



# Etat des lieux du secteur des nanotechnologies

Nanotechnologies et pays en développement - Une étude pour l'Agence française de développement

---

Rapport n°1

*Dorothee Benoit Browayes et Mathilde Colin Detcheverry (VIVAGORA)*

*Avec la collaboration de Marie-Christine Le Bret (GRETE)*

Dans le cadre de l'étude sur les risques et opportunités des nanotechnologies pour les pays en développement confiée par l'Agence française de développement aux associations Gret et Vivagora, cinq rapports ont été élaborés :

- **Rapport n°1 : Etat des lieux du secteur des nanotechnologies**
- Rapport n°2 : Nanotechnologies et enjeux dans les secteurs de l'eau et de l'énergie des pays en développement
- Rapport n°3 : Risques et opportunités trans-sectoriels des nanotechnologies pour les pays en développement
- Rapport n°4 : Veille technologique : une brève revue de pratiques des agences d'aide
- Rapport n°5 : Nanotechnologies et pays en développement : Recommandations à l'AFD



Campus du Jardin tropical

45 bis avenue de la Belle Gabrielle  
94736 Nogent-sur-Marne Cedex, France

Tél. : 33 (0)1 70 91 92 00

Fax : 33 (0)1 70 91 92 01

[gret@gret.org](mailto:gret@gret.org) - <http://www.gret.org>

*Les opinions exprimées dans ce rapport sont celles des auteurs et ne reflètent pas nécessairement celles de l'Agence française de développement.*

**Remerciements :** Les auteurs remercient Serge Allou et Yves Le Bars du Gret et Frédéric Bontems et Françoise Tisseyre du département du Pilotage stratégique et de la prospective de l'AFD, pour leur appui et leurs commentaires dans la relecture des rapports.



# Sommaire

I.	SYNTHESE.....	1
II.	LES TECHNOLOGIES NANO-BIO-INFO-COGNO (NBIC) EN EMERGENCE .....	5
	1. Propriétés émergentes .....	6
	2. Nanomatériaux .....	7
	3. Nanosystèmes : robotique et électronique.....	8
	4. Biosystèmes : du bio-mimétisme à la biologie synthétique .....	9
	5. La notion de convergence .....	10
III.	LES ENJEUX .....	12
	1. Les enjeux économiques .....	12
	2. Les enjeux sanitaires et environnementaux.....	13
	2.1 Nouveaux comportements : diffusion, réactivité et bio-persistance.....	14
	2.2 Les nanotubes de carbone et le risque « amiante ».....	15
	2.3 Les produits incorporés.....	15
	2.4 Les effets de la banalisation du nanoargent .....	16
	2.5 Peu de moyens investis pour connaître les risques .....	16
	3. Les enjeux éthiques et sociétaux .....	17
	3.1 Assumer les nanomatériaux produits.....	17
	3.2 Le nanomonde et son électronique ubiquitaire sont-ils souhaitables ?.....	19
	3.3 Quelles sont les finalités des nanotechnologies ? .....	19
	3.4 Qui aura accès aux bénéfices ou sera exposé aux risques des nanotechnologies ?.....	21
IV.	LES ACTEURS MOBILISES, LES INSTRUMENTS, LES REGLEMENTATIONS .....	22
	1. Les principaux acteurs.....	22
	1.1 Les pouvoirs publics locaux, nationaux.....	22
	1.2 Les acteurs économiques privés .....	23
	1.3 Les acteurs scientifiques et académiques.....	23
	1.4 Les organisations et initiatives internationales .....	25
	1.5 Les initiatives privés et les organisations de la société civile.....	26
	1.6 Les citoyens consommateurs .....	29
	1.7 Les employés du secteur privé et de la recherche.....	30
	2. Les instruments .....	30
	2.1 Processus participatifs .....	30
	2.2 Pétitions .....	31

3.	Les réglementations .....	31
3.1	Traçabilité, déclaration et étiquetage .....	32
3.2	Législations .....	33
4.	De nouvelles formes de gouvernance pour une innovation responsable .....	33
4.1	Une gouvernance internationale très annoncée .....	33
4.2	Démarches volontaires et régulation.....	33
4.3	Phase d'expérimentations .....	34
V.	SECTEURS EN MUTATION.....	36
1.	L'énergie .....	36
1.1	Economies d'énergie .....	36
1.2	Energies renouvelables .....	36
1.3	Stockage.....	37
2.	L'environnement .....	37
2.1	Réduction de la consommation des ressources et des émissions polluantes ...	37
2.2	Epuration de l'eau.....	37
2.3	Dépollution .....	38
2.4	Déchets et cycle de vie des nanomatériaux .....	38
3.	Matériaux .....	39
3.1	Secteur automobile .....	39
3.2	Secteur textile .....	39
3.3	Imprimerie .....	39
3.4	Construction.....	39
4.	Santé.....	40
4.1	Thérapeutiques.....	40
4.2	Diagnostics .....	41
5.	Alimentation et agriculture .....	41
5.1	Aliments.....	41
5.2	Emballages.....	42
5.3	Agriculture .....	42
5.4	Elevage .....	42
6.	Communications (capteurs, étiquettes, traçabilité) .....	43
7.	Défense.....	44
	CONCLUSION .....	46
	ANNEXE 1 – FICHE DETAILLEE DES NANOMATERIAUX LES PLUS COMMUNEMENT REPANDUS.....	47
	GLOSSAIRE .....	50

## I. SYNTHÈSE

Un **nanomètre** équivaut à un milliardième de mètre,  $10^{-9}$  mètre. C'est la dimension d'une molécule d'eau, ou du rayon de la double hélice d'ADN. Les poussières naturelles d'érosion ou issues des volcans sont composées de particules de taille nanométrique. D'autres proviennent des fumées industrielles ou des véhicules et flottent dans l'air par milliers : en ville, un centimètre cube d'air contient environ 10 000 **nanoparticules**.

Les **nanotechnologies** sont nées avec la possibilité d'intervenir à cette échelle. Recomposer la matière en la manipulant atome par atome, brique élémentaire de la matière, telle est l'ambition des programmes lancés à la fin des années 90. Deux démarches composent aujourd'hui le champ des nanotechnologies, l'une ascendante dite *bottom up* qui consiste à faire du « lego moléculaire » pour aboutir à des systèmes innovants, l'autre descendante dite *top down*, qui miniaturise sur le modèle de l'électronique qui grave des circuits de plus en plus finement (de l'ordre de 20 nm aujourd'hui). Les puristes excluent la seconde considérant l'approche *bottom up* comme la seule innovante.

*Mais pourquoi travailler la matière à l'échelle nanométrique ?*

Les nanoobjets offrent des propriétés inédites liées à l'agencement des atomes, résistance accrue, conduction amplifiée, réflexion de la lumière, changement de couleur, propriété catalytique ou antibactérienne, etc. Emblématiques de ces innovations, les nanotubes de carbone sont six fois plus résistants et cent fois plus légers que l'acier et offrent une conductibilité thermique équivalente à celle du diamant. En ajoutant des nanoparticules dans des matériaux usuels, on va pouvoir ainsi leur greffer des propriétés nouvelles.

Les nanotechnologies ouvrent la voie à des combinaisons inédites : fonctionnalisation de la matière, programmation d'objets, hybridation avec les organismes vivants. Le monde biologique est un modèle pour les nanotechnologies qui imitent les propriétés anti humidité de la fleur de lotus ou antidérapante du gecko. Les capacités d'auto-organisation ou de réplication du vivant sont aussi l'horizon des **nanosystèmes**.

**A l'échelle nanométrique, les supports** d'information convergent : au codage binaire de l'électronique, on peut faire correspondre le codage génétique de l'ADN. La création de systèmes à la fois vivants et électroniques disposant de nouvelles fonctions peut ainsi être envisagée (les interfaces cerveau-ordinateur par exemple).

Les nanotechnologies ouvrent ainsi la voie à une révolution industrielle. On les qualifie de

« pervasives » car elles déferlent dans tous les domaines depuis l'automobile, le bâtiment, les textiles jusqu'aux secteurs cosmétique, agroalimentaire ou médical.

On estime que d'ici 2015 les nanotechnologies concerneront plus de 10% de la totalité des emplois des industries manufacturières et que le marché mondial devrait représenter entre 750

### Les 5 vagues distinguées dans l'émergence des nanoobjets

1. La miniaturisation de l'électronique, déjà bien avancée : elle laissera la place à la nanoélectronique où chacun des composants sera moléculaire.
2. L'invention de matériaux aux propriétés « exaltées » : matériaux renforcés, aérosols ou revêtements protecteurs, colloïdes aux effets de texture, etc.
3. La création de produits réactifs changeant d'état au fur et à mesure de leur utilisation et selon leur environnement : emballages actifs, textiles chauffants ou rafraîchissants, verres variables, matière programmable, etc.
4. Les assemblages de nanosystèmes ou **nanorobots** : mécaniques, hydrauliques, optiques, etc.
5. Les nanosystèmes ayant des compétences nouvelles d'**auto-assemblage** et de **réplication**

et 2 000 milliards d'euros (l'équivalent des revenus annuels consolidés des pays producteurs de pétrole aujourd'hui).

### *L'engouement politique et économique*

Les politiques ont rapidement identifié le potentiel économique des nanotechnologies : à la fin des années 90, les responsables de politiques scientifiques ont considéré le terme nano comme un sésame pour fédérer toutes les disciplines, depuis la chimie, la biologie jusqu'à l'informatique et les neurosciences. Ces décideurs ont forgé la notion de **convergence des nanotechnologies nano-bio-info-cogno** (d'où l'acronyme **NBIC**), qui est donc davantage une vision politique qu'une réalité scientifique - en y adossant programmes et initiatives nanotechnologiques publics.

Les premiers grands programmes d'appui aux initiatives nanotechnologiques (aux Etats-Unis, avec la *National Nanotechnology Initiative -NNI-* et en Europe avec le rapport *Converging Technologies for the European Knowledge Society -CTEKS-*) vont se structurer selon des caractéristiques culturelles : le courant nord-américain pose l'objectif de « l'amélioration des performances de l'individu » tandis que l'Europe se focalise sur des finalités sociales en développant le cap de la « société de la connaissance ». Et entre 1998 et 2003, les investissements publics dans les nanosciences et nanotechnologies vont être multipliés par six en Europe, par huit aux États-Unis et au Japon. Après les Etats-Unis, tous les pays développés et émergents sont entrés successivement dans la course, le Japon et la Corée de manière précoce en 2001, l'Europe en 2002, suivie de la Chine et de Taïwan.

Aujourd'hui, l'Union européenne y consacre environ 3,5 milliards d'euros pour la période 2007-2013. La *NNI* prévoit 1,6 milliard de dollars pour 2010 (depuis sa création en 2001, l'investissement de la *NNI* sur les nanotechnologies s'élève à 12 milliards de dollars).

Premiers mobilisés, les pouvoirs publics encouragent les hybridations public-privé avec de grands groupes industriels trouvant dans les nanotechnologies un foisonnement d'innovations possibles.

### *Une prise en compte limitée des risques ...*

Si l'intervention sur l'architecture des matériaux fait apparaître des propriétés nouvelles, elle induit aussi des risques inédits sur le plan sanitaire, environnemental. En effet, les nanoparticules manufacturées génèrent des risques, du fait de leur petite taille (elles franchissent les barrières biologiques), leur très grande surface d'interaction et leur forme. Elles peuvent aussi s'accumuler dans les tissus vivants (bioaccumulation).

Ainsi certains nanotubes de carbone (longs et rigides) peuvent induire des effets de type amiante quand ils sont inhalés. Présent dans la moitié des nanoproduits sur le marché, le **nanoargent** aux propriétés antibactériennes est utilisé par les hôpitaux pour les pansements, cathéters, valves, ciments osseux, sutures, et dans la production de savons, de peintures, de textiles, tapis, meubles, jouets et même claviers d'ordinateur et réfrigérateurs. Au-delà du problème de bioaccumulation posé, on observe des résistances bactériennes et des destructions de flore et faune microbiennes de milieux naturels par l'usage du nanoargent posant plus largement un problème de santé publique. L'environnement est aussi la cible des risques nanotechnologiques ; ainsi la faune aquatique serait également fragilisée par la présence des **nanopar-**

**ticules d'oxydes de titane** présent dans des ciments et peintures pour ses propriétés antisalissure et antipollution.

Les alertes sur ces risques sont récentes et les autorités publiques et scientifiques ont tardé à se pencher sur cette question. Peu de moyens financiers ont été alloués à leurs caractérisations (2 à 3% des budgets seulement). En réaction à cet attentisme, de nombreux acteurs publics et privés ont appelé à l'application du **principe de précaution** ou à la mise en place de mesures de contrôle des risques. En France, le comité d'éthique du CNRS invite en octobre 2006 les chercheurs à travers un rapport sur les enjeux éthiques des nanosciences et des nanotechnologies à développer des pratiques responsables. Le Haut Conseil à la Santé publique émet un avis en janvier 2008 exigeant d'appliquer le principe de précaution dans l'usage des nanotubes de carbone. Au niveau européen, en 2006, le Comité scientifique sur les risques émergents et nouvellement identifiés de la direction européenne de la Santé et des Consommateurs appelle aux changements de méthode d'évaluation face aux risques spécifiques des nanosubstances.

La grande faiblesse réside dans l'absence de traçabilité des ces nanomatériaux qui sont mis sur le marché sans aucune mention de leurs caractéristiques nanométriques. De ce fait les pouvoirs publics n'ont pas de visibilité ni de prise sur ces objets. En France, l'article 42 de la loi Grenelle 1, a promulgué l'obligation pour les industriels de déclarer les « substances à l'état nanoparticulaire » qu'ils mettent sur le marché, leurs quantités et leurs usages (l'article 73 du projet de loi Grenelle 2 précise son application). Mais se posent d'énormes problèmes de terminologie, de cohérence, et donc de mise en œuvre.

Nous sommes confrontés à un gigantesque défi : des risques potentiels existent, mais nous ne disposons pas des moyens pour les cerner. Le problème majeur réside dans la nouveauté des questions posées par les nanoparticules. Les toxicologues ne savent pas quels paramètres pertinents ils doivent considérer (charge, état de surface...). De plus on extrait difficilement les nanoparticules manufacturées du « bruit de fond » de toute la pollution de l'air. Restent aussi à définir les modes de protection des travailleurs, exposés aux nanoparticules pendant le processus de fabrication...

Du côté de la société civile, une coalition de 43 associations de défense de la santé, de l'environnement, des consommateurs et des citoyens, s'est mobilisée en 2007 sous la coordination de l'*International Center for Technology Assessment*, puissante association américaine. Celle-ci a cosigné une déclaration exigeant la mise en place de huit principes de surveillance des nanotechnologies et nanomatériaux. Ce réseau pétitionne aussi pour que l'usage du nanoargent soit régulé comme celui d'un biocide. L'*International Council On Nanotechnology*, organisation mise en œuvre sous l'impulsion de l'université Nord-Américaine *Rice*, tente aussi de générer des pratiques de sécurité en valorisant les démarches de précaution. L'*Action group on Erosion, Technology and Concentration*, organisation canadienne pionnière dans le domaine des risques liés aux nanoparticules estime dès 2003 qu'il faut concevoir un système d'alerte précoce capable de contrôler les nouvelles technologies d'importance et mettre en place une convention internationale pour l'évaluation des nouvelles technologies rattachée aux Nations unies (initiative *ICENT*).

*... et des questionnements éthiques et sociétaux vis-à-vis des nanosystèmes*

La réduction d'échelle qui banalise les dispositifs invisibles engendre aussi des questionnements éthiques et sociétaux, dont les actions législatives et réglementaires ne tiennent pas

compte actuellement. Le contrôle de la production nanotechnologique et l'information du public sont des chapitres peu développés qui ne permettent pas aux producteurs et aux consommateurs d'assumer pleinement la responsabilité de la production et l'usage des nanomatériaux fabriqués.

Par ailleurs et plus fondamentalement le contrôle des nanosystèmes pose question, alors même qu'ils sont invisibles et que l'ambition explicite des chercheurs est de faire émerger dans la matière des capacités d'auto-assemblage et de réplication, propriétés jusqu'ici propre au vivant. Il s'agit donc de s'interroger sur nos responsabilités vis-à-vis d'artéfacts conçus justement comme incontrôlables (cf. la 5<sup>ème</sup> vague d'innovation identifiée).

Avec l'essor des nanotechnologies, les questions de la multiplication et du contrôle des données se posent aussi de façon accrue. Les puces électroniques des cartes de transport permettent de retracer les trajets d'une personne ; la gestion de l'identification des stocks, des cheptels et maintenant des animaux domestiques recourt massivement aux techniques RFID (*Radio frequency identification*). Se profile ainsi un monde de la traçabilité totale et son corollaire, une société de la surveillance dans laquelle le principe fondamental de la liberté individuelle serait remis en cause.

Dès les années 2002, les recherches sur les risques, le débat public et l'inclusion des parties prenantes ont été considérées comme indispensables pour permettre le développement des nanotechnologies. En France, d'octobre 2009 à février 2010, la Commission nationale du débat public (CNDP) met en œuvre un débat sur les nanotechnologies qui se heurte à des oppositions fortes questionnant de manière radicale le **nanomonde** imposé par le mouvement technique actuel.

Si un système de régulation se profile à la gouvernance plus internationale et fondé sur des démarches volontaires, l'encadrement actuel ne permet pas d'assurer le principe de précaution.

#### *Un fort potentiel à relativiser*

Si les nanotechnologies peuvent apporter des solutions pour la santé, l'énergie, l'environnement, elles devront aussi être validées sur un plan économique et utilitaire pour les pays en développement. Elles n'auront d'utilité que si elles répondent et s'ajustent aux défis locaux et spécifiques des populations.

**En moins d'un demi siècle, ce qui n'était qu'un concept de visionnaire est devenu réalité, certes invisible mais aux potentiels d'impact économique, environnemental, sociétal et éthique majeurs pour notre monde.** Reste à rendre ces potentiels nanotechnologiques profitables pour notre monde c'est-à-dire à les adapter aux exigences durables et humaines pour qu'ils ne génèrent pas plus de menaces qu'ils n'apportent de bénéfices.

## **II. LES TECHNOLOGIES NANO-BIO-INFO-COGNO (NBIC) EN EMERGENCE**

---

On assiste depuis une vingtaine d'années à la multiplication d'interfaces entre la chimie électronique, la biologie et les sciences de l'information et de la cognition ouvrant la voie à un potentiel d'innovation considérable.

La focalisation sur l'échelle nanométrique, proche de celle des atomes (un nanomètre = un milliardième de mètre, soit la taille d'une molécule d'eau) et les briques élémentaires de la matière incarnent « la descente de la technique vers la dimension de l'atome qui renouvelle entièrement sa relation au vivant »<sup>1</sup>.

Avec les nanotechnologies, qui permettent la manipulation et la fabrication d'architectures à l'échelle du nanomètre, la matière est devenue réagençable et « fonctionnalisable » (par greffe de modules) de façon ciblée. On peut par exemple ajouter des **nanoparticules** de titane à une crème solaire pour empêcher le passage des ultra-violets ou des nanotubes de carbone pour rendre une pièce de moteur ultra-résistante.

Les nanotechnologies vont donc avoir un impact considérable sur notre mode de vie car elles concernent tous les aspects de notre environnement quotidien, en particulier dans les domaines suivants :

- santé : mise au point de médicaments et de thérapeutiques plus efficaces ;
- environnement, énergie : contrôle de pollution, dépollution, économies d'énergie, techniques nouvelles de capture et de conversion de l'énergie ;
- information et communication : miniaturisation des capteurs et émetteurs, des étiquettes identifiantes, augmentation des capacités des mémoires informatiques ;
- matériaux nouveaux, plus légers, plus résistants, avec des fonctions nouvelles (tissus, revêtements, ciments, peintures, vitrages, etc.).

Il s'agit donc d'une révolution industrielle qui « refait du neuf avec du vieux ». Elle est restée intangible, difficile à cerner car transversale, et en plus invisible : les nanoparticules ne sont pas perceptibles. Le terme même de « nanotechnologies » est source de confusion, puisqu'il est utilisé indistinctement pour faire référence à différentes démarches qui dans les faits renvoient à deux approches différentes :

---

<sup>1</sup> André Lebeau, L'Engrenage de la Technique, Essai sur une menace planétaire, Editions Gallimard, « Bibliothèque des sciences humaines » 2005

---

**L'approche top-down (descendante)**

C'est la miniaturisation poussée à l'extrême, déjà en œuvre depuis de nombreuses années principalement dans l'électronique qui réalise des composants et gravures de l'ordre de 20 nanomètres aujourd'hui.

**L'approche bottom-up (ascendante) ou lego moléculaire**

C'est l'approche plus innovante qui consiste à élaborer des assemblages d'atomes. Les nanotechnologies offrent des outils pour connecter l'inerte au vivant et générer dans la matière des propriétés d'auto-organisation ou de réplication jusqu'ici restées l'apanage des seuls organismes biologiques.

---

Très vite des querelles ont opposé les « **puristes** » défendant la seule démarche ascendante comme nouvelle, et les « **opportunistes** » qui ont vu dans le terme « nano » un sésame pour fédérer toutes les disciplines et attirer des financements.

## 1. Propriétés émergentes

L'intérêt et le décollage en flèche des nanotechnologies s'expliquent par les propriétés nouvelles des **nanomatériaux** rendues possibles par leur petite taille ou leur forme singulière.

Par exemple, à l'échelle nanométrique, des matériaux habituellement inertes à l'échelle normale (macroscopique) deviennent plus résistants, ou plus conducteurs (d'électricité, de chaleur), réfléchissent la lumière, changent de couleur, deviennent explosifs, ou antibactériens, etc. Des **phénomènes quantiques** peuvent aussi émerger.

Les nanotechnologies engendrent un vrai tsunami technologique car tous les secteurs de production sont concernés : bâtiment, automobile, aéronautique, textile, énergie, électronique, médical, agro-alimentaire, etc.<sup>2</sup>

Elles offrent de nouvelles possibilités pour des milliers de matériaux qui existent déjà, mais que l'on peut « doper », rendre adaptatifs ou hybrider.

Au-delà des **nanoproduits** que nous allons décrire ci-dessous, d'autres innovations devraient déferler en cinq vagues successives<sup>3</sup> :

La première est déjà bien avancée : il s'agit de la miniaturisation de l'électronique avec des circuits intégrés (gravures de 20 nanomètres) qui laisseront la place à la nanoélectronique où chacun des composants sera moléculaire.

La seconde vague concerne **l'invention de matériaux aux propriétés « exaltées »** : matériaux renforcés, aérosols ou revêtements protecteurs, colloïdes aux effets de texture, etc.

La troisième génération se profile et consiste en **produits réactifs qui changent d'état au fur et à mesure de leur utilisation et selon leur environnement** (emballages actifs, textiles chauffants ou rafraîchissants, verres variables, matière programmable, etc.)

Avec la quatrième génération, arrivent les assemblages de nanosystèmes ou **nanorobots** (mécaniques, hydrauliques, optiques, etc.).

---

<sup>2</sup> Pour cette raison, le rapport 2008 sur le sujet publié par l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques (OPECST) parle de « technologies pervasives »

<sup>3</sup> Selon l'instigateur de la *Nanoinitiative* américaine, Mihail Roco (« Nanoscale Science and Engineering : Unifying and Transforming Tools », AICHE Journal Vol.50, N0.5 , pp. 895-6) et Jim Saxton, « Nanotechnology : the future is coming sooner than you think », Joint Economic Committee United States Congress, mars 2007

La cinquième génération doit voir émerger des compétences nouvelles d'**auto-construction** et de **réplication des nanosystèmes**.

## 2. Nanomatériaux

La plupart des nanomatériaux aujourd'hui sur le marché offrent des avantages dus à l'adjonction de poudres nanoparticulaires qui leur confèrent de nouvelles propriétés<sup>4</sup>. Leur production remonte pour certains aux années 80.

Une initiative privée américaine, le Projet sur les nanotechnologies émergentes (PEN) a établi un registre des nanoproducts<sup>5</sup> qui recense près d'un millier d'articles dans le domaine de la consommation grand public.

En 2006, le PEN, a estimé que plus de 58 000 tonnes de nanomatériaux seront produites entre 2011 et 2020, et que leur impact écologique pourrait être équivalent à celui posé par 5 millions à 50 milliards de tonnes de matériaux conventionnels

Quatre substances (nanoobjets) sont à la source de 95% des nanomatériaux :

- les nanotubes de carbone,
- les oxydes de titane,
- le nanoargent et
- les nanosilices.

Exemples nanoobjets	Principales propriétés	Exemples d'applications
<b>Nanotubes de carbone (NTC)</b>	- Qualités électriques, optiques, thermiques et mécaniques exceptionnelles ; - six fois plus résistants que l'acier, et cent fois plus légers ; - conductibilité thermique équivalente à celle du diamant (le meilleur conducteur thermique connu).	- Cadres de vélo, raquettes, clubs de golf, balles de tennis ; - peinture électrostatique des pièces de carrosserie et accessoires automobiles ; - peintures d'écrans électromagnétiques pour les téléphones mobiles ou les ordinateurs portables ; - additifs antistatiques pour emballage de matériels électroniques, ou containers en plastiques pour produits chimiques inflammables (par exemple les réservoirs et les lignes essence dans les véhicules automobiles).
	A noter : Il y aurait 50 000 sortes de nanotubes aujourd'hui, chacune possédant des propriétés particulières !	
<b>Nanoparticules d'oxydes de titane</b>	- Transparence ; - agent blanchissant ; - conservateur ; - absorption des ultra-violets ;	- Industrie cosmétique : crèmes solaires, soins anti-âge, rouges à lèvres, vernis à ongles ; - industrie agroalimentaire : glaçages, enrobage de chewing-gums ou bonbons ;

<sup>4</sup> « Nanomatériaux : positionnement des compétences françaises », synthèse de l'étude réalisée par Développement et Conseil pour le compte de la Direction générale des entreprises (DGE) du Ministère de l'Economie, des Finances et de l'Emploi, 2007, 6 p.

<sup>5</sup> Conduit par le Centre international Woodrow Wilson et les *Pew Charitable Trusts* : <http://www.nanotechproject.org/inventories>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- effet antisolaire ;</li> <li>- catalyseur ;</li> <li>- dépollution (destruction chimique des oxydes d'azote issus du trafic automobile).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- moteurs diesel ;</li> <li>- ciments, bétons de revêtement de bâtiments ou pavés de trottoirs.</li> </ul>
<b>Nanoargent</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Puissant antibactérien, bien plus efficace que les formes classiques de l'argent ou que la plupart des autres produits utilisés pour tuer les bactéries.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Textile : chaussettes et autres vêtements « anti-odeurs » ;</li> <li>- produits de soins antibactériens, pansements actifs, contraceptifs féminin ;</li> <li>- électronique et électroménager : revêtements antibactériens sur les souris et claviers d'ordinateurs, planches à découper, réfrigérateurs, climatiseurs, machines à laver, aspirateurs sans sac ;</li> <li>- emballages alimentaires, pour un allongement de la durée de conservation des aliments et une lutte active contre les infections alimentaires ;</li> <li>- films et vernis pour peinture, pour des surfaces plus nettes et plus propres ;</li> <li>- accessoires de la vie quotidienne, pour des objets « naturellement » aseptisés : robinets, bracelets de montre, peluches, etc.</li> </ul>
	<p>A noter : le nanoargent représente actuellement plus de 50% des <u>nanoproduits</u> commercialisés. Comme il est très facile à obtenir et que le marché des antibactériens est en pleine expansion, ses applications connaissent un essor rapide, notamment aux Etats-Unis et en Asie.</p>	
<b>Nanosilices</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amélioration des textures des produits alimentaires (rendus plus onctueux, plus homogènes) ;</li> <li>- rehausser ou programmer leurs goûts ou leurs couleurs à volonté ;</li> <li>- augmentation des effets énergisants.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Effet acidifiant ou antiagglomérant utilisé dans les laits, soupes, crèmes en poudre, burgers ;</li> <li>- caractère épaississant et abrasif exploité pour les pâtes dentifrices.</li> </ul>

*A noter : Rien ne transparaît de ces projets sur les sites internet des entreprises concernées. Les oxydes de silice sont étiquetés sous la mention E551 sans précision sur la structure micro ou nano. On pouvait pourtant dénombrer 35 brevets – dont six issus de structures chinoises - dans ce domaine dès 2004<sup>6</sup>.*

Cf. annexe 1 pour une description plus détaillée de ces quatre nanomatériaux.

### 3. Nanosystèmes : robotique et électronique

Les pionniers des nanotechnologies<sup>7</sup> ont davantage entrevu des machines miniatures que les produits chimiques présentés plus haut. Dans son livre de science-fiction *Engines of creation*

<sup>6</sup> Rapport *Down on the farm*, ETC Group paru en novembre 2004, P 64-67

<sup>7</sup> Comme Richard Feynman ou Eric Drexler, issu du laboratoire de Marvin Minsky (pionnier de la cybernétique)

paru en 1986<sup>8</sup>, Eric Drexler décrit l'avènement d'« usines lilliputiennes, réduites à quelques molécules capables de recycler les déchets, de produire de l'eau pure et de l'énergie ».

Dans cette veine, des modélisations sont réalisées, mais les perspectives concrètes se trouvent davantage dans la manipulation du vivant (notamment les microorganismes pour faire des carburants ou de l'hydrogène) et la biologie synthétique – voir point suivant - que dans les **machines molles** décrites notamment par Richard Jones<sup>9</sup>.

Cependant, les grands centres de recherche (Caltech, Georgia Tech, Carnegie Mellon, Purdue, Oxford, Ecole polytechnique de Lausanne, etc.) travaillent à mettre au point des robots minuscules ou **nanites**, capables d'interagir avec le vivant, ou bien de coopérer comme un essaim d'abeilles<sup>10</sup>.

Diverses démarches (par exemple celle portée par le GeorgiaTech d'Atlanta) visent une fusion entre cerveau et machine s'appuyant sur la fabrique de réseaux de neurones apprenants mis en culture sur des plaques électroniques et qui sont utilisés pour piloter des robots.

La nanodimension est l'horizon de l'électronique depuis plus de quarante ans. Car « toujours plus petit » rime avec « toujours plus vite » et toujours plus de capacités : si les premiers circuits intégrés comportaient une dizaine de transistors en 1962, le microprocesseur Core2 d'Intel en comptait 291 millions en 2006, tandis que l'Itanium prévu par Intel doit en renfermer 1,7 milliard ! Ainsi l'« électronique nomade ou ubiquitaire » triomphe. La miniaturisation permet de réaliser des petits objets, puces, capteurs, mémoires, dotés d'une grande puissance de calcul, autonomes voire communicants.

Alors que l'électronique moléculaire (qui utilisera uniquement des composants faits avec quelques atomes) est encore embryonnaire, les dispositifs invisibles et nomades qui captent des informations, se multiplient et se banalisent<sup>11</sup> (capteurs d'informations, mémoires informatiques, bases de données interconnectées sur internet, etc.).

#### **4. Biosystèmes : du bio-mimétisme à la biologie synthétique**

Les systèmes vivants sont sources d'inspiration à la fois dans leur structure et dans leur organisation.

Côté structure, des matériaux produits par les organismes vivants, le bois, l'os, les coquillages, le fil d'araignée, etc. sont des modèles d'architecture nanométrique que les ingénieurs tentent de synthétiser. Ces derniers exploitent par exemple des propriétés de surface comme celle de la fleur de lotus (anti-humidité) ou du gecko (animal capable d'adhérer sur des surfaces lisses par d'innombrables poils présents sur ses pattes).

---

<sup>8</sup> Kim Eric Drexler, *Engines of Creation, The Coming Era of Nanotechnologies*, New York, Anchor Books, 1986. Traduction française : K. Eric Drexler, *Engins de création. L'avènement des nanotechnologies*, Paris Vuibert, 2005

<sup>9</sup> Richard A.L. Jones, *Soft Machines : nanotechnology and life*, Oxford University Press, 2004

<sup>10</sup> Voir le programme européen « Swarm-bots » qui vise à inventer des artefacts qui s'auto assemblent

<sup>11</sup> Le Groupement d'intérêt Pegasus sur « les objets communicants » a été créé en 2003 par le CNRS, l'INPG, les Universités Joseph-Fourier et Mendès-France.

Côté organisation en système vivant, de nombreuses inventions peuvent guider la créativité. On peut ainsi concevoir des machines évolutives capables de mettre en jeu des messages et leur circulation pour connecter les parties ou échelles et réaliser des feed-back permanents comme à l'intérieur d'un organisme vivant. L'étude de ces systèmes vivants complexes permet de développer des modèles intéressants à la fois le climat, l'environnement, la finance ou le cerveau.

L'ambition de la convergence Nano-Bio-Info-Cogno (ou NBIC) est de travailler à l'interface entre bits, atomes, neurones et gènes<sup>12</sup> – voir point 5 suivant. Or, nous sommes à un moment charnière où les outils informatiques de modélisation et les moyens de fabrication sur mesure de l'ADN, support d'information du vivant, permettent d'envisager une ingénierie d'organismes vivants inédits : on parle de **biologie synthétique**. Au-delà du génie génétique (ou transgénèse qui ajoute des fonctions) et des OGM, on envisage de fabriquer des virus ou bactéries avec des composants totalement synthétisés (copiant l'existant ou inventant de nouveaux arrangements).

Les objectifs concernent quatre secteurs d'application :

- **l'énergie** avec la production de biocarburants (hydrogène, éthanol, hydrocarbures...) pour diminuer la dépendance au pétrole et réduire l'empreinte carbone ;
- **la pharmacie** avec des organismes transformés en usines à médicament (ex levures pour faire de l'**artémisinine**) ;
- **la chimie** en général, avec la synthèse de molécules complexes ou de nouveaux matériaux ;
- la détection de substances (organismes sentinelles), la décontamination ou l'ingénierie climatique.

## 5. La notion de convergence

A l'échelle nanométrique, les supports d'information convergent. Au codage binaire de l'électronique, on peut faire correspondre le codage génétique du vivant contenu dans la double hélice d'ADN d'un diamètre de deux nanomètres.

Ainsi, la convergence invoquée dans le programme américain Nano-bio-info et cognosciences de 2002 mise sur une sorte de loi universelle qui serait capable de rendre compte de tous les phénomènes micro ou macroscopiques. Elle serait une approche interdisciplinaire unifiée susceptible de « construire des systèmes à l'échelle nano qui combinent à la fois les lois nanométriques, les principes biologiques, les technologies de l'information et les approches systémiques », indique Mihail Roco<sup>13</sup>. Pour lui, cette perspective est envisageable car « on peut recourir aux mêmes éléments d'analyse (atomes, molécules...), aux mêmes principes et outils, et aux connexions causales à la fois pour les constituants élémentaires et pour les architectures macroscopiques ».

---

<sup>12</sup> Qui a donné lieu à l'acronyme Bang

<sup>13</sup> M.C. Roco, *National Nanotechnology Initiative : Past, Present, Future, Handbook on NanoScience, Engineering and Technology*, 2nd ed., Taylor and Francis, 2007, page 3.1-3.26

Comme toutes les modes scientifiques, celle-ci se veut hégémonique. « Les nanostructures ont été identifiées comme les fondations des systèmes biologiques, des manufactures moléculaires et des processus de communication », affirme Roco dans le même article. Ce dernier considère l'échelle nano comme le niveau où résident les « causes ultimes » supposées être les « clés » des phénomènes.

Cette convergence procède d'un réductionnisme ancien (celui du « tout est génétique ») qui peut ainsi s'étendre vers une généralisation au « tout est atomique » ou « tout est neuronal ». On est donc en présence d'un parti pris, d'une vision qui privilégie le niveau des constituants plutôt que celui des systèmes ou des interactions avec l'environnement.

Cette priorité simplificatrice permet d'envisager des connexions machine-cerveau, des organes ou mémoires artificiels, des implants sensoriels, etc. Et c'est la miniaturisation de l'électronique couplée à la numérisation des phénomènes qui permet d'entrevoir ces hybridations.

Les nanotechnologies sont adossées à la convergence dans leur définition dès les premiers rapports de la *National Nanotechnology Initiative* (NNI, initiative américaine lancée par Bill Clinton en 2000). La convergence des technologies est présentée par les initiateurs du programme comme la mise en commun des possibilités offertes par les nanotechnologies, les biotechnologies, les sciences de l'information et les sciences cognitives : nano-bio-info-cogno, d'où l'acronyme **NBIC**. La convergence devient l'instrument par lequel les « performances de l'individu » peuvent être « améliorées » (cf. le titre du rapport *Converging technologies for improving human performances*). Du point de vue des concepteurs du programme, les transformations qu'implique la convergence doivent aller de pair avec une action sur le social : il faut adapter le discours aux différentes croyances, aux attentes de différents groupes sociaux, afin d'assurer la meilleure diffusion de la technologie. Il s'agit là d'une vision mécaniste d'un social existant et à activer en fonction d'attentes précises.

La politique européenne relative aux technologies convergentes se démarque de l'horizon américain. Le rapport *CTEKS (Converging technologies for european knowledge society)* publié en 2004 donne à la convergence une finalité sociale : développer la société de la connaissance. En proclamant la nécessité de l'*engineering for the mind* plutôt que l'*engineering of the mind*, la politique scientifique européenne propose une vision des technologies convergentes beaucoup moins axée sur l'individu. C'est une autre définition du progrès social qui est ici proposée.

### III. LES ENJEUX

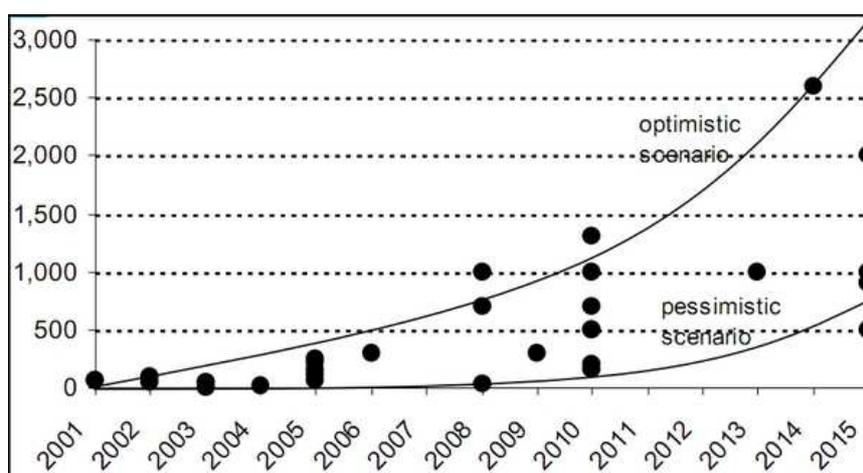
#### 1. Les enjeux économiques

L'engouement pour les nanotechnologies a été largement porté par des programmes politiques non moins ambitieux que la conquête de la Lune dans les années 70, ou le décryptage du génome humain dans les années 90.

Entre 1998 et 2003, les investissements publics dans les nanosciences et nanotechnologies ont été multipliés par six en Europe, par huit aux États-Unis et au Japon. La NNI américaine a alloué un demi-milliard de dollars au secteur avec un slogan : « Façonner le monde, atome par atome ». Tous les pays développés et émergents sont entrés successivement dans la course, le Japon et la Corée de manière précoce en 2001, l'Europe en mars 2002, suivie de la Chine et de Taïwan en septembre 2002.

Selon les prévisions de la Commission européenne, le marché mondial des nanotechnologies devrait représenter entre 750 et 2 000 milliards d'euros d'ici à 2015, et le potentiel de création d'emplois pourrait attendre 10 millions d'emplois liés aux nanotechnologies, soit 10 % de la totalité des emplois des industries manufacturières dans le monde.

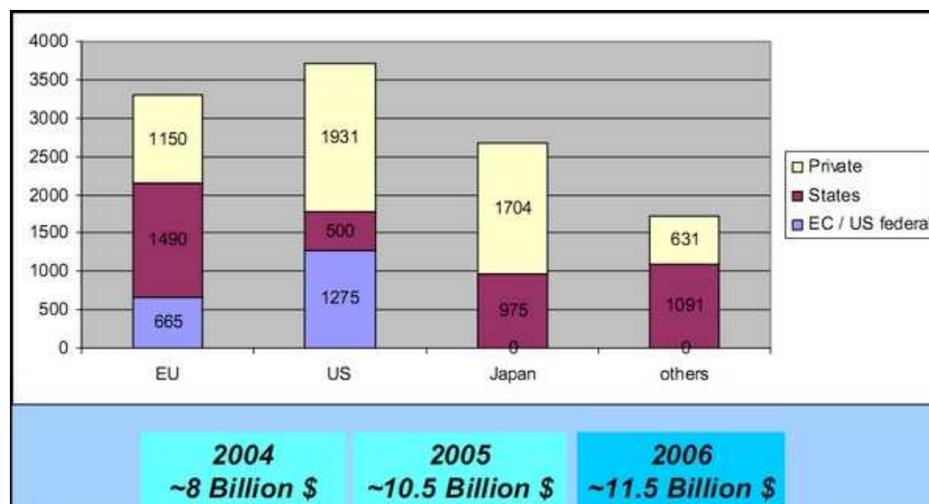
**Marché mondial des nanotechnologies en milliards de dollars US**



Source: Diverse, European Commission, 2006 dans Frima H., 2007, Nanotechnology motor of the European economy, 4th nanotechnology Forum Hessen, Frankfurt, 22 novembre 2007

L'Europe, l'Asie et les États-Unis investissent à peu près autant en matière de R&D pour les nanotechnologies.

## Recherche et développement en nanotechnologies dans le monde – chiffres globaux pour 2006 en millions de dollars (1€ = 1,25\$)



Source: European Commission & Lux research dans Frima H., 2007, Nanotechnology motor of the European economy, 4th nanotechnology Forum Hessen, Frankfurt, 22 novembre 2007

La France se situe en bonne position (6<sup>ème</sup> rang) au niveau de ses publications sur les nanotechnologies. Par contre, sa place est moins bonne en matière de brevets (10<sup>ème</sup> rang).

## 2. Les enjeux sanitaires et environnementaux

La question des risques sanitaires et environnementaux conditionne le développement des nanotechnologies. « Depuis cinq ans, ce qui a vraiment changé, c'est le développement des préoccupations sanitaires et environnementales », reconnaît *Cientifica*, groupe anglais de consultation dans son cinquième rapport sur les nanotechnologies paru en 2008. « Le défi de sécurité et de protection de l'environnement vis-à-vis d'effets irréversibles est considérable ».

Les risques « nano » ont été signalés parmi les 26 risques majeurs à surveiller, dans le rapport du Forum économique mondial de Davos en 2008

Les nanoparticules ne sont pas des entités nouvelles en soi. Il en existe à l'état naturel (poussières d'érosion ou même des volcans), d'autres sont issues des fumées industrielles, des véhicules (combustions, freinage...) qui flottent dans l'air par milliers : en ville, un centimètre cube d'air contient environ 10 000 nanoparticules, 700 000 en cas de pic de pollution. L'excès de risque de décès est de 2,2% pour une augmentation de dix microgrammes par m3 des particules fines, selon l'Institut national de veille sanitaire (INVS)<sup>14</sup>.

C'est un nouveau type de nanoparticules cependant qui voit le jour, d'origine industrielle ou manufacturée, et qui apporte avec lui de nouveaux risques sanitaires et environnementaux, dus

<sup>14</sup> Communiqué de l'INVS du 19 juin 2008, Résultat du programme de surveillance air et santé dans neuf villes de France, au cours de la période 2000-2004

à la petite taille, la très grande surface d'interaction, et la forme des nanoparticules associée à leur nature chimique<sup>15</sup>.

Par exemple, les nanotubes de carbone posent des problèmes sanitaires que ne soulèvent pas le graphite de synthèse, le noir de carbone ou le diamant, qui sont tous constitués de carbone. De même, les particules d'or ont un effet catalytique quand leur taille est de 3,5 nanomètres ; cet effet disparaît à des tailles supérieures comme inférieures. Il n'est donc plus question, avec les nanoproducts, de considérer uniquement la composition chimique, ni de les assimiler à leurs équivalents macrostructurés. Les effets spécifiques, dus à la taille ou la forme, varient d'un type de nanoparticule à l'autre.

## 2.1 Nouveaux comportements : diffusion, réactivité et bio-persistance

Les nanoparticules induisent trois types de comportements nouveaux :

### ■ Elles franchissent les barrières biologiques

Quand les nanoparticules sont libres<sup>16</sup>, elles se diffusent facilement dans le corps humain et franchissent les barrières biologiques, comme la barrière hémato-encéphalique ou la barrière placentaire, qui assurent traditionnellement la protection de parties vitales du corps humain.

- ▷ Si elles sont inhalées<sup>17</sup>, elles peuvent pénétrer les alvéoles pulmonaires (et si elles mesurent moins de deux nanomètres, passer dans le sang). Elles s'accumulent alors dans les reins, les testicules, le thymus et le cerveau. Le passage par le nerf olfactif vers le cerveau montre que la barrière hémato-encéphalique est inopérante vis-à-vis de ces particules.
- ▷ Le passage dans le placenta ou le fœtus chez des rates gestantes a également été mis en évidence pour des toutes petites particules de 1,4 nanomètre.

« Le problème principal des nanoparticules est l'inhalation par les travailleurs et leur diffusion par voie lymphatique ou nerveuse » insiste Benoit Hervé-Bazin, chargé de mission auprès de la direction scientifique de l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS)<sup>18</sup>.

### ■ Elles sont très réactives

Elles ont une surface d'interaction considérablement plus grande que les produits identiques microstructurés. Par exemple, un gramme de nanotitane représente une surface de 60 m<sup>2</sup> alors qu'un gramme de titane en poudre grossière n'offre que quelques cm<sup>2</sup> d'interaction. Le corollaire est la capacité de transport très augmentée avec les nanoparticules (notamment de l'arsenic par exemple). On parle d'un effet « cheval de Troie ». Cette réactivité induit d'ailleurs des risques d'explosion quand on manipule des poudres ultrafines. Les cas du carbone (graphite, noir de carbone, nanotubes de carbone) et du dioxyde de titane sont exem-

---

<sup>15</sup> André Cicoella et Dorothée Benoit Browaeys, *Alertes santé*, Chapitre XIII : nanomonde : et si l'on parlait de sécurité sanitaire ? Fayard, Paris, 2005

<sup>16</sup> Bien sûr, si les nanoparticules sont incluses dans une matrice, elles n'engendrent pas de risques, sauf en cas de ravinement, d'abrasion, ou dégradation en fin de vie du matériau.

<sup>17</sup> Elie Dolgin, *States struggle to deal with nanotech health concerns : fine particles could damage cells*, Milwaukee Journal Sentinel, 24 juin 2008

<sup>18</sup> Benoit Hervé-Bazin coord. *Les nanoparticules*, un enjeu majeur pour la santé au travail, Librairie Eyrolles, EDP Sciences, Ed. 2007

plaires car ce sont des espèces réputées inertes : sous forme micronique, ces composés ne posent aucun problème de santé. Or sous forme nanométrique, ces substances peuvent induire des inflammations, des stress oxydatifs, des processus cancérogènes.

#### ■ Elles peuvent persister dans les tissus

On parle ici de bioaccumulation. Ce sont surtout les particules minérales qui peuvent s'accumuler et créer des réactions inflammatoires : les cellules meurent ou prolifèrent. Ces réactions s'aggravent quand elles s'installent ou s'auto-entretiennent. Dans ce cas, on peut voir émerger des fibroses ou des cancers. La biopersistance est le critère-clé de la toxicité potentielle des nanoparticules.

### 2.2 Les nanotubes de carbone et le risque « amiante »

Alors que des centaines d'industriels dans le monde ont commencé à produire des nanotubes de carbone, des inquiétudes sanitaires se confirment. Les toxicologues<sup>19</sup> craignent en effet, des dégâts pulmonaires de type amiante, notamment avec les tubes les plus allongés et rigides qui ne peuvent pas être évacués vers la lymphe par les macrophages qui font le travail d'« éboueurs » au sein de la cellule. Le Haut Conseil à la Santé publique (HCSP) a émis un avis en janvier 2008 exigeant d'appliquer le principe de précaution. Suite à ces études et aux consignes ministérielles françaises<sup>20</sup>, les laboratoires publics et privés où chercheurs ou ouvriers peuvent être exposés aux nanotubes de carbone ont pris des mesures de protection qui restent disparates.

### 2.3 Les produits incorporés

Le dioxyde de titane ( $\text{TiO}_2$ ) est utilisé comme écran solaire par les industriels de la cosmétique depuis longtemps et présente aussi l'avantage de donner une crème transparente (au lieu des dépôts blancs sur la peau). L'usage de ces nanoparticules dans les crèmes solaires, les rouges à lèvres, vernis, etc. pose le problème de leur pénétration dans le corps humain ainsi que celui de leur diffusion dans l'environnement.

Ce problème se trouve amplifié parce que les cimentiers et fabricants de peinture ajoutent eux aussi de plus en plus du  $\text{TiO}_2$  à leurs produits, soumis au ravinement ou au décapage. Le problème du nano $\text{TiO}_2$  est surtout environnemental car ce dernier semble avoir des effets néfastes sur la faune aquatique. Sa diffusion par inhalation doit être évitée à tout prix, car il a été classé « possible cancérogène » par inhalation en juin 2006, par le Centre international de recherche sur le cancer (CIRC).

Du côté de l'alimentation, les connaissances sur les impacts sanitaires des nanoparticules de silice sont très faibles ou en tout cas non publiques. Certains médecins considèrent qu'il est indispensable d'explorer la diffusion de ces particules dans des organes ou des compartiments

---

<sup>19</sup> Voir notamment les résultats publiés dans la revue *Nature Nanotechnology* par l'équipe de Ken Donaldson à Edimbourg, viennent confirmer de précédents travaux de chercheurs japonais parus dans *The Journal of Toxicological Sciences* en février

<sup>20</sup> Circulaire de la Direction générale du travail (DGT) relative à la protection de la santé en milieu de travail contre les risques liés à l'exposition aux substances chimiques sous la forme de particules de taille nanométrique, 18 février 2008

cellulaires non usuels. De même, le recours à des **nanocapsules** pour acheminer des vitamines, minéraux, phytostérols ou autres composants insolubles pourrait conduire à des déséquilibres.

## 2.4 Les effets de la banalisation du nanoargent

L'argent est utilisé pour ses propriétés antiseptiques depuis des siècles, à faibles doses et avec parcimonie. On connaît en effet quelques-uns de ses effets toxiques : son accumulation, notamment dans les nerfs cutanés, conduit à une maladie, l'argyrie, qui se manifeste par un teint gris impossible à éliminer, ainsi que des effets nerveux avec de possibles convulsions.

Malgré ces risques, une véritable frénésie pour le nanoargent s'est emparée des sociétés occidentales dans un hygiénisme antibactérien débridé. Les hôpitaux ont été les premiers à utiliser cet antiseptique pour les pansements, cathéters, valves, ciments osseux, suture. Puis le nanoargent a fait son apparition dans les savons, les peintures, les textiles, les tapis, les meubles, les jouets et même les claviers d'ordinateur, les réfrigérateurs. Couplé avec le nanotitane, on l'utilise en spray pour rendre les surfaces anti poussières, antipollution, antibactériennes, etc.

Pourquoi s'en inquiéter ? Des alertes de scientifiques notamment en Suède pointent de multiples effets délétères. Elles indiquent que « les résistances vont se multiplier chez les microorganismes et les germes utiles se trouver détruits ». Il s'agit d'un **problème de santé publique** : les traitements individuels hypothèquent l'efficacité contre des germes tueurs menaçant des populations fragiles. « De plus, quand les bactéries réagissent au nanoargent, elles modifient leur paroi et deviennent, de ce fait insensibles à un groupe d'antibiotiques majeurs, les beta-lactames qui constituent 50% des prescriptions antibiotiques », explique Asa Melhus, professeur associé au département de microbiologie clinique de l'Hôpital universitaire d'Uppsala<sup>21</sup>. Cette femme est à l'origine, avec son collègue environnementaliste Lars Hylander de l'initiative lancée début 2006 pour la Surveillance internationale sur l'argent. Il s'agit de militer pour bannir les excès et les mésusages qui risquent de multiplier les résistances bactériennes et de détruire la flore et faune microbiennes des milieux naturels ou des stations d'épuration.

Aux Etats- Unis, de puissantes associations comme ICTA (*International Center for Technology Assessment*) militent pour que le nanoargent soit soumis à la législation des biocides.

## 2.5 Peu de moyens investis pour connaître les risques

Les moyens financiers pour développer des études sur les risques liés aux nanotechnologies restent faibles, comparés à ceux déployés pour le développement des **nanoproduits**.

Aux Etats-Unis, la loi fédérale qui a conduit à la NNI en 2001, oblige à consacrer 5% des budgets de recherche aux impacts sanitaires et environnementaux. D'après le PEN (*Project on emerging technologies du Centre Woodrow Wilson*), ces derniers ont représenté seulement 1% du budget en 2005.

En Europe, c'est aussi à la marge que des programmes sur les risques ont été déployés : NanoSafe (cf. [www.nanosafe.org](http://www.nanosafe.org)), NanoCare ou NanoDerm... Sur 1,4 milliard d'euros alloués

---

<sup>21</sup> *International Silver Watch*, projet de sensibilisation sur ces dérives lancé en mars 2008

par la Commission européenne aux nanotechnologies dans le 6<sup>ème</sup> Programme cadre de recherche et développement (PCRD), seuls 38 millions ont servi aux travaux sur les risques pour l'environnement et pour les opérateurs.

En France, l'Agence nationale de la recherche (ANR) n'a financé qu'un seul projet dans ce domaine en 2006, soit à peine 1% du budget du secteur.

Face aux incertitudes et à l'impossibilité de cerner les risques, les assureurs ne sont pas enclins à proposer des couvertures. Le réassureur *Swiss-Re*, très conscient d'une possible perception négative des consommateurs, a indiqué dès 2004<sup>22</sup> qu'il ne prendrait pas en charge le risque « nano ».

### 3. Les enjeux éthiques et sociétaux

En intervenant à l'échelle des atomes qui constituent la matière, les nanotechnologies ouvrent la voie à des combinaisons inédites : fonctionnalisation de la matière, programmation d'objets, pilotage des comportements des artefacts ou des organismes vivants. On peut distinguer quatre niveaux de préoccupations :

- Comment assumer les nanomatériaux produits ?
- Le **nanomonde** et son électronique ubiquitaire sont-ils souhaitables ?
- Quelles sont les finalités des nanotechnologies ?
- Qui aura accès aux bénéfices des nanotechnologies ? qui sera exposé aux risques ?

#### 3.1 Assumer les nanomatériaux produits

Les questions sont de trois ordres :

##### ■ Sécurité sanitaire et écologique

Pour les populations se pose d'emblée un problème d'information. Les produits qui contiennent des nanoparticules ou qui sont **nanosturés** ne sont pas étiquetés. C'est la mention d'une propriété nouvelle qui permet de déduire (sans certitude) que l'on a affaire à un nanomatériau. L'information sur les risques potentiels ou sur le cycle de vie des nanomatériaux n'est pas évidente non plus. En France, le site NanoSmile ([nanosmile.org](http://nanosmile.org)) a cette vocation mais il manque d'expertises pluralistes. Les rapports de l'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) ainsi que les comptes-rendus du nanoForum du Conseil national des Arts et métiers (Cnam) permettent d'avoir des données mais elles ne sont pas grand public.

Les citoyens se demandent si l'on est en mesure d'éviter la mise sur le marché de nanomatériaux dont on suspecte des effets sanitaires néfastes, selon le principe de précaution. De même, ils voient mal comment contenir une banalisation de certains usages qui pourrait s'avérer néfaste pour l'intérêt général (cf. le cas du nanoargent mentionné plus haut).

---

<sup>22</sup> *Nanotechnology - Small matter, many unknowns*, Swiss-Re, <http://www.swissre.com>

## ■ Utile-Futile

Les bénéfices annoncés sont-ils prioritaires pour la société ? Quelles sont les capacités d'intervention des citoyens pour favoriser les applications jugées utiles ?

## ■ Contrôle

Sommes-nous capables de contrôler les nanoobjets que nous fabriquons ? Alors même qu'ils sont invisibles et que l'ambition explicite des chercheurs est de faire émerger dans la matière des capacités d'auto-assemblage et de réplication, jusqu'ici propre au vivant, comment pourrions-nous assumer nos responsabilités vis-à-vis d'artéfacts conçus comme incontrôlables ? À qui pouvons-nous faire confiance ?

Au début du 21<sup>ème</sup> siècle alors que se prépare la création de Minatoc (cf. encadre dans la partie acteurs) en France, des inquiétudes s'exprimaient dans les interventions publiques du philosophe Jean-Pierre Dupuy. Ce dernier soulignait alors la posture irresponsable des nano ingénieurs qui se mettent en condition de faire émerger des propriétés par définition incontrôlables (processus d'auto-assemblage ou de réplication). Ce dernier dénonçait alors le double-jeu des scientifiques foncièrement ambivalents puisque, d'un côté ils organisent la perte de maîtrise, et de l'autre ils prétendent devenir les maîtres des comportements atomiques (niant l'imprévisibilité liée notamment à la physique quantique).

Sur le plan idéologique, J.-P. Dupuy a pointé la collusion entre les leaders américains, promoteurs des nanotechnologies et les milieux transhumanistes.

Avec les biotechnologies et les nanoparticules qui nous inondent, les frontières s'estompent entre les espaces confinés et milieu commun. Les laboratoires sont confrontés à des objets de plus en plus difficiles à contenir tandis que l'espace social est envahi par des essais « grandeur nature » de systèmes vivants dont on maîtrise peu les disséminations.

### ***Exemple 1 : Un essai grandeur nature***

*En septembre 2008 a été annoncée la création du Centre sur les impacts des nanotechnologies (CEINT) à Duke University (Caroline du Nord) doté de 14,4 millions de dollars. Il est prévu de transformer la forêt de Duke, près de Durham, en trente-deux « mésocosmes » ou écosystèmes expérimentaux.*

Comme les champs expérimentaux pour les OGM ont préparé l'extension des laboratoires à l'espace public, l'ingénierie expérimentale utilise des espaces ouverts dans une justification parfois douteuse. L'envahissement des espaces sociaux par des réalisations relevant massivement de logiques de laboratoire, et d'impératifs économiques et militaires transforme le monde lui-même en un gigantesque laboratoire, pour une expérience à grande échelle engageant le futur de la Terre des hommes et la vie elle-même.

### ***Exemple 2 : La biologie synthétique***

*La banalisation de la synthèse des éléments constitutifs des organismes vivants (génomme des virus de la poliomyélite ou de la grippe espagnole, de bactéries, etc.) se fait sans outils de maîtrise, avec le risque de voir se développer des « bioerreurs », « bioterreurs », et « biohackers » (dont le DIYbiogroup<sup>23</sup>)*

<sup>23</sup> Groupe de chercheurs du MIT et de Harvard constituant une communauté informelle d'amateurs en biologie.

### 3.2 Le nanomonde et son électronique ubiquitaire sont-ils souhaitables ?

Avec l'essor des nanotechnologies, la question de la multiplication et du contrôle des données se pose de façon accrue. Les nanotechnologies fabriquent à l'homme un nouveau milieu (voire un nouveau corps) fait de capteurs électroniques, mémoires diffuses, écrans nomades, mais aussi de matériaux actifs, capteurs d'énergie, implants corporels invisibles, brouillard « intelligent », organismes vivants synthétiques ou génétiquement fabriqués (OGF).

Elles sont en mesure de façonner notre quotidien et nos relations de façon profonde. Ainsi Alan Holland écrit « La question n'est plus ' *comment devons-nous vivre* ' (dans des conditions de vie présumées stables), mais bien plus ' *jusqu'où pouvons-nous modifier nos conditions de vie et celles des autres espèces ?* ' »<sup>24</sup>.

Que voulons-nous développer comme lien social, comme capacité de dialogue face aux masses d'information circulantes, aux objets communicants qui peuvent nous servir comme nous asservir ?

Les puces électroniques sont utilisées dans les cartes de transport (Pass Navigo à Paris par exemple) et permettent de retracer les trajets d'une personne dans les 48h précédentes. La gestion des stocks ou des cheptels (et maintenant aussi des animaux domestiques) recourt massivement aux RFID (*Radio Frequency Identification* ou étiquettes électroniques d'identification par radio-fréquence). Des usages sur l'homme se développent (enfants, personnes âgées, sécurité...). La traçabilité totale se profile (connexion des données bancaires, médicales, géolocalisations, etc.) ainsi qu'une société de la surveillance contre laquelle a mis en garde l'équivalent anglais de notre Commission nationale informatique et liberté (CNIL).

Une technologie qui permet en théorie de suivre, voire de recouper des milliards de micro-événements ouvre des perspectives considérables dans les domaines des services, des loisirs, de la démocratie ; mais elle soulève des questions sur les possibilités de mésusages, de glissements conduisant à la **rupture du respect de la vie privée**, et quant à leur impact sur la vie sociale et leur emploi à l'échelle planétaire.

Dans un document intitulé « Nanotechnologies, communication et liberté », Ion Vezeanu, philosophe à l'Université Pierre Mendès France de Grenoble, résume : « L'homme des nanotechnologies ne se contente plus de faire travailler les machines, il veut les faire communiquer, dialoguer et réfléchir à sa place. Plus que cela, il délègue son pouvoir de contrôle, de surveillance et de décision aux automates (...). Ceux-ci, réduits à des dimensions nanométriques, deviennent invisibles et par là, gagnent une immense puissance puisque leur pouvoir devient occulte, incontrôlable et incontestable. ».

### 3.3 Quelles sont les finalités des nanotechnologies ?

Les nanotechnologies créent de nouvelles possibilités de dérives dans le domaine de la modification du corps, du cerveau, et même plus largement, de l'humain (médecine anti-âge, dopage, homme bionique). Certains projets tracent même la voie vers une vie formatée, planifiée, ayant perdu sa dimension « naturelle ».

---

<sup>24</sup> Alan Holland, Faut-il renoncer à une éthique de l'environnement dans Sous la direction de Henk A.M.J. Ten Have « Ethiques de l'environnement et politique internationale ». Collection Ethiques Editions Unesco, p.154

Les nanotechnologies font en effet sauter les frontières entre artéfact et objet naturel, entre d'un côté les sciences des matériaux, l'électronique, l'informatique et de l'autre, le monde vivant. On parle de machines molles ou vivantes, d'organismes artificiels... La relation à la nature, les représentations de la place de l'homme se trouvent chamboulées.

La frontière entre objets naturels et objets fabriqués est celle qui fonde nos responsabilités. Pour Raphaël Larrère, sociologue à l'Institut national de la recherche agronomique (INRA) il est important de réaliser que nous ne nous comportons pas de la même façon vis-à-vis des êtres naturels et des êtres artificiels : les premiers relèvent d'une éthique du respect, les seconds – qui perdent toute altérité – relèvent de la responsabilité de ceux qui les ont produits.

En outre, les implants intra-cérébraux, les prothèses hybrides, l'**uploading** de l'esprit, la recherche de l'immortalité modèlent une nouvelle condition humaine, qui permettrait un affranchissement de la maladie, de la souffrance ou même de la mort.

Ainsi, une autre manière de soigner peut être d'insérer dans le corps des dispositifs électroniques stimulants.

#### ***L'exemple de Clineatec***

*Comme on utilise des pacemakers pour aider le cœur, on recourt à des brain-stimulateurs pour inhiber des fonctionnements intempestifs du cerveau, notamment chez les personnes atteintes de Parkinson. Depuis 1995, une dizaine de centres spécialisés dans le monde ont implanté des stimulateurs chez 35 000 patients.*

*Des indications nouvelles se développent pour des personnes dystoniques (trouble du tonus musculaire), épileptiques ou atteintes de troubles obsessionnels compulsifs (TOC) sévères. Des usages contre l'obésité ou en prévention pour lutter contre la neuro-dégénération sont à l'étude.*

*La miniaturisation de ces microsystèmes cérébraux implantés, offerte par les nanotechnologies, peut améliorer les résultats. C'est l'ambition du projet français Clineatec, volet « bio » du pôle Minatec de Grenoble où devraient collaborer, sur un même site physiciens, électroniciens, biologistes et cliniciens. Des tests préliminaires sur des singes et des implantations sur les malades seront menés en parallèle.*

*La mise au point d'interfaces cerveau-ordinateur (brain-computer interface, BCI) est aussi au programme : neuro-prothèses et implants pour des suppléances sensorielles (visuelle, auditive) mais aussi motrices pour des handicapés ou paralysés. Des implants intracérébraux de délivrance de médicaments pour pallier un accident vasculaire cérébral (AVC) ou détruire une tumeur sont envisagés.*

Certains voient dans cette entreprise une démarche de recherche déshumanisée, totalement tirée par la logique technique. D'autres s'interrogent : jusqu'où irons-nous dans l'intervention sur le cerveau ? Sommes-nous face aux balbutiements de « dispositifs embarqués », capables demain de réguler nos humeurs, d'effacer nos histoires sombres et de formater des boute-en-train laborieux, dignes du meilleur des nanomondes ?

Ces développements nous renvoient l'écho amplifié de la course à la performance, à la perfection des corps, à l'humain « augmenté », qui risque de rendre les individus totalement dépendants de la technique, fantasme dans lequel se complaît le mouvement **transhumaniste**, dont l'influence s'étend aussi bien à la sphère académique et culturelle qu'au monde de la recherche et de l'industrie, notamment aux Etats-Unis.

C'est bien la définition de l'humain, et celle de l'humanisme, qui sont ici en jeu sans que le grand public ait conscience de ces développements. Pourtant, améliorer l'humain en transcendant la biologie est-il un horizon voulu par tous ?

### **3.4 Qui aura accès aux bénéfiques ou sera exposé aux risques des nanotechnologies ?**

D'autres enjeux sociétaux sont d'importance : il n'est pas sûr que les innovations et applications permises par les nanotechnologies puissent être accessibles à tous. Quelles populations seront affectées par les risques sanitaires et environnementaux qu'elles engendrent ?

Avec le projet de « sortir de la condition humaine », quelle solidarité peut être maintenue entre les hommes ?

## IV. LES ACTEURS MOBILISES, LES INSTRUMENTS, LES REGLEMENTATIONS

---

Les nanotechnologies ne correspondent pas à une rupture scientifique mais plutôt à une construction politique. Certes des visionnaires comme le physicien Richard Feynman ont entrevu les possibilités immenses d'une intervention à l'échelle nanométrique dès 1959. Puis des instruments ont permis l'accès aux atomes et leur manipulation. En 1974, un scientifique japonais, Norio Taniguchi utilise le premier le terme de **nanotechnologie**.

A la fin des années 90, des responsables des politiques scientifiques ont vu dans le terme **nano** un sésame pour fédérer toutes les disciplines. Très vite les prophètes comme Eric Drexler ou Ray Kurzweil ont été contrés par les réalistes comme Richard Smalley ou par les inquiets comme Bill Joy qui, dans son article « L'avenir n'a pas besoin de nous » paru en 2000, a souligné les problèmes de maîtrise et de finalité de ces innovations.

Ainsi, l'histoire des nanotechnologies a commencé avec un engouement des politiques qui ont alloué des financements à des programmes fédérateurs. Premiers mobilisés, les pouvoirs publics ont encouragé les hybridations public-privé avec de grands groupes industriels trouvant dans les nanotechnologies un foisonnement d'innovations possibles. Dès les années 2002, les questions des risques et de l'acceptabilité sociale ont été posées comme déterminantes. Les recherches sur les risques, le débat public et l'inclusion des parties prenantes ont été considérées comme des conditions pour permettre le développement des nanotechnologies. Les acteurs de la société civile ont cependant mis du temps à saisir les enjeux de ces projets techniques, confrontés à une diversité redoutable de questions.

### 1. Les principaux acteurs

Schématiquement, sept groupes d'acteurs peuvent être distingués :

#### 1.1 Les pouvoirs publics locaux, nationaux

En tant qu'instances de régulation ayant pour tâche de fixer des règles et normes permettant le déploiement optimum, et sûr, de nouvelles technologies, les Etats, parlements, offices d'évaluation des choix scientifiques et techniques, organes d'expertises se sont penchés sur le cas des nanotechnologies de façon plus réactive que proactive, après la mobilisation des acteurs scientifiques/industriels (voir les parties « Instruments » et « Réglementations » ci-après).

En revanche, ils se sont montrés bien plus actifs dans le financement des programmes de recherche et développement des nanotechnologies. Rien qu'au niveau européen, via le 7ème Programme cadre de recherche et développement, la Commission y consacre environ 3,5 milliards d'euros pour la période 2007-2013. Outre-Atlantique, la proposition budgétaire de 2010 pour la *NNI*, publiée le 14 Mai 2009, s'élève à 1,64 milliard de dollars. Depuis la création de la *NNI* en 2001, l'investissement total du gouvernement américain sur les nanotechnologies s'élève désormais à 12 milliards de dollars.

En France, le Programme national Nanosciences, lancé par le ministère de la recherche, le CNRS et le CEA est le programme bénéficiant du plus important financement de l'Agence nationale de la recherche (ANR). Le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) a joué un rôle

structurant, mobilisant des fonds publics importants dans le secteur de l'électronique, pour Minatec à Grenoble, Minalogic puis Crolles 2.

En 2009, deux projets phares ont été lancés : NanoInnov (plan national) d'un montant de 70 millions d'euros pour une implantation à Saclay notamment et Nano2012 (programme de coopération, qui fait suite à Crolles 2), dont le budget de 2,3 milliards d'euros est assumé à hauteur de 477 millions par l'Etat et 667 millions par les collectivités locales.

## 1.2 Les acteurs économiques privés

Quasiment tous les secteurs industriels sont concernés par les nanotechnologies (bâtiment, automobile, aéronautique, textile, énergie, électronique, médical, agro-alimentaire, etc.).

L'industrie mobilisée sur les nanotechnologies ne se présente pas comme une nouvelle communauté émergente, incarnée par des start-up. Elle a le visage des grands groupes dont l'activité de recherche et développement est réalisée en partenariat avec les centres de nanotechnologie des grandes universités. Ainsi en France, le chimiste Arkema pilote un programme de recherche baptisé Genesis sur les matériaux nanostructurés d'un montant de 107 millions d'euros. Rhodia, Saint Gobain, Evonik sont les principaux fournisseurs des nanomatériaux en Europe.

Les sociétés de conseil et Cabinet de consultants comme *Lux Research* ou *Cientifica* à Londres ont joué un rôle moteur pour donner une cohérence et une évaluation des potentiels aux entrepreneurs mobilisés sur les nanotechnologies.

## 1.3 Les acteurs scientifiques et académiques

Les recherches fondamentales et appliquées sur les nanotechnologies sont des programmes phares au sein des grandes universités.

Aux Etats-Unis, ils sont pléthore<sup>25</sup>, bénéficiant de financements privés mais également de financements publics très importants ; le réseau de *Nanoscale Science and Engineering Centers* (NSEC) est par exemple financé par la *National Science Foundation* (NSF).

En France, les laboratoires du CEA, du Centre national de recherche scientifique (CNRS) et universitaires sont les principaux acteurs académiques. Comme pour les laboratoires américains, ils bénéficient de financements en provenance du secteur privé, mais aussi public (entre 2005 et 2008, 139 millions d'euros ont été alloués à des projets nano par l'ANR).

Le CNRS a contribué à l'émergence du programme national Nanosciences, qui pousse la construction d'un réseau de Centres de compétences en nanosciences « C'Nano ». Cinq centres ont été lancés en 2004-2005, basés en Ile-de-France, en Rhône-Alpes (Minalogic), dans le Grand-Est, dans le Nord-Ouest, dans le Grand Sud-Ouest. Les 5 C'Nano rassemblent 4100 chercheurs.

---

<sup>25</sup> Cf. [community.acs.org/nanotation/Wiki/tabid/80/topic/Nano+Centers/Default.aspx](http://community.acs.org/nanotation/Wiki/tabid/80/topic/Nano+Centers/Default.aspx)

### **Minatec – Campus d’innovation en micro et nanotechnologies**

Minatec regroupe au sein d’un lieu unique entre 3 et 4000 chercheurs, étudiants et industriels et spécialistes du transfert technologique. Initié par le CEA et l’institut polytechnique de Grenoble en 2000, le projet Minatec prend forme en 2002 avec de multiples partenaires : Etat, collectivités locales, CEA etc... En 2006, les bâtiments sont inaugurés ; doté d’un budget annuel 300 millions d’euros, son objectif est de devenir l’un des cinq premiers centres mondiaux en micro et nanotechnologies.

### **Minalogic - Pôle de compétitivité mondial**

Hébergé dans les bâtiments de Minatec, Minalogic a pour ambition de construire le premier centre européen et l’un des trois plus grands centres au niveau mondial pour les puces miniaturisées intelligentes et de valoriser ces avancées technologiques dans les filières industrielles qui peuvent tirer un avantage compétitif des solutions miniaturisées intelligentes.

A côté de la recherche et développement technique, apanage des départements de science dure, se développe également, mais dans une moindre mesure, un volet de recherches plus axées sur les sciences sociales et l’évaluation des risques éthiques, sanitaires et environnementaux.

Les académies britanniques (*Royal Society* et la *Royal Academy of Engineering*) ont joué un rôle clé pour attirer l’attention sur les risques même incertains générés par les nanomatériaux<sup>26</sup>. Elles ont demandé aux industriels de « restreindre les expositions aux nanotubes, de divulguer leurs tests toxicologiques, et que des recherches approfondies soient menées pour cerner les impacts biologiques ». Présidente du Groupe de travail sur les nanotechnologies de la *Royal Society*, Ann Dowling a établi une feuille de route de vigilance et de prudence<sup>27</sup>.

En France à la même époque, les Académies des sciences et des technologies ont abordé le sujet sur un plan technique sans considérer la convergence nano-bio.

Le comité d’éthique du CNRS a publié un rapport « Enjeux éthiques des nanosciences et des nanotechnologies » en octobre 2006. Ce dernier a invité les chercheurs à développer des pratiques responsables (précaution face aux risques). A Grenoble, l’Observatoire Micronanotechnologies, centre commun CEA-CNRS a été à l’initiative des premières conférences en France dans le domaine. Plus orienté sur les données économiques le *NanoTrendChart Observatory* (cf. <http://www.nanotrendchart.org/>) financé par l’ANR produit des données précieuses pour saisir la vitalité du domaine.

---

<sup>26</sup> *Royal Society and Royal Academy of Engineering. Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties, London: Royal Society; London: Royal Academy of Engineering, 29 juillet 2004. Voir aussi Nanotechnologies : Une analyse préliminaire des risques sur la base de l’atelier organisé à Bruxelles les 1er et 2 mars 2004, Disponible à [europa.eu.int/comm/health/ph\\_risk/events\\_risk\\_en.htm](http://europa.eu.int/comm/health/ph_risk/events_risk_en.htm)*

<sup>27</sup> Conférence du 26 mai 2005 sur *Le développement responsable des nanotechnologies*, à l’ambassade de Grande-Bretagne, à Paris.

## 1.4 Les organisations et initiatives internationales

### *Au niveau mondial*

#### ■ L'Organisation des Nations Unies

Il existe un intérêt dans les institutions spécialisées de l'ONU, mais cette dernière n'a pas encore reconnu officiellement la nécessité d'un agenda harmonisé entre les différentes agences.

#### ■ L'ISO

En 2005, l'ISO crée un nouveau comité technique Nanotechnologies pour élaborer des normes internationales relatives aux nanotechnologies. Depuis, deux normes ISO ont été publiées, l'une portant sur les pratiques de sécurité dans les arrangements professionnels relatifs aux nanotechnologies, l'autre sur la terminologie et définitions relatives aux nano-objets.

### *Au niveau régional*

#### ■ Le processus d'Alexandria

Pour structurer une gouvernance mondiale responsable, s'est mis en place dès 2004, le Processus d'Alexandria, plate-forme internationale de dialogue sur les options en matière de nanotechnologies<sup>28</sup>. C'est la NSF qui a pris cette initiative avec une première rencontre à Alexandria (en Virginie, EU) puis à Tokyo en juin 2006. Une tension avec la délégation américaine en 2005 à propos d'un code de conduite, a mis en route une autre dynamique au sein de l'OCDE.

#### ■ L'OCDE

L'organisation consacre à l'heure actuelle deux groupes de travail aux nanotechnologies, l'un sur la sécurité des nanomatériaux manufacturés, l'autre sur le développement responsable et maîtrisé des nanotechnologies. Ces initiatives conduisent d'une part à mettre en commun les résultats relatifs aux études des risques, et d'autre part à initier une réflexion sur des méthodes d'« engagement du public ». Il s'agit dans les deux cas de mécanismes voués à fournir de l'information aux Etats membres – à leur charge ensuite de mettre en place les régulations et/ou dispositifs jugés opportuns ([www.oecd.org/sti/nano](http://www.oecd.org/sti/nano)).

#### ■ Le Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (SCENIHR)

En appui à la direction européenne de la Santé et du Consommateur, le SCENIHR documente les risques liés à l'émergence des nouvelles technologies. En 2009, le SCENIHR a publié une évaluation des risques des nanomatériaux

#### ■ International Council On Nanotechnology (ICON)

ICON est une organisation qui s'est mise en place sous l'impulsion du *Center for Biological and Environmental Nanotechnology* (CBEN) de *Rice University* (Houston, Texas). L'organisation, de portée internationale, est majoritairement constituée d'acteurs américains

---

<sup>28</sup> Le *Meridian Institute* qui a hébergé la première rencontre publie régulièrement une lettre de veille sur l'impact pour les pays du sud (*Meridian Nanotechnology and Development News*, [www.meridian-nano.org](http://www.meridian-nano.org)) et a organisé une conférence « Nano & the Poor » en 2005.

avec un nombre important d'industriels. Le monde académique, les agences gouvernementales et des ONG y sont aussi représentés. Les activités d'ICON (cf. [www.icon.rice.edu](http://www.icon.rice.edu)) peuvent se décliner selon quatre axes principaux :

1. l'organisation de forums et conférences sur les questions sanitaires et environnementales,
2. la mise en ligne d'une base de données répertoriant les publications scientifiques sur les risques en nanotechnologies,
3. l'information des décideurs, et
4. la vulgarisation de données scientifiques complexes à destination du grand public et des acteurs des nanotechnologies.

■ **Le Conseil international pour la gouvernance des risques (*International Risk Governance Council, IRGC*),**

Le Conseil international pour la gouvernance des risques (IRGC) est une fondation de droit suisse, basée à Genève. Gouvernée par un conseil d'administration composé de membres de l'industrie et de représentants de services publics nationaux, cet organisme se veut cependant indépendant

## **1.5 Les initiatives privés et les organisations de la société civile**

### *Initiatives privées*

Le PEN, *Project on Emerging Nanotechnologies*, a été lancé aux Etats-Unis en avril 2005 par le *Woodrow Wilson International Center for Scholars* (organisation à but non lucratif) en partenariat avec le *Pew Charitable Trusts* (organisme privé philanthropique). Le PEN collabore avec les chercheurs, le gouvernement et les industriels afin d'identifier les décalages entre les connaissances et la réglementation, et de développer des stratégies pour les combler. Le but du PEN est de faciliter le débat, de créer un véritable dialogue entre le public et les politiques sur le développement des nanotechnologies et de sensibiliser le public aux risques et bénéfices potentiels. Parmi les actions entreprises par le PEN, un inventaire des recherches en nanotechnologies, sous la forme d'une base de données consultable en ligne, donne accès à la description des projets de recherche, leur durée et la date de leur mise en œuvre, les noms des investisseurs ainsi que les montants et sources des financements. Une autre initiative du PEN est l'inventaire des produits commerciaux incorporant des nanomatériaux ou mettant en jeu les nanotechnologies pour leur élaboration. Toutes les données sont consultables en ligne : <http://www.nanotechproject.org/>

### *OSC*

Peu d'informations circulent sur les nanotechnologies avant 2005, et les articles sur le sujet dans les médias sont rares. Les associations tardent à se positionner dans le domaine des nanotechnologies car le ticket d'entrée pour acquérir une expertise est élevé. De plus, les militants sont déconcertés par un domaine aussi multiforme et transversal qui touche aussi bien l'environnement, la santé, l'agriculture, l'alimentation, les libertés individuelles, etc.

En fait, les nanotechnologies récapitulent une série de « critiques de la technique » et « recyclent » des risques déjà établis : avec la nanoélectronique, se posent les risques d'abus dans la surveillance des personnes et des corps (atteinte à la liberté par des capteurs et systèmes de

localisation) ; avec les nano biotechnologies, c'est la fabrication d'organismes synthétiques qui inquiète ainsi que l'instrumentalisation des corps et la manipulation des cerveaux (implants pour maîtriser l'humeur, les souvenirs). L'invisibilité et l'intrusion des dispositifs font peur. Ainsi, la technologie est interrogée en tant que telle comme processus transformateur des modes de vie et de la vie même.

Cette critique transversale qui pose la question des finalités (déjà soulevée dans les années 70 face à l'informatisation et qui a conduit à la création de la CNIL) est très active en France chez les militants de la décroissance (Groupe Oblomov) qui se sont manifestés lors du cycle Nanomonde en 2006 à Paris<sup>29</sup>, de Pièces et Main d'œuvre (PMO) à Grenoble ou de Bleue comme une Orange à Toulouse. Les questions qu'ils posent sont radicales : et si les nanotechnologies concouraient à une perte de maîtrise d'objets répliquants ou capables d'auto-assemblage, à la baisse d'autonomie des individus, à la surveillance généralisée, à la concentration des pouvoirs, à une fuite en avant insensée, ou même à une aliénation croissante par la technique<sup>30</sup>? En France, les nanotechnologies ont suscité des contestations locales radicales dans la région grenobloise (cf. le groupe Pièces et Main d'œuvre) qui considèrent les débats uniquement comme des processus d'acceptabilité.

En France, toujours, actifs sur le champ agroalimentaire, les Amis de la Terre Europe et Australie ont publié en mars 2008 leur rapport « Du Labo à nos assiettes : les nanotechnologies dans l'alimentation et l'agriculture »<sup>31</sup>. Ils y répertorient 106 produits intégrant des nanoparticules - donc « potentiellement dangereux » - comme des compléments nutritifs, des boissons (exhausteurs de goûts), des emballages, des ustensiles de cuisine antibactériens, mais aussi plus largement dans l'agriculture. Ils dénoncent l'absence d'étiquetage, peu d'investigation médiatique, des garanties sanitaires loin d'être satisfaisantes, des réglementations nationales et européennes inadaptées et des agriculteurs de plus en plus dépendants des firmes de biotechnologie. Les Amis de la Terre interpellent essentiellement sur l'utilité et la sûreté de ces innovations.

VivAgora, fondée en 2003, s'est engagée dans la mise en débat public des nanotechnologies dès 2005. Convaincue que les nanotechnologies sont de nature à transformer en profondeur les liens sociaux et les conditions de vie, elle estime urgent de faciliter l'appropriation par les citoyens de leurs enjeux. Il s'agit de faire des nanotechnologies une « affaire publique », ce qui implique de développer de nouveaux modes de gouvernance, transparents, ouverts et participatifs dans tous les secteurs concernés.

Au Royaume Uni, en janvier 2008, la *Soil association*<sup>32</sup> structure britannique de promotion de l'agriculture biologique a créé un standard *nano-free* pour les produits de consommation<sup>33</sup>.

---

<sup>29</sup> Organisé par VivAgora à la Cité internationale universitaire de Paris - voir sur le site [www.vivagora.org](http://www.vivagora.org)

<sup>30</sup> D. Benoit Browaeys « Nanotechnologies : le point de vue des associations », ADSP n° 64, Paris, septembre 2008

<sup>31</sup> [http://www.amisdelaterre.org/Nanotechnologies-chronique-d-une.html?var\\_recherche=nanotechnologies](http://www.amisdelaterre.org/Nanotechnologies-chronique-d-une.html?var_recherche=nanotechnologies)

<sup>32</sup> La *Soil association* a une longue histoire de protection des produits agricoles et alimentaires. En 1967, elle a publié le premier standard pour bannir les pesticides, les antibiotiques et autres produits chimiques de l'agriculture bio. En 1983, elle a exclu les protéines animales de la nourriture du bétail, trois ans avant le premier cas de vache folle en Grande-Bretagne. En mars 1997, elle a été le premier producteur bio à certifier des graines et aliments sans OGM.

L'association annonce qu'elle certifie des cosmétiques, aliments et textiles dépourvus de nanomatériaux fabriqués par l'homme. Tout produit contenant des nanoparticules manufacturées inférieures 200 nanomètres est donc exclu par l'association qui espère que d'autres organismes de certification en Europe vont la suivre dans ce mouvement. Ainsi le logo de la *Soil Association*, apposé sur les emballages, certifie l'absence de nanoparticules manufacturées. Le groupe ETC s'est réjoui de cette initiative juste un an après l'annonce qu'elle a faite des gagnants du concours de logos *Nano-free*.

Outre-Atlantique, avec l'arrivée des premiers nanoproducts sur le marché, des manifestations hostiles émergent. Le groupe *Topless Humans Organized for Natural Genetics* (THONG) s'exhibe en corps nus bariolés en juin 2005 à Chicago, devant le magasin *Eddie Bauer* qui commercialise des vêtements anti-salissures utilisant des nanoparticules. Les protestataires font aussi irruption dans un colloque sur les nanotechnologies ironisant sur la phrase célèbre de Feynmann, « *There is plenty of room at the bottom* ».

Toujours aux Etats-Unis, l'*ETC group* (*Action group on Erosion, Technology and Concentration*) est une organisation pionnière dans le domaine des risques liés aux nanoparticules<sup>34</sup>. Dans son rapport *The Big Down* publié dès 2003, ETC considère qu'il faut mettre fin au cycle de crises sanitaires liées aux technologies (amiante, Tchernobyl, vache folle, etc.) et concevoir un « système d'alerte ou d'écoute précoce capable de contrôler n'importe quelle nouvelle technologie d'importance, avec une Convention internationale pour l'évaluation des nouvelles technologies (ICENT) adossée aux Nations unies ».

D'autres organisations sont actives, comme *Environmental Defense Fund*, *The Natural Resources Defense Council*, *Consumers Union*, etc.

Les OSC sont encore peu coordonnées à l'échelle internationale, néanmoins des listes de diffusion regroupant des organisations mobilisées existent aujourd'hui aux Etats-Unis (coordonnées par l'ICTA) et en Europe (coordonnée par le Bureau européen de l'environnement).

### *Regroupements et coalitions*

#### ■ **La coalition Nanoaction ([www.nanoaction.org](http://www.nanoaction.org))**

L'ICTA a regroupé une coalition de 43 associations de défense de la santé, de l'environnement, des consommateurs et des citoyens, pour appeler à une vigilance forte et étendue vis-à-vis des nanotechnologies et de leurs produits. Cette Déclaration intitulée *Principles for Nanotechnologies and Nanomaterials Oversight* a été rendue publique en juillet 2007. Elle détaille huit principes-clés pour un encadrement adéquat et effectif du champ émergent des nanotechnologies.

#### ***Principles for Nanotechnologies and Nanomaterials Oversight***

1 - Un principe basique de la précaution avec la charge de la preuve supportée par les producteurs.

<sup>33</sup> Cf. [www.soilassociation.org/web/sa/saweb.nsf/89d058cc4dbeb16d80256a73005a2866/42308d9.44a3088a6802573d100351790](http://www.soilassociation.org/web/sa/saweb.nsf/89d058cc4dbeb16d80256a73005a2866/42308d9.44a3088a6802573d100351790) !OpenDocument

<sup>34</sup> *Think Tank* canadien qui s'intéresse à l'érosion, la technologie et la concentration des entreprises. [www.etcgroup.com](http://www.etcgroup.com)

- 2 - Des réglementations spécifiques obligatoires avec classification des nanomatériaux comme « nouvelles substances ».
- 3 - La prévention de l'exposition du public et des travailleurs pour tout nanoproduit dont l'innocuité n'est pas démontrée.
- 4 - La protection de l'environnement par une analyse complète du cycle de vie en amont de toute commercialisation pour les nanomatériaux.
- 5 - La transparence avec étiquetage des nanoproduits et informations disponibles.
- 6 - Une participation significative du public à tous les niveaux de l'innovation et de la mise sur le marché.
- 7 - Considération des impacts sociaux et éthiques.
- 8 - Responsabilité juridique des fabricants.

#### ■ Le Bureau européen de l'environnement (BEE)

Ce bureau représentant la fédération européenne des associations de protection de l'environnement, a publié au début 2009 la position des ONG d'environnement sur les nanotechnologies et les nanomatériaux. Leurs principales revendications portent sur le développement de l'enregistrement et d'un schéma d'approbation des nanomatériaux avant leur mise sur le marché ; sur la mise en œuvre d'une consultation publique sur l'innovation technologique, y compris les nanotechnologies et les nanomatériaux ; sur la mise en place d'une législation et d'un cadre réglementaire adéquats et sur la priorisation du financement de la recherche sur les impacts potentiels des nanomatériaux sur le fonctionnement des systèmes naturels et humains. Le principe de précaution est un élément fondamental de cette position et essentiel pour une gestion responsable des nanomatériaux.

Au niveau européen, est aussi active l'Alliance des organisations écologistes et de consommateurs (ASECO) ; ce collectif européen demande des procédures de mise sur le marché, similaires à celles des médicaments. Il revendique surtout le droit de choisir et de créer des zones *nano-free* sur le modèle des régions sans OGM.

En France, VivAgora a initié l'Alliance citoyenne sur les enjeux des nanotechnologies (ACEN), plate-forme d'ONG concernées par les nanotechnologies ayant pour objectif la mise en place d'une veille citoyenne. Elle fédère aujourd'hui une douzaine d'ONG françaises et plusieurs fédérations au plan européen. Elle a ouvert à la fin 2009 un portail collaboratif d'informations pertinentes pour la société (réglementations, débats, campagnes, réseaux associatifs, etc.).

#### 1.6 Les citoyens consommateurs

Bénéficiaires des innovations technologiques, mais également potentiellement victimes de leurs nuisances, ils sont également susceptibles d'inventer des usages inattendus des dispositifs mis sur le marché.

## 1.7 Les employés du secteur privé et de la recherche

Exposés aux nanoparticules pendant le processus de fabrication, les travailleurs et chercheurs manipulant et inhalant des nanomatériaux sont les personnes les plus susceptibles d'être affectées directement par les risques sanitaires des nanotechnologies. De nombreux articles et rapports internationaux<sup>35</sup> soulignent la nécessité de les protéger, et des protocoles et guides de « bonnes pratiques »<sup>36</sup> commencent à voir le jour. Les syndicats ne sont pas en reste et se sont emparés de la question.

En janvier 2007, la CFDT Grenoble a formalisé un ensemble de préconisations<sup>37</sup> présentées lors des tables rondes réalisées à la Cité des sciences et de l'industrie.

La même année, de nombreux syndicats et regroupements de syndicats<sup>38</sup> ont signé la Déclaration *Principles for Nanotechnologies and Nanomaterials Oversight* citée plus haut.

En juin 2008, le syndicat européen *ETUC (European Trade Union Confederation)* et la CES (Confédération Européenne des Syndicats) ont émis une résolution<sup>39</sup> soulevant la complexité des problèmes posés par l'exposition massive des travailleurs à des substances aux propriétés inédites et ont demandé une mise en œuvre soignée du principe de précaution.

En octobre 2008, les syndicats français CGT, CFDT et CFTC ont émis des propositions<sup>40</sup> allant dans le même sens au cours de la séance sur la protection des travailleurs du NanoForum organisé à Paris par Vivagora et le CNAM.

Dans le cadre du débat public national organisé par la Commission National du Débat Public (CNDP), la CFE-CGC, l'UNSA, l'AFOC, la CFDT, la CFTC, et la CGT, ont publié des « cahiers d'acteurs »<sup>41</sup> sur la question.

## 2. Les instruments

Le présent paragraphe recense les principaux instruments où des échanges, débats, travaux se font et fondent l'avenir des nano, qu'ils soient d'origine publique, privée, scientifique ou sociale

### 2.1 Processus participatifs

Même si de nombreux débats ont été initiés par des associations comme *Greenpeace* en Grande Bretagne (NanoJury en 2005) ou VivAgora en France (Nanomonde à Paris et Nano-

---

<sup>35</sup> <http://www.nanoceo.net/nanorisks/OHS>

<sup>36</sup> <http://www.nanoceo.net/nanorisks/OHS-Protocols-Best-Practices>

<sup>37</sup> [http://www.cite-sciences.fr/francais/ala\\_cite/expositions/nanotechnologies/debat-nanotechnologies/pdf\\_cahiers/cahier-13.pdf](http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/expositions/nanotechnologies/debat-nanotechnologies/pdf_cahiers/cahier-13.pdf)

<sup>38</sup> Par exemple, l'*American Federation of Labor and Congress of Industrial Organizations (AFL-CIO)*, the *Bakery, Confectionery, Tobacco Workers and Grain Millers International Union*, the *International Union of Food, Agricultural, Hotel, Restaurant, Catering, Tobacco and Allied Workers' Associations*, *United Steelworkers*.

<sup>39</sup> [http://www.etuc.org/IMG/pdf\\_ETUC\\_resolution\\_on\\_nano\\_-\\_FR-\\_25\\_June\\_08.pdf](http://www.etuc.org/IMG/pdf_ETUC_resolution_on_nano_-_FR-_25_June_08.pdf)

<sup>40</sup> [http://www.vivagora.org/IMG/pdf/CR\\_Nanoforum\\_23oct08.pdf](http://www.vivagora.org/IMG/pdf/CR_Nanoforum_23oct08.pdf)

<sup>41</sup> <http://www.debatpublic-nano.org/documents/liste-cahier-acteurs.html>

Viv à Grenoble en 2006), les pouvoirs publics ont eux aussi amorcé des interactions publiques :

- Conférence de consensus danoise - par le *Danish board of technology* juin 2004.
- Conférence de citoyens de Madison, aux Etats-Unis, en avril 2005 qui a donné naissance au site très documenté <http://www.nanoceo.net>.
- *Focus-group* suisse en octobre 2006.
- Conférence de citoyens du Conseil régional d'Ile-de-France en janvier 2007.
- NanoForum à Paris, porté par le CNAM, et soutenu par la Direction Générale de la Santé (en cours - permanent).
- Débat public sur les nanotechnologies amorcé en automne 2009 par la CNDP ([www.debatpublic-nano.org](http://www.debatpublic-nano.org)). D'octobre 2009 à février 2010, le débat s'est heurté à des oppositions fortes questionnant de manière radicale le « nanomonde » imposé par le mouvement technique actuel

En Europe, la direction générale de la Recherche a aussi financé des projets comme NanoDialogue, Nanologue, Deepen, Nanocap, Nanobioraise...

## 2.2 Pétitions

En 2006, l'ICTA et la coalition de 43 associations qu'elle anime déposent une première pétition auprès de la *Food and Drug Administration* demandant à cette dernière de traiter les risques environnementaux et sur la santé humaine des nanomatériaux non testés et non identifiés dans les produits de consommation.

Puis c'est sur le champ des cosmétiques que se mobilisent, en mai 2006, six associations américaines pour demander à l'Administration fédérale de faire retirer du marché tous les produits cosmétiques renfermant des nanoparticules synthétiques (de dioxyde de titane ou d'oxyde de zinc).

En 2008, ICTA et sa coalition déposent à nouveau une pétition cette fois auprès de l'Agence de protection de l'environnement demandant à cette dernière d'appliquer sur les produits utilisant du nanoargent la réglementation des pesticides.

## 3. Les réglementations

Le Comité de la précaution et de la prévention (CPP)<sup>42</sup> ainsi que l'Afsset ont publié chacune un rapport en 2006 interpellant les pouvoirs publics à propos des moyens spécifiques à développer pour caractériser et quantifier les nanoparticules et mutualiser les informations au sein d'une base de données cohérente.

La même année, le Comité scientifique des risques sanitaires émergents et nouveaux (Scenihp) de la direction européenne sur la Santé et les Consommateurs (Sanco) signalait qu'il fallait changer de méthode d'évaluation face aux risques spécifiques des nanosubstances.

---

<sup>42</sup> *Nanotechnologies, nanoparticules : quels dangers, quels risques ?* Comité de la prévention et de la précaution, mai 2006

Enfin le Conseil international pour la gouvernance des risques (IRGC), fondation de droit suisse, basée à Genève, insistait sur deux types de risques émergents : ceux liés aux structures passives et ceux d'un genre nouveau créés par les nanostructures actives (à fonctions évolutives) comme les nano-emballages. Dans son livre blanc sur la gouvernance des risques liés aux nanotechnologies<sup>43</sup>, l'IRGC craignait la possible « fracture dans les connaissances » si les industriels ne divulguent ni leurs travaux, ni leurs pratiques.

Ces rapports confirment que nous sommes confrontés à un gigantesque défi : des risques potentiels existent, mais nous ne disposons pas de moyens pour les cerner. Le problème majeur réside dans la nouveauté des questions posées par les nanoparticules. Les toxicologues ne savent pas quels paramètres pertinents ils doivent considérer (charge, état de surface...). De plus on extrait difficilement les nanoparticules manufacturées du « bruit de fond » de toute la pollution de l'air (on estime à 10 000 le nombre de nanoparticules dans un cm<sup>3</sup> d'air). Restent enfin à définir les modes de protection des travailleurs.

### **3.1 Traçabilité, déclaration et étiquetage**

L'élément le plus préoccupant est l'absence de traçabilité des nanomatériaux : les pouvoirs publics n'obtiennent qu'à grand peine les informations de la part d'industriels qui n'ont jamais eu l'obligation de mentionner l'originalité structurelle de leurs nanomatériaux. Ainsi les nanotubes de carbone se retrouvent sur le marché comme du simple graphite de synthèse, dont on connaît la composition chimique, mais pas la structure.

Les instances de normalisation comme l'ISO travaillent à préciser des catégories de nomenclatures pour un étiquetage adéquat considérant les propriétés particulières. En septembre 2008, l'ISO a publié une définition des nanotechnologies qui met l'accent sur les propriétés nouvelles. Deux groupes de réflexion ont été mis en place en 2009, sur « nanotechnologies et soutenabilité » et « nanotechnologies et société ».

En France un groupe nano a été constitué au sein du Conseil national de la consommation (CNC). Malgré une douzaine de réunions qui ont fait collaborer trois collègues industriels, associatifs et administratifs, aucun avis n'a été publié du fait des remaniements du CNC.

Le suivi des matériaux mis sur le marché sans déclaration spécifique est un énorme défi sanitaire. Il se heurte à quatre catégories de problèmes :

1. Caractériser les particules : on ne sait pas quels paramètres pertinents considérer : charge, état de surface ? Et il est difficile d'extraire les nanoparticules manufacturées du « bruit de fond » de toute la pollution de l'air (10 000 nP/cm<sup>3</sup>).
2. Quantifier les particules.
3. Définir les traitements pour retraiter les nanomatériaux (décharge contrôlée, vitrification haute température, etc.).
4. Accéder à l'information sur la production et les usages du fait de l'absence d'inventaire officiel et de déclaration obligatoire, envisagée en France avec les projets

---

<sup>43</sup> IRGC *White Paper on Nanotechnology Risk Governance*, 2006, 108p.

de lois Grenelle 1 et 2 (lors du questionnaire 2008 de l'Afsset seulement 16% des entreprises ont répondu).

### **3.2 Législations**

Le Parlement européen, dans une résolution du 24 avril 2009 sur les aspects réglementaires des nanomatériaux, souligne l'écart entre l'investissement massif pour la recherche sur les nanosciences - soit 3,5 milliards d'euros pour la période 2007-2013 - et le « manque considérable de connaissances et d'informations ». Il demande à la Commission de réviser toute la législation nanos avant 2011 et de dresser un inventaire des différents types et utilisations des nanomatériaux, comme l'a décidé le Canada au début 2009. Un effort est fait pour que le règlement Reach (obligation d'enREgistrement, Evaluation et Autorisation, restriction des produits CHimiques) entré en vigueur en 2007 s'applique aux nanomatériaux sur le principe « pas de données, pas de marché ».

En février 2009, l'EEB rendait publiques ses « exigences en vue d'une gouvernance durable pour les nanomatériaux ». L'exigence essentielle de l'EEB, c'est qu'aucune nouvelle mise sur le marché ne soit autorisée pour les produits contenant des nanomatériaux manufacturés susceptibles de conduire à l'exposition des consommateurs ou de l'environnement.

En France, l'article 42 du projet de loi Grenelle 1 aborde le sujet de la déclaration volontaire et demande que la mise sur le marché de « substances à l'état nanoparticulaire » ou des matériaux destinés à rejeter de telles substances fasse l'objet d'une déclaration obligatoire sur les quantités et usages à l'autorité administrative et d'une information aux public et consommateurs. L'article 73 du projet de loi Grenelle 2 en précise l'application.

## **4. De nouvelles formes de gouvernance pour une innovation responsable**

Les nanotechnologies apparaissent comme une mise à l'épreuve des modes de gouvernance de la technologie. Alors que le dialogue avec le public apparaît comme une priorité pour les acteurs publics, sa mise en œuvre est problématique. La gouvernance des nanotechnologies comprend certaines spécificités détaillées ci-dessous :

### **4.1 Une gouvernance internationale très annoncée**

Les nanotechnologies ont la particularité d'avoir été annoncées dès les premiers programmes américains comme une initiative dont la gouvernance se devait d'être mondiale. Alors que les discours justifiant la mise à disposition de fonds publics sont très souvent fondés sur l'argument de la compétition internationale, la régulation des nanotechnologies est très vite apparue comme une condition nécessaire au développement des relations marchandes. A cela s'ajoute une inquiétude partagée par les gouvernements des pays développés pour des réactions potentiellement négatives de la part de la société civile.

### **4.2 Démarches volontaires et régulation**

La gouvernance des nanotechnologies prend bien souvent la forme de la démarche volontaire. Les risques posés par les nanoparticules sont encore difficilement identifiables, et posent des problèmes spécifiques aux régulations existantes des produits chimiques, qui ne prennent pas en compte la spécificité des substances fondée seulement sur leur taille. Les dispositifs propo-

sant des démarches volontaires pour les producteurs ou usagers de nanoparticules peuvent ainsi apparaître comme des solutions potentielles. Aux Etats-Unis, l'Agence gouvernementale de protection de l'environnement (EPA) a lancé un programme de déclaration volontaire des nanoproducts utilisés par les industriels, qui a été très critiquée par de nombreuses ONG pour son échec à impliquer les entreprises de façon significative.

Les démarches volontaires sont proposées dans le domaine de l'usage et de la production des nanoparticules, mais aussi dans le cas de la conduite des projets de recherche. Ainsi la direction générale de la recherche de la Commission Européenne a proposé en 2007 un code de conduite pour la recherche en nanosciences (révisable tous les 2 ans). De même la Direction Sanco réunit chaque année les acteurs concernés, industriels, académiques et associations pour cartographier les avis et induire une interaction pour plus de transparence.

Le réseau international ICON tente aussi de générer des pratiques de sécurité en valorisant les démarches de précaution. On peut aussi signaler les travaux faits en coopération entre le groupe Dupont et la puissante organisation *Environmental Defense Fund* pour baliser les moyens de limiter les risques.

### 4.3 Phase d'expérimentations

#### ■ Aux Etats-Unis

La vision mécaniste du social que propose le rapport *Converging Technologies* est loin d'épuiser les propositions de répartition des rôles politiques autour des programmes nanotechnologies américains. En effet, les décisions à prendre sont, pour une grande part, inscrites dans les politiques environnementales existantes (pour ce qui a trait à la régulation des substances chimiques ou à la protection du consommateur). A ce titre, le recours aux parties prenantes est un exercice obligatoire, dont les rapports sur les nanotechnologies font abondamment mention. Mais en parallèle, les concepteurs des programmes nanotechnologies explicitent une volonté de s'assurer de la confiance du public à l'aide d'instruments de communication adaptés. Cette dernière posture les conduit à exprimer une méfiance envers les acteurs associatifs, soupçonnés de déformer le message à transmettre.

Il en résulte une profonde ambiguïté sur les modalités de l'implication de la société civile dans les programmes nanotechnologiques. En pratique, les initiatives ayant trait à la communication vers le public (organisées par exemple par les musées des sciences) sont déconnectées des démarches ayant trait à la régulation. Ces dernières – à l'EPA par exemple – s'appuient sur des initiatives volontaires, tandis que les acteurs associatifs tentent d'intervenir via les instruments juridiques traditionnels dans le système américain (c'est le cas de la pétition par exemple).

Des chercheurs en sciences humaines de l'université d'Etat de l'Arizona sont financés par la NSF pour développer un programme dit d'évaluation des technologies en temps réel (*real time technology assessment*) : le *Center for Nanotechnology in Society* (CNS) cherche donc à expérimenter des méthodes délibératives de gestion des technologies. Bien plus que de peser directement sur les prises de décisions publiques, l'objectif des travaux du CNS est de servir de modèle à une hypothétique future gouvernance des technologies.

■ **En France**

Les nanotechnologies constituent une épreuve pour les institutions existantes de la politique scientifique. Traiter des nanotechnologies est l'occasion d'expérimenter certains dispositifs. En France, le Nanoforum organisé par le CNAM et VivAgora et soutenu par la DGS constitue un dispositif original : au cours d'une série de réunions publiques préparées par un comité de pilotage pluraliste, les enjeux spécifiques des nanotechnologies ont pu être mis au jour.

La Commission Nationale du Débat Public (CNDP) a organisé à l'automne 2009 un débat public sur les nanotechnologies. La CNDP dispose aujourd'hui d'une procédure éprouvée sur des débats liés à des projets d'aménagement local, mais elle doit faire face dans le cas des nanotechnologies à la largeur thématique et géographique du sujet.

## V. SECTEURS EN MUTATION

---

Le marché des **nanotechnologies vertes** est estimé à 6,1 milliards de dollars en 2010. Pour saisir les mutations qu'introduisent ces innovations, nous proposons de les décrire selon les cinq secteurs où l'on attend les plus fortes ruptures et qui ont un intérêt pour les pays émergents ou en développement : énergie, environnement, matériaux, santé, communication.

### 1. L'énergie

Les nanotechnologies peuvent apporter des réponses aux besoins énergétiques dans un contexte post-pétrole où l'on cherche à la fois à économiser l'énergie (en améliorant les rendements ou en diminuant les pertes), à inventer des énergies renouvelables et des systèmes de stockage efficaces. Le secteur de l'« énergie durable », qui focalise 17% des investissements industriels mondiaux voit dans les nanomatériaux les moyens d'améliorer les rendements des systèmes énergétiques, de stocker l'hydrogène (avec des nanotubes de carbone), de faire des piles à membranes performantes (**piles à combustibles** avec nanopoudres de carbone de Toshiba), des batteries plus efficaces (avec des nanoparticules de Lithium-Manganèse).

#### 1.1 Economies d'énergie

Dans le secteur de l'habitat, l'isolation des bâtiments pourra être renforcée par l'utilisation de nanomatériaux ultra poreux ou à changement de phase (qui sont capables d'absorber la chaleur pendant la journée et la restituer quand il fait froid). Des progrès sont attendus aussi en matière d'éclairage notamment avec les diodes électroluminescentes (LED) de nouvelle génération. Des pistes sont explorées avec des gels d'alumine, des aluminés ultrapures, ou certaines terres rares pour améliorer les performances de luminescence. De même des ampoules au nanophosphore, qui génèrent de la lumière blanche sous excitation UV, transforment 100% de l'énergie en lumière (contre seulement 5 % avec les filaments de tungstène actuels).

Dans le domaine des transports, l'allègement des structures notamment en utilisant les nanotubes de carbone peut diminuer les consommations en carburant. Celles-ci peuvent aussi être minimisées en utilisant des catalyseurs augmentant l'efficacité des moteurs. L'oxyde de cérium expérimenté sous le nom d'*Envirox* (sous-licence de l'allemand *Clariant*), par *Oxonica* en Grande Bretagne - avec la compagnie d'autocars, *Stagecoach* - permet de faire baisser la consommation de 10%.

La réduction des frottements est une autre stratégie pour limiter la consommation de carburant. Des revêtements nanostructurés comme le *DLC* (*Diamond like Carbone*) sont hyper glissants et incorporent des creux en surface qui font office de microréservoirs de lubrifiant.

#### 1.2 Energies renouvelables

Les panneaux solaires développés jusqu'à ce jour ont un rendement faible qui ne dépasse pas 20%. Cette limite est due au silicium massif des cellules solaires qui n'absorbe qu'une fraction des rayons lumineux qui composent la lumière. En utilisant une surface constituée de nanofils de silice, les rendements des cellules voltaïques peuvent être de 50 à 70%. Les cellules de silicium pourraient aussi être dopées au manganèse pour optimiser ce rendement.

Des recherches sont faites sur des cellules solaires chlorophylliennes où le silicium est remplacé par des polymères incrustés de pigments ou chromophores (colorants comme la chloro-

phylle), greffés à la surface des nanoparticules de dioxyde de titane ou de sulfures de cadmium. Cette démarche est développée par l'École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) avec *Konarka Technology*<sup>44</sup>. En 2003, la société *Nanosys* exploitant le même procédé a annoncé avoir obtenu une efficacité de conversion énergétique de 30 %. D'autres sociétés comme *Nanosolar* ou *Heliovolta* sont sur ce créneau.

Ces cellules peuvent être imprimées sur plastique et être intégrées à des téléphones portables, des textiles de tentes ou de couvertures, des carrosseries automobiles ou des tuiles. À terme on espère pouvoir peindre avec un enduit photosolaire pour rendre toute surface disponible, productrice d'électricité !

### 1.3 Stockage

Les batteries lithium-ion utilisées pour les téléphones mobiles ou pour les ordinateurs portables restent trop chères et pas assez durables pour les voitures électriques. Des gains importants sont recherchés en associant des nanoparticules de lithium, de fer et de phosphate.

On cherche aussi à améliorer les capacités des piles à combustibles en utilisant des nanomatériaux.

On peut aussi espérer réduire les émissions de polluants et traiter les effluents : le créneau des catalyseurs, céramiques nanoporeuses, aérogels, filtres fonctionnalisés, membranes organiques actives est porteur.

## 2. L'environnement

Les nanotechnologies sont en mesure de limiter les pollutions industrielles tout en diminuant les quantités de matières premières requises. L'épuration de l'eau, la dépollution peuvent trouver aussi des solutions innovantes avec les membranes nanoporeuses ou actives.

### 2.1 Réduction de la consommation des ressources et des émissions polluantes

L'ambition initiale des nanotechnologies est d'économiser les ressources et l'énergie dans une démarche de construction plutôt que de réduction (où découpages et moulages conduisent à des rebuts)<sup>45</sup>. Cependant, aujourd'hui la plupart des produits nanostructurés sur le marché sont issus de procédés classiques qui restent gourmands en énergie (fabrication des nanotubes de carbone). On peut attendre des progrès du côté des processus de catalyse en sortie de cheminées et des pots d'échappement en utilisant des céramiques ultra poreuses nanostructurées.

### 2.2 Epuration de l'eau

Les nanotechnologies devraient jouer un rôle important dans la dépollution et l'épuration de l'eau car les nanoparticules sont très réactives (à cause de leur surface d'interaction très élevée). Des filtres à base de nanoparticules d'oxyde de fer peuvent par exemple piéger l'arsenic qui empoisonne des populations menacées au Bangladesh où trente à soixante-dix millions de

---

<sup>44</sup> *Small Times*, 18 février 2005

<sup>45</sup> Christian Joachim et Laurence Plévert, *NanoSciences, La révolution invisible*, Paris, Éd. du Seuil, « Science ouverte », 2008

personnes sont contaminées. Au Centre d'enseignement et de recherche en géosciences de l'environnement (Cerege) de l'université Paul Cézanne d'Aix-en-Provence, des membranes de nanofiltration capables d'arrêter les agrégats de métaux toxiques, les bactéries et même les virus, sont mises au point, avec des billes d'alumoxane (oxydes d'aluminium) et de ferroxane<sup>46</sup> (oxydes de fer).

La finesse du tamis que permettent les filtres à nanopores peut aussi bloquer bactéries et virus.

Des membranes céramiques nanoporeuses sont déjà utilisées pour fournir une eau potable mieux filtrée. L'Institut polytechnique *Rensselaer* situé près de New York recourt à des membranes nanostructurées pour dessaler l'eau de mer<sup>47</sup>.

### 2.3 Dépollution

Pour dépolluer les sols, l'injection de nanoparticules de fer peut décomposer des polluants organiques récalcitrants comme les hydrocarbures ou les composés chlorés (pesticides, dioxines, PCB, etc.) tandis que des nanoparticules d'oxydes de titane (TiO<sub>2</sub>) dégradent les composés azotés. Des nanopoudres de dioxyde de silice sont aussi utilisées pour la dépollution. L'éventuelle généralisation de procédés de dépollution des nappes phréatiques avec des nanopoudres doit être précédée par des études d'impact pour éviter que le remède ne soit pas pire que le mal.

### 2.4 Déchets et cycle de vie des nanomatériaux

La présence de nanoparticules dans quantité de matériaux (cadre de vélos, électronique, ciments, textiles...) ne permettra pas de prévoir un retraitement spécifique. La question du cycle de vie de certains matériaux comme les pneus enrichis en nanotubes de carbone, est au cœur des travaux de la structure Ordimp à Toulouse.

Si les solutions évoquées dans ce chapitre consacré à l'environnement peuvent être efficaces, il faut les mettre en regard de bilans environnementaux pas toujours très bons pour les nanomatériaux. Dans un numéro spécial du *Journal of Industrial Ecology*, paru en octobre 2008, plusieurs auteurs alertent sur les impacts, en termes de pollution et de consommation énergétique des nanoproducts. Des chercheurs de l'Ohio, par exemple, ont montré que l'impact du cycle de vie des nanofibres de carbone pourrait être cent fois plus important que celui des matériaux traditionnels. Selon David Rejeski, directeur du *PEN*, l'idée selon laquelle la production à l'échelle nanométrique serait nécessairement écologique et propre est erronée.

L'EEB qui fédère au niveau européen plus de 140 ONG dans 31 pays, et le Réseau international pour l'élimination des Polluants organiques persistants (*IPEN*) qui réunit plus de 700 ONG, dans plus de 80 pays), ont produit des rapports assez réservés sur les promesses des nanotechnologies pour l'environnement. Ils posent une question cruciale : comment être sûr que la technologie utilisée est non seulement efficace mais aussi moins toxique que les polluants qu'elle est censée nettoyer ?

---

<sup>46</sup> Cf. [www.vivantinfo.com/index.php?id=143](http://www.vivantinfo.com/index.php?id=143)

<sup>47</sup> Jean-Luc Goudet, « Bientôt des nanotubes pour dessaler l'eau de mer ? », *Futura-Sciences*, 24 février 2007.

### **3. Matériaux**

#### **3.1 Secteur automobile**

Dans le secteur automobile (un des plus important pour les nanotechnologies) ou aéronautique, les constructeurs prévoient d'alléger les structures avec des nanotubes de carbone (qui peuvent aussi renforcer les pièces de moteur) qui ont l'avantage de maintenir les propriétés électrostatiques utiles pour la ligne essence et l'application des peintures sur des structures de moins en moins métalliques. Chez les spécialistes de pneumatiques comme Michelin, le renforcement des élastomères par des nanotubes est à l'étude (effet antiusure et antibruit, réduction jusqu'à 4 % de la consommation d'essence).

#### **3.2 Secteur textile**

Dans le secteur textile, les nanomatériaux constituent un vivier de potentialités : fibres métallisées capables de contenir de l'énergie ou d'intégrer des capteurs ou des systèmes intelligents ; revêtements plastiques (*Plexcore*®) ou antistatiques (*Gore tex*) ; textiles chauffants, ou luminescents, vêtements auto désinfectants (de la firme *Nano-Tex*) ; pansements antibactériens au nanoargent. Les vêtements peuvent ainsi devenir actifs et libérer des produits cosmétiques ou antibactériens.

#### **3.3 Imprimerie**

Dans le domaine de la papeterie et des impressions, on utilise abondamment le noir de carbone, qui constitue 10% à 30% de la masse des encres. Les toners d'imprimantes sont faits non seulement avec du noir de carbone, mais aussi avec des silices amorphes et du dioxyde de titane. L'industrie du papier prépare des feuilles effaçables et ré-imprimables plus de cent fois. Une lampe ultraviolette « révèle » les dépôts qui disparaissent après 16 à 24h ou bien par chauffage. Les grains de toner - que l'on fait classiquement adhérer par cuisson - sont ainsi décollés. La société *Xerox*, à la pointe de ces innovations, réalise des pigments d'encre, activables électriquement.

#### **3.4 Construction**

Dans le secteur de la construction, l'ensemble des matériaux qui remplacent progressivement l'acier et les métaux comme les polymères peuvent être renforcés par des nanomatériaux. Les aciers nanostructurés sont plus résistants à l'usure. L'ajout d'oxydes métalliques dans l'acier confère aussi une très haute résistance mécanique, même à très haute température.

Pour les bâtiments et routes, se développent des offres pour des peintures, ciments, mortiers, carreaux, panneaux de toiture, enrichis en nanotitane pour les rendre autonettoyants et antipollution. Le géant *Eurovia*, filiale de Vinci, implantée dans seize pays, a aussi mis au point un nouveau revêtement *Noxer*® qui réduit les rejets d'oxydes d'azote en les neutralisant.

Des industriels réunis au sein du réseau *Photocal* vendent aussi des sprays, revêtements tous supports (pierre, verre, bois...) qui confèrent aussi des propriétés antibactériennes.

## 4. Santé

### 4.1 Thérapeutiques

Pour l'industrie pharmaceutique, la recherche de moyens nouveaux pour acheminer la matière active de manière ciblée – on parle de vectorisation – est stratégique. Cela permet d'être efficace (moins de substance nécessaire) et de minimiser les effets secondaires. Des efforts importants sont réalisés pour fabriquer des nanovéhicules, sorte de « chevaux de Troie » miniatures dotés d'antigènes qui leur donnent une affinité pour l'organe ciblé, le plus souvent des tumeurs. Spécialiste de ces vectorisations à l'université Paris-Sud, Patrick Couvreur a mis au point un polymère biodégradable (le polycyanoacrylate d'alkyle) qu'il charge de doxorubicine, anticancéreux, pour traiter des leucémies ou des cancers hépatiques. Il a fondé deux sociétés : *BioAlliance* en 1997 et *Medsqual* en cours d'incubation.

Une autre approche développée par l'entreprise allemande *MagForce* (ou *Nanobiotics*) est d'injecter des nanovecteurs métalliques qui se fixent sur l'organe cancéreux et s'ouvrent dès que l'on applique un champ magnétique. Cela libère le médicament sur la cible désirée. De même, la société anglaise *Midatech* a déposé plusieurs brevets sur la fabrication de nanoparticules à cœur d'or que l'on peut chauffer à volonté détruisant ainsi des cellules malignes cancéreuses ou des bactéries résistantes. Ces particules thérapeutiques peuvent passer la barrière dite « hémato-encéphalique » et pénétrer le cerveau pour traiter les maladies d'Alzheimer ou de Parkinson.

Des percées sont aussi réalisées dans le domaine de la médecine régénérative avec des matériaux pour des greffes dentaires ou osseuses, des implants ou des prothèses. Le « métal trabéculaire » du laboratoire *Zimmer* possède une structure poreuse fractale facilitant la repousse de l'os. La régénération de tissus voire le remplacement d'organes entiers est envisagé<sup>48</sup>.

Des imprimantes 3D à « jet de cellules » progressent dans leurs résultats en vue de la réparation chirurgicale<sup>49</sup>. Pour stopper des hémorragies en quelques secondes, des travaux, réalisés au *MIT* sur un liquide qui durcit au contact des tissus salés du corps, pourraient servir pour protéger les soldats.

La miniaturisation des microsystèmes cérébraux implantés, offerte par les nanotechnologies, peut améliorer les résultats pour pallier la maladie de Parkinson. Plus de trente-cinq mille personnes dans le monde ont déjà été soignées par de tels implants de stimulation profonde, dont les indications s'élargissent : obésités, dépressions profondes résistantes...

La mise au point d'interfaces cerveau-ordinateur (*brain computer interface*, *BCI*) est aussi au programme : neuroprothèses et implants pour des suppléances sensorielles (visuelle, auditive...) mais aussi motrices pour des handicapés ou des paralysés. Des implants intracérébraux de délivrance de médicaments pour pallier un accident vasculaire cérébral (AVC) ou détruire une tumeur sont envisagés.

---

<sup>48</sup> Dans le cadre du septième programme-cadre pour la recherche (2007-2013), la Commission prévoit de consacrer environ 100 millions d'euros par an à des projets dans le domaine de la nanomédecine.

<sup>49</sup> Paul Calvert, *Materials Science : printing cells*, Science n°318, pp 208-209, 12 octobre 2007

## 4.2 Diagnostics

Dans le champ diagnostic, une médecine personnalisée, adaptée à chaque situation biomoléculaire particulière, se met en place. Les nanotechnologies permettent de réaliser des systèmes capables de détecter des doses infimes voire une seule molécule : ce sont les laboratoires sur puces très performants et d'usage précoce. Des détecteurs basés sur le principe de l'interrupteur à canal ionique peuvent aussi obtenir une sensibilité inégalée.

## 5. Alimentation et agriculture

Les industriels de l'agro-alimentaire sont très réticents à évoquer les nanoproduits qu'ils développent ou qu'ils ont déjà mis sur le marché. Cette attitude de secret a été plusieurs fois dénoncée par plusieurs services de la Commission européenne.

### 5.1 Aliments

Toujours est-il que la société allemande d'analyse stratégique, *Helmut Kaiser Consultancy (HKC)* estime que les **nanoaliments** - soit environ 300 nanoproduits disponibles sur le marché - constituent déjà un marché de 5,3 milliards de dollars et vont atteindre 20,4 milliards de dollars en 2012. Dans un rapport publié début 2008, les experts de *HKC* ont recensé plus de 400 sociétés dans le monde sur ce créneau de l'innovation nanotechnologique, les Etats-Unis ayant le *leadership*, suivis par le Japon et par la Chine.

Les innovations se focalisent sur les nanocapsules pour piloter les principes actifs et augmenter l'assimilation des substances. Car beaucoup d'aliments comme le thé vert, le gingembre, le pépin de raisin, le ginseng renferment des composés qui peuvent prévenir les maladies, mais le corps ne les absorbe pas. En Israël, deux firmes, *Nutralease* et *Shemen industries* utilisent de minuscules sphères dont le cœur aqueux plein de nutriments (vitamines, minéraux) est entouré d'huile. Cela permet d'acheminer dans l'organisme des phytostérols ou d'autres composants qui sont insolubles. Par cette technique on peut aussi cacher un ingrédient au goût indésirable. En Australie, une des marques les plus populaires de pain blanc contient des capsules remplies d'huile de thon dont le goût de poisson est imperceptible.

Le principe de double émulsion permet d'encapsuler de la vitamine C, une molécule qu'il faut impérativement abriter de l'air sous peine d'oxydation, donc de perte d'activité. Les microcapsules peuvent être incorporées à des crèmes ou à des dentifrices, et c'est l'action mécanique de l'utilisateur (l'application sur la peau ou le brossage) qui les casse, libérant la vitamine C au bon moment.

Beaucoup d'industriels spécialisés dans les suppléments alimentaires comme *SportMedix* ou *Adinotec* font des « biorégulateurs nanostructurés » à destination des sportifs. *BASF* produit un caroténoïde qui allonge la durée de conservation des produits : il s'agit d'un lycopène synthétique nanométrique, antioxydant et précurseur de la vitamine A, qui est ajouté aux limonades, jus de fruits, fromages et margarine. Des alliances comme celle d'*Evonik* avec *Aquanova* visent à accroître l'usage d'un supplément très apprécié au Japon, l'acide alpha lipoïque, sous forme de nanomicelles (le produit s'appelle Alipure SOL) beaucoup plus assimilables que le produit huileux. Enfin, signalons que *Nestlé* et *L'Oréal* collaborent pour produire des nutricosmétiques, c'est-à-dire des aliments à finalité esthétique.

## 5.2 Emballages

Les nanotechnologies permettent aussi de concevoir les emballages comme des barrières actives qui diffusent des substances jouant un rôle de gardien alimentaire. Certains empêchent l'oxydation ou bloquent les ultra-violets, d'autres détectent des pathogènes, ou alertent le consommateur d'une nourriture avariée. On estime que le marché de ces emballages actifs nanostructurés devrait atteindre 3,7 milliards de dollars en 2010.

En remplacement du verre, lourd et cassant, des entreprises comme *Voridian* (dans le Tennessee) ou *NanoCor*, filiale de *Amcol International*, - qui a déposé plus de quarante brevets sur les nanocomposites plastiques - ont mis au point des bouteilles plastiques qui empêchent les échanges gazeux comme l'entrée d'oxygène et la fuite de gaz carbonique. Les fabricants de bière comme *Hite Brewery Co*, *South Korea's Hite Brewery* ou *Miller Brewing Company* ont adopté cet embouteillage qui devrait permettre de garder la bière fraîche pendant dix-huit mois. D'autres bouteilles plastiques sont durcies par des inclusions de Nitride de titane et incorporent des cristaux de nanoparticules d'oxydes de titane réfléchissant les UV. On estime qu'un tiers des bouteilles en circulation aux Etats-Unis contiennent ces composants.

De leur côté, *Kraft*, *Bayer* et *Kodak* développent ce qu'on appelle des *smart packages* qui détectent et signalent toute présence de bactéries dangereuses : salmonelles, *Escherichia Coli*, etc. Dès que l'aliment se détériore, l'emballage change de couleur. Des recherches sont faites pour diffuser progressivement des substances conservatrices ou des saveurs pour prolonger les aliments, par ouverture progressive de nanocapsules. *Hansen Technologies*, spécialiste des **nanocapteurs** biologiques inclus dans les emballages, se déploie sur un marché d'1,4 milliard de dollars. Le consortium *Altria* qui détient *Kraft* investit largement dans la traçabilité des denrées avec étiquettes électroniques. Plus originale la société californienne *Nanoplex Technologies* développe un code-barres moléculaire, qui identifie des éléments chimiques qui peuvent avoir été ajoutés. Cela permet d'éviter les contrefaçons ou de repérer la présence de pathogènes.

## 5.3 Agriculture

En matière d'agriculture, depuis fort longtemps le broyage de poudres pesticides a été pratiqué dans les pays de l'est. Plus récemment ont été mises au point des nanocapsules permettant de véhiculer les produits phytosanitaires. Ce moyen peut contrôler la diffusion, par exemple en conférant aux capsules une affinité pour une partie de la plante que l'on veut traiter. On peut aussi concevoir une capsule qui ne libère son insecticide qu'au contact de la salive du ravageur ciblé. *Syngenta*, *Monsanto* and *BASF* ont déjà des « pesticides nano encapsulés programmés » sur le marché américain et britannique.

Dans les pays du sud, des recherches sont faites sur des herbicides non-toxiques. Des coopérations entre l'université indienne d'agriculture du Tamil Nadu (Inde) et *Monterrey Tech*, à Mexico, visent à attaquer les graines des mauvaises herbes et les empêcher de germer.

## 5.4 Elevage

Pour l'élevage, des exploitations piscicoles américaines expérimentent la vaccination de masse au moyen d'ultrasons. Des nanocapsules contenant de minces fibres d'ADN sont déposées dans un étang, où elles sont absorbées par les cellules des poissons. L'ultrason est ensuite utilisé pour rompre les capsules qui libèrent ainsi l'ADN et provoquent une réponse immuni-

taire chez l'animal. Cette technique a été testée par *Clear Springs Foods*, une entreprise très importante qui exploite le tiers des établissements de truiticulture des États-Unis.

## 6. Communications (capteurs, étiquettes, traçabilité)

Les puces *RFID* représentaient déjà un marché de 2,9 milliards de dollars avec six cents millions de puces vendues dans le monde en 2005. Les ventes vont exploser puisqu'on prévoit la production de quatre milliards de puces en 2016, sur un marché de quatre cents milliards.

Ces puces qui renferment un code identifiant se généralisent du fait de leur prix désormais dérisoire, soit cinq centimes par étiquette.

La grande distribution y recourt pour suivre les marchandises. *Wal-Mart*, *Tesco*, *Metro*, *Carrefour* exigent de plus en plus ces nouveaux « codes-barres » auprès de leurs fournisseurs comme *Gillette*, *Nestlé*, *Procter&Gamble*, *Benetton* pour gérer automatiquement les stocks. Il s'agit pour eux d'étiqueter tous les produits (et non plus seulement les lots) et d'obtenir la description intégrale d'un chargement (de camion par exemple) en un seul clic !

Avec ces puces, il est possible d'assurer le suivi d'objets de valeur (enregistrement et datation de tout choc) pour établir les responsabilités précieuses pour les assureurs. Les banques, sièges sociaux les utilisent pour autoriser l'accès seulement aux personnes détentrices de puces. Dans les passeports biométriques, les informations sur les données personnelles (empreintes digitales, iris de l'œil, etc.) sont aussi portées par une puce *RFID*. L'incorporation de puces miniatures – produites par *Aliflex*, *IER* ou *Mérieux* - est devenue obligatoire pour les animaux d'élevage depuis janvier 2008<sup>50</sup> et se répand pour les animaux de compagnie. L'inclusion de *RFID* dans des plats cuisinés ou des vêtements peut aussi permettre de régler automatiquement des temps de cuisson ou de lavage.

Il faut souligner que cette numérisation des objets est directement interconnectée à l'« internet des objets » (*Internet Protocol V6*) comme l'a souligné Philippe Lemoine, commissaire à la CNIL<sup>51</sup>. Il y a donc risque d'une surveillance généralisée avec **l'informatique ubiquitaire** qui met en relation les données identifiant, localisant ou renseignant sur toutes sortes de choses (comportements, habitudes, maladies, etc.). Une guerre pour posséder les bases de données et maîtriser les architectures fait rage et *Google*, notamment, a bien l'intention avec ses robots de catégorisation, de piloter cette prochaine indexation du monde.

Progressivement l'environnement moderne citadin se densifie avec une électronique ubiquitaire qui connecte en continu (téléphone, Wifi) et qui fournit une réalité augmentée (lunettes informatives, mémoires embarquées, positionnement GPS, cf. [www.nanomarkets.net](http://www.nanomarkets.net)). Les écrans plats flexibles, pliables et même découpables comme une moquette (cf. [www.inanov.fr](http://www.inanov.fr)), les panneaux signalétiques ou publicitaires interactifs, les interfaces de plus en plus intégrées (proches du corps et bientôt incarnées peut être) génèrent une fluidité entre

<sup>50</sup> Règlement CE n°21/2004 du conseil du 17/12/2003 pour répondre aux exigences de sécurité sanitaire

<sup>51</sup> « Nanotechnologies, informatique et libertés » communication du 12 janvier 2006 par Philippe Lemoine, janvier 2006. <http://www.cnil.fr/la-cnil/actu-cnil/article/article//nanotechnologies-vers-une-meta-convergence-juridique/>

sensations, pensées et actualités du monde extérieur comme l'anticipait le film *Minority Report*<sup>52</sup>.

La plupart des sondages indiquent que la population se méfie de plus en plus des traces numériques laissées par tous les outils à puces (cartes bancaires, téléphones portables, cartes vitale, caméras, passeports biométriques).

## 7. Défense

Les nanotechnologies apportent des capacités stratégiques pour surveiller et transmettre les données avec des capteurs et émetteurs miniatures et légers, qui peuvent être disséminés (*smart dust*), mais aussi directement transportés par l'homme, sans alourdir son chargement<sup>53</sup>. On comprend ainsi qu'un tiers du budget nano des États-Unis (*NNI*) est alloué au Département de la Défense<sup>54</sup>. Dans son livre, consacré aux applications militaires des nanotechnologies, le physicien allemand, Jürgen Altmann détaille les projets en cours<sup>55</sup>. Le chercheur de l'Université de Dortmund considère l'hybridation entre le vivant et les systèmes électroniques comme la perspective la plus novatrice : l'armée développe ainsi des insectes pilotables, des requins espions, des essais de « frelons bioniques » qui consistent à équiper les animaux d'un système de contrôle permettant de les télécommander voire d'augmenter leurs capacités<sup>56</sup>. De même, des morceaux d'organes sensoriels (souvent plus performants que les capteurs artificiels actuels) pourraient être implantés dans des microrobots.

Sur le plan de la surveillance de l'ennemi, la prolifération de capteurs autonomes capables de calculer et de communiquer le résultat de leurs mesures fait partie de l'arsenal du futur. De même, des microrobots de taille inférieure à 5 millimètres voire submillimétriques se déplaçant avec des flagelles, des pattes, une ondulation, ou simplement portés par le vent.

Du côté des systèmes d'armes, les **fullerènes** avec leurs qualités de légèreté et de robustesse sont très prisés comme substituts aux métaux (indétectabilité). Le recours à des moteurs miniatures (bio-inspirés, matériaux simulant des muscles, moteurs électrostatiques) peut offrir à la fois mobilité et robustesse.

Des applications militaires sont aussi recherchées pour réaliser des gilets pare-balles dont les inclusions de nanoparticules durcissent au moindre choc<sup>57</sup>. La pièce maîtresse des États-majors reste le « fantassin du futur » qu'il faut équiper au mieux, voire doper. Ainsi depuis 2006, le Pentagone consacre plus de 350 millions de dollars par an aux nanotechnologies, avec no-

---

<sup>52</sup> Film réalisé par Stephen Spielberg à partir de la nouvelle éponyme de Philip K. Dick, où des êtres humains mutants, les précogs, vivant à Washington en 2054, peuvent prédire les crimes à venir grâce à leur don de présience.

<sup>53</sup> Rencontres Internationales de Prospective du Sénat. *Les nanotechnologies : vivier du futur. Pour une prise de conscience des enjeux stratégiques*. 20 Juin 2002 - [www.prospective.org/upload/WORD/20\\_juin\\_2002\\_Nanotechnologies\\_vivier\\_du\\_futur.doc](http://www.prospective.org/upload/WORD/20_juin_2002_Nanotechnologies_vivier_du_futur.doc)

<sup>54</sup> Voir la note de lecture de Louis Laurent sur le site <http://www.vivantinfo.com/index.php?id=152>

<sup>55</sup> J. Altmann, *Military nanotechnology: Potential applications and preventive arms control*, Editions Routledge, Londres et New York, 2006

<sup>56</sup> Voir les travaux de l'équipe de Sanjiv Talwar (Neural and Behavioral Science Program, State University of New York Downstate Medical Center) sur les « ratbots » publiés en mai 2002 dans la revue Nature.

<sup>57</sup> Christophe Jacquemin, *Une armure liquide bientôt commercialisée*, Automates intelligents, 10 avril 2007

tamment le projet *Future Force Warrior* (futur guerrier de combat - cf. [www.natick.army.mil/soldier/wsit](http://www.natick.army.mil/soldier/wsit)).

Pour soutenir cet effort, a été inauguré en 2002, l'*Institute for Soldier Nanotechnologies* (Institut des nanotechnologies du soldat - cf. <http://web.mit.edu/isn/>) au sein du *MIT*. Doté d'un budget public de cinquante millions de dollars auquel s'ajoutent quarante millions issus des partenaires privés (DuPont, *Raytheon*<sup>58</sup> *Partners Healthcar*), ce centre se déploie sur cinq axes : matériaux légers et fibres actives, combinaison médicalisée, protection balistique, détection et intégration nanoélectroniques.

Tous ces investissements répondent à un constat que font les spécialistes de défense comme Michael Goldblatt de la *Darpa* (*Defense Advanced Research Projects Agency*) soulignant que « l'humain est devenu le chaînon le plus faible, d'un point de vue autant physiologique que cognitif ». C'est d'ailleurs la raison qui pousse à augmenter tous les automatismes, quitte à laisser très peu de marge de manœuvre à l'homme de terrain. Dans son livre *Mind Wars*, Jonathan Moreno pointe d'ailleurs cet asservissement, qui aboutit à l'interdiction, pour un militaire de l'armée américaine, de refuser une opération qui le rendrait plus performant.

Selon les spécialistes, la plus grande préoccupation avec les nanotechnologies est le risque de rupture des procédures de dissuasion. « Dès lors que l'adversaire ne sera plus identifiable parce que furtif, plus aucune anticipation ne pourra fonctionner, et l'on assistera à la surenchère des suspicions », estime Alain de Neve, analyste à l'Institut Royal Supérieur belge de Défense qui souligne l'impossibilité de contrôler des armes indétectables et les risques de nanodispositifs autorépliquants.

---

<sup>58</sup> En novembre 2004, Raymor a créé une filiale industrielle en matériaux avancés et en nanotechnologie, *AP&C* (*Advanced Powders & Coatings Inc.*) lui appartenant à 100 %. Raymor et AP&C détiennent les droits exclusifs sur plus de 20 brevets à travers le monde.

## **Conclusion**

Les problèmes d'énergie et le développement durable constituent un des enjeux majeurs pour l'avenir de la planète, tant par rapport au réchauffement climatique qu'aux besoins de développement des pays du Sud. Comme pour les promesses faites par les promoteurs du nucléaire, des biotechnologies et de la chimie, les enthousiastes des nanotechnologies affirment que celles-ci vont résoudre les problèmes de famine, de pauvreté, d'énergie et de pollution.

Pourtant chacun sait aujourd'hui que la science et les technologies ne peuvent pas, à elles seules, répondre aux défis auxquels notre planète est confrontée. Comme toute autre science et vague technologique, les nanosciences et nanotechnologies se situent dans des contextes sociaux et politiques concrets. Les questions qui se posent alors sont les suivantes :

- ▷ Peut-on adapter les nanotechnologies aux besoins des populations et de la planète et respecter un développement durable ?
- ▷ Existe-t-il dans ces domaines des alternatives (moins coûteuses, plus adaptées) aux nanotechnologies ?
- ▷ Quelles sont les nano-techniques « durables » ? Est-ce qu'elles répondent aux Objectifs du Millénaire pour le développement (OMD) qui concernent, entre autres, le traitement de l'eau, l'économie d'énergie, la pollution de l'air, etc.

Si les nanotechnologies peuvent apporter des améliorations pour la purification de l'eau, la performance des cellules photovoltaïques et réduire les coûts énergétiques, est-on bien sûr que ce seront ces applications auxquelles la recherche publique et privée donnera la priorité ? Et les innovations technologiques qui en découleront seront-elles abordables pour les pays en développement ?

## Annexe 1 – Fiche détaillée des nanomatériaux les plus communément répandus

### ■ Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (NTC) font partie des produits-phares des nanotechnologies. Ces derniers ressemblent à des grillages enroulés sur eux-mêmes d'un diamètre pas plus important que celui de la double hélice d'ADN, soit 3 à 4 nanomètres. Ce sont des feuillets de carbone en nids d'abeille qui peuvent avoir deux configurations : ils peuvent soit former un monofeuillet (un seul rouleau), soit être constitués de plusieurs cylindres emboîtés comme des poupées russes (multiparois) ou d'un feuillet enroulé sur lui-même comme un parchemin. Leurs longueurs sont aussi très variables. Selon les estimations de Vicky Colvin de la *Rice University*, il y aurait 50 000 sortes de nanotubes aujourd'hui<sup>59</sup>, chacune possédant des propriétés particulières !

Les NTC offrent des qualités électriques, optiques, thermiques et mécaniques exceptionnelles. Ils ont été utilisés initialement comme additifs dans des polymères techniques pour en améliorer la conductivité électrique, en remplacement du graphite (l'intérêt est que l'on en utilise dix à quinze fois moins que du graphite, sans avoir la perte des propriétés mécaniques que l'on a en utilisant du graphite). La conductivité électrique des pièces plastiques dans l'industrie automobile permet la peinture électrostatique des pièces de carrosserie et des accessoires. Ainsi certaines pièces en alliage de polymères (Noryl GTX) enrichis en nanotubes de carbone ont été utilisées par Renault pour certains modèles de la Clio 1. Les autres utilisations concernent les peintures écrans électromagnétiques pour les téléphones mobiles ou les ordinateurs portables, ainsi que les additifs antistatiques pour emballage de matériels électroniques, ou contenants en plastiques pour produits chimiques inflammables (par exemple les réservoirs et les lignes essence dans les véhicules automobiles).

Comparés à l'acier, les nanotubes de carbone sont à la fois plus résistants, plus légers, et plus flexibles. On peut donc en ajouter à des composites époxy pour les rendre plus solides (éviter les micro craquelures) et plus souples : voilà donc des cadres de vélo, des raquettes, des clubs de golf, des balles de tennis renforcés aux nanotubes. Des développements beaucoup plus prometteurs sont attendus d'ici dix ans par la réalisation de fibres à base de nanotubes qui seront cinq à dix fois plus résistantes que les meilleures fibres actuelles en Kevlar ou en Dyneema, (fibre polyéthylène utilisée notamment pour fabriquer des sangles et des cordelettes) et quatre fois plus résistante que les fils d'araignée.

Enfin, les nanotubes de carbone ont une conductibilité thermique équivalente à celle du diamant, le meilleur conducteur thermique connu. D'où un intérêt pour éliminer la chaleur ou l'uniformiser (catalyseurs chimiques, pneus, circuits électroniques de puissance,...)

---

<sup>59</sup> Jo Anne Shatkin, *Nanotechnology : Health and Environmental Risks*, CRC Press, Taylor & Francis Group 2008, p 11

Dans les ordinateurs portables de demain (et déjà ceux d'aujourd'hui), on pourra retrouver des nanotubes un peu partout : dans l'écran plat, dans les transistors, dans les batteries lithium-ions (en remplacement partiel du graphite pour améliorer la conductivité électronique des électrodes et lui conférer plus d'énergie et de puissance), dans la peinture écran électromagnétique (éviter les interférences avec les champs électromagnétiques extérieurs), dans la coque pour la renforcer mécaniquement.

### ■ Les oxydes de titane

Le titane est connu depuis des lustres comme pigment blanc. C'est le dioxyde de titane (sous forme de particules de 250 à 350 nanomètres) qui est ajouté dans les peintures, les plastiques, les céramiques, les papiers, les encres, les bitumes dès lors qu'on cherche à produire du blanc opaque... En médecine, l'oxyde de titane est aussi largement utilisé dans les prothèses orthopédiques et dentaires (implants dentaires, prothèses orthodontiques, crochets...).

Depuis une quinzaine d'années, il a été découvert qu'en produisant des poudres ultrafines de moins de cent nanomètres, des propriétés nouvelles apparaissent : le produit devient transparent et absorbe parfaitement les ultra-violets. L'industrie cosmétique comme l'anglais Boots avec ses crèmes solaires Optisol, mais aussi L'Oréal, s'est donc passionnée pour ces nanopoudres qu'elles ont introduites dans de nombreuses gammes de produits en complément de l'oxyde de zinc (ZnO) intégré pour ses propriétés réfléchissantes. « Avec des particules de soixante nanomètres, l'effet antisolaire est optimum, souligne Francis Quinn du Groupe L'Oréal. Il existe deux formes cristallines, le rutile et l'anatase<sup>60</sup> mais nous n'utilisons que le rutile ».

Les industries de la cosmétique recourent aussi aux oxydes de zinc pour améliorer la tenue des rouges à lèvres, et à de la poudre de zircon pour les vernis à ongles. Les produits anti-âge ont le vent en poupe comme *Zelens Fullerene C-60, Face Cream* (qui contient des nanoparticules d'anti-oxydants), *Eternalis Night Cream* de *Beyond Skin Science* ou encore les produits de *Nanocentivas* qui débarrassent le corps des radicaux libres.

Le dioxyde de titane ultrafin (TiO<sub>2</sub>) présente par ailleurs des atouts écologiques : c'est en effet, un catalyseur (uniquement sous sa forme anatase) utilisé dans les moteurs diesel mais qui peut aussi servir à la destruction chimique des oxydes d'azote issus du trafic automobile... Mélangé à un coulis spécial à base de ciment, l'oxyde de titane permet une réaction de photocatalyse. Cette réaction chimique fonctionne avec les rayons du soleil et plus il y a de soleil, meilleurs sont les résultats de ces « mangeurs de pollution ». Ces atouts intéressent les cimentiers comme Italcementi qui incorporent déjà le nanotitane dans leurs ciments, bétons ou pavés de trottoirs. Dans les villes, les municipalités mettent en place des trottoirs « autonettoyants » comme à Vanves, en banlieue sud de Paris (où les ciments TX Aria ont été produits par Calcia). Pour minimiser les dépenses d'entretien des façades, les bétons de revêtement sont enrichis en nanoparticules de titane comme à la Cité de la musique à Chambéry ou pour l'église

---

<sup>60</sup> In *Critical reviews in Toxicology*, 37:1-27, 2007- *Grey Goo on the Skin? Nanotechnology, Cosmetic and Sunscreen Safety*, 23 janvier 2007 - par Jürgen Lademann, Hôpital La Charité- Université de médecine de Berlin, Michael S. Roberts, Université de Queensland Brisbane, Australie et Gerhard J. Nohynek et Christele Ribaud, tous deux salariés de L'Oréal.

du jubilé à Rome. Le nanotitane est très utilisé dans les peintures en Asie, notamment au Japon.

Enfin, le dioxyde de titane sert dans l'industrie agroalimentaire comme agent blanchissant pour des glaçages, l'enrobage des chewing-gums ou des bonbons. Il est employé sous ses deux formes rutilé et anatase, comme additif alimentaire (E171). L'américain *Mars Inc.* a obtenu en 1998, le brevet US 5741 505, sur les « produits comestibles à enrobage inorganique ». L'enrobage empêche l'oxygène ou l'humidité d'atteindre le produit, ce qui accroît sa durée de conservation.

### ■ Le nanoargent

Le nanoargent est un puissant antibactérien, bien plus efficace que les formes classiques de l'argent ou que la plupart des autres produits utilisés pour tuer les bactéries. Comme il est très facile à obtenir et que le marché des antibactériens est en pleine expansion (+40% par an), ses applications connaissent un essor rapide, notamment aux Etats-Unis et en Asie, dans des domaines variés :

- Textile, pour fabriquer des chaussettes et autres vêtements « anti-odeurs »
- Cosmétiques et soins, pour des crèmes, des savons, des dentifrices, des sprays antibactériens, des pansements actifs voire des contraceptifs féminins...
- Electronique et électroménager, pour des revêtements antibactériens sur les souris et claviers d'ordinateurs, les planches à découper, les réfrigérateurs, les climatiseurs, les machines à laver, les aspirateurs sans sac, etc.
- Emballages alimentaires, pour un allongement de la durée de conservation des aliments et une lutte active contre les infections alimentaires
- Films et vernis pour peinture, pour des surfaces plus nettes et plus propres
- Accessoires de la vie quotidienne, pour des objets « naturellement » aseptisés : robinets, bracelets de montre, peluches, etc.

Le nanoargent représente actuellement plus de 50% des nanoproducts commercialisés et sa production (très importante en Corée) est amenée à croître fortement dans les années à venir.

### ■ Les nanosilices

Les nanotechnologies apportent aussi des solutions pour améliorer les textures des produits alimentaires (rendus plus onctueux, plus homogènes), pour rehausser ou programmer leurs goûts ou leurs couleurs (à volonté), pour augmenter les effets énergisants, ou développer des emballages actifs, anti-UV, antimicrobiens ou avec capteurs. Mais rien ne transparaît de ces projets sur les sites internet des entreprises concernées... On pouvait pourtant dénombrer 35 brevets – dont six issus de structures chinoises - dans ce domaine dès 2004<sup>61</sup>.

Côté texture, Nestlé et Unilever s'emploient à améliorer les émulsions pour les rendre plus uniformes. Le recours aux nanoparticules d'oxydes de silice (étiquetés sous la mention E551 sans précision sur la structure micro ou nano) a un effet acidifiant ou antiagglomérant utile pour les laits, soupes, crèmes en poudre, burgers... Son caractère épaississant et abrasif est exploité pour les pâtes dentifrices.

---

<sup>61</sup> Rapport *Down on the farm* d'ETC Group paru en novembre 2004 , P 64-67

## Glossaire

### A

Artémisinine : Substance notamment utilisée dans les traitements médicamenteux contre la malaria et le cancer

### D

Diodes luminescentes : Les diodes luminescentes sont formées d'une succession de cristaux de taille variable de 2 à 100 nanomètres qui possèdent des propriétés électroniques et optiques qui relèvent de la physique quantique. En présence d'un courant électrique, chaque cristal est excité et désexcité et émet un rayon lumineux : du bleu pour les petits cristaux au rouge pour les plus gros, ce qui permet globalement de recréer de la lumière blanche.

### F

Fullerènes : Les fullerènes sont des composés d'atomes de carbone, formant des sphères. Le premier fullerène a été découvert en 1985, il s'agit du C<sub>60</sub> composé de 12 pentagones et 20 hexagones.

### I

Informatique ubiquitaire : Ce terme a été inventé par Mark Weiser, responsable du Centre de recherches de *Xerox* à Palo Alto, pour désigner des myriades de dispositifs de traitement en réseaux, intégrés et distribués.

### M

Machines molles : Ce terme désigne des automates capables de s'adapter à leur environnement et d'évoluer avec lui

### N

Nanite : Le terme nanite est utilisé pour qualifier des nanorobots dans la littérature de science fiction.

Nanoaliment : Les nanoaliments sont des produits alimentaires dont la fabrication comporte comme ingrédients des nanoparticules.

Nanocapsule : Une nanocapsule est un objet creux de taille nanométrique ayant la fonction de réservoir ambulant dans lequel un principe actif peut être incorporé, dans un but thérapeutique, cosmétique...

Nanocapteur : Un nanocapteur est un objet fabriqué dont la dimension est comprise entre 1 et 100 nm et disposant de capacités de détection et/ou de mesure.

Nanomatériau : Un nanomatériau est un matériau composé de structures de taille nanométrique comme les nanoparticules.

Nanomicelle : Une nanomicelle est un agrégat de forme sphérique, de molécules, d'une taille de 1 à 100 nm.

**Nanoobjet :** Un nanoobjet (nano-objet) est un objet dont la dimension est comprise entre 1 et 100nm. Parmi les nanoobjets : les nanoparticules, les nanotubes...

**Nanoparticule :** Le terme « nanoparticule » désigne des grains très fins dont une des dimensions est comprise entre 1 et 100 nanomètres.

**Nanopore :** C'est un pore de taille nanométrique (entre 1 et 100 nm) que l'on trouve en quantité sur certains matériaux destiné à filtrer des substances gazeuses ou liquide et retenant bactéries et virus.

**Nanoproduit :** c'est un terme générique pour qualifier l'ensemble des objets, structures, dispositifs systèmes de taille nanométrique (dont une des dimensions est comprise entre 1 et 100 nm).

**Nanostructuré :** un matériau nanostructuré est un matériau dont la masse ou la surface a été modifié par des procédés nanotechnologiques afin d'améliorer ses propriétés ou lui en confier de nouvelles

**Nanotechnologies vertes :** nanotechnologies visant la protection de l'environnement (isolants thermiques, revêtement autonettoyant...)

**P**

**Phénomènes quantiques :** Les phénomènes quantiques reposent sur le fait que le monde de l'infiniment petit se comporte très différemment de l'environnement macroscopique auquel nous sommes habitués. Dans ce monde, toute prévision est probabiliste.

**Pile à combustible :** La pile à combustible produit de l'électricité en convertissant de l'hydrogène et de l'oxygène en eau. Encore peu utilisées, elles nécessitent du platine et d'autres métaux très chers et de disposer d'hydrogène difficile à produire.

**U**

**Uploading (de l'esprit) :** Il s'agit du transfert (ou téléchargement) de l'esprit d'une personne vers un autre support vivant

**T**

**Transhumanisme :** Le transhumanisme est une idéologie qui défend le recours aux techniques pour augmenter les aptitudes mentales et physiques et améliorer les aspects indésirables de la condition humaine, comme la souffrance, la maladie, le handicap, le vieillissement ou la mort involontaire. Le terme de « transhumanisme » a été utilisé pour la première fois par le biologiste Julian Huxley – le frère d'Aldous – pour désigner un dépassement de l'humanité.