup> Chen H H., Yu C., Ueng TH., Chen S., Chen BJ., Huang KJ. and Chiang LY. (1998). Acute and subacute toxicity study of water-soluble polyalkylsulfonated C60 in rats. *Toxicol Pathol* 26(1): 143-51.

<sup>99</sup> Shi, Y., Xu, Z., Feng, J. and Wang, C. 2006. Efficacy of modified montmorillonite nanocomposite to reduce the toxicity of aflatoxin in broiler chicks. *Animal Feed Science and Technology* 129 (1-2): 138-148.

<sup>100</sup> Yoksari, R. and Chirachanchai, S. 2008. Amphiphilic chitosan nanosphere: studies on formation, toxicity, and guest molecule incorporation. *Bioorg Med Chem* 16 (5): 2687-96.

<sup>101</sup> Carrero-Sanchez JC, Elias AL, Mancilla R, Arrellin G, Terrones H, Lacllette JP, Terrones M. 2006. Biocompatibility and toxicological studies of carbon nanotubes doped with nitrogen. *Nano Lett.* Aug;6(8):1609-16.

## Chapitre IV : Conclusion

La revue des données de la littérature sur l'utilisation des nanoparticules en alimentation humaine et animale amène à souligner les points suivants :

- l'essentiel des applications est à l'état de projet de recherche, certaines feraient déjà l'objet de commercialisation, même s'il est difficile d'en objectiver la réalité technologique ou commerciale,
- les quatre étapes de l'évaluation des risques (identification du danger, caractérisation du danger, exposition et caractérisation du risque) sont applicables aux nanoparticules et nanocomposés,
- la toxicocinétique (absorption, distribution, métabolisme, élimination) et la toxicité des nanoparticules, très peu documentées par voie orale, différent de celles des matériaux conventionnels correspondants ; elles semblent dépendre de leur composition chimique, de leur taille, de leur forme, de leur réactivité de surface... ; ce qui conduit à envisager des évaluations de risque au cas par cas,
- l'évaluation des risques liés aux nanoparticules est limitée par l'absence de méthodes validées et applicables en routine permettant la détection, l'identification et la quantification des nanoparticules, dans les différentes matrices (aliments, eau, air...), dans les liquides biologiques et les tissus,
- en raison des propriétés physico-chimiques spécifiques des nanoparticules, les essais toxicologiques conventionnels nécessiteront des adaptations et d'autres modèles seront à développer.

En l'absence de caractérisation précise des dangers, d'outils métrologiques et de connaissance des usages alimentaires potentiels, il n'est pas possible, aujourd'hui, d'évaluer l'exposition du consommateur ni les risques sanitaires liés à l'ingestion de nanoparticules.

Le développement de travaux de recherche doit être soutenu<sup>102</sup> et, dans l'attente de données pertinentes notamment sur l'absorption digestive, la prudence s'impose à l'égard de l'utilisation de nanotechnologies et/ou nanoparticules en alimentation humaine et animale.

En conséquence, l'Afssa estime que l'évolution du dispositif réglementaire devrait exiger une déclaration systématique de ces substances ou produits dans l'alimentation et conduire à des autorisations de mise sur le marché.

---

<sup>102</sup>Exemples de projets collaboratifs de recherche financés par la Commission européenne dans le cadre du 7<sup>ème</sup> PCRD :  
NMP-2008-1.3-2 Impact of engineered nanoparticles on health and the environment  
KBBE-2009-2-4-01 Analytical tools for the characterisation of nano-particles in the food matrix

## Annexe

EFSA

7<sup>th</sup> liste de substances dans les matériaux au contact de l'aliment  
(adoptée le 29 mars 2005)

Réf. N°: 86437

Argent Zéolite A (*Argent zinc sodium ammonium alumino silicate*) – contenu en argent : 2 à 5 %  
- contenu maximum dans le polymère : 10 % (p/p)

Réf. N° : 86437/50

Argent-zinc-aluminium-bore-verre de phosphate, mixé avec 5 – 20% sulfate de baryum ; contenu en argent : 0,35 à 0,6 % - contenu maximum en plastique : 1 % p/p

Réf. N° : 86438 and 86438/50

Argent zinc zéolite A ; contenu en argent : 1 à 1,6 %  
Argent zinc zéolite A ; contenu en argent : 0,34 à 0,54 %

---





# **SURVIVRE AUX NANOTECHNOLOGIES ? GIGA-QUESTIONS, NANO-VISIONS ET CITOYENNETÉ**

**Contribution de la Fondation Sciences Citoyennes  
au débat autour des nanotechnologies**

**Note N°3 de la Fondation Sciences Citoyennes  
Octobre 2006**

# Charte de la Fondation Sciences Citoyennes

Une association pour redistribuer les capacités d'expertise et de recherche vers les mouvements citoyens

Nous vivons un changement de nature des risques, des disparités et des dangers créés par les modes dominants de production et de consommation. La mondialisation libérale accentue ces menaces et entend soumettre la recherche et le développement technique aux exigences de la solvabilité. Ces dernières années, l'accumulation de crises (Tchernobyl, amiante, sang contaminé, vache folle, OGM...) ont montré la nécessité de prendre en compte d'autres intérêts et risques que ceux définis par les acteurs techno-industriels. Elles ont suscité une remise en cause de l'expertise et de la science, un renouveau des mobilisations sociales et de nombreuses initiatives d'implication de 'profanes' dans la recherche, l'expertise ou la vigilance, qui ont conduit à un certain désenclavement de la science et de ses institutions.

Face à la marchandisation des savoirs et du vivant, ces mobilisations et initiatives amorcent un sursaut démocratique et un nouveau pacte social pour une science citoyenne, responsable et solidaire. Loin de se réduire à « une montée des croyances irrationnelles » ou à un manque d'information ou de "culture scientifique », elles affirment qu'une science pour tous doit se construire avec tous, dans le dialogue avec des savoirs autrefois dévalorisés.

Moteur d'émancipation pendant plusieurs siècles, la science, devenue technoscience, est aujourd'hui un formidable pouvoir. Pour servir le bien-être de l'ensemble des êtres humains de notre planète, ce pouvoir requiert d'autres pilotes que la seule volonté de savoir, le désir de puissance ou les logiques de profit. Après l'ère de la « maîtrise de la nature », doit donc venir celle de la « maîtrise de la science », de la citoyenneté scientifique.

La Fondation Sciences Citoyennes a pour objectif de favoriser et prolonger le mouvement actuel de réappropriation citoyenne et démocratique de la science, afin de la mettre au service du bien commun.

Elle se donne notamment pour objectifs :

- L'accroissement des capacités de recherche et d'expertise de la société civile, des forces associatives, consuméristes, syndicales et citoyennes. Nous appuierons la constitution d'un tiers secteur scientifique, répondant mieux à des besoins sociaux et écologiques croissants et négligés par les orientations scientifiques dominantes, qu'elles soient le fait de l'État ou de l'industrie privée.
- la stimulation de la liberté d'expression et de débat dans le monde scientifique, l'appui aux lanceurs d'alerte et le développement de controverses publiques et de "forums hybrides" sur les enjeux à forte technicité scientifique. Loin des peurs frileuses des interventions du public et des logiques technocratiques, le pluralisme et la controverse sont la source non seulement d'une meilleure exploration des mondes possible et, partant, de meilleures décisions, mais aussi d'une appropriation active des connaissances scientifiques par le public.
- De promouvoir l'élaboration démocratique des choix scientifiques et techniques. Nous favoriserons la mise en débat public des politiques publiques en matière de recherche, de technologie et d'organisation de l'expertise. Nous mènerons également l'analyse vigilante des nouveaux dispositifs délibératifs qui se multiplient afin de soutenir ceux qui favorisent une véritable démocratie technique.

# Autres publications et notes de la Fondation Sciences Citoyennes

**Traduction** du livre de Richard Sclove, « *Choix technologiques, choix de société* », Paris, Éditions Charles Léopold Mayer et Descartes et Cie, 2003.

**Note N°1** : Quel débat sur les OGM ? Quelle participation de la société civile à l'orientation des politiques de recherche agronomique ? Oct. 2003.  
[http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=73](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=73)

**Note N°2** : Quelle politique scientifique pour entrer dans le 21<sup>e</sup> siècle ? Vers un nouveau contrat entre recherche et société. Contribution de la Fondation Sciences Citoyennes aux États-Généraux sur l'avenir de la Recherche. Oct. 2004.  
[http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=601](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=601)

**Synthèse N°1** : L'expertise et la recherche associative et citoyenne en France. Esquisse d'un état des lieux. Nov. 2003.  
[http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=122](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=122)

**Synthèse N°2** : Savoirs libres et production de biens communs en réseau. Compte-rendu de la rencontre du 3/12/2005. Jan. 2006.  
[http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=1455](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=1455)

**Synthèse N°3** : « Débat » public EPR 2005-2006 ».  
[http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=1464](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=1464)

Cette note est le produit d'une réflexion collective d'un groupe de travail de la Fondation Sciences Citoyennes, coordonné par Claudia Neubauer.

Membres du groupe de travail : Sébastien Denys, Laurent Dianoux, Lionel Larqué, Glen Millot, Jérôme Pastor, Jacques Testart, Sezin Topcu.

Le texte a bénéficié d'une relecture externe par des chercheurs et des acteurs du débat sur les nanotechnologies : Pierre-Benoit Joly, Dominique Pestre, Marc Robert, Françoise Roure, Claire Weill.  
Le texte n'engage évidemment pas les relecteurs externes.

# 1. Résumé

Les NST – NanoSciences et NanoTechnologies – prétendent imposer une (r)évolution scientifique et technologique. C'est un des secteurs d'activité annonçant des perspectives d'innovation les plus fortes, exigeant pour cela un soutien massif des secteurs public et privé. Pourtant, on connaît encore mal son contexte d'émergence, les réseaux d'acteurs impliqués et leur forme d'engagement ainsi que les paramètres scientifiques qui la conditionnent.

Les promoteurs des NST mettent en oeuvre de nouvelles stratégies de développement, et des reconfigurations organisationnelles de l'action scientifique et industrielle qui mettent en jeu l'ensemble des stratégies, actions et interactions de ces acteurs.

A cela se rajoutent des visions sur les possibilités ouvertes par les NST qui toucheraient et bouleverseraient tous les secteurs industriels et tous les aspects de la vie en société. Au même moment, les artisans de ces visions mettent en avant une « évolution naturelle » des technologies comme si celles-ci ne dépendaient pas des choix politiques et budgétaires. A leurs yeux les NST représenteraient un nouvel El Dorado technologique.

Le cadre proposé par les nanopromoteurs est si large qu'il peut rapidement confiner au mirage, s'appuyant sur des visions caricaturales. Cela ne serait pas tant inquiétant si les NST ne confisquaient pas de si considérables budgets émanant d'états (pourtant) démocratiques, agissant en matière technoscientifique de façon de plus en plus autoritaire, subordonnant toutes leurs stratégies à la « course économique » en l'absence de réflexion globale – et de recherche – sur l'impact des NST sur la vie privée, la santé, l'environnement, la propriété intellectuelle, et *last but not least* sur le développement démocratique de nos sociétés.

En France, les institutions publiques n'ont commencé que depuis peu à apporter un regard élaboré sur un sujet éminemment conflictuel.<sup>1</sup> Leur discours est souvent assez partisan et peu critique. Nous le déplorons tout autant que la non mise en œuvre de véritables débats publics de qualité et respectueux des principes démocratiques les plus élémentaires.

C'est dans ce cadre que s'inscrit l'ambition de cette note.

Elle s'inscrit aussi dans la droite ligne des documents de la Fondation Sciences Citoyennes (FSC) qui veut qu'un débat tronqué ne fortifie pas notre démocratie mais l'affaiblisse, qu'aucun argument d'autorité n'est légitime. La mise à plat des arguments et dimensions complexes du sujet aidera la collectivité à choisir elle-même, plutôt que de dépendre d'un cénacle d'experts ou de hiérarques plus ou moins compétents et intéressés.

C'est pourquoi la FSC aspire à des nouvelles formes de vigilance citoyenne et civique vis-à-vis des technosciences.

---

1 Les positions et analyses notamment des Académies des sciences et des technologies, du CEA, des collectivités territoriales à Grenoble diffèrent ici pas mal des positions et réflexions proposées dans le rapport de JP. Dupuy et F. Roure sur « Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle » (2004, à la demande du Ministère des Finances) et du rapport tout récent du Comité de la prévention et de la précaution (CPP) de mai 2006. Le premier ministre a annoncé le 31 mai 2006, autour de l'inauguration de Minatoc à Grenoble, le lancement d'un grand débat « nano » (mais vu la « machinerie nano » qui s'est déjà mise en place en France et vue la qualité de nos « grands débats nationaux » jusque-là, nous pouvons être inquiets quant au sort de ce débat). Sont attendus les rapports de l'AFSSET et de l'AFSSAPS ainsi qu'un rapport sur éthique et nano par le Comité éthique du CNRS (COMETS) et le Conseil Consultatif National d'Éthique pour les sciences de la vie (CCNE).

## 2. Que sont les nanotechnologies ?

### Définition, chiffres, applications

Des dépenses publiques de 3,5 milliards d'euros en 2003, tous pays confondus, avec un taux de croissance de 40% par an<sup>2</sup>, un budget prévu de plusieurs milliards d'euros dans le nouveau Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD) de l'Union Européenne, un nombre de brevets qui a quadruplé entre 1995 et 2001<sup>3</sup>, un taux de croissance à deux chiffres pour les publications et un chiffre d'affaires mondial estimé à 1000 milliards de dollars d'ici à 2015<sup>4</sup>.

Après des engagements et investissements lourds au nom de la compétitivité internationale et du bien-être des citoyens, les nanotechnologies et nanosciences arrivent finalement sur la scène publique. Puisqu'elles sont annoncées par leurs promoteurs comme « la révolution technologique du XXI<sup>e</sup> siècle » qui va influencer presque tous les aspects de notre vie, et puisqu'elles occupent une place grandissante dans la recherche et le développement technologique, il est urgent de s'interroger sur leurs finalités, les conséquences socio-économiques, les visions de la vie et du monde dont elles sont porteuses et sur les décisions politiques déjà prises et à prendre.

**Une première définition, faisant référence aux pures caractéristiques techniques, pourrait présenter les nanosciences et nanotechnologies** comme un ensemble de techniques, processus et produits qui visent la réalisation, l'étude et la manipulation, à l'échelle des atomes et molécules (c'est-à-dire du milliardième de mètre), de structures, systèmes ou objets dont la taille typique est inférieure à 100 nanomètres (10<sup>-9</sup> m). Leurs propriétés physiques, chimiques ou biologiques, pour lesquelles ils sont exploités, découlent spécifiquement de cette taille nanométrique. A l'échelle « nano », les substances ont un comportement optique, électrique, magnétique et de diffusion qui diffère de celui qu'elles développent habituellement dans le monde « macro » (qui est aussi notre monde quotidien, le monde de la physique classique). Elles adoptent le comportement des atomes qui sont gouvernés par les lois de la physique quantique. A l'échelle nano on est, selon le cas, dans un domaine d'interactions quantiques, ou selon les systèmes, dans un domaine intermédiaire entre les lois de la physique classique et quantique. De ces caractéristiques du monde atomique, on parvient à générer des nanomatériaux qui se présentent sous forme de particules libres ou fixées, de fibres ou tubes, de cristaux ou de lamelles dont le comportement est gouverné par ce qui se produit en surface plus qu'en volume. Ainsi, les propriétés d'usage des nanomatériaux et nano-objets sont-ils particulièrement spécifiques : des métaux deviennent transparents, des substances changent leur réactivité chimique ou électrique (par exemple des substances jusque-là non-conductrices véhiculent l'électricité). On perçoit aussi que cette *technologie* se situe à l'interface de la biologie, de la chimie, de la physique, de la science des matériaux et de l'informatique puisqu'elle a vocation à permettre de contrôler et de manipuler de façon précise et « individuelle » des atomes et les matériaux qui résultent de leurs « assemblages ».<sup>5</sup>

« Il y a plein de place en bas ! » (« There is plenty of room at the bottom ! »). Cette phrase lancée en 1959 par Richard Feynman est devenue la devise des novovisionnaires.<sup>6</sup> Techniquement, le microscope à ef-

2 Jean-Pierre Dupuy, Françoise Roure : « Les nanotechnologies : éthique et prospective industrielle », Section « Innovation et entreprises », novembre 2005.

3 The Royal Society & The Royal Academy of Engineering, report on « Nanoscience and nanotechnologies », July 2004

4 National Science Foundation américaine 2001, (ANR, appel à projets 2005, programme national en nanosciences et nanotechnologies (PNANO), [www.gip-anr.fr](http://www.gip-anr.fr))

5 voir aussi le dossier « nanotechnologies » de Transversales avec l'article « Trois questions à Remy Mosseri », ([www.grit-transversales.org](http://www.grit-transversales.org)) et le rapport du Comité de la prévention et de la précaution (CPP) qui donne une définition technique des nanotechnologies très élaborée.

6 Eric K. Drexler, « Engines of creation » 1986 (paru en France sous le titre « Engins de création : L'avènement des nanotechnologies ». Vuibert, 2005) ; Chateauraynaud F. Nanosciences et technoprophéties – le nanomonde dans la matrice des futurs. Version du 30 avril 2005, [http://prospero.dyndns.org:9673/prospero/acces\\_public/06\\_association\\_doxa/nano\\_pdf](http://prospero.dyndns.org:9673/prospero/acces_public/06_association_doxa/nano_pdf)

fet tunnel développé par IBM dans le cadre d'une recherche industrielle et dans la suite le microscope à force atomique ont permis de manipuler et assembler les atomes individuels dès 1981. Ils ont ouvert la porte au développement des nanotechnologies. A cela se rajoute « la loi de Moore »<sup>7</sup> qui est une prévision fonctionnant comme une sorte d'impératif de miniaturisation. Aujourd'hui, les nanotechnologies suivent deux approches : celle de la miniaturisation descendante - ou « top-down » - assez traditionnelle ; l'autre, plus récente, dite ascendante - ou « bottom-up » - dont le principe est de construire du complexe à partir des atomes.

Or l'échelle nanométrique est aujourd'hui de plus en plus commune à différentes technologies (convergence des outils et des techniques entre physique, chimie et biologie). Dès lors, cette définition technique ne suffit plus depuis que les nanotechnologies sont intrinsèquement liées aux technologies convergentes (nanotechnologies - biotechnologies - technologies d'information - sciences cognitives/neurosciences, NBIC ; voir chapitre 4.3), à la notion de la complexité, et à la production d'artefacts. Des termes tels que « domination », « puissance », « compétitivité » et « contrôle » accompagnent les nanotechnologies depuis leur naissance (par exemple aux États-Unis un battage médiatique associe les nanotechnologies à l'idéologie de la toute-puissance américaine) et présagent d'une certaine vision sociétale y compris dans les dimensions métaphysiques auxquelles elles sont associées. Les nanotechnologies pourraient matérialiser le rêve d'un contrôle, d'une manipulation et d'une surveillance sans précédent de la structure de la matière, y compris vivante et de la vie sociétale.

**Le potentiel d'applications** semble énorme et des ruptures technologiques dans de nombreux secteurs industriels sont envisagées. Même si certaines applications sont déjà arrivées sur le marché (cosmétiques et crèmes solaires, vernis de voiture plus brillants, raquettes de tennis, matériaux d'isolation pour véhicules militaires) il est difficile de donner un agenda quant à l'apparition d'autres applications. Il faut savoir que de nombreux projets présentés comme faisant partie de l'univers « nano » relèvent plutôt des microtechnologies (millième de millimètre :  $10^{-6}$  m) ou de la frontière entre les deux. En fait, peu de laboratoires dans le monde sont à ce jour capables de manipuler réellement les atomes.

Les secteurs les plus concernés sont :

- les technologies de l'information et de la communication : stockage de données, nanoélectronique (transistors), nanolithographie, cryptographie, semi-conducteurs, circuits intégrés ; la microélectronique et l'informatique sont les secteurs les plus marqués par l'implication des grands groupes industriels ;
- le militaire : nouvelles armes, vêtements, équipements, amélioration de la performance humaine ;
- les technologies médicales : chirurgie, implants bioactifs, neuroprothèses<sup>8</sup>, puces à ADN (tests pour la détection des prédispositions génétiques), détecteurs de phénomènes pathologiques, thérapies (cancer : par exemple vecteurs intelligents pour délivrer des médicaments sur place) ;
- les technologies de l'énergie : économies d'énergie (isolation, éclairage), énergies renouvelables (cellules solaires photovoltaïques) ;
- les écotechnologies : dépollution des eaux et des sols ;
- les technologies de sécurité : capteurs ; RFID (Radio Frequency Identification Devices), étiquettes électroniques ;
- les technologies de transport, des matériaux de construction ;
- les textiles : sport, armée ;
- les cosmétiques : crèmes solaires, rouges à lèvres ;
- la chimie ;
- l'alimentation : étiquettes numériques.

Deux des nanomatériaux les plus connus sont les fullerènes et les nanotubes de carbone. Les fullerènes (ou « bucky balls ») sont des molécules composées de 60 atomes de carbone attachés les uns aux autres sous forme de ballon de foot. Les fullerènes ont une immense surface comparée à leur volume<sup>9</sup>. Ils sont ainsi hautement réactifs et sont supposés pouvoir transporter des médicaments dans le corps de patients ou neutraliser des déchets toxiques. Quant aux nanotubes de carbone, ils sont d'une extrême solidité.

7 La loi de Moore a été exprimée en 1965 par Gordon Moore, un des deux fondateurs d'Intel. Elle indiquait que la complexité des semi-conducteurs proposés en entrée de gamme doublait tous les ans depuis 1959, date de leur invention. Cette augmentation exponentielle fut rapidement nommée *Loi de Moore* ou, compte-tenu de l'ajustement ultérieur, *Première loi de Moore*. ([wikipedia.org](http://wikipedia.org))

8 Un exemple est le « Artificial Hand project » des chercheurs à l'Université de Lund en Suède

9 Pour des raisons géométriques, mille particules de 100 nanomètres de rayon ont une surface bien supérieure à une particule de 1 micromètre de rayon, d'où une démultiplication de possibilités de contact avec les tissus biologiques. (RDT, n° 47, janvier 2005)

### 3. La course aux nanotechnologies, nouvelle bulle technologique ?

Les gouvernements sont actuellement les plus grands supporteurs des nanotechnologies. Plus de 30 pays y investissent aujourd'hui massivement en Recherche et Développement (R&D). Parmi eux, les États-Unis, le Japon, l'Europe, la Chine, Taïwan et la Corée du Sud. Ainsi le nombre de grands programmes nationaux, d'institutions de recherche et de start-up nanos a explosé en quelques années.

Pour ne donner que quelques exemples : aux États-Unis, l'Initiative Nationale de Nanotechnologie (National Nanotechnology Initiative, NNI), à laquelle participent vingt-trois agences fédérales qui subventionnent plus de cent centres de nanosciences et nanotechnologies, est un programme fédéral de R&D qui coordonne les efforts de multiples acteurs en recherche, ingénierie et technologie. Son budget s'élevait en 2005 à environ 1 milliard de dollars et sera reconduit en 2006. Il est à noter que dans le cadre de la *National Nanotechnology Initiative*, un budget de plus de 3,7 milliards de dollars de dépenses fédérales est prévu pour la période 2004 à 2007<sup>10</sup>. 65% des subventions soutiennent des recherches académiques et une part substantielle promeut le partenariat public privé (PPP). Les principales agences qui investissent sont la National Science Foundation (338 M\$), le Département de la Défense (257 M\$), le Département de l'Énergie (210 M\$), les National Institutes of Health (142 M\$) et le Département du Commerce (75 M\$). En 2005, l'Office des brevets et des marques (U.S. Patent and Trademark Office) et la Commission de consommateurs pour la sécurité de produits (Consumer Product Safety Commission) ont rejoint l'initiative, témoignant de l'importance croissante des activités commerciales<sup>11</sup>. Le fait que le Département de la Défense soit le deuxième plus grand investisseur aux États-Unis n'est en soit pas une grande surprise - tant le complexe militaro-industriel tient dans la plupart des pays développés un rôle fondamental dans les secteurs scientifiques - mais cet énorme effort montre l'importance que les militaires américains accordent aux nanotechnologies. Le Japon n'est pas en reste puisque ce pays a investi dans les NTS environ 400 M\$ en 2001 et 800 M\$ en 2003 et y injectera probablement plus que les États-Unis en 2006. Pratiquement toutes les universités et grandes institutions de recherche qui tiennent à leur reconnaissance au niveau mondial possèdent aujourd'hui des laboratoires en nanosciences ou nanotechnologies.

Quant à l'Union Européenne, elle investit à la fois au niveau de chaque État membre et au niveau communautaire. Dans le 6<sup>ème</sup> PCRD<sup>12</sup>, qui couvre la période allant de 2002 à 2006, les nanotechnologies figuraient parmi les sept domaines prioritaires avec un budget de plus de 1 milliards d'euros. Le 7<sup>ème</sup> PCRD (2007-2013) prévoit une augmentation importante<sup>13</sup>. Pendant que l'Allemagne quadruplait le montant des subventions allouées à ce secteur par le Ministère de la Recherche depuis 1998 pour dépasser 100 millions d'euros en 2003<sup>14</sup>, la Grande Bretagne créait un des premiers instituts en nanotechnologie en 1994<sup>15</sup>. Conformément au discours sur l'agenda et la stratégie de Lisbonne, le 7<sup>ème</sup> PCRD présente les NST exclusivement en terme de leadership économique, de concurrence et de compétitivité. Ne sont pas mentionnées ni les questions de toxicité des nanoparticules, ni les approches philosophiques, ni les conséquences potentielles au niveau sociétal.

10 D. Benoit-Browaeyns, « Pour une géopolitique des nanosciences » ; <http://www.vivantinfo.com/index.php?id=121>

11 <http://www.nano.gov/html/about/funding.html> (comme chiffres de la National Nanotechnology Initiative, comme disponible le 06.01.2006)

12 Programme Cadre de Recherche et développement 2002-2006. Les PCRD sont l'instrument financier principal pour soutenir la R&D dans l'Union Européenne.

13 La Commission Européenne, dans son texte pour le 7<sup>ème</sup> PCRD du 6 avril 2005 proposait 4,8 milliards d'euros. Il n'est pas encore clair combien il en restera à l'issue des négociations financières entre les états membres.

14 [http://www.bmbf.de/pub/nanotechnologie\\_in\\_deutschland-standortbestimmung.pdf](http://www.bmbf.de/pub/nanotechnologie_in_deutschland-standortbestimmung.pdf)

<http://www.bmbf.de/de/nanotechnologie.php>

15 Institute of Nanotechnology, <http://www.nano.org.uk/>

### Les priorités des politiques de recherche publique

Comme nous l'avons déjà rappelé dans notre note sur la politique de recherche : « à eux seuls, la recherche militaire et les programmes technologiques nucléaire, aéronautique et spatial absorbent plus de 40% de la dépense publique de recherche française. De plus, la France accuse un déficit considérable de recherche dans la plupart des domaines liés au développement durable et à la santé publique : santé environnementale et toxicologie, écologie, énergies renouvelables, agriculture biologique et durable, chimie et ingénierie vertes ne doivent pas rester orphelins de recherche en France. »<sup>16</sup>

Comme les autres domaines de recherche définis comme prioritaires (« mainstream »), les nanotechnologies participent d'un discours politique dominant qui réduit la fonction de la recherche à un service pour la compétitivité économique, pour une plus grande protection de la propriété intellectuelle, pour l'intensification des partenariats entre universités et industrie privée (au point où les universités sont en train de perdre leur mission historique) et qui fait croire que seules les technologies les plus sophistiquées sont créatrices d'emploi et de bonheur collectif.

Au niveau de l'industrie privée, presque toutes les compagnies classées dans le « Fortune 500 », ainsi qu'environ 1200 start-up investissent dans la R&D en nanotechnologies. De nombreuses multinationales ont déjà des produits sur le marché ou sont en train d'en préparer.

#### Quelques-unes des firmes « dans la course nano »

- Nanocomputing : IBM, Motorola, Hewlett Packard, AMD
- Cosmétiques, substances chimiques : BASF, L'Oréal, Du Pont, Lancome
- Aérospatial et défense : Sandia, Lockheed Martin
- Alimentation et médicaments : Kraft, Aventis, Proctor, Gamble<sup>15</sup>, Unilever
- Appareils ménagers : Samsung
- Automobiles : Kleinmann
- Vêtements : Greenyarn LLC.
- Photos : Kodak

A ce jour, l'Oréal a déjà mis sur le marché des crèmes solaires transparentes et plus hydrophobes (oxyde de titane ou de zinc en nanoforme), du maquillage (dioxyde de titane), des particules d'oxydes de silicium et de zinc ainsi que des fullerènes pour lutter contre les effets du vieillissement de la peau (ex. éliminer des radicaux libres). Lancome propose également une crème pour la peau (Hydra Zen, avec des trécéramides nano-encapsulés). Le constructeur d'automobiles Mercedes vend depuis 2003 des vernis plus brillants et plus résistants que les peintures conventionnelles et vendra à moyen terme un vernis auto-nettoyant<sup>17</sup>. Samsung utilise « des nanotechnologies sophistiquées en les appliquant sur la couche intérieure de leur réfrigérateurs afin d'assurer une stérilisation efficace, une déodorisation et des effets anti-bactériens. ». L'entreprise allemande Kleinmann vend un spray de protection de parebrises dans lequel les nanoparticules se lient avec le verre et le rendent résistant contre de la neige, de la glace et de la poussière. Greenyarn LLC présente des chaussettes « éco-fabriquées » qui contiennent des nanoparticules de bambou. Kodak propose des écrans de vidéo et de caméras faits avec des couches polymères nanostructurées.<sup>18</sup>

(Pour des investissements dans le secteur militaire : voir chapitre 4)

16 Fondation Sciences Citoyennes, « *Quelle politique scientifique pour entrer dans le 21<sup>e</sup> siècle ? Vers un nouveau contrat entre recherche et société. Contribution de la Fondation Sciences Citoyennes aux États-Généraux sur l'avenir de la recherche* », Note N°2 de la Fondation Sciences Citoyennes, 2004 ; [http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id\\_article=601](http://sciencescitoyennes.org/article.php3?id_article=601)

17 <http://www.auto-innovations.com/site/dossier/nanopaint.html>

18 Toutes ces informations se retrouvent sur les sites respectives de ces entreprises (avril 2006).



## Tous nanobricoleurs ?

Dans un tel contexte de fusion renforcée entre dynamiques de recherche et business, les risques sont grands de voir s'accroître dans le domaine des nanotechnologies les dérives que nous avons déjà observées dans celui des biotechnologies : pseudo-scientifiques en mal de scoop (e.g. Hwang Woo Suk, clonage) ; accidents consécutifs à des applications trop précipitées (e.g. mort d'un jeune américain suite à un essai de phase I de thérapie génique en 1999<sup>19</sup>) ; manquements plus fréquents à la déontologie des chercheurs<sup>20</sup> ; conflits d'intérêt ; projection d'un idéal de contrôle total de la nature.<sup>21</sup>

L'activité de laboratoire est en pleine transformation. Traditionnellement, et sans vouloir enjoliver le passé, on peut considérer que les chercheurs sont sensés partager une déontologie scientifique contraignante qui comprend notamment des protocoles rigoureux et un certain désintéressement - ce qui veut dire qu'en science tous les moyens n'étaient pas permis. Or, ces professionnels entrent aujourd'hui de plus en plus dans le monde du business soit par la création de start-up, soit par des contrats avec des entreprises. Mais les principes qui régissent le monde des affaires sont différents des règles de validation des savoirs scientifiques, et ce malgré les codes de déontologie ou les comités d'éthiques. Le premier objectif d'une entreprise est de faire du profit. On ne peut pas exiger d'un chercheur qu'il soit d'abord « compétitif » et espérer que cette priorité reste sans effet sur sa déontologie...

Dans cette logique, un des éléments du discours des zélateurs des NBIC consiste à proclamer la naturalisation de la technique avec pour principal argument maintes fois entendu que « ça se fera de toute façon » et que « d'un point de vue de la rationalité technique, les solutions inventées par le vivant ne sont pas toujours optimales. »<sup>22</sup> Il existerait donc une sorte de « sélection naturelle des technologies », le travail des scientifiques et ingénieurs consistant simplement à faire émerger « de façon naturelle » des technologies plus performantes. Alors, le scientifique n'aurait aucune responsabilité active dans ce processus évolutif qu'il ne peut qu'accompagner, ce qui rendrait impossible toute contestation politique ou évaluation technique.

Or, d'après J.P. Dupuy et A. Grinbaum, les programmes de recherche scientifique et technologique sont basés sur des présuppositions générales sur la structure du monde et ces idées et visions du monde pèsent de façon implicite (ou explicite) sur chaque agenda de recherche. La philosophie positiviste demeure toujours la base la plus répandue des sciences modernes. Il devient dès lors majeur de se poser la question suivante : quelles idées et visions du monde demeurent sous-jacentes aux recherches en nanotechnologies ?<sup>23</sup>

- Nos comportements les plus complexes peuvent être décrits par une approche informatique (la matière, le vivant, le cerveau sont vus comme des machines)
- Si on propose à quelqu'un l'amélioration de son corps et/ou de son esprit et l'immortalité, il n'hésitera pas à y recourir puisque la perfection est un vieux rêve de l'humanité. (La fonction de la science et de la technique est de perfectionner la nature humaine plus que la condition humaine)
- L'amélioration des êtres humains est un problème biologique et non pas social (ils ne sont pas responsables des injustices sociales)
- Les êtres humains peuvent maîtriser la complexité de la nature ; ils peuvent et doivent la reproduire
- Les réalisations technologiques sont les clés du bien-être des humains

Dans les rêves de certains nanotechnologues, il ne s'agit plus de tenter d'isoler des phénomènes simples pour éventuellement les assembler afin d'obtenir un résultat complexe. Dans ce cas, la surprise ne peut venir que d'un phénomène nouveau, imprévu. Avec les NT, le processus de recherche serait modifié. On générerait massivement de la complexité pour observer le résultat obtenu. La surprise vient alors de ce qu'est capable de réaliser le produit obtenu (même si l'abord 'un problème à l'échelle nano peut également correspondre à des nécessités bien précises, ou permettre d'aborder des questions de physique fondamentale).

19 [http://www.inapg.inra.fr/ens\\_rech/bio/biotech/textes/societe/droit/therapege/droitgen.htm](http://www.inapg.inra.fr/ens_rech/bio/biotech/textes/societe/droit/therapege/droitgen.htm)

20 « Scientists behaving badly » (comment) Nature 435, 9 juin 2005 : Sur 7 000 chercheurs questionnés avec respect de l'anonymat, 3 247 avaient accepté de répondre à des questions sur d'éventuelles pratiques contraires à la déontologie. Un chercheur sur trois avouait de tels comportements plus ou moins graves : données falsifiées, conflit d'intérêt non déclaré, plagiat, omission de certains résultats, etc.

21 Dahan A., Pestle, D. (eds.), « Les sciences pour la guerre ». 1940-1960. Paris, Ed. EHESS, 2004

22 Bensaude-Vincent, B. « *Se libérer de la matière ? Fantasmages autour des nouvelles technologies* », Éditions INRA, Paris 2004

23 Dupuy, J.-P. et Grinbaum « Living With Uncertainty: Towards a Normative Assessment of Nanotechnology », *Technologie* joint issue with *Hyle* 8(2), 2004, pp. 4-25

## 4. Nano-particules et giga-problèmes : quelques risques potentiels majeurs liés au développement des nanotechnologies

Par opposition à leur taille, infiniment petite, les nanotechnologies et plus particulièrement le développement de leurs applications sont susceptibles de générer des problèmes gigantesques : problèmes sanitaires et environnementaux, éthiques, économiques, juridiques et philosophiques. Sans être exhaustif, nous souhaitons en évoquer quelques-uns.

### 4.1. La toxicité des nanoparticules : incertitude scientifique et vide réglementaire

Des nanoproducts ont déjà intégré le marché en dépit du manque de recherches sur leur sécurité et en l'absence de bases juridiques. Ici, le principe de précaution ne prévaut pas.

#### Au bazar des high-tech : des crèmes radioactives aux crèmes nano-technologiques...

La « radiumfolie » du début du 20<sup>ème</sup> siècle a fait vivre des médecins, l'industrie pharmaceutique et cosmétique, des stations thermales. Après la découverte des effets thérapeutiques des éléments radioactifs comme le radium, la radioactivité était capable de soigner pratiquement toute maladie ou d'assurer la beauté. L'industrie pharmaceutique mit sur le marché des produits à base de radium : la Tubéradine soignant la bronchite, la Digéraline facilitant la digestion, la Vigoradine luttant contre la fatigue. Le mot « radium » devint un argument magique pour vendre des crèmes, poudres, cosmétiques, savons, dentifrices, et shampoings... La crème, qui contenait 0,25 milliogramme de gramme de bromure de radium pour 100 grammes d'excipient, était censée effacer les rides du visage : « La Science a créé Tho-Radia pour embellir les femmes. À elles d'en profiter. Reste laide qui veut ! » disait la réclame. Les belles des années 1920 furent heureusement protégées des charlatans par le prix très élevé des substances radioactives. Les préparations ne contenaient que de petites quantités de radium, de l'ordre de 100 becquerels par gramme. Elles furent de ce fait pratiquement inoffensives... »<sup>24</sup>.

La raison voudrait que de tels slogans simplistes soient relégués dans les tiroirs de l'Histoire, au rang des dégâts collatéraux du charlatanisme pseudo-scientifique. Mais alors, que dire des arguments publicitaires des vendeurs de crèmes nanotechnologiques ?<sup>25</sup> La même vigilance s'impose, indéniablement. Raisonnablement.

24 [http://www.laradioactivite.com/pages/00\\_phenomene/03\\_radiofolies.htm](http://www.laradioactivite.com/pages/00_phenomene/03_radiofolies.htm) site CNRS

25 ici on peut se demander si la radium folie est morte partout : il existe au Brésil de l'eau minérale vendue avec l'argument « radioactive » sur l'étiquette...

À ce jour, très peu de recherches sur la toxicité des nanoparticules ont été effectuées. La part des budgets alloués aux questions de sécurité sanitaire et environnementale dans le cadre de l'Initiative Nationale en Nanotechnologie aux États-Unis est très faible (environ 3%). Le budget du Département de Défense (DOD) était de 257 millions de dollars en 2005 alors que le budget du Ministère de la protection de l'environnement (Environmental Protection Agency, EPA) se résumait à 5 millions de dollars (moins de 13% du seul budget du DOD). Pour 2006, les investissements nano aux États-Unis comprennent 1.054 milliards de \$ avec un budget EHS (Environnement, Santé et Sécurité) de 38,5 millions de \$ (ce qui correspond à 3,7%) auxquels s'ajoutent 42,6 millions de \$ (ce qui correspond à 4,0%) pour traiter des problèmes éthiques, légaux et sociétaux (nommé « ELSI » = ethical, legal and societal issues) et ceux liés à l'éducation. Puisque ces budgets augmentent, on pourrait être tenté de les interpréter comme une indication d'une prise de conscience aux États-Unis si l'angle majoritaire sous lequel ces budgets sont gérés n'était pas pas celui du « Comment faire pour éviter de reproduire les erreurs faites avec les OGM afin de ne pas se mettre le public à dos... »

Alors que les investissements pour la recherche en nanotechnologies ont dépassé 3,5 milliards de dollars en 2004 à l'échelle mondiale, il est très inquiétant que la part dévolue à l'évaluation des risques soit toujours aussi limitée, malgré quelques programmes comme National Toxicology aux États-Unis ou Nano-Safe en Europe. Il manque donc quantitativement des études sur les éventuels effets sur le long terme, et les quelques résultats scientifiques en termes d'évaluation de risques et de toxicité obtenus jusqu'à présent sont contradictoires. Pour ne citer que deux travaux : En septembre 2005, des chercheurs de l'Université américaine de Vanderbilt observaient que des fullerènes se lient fortement à l'ADN. X. Zhao et ses collègues montraient que si la molécule d'ADN est abimée, les fullerènes peuvent de façon stable occuper le site dégradé, cette forte association pouvant influencer de façon négative le processus d'autoréparation de l'ADN en double hélice<sup>26</sup>. Ce constat soulève une multitude d'interrogations d'ordre scientifique auxquelles il convient de répondre avant d'envisager, comme c'est déjà le cas aujourd'hui, d'utiliser de tels matériaux comme véhicules de transport de médicaments. De l'autre côté, une autre étude parue en 2006 dans un des journaux scientifiques les plus renommés montrait que des nanotubes de carbone ne s'accumulaient pas dans le sang ni les organes et étaient excrétés dans les urines (injection dans des souris).<sup>27</sup> Donc, des questions complètement ouvertes à cette heure attendent de façon urgente des réponses. Au-delà des doutes sur la mobilité des nanoparticules dans les différents tissus et organes du corps humain (puisque les nanoparticules semblent capables de passer les barrières pulmonaires, hémato-encéphaliques et placentaires), on devrait aussi s'interroger sur la mobilité des différentes nanoparticules dans l'environnement (sols, eaux, air) et les éventuels effets des nanopoussières (à l'instar de l'amiante). Quels seront les tissus les plus attaqués et par quelles nanoparticules ? Quelle caractéristique physico-chimique des nanoparticules entraîne quel effet ? Aujourd'hui nous ne savons même pas si les gants en plastique utilisés par les chercheurs dans les laboratoires arrêtent les nanoparticules. Or, la « toxicité effective » d'une substance n'est mesurable que lorsque les dangers sont connus et que des études peuvent les analyser. Quelle unité de mesure (masse, volume, surface, structure...) sera adaptée pour évaluer les effets des nanoparticules ?

Le rapport sur les nanotechnologies de la Royal Society Britannique de juillet 2004 est sans équivoque : « nous souhaitons vivement que la dissémination de nanoparticules et de nanotubes dans l'environnement soit évitée autant que possible. Plus spécifiquement nous recommandons comme mesure de précaution que les entreprises et les laboratoires de recherches qui fabriquent des nanoparticules et des nanotubes les traitent comme s'ils étaient des déchets dangereux et que l'utilisation de nanoparticules libres dans des applications environnementales telle que la remédiation des eaux souterraines soit interdite jusqu'au moment où une recherche appropriée démontrera que les bénéfices compensent les risques potentiels. »<sup>28</sup>.

26 Xiongce Zhao, Alberto Striolo and Peter T. Cummings *Biophysical Journal* 89:3856-3862 (2005) « *C<sub>60</sub> binds to double-strand DNA, either at the hydrophobic ends or at the minor groove of the nucleotide. C<sub>60</sub> binds to single-strand DNA and deforms the nucleotides significantly. Unexpectedly, when the double-strand DNA is in the A-form, fullerenes penetrate into the double helix from the end, form stable hybrids, and frustrate the hydrogen bonds between end-group basepairs in the nucleotide. When the DNA molecule is damaged (specifically, a gap was created by removing a piece of the nucleotide from one helix), fullerenes can stably occupy the damaged site. We speculate that this strong association may negatively impact the self-repairing process of the double-strand DNA. Our results clearly indicate that the association between C<sub>60</sub> and DNA is stronger and more favorable than that between two C<sub>60</sub> molecules in water. Therefore, our simulation results suggest that C<sub>60</sub> molecules have potentially negative impact on the structure, stability, and biological functions of DNA molecules.* »

27 Singh, R. et al. « Tissue biodistribution and blood clearance rates of intravenously administered carbon nanotube radiotracers ». *PNAS*, February 2006, vol.103, n°9, p.3357-3362.

28 The Royal Academy and The Royal Academy of Engineering: « Nanoscience and nanotechnologies: opportunities and uncertainties. » 29 July 2004 <http://www.nanolec.org.uk/finalReport.htm>

« we are keen that the release of nanoparticles and nanotubes to the environment is avoided as far as possible. Specifically we recommend as a precautionary measure that factories and research laboratories treat manufactured nano-

Dans le même état d'esprit, l'ONG canadienne ETC Group demande depuis des années le retrait du marché de tous les produits « nano » tant que leur sécurité sanitaire et environnementale n'est pas prouvée. En tant que citoyens français, nous cherchons en vain de telles considérations dans le rapport sur les nanotechnologies émanant de l'Académie française (voir chapitre 5). Le rapport récent du Comité de la prévention et de la précaution constate par contre que « Toutefois les résultats de tests de laboratoire, effectués selon des méthodologies éprouvées pour les substances chimiques en général, laissent penser que les organismes vivants (microorganismes, invertébrés, vertébrés, plantes) peuvent être affectés par l'exposition à des nanomatériaux. »<sup>29</sup>

Les réticences et les craintes ne sont toutefois pas l'apanage d'analystes et d'experts traditionnellement au fait des questions scientifiques. En mai 2004, Swiss Re, deuxième plus grande compagnie de ré-assurance mondiale, communiquait sur les risques inconnus et imprévisibles associés à la nanotoxicité ou à la nanopollution, risques qui pouvaient rendre les nanotechnologies non assurables à terme<sup>30</sup>. Le parallèle avec les plantes génétiquement modifiées (PGM) est patent concernant le risque afférent à la dissémination de molécules (nanoparticules ou gènes modifiés).

## Régulations juridiques

A ce jour, aucun gouvernement n'a adopté de réglementation juridique spécifique aux nanoparticules ou à leurs impacts sociaux, environnementaux ou sanitaires. Ils ont du mal à avouer que les législations sanitaires et environnementales existantes ne sont pas adéquates pour traiter les exigences spécifiquement liées aux matériaux à l'échelle nano. Ces matériaux ne sont pas encore répertoriés comme une classe de substances chimiques à part.

Malgré ce déficit majeur, toute une série de produits contenant des nanoparticules est déjà sur le marché. Il est plus que temps d'élaborer un cadre législatif *ad hoc*. Il s'agit notamment de légiférer sur les conditions de mise sur le marché de produits nano, sur la maîtrise des déchets émanant de ces filières, sur les conditions de travail et de sécurité des travailleurs et des chercheurs en nanotechnologies, sur les conséquences juridiques en matière de pollution sanitaire et environnementale, etc.

Dans la précipitation pour bâtir cette nouvelle industrie, l'essentiel de l'intelligence et de la prospective semble avoir été consacré à échafauder les bases de ce nouveau mythe technoscientifique. Les ingénieurs des nanotechnologies ont notamment négligé jusqu'ici de s'interroger sur ce qu'advient ces produits une fois utilisés et devenus déchets. S'il semble plus au moins acquis que les nanoparticules ne présentent pas de grands risques tant qu'elles sont accrochées à une matrice, reste la question de ce qui se passera quand les matrices se dégradent, se décomposent, disparaissent. Rappelons que ce n'est que plus de 30 ans après le lancement du programme national nucléaire français qu'a été lancé un « débat national » sur les déchets radioactifs afin de préparer le débat parlementaire de 2006. Nous ne ferons pas ici une critique de ce débat, mais soulignons qu'il a été lancé surtout parce que « En France, pour 10% des déchets radioactifs, les déchets moyennement et hautement radioactifs à vie longue, il n'existe à ce jour qu'une solution provisoire de gestion : l'entreposage industriel en surface dans des bâtiments spécialement aménagés sur leurs sites de production. »<sup>31</sup> Pourquoi en serait-il autrement pour les nanoparticules ?

Rappelons aussi que la nouvelle législation européenne REACH concernant l'enregistrement, l'évaluation et l'autorisation des substances chimiques, ainsi que les restrictions applicables à ces substances prétend offrir au public une meilleure protection vis-à-vis des substances chimiques intentionnellement produites. Il s'agit potentiellement de la réglementation la plus ambitieuse et la plus importante de ces vingt dernières années. Pour la première fois, les industries chimiques devront fournir les données de sûreté sanitaire et environnementale sur toutes les substances qu'elles produisent<sup>32</sup>. Mais REACH concentre depuis des années d'intenses efforts de torpillage des lobbies de la chimie<sup>33</sup>. La majorité des substances chimiques utilisées aujourd'hui n'a jamais été testée au regard de leurs effets sur la santé humaine et l'environnement, pas

---

particles and nanotubes as if they were hazardous waste streams and that the use of free nanoparticles in environmental applications such as remediation of groundwater be prohibited. »

29 Rapport du CPP : « Nanotechnologies, nanoparticules – quels dangers, quels risques ? » Ministère de l'écologie et du développement durable, Paris, mai 2006

30 <http://www.swissre.com/> « Nanotechnology - Small matter, many unknowns »

31 Débat public sur les déchets radioactifs : <http://www.cea.fr/fr/actualites/articles.asp?id=663>

32 Jusque là ce n'est le cas que pour les substances dont la production a commencé après 1981, ce qui représente moins de 10% des substances commercialisées (source : Greenpeace, Janvier 2004).

33 Le Monde, 15 novembre 2005

plus que les interactions entre ces nombreuses substances. Comment faire croire que l'industrie nanotechnologique sera plus prudente avec d'aussi maigres budgets alloués aux questions de sécurité sanitaire et environnementale ? Une hypothèse voudrait que les nanoparticules relèvent de la directive REACH.<sup>34</sup> Pourtant, plusieurs obstacles techniques et politiques s'opposent à leur intégration à ce dispositif. Ainsi, les associations, syndicats et mouvements politiques qui se sont battus des années en faveur de l'adoption de la directive REACH sont-ils réticents à l'idée d'une réouverture du texte, tant ils ont mesuré la force de leurs adversaires et la puissance de leurs relais au plus près des parlements et des gouvernements. Or, REACH devrait être sensiblement réécrit pour incorporer correctement la nano-toxicologie, impliquant un nouveau retard d'application du texte et de nouvelles opportunités pour l'affaiblir encore un peu plus. Autre exemple technique : la clause d'exemption de contrôle pour la fabrication en dessous d'une tonne qui existe dans REACH n'a aucun sens dans le cas des nanoparticules dont la faible masse ne peut constituer un critère pertinent de contrôle et de régulation.<sup>35</sup> La méthodologie d'évaluation doit être d'autant plus adaptée que nous ne comprenons pas encore les mécanismes de la toxicité liés aux nanoparticules. Nous pensons que des législations « nano » devraient prendre en compte des critères de taille ou de forme pour distinguer différentes versions « nano » d'une même substance. Ici, comme pour les OGM, le concept de « l'équivalence en substance » n'est pas adapté. Utilisé depuis des années 1990 pour juger les demandes d'autorisation d'OGM, ce postulat sert à justifier que l'administration américaine ne porte que de rares interdictions sur la dissémination de produits transgéniques et ne soutient pas de recherches sérieuses sur leurs impacts sanitaires et environnementaux. De façon générale, tenter d'intégrer les nanotechnologies dans des règlements existants signifierait aussi que le paysage politique s'adapterait au « nano-monde » sans négliger les questions systémiques émergentes telles que les conséquences sur les droits de l'homme et la liberté de l'espace privé, sur le commerce, sur les défavorisés ou des questions de monopole, etc.

## 4.2. Contrôle technologique, monopoles et mythes recyclables des biotechnologies

### *Brevets*

Les brevets en nanotechnologie concernent tous les secteurs industriels et leur nombre ne cesse de croître, qu'ils soient soumis aux offices de brevets à Washington (United States Patent and Trademark Office), Munich (Office Européen de Brevets) ou Tokyo (Office Japonais des Brevets). Même s'il est difficile aujourd'hui d'établir un nombre exact de nano-brevets dans le monde (les chiffres varient selon les sources de plusieurs milliers<sup>36</sup>), il en sort néanmoins clairement que des compagnies américaines sont en tête, précédant de loin leurs homologues japonaises, allemandes, canadiennes, françaises et australiennes, elles-mêmes suivies par... des établissements universitaires américains. Ces nano-brevets couvrent surtout des nanomatériaux comme des nanotubes ou nanoparticules, des produits incluant des nanomatériaux, des systèmes de caractérisation et de contrôle des nanomatériaux ainsi que des processus de production. Même le brevetage d'éléments naturels devient envisageable si leur production implique des processus techniques. Ils sont souvent assignés de façon à couvrir le plus largement possible le domaine concerné (un fait déjà connu en biotechnologie) et à obtenir des droits sur la quasi-totalité des secteurs industriels. Ainsi, et ce n'est pas nouveau non plus, ces brevets bloquent l'innovation car ils créent une complexité de demandes propriétaires quasi insurmontable avec des brevets qui se chevauchent et des nombreux royalties à payer.

Dans le domaine des nanotechnologies, les recherches sont largement financées par l'argent public tandis que la plupart des résultats de R&D s'observent dans le secteur privé (exceptions faites des universités américaines) : par exemple des compagnies comme les géants informatiques NEC Corporation, IBM et

34 Le rapport du CPP « Nanotechnologies, nanoparticules – quels dangers, quels risques ? » analyse judicieusement comment REACH pourrait intégrer les nanos.

35 C'est-à-dire si on considère les nanoparticules comme a priori dangereuses, elles pourraient relever de la procédure d'autorisation, la mesure de précaution dans REACH, qui s'applique aux substances, quel que soit le volume produit.

36 Zan Huang, et al. « International nanotechnology development in 2003: Country, institution and technology field analysis on US PTO patent database », *Journal of Nanoparticle research* 6: 325-354, 2004. Charles Q. Choi « Nano World: Nanopatents in conflict », UPI, published april 25, 2005. ETC Group « Nanotechs 'Second Nature' patents: implications for the Global South », ETC, June 2005.

Carbon Nanotechnologies Inc. détiennent de nombreux brevets sur des nanotubes de carbone. Cette pression de dépôt de brevets, qui n'est pas nouvelle, pèse aussi très fortement dans l'univers des start-up pour lesquelles les droits de propriété intellectuelle constituent la source majeure de capital.

Après les brevets sur le vivant apparaissent alors les brevets sur la matière.<sup>37</sup> Dans ce cadre, les brevets d'hier sur des organismes génétiquement modifiés faciliteront les brevets d'aujourd'hui sur des organismes ou matériaux « nanotechniquement » modifiés. Pour les Monsanto, Novartis, Merck, Unilever etc. ces brevets sont un des « outils » les plus précieux pour maintenir et renforcer leur pouvoir. Et pour citer Jim Thomas du groupe ETC : « Pendant plus d'une décennie, la société civile et les mouvements populaires ont protesté contre l'appropriation du vivant aux cris de "pas de brevets sur le vivant". Les nanotechnologies ont permis aux multinationales d'étendre leurs tentacules jusqu'au cœur de la matière vivante et inerte. Il faut hélas aujourd'hui dire : pas de brevets sur la nature tout entière ! »<sup>38</sup>.

### *Des mythes biotechnophiles aux mythes nanotechnidolâtres*

Les parallèles entre les biotechnologies et les nanotechnologies sont nombreux même si dans ce dernier cas, les applications industrielles pourraient être plus larges et avoir des conséquences plus profondes sur tous les domaines de la vie.

Avec l'arrivée des nanotechnologies, les organisations de la société civile qui se sont engagées dans le domaine des biotechnologies vivent une sorte de « déjà vu » face aux propositions des nanopromoteurs. Comme aux temps radieux des promesses du nucléaire, des biotechnologies et de la chimie, les optimistes ont prétendu et continuent de prétendre qu'elles vont résoudre les problèmes de famine, de pauvreté, d'énergie et de pollution. Théoriquement, dans un monde juste, solidaire et éco-responsable, les nanotechnologies pourraient éventuellement jouer un tel rôle. Mais dans notre monde réel, la maîtrise de ces technologies ne peut qu'accroître le pouvoir de ceux qui la détiennent au détriment des autres, et leur commercialisation conduira inévitablement à de nouveaux monopoles de contrôle. Les contre-exemples des biotechnologies, de la chimie ou de la génétique (e.g. des OGM comme de la thérapie génique) montrent qu'elles ne tiennent pas – qu'elles ne peuvent tenir - leurs promesses et que les conséquences environnementales, réglementaires et sociales liées à leur utilisation risquent rapidement de pénaliser une grande partie des populations (par ex. paysans, sociétés du Sud). En ce qui concerne les nanotechnologies, on peut observer que, dès leur naissance, elles sont avant tout considérées et pensées comme objets de compétitivité. Les « mythes recyclables » - tels que celui des technologies nourricières et pourvoyeuses de santé pour les plus pauvres - continuent d'être utilisés, plus comme leurres que comme discours prospectifs<sup>39</sup>. Car qui pourrait y croire ? Jusqu'ici, les OGM ont surtout nourri les entreprises multinationales, et Monsanto, Novartis et d'autres n'ont cessé d'augmenter leurs profits au cours des dernières années.<sup>40</sup> Comment soutenir les valeurs de solidarité et de bien commun lorsqu'on évoque les NST dans un monde où les seules valeurs reconnues et surdéterminantes sont la rentabilité, le profit et la compétitivité ? Il n'est pas seulement ambigu de faire passer les vessies du progrès pour les lanternes de l'humanisme. Désormais, cette rhétorique est tout simplement criminelle, car au bénéfice des organisations humaines les plus prédatrices des ressources. Alors, le manque de ces ressources peut signer l'arrêt de mort de millions d'êtres humains qui devront attendre encore bien longtemps pour jouir des « retombées positives » des nanotechnologies notamment au fin fond de l'Afrique subsaharienne ou des bidonvilles des mégapoles. Le monde des technosciences tourne sur lui-même, hors sol, hors société, hors humanité.

Autre élément de mythologie contenu dans de nombreux discours : les technologies protégeront l'environnement. Théoriquement, là encore, les biotechnologies auraient dû diminuer l'utilisation des substances chimiques. Or, dans l'univers agricole, elles ont surtout créé de nouvelles dépendances vis-à-vis de la chimie. Une nouvelle fois, les scientifiques naviguent à vue puisqu'une très faible part des recherches porte sur les impacts environnementaux et sanitaires de ces découvertes. Les experts ne peuvent apporter des éléments de réponse ou d'éclairage en matière de politique publique qu'à partir d'un éventail de connaissances acquises et connues. Alors, ne pas chercher dans telle ou telle direction – par exemple en épidémiologie - revient à interdire d'intégrer des critères relevant de ce champ de la connaissance dans le

37 Thierry Morse, PMO, <http://pmo.erreur404.org/repliquesII.rtf>

38 Jim Thomas, Des brevets sur les atomes ? L'Ecologiste n°13, juillet-août-septembre 2004

39 voir aussi : ETC Group « The Big Down » et « Les utopies technologiques » Global Chance, n° 20, février 2005

40 [www.monsanto.com](http://www.monsanto.com) : Brett Begemann (executive vice president) lors du Monsanto Biennial U.S. Investor day, 10 novembre 2005; Communication de Monsanto Co., Wednesday 6 avril 2005, The Ledger, <http://www.ledger.com>

cadre de politiques publiques (industrielles, sanitaires, environnementales, etc.). L'aveuglement du corps scientifique et technocratique en matière de complexité sociétale dans le domaine de la recherche produit un feedback négatif qui nourrit l'aveuglement, occulte la problématique, la range dans la case « cassandre anti-progrès ». Et *la nave va !* On a beau jeu *a posteriori* de s'inquiéter des caractéristiques hautement réactives et potentiellement hautement toxiques des nanoparticules pour la santé humaine et pour l'environnement. La carence de recherches en la matière signifie le début et la fin du débat.

Dernier élément du discours mythologique : les technologies maintiendront l'emploi. Il existe peu d'analyses comparatives sur la création d'emplois par des technologies de pointe ou par des voies alternatives. A ce jour, le seul secteur où des débuts d'analyse émergent depuis peu est celui de l'énergie. Or il semble à peu près acquis que le secteur économique des énergies renouvelables serait un bon créateur d'emplois - ce qui n'empêche pas la France de refuser de modérer son option stratégique nucléaire, probablement avec l'assentiment d'autres pays européens limitrophes. (Le réacteur EPR, dont le feu vert pour sa création a été donné par EDF le 3 mai 2006, emploiera à partir de 2012, date prévue de mise en production, 300 personnes.<sup>41</sup>)

Promesses et défis des biotechnologies	Promesses et défis des nanotechnologies
<p><u>Promis</u> depuis 15 ans : des thérapies géniques ciblées (corrections des pathologies génétiques)</p> <p><u>A ce jour</u> : aucun traitement disponible</p>	<p><u>Promesses</u> : diagnostics, thérapies ciblées, amélioration d'organes déficients</p>
<p><u>Promis</u> : depuis 25 ans : produire des remèdes à d'innombrables maladies)</p> <p><u>A ce jour</u> : les OGM unicellulaires produisent de nombreux (et coûteux) médicaments dont la plupart pourraient être obtenus autrement</p>	<p><u>Promesses</u> : guérir des maladies (cancer, etc.) qu'on soupçonne de plus en plus d'être liées à des problèmes de pollution environnementale (prévention &lt;-&gt; thérapie)</p>
<p><u>Promis</u> : promouvoir le développement durable ; grâce aux plantes GM (PGM) : accroître les récoltes et réduire l'usage des pesticides, insecticides</p> <p><u>A ce jour</u> : technologie imposée malgré des avantages non démontrés. Selon une étude récente, l'agriculture biologique serait capable de nourrir la planète<sup>42</sup></p>	<p><u>Promesses</u> : Promouvoir le développement durable et la protection de l'environnement par des procédures industrielles plus économes (TV's moins gaspilleuses d'énergie, piles photovoltaïques plus performantes, dépollution, etc.)</p>
<p><u>Installé</u> : Sélection humaine, par exemple avec le diagnostic préimplantatoire (DPI) afin d'éliminer les génomes non conformes dès l'embryon</p>	<p><u>Promesses</u> : amélioration de la performance humaine (forces de muscles, capacités de vue, capacités cérébrales, etc.), surtout intéressant pour le militaire, éventuellement pour le sport de haute compétition</p>
<p><u>De plus en plus</u> : puces à ADN : Fichage des personnes, assurance et orientation professionnelle (selon des dispositions génétiques), développement de médicaments dits « préventifs » par les industries pharmaceutiques</p>	<p><u>Promesses</u> : identification et protection d'enfants, de patients, d'animaux domestiques et en élevage, traçage de produits et de biens; sécurité augmentée (réseaux de nano-capteurs dans les aéroports, zones militaires..)</p>

41 Ouest-France, Manche : Futur réacteur nucléaire – cette foi, c'est parti. 9 mai 2006

42 Étude du World Watch Institute, 2006

Promesses et défis des biotechnologies	Promesses et défis des nanotechnologies
	<u>A ce jour</u> : utilisation croissante des technologies d'identification par fréquence radio (RFID), implantation des puces, passeports électroniques, etc., donc d'outils qui facilitent la surveillance et la transmission de données personnelles
<u>Promis</u> : augmentation de l'espérance de vie  <u>A ce jour</u> : le marché des médicaments ne cesse de croître. Comment départager effets médicaux et effets sociaux sur l'allongement de la vie ?	<u>Promesses</u> : retarder voire éviter le vieillissement
<u>Promis</u> : Lutter contre la faim avec des PGM mieux adaptées à des conditions difficiles ou extrêmes de culture comme on les rencontre par exemple en Afrique  <u>A ce jour</u> : de nombreux petits paysans africains encore plus appauvris. Grâce aux PGM, les PVD affamés pourront nourrir le bétail du Nord...	
Le développement des biotechnologies est lié à la « molécularisation » du vivant, à l'extension des transactions marchandes au vivant et aux connaissances fondamentales, et à l'extension des règles de brevetabilité.	La révolution technologique des NST est considérée comme inéluctable par de nombreux scientifiques qui attendent la mise au point de la première percée technique majeure dans les 10 ou 20 ans à venir.

En d'autres termes, les technologies ne peuvent compenser le manque de politiques sociales et environnementales judicieuses et elles ne résoudront pas les injustices de longue date. La science et les technologies sont incapables, à elles seules, de répondre aux défis auxquels notre planète et nos sociétés sont confrontées. Envisager des politiques publiques scientifiques dans les seuls cadres industriels et commerciaux est inepte. Comme toute autre vague technologique, les nanosciences et nanotechnologies se situent dans des contextes sociaux et politiques concrets. Des questions concrètes se posent qui permettraient d'instaurer un dialogue entre les zéloteurs inconditionnels des NST et les citoyens de plus en plus réticents à avaler les pilules déjà maintes fois prodiguées : Pourrait-on adapter les NT aux besoins des populations de la planète ? Comment assurer que les NT ne se substituent pas à des alternatives technologiques « moins dans le coup techniquement » ? Selon certains scientifiques, les nanotechnologies pourraient apporter une amélioration pour la purification de l'eau, la performance des cellules photovoltaïques, la réduction des coûts énergétiques. Même si cela était vrai, la recherche publique et privée donnera-t-elle la priorité à ces applications ? Les innovations technologiques qui en découleraient seraient-elles abordables pour les pays du Sud ? A quelles conditions ?

### *Nanobiotechnologies et applications médicales*

En manipulant l'ADN, en considérant les cellules comme des usines, les molécules comme des machines et les gènes comme des briques informatiques, en utilisant alors un langage technique et des approches réductionnistes pour décrire les réalités complexes des processus et systèmes biologiques, la biolo-



gie moléculaire et la génétique ont préparé le terrain pour l'arrivée des nanobiotechnologies.<sup>43</sup> Les applications potentielles des nanobiotechnologies pour la biomédecine sont aujourd'hui un des piliers de l'argumentation des promoteurs et même si la part de la dimension « nano » dans ces projets peut beaucoup varier, elle sert au moins pour demander des soutiens financiers. Il s'agit ainsi de créer des nanovésicules pour délivrer des médicaments en des lieux précis dans le corps humain, pour détruire des cellules cancéreuses, lutter contre le SIDA ou détecter des phénomènes pathologiques, de réaliser des dispositifs bioniques pour guérir des paralysies. Nous sommes encore très loin de toutes ces applications, même en laboratoire, mais elles font partie de cette « économie de promesses technologiques » qui sait si bien attirer des fonds et qui nous présente toujours des solutions qui seraient à portée de la main.

Mais il s'agit aussi de synthétiser des molécules d'ADN qui n'existent pas dans la nature et de « ré-écrire le code de la vie » en rajoutant par exemple des nucléotides artificiels aux quatre nucléotides qui forment les éléments de base pour (quasi) tous les organismes vivants. Les chercheurs qui travaillent à l'interface entre la biologie et l'ingénierie, c'est-à-dire dans ce domaine récent nommé biologie synthétique, essayent donc de construire des systèmes de vie artificielle, aujourd'hui souvent des bactéries ou virus.<sup>44</sup> Ces organismes sont censés produire des médicaments ou de l'énergie mais ils seraient également intéressants pour des utilisations militaires et présentent des dangers inconnus pour la biodiversité. De nombreuses compagnies biotechnologiques se sont mises à leur fabrication et production (au moins une quarantaine d'entreprises privées américaines de synthèse de gènes fabriquent des ADN artificiels, nombre d'entre elles recevant des subventions du gouvernement américain, du militaire ou des investisseurs privés).<sup>45,46</sup> En octobre 2004, le journal scientifique *Nature* alertait que « si les biologistes sont vraiment sur le point de synthétiser de nouvelles formes de vie, l'impact de leur abus ou d'éventuelles catastrophes pourrait être énorme. »

Sur le plan de la propriété intellectuelle, le couplage des nanotechnologies avec les biotechnologies soutient le processus actuel d'extension des mécanismes d'appropriation du biologique et du biomédical par les brevets. On risque voir naître des traitements ou médicaments fortement liés à des projets commerciaux et couverts par des dizaines de brevets qui rendront leur exploitation inimaginablement compliquée et poseront des problèmes considérables de santé publique. On risquera également d'avoir plus de médicaments chers avec des effets thérapeutiques douteux (par exemple pour prévenir les éventuelles conséquences des prédispositions génétiques) et des effets secondaires non connus. Finalement, le risque est que la prévention soit encore réduite à sa dimension génético-moléculaire, excluant une prévention sociale qui inclut notamment les conditions de travail, de vie quotidienne, de facteurs environnementaux, de l'alimentation.<sup>47</sup>

### **4.3. Le meilleur des mondes – technologies convergentes, et atteinte à l'espace privé**

Il est souvent difficile, en discutant des nouvelles technologies, de distinguer ce qui tient d'un effet de « hype » de ce qui relève de la science fiction et de ce qui est à prendre au sérieux. Ce qu'il faut toujours prendre au sérieux, ce sont les discours qui accompagnent l'annonce des développements technologiques même si ceux-ci n'aboutiront pas forcément.

L'expression « technologies convergentes » (« converging technologies ») fut d'abord utilisée aux États-Unis pour nommer un programme interdisciplinaire lancé en 2002. Elle désigne une combinaison synergique entre nanotechnologies, biotechnologies/sciences du vivant, informatique et sciences cognitives/neurosciences : NBIC. Cet effet de convergence - cette « technocratie convergente » selon ETC - peut profondément affecter les économies nationales, le commerce et les conditions de vie.

43 En témoigne aujourd'hui une réorientation, encore tatonnante, de la biologie moléculaire et de la génétique vers des nouveaux paradigmes.

44 avec un approche technique de création « bottom-up » au contraire de l'approche traditionnelle de la génétique qui est de couper et relier des morceaux d'ADN existants

45 On y retrouve des gens comme Craig Venter, bien connu de la course du séquençage du génome humain.

46 En mai 2006, 38 organisations de la société civile (y compris FSC) ont signé une lettre ouverte contre l'approche des biologistes synthétiques pour une auto-régulation et auto-gouvernance du domaine par eux mêmes lors de leur conférence « Synthetic biology 2.0 » du 20 au 22 mai à Berkeley, États-Unis

47 Aigrain, Ph. Weill, C. « Nanotechnologies biomédicales : un éclairage critique. » Transversales, 17 janvier 2006

Derrière ces dynamiques de convergence, la logique dominante est que tout processus et matériel – biologique ou technique – est défini au niveau atomique et donc à l'échelle nano. Les promoteurs des NBIC assument l'idée d'un contrôle (plus ou moins linéaire) des événements au niveau macro par leur manipulation aux échelles micro et nano. On retrouve ici ce que l'on pourrait qualifier de « réductionnisme de bazar » qui voudrait que, tel un petit démiurge, l'être humain serait en capacité de penser le complexe uniquement à partir de la maîtrise des parties. C'est cette idée qui fit croire, en génétique par exemple, qu'à partir d'une connaissance suffisante des gènes, on pourrait maîtriser la synthèse des protéines et, à terme, influencer et modéliser des comportements et des caractères d'organismes vivants complexes. Mais en biologie comme dans la plupart des autres sciences (et c'est ici un des points de similitude épistémologique entre sciences dures et sciences humaines et sociales) la recherche en laboratoire peine à modéliser la réalité. Par exemple, de nombreux modèles macroéconomiques fournissent de splendides mondes virtuels où l'allocation des richesses est optimale. La seule critique forte qu'on peut leur opposer est qu'ils ne parviennent pas à expliquer le réel. Un détail sûrement !<sup>48</sup>

« En dépit des moments de perspicacité et même de génie, l'esprit humain semble souvent tomber loin en dessous de sa capacité entière. Le niveau de la pensée humaine diffère considérablement en ce qui concerne la conscience, l'efficacité, la créativité, et l'exactitude. Nos possibilités physiques et sensorielles sont limitées et susceptibles d'une détérioration rapide due à des accidents ou des maladies et à la dégradation progressive par le vieillissement. Trop souvent nous communiquons mal l'un avec l'autre, et des groupes n'arrivent pas à réaliser leurs objectifs désirés. Nos outils sont difficiles à manipuler plutôt qu'être des prolongements naturels de nos capacités. Dans les décennies à venir, les technologies convergentes promettent d'augmenter de manière significative notre niveau de compréhension, de transformer les capacités sensorielles et physiques humaines, et d'améliorer les interactions entre l'esprit et l'outil, l'individu et l'équipe. »<sup>49</sup> Dans le même document, il est question des interfaces directes et rapides entre cerveau humain et machines pour transformer le travail dans les usines et pour assurer la supériorité militaire, des robots et logiciels opérant sur la base de principes compatibles avec la conscience et la personnalité humaine, de corps plus durable et résistant au processus de vieillissement et du contrôle de la génétique humaine.

Michael Crichton, George Orwell ou Aldous Huxley n'auraient pu décrire mieux ce nouveau monde dans leurs romans, sauf que les auteurs de ces phrases qui se lisent comme la science fiction ne sont pas des romanciers. Le rapport « *Converging Technologies for Improving Human Performances: nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science* », sponsorisé par la National Sciences Foundation (NSF) et le Département du Commerce des Etats-Unis, a été co-rédigé en 2002 par Mihail Roco et William Sims Bainbridge. M. Roco est un des personnages clés de l'Initiative Nationale en Nanotechnologies aux États-Unis. Il préside la commission 'Nanoscale science, engineering and technology' du Conseil National des sciences et technologies (NSET) et est conseiller en nanotechnologie de la NSF. Quant à M. Bainbridge, il est un ancien directeur de la 'Division of Information and Intelligent Systems' et directeur actuel du 'Social Informatics Program' de la NSF.

Pourtant, ce que ces « gigaprophètes »<sup>50</sup> nous disent est presque une reprise de ce qu'avancait Huxley dès les années 1930 : « *Notre monde n'est pas le même que celui d'Othello. (...) Le monde est stable, à présent. Les gens sont heureux ; ils obtiennent ce qu'ils veulent, et ils ne veulent jamais ce qu'ils ne peuvent obtenir. Ils sont à l'aise ; ils sont en sécurité ; ils ne sont jamais malades ; ils n'ont pas peur de la mort ; ils sont dans une sereine ignorance de la passion et de la vieillesse ; ils ne sont encombrés de nuls pères ni mères ; ils n'ont pas d'épouses, pas d'enfants, pas d'amants, au sujet desquels ils pourraient éprouver des émotions violentes ; ils sont conditionnés de telle sorte que, pratiquement, ils ne peuvent s'empêcher de se conduire comme ils le doivent.* » (Huxley, *Le meilleur des mondes*)

Aussi en réponse au rapport américain, en Europe, la Commission Européenne a constitué en décembre 2003 un groupe d'experts « *Foresighting the new technology wave* ». Celui-ci devait inscrire ses réflexions dans le cadre de l'agenda de Lisbonne (qu'il n'avait pas à questionner et ce qu'il n'a pas fait même si le groupe semble l'avoir traité avec une certaine distance) et établir des recommandations en termes de

48 Concernant la génétique voir notamment: E. Fox Keller *Le siècle du gène*. Edition Gallimard, 2003 et E. Jablonka & M.J. Lamb « *Evolution in four dimensions: Genetic, epigenetic, behavioral, and symbolic variation in the history of life.* » Bradford Books, 2005

49 Roco and W.S. Bainbridge, « *Converging Technologies for Improving Human Performances: nanotechnology, biotechnology, information technology and cognitive science.* » Arlington, VA: National Science Foundation, juin 2002 (version électronique : [http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/report/NBIC\\_report.pdf](http://www.wtec.org/ConvergingTechnologies/report/NBIC_report.pdf)).

50 Chateauraynau, F. *Nanosciences et technoprophéties – le nanomonde dans la matrice des futurs*. Version du 30 avril 2005, [prospero.dyndns.org:9673/prospero/acces\\_public/06\\_association\\_doxa/nano\\_pdf](http://prospero.dyndns.org:9673/prospero/acces_public/06_association_doxa/nano_pdf)