



Comment maîtriser les risques posés par les Nanotechnologies ? L'approche américaine

Sommaire

Octobre 2006

Introduction

I – Toxicité et impacts environnementaux des nanotechnologies.

- 1 – Une nouvelle révolution industrielle ?
- 2 – Les facteurs de risque.

II – L'organisation de la recherche sur les risques au niveau de la National Nanotechnology Initiative.

- 1 : L'engagement de la National Nanotechnology Initiative
- 2 : L'action du NEHI
- 3 - L'action de la NSF
- 4 : Nanotechnologies et environnement
- 5 : Risques sanitaires
- 6 : Règlementation et standards

III - Les initiatives locales ou privées

IV – Quelques exemples d'études et de travaux

Conclusion



Editorial

Les nanotechnologies représentent un enjeu économique majeur et tous les pays développés y investissent des sommes de plus en plus importantes.

Alors que certaines applications sont déjà sur le marché, les risques associés à ces nouvelles technologies et aux nouveaux produits qu'elles génèrent sont encore mal connus. Beaucoup de questions se posent sur l'impact environnemental des processus de production, sur les problèmes de transport, de stockage et de cycle de vie des nanomatériaux, et on dispose de très peu de données sur leur interaction avec les systèmes vivants, de sorte qu'il est difficile d'évaluer aujourd'hui le danger potentiel qu'ils représentent pour la santé humaine.

Répondre à ces questions nécessite qu'un effort important de recherche sur l'impact des nanomatériaux soit développé dans les domaines de l'environnement, de la santé et de la sécurité.

Nous avons souhaité pour ce troisième numéro 2006 de Sciences Physiques Etats-Unis faire le point sur l'approche américaine.

Roland Hérino

*Attaché pour la Science et la Technologie
Houston*

Introduction

Le développement des nanotechnologies a déjà conduit à la commercialisation de plusieurs centaines de produits contenant des nanomatériaux, mais ce ne sont là que les prémices d'une révolution annoncée. Les analystes du secteur estiment qu'en 2015 les produits élaborés à partir des nanotechnologies représenteront un marché mondial de plus de mille milliards de dollars qui générera plus de deux millions d'emplois (1). La production de nanomatériaux, à peine lancée à l'échelle industrielle, devrait ainsi connaître une croissance exponentielle dans les prochaines années, et toucher de très nombreux secteurs : la production d'énergie, l'électronique, l'optique, la médecine et la pharmacie, la chimie, l'agro-alimentaire, l'aéronautique, la défense, l'automobile, la construction, la cosmétique, le textile, etc. Le tableau ci-contre, extrait d'un rapport de l'Unesco (2), dresse une liste d'applications potentielles dans des secteurs clés qui sont vitaux pour de nombreux pays du tiers-monde.

Ce développement rapide est stimulé par des investissements importants dans la recherche (9,6 milliards de dollars pour 2005) dans un contexte international très compétitif. Cependant la déferlante 'nano' amène son lot d'interrogations quant aux risques que pourra poser la prolifération de nanomatériaux dont les effets sur la santé et l'environnement sont encore mal connus. Les Etats-Unis, pays leader dans la recherche et l'industrialisation des nanotechnologies, sont en première ligne pour faire face aux risques potentiels des technologies de l'infiniment petit qui pourraient profondément changer la société de demain. Ce rapport fait le bilan des questions que pose l'évaluation de ces risques et tente de faire le point des initiatives qui sont prises aux Etats-Unis dans le but d'y répondre.

I – Toxicité et impacts environnementaux des nanotechnologies

1 – Une nouvelle révolution industrielle ?

On considère souvent les nanotechnologies comme un nouveau secteur industriel mais il s'agit plutôt d'un ensemble de techniques, d'outils et de procédés qui permettent de manipuler la matière à une échelle en dessous de la centaine de nanomètres. Cette expertise permet aujourd'hui de créer des nanomatériaux artificiels qui possèdent des propriétés uniques dont les applications potentielles sont innombrables et touchent de très nombreux domaines. De nombreux produits manufacturés incluant des nanomatériaux sont déjà offerts aux consommateurs (parfois sans qu'ils le sachent) : on trouve des nanoparticules dans certains cosmétiques (crèmes solaires en particulier), vêtements, peintures, articles de sports, etc. Des estimations faites par la Royal Society (3) chiffrent la production actuelle de nanomatériaux à 1000 tonnes par an (principalement pour l'industrie des cosmétiques). Ce chiffre devrait doubler d'ici 2010, et atteindre les 58 000 tonnes au cours

Applications des nanotechnologies	
	Exemples
Stockage, production et conversion d'énergie	Stockage de l'hydrogène à base de nanotubes de carbone ou autres nanomatériaux Cellules photovoltaïques et dispositifs organiques électroluminescents à base de quantum dots Nanotubes de carbone pour le revêtement de cellules solaires Nano-catalyseurs pour la génération d'hydrogène
Amélioration de la productivité agricole	Nanocapsules pour la distribution d'herbicides Nanocapteurs pour le contrôle de la qualité des sols et de la santé des plantes Nano-aimants pour la décontamination des sols
Traitement et assainissement de l'eau	Nanomembranes pour la purification de l'eau, la désalinisation et la détoxification Nanocapteurs pour la détection de contaminants et de pathogènes Nanoparticules magnétiques pour le traitement de l'eau Nanoparticules TiO ₂ pour la dégradation catalytique de polluants de l'eau
Diagnostics et dépistage de maladies	Biopuces pour des tests biologiques sur des nanolitres d'échantillon Nanocapteurs biologiques avec des nanotubes de carbone Quantum dots et nanofils pour le diagnostic Nanoparticules magnétiques comme nanocapteurs Nanoparticules comme agents de contraste pour l'imagerie médicale
Vecteurs de médicaments	Nanocapsules, liposomes, fullerènes, nanobioaimants pour la délivrance contrôlée de médicaments
Stockage et traitement des aliments	Nanocomposites pour les films plastiques utilisés pour les emballages d'aliments Nanoémulsion antimicrobienne pour la décontamination de la nourriture, des emballages et des équipements Biocapteurs à antigènes pour la détection de pathogènes
Traitement de la pollution atmosphérique	Nanoparticules pour la dégradation photocatalytique des polluants de l'air pour des systèmes autonettoyants Nanocatalyseurs pour des pots catalytiques plus efficaces et moins chers Nanocapteurs pour la détection de polluants Nanosystèmes pour la séparation de gaz
Construction	Nanomatériaux pour des surfaces, revêtements, ciment, etc. plus résistants et moins chers Surfaces autonettoyantes avec revêtement bioactif Nanomatériaux résistants mieux à la chaleur et bloquant les UV et les radiations infrarouges

de la prochaine décennie grâce à de nouvelles applications pour les matériaux structurels et l'environnement.

Nombreux sont ceux qui prédisent que les nanotechnologies pourront aider à résoudre des problèmes majeurs dans des secteurs aussi différents que celui de l'énergie, de la médecine ou encore de l'environnement.. Beaucoup de ces bénéfices attendus restent encore très prospectifs, et ne deviendront réalité que d'ici une dizaine d'années, voire bien plus, sachant que le développement à maturité des nanotechnologies s'étendra probablement sur plusieurs décennies. Les différentes étapes successives du développement des nanotechnologies (telles que les prévoit une analyse de

M.C. Roco (4)) se déclinent en quatre générations de produits de plus en plus élaborés, allant de nanostructures isolées passives, puis actives, à l'élaboration de systèmes de nano systèmes mettant à profit des techniques d'auto-assemblage moléculaire, et qui nécessiteront des recherches qui s'étaleront sur toute la première moitié du XXI^{ème} siècle.

Bien que les acteurs du secteur aient tendance à insister sur les innombrables bénéfices des nanotechnologies, il se développe depuis quelques années un questionnement sur les risques collatéraux de ces bénéfices. La compétition qui s'est développée entre les pays afin de profiter des apports des nanotechnologies a créé une situation où la recherche sur les risques potentiels est très en retard sur le développement d'applications et l'industrialisation de nanomatériaux. Cette situation périlleuse n'a pas encore d'impact notable dans la mesure où la taille actuelle du secteur des nanotechnologies reste relativement petite, mais au fur et à mesure que son importance croît, le statu quo pourrait mettre en danger non seulement l'environnement et la santé des personnes exposées mais également devenir fatal pour le développement ultérieur des nanotechnologies qui pourraient connaître un sort similaire à celui des OGM en France.

2 – Les facteurs de risque

Les risques posés par les nanomatériaux, tout comme ceux posés par les produits chimiques, peuvent difficilement être généralisés, tant le danger et le risque d'exposition peut varier d'un produit à l'autre, et selon le type d'application. On peut cependant identifier relativement aisément quelles sont les propriétés qui sont susceptibles de les rendre dangereux.

Ce sont en effet leurs caractéristiques qui confèrent aux nanomatériaux leurs propriétés exceptionnelles qui constituent par elles-mêmes des facteurs de risque. Le comportement original des nanomatériaux provient principalement de leur très petite taille et de la valeur exceptionnellement élevée du rapport entre le nombre d'atomes de surface et le nombre total d'atomes qui constituent ces objets. Leur réactivité et leurs propriétés physico-chimiques (solubilité, agrégation) sont fortement influencées par les caractéristiques de leur surface : aire, structure, pureté, fonctionnalisation, etc. Ce sont sur elles que se basent de nombreuses applications, mais elles sont aussi un sujet de préoccupation quant à leurs effets sur les systèmes biologiques.

La taille nanométrique des nanoparticules peut leur conférer de nouvelles propriétés biologiques dans la mesure où elles peuvent pénétrer à l'intérieur des cellules plus facilement que des particules de taille micrométrique. Cette particularité qui est exploitée pour fabriquer des agents thérapeutiques capables de pénétrer à l'intérieur des cellules peut se révéler dangereuse. Des particules de taille nanométrique sont susceptibles de franchir les barrières cellulaires et traverser tous les mécanismes de protection respiratoire ou gastro-

intestinale, elles peuvent être entraînées dans le sang vers les différents organes et s'accumuler sur certains sites spécifiques, ou encore se déplacer le long des nerfs olfactifs pour pénétrer dans le cerveau. Des nanoparticules peuvent ainsi se retrouver distribuées un peu partout dans l'organisme des personnes exposées. Plusieurs études soulignent l'importance du paramètre "taille" sur les effets toxicologiques, comme les travaux du Prof. Oberdörster (5) qui montrent que l'instillation de particules de TiO₂ de 20 nm de diamètre chez des rats et des souris entraîne une réponse inflammatoire plus importante que celle induite par la même masse de particules de 250 nm de diamètre.

Au fur et à mesure que la taille d'une particule diminue, la proportion d'atomes appartenant à la surface augmente dramatiquement. L'augmentation de la surface spécifique a un effet prononcé sur la réactivité des très petites particules, et plusieurs études illustrent l'importance du paramètre "surface" dans les effets toxicologiques des nanoparticules manufacturées. La notion de dose adsorbée doit être reconsidérée pour les nanomatériaux, et il peut être plus pertinent de retenir la surface comme paramètre dosimétrique plutôt que la masse de particules administrée.

La composition chimique des nanoparticules peut être aussi pathogène. La présence d'atomes métalliques en surface (intrinsèques ou comme résidus issus du processus de fabrication) est un élément pouvant contribuer à la toxicité des nanoparticules manufacturées dans la mesure où elle peut favoriser la création de radicaux libres toxiques. Ceci a été démontré, par exemple, dans le cas du fer pour des particules ultrafines provenant de la pollution atmosphérique et dans le cas des nanotubes de carbone (6). Des modifications de surface peuvent être apportées aux nanoparticules en fonction de l'application prévue, en particulier en greffant de nouvelles molécules à leur surface (fonctionnalisation). Ces modifications peuvent avoir un impact majeur sur la toxicité ou l'innocuité des nanoparticules. Des chercheurs de l'Université de Californie à San Diego (UCSD) ont ainsi montré que l'encapsulation des quantum dots de CdSe réduisait considérablement leur cytotoxicité (7). Des résultats semblables ont aussi été obtenus pour les nanotubes de carbones, les fullerènes et les particules de TiO₂.

Les nanoparticules manufacturées peuvent avoir différentes formes (sphères, fibres, tubes, anneaux ou feuilles) qui influencent leur toxicité. Des études toxicologiques ont montré que l'exposition prolongée à des fibres, qu'elles soient naturelles (comme l'amiante) ou fabriquées par l'homme, est associée à un risque élevé de fibrose pulmonaire et de cancer. De même, des études *in vitro* sur les effets de particules de TiO₂ ultrafines sur des cellules en culture ont pu montrer que la forme fibreuse de la molécule est plus toxique que la forme sphérique.

La solubilité des nanoparticules ou leur capacité à former des agrégats est également un facteur important de risque. De nombreuses nanoparticules ont tendance à s'agglomérer pour former des agrégats beaucoup plus gros qu'une particule isolée. Ainsi, la faible solubilité des fullerènes en milieu aqueux se traduit pas une forte tendance à l'agrégation hydrophobique des molécules. Plusieurs résultats montrent que la formation d'agrégats permet de limiter la dispersion des fullerènes dans l'environnement et de diminuer sensiblement leurs effets délétères sur les bactéries.

II – L'organisation de la recherche sur les risques au niveau de la National Nanotechnology Initiative

1- L'engagement de la National Nanotechnology Initiative

La recherche et le développement dans le domaine des Nanotechnologies aux Etats-Unis sont coordonnés au niveau fédéral par le programme NNI (National Nanotechnology Initiative). Créé en 2001 avec un budget d'environ 450 millions de dollars, ce programme qui a vu son financement presque tripler en 5 ans vise à coordonner les actions de 25 agences fédérales et attribue un soutien financier spécifique à 13 d'entre elles.

Pour une présentation détaillée de la NNI et de la recherche en nanotechnologies aux Etats-Unis, téléchargez gratuitement les rapports de la Mission pour la Science et la Technologie:

http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/2005/smm05_029.htm
http://www.bulletins-electroniques.com/rapports/2005/smm05_052.htm

Les questions relatives à l'impact des nanomatériaux sur l'environnement, la santé et la sécurité (domaine EHS, pour Environment, Health and safety) ont été inscrites dès 2001 dans les thématiques soutenues par la NNI. Courant 2003, le comité NSET (Nanoscale Science, Engineering, and Technology Subcommittee) qui assure la gestion du programme NNI, et qui est constitué des représentants des agences fédérales et de responsables de l'OSTP (Office for Science and Technology Policy), a décidé de mettre en place un groupe de travail spécifique,

Lexique des institutions fédérales et programmes

NSF:	National Science Foundation
EPA:	Environmental Protection Agency
DOD:	Department of Defense
DOE:	Department of Energy
NIH:	National Health Institute
NIOSH:	National Institute for Occupational Safety and Health
FDA :	Food and Drug Administration
USDA:	United States Department of Agriculture
OSHA:	Occupational Safety and Health Administration
NCTR :	National Center for Toxicological Research
NIEHS:	National Institute of Environmental Health Sciences
NTP:	National Toxicology Program (NTP)

le NEHI (Nanotechnology Environmental and Health Implication). L'objectif du NEHI est principalement de promouvoir les échanges entre les différentes agences qui sont impliquées dans la recherche EHS, et qui sont relativement nombreuses (principalement la NSF, le DOD, le NIH, le NIOSH, l'EPA, le NIST, l'USDA), afin d'assurer une meilleure coordination de la recherche.

Le budget de la NNI dédié aux questions EHS augmente d'année en année même s'il reste encore relativement modeste par rapport au budget global. Avec un montant d'environ 35 millions de dollars pour 2005, les Etats-Unis investissent toutefois nettement plus que l'Europe sur les questions EHS qui leur consacre une somme d'environ 7,5 millions de dollars. L'investissement pour la R&D en EHS atteindra pratiquement les 38 millions de dollars en 2006, et la demande faite au président pour 2007 dépasse les 44 millions de dollars. Ces chiffres sont cependant contestés par certains, comme par exemple par le Wilson Center, organisme de conseil indépendant, qui a revu à la baisse les estimations de la NNI en choisissant des critères plus stricts. D'après cet organisme, seulement 11 millions de dollars auraient été investis en 2005 sur des thèmes EHS pertinents, soit 1% du budget total (8). Il est vrai que les chiffres avancés peuvent varier sensiblement en fonction des critères retenus pour classer un projet dans la thématique EHS et aussi parce que de nombreux projets se situent à la frontière d'autres thématiques.

Le tableau ci-dessous détaille la répartition et l'évolution des financements pour les années 2005, 2006 (estimé), et 2007 (budget requis) entre les différentes agences. Ces chiffres sont comparés au budget total de la NNI. On a également indiqué les soutiens financiers accordés par la NNI aux études relatives à la formation et

Budget de la NNI pour la R&D EHS			
(millions de dollars)			
	2005	2006	2007
NSF	20,9	22,1	25,7
DOD	1,0	1,0	1,0
DOE	0,5	0,5	0,0
NIH	2,7	4,5	4,6
NIST	0,0	2,4	1,8
EPA	6,7	3,9	8,0
USDA	0,1	0,1	0,1
NIOSH	3,0	3,0	3,0
TOTAL	34,8	37,5	44,1
Budget de la NNI consacré à l'éducation et aux problématiques éthiques, sociétales et légales			
	33,3	34,1	38,1
Budget total de la NNI			
	1 100	1 300	1 280

aux problématiques éthiques, sociétales et légales relatives aux nanotechnologies.

2- L'action du NEHI

Depuis 2003, c'est donc le groupe de travail NEHI qui est responsable au niveau fédéral des orientations et de la coordination de la recherche dans le domaine EHS au sein du programme NNI. Son rôle est d'identifier les recherches à entreprendre pour assurer un développement responsable des nanotechnologies, d'en établir les priorités et de s'assurer de leur implémentation, ainsi que de favoriser l'échange d'information entre les agences qui supportent le recherche EHS en nanotechnologie et celles qui sont responsables des régulations et des directives sur les nanomatériaux. Le NEHI se charge également d'assurer la communication sur les recherches EHS auprès des agences gouvernementales et autres parties non-gouvernementales. Son action prend aussi en compte les questions de standardisation, de nomenclature et de terminologie en nanotechnologies. Cependant, le rôle du NEHI est essentiellement consultatif et ce groupe de travail n'a pas de véritable pouvoir de décision.

Le NEHI vient de publier un document (9) qui veut tout d'abord être un guide destiné aux différentes agences fédérales qui financent la recherche sur les nanotechnologies pour les informer de la politique générale suivie par la NNI en matière de recherches EHS, de sa programmation et de sa coordination. Ce rapport qui représente ainsi le premier document complet et détaillé sur les objectifs et l'action du gouvernement fédéral dans le domaine EHS, s'adresse aussi à un public bien plus large, et notamment à ceux qui étaient de plus en plus nombreux à s'inquiéter du développement incontrôlé des nanotechnologies et à dénoncer le manque d'engagement du gouvernement dans le recensement et la prévention des risques associés.

3- L'action de la NSF

La NSF, avec un budget 2006 consacré aux recherches relevant des secteurs EHS de plus de 22 millions de dollars, est de loin l'agence dont la contribution est la plus importante. Contrairement aux

autres agences fédérales qui ont des objectifs relativement bien ciblés, la NSF soutient majoritairement des actions de recherche fondamentale de sorte que le spectre des projets sur les thématiques EHS est très large, et difficile à synthétiser. Le tableau de bas de page donne quelques exemples de projets retenus par l'agence sur la thématique "Toxicité des Nanomatériaux" de 2004 à 2006. La NSF finance des opérations de R&D proposées par les universités et instituts de recherche, ainsi que par quelques petites entreprises. Elle assure également le financement du réseau NNIN (NNI Network) qui compte 13 centrales qui rassemblent des équipements lourds et des moyens de caractérisation en nanotechnologies, et d'un ensemble de 16 centres de recherche pluridisciplinaires (les Nanoscale Science and Engineering Centers), ainsi qu'un centre spécialisé dans l'étude des impacts environnementaux (Center for Biological and Environmental Nanotechnology, Rice University, Houston).

4- Nanotechnologies et environnement

L'EPA est la principale agence fédérale américaine pour la protection de l'environnement. A ce titre, elle joue un rôle majeur dans la définition des directions de recherche pour les applications et implications des nanotechnologies à l'environnement, aussi bien dans le cadre de ses propres programmes qu'au sein du NEHI et du sous-comité NSET de l'OSTP. En 2005-2006, l'EPA aura investi plus de 11 millions de dollars pour développer des méthodes visant à utiliser les nanomatériaux pour protéger l'environnement et éliminer les contaminants toxiques des eaux de surface, pour mettre au point des méthodes de production "verte" de nanomatériaux. En ce qui concerne les risques, l'EPA finance des projets qui portent sur des études de toxicité, de dissémination, de transport et de transformation des nanomatériaux manufacturés pendant leur cycle de vie (quantum dots, nanotubes de carbone, nanofils, etc.), ainsi que sur les aspects d'exposition et de bioaccumulation. L'EPA vient de lancer en septembre 2006 en concertation avec la NSF et le NIOSH un appel

Exemples de projets financés par la NSF en Toxicologie (2004 - 2006)		
Titre du Projet	Université	Soutien NSF
Size Dependant Neural Translocation of Nanoparticles	University of Rochester	\$200 000
Reverse Engineering Cellular Pathways from Human Cells Exposed to Nanomaterials-Development of Novel Risk Assessment Methods	Houston Advanced Research Center	\$200 000
Biochemical, Molecular and Cellular Responses of Zebrafish Exposed to Metallic Nanoparticles	University of Florida Center for Environmental and Human Toxicology	\$350 000
Cross-Media Environmental Transport, Transformation, and Fate of Manufactured Carbonaceous Nanomaterials	Virginia Polytechnic Institute and State University	\$350 000
Lung Deposition of Highly Agglomerated Nanoparticles	U Minnesota Twin Cities	\$400 000
Aggregation and Deposition Behavior of Carbon Nanotubes in Aquatic Environments	Yale University	\$400 000
The Life Cycle of Nanomanufacturing Technologies	University of Illinois at Chicago	\$200 000

Exemples de projets financés par l'EPA (2004 - 2007)		
Titre du Projet	Université	Soutien EPA
Réponses des cellules pulmonaires aux métaux présents dans des nanoparticules manufacturées	Université de l'Utah	\$332 000
Toxicité chronique des nanoparticules photocatalytiques pour les bactéries, les algues et le zooplancton	Université de Delaware	\$335 000
Effets des nanoparticules manufacturées carbonées sur les processus microbiens dans des systèmes environnementaux	Université de Purdue	\$350 000
Toxicité des nanomatériaux dendritiques : une étude physico-chimique et génotoxique intégrée	California Institute of Technology	\$375 000
Biopersistance et toxicologie d'oxydes métalliques nanométriques inhalés	Institut de Recherche Respiratoire Lovelace	\$375 000
Effets sur la santé de nanomatériaux inhalés	Université de Californie – Davis	\$335 000

d'offre intitulé "Nanotechnology Research Grants Investigating Environmental and Human Health Effects of Manufactured Nanomaterials:", et les mêmes agences ouvriront en avril prochain un nouveau programme "Investigating Environmental Effects of Manufactured Nanomaterials" en association avec l'Union Européenne. Le tableau ci-dessus donne quelques exemples de projets financés récemment par l'EPA. Le DOD soutient aussi des recherches dans le domaine de l'environnement qui portent sur le contrôle de la toxicité de l'eau et de l'air, ainsi que sur les moyens de protection contre une utilisation non pacifique des nanotechnologies. L'EPA contribue par ailleurs dans le cadre du programme SBIR (Small Business Innovation Research) aux aides aux PME pour le développement d'applications utiles aux thématiques nano EHS.

Soulignons pour terminer que l'EPA prévoit de doubler en 2007 son budget consacré aux risques environnementaux des nanotechnologies.

5- Risques sanitaires

Les NIH sont des acteurs très importants du programme NNI, et sont engagés dans plusieurs actions qui visent principalement à exploiter les nanotechnologies pour améliorer la compréhension, le diagnostic et le traitement des maladies. L'activité orientée vers les risques sanitaires reste très limitée : sur un budget 2005 de 145 millions de dollars dédié aux nanotechnologies, moins de 3 millions sont allés au soutien de recherches liées à ces aspects.

Avec le National Institute of Environmental Health Sciences (NIEHS), les NIH sont impliqués dans le National Toxicology Program qui relève du Department of Health and Human Services et qui développe une action appelée Nanotechnology Safety Initiative. Deux autres agences sont également partie prenante dans cette initiative, le National Institute for Occupational Safety and Health of the Centers for Disease Control and Prevention (NIOSH/CDC) et la FDA avec son National Center for Toxicological Research. La Nanotechnology Safety Initiative est focalisée sur 3 principaux axes de recherche : les nanomatériaux dans les produits commerciaux auxquels l'homme est intentionnellement

exposé (en dehors des médicaments) comme les cosmétiques et les crèmes solaires, les nanomatériaux qui représentent des familles spécifiques dont le comportement peut être extrapolé aux autres constituants du groupe, et des ensembles de nanomatériaux choisis pour tester spécifiquement des hypothèses sur un paramètre physicochimique-clé (comme la taille, la forme, la composition ou la chimie de surface) qui peut être corrélé à une activité biologique. Les projets soutenus dans ce cadre portent sur les oxydes métalliques, les nanocristaux semiconducteurs fluorescents (quantum dots), les fullerènes et les nanotubes de carbone. Les NIH financent à travers le NCI (National Cancer Institute) le Nanotechnology Characterization Laboratory mis en place récemment dans le cadre d'un partenariat avec la FDA. Ce laboratoire s'intéresse en particulier à la caractérisation des propriétés biologiques des nanoparticules *in vitro*, ainsi qu'à des études *in vivo* de leur compatibilité biologique sur des modèles animaux. Il contribue à identifier les relations entre la structure physique des nanomatériaux et leur activité biomédicale.

Le NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health) est l'agence dont l'activité "nano" est la plus clairement engagée sur les aspects EHS. Ses efforts visent à tenter d'apporter des réponses aux questions essentielles que posent la compréhension des implications des nanotechnologies : de quelle manière les travailleurs de l'industrie peuvent-ils être exposés aux nanoparticules lors de la fabrication ou de la manipulation des nanomatériaux, comment les particules interagissent-elles avec le système corporel, quels effets ont-elles sur les systèmes vivants ? Le NIOSH a ainsi mis en œuvre en 2005 un plan stratégique sur 5 années (le NIOSH Nanotechnology and Health & Safety Research Program) dédié à l'étude des risques sanitaires et à la toxicité associée à l'exposition aux nanoparticules sur le lieu de travail. Il faut souligner une action concrète qui est la création par le NIOSH d'une base de données consultable en ligne, la NIL (Nanoparticle Information Library) qui répertorie les nanoparticules utilisées aujourd'hui (10).

Pour finir, il faut également signaler l'existence du Health Effects Institute, qui est une organisation indépendante qui soutient des recherches destinées à fournir des données impartiales et pertinentes sur les effets sur la santé de la pollution atmosphérique. Cet organisme reçoit la moitié de ses fonds de l'EPA, l'autre moitié venant principalement de sponsors appartenant à l'industrie automobile mondiale. Le HEI a diligenté depuis de nombreuses années des études sur les nanoparticules issues de la combustion. Cette institution n'a pas encore initié de programme de recherche spécifique dans le domaine des nanoparticules manufacturées, mais a beaucoup contribué à la prise de conscience sur l'impact de la taille des particules quant à leur effet toxique par inhalation.

6- Réglementation et standards

Une question qui est clairement associée à la toxicité des produits est celle de l'information du consommateur, et ainsi de la classification des nanoparticules, et donc du développement de standards et d'une réglementation. Une des questions clés relative à la production de tout nouvel objet technique ou scientifique est le degré de confiance que les consommateurs et les citoyens accordent à l'information qui leur en est donnée. Les aliments génétiquement modifiés en sont l'exemple négatif le plus évident, et le plus inquiétant, pour les entreprises qui souhaitent investir dans les nanotechnologies. L'état actuel des travaux sur les effets des nanoparticules sur la santé et la sécurité des individus est encore trop sujet à controverse pour pouvoir donner lieu à une communication claire sur les risques, quels qu'ils soient. Pour compliquer un peu plus le problème, il n'y a pas actuellement de consensus en ce qui concerne les réglementations sur la question de savoir s'il faut traiter les nanoparticules et les nanomatériaux comme des produits totalement nouveaux, ou bien comme une classe particulière de matériaux existants.

La mise en place d'une nouvelle standardisation est nécessaire, incluant nomenclature et terminologie, en particulier pour développer un langage commun pour décrire les nanoparticules, et des matériaux de référence doivent être définis pour permettre de mieux appréhender les risques et classer les toxicités. L'engagement du NIST dans les nanotechnologies constitue ainsi un élément indispensable pour les questions EHS. Le NIST a consacré 2,4 millions de dollars pour l'année 2006 à des actions spécifiques à la thématique EHS. Les activités du NIST sont développées aussi bien dans ses laboratoires propres, et notamment dans le nouvel Advanced Measurement Laboratory, inauguré en 2004, qu'en partenariat avec le monde académique. Le DOE de son côté finance directement 5 laboratoires de recherche dédiés aux nanotechnologies qui sont autant de centres qui contribuent à la caractérisation des nanoparticules.

L'ANSI (American National Standard Institute) a de son côté mis en place en août 2004, un groupe de travail appelé ANSI-Nanotechnology Standards Panel (ANSI-

NSP) dont les préoccupations sont dans la même lignée que celles du NIST. Ce groupe veut être un forum qui rassemble monde académique, entreprises, institutions travaillant sur les standards, et agents gouvernementaux, pour que toute la communauté soit impliquée dans la définition des besoins, avec l'objectif de mettre en place un plan de travail et établir des priorités pour la mise à jour de standards et la création de nouveaux standards

III – Les initiatives locales ou privées

Plusieurs initiatives qui ne sont pas directement associées à la NNI ont été lancées par des organismes indépendants ou des institutions locales américaines pour informer et sensibiliser l'opinion publique et les décideurs sur les questions EHS. On citera ici les plus significatives.

Le Project on Emerging Nanotechnologies (PEN) a été lancé en avril 2005 par le Woodrow Wilson International Center for Scholars en partenariat avec le Pew Charitable Trusts (11). Le Woodrow Wilson International Center for Scholars est une organisation à but non lucratif, établie par le Congrès en 1968 en mémoire du président Wilson et basée à Washington D.C., qui est engagée dans l'étude d'affaires nationales et internationales. Le Pew Charitable Trusts est un organisme privé philanthropique basé à Philadelphie (avec un bureau à Washington D.C) qui finance des recherches et des sondages avec l'objectif de fournir au grand public une information indépendante et non partisane sur les grandes questions sociétales, et qui vise à proposer des solutions politiques aux problèmes importants posés aux américains.

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 et de créer un véritable dialogue public – politiques sur le développement des nanotechnologies. L'objectif est de sensibiliser le public aux risques et bénéfices potentiels. Le PEN s'attache à fournir une source de données indépendantes et objectives pour informer et orienter les décisions affectant le développement et la commercialisation des nanotechnologies. Le PEN est aussi engagé dans des actions éducatives auprès des universités. Toutes les publications du PEN (rapports, enquêtes) sont à la disposition du public. Parmi les actions entreprises par le PEN, on notera un inventaire des recherches EHS en nanotechnologies, sous la forme d'une base de données consultable en ligne qui donne accès à la description des projets de recherche, à leur durée et à la date de leur mise en œuvre, aux noms des investigateurs ainsi qu'aux montants et sources des financements (12). Une autre initiative du PEN est l'inventaire des produits commerciaux incorporant des nanomatériaux ou mettant en jeu les nanotechnologies pour leur élaboration. Ces données sont également consultables en ligne (13).

ICON (International Council On Nanotechnology) est une organisation qui s'est mise en place sous l'impulsion du CBEN (Center for Biological and Environmental Nanotechnology) de Rice University (Houston, Texas). ICON s'est donné pour mission d'œuvrer pour une bonne intendance des nanotechnologies, en s'appuyant sur les résultats de la recherche, sur l'évaluation des risques, et sur la communication. L'organisation se veut internationale, même si elle est pour l'instant majoritairement constituée d'acteurs américains avec un nombre important d'industriels. Le monde académique et les agences gouvernementales et non-gouvernementales y sont aussi représentés (voir tableau en bas de page). Les activités d'ICON peuvent se décliner selon quatre axes principaux : 1/ l'organisation de forums et conférences sur les questions EHS, 2/ la mise en ligne d'une base de données répertoriant les publications scientifiques sur les risques en nanotechnologies (14), 3/ l'information des décideurs, 4/ la vulgarisation de données scientifiques complexes à destination du grand public et des acteurs des nanotechnologies. Signalons qu'ICON a mis en place un groupe de travail sur l'étude des bonnes pratiques pour la manipulation des nanomatériaux dans l'industrie. Une enquête financée par ICON et conduite par l'Université de Californie à Santa Barbara (USCB) est actuellement en cours auprès d'une cinquantaine d'entreprises installées aux Etats-Unis, en Europe et en Asie du Sud Est afin de faire le bilan actuel des mesures de gestion du risque. Il s'agit de mener une étude approfondie des processus industriels, de la production à la récupération des déchets, afin de permettre d'identifier les méthodes les plus sûres pour travailler avec les nanomatériaux.

Quelques initiatives relèvent directement du secteur industriel. On peut notamment citer la mise en place d'un

Industriels de la chimie américaine participant au CI - CBAN
. Air Products & Chemicals Inc.
. British Petroleum
. Cabot
. Ciba Specialty Chemicals
. The Dow Chemical Company
. E.I. du Pont de Nemours and Company
. Eastman Chemical Company
. General Electric Company
. Praxair, Inc.
. Rohm and Haas Company
. Shell
. Solutia
. Westinghouse Savannah River Company
. American Chemical Society
. American Institute of Chemical Engineers
. Council for Chemical Research
. Materials Technology Institute

groupe de réflexion sur les questions EHS par les grandes entreprises américaines du secteur chimie, en partenariat avec la NNI, le Chemical Industry - Consulting Board for Advancing Nanotechnology (CI – CBAN) (15). Le tableau ci-dessus donne la liste des entreprises participantes. L'industrie chimique est évidemment la première impliquée dans la fabrication des nanomatériaux, et elle a tout intérêt à ce que l'important développement annoncé de ce secteur se fasse dans des conditions bien maîtrisées au niveau des risques. Poussée par des raisons similaires, l'industrie des semi-conducteurs, a elle aussi formé un groupe de travail, le SRC NNI Consultative Working Group # 5 (CWG5), lequel s'est d'ailleurs rapidement associé au groupe de l'industrie chimique. Ce consortium a défini 5 priorités sur les questions EHS : 1/ développement d'une métrologie adaptée pour l'évaluation de la toxicité des nanoparticules, 2/ développement de méthodes de contrôle et de mesure de l'exposition aux nanoparticules, 3/ développement d'une méthodologie pour l'évaluation des risques d'exposition, 4/ mise en place d'une stratégie de test de la toxicité des nanoparticules, 5/ la communication au public et la formation.

Signalons aussi le lancement en octobre 2005 du Nanoethics Group qui veut répondre, selon ses responsables, à la fois à une certaine inquiétude du grand public et à un manque d'information sur ce domaine. L'équipe qui se déclare indépendante de tout groupe de pression, industriel ou politique, est constituée de professionnels de l'éthique qui ont une bonne expérience à la fois en nanotechnologies et en communication, comme le Dr Fritz Allhoff, l'un de ses cofondateurs, professeur à Western Michigan University qui a été associé à l'American Medical Association's Institute of Ethics. Le Nanoethics Group se propose d'étudier les questions relatives aux effets des nanotechnologies sur l'environnement, sur la santé, aux utilisations militaires, aux aspects de respect de la vie privée, etc... et d'aider à

Membres de l'ICON
. EPA
. Univ of South Carolina
. Swiss Reinsurance Company
. Intel
. Bracewell & Giuliani, LLP
. Woodrow Wilson International Center
. Procter & Gamble
. FDA
. Carbon Nanotechnologies Inc.
. DuPont
. Frontier Carbon Corporation
. Nanobusiness Alliance
. University of Rochester
. Foresight Institute
. L'Oréal
. Clorox
. Japanese Industrial Standards Committee
. Mitsubishi Corporation
. US Consumer Product Safety Commission
. Napier University, UK
. NNI Coordination Office
. Environmental Defense

éduquer le grand public qui reste encore très peu familier de ces nouvelles technologies et qui ignore en quoi elles pourraient changer sa vie, en mieux ou en pire...!

IV – Quelques exemples d'études et de travaux

Les projets de recherche en nanotechnologies relatifs à la thématique EHS sont relativement nombreux et diversifiés. Selon l'inventaire réalisé par le Wilson center, on compte plus de 150 projets qui sont aujourd'hui en cours de développement (16). Le tableau de la page suivante donne quelques exemples significatifs de projets qui sont développés actuellement.

Les recherches se répartissent essentiellement sur deux principaux secteurs, celui des questions de santé publique (pour environ 60% des financements) et celui de l'environnement (environ 20% des financements). Les autres 20% vont à divers autres projets, dont certains sont à la frontière santé – environnement, et d'autres relatifs à l'évaluation du risque industriel, par exemple.

En ce qui concerne les impacts sur la santé, il est nécessaire d'aller vers une meilleure connaissance des nanomatériaux manufacturés quant à leurs propriétés de mobilité, à leur biodisponibilité et à leur impact sur une grande variété d'organismes. Compte tenu de la grande diversité des nanoparticules, et des différentes modifications auxquelles on peut les soumettre, la tâche est immense. Les dérivés du carbone (fullerènes et nanotubes) sont les nanomatériaux de loin les plus étudiés (plus de ¾ des investissements de recherche) et ils sont déjà produits à l'échelle industrielle; il est donc logique qu'ils aient fait l'objet des premières études de toxicité. La revue internationale Carbon a consacré cette année un numéro spécial (volume 44, n°6) intitulé "Toxicology of Carbon Nanomaterials" qui permet de faire le point des recherches réalisées au cours des 10 dernières années sur la toxicité des nanotubes de carbone et des fullerènes, et sur leur biocompatibilité. Un travail important est mené aujourd'hui à Rice University (Houston, Texas) en collaboration avec Yale University sur la solubilisation des fullerènes en relation avec leur toxicité : la fonctionnalisation de leur surface permet de les rendre solubles dans l'eau, à différents niveaux de concentration selon la nature du groupement chimique choisi, et par la-même permet de modifier leur réactivité sur les cellules. Parallèlement, d'autres études relatives à la toxicité des nanomatériaux se focalisent sur les risques résultant d'une inhalation. Des chercheurs du Johnson Space Center de la NASA à Houston s'intéressent ainsi aux possibles effets toxiques des nanotubes sur les poumons de rats, en analysant les tissus pulmonaires après inhalation. D'autres travaux sur l'inhalation de dérivés carbonés nanométriques sont aussi menés par des chercheurs de la société DuPont.

Parmi les autres nanomatériaux étudiés, il faut citer les nanoparticules d'argent qui sont très répandues dans les revêtements stériles de biens de consommation et de matériels médicaux, du fait de leurs propriétés antibactériennes. De façon plus générale, les études de

la cyto-toxicité des nanoparticules métalliques (ou d'oxydes métalliques) se développent beaucoup (University of Florida, University of North Carolina, University of California, Davis) et ce d'autant plus qu'elles sont de plus en plus utilisées au niveau industriel pour fabriquer des catalyseurs, des peintures, des revêtements ou encore des produits cosmétiques (oxyde de titane, oxyde de zinc). Par ailleurs, d'autres recherches s'intéressent aux effets des quantum dots de semiconducteurs II/VI comme CdSe et CdSe/ZnS sur certaines bactéries (California Institute of Technology), ces matériaux étant beaucoup utilisés comme marqueurs fluorescents en biologie.

En ce qui concerne les aspects relatifs à l'environnement, ils dépendent beaucoup de la nature des nanomatériaux, des conditions d'utilisation, de leur séparation en différentes phases (eau et air, par exemple), de leur mobilité dans ces phases, de leur persistance et de l'importance des sources. Il faut remarquer qu'un certain nombre de travaux concerne l'utilisation des nanomatériaux pour l'amélioration de l'environnement comme par exemple la décontamination des sols et des eaux à l'aide de nanoparticules. Les aspects relatifs à la dissémination, au transport des nanoparticules dans les différents milieux environnementaux, et au cycle de vie de ces objets ne sont encore abordés que très ponctuellement. Le transport est lié à la mobilité des nanoparticules qui dépend de leur propension à s'attacher à des surfaces et à former des agrégats. Il est important de savoir où se déposent les molécules, comment elles peuvent se disperser et quelle est leur persistance dans l'environnement. Le CBEN de Rice University développe un programme focalisé sur l'étude des propriétés de transport des nanoparticules carbonées (fullerènes et nanotubes, fonctionnalisés et non fonctionnalisés), notamment dans les sols. Une équipe de l'Université Carnegie Mellon (Pittsburg, Pennsylvanie) aborde les problèmes environnementaux liés au cycle de vie des nanomatériaux. Il faut néanmoins reconnaître qu'il n'y a pas encore aux Etats-Unis une forte mobilisation sur ces thématiques.

Les recherches conduites jusque là aux Etats-Unis pour évaluer les risques relatifs à l'exposition aux nanoparticules des ouvriers de l'industrie sur leur lieu de travail ont essentiellement concerné l'exposition par voie aérienne (NIOSH) et dans une moindre mesure l'exposition par contact avec la peau (North Carolina State University). Les questions de sécurité sont encore peu abordées car elles découlent directement des résultats des études d'impact sur l'environnement et la santé. Compte tenu de l'état actuel de nos connaissances, les consignes de sécurité pour les nanomatériaux sont celles en vigueur pour les matériaux de taille microscopiques. En revanche, beaucoup de données sont disponibles sur les espèces chimiques utilisées pour la production des nanomatériaux. Par exemple, les fullerènes sont produits à partir du benzène, les nanotubes de carbone à partir du monoxyde de carbone, et des métaux lourds entrent dans

EXEMPLES de PROJETS EHS en NANOTECHNOLOGIES en COURS D'ETUDE			
Investigateur	Soutien accordé	Agence	Titre et présentation du projet de recherche
DuPont	600 000 \$	industrie	Nanoparticle Occupational Safety and Health Consortium <ul style="list-style-type: none"> Comportement des nanoparticules sur le lieu de travail Contrôle et mesure de l'exposition aux nanoparticules en suspension dans l'air Mesure de la pénétration des nanoparticules à travers les équipements de protection Membres du consortium: Procter & Gamble, Dow Chemical, Air Products & Chemicals, Inc., Degussa, Rohm & Haas, PPG, Intel Corporation, the UK Health & Safety Executive, et le Department of Energy, Office of Science.
Rice University	334 000 \$	EPA	Absorbition and Release of Contaminants onto Engineered Nanoparticles Examen des capacités d'adsorption/désorption des nombreux contaminants organiques et étude leur transport. Nanomatériaux étudiés : nanotubes, fullerènes, silice, alumine, magnétite et anatase.
The University of Iowa	400 000 \$	NIOSH	Assessment Methods for Nanoparticles in the Workplace <ul style="list-style-type: none"> Identification et évaluation des méthodes pour mesurer la concentration de nanoparticules en suspension dans l'air. Caractérisation des nanoparticules pour évaluer leurs propriétés physico-chimiques. Déterminer l'efficacité de piégeage des nanoparticules par des filtres respiratoires
Northeastern University Wake Forest University	130 000 \$	NSF	Carbon Nanotube Synthesis: Assessing Economic and Environmental Tradeoffs in Process Design Etude des processus de fabrication des nanotubes de carbone: produits synthétisés, matériaux utilisés, effluents générés dans l'environnement et énergie utilisée. Etude du cycle de vie complet.
University of South Carolina at Columbia	335 000 \$	EPA	Chemical and Biological Behavior of Carbon Nanotubes in Estuarine Sedimentary Systems Etude sur le devenir des nanotubes de carbone dans l'eau des estuaires, dans les sédiments et les animaux potentiellement affectés.
Yale University Rice University	100 000 \$	NSF	Collaborative Research: Fullerene Aggregation in Aquatic Systems Recherche sur l'agrégation de nanomatériaux à base de fullerènes et leur devenir dans les systèmes aquatiques.
University of California - Davis	335 000 \$	EPA	Health Effects of Inhaled Nanomaterials L'inhalation de nanoparticules cause un stress oxydatif et une réponse inflammatoire de l'organisme. Caractérisation précise de l'impact de nanomatériaux inhalés suivant leur taille, leur composition et les contaminants associés lors du processus de fabrication
North Carolina State University	329 000 \$	EPA	Evaluated Nanoparticle Interactions with Skin Etude de l'interaction de nanoparticules utilisées par l'industrie (Oxyde de fer, sélénium de cadmium, fullerènes) avec la peau (absorption, toxicité, sensibilisation,...)
University of Iowa	1 400 000 \$	NSF	NIRT: Nanoparticle Fe as a Reactive Constituent in Air, Water, and Soil Etude focalisée sur les nanoparticules de fer, Caractérisation de leur réactivité dans l'air, l'eau, le sol.
Purdue University	1 600 000 \$	NSF	NIRT: Response of aquatic and terrestrial microorganisms to carbon-based manufactured nanoparticles. Analyse des effets écologiques et toxicologiques des nanostructures carbonées sur les micro-organismes présents dans le sol et dans l'eau Nanoparticules étudiées : fullerènes simples ou fonctionnalisés, nanotubes de carbone simple paroi, nanotubes de carbone dopés à l'or et à l'argent, nanotubes fonctionnalisés.
Sandia National Lab	695 000 \$	DOE	Development of Detection Techniques and Diagnostics for Airborne Carbon Nanoparticles Développement de l'instrumentation nécessaire pour déterminer la masse et la taille de nanoparticules avec des techniques optiques non-invasives.

la composition des quantum dots. La manipulation de ces produits chimiques est déjà soumise à de nombreuses réglementations qui visent à protéger le personnel de production et à éviter une contamination de l'environnement. Le processus de fabrication est ainsi une composante incontournable de l'appréciation du risque des nanotechnologies. Sur cette question, une étude

récente menée par une équipe de Rice University comparant les risques environnementaux liés à la fabrication de cinq variétés de nanomatériaux a conclu que les procédés utilisés n'étaient potentiellement pas plus dangereux que ceux déjà largement développés dans l'industrie chimique (comme les procédés de raffinage du pétrole, par exemple).

Conclusion

Même si on ne dispose pas actuellement de données assez convaincantes, on ne peut pas écarter l'hypothèse que les nanomatériaux manufacturés soient porteurs d'effets toxiques. Il n'est ainsi plus possible de différer une évaluation sérieuse des problèmes de sécurité que peut poser le développement des nanotechnologies. Une approche volontariste est donc nécessaire, qui doit être suivie par des prises de décision quant à la législation et à la réglementation. Les Etats-Unis sont engagés dans cette voie, mais malgré des efforts évidents de coordination et d'incitation, il semble que beaucoup reste encore à faire. Nombreux sont ceux qui estiment que le niveau d'investissement du gouvernement fédéral sur les questions EHS posées par les nanomatériaux reste beaucoup trop faible, et qu'il faudrait investir au moins 100 millions de dollars dans les deux prochaines années dans la recherche sur les risques. Plusieurs analystes soulignent que cet effort financier devrait être accompagné de la mise en place d'un véritable réseau de recherche bien coordonné qui bénéficie du concours des différentes initiatives déjà en place et permette d'en augmenter la synergie. Il semble également essentiel que les questions de prévision et de gestion des risques puissent être abordées dans un contexte très large de coopération internationale, et il faut reconnaître que là aussi, beaucoup d'efforts restent encore à faire.

Rapport rédigé par :

Roland Hérimo

Attaché pour la Science et la Technologie

Rémi Delville

Volontaire International

Service Scientifique du Consulat Général de France
Houston, Texas.

Références :

- 1 - Lux Research, The Nanotech Report, 4th edition, Lux Research Inc., New York, NY, (2006)
- 2 - The Ethics and Politics of Nanotechnology, Unesco, Paris, (2006)
- 3 - Nanoscience and Nanotechnologies: Opportunities and Uncertainties, The Royal Society and The Royal Academy of Engineering, London, UK, (2004)
- 4 - Roco, M.C., AIChE. J. (2004) 50 (5), 890-897
- 5 - G. Oberdörster et al, Environ. Health Perspect. 113, 823 (2005)
- 6 - Pulmonary Toxicity of Single-Wall Carbon Nanotubes in Mice, NIOSH & NASA, (2003), <http://toxsci.oxfordjournals.org/cgi/reprint/kfg243v1.pdf>
- 7 - University of California in San Diego, Derfus et coll., <http://lmrt.mit.edu/publications/derfusletters.pdf>
- 8 - Nanotechnology : A Research Strategy for Addressing Risk, Andrew D. Maynard, July 2006
- 9 - Environmental, Health and Safety Research Needs for Engineered Nanoscale Materials, National Science & Technology Council (2006)
- 10 - Nanoparticle Information Library, <http://www2a.cdc.gov/niosh-nil/index.asp>.
- 11 - <http://www.nanotechproject.org/>
- 12 - Project on Emerging Nanotechnology, <http://www.nanotechproject.com/index.php?id=18>
- 13 - A nanotechnology Consumer Product Inventory, <http://www.nanotechproject.org/index.php?id=44>
- 14 - EHS Database, <http://icon.rice.edu/research.cfm>
- 15 - Chemical Industry - Consulting Board for Advancing Nanotechnology, www.chemicalvision2020.org/nanotechnology.html
- 16 - Nanotechnology Health and Environmental Implications, an inventory of current research, <http://www.nanotechproject.com/index.php?id=18&action=advanced>

Dernière minute :

Pour nos lecteurs intéressés, signalons la parution toute récente (12 octobre) d'un rapport du Comité d'Ethique du CNRS (COMETS) sur les Enjeux Ethiques des Nanosciences et des Nanotechnologies.

Document pdf téléchargeable :

http://www.cnrs.fr/fr/presentation/ethique/comets/docs/ethique_nanos_061013.pdf

ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES

NANOSCIENCES, MICROELECTRONIQUE,
MATERIAUX

Octobre 2006

Pour vous abonner gratuitement à :

ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES
et être informé en priorité de la disponibilité
des prochains numéros, il suffit d'envoyer un
courrier électronique à l'adresse:
subscribe.be.etatsunis@adit.fr
Vous recevrez en retour une confirmation
d'abonnement.

Directeur de la publication :
Michel ISRAEL

Rédacteurs en chef :
Roland HERINO
Daniel OCHOA

Rédacteurs :
Raphaël ALLEGRE
Rémi DELVILLE

ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES
est une publication trimestrielle de
la Mission pour la Science et la Technologie
de l'Ambassade de France aux Etats-Unis,
dont la diffusion est assurée par l'ADIT

Vous y trouverez un archivage des anciens numéros
et découvrirez aussi les autres publications de la Mission
pour la Science et la Technologie

-S&T Presse
-Flash TIC
-Revue santé Etats-Unis
-Revue de l'environnement
-Etats-Unis Espace
-Etats-Unis Microélectronique/ Matériaux
(archives précédant la fusion)

Retrouvez ETATS-UNIS SCIENCES PHYSIQUES ainsi
que toute l'actualité technologique aux Etats-Unis et dans
le reste du monde sur le site:

<http://www.bulletins-electroniques.com/>

DOSSIERS ETATS-UNIS SCIENCES-PHYSIQUES

- Juin 2006 : Recherche et Industrie Photovoltaïque (PV) aux Etats Unis
- Février 2006 : Recherche et production industrielle des nanotubes de carbone - Recherche américaine : vers un modèle ouvert basé sur la collaboration
- Octobre 2005 : Nanotechnologies et santé publique - A l'interface du nanomonde - De nouvelles cellules photovoltaïques - Du nouveau dans les semiconducteurs
- Août 2005 : La photolithographie
- Février 2005 : L'électronique grand public aux Etats-Unis
- Juillet 2004 : L'International Roadmap for Semiconductors
- Mai 2004 : Les Nanocomposites aux Etats-Unis

AUTRES RAPPORTS ETATS-UNIS

- Mars 2006 : Forum Energie et Nanotechnologie : stockage et distribution
- Mars 2006 : Associations, accréditation, autorégulation : les règles du marché de l'enseignement supérieur américain
- Janv 2006 : Regards français sur la Silicon Valley
- Janv 2006 : Présence française dans le domaine High Tech dans la region de San Francisco
- Sept 2005 : Les efforts de Recherche et Développement en nanotechnologies aux USA
- Sept 2005 : La Politique Fédérale de R&D en Nanotechnologies aux Etats Unis
- Sept 2005 : Initiative jeunes entrepreneurs - Mobilité de jeunes chercheurs/entrepreneurs vers la France
- Sept 2005 : Enseignement universitaire et recherche : comparaison entre les USA, le Japon et la France
- Sept 2005 : Le développement technologique dans la région de San Francisco
- Sept 2005 : Le Devenir des Post-doctorants en Amérique du Nord
- Mars 2005 : La spintronique aux Etats-Unis - Un Aperçu des Recherches
- Jan 2005 : Nanoélectronique – USA
- Jan 2005 : Comment fonctionnent les universités américaines ?
- Jan 2005 : L'environnement au sortir des élections américaines : bilan et perspectives