

Perspectives

Les nanosciences représentent une véritable révolution technologique. De nombreuses applications industrielles et médicales se développent ou sont déjà mises en œuvre. Leur potentiel économique est considérable et concerne tous les secteurs d'activité.

Nanomatériaux : différentes voies de synthèse, propriétés, applications et marchés

Eric Gaffet
Directeur de
recherche au CNRS,
Nanomaterials
Research Group/
UMR CNRS 5060

Les nanotechnologies constituent un champ de recherche et de développement impliquant la fabrication de structures, dispositifs et systèmes à partir de procédés permettant de structurer la matière au niveau atomique, moléculaire ou supramoléculaire à des échelles caractéristiques de 1 à 100 nanomètres (nm). Ces constituants, encore appelés brique élémentaire, constituent une partie des nanomatériaux, relativement faibles en termes de quantité produite. Dans le domaine des nanomatériaux, il convient de considérer également les nanoparticules, les revêtements nanostructurés ainsi que les matériaux massifs denses ou encore les nanocomposites (à matrice organique, inorganique ou encore métallique).

De nouveaux comportements de la matière sont attendus, dus à la prépondérance des lois de la physique quantique, s'exprimant essentiellement à cette échelle. De nombreuses applications industrielles et médicales se développent à très grande vitesse et sont déjà, pour certaines, mises en œuvre actuellement.

Ainsi, on peut considérer que l'avènement des nanosciences (nanotechnologies et nanomatériaux) constitue un tournant majeur dans le développement industriel du XXI^e siècle.

Nanomatériaux

Il convient de définir un nanomatériau comme un matériau composé ou constitué de nano-objets (dont l'une au moins des trois dimensions physiques est comprise entre 1 et 100 nm) et présentant des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique.

Les **nano-objets** peuvent se présenter sous la forme de **particules, fibres** ou **tubes** (on parle de charges ou renforts), de couches minces ou de constituants structurels.

Les nano-objets sont utilisés soit en tant que tels (comme catalyseurs pour les réactions chimiques, comme vecteurs pour transporter des médicaments au niveau des cellules cibles, pour le polissage de « wafers » et disques durs en microélectronique...), soit en vue d'élaborer des matériaux.

Ces nanomatériaux peuvent être décrits selon trois catégories :

- **Les matériaux nanorenforcés** : Les nano-objets sont incorporés ou produits dans une matrice pour apporter une nouvelle fonctionnalité, ou modifier des propriétés physiques. Les nanocomposites sont un bon exemple de renfort afin d'acquérir une résistance à l'usure supérieure.

● **Les matériaux nanostructurés en surface** : Les nano-objets constituent les éléments de revêtements de surface. Les procédés de fabrication de ces revêtements de surface s'appuient sur des principes de dépôt physique (PVD, faisceau d'électrons, ablation laser...) ou chimique (CVD, épitaxie, sol-gel).

● **Les matériaux nanostructurés en volume** : Les nano-objets peuvent également être les éléments de matériaux massifs qui, par leur structure intrinsèque nanométrique (porosité, microstructure, réseau nanocristallin), bénéficient de propriétés physiques particulières.

Aspects économique et social

Le marché des nanotechnologies/nanomatériaux

La Commission européenne a estimé que le marché mondial des nanotechnologies en 2001 était légèrement supérieur à 40 milliards d'euros. En 2008, le marché global des produits issus des nanotechnologies devait atteindre plus de 700 milliards d'euros.

En 2010-2015, les enjeux économiques liés à l'avènement des nanotechnologies au niveau mondial devraient atteindre 1 000 milliards d'euros par an (tous secteurs confondus ; source : National Science Foundation), dont près de 340 milliards d'euros pour le domaine spécifique des nanomatériaux (Hitachi Research Institute). En complément, les nanotechnologies devraient concerner directement l'emploi de près de 2 à 3 millions de personnes dans le monde.

Le financement en France

De l'étude *Le financement des nanotechnologies et des nanosciences. L'effort des pouvoirs publics en France : Comparaisons internationales*, publiée en janvier 2004 pour le compte du ministère de la Jeunesse, de l'Éducation nationale et de la Recherche (MJENR) qui avait pour objet d'inventorier les moyens et les crédits publics consacrés aux nanotechnologies, il ressort que la France consacre à ce domaine un effort important.

D'après cette étude, si l'on prend en considération l'ensemble des crédits d'intervention dans leur diversité et les moyens consacrés à ce domaine par le CNRS et le CEA, frais de personnels compris, on atteint un montant de 551,6 millions d'euros HT (637 millions TTC) en 2003. Cependant, s'il est possible de distinguer dans certains cas une activité spécifiquement nanotechnologique, cette distinction est le plus souvent impossible à opérer et dépourvue de sens.

En termes quantitatifs, les financements publics dans le domaine des nanotechnologies/nanomatériaux sont objectivement d'un niveau très significatif en France, à la fois en valeur absolue et par rapport aux principaux partenaires européens, en particulier l'Allemagne et la Grande-Bretagne. Ce niveau est sensiblement plus faible qu'au Japon et aux États-Unis.

Depuis 2005 en France, des appels à programme nationaux (Agence nationale de la recherche, ANR, Oseo, etc.) permettent de soutenir des travaux coordonnés sur l'évaluation des effets des nanoparticules sur la santé.

Un an et demi après les recommandations des rapports de l'Agence française pour la sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) et du Comité pour la prévention et la précaution (CPP), indiquant la nécessité de coordonner les actions de maîtrise des risques à un niveau national, voire européen, a été créé au sein du Haut Conseil à la santé publique un groupe d'experts intitulé « Veille sur les impacts sanitaires des nanotechnologies ».

Ce groupe d'expertise à portée interministérielle sur les nanomatériaux et les nanotechnologies a pour mission de fournir des analyses et de faire des recommandations sur les questions qui lui seront adressées ou qu'il aura identifiées comme pertinentes afin de fournir au gouvernement (ministère chargé de la Santé, et ministères concernés par ce sujet : Écologie, Agriculture, Recherche, Travail et Industrie) l'appui et les conseils dont il a besoin pour pouvoir définir sa politique et gérer les questions nouvelles que suscitent les nanomatériaux et les nanotechnologies en matière de sécurité sanitaire.

À la fin de l'année 2005, l'ensemble des gouvernements avait dépensé près de 18 milliards de dollars pour financer les secteurs nanotechnologie et nanomatériaux. Avec près de 6 milliards de dollars de financement supplémentaire en 2006, le financement mondial est estimé atteindre le montant du financement intégral du programme Apollo ayant permis de poser des hommes sur la Lune.

Productions et applications des nanomatériaux

Marché mondial

Les applications des nanomatériaux sont multiples, comme développé ci-après selon le rapport intitulé *Étude prospective sur les nanomatériaux* et réalisé pour le compte de la Direction générale de l'industrie, des technologies de l'information et des postes (Digitip) du ministère des Finances, par la société française Développement & Conseil (2004) (tableau 1).

La figure 1 présente les projections de marchés en fonction des différents types de nanoparticules et/ou nanomatériaux.

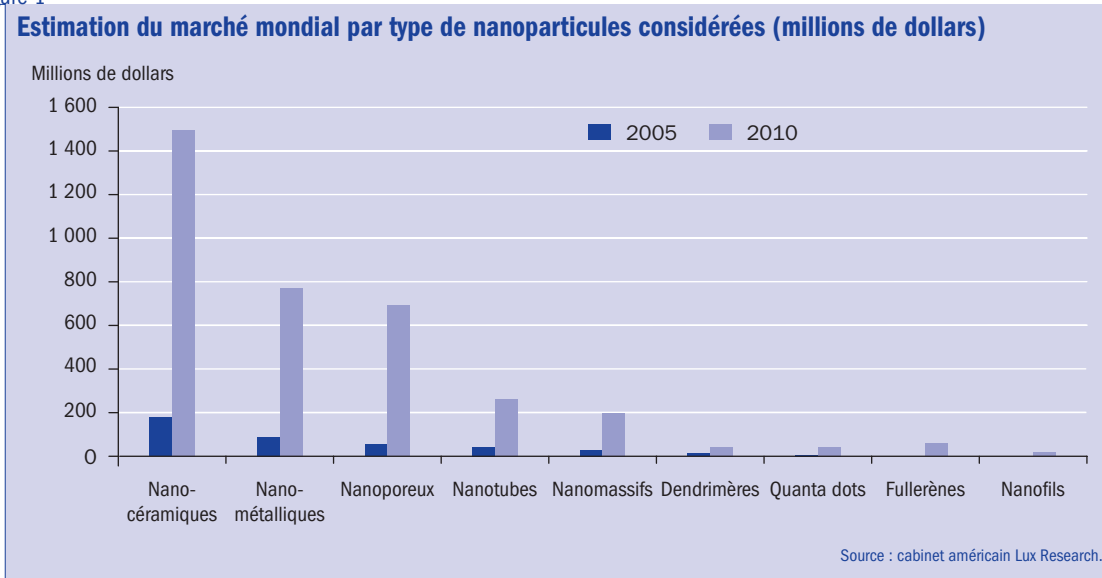
Le marché mondial des nanoparticules, pour des applications liées à l'énergie, a été estimé à 54,5 millions d'euros en 2000 et devait atteindre 77 millions d'euros en 2005, soit un taux de croissance annuel moyen de 7 %. Ce marché est porté par les prises de conscience successives de l'importance de la protection de l'environnement. Les nanoparticules sont utilisées en tant que supports de catalyse dans l'industrie automobile, membranes céramiques, piles à combustibles, photocatalyse, propulseurs et explosifs, revêtements antirayures, céramiques structurales, revêtement par vaporisation thermique.

Le marché mondial des nanoparticules pour des applications biomédicales, pharmaceutiques et cosmétiques a été estimé (Rapport de la Direction générale de l'industrie, des technologies de l'information et des postes, 2004) à 85 millions d'euros en 2000 et devait atteindre 126 millions d'euros en 2005, soit un taux de

tableau 1

Domaines d'applications par type de nanomatériaux	
Nanomatériaux	Domaines d'applications
Nanocéramiques	Matériaux composites structuraux - Composants anti-UV - Polissage mécano-chimique des substrats (wafers) dans la microélectronique - Applications photocatalytiques
Nanométalliques	Secteurs antimicrobiens et/ou de la catalyse - Couches conductrices des écrans, les capteurs ou encore les matériaux énergétiques
Nanoporeux	Aérogels pour isolation thermique dans les domaines de l'électronique, de l'optique et de la catalyse - Domaine bio-médical pour des applications de type vectorisation ou encore implants
Nanotubes	Nanocomposites conducteurs électriques - Matériaux structuraux - Les nanotubes monofeuillets pour des applications dans le domaine de l'électronique, les écrans
Nanomatériaux massifs	Revêtements durs - Composants structuraux pour l'industrie aéronautique, l'automobile, les conduites pour les industries pétrolières et gazières, le domaine sportif ou encore le secteur anticorrosion
Dendrimères	Domaine médical (administration de médicaments, détection rapide) - Domaine cosmétique
Quanta Dots	Applications optoélectroniques (écrans) - Cellules photovoltaïques - Encres et peintures pour applications de type marquage anti-contrefaçon
Fullerènes	Secteurs du sport (nanocomposites) et des cosmétiques
Nanofils	Applications dans les couches conductrices des écrans ou encore les cellules solaires ainsi que les dispositifs électroniques

figure 1



croissance annuel moyen de 8,3 %. Il s'agit du marché représenté par les particules inorganiques utilisées pour produire des agents antimicrobiens, des marqueurs biologiques pour la recherche et le diagnostic, des procédés de séparation biomagnétiques, des vecteurs d'administration de médicaments, des milieux de contraste pour l'imagerie à résonance magnétique, des dispositifs orthopédiques et des écrans de protection solaire.

La production annuelle mondiale des nanocomposites, quant à elle, se limite actuellement à quelques milliers de tonnes, principalement pour la câblerie et l'emballage.

Mais, en 2010, on s'attend à ce que cette production passe à 500 000 tonnes par an. Des marchés ont été identifiés dans les secteurs des transports, de l'ingénierie et de la haute technologie grâce aux propriétés de ces matériaux qui permettent l'allègement, le renfort des structures et une conception différente des pièces avec, par exemple, la possibilité de travailler sur la réduction d'épaisseur.

La production de noir de carbone, en 1995, avait déjà atteint à l'échelle mondiale près de 6 millions de tonnes/an. En 2005, la production mondiale a été

estimée atteindre le volume de 10 millions de tonnes. La production de silice a été évaluée à près de 300 000 tonnes par an. La production mondiale d'oxyde de titane est estimée à 3,5 millions de tonnes pour les particules de dimension micrométrique et près de 3 800 tonnes de nanoparticules ont été produites en 2000. Le volume de nanoparticules d'aluminium est estimé à 100 tonnes par an à l'échelle mondiale.

État de la production française de nanomatériaux et de leurs usages actuels

Selon un document récent, publié par l'INRS [22], un premier état de la production française de nanoparticules peut être dressé. Ces informations seront consolidées par les éléments issus d'un rapport de l'Afsset et intitulé *Nanomatériaux et sécurité au travail* [26].

Nous reprendrons ci-dessous les grandes lignes du document de l'INRS concernant les différentes nanoparticules produites en France.

Dioxyde de titane (TiO₂) : La production française de TiO₂ est voisine de 240 000 tonnes. La taille des particules utilisées varie, suivant le secteur concerné, de 150 à 400 nm en tant que pigment ou opacifiant dans l'industrie de la peinture et des plastiques, ce qui la place en limite supérieure des diamètres des nanoparticules. La production de dioxyde de titane nanométrique est assurée par 270 opérateurs sur un seul site et avoisine les 10 000 tonnes/an pour trois applications : l'architecture, la cosmétique et l'épuration de l'air.

Silice (SiO₂) : Avec 200 000 tonnes produites, la France est le deuxième producteur mondial de silice naturelle, issue de l'extraction de gisements d'une roche particulière : la diatomite. Cette production a lieu sur deux sites d'extraction et concerne une centaine de salariés. Pour ce qui concerne la silice synthétique (c'est-à-dire la silice précipitée, la silice pyrogénée et les fumées de silice), le tonnage annuel est supérieur à 100 000, et le personnel employé avoisine 300. L'utilisation principale est le renforcement des caoutchoucs : les pneumatiques (en association avec le noir de carbone 50/50), les semelles de chaussures, les pièces techniques en caoutchouc (fils et câbles). Dans l'industrie agroalimentaire, elle est utilisée comme support de vitamines, d'acidifiant, d'agent anti-mottant. L'industrie de la peinture l'utilise comme agent matant, le secteur des pâtes dentifrice pour son caractère d'épaississant et d'abrasif doux.

Nanoargiles : La fabrication est exclusivement réalisée à l'étranger : deux fabricants, allemand et américain, se partagent le marché. Un site français de production de nanoargiles est actuellement en développement. Une production de l'ordre de 100 tonnes était prévue pour 2007. Une cinquantaine de personnes travaillent sur ce site.

Nanotubes de carbone simple paroi (SW-NTC) : Les capacités de production de cette catégorie de nanotubes sont de l'ordre de quelques grammes à plusieurs dizaines de kilos par jour. Actuellement, la capacité

maximale est réalisée par une entreprise américaine avec 40 kg/jour, à partir d'une technologie CVD et d'un mélange gazeux Fe (CO) 5/CO (procédé HiPCO, dépôt chimique en phase vapeur). La production française de SW-NTC est assurée par des laboratoires de recherche universitaire. Plusieurs sites sont équipés de structures pouvant produire des quantités de l'ordre de la dizaine de grammes à partir de procédés soit similaires de type « basse température » (CVD, Chemical Vapor Deposition ou CCVD, Catalytic Chemical Vapor Deposition), soit de type « haute température » (arc ou plasma).

Nanotubes de carbone multiparois (MW-NTC) : Ils sont produits par un industriel français depuis 2006. Cette unité, de capacité de production de 10 tonnes/an, est un pilote et une dizaine de personnes y sont affectées. Sa production serait étendue à plusieurs centaines de tonnes d'ici la fin de la décennie.

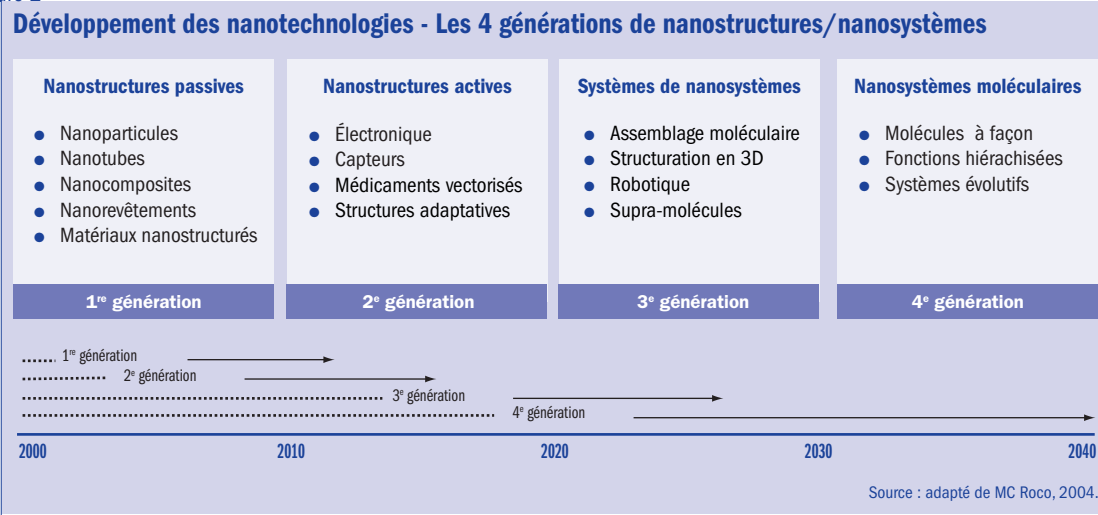
Noir de carbone (Carbon Black) : Le noir de carbone est essentiellement constitué de sphères de taille comprise entre 10 et 500 nm agrégées à raison de quelques dizaines à quelques centaines de particules. La production française était de 240 000 tonnes en 2005. Elle se répartit entre quatre sites de production et concerne un effectif de 350 personnes. 70 % du noir de carbone est utilisé par l'industrie du pneumatique. La proportion qui pouvait atteindre 30 % du poids d'un pneu tend à se réduire du fait de la substitution par de la silice précipitée. L'industrie du caoutchouc l'utilise également pour la réalisation de gaines de protection des câbles, dans la composition des bandes transportées, des courroies et des joints.

Alumines : Un seul site de production assure la fabrication d'alumines ultrapures en France. Celles-ci sont réalisées à partir d'un procédé alun : sulfate d'aluminium et d'ammoniaque multihydraté. Deux unités horizontales sont en cours de montage sur le site pour porter la production de 1 000 à 1 700 tonnes/an à partir de 2008. D'autres producteurs se partagent le marché de l'alumine. Appelée alumine de spécialité, elle est élaborée à partir du procédé Bayer, qui utilise la bauxite comme matière première. La production française d'alumines de spécialité représentait 468 000 tonnes en 2004. Ce tonnage inclut une proportion d'alumine ultrafine et nanostructurée à côté des nuances traditionnelles. L'une des applications pourrait être le polissage mécano-chimique des substrats pour l'industrie électronique.

Analyse des marchés et futurs développements

Selon l'analyse développée dès 2004 par M.C. Rocco (Rocco M.C., 2004. Nanoscale science and engineering : unifying and transforming tools, *AIChE Journal* 50 (5), 890–897), il convient de distinguer quatre étapes majeures dans le domaine des nanotechnologies/nanomatériaux : les nanostructures passives, les nanostructures actives, les systèmes de nanosystèmes et enfin les nanosystèmes moléculaires. La figure suivante illustre cette analyse. Les nanoproducts actuellement commercialisés appartiennent essentiellement à la catégorie des nanostructures passives (figure 2).

figure 2



Une nanostructure active est une structure susceptible de modifier son état (morphologie, forme, propriétés mécaniques, électroniques, magnétiques, optiques, biologiques, etc.) pendant son utilisation. À titre d'illustration, un actuateur mécanique pourrait changer ses dimensions; et des nanoparticules mises en œuvre afin de vectoriser des principes actifs dans le domaine de la médecine pourraient changer de morphologie et/ou de composition chimique afin de franchir des barrières biologiques par exemple. Ces nouveaux états des nanostructures pourraient à leur tour évoluer, en particulier afin d'assurer une fin de cycle de vie sécurisée. De tels changements seront d'autant plus complexes que les structures et les systèmes sont appelés à devenir de plus en plus volumineux et à mettre en œuvre des fonctions multiples.

Des exemples de telles nanostructures actives sont les systèmes nano-électro-mécaniques (NEMS), les nano-dispositifs biologiques, les transistors, les amplificateurs, les vecteurs pharmaceutiques et chimiques, les machines moléculaires, les moteurs moléculaires activés par la lumière, les dispositifs mettant en œuvre la nanofluidique, les capteurs ou encore les dispositifs radiofréquences (RFID).

Dans le domaine du marquage et de l'identification, il est important de souligner les réalisations d'ores et déjà opérationnelles. À titre d'illustration, en 2006, Hitachi a présenté la plus petite puce RFID jamais réalisée. Ses mensurations (0,05 x 0,05 mm²) lui ont valu le nom de « poudre » (ou encore *Smart Dust*). Elle contient une mémoire morte de 128 bits permettant de stocker un numéro d'identité de 38 chiffres et peut être facilement intégrée dans une feuille de papier. Pour rappel, une puce RFID (Radio Frequency Identification) permet une identification automatique du contenu qu'elle transporte. Les puces RFID peuvent contenir toute sorte d'informations et se trouvent sur moult supports, comme un passeport, ou les étiquettes de produits vendus en supermarché, ou encore des

billets de concert. L'apparition de « poudre » de RFID permet de faciliter leur intégration sur de plus en plus de supports. Parallèlement à ces développements, une société britannique a élaboré un dispositif permettant de localiser de telles puces RFID jusqu'à une distance de 180 mètres (<http://www.tfto.info/pod/152/rfid-loc8tor.html>) et dans un volume à trois dimensions avec une précision de 2 cm. Une telle miniaturisation conduit certains à s'interroger sur la notion de traçabilité de l'individu et du contrôle à son insu.

Dans le domaine de la médecine, des nanomatériaux sont déjà utilisés dans des dispositifs médicaux actuellement commercialisés : pansements, implants, prothèses, etc. Le secteur de la biologie médicale utilise des nanoéléments pour le diagnostic *in vitro* de maladies infectieuses, immunologiques ou cancéreuses. Certains dispositifs de surveillance médicale quotidienne de paramètres biologiques (par exemple, la glycémie) profiteront utilement de la miniaturisation extrême qu'apportent les nanotechnologies. Le secteur de l'imagerie médicale explore les possibilités d'améliorer le contraste et la finesse des images données par l'IRM par l'apport de nanoparticules dans les organes cibles. La recherche pharmacologique explore de longue date la possibilité de vectoriser des molécules thérapeutiques au plus près de la lésion en utilisant des nanoparticules permettant de cibler la cellule malade. Des essais thérapeutiques sont en cours notamment dans le domaine du traitement des cancers. Les nanotechnologies pourraient permettre de faire des médicaments « sur mesure ». Des médicaments et des agents de contraste nanoparticulaires ont déjà été acceptés par les agences réglementaires.

Une application fait l'objet de développements rapides et bénéficie, sans doute aucun, des avancées de la miniaturisation liée au développement des nanotechnologies : il s'agit de la neurostimulation profonde par des microélectrodes placées dans le cerveau (NanoForum – session « Nanomédecine » du 5 juin 2008). Depuis les

années quatre-vingt, une équipe de Grenoble (Pr Benabid) a découvert que la stimulation électrique d'une partie du cerveau supprimait les tremblements des personnes atteintes de la maladie de Parkinson. Depuis, en lien avec plusieurs équipes internationales, d'autres indications ont été proposées : dystonies graves (mouvements anormaux), épilepsie, etc. Puis cette technique a été testée — avec l'accord du Comité consultatif national d'éthique pour les sciences de la vie (CCNE) — pour le traitement des troubles obsessionnels compulsifs ou les syndromes dépressifs résistant aux traitements médicamenteux. Actuellement, il y a plus de 35 000 malades traités dans le monde avec ce « pace-maker » cérébral, environ 1 000 en France. De plus, des recherches s'intéressent à l'interface « cerveau-machine » afin de contrôler les mouvements musculaires en agissant soit directement sur les fibres nerveuses ou musculaires, soit en passant par le système nerveux central. De telles applications sont prometteuses pour les personnes souffrant de paralysie ou de mouvements anormaux.

Cependant, ces techniques comportent des risques d'effets indésirables : notamment, la pose de l'électrode peut être la cause d'un phénomène de rejet ou d'hémorragies cérébrales. C'est pourquoi l'idée d'utiliser des électrodes de l'échelle nanométrique est née. En France, le projet Clinatec est un centre de recherche biomédical dédié au domaine de la nanomédecine, avec une focalisation première sur les dispositifs implantés et sur l'interface cerveau-machine. L'utilisation abusive des applications médicales des nanotechnologies, en particulier pour des applications spécifiques comme la neurostimulation profonde, est une possibilité qui mérite d'être discutée.

Il convient également de souligner que les nanotechnologies et les nanomatériaux comportent un développement très nettement dual en termes d'intégration dans les domaines d'applications spécifiques de la défense. Il en est ainsi des protections individuelles (gilets ou casques pare-balles à base de nanotubes de carbone), des dispositifs de détection très rapides et ultrasensibles, des vectorisations chimiques et bactériologiques, des exosquelettes (prothèses externes interfacées sur le cerveau humain et devant permettre au combattant de porter 80 kg pendant 80 km à plus de 50 km/h, objectif de la Darpa/USA), tout comme dans le développement de bombes thermobariques mettant en œuvre des nanoparticules pyrophoriques et développant des effets de souffle équivalant à une arme nucléaire (<http://news.bbc.co.uk/2/hi/europe/6990815.stm>) — les premiers essais ont été conduits par les États-Unis et la Russie dès 2007. Cet aspect dual pervasif des nano-applications conduit à s'interroger au niveau international sur la réactualisation des dispositifs et traités relatifs à la non-prolifération d'armes de destruction massive.

Nanomatériaux et sécurité

L'état des connaissances sur les effets des particules micro/nanométriques de la pollution atmosphérique

fait craindre des effets sur la santé des nanoparticules fabriquées par l'homme. Cependant, très peu de données fiables sont disponibles actuellement dans ce domaine. Mais les études publiées font état d'interactions des nanoparticules au niveau cellulaire, qui incitent à la prudence. Récemment, des travaux menés par K. Donaldson et al. tendent à démontrer que certains nanotubes de carbone pourraient induire des effets similaires à des fibres d'amiante (induction du mésothéliome) [48].

Comme indiqué dès 2005 dans une note de synthèse : *Note de synthèse pour le PNSE - Les déterminants environnementaux : Nanoparticules et santé* — coordination : J. Boczkowski, E. Gaffet et A. Lombard — les questions scientifiques importantes dans le domaine « nanoparticules et santé » doivent concerner tout le cycle de vie et s'intéresser plus particulièrement aux aspects suivants :

- la caractérisation physico-chimique et la classification des nanoparticules selon leur degré de réactivité de surface, signe d'effets biologiques potentiels ;
 - la détection et la caractérisation de l'exposition à ces particules des opérateurs de fabrication aux utilisateurs,
 - leurs effets biologiques potentiels sur l'homme.
- Ces questions concernent aussi bien les travailleurs du secteur des nanotechnologies/nanomatériaux, qui peuvent être exposés à des concentrations importantes de nanoparticules, que la population en général, dont l'exposition à ces nanoparticules, plus indirecte, est liée au cycle de vie de ces nano-objets.

Enfin, le risque associé à l'explosion de nanoparticules constitue également une question importante et relativement peu étudiée concernant le personnel impliqué dans la fabrication de nanomatériaux à partir de ces nanoparticules.

Conclusion

En conclusion, les nanosciences (nanotechnologies et/ou nanomatériaux) sont d'ores et déjà une réalité industrielle et économique. Tout comme d'autres secteurs industriels, il convient de s'interroger sur l'introduction de ces nouveaux produits afin d'en mesurer et d'en contrôler les conséquences tant sociétales qu'environnementales et sanitaires. Il s'agit d'un enjeu crucial pour assurer le développement responsable des nanomatériaux et des nanotechnologies. ❖

Sites

Compte tenu de l'importance de ce domaine, des sites Internet permettent désormais de suivre une veille active sur les publications. Nous citerons :

- The Virtual Journal of Nanotechnology Environment, Health and Safety <http://www.icon.rice.edu/virtualjournal.cfm>
- Nanotechnology : Health and Environmental Implications, An Inventory of Current Research. <http://www.nanotechproject.org/inventories/ehs/>
- Safe Production and Use of Nanomaterials. <http://www.nanosafe.org/>

Les applications thérapeutiques et médicales

Dominique Masset
Pharmacien
toxicologue, chef
du Département
toxicologie de
l'Afssaps

Le Comité des médicaments à usage humain de l'European Medicines Agency (EMA), basé à Londres, a défini la nanotechnologie comme la production et l'application de structures, de dispositifs et de systèmes, caractérisée par la forme et la taille de matériaux à l'échelle nanométrique allant du niveau atomique (situé à environ 0.2 nm) jusqu'à environ 100 nm.

La nano médecine est définie comme étant une application des nanotechnologies dans le but de traiter ou de prévenir les maladies ou d'établir un diagnostic médical. Actuellement, les principales utilisations des nano-objets dans le domaine des soins sont essentiellement la vectorisation des médicaments, l'imagerie médicale, le transport des gènes (thérapie génique), la délivrance des vaccins et le traitement hyperthermique des tumeurs.

Les nanoparticules se développent également dans d'autres secteurs de produits de santé comme les dispositifs médicaux (prothèses, pansements...), l'ingénierie tissulaire, les réactifs de diagnostic *in vitro* et *in vivo* et les cosmétiques.

Les différentes classes de nanoparticules utilisées dans les soins en médecine

Les nano-objets biodégradables

Ils se caractérisent par leur propriété à pouvoir être métabolisés et/ou dégradés par l'organisme.

Les nano-émulsions et liposomes

Les émulsions sont constituées d'un mélange huile dans eau : elles se définissent par des substances qui stabilisent la taille et la forme des particules. Les liposomes sont des systèmes colloïdaux vésiculaires, biocompatibles et biodégradables, composés d'une ou plusieurs bicouches de phospholipides. Ils sont utilisés comme vecteurs permettant d'améliorer l'efficacité et la sécurité des principes actifs médicamenteux [31].

Les nanostructures à base de polymères

Les polymères sont de longues chaînes moléculaires obtenues par la répétition d'une molécule ou structure moléculaire appelée monomère. Ces polymères forment une matrice sur laquelle sont liées les molécules de principes actifs. Ainsi les molécules de principes actifs sont libérées au fur et à mesure de la dégradation du polymère dans l'organisme [31].

En fonction des différentes compositions et des différentes méthodes de préparation des chaînes de polymères, on distingue les micelles, les nanosphères, les nanocapsules et les polysomes, qui se caractérisent par leurs structures et des propriétés physico-chimiques différentes [29].

Les nanoparticules non biodégradables

Il s'agit principalement de nano-objets métalliques, dont l'échelle nanométrique va modifier les propriétés idoines du métal qui les compose, comme les nanoparticules d'oxydes de fer (15-60 nm) qui possèdent des propriétés super-paramagnétiques. L'or massif n'a pas de propriétés catalytiques particulières, mais sous forme de nanoparticules il possède des propriétés intéressantes utilisables dans les réactions d'oxydation du monoxyde de carbone (CO). Ce changement de propriétés électroniques des agrégats d'or est dû à la taille des particules [27]. Elles possèdent des propriétés optiques et chimiques intéressantes : elles sont utilisées en thérapeutique et en imagerie biomédicale.

Les nanoparticules de métal sont développées dans la réparation des tissus, la vectorisation des médicaments, dans l'imagerie en résonance magnétique et dans l'hyperthermie des tumeurs malignes. Leur taille, leur charge et leur surface chimique influencent fortement leur biodistribution.

Les nanoparticules d'or sont une nouvelle catégorie de nanoparticules sphériques constituées d'un noyau qui, du fait de sa taille, possède une polarité électrique, recouvert d'une fine coquille d'or. Elles peuvent être recouvertes de dextran (sucre de haut poids moléculaire) de phospholipides ou autres composants afin d'inhiber leur agrégation et d'améliorer leur stabilité. Ces particules peuvent être utilisées comme agents de ciblage actifs ou passifs

Le cas spécifique des puits quantiques : Ils sont constitués d'un noyau composé d'éléments semi-conducteurs. Ce noyau est recouvert d'une couche qui le protège de l'oxydation et augmente sa photoluminescence. Sa surface peut être recouverte de ligand où peuvent être inclus des substances médicamenteuses, des anticorps, des peptides. Cette partie représente l'élément de ciblage et va déterminer leur mode d'entrée cellulaire et leur localisation intracellulaire.

La vectorisation de médicaments : stratégie vectorielle d'approche thérapeutique

Le principe de vectorisation permet de transporter une substance pharmacologiquement active vers sa cible tout en diminuant les effets délétères que peut avoir cette substance sur le reste de l'organisme ; ainsi cette vectorisation permet simultanément une amélioration de l'efficacité du traitement tout en en diminuant la toxicité. Parmi ces différents types de vectorisation, des médicaments sont déjà commercialisés ou font l'objet d'essais cliniques. Ce sont essentiellement des anticancéreux vectorisés et conçus pour cibler les cellules cancéreuses. De nombreux médicaments vectorisés sont en cours de développement ou de recherche : les

Les références
entre crochets renvoient
à la bibliographie p. 77.

principes actifs sont conjugués à des grandes chaînes moléculaires pour former des réservoirs de taille nanométriques (indométacine, 5 FU), ou conjugués à des nanoparticules magnétiques pour orienter leur transport vers l'organe cible sous l'action d'un champ magnétique externe [24, 17].

Les principaux objectifs de la vectorisation des médicaments sont de :

- permettre la distribution de molécules actives uniquement au site d'action sans affecter les tissus sains comme les spécialités Ambisome® ou Daunoxone®, utilisées dans le traitement des tumeurs cancéreuses ;
- faciliter le franchissement de certaines barrières physiologiques comme la barrière hémato-encéphalique, et de certains types de cellules ;
- administrer des médicaments par d'autres voies que la voie traditionnelle, par exemple l'administration de l'insuline par voie orale au lieu de la voie sous-cutanée ;
- améliorer la cinétique des principes actifs dans l'organisme pour qu'ils ne soient pas trop vite éliminés ;
- permettre l'éviction d'excipients entraînant des effets secondaires graves et obligeant l'administration d'un traitement préventif afin de les atténuer, comme le Crémophor, excipient utilisé pour solubiliser des principes actifs difficilement solubles et en améliorer l'absorption [31, 24].

Il existe trois générations de ce type de vecteurs.

Les vecteurs de 1^{re} génération

Ces vecteurs de 1^{re} génération (dits à tropisme hépatosplénique) ont la particularité d'interagir fortement avec les protéines plasmatiques de la circulation sanguine. Ainsi, la fixation de ces protéines à la surface du vecteur favorise une captation rapide par les cellules du système immunitaire. Il en résulte une distribution et accumulation restreintes du principe actif, au niveau du foie et de la rate. Cette distribution des liposomes de 1^{re} génération a été mise à profit pour vectoriser des molécules d'intérêt thérapeutique au niveau de ces sites biologiques, notamment dans le traitement des métastases hépatiques [4].

Les vecteurs de 2^e génération

Il s'agit de vecteurs de 1^{re} génération recouverts de longs polymères hydrophiles et flexibles comme les polyéthylènes glycols (PEG), les polysaccharides, les poloxamères et les polyxamines qui confèrent aux liposomes un caractère furtif, en empêchant les protéines plasmatiques de s'adsorber à leur surface en les repoussant comme une goutte d'eau sur une feuille de lotus.

Ces vecteurs se caractérisent de ce fait par un temps de demi-vie plasmatique prolongé et une capture hépatique réduite. L'absence de reconnaissance par les macrophages du foie, de la rate et de la moelle est d'autant plus prononcée que les liposomes sont de faible taille. Le temps de résidence dépend de la longueur

des chaînes de PEG. Des approches similaires ont été appliquées à d'autres classes de nano-objets comme les puits quantiques. Ces vecteurs de 2^e génération, encore appelés vecteurs furtifs, ont une probabilité importante de traverser des vaisseaux de perméabilité accrue comme ceux localisés au niveau des tumeurs ou des foyers infectieux. Cela permet donc le ciblage de tumeurs hors du territoire hépatique ou de la rate. Par ailleurs, les nanoparticules préparées à partir des chaînes moléculaires spécifiques sont capables de traverser la barrière hémato-encéphalique [4].

Les vecteurs de 3^e génération

Ces systèmes sont constitués par des vecteurs de 2^e génération sur lesquels ont été greffés des ligands spécifiques (anticorps monoclonal, acide folique...) capables de leur conférer une spécificité vis-à-vis d'une cible cellulaire (récepteurs) [4].

L'imagerie diagnostique et thérapeutique

Différentes nanoparticules peuvent être employées en imagerie, en résonance magnétique, en ultra-son, en tomographie à émission de positron, etc. [31]. Elles sont représentées par plusieurs types d'objets que sont les vésicules de lipides (liposomes), les puits quantiques qui sont des nanocristaux de composés semi-conducteurs, les nanoparticules magnétiques constituées d'oxyde de fer sous forme colloïdale qui sont utilisées comme agents de contraste en imagerie à résonance magnétique.

Le choix du type d'objet va dépendre de la technologie d'imagerie que l'on souhaite mettre en œuvre et du type de pathologie que l'on veut visualiser (tableau 1).

Ces produits peuvent être utilisés à la fois dans le diagnostic et la thérapie. Ainsi, dans la neutronthérapie, les nanoparticules à base de gadolinium ne ciblent et ne s'incorporent que dans les cellules cancéreuses qui peuvent être ensuite détruites par l'application d'un faisceau de neutrons. Cette technique va donc épargner la destruction des cellules saines. Elle est en cours de développement aux États-Unis et au Japon.

La délivrance de gènes : la thérapie génique

La thérapie génique repose sur l'introduction de matériel génétique dans le but de réduire ou d'éliminer une maladie. La principale difficulté à l'heure actuelle réside dans le transport du gène d'intérêt dans les cellules cibles. En effet, l'ADN est une macromolécule anionique et hydrophile, incapable de franchir les membranes cellulaires hydrophobes : il est donc nécessaire de la vectoriser.

Les vecteurs peuvent être viraux ou chimiques. Les vecteurs chimiques sont essentiellement constitués de nanoparticules. Le but de ces vecteurs est de mimer le mécanisme d'action des virus. Ils devront présenter les avantages de :

- offrir une bonne tolérance vis-à-vis du système immunitaire,

tableau 1

Exemples d'agents de contraste nanométriques		
Type de nanoparticule	Agent de contraste	Développement
Liposomes	99mTC	Essai clinique
	Gadolinium	Artirem - dotarem
	[2-18F]FDG	Essai clinique
Puits quantiques	Puits quantiques	Essai clinique
	Puits quantiques-micelles	Essai clinique
	Puits quantiques-conjugués	Essai clinique
Nanoparticules magnétiques	Oxyde de fer-dextran	Endorem – cliavist – sinerem – lumirem
	Oxyde de fer-polyacrylamide	Essai clinique
	Oxyde de fer-SLN	Essai clinique
	Oxyde de fer-insuline	<i>In vitro</i>
Nanoparticules pour échographie	Hexafluorure de soufre (sous de microbulles)	Sonovue
Dendrimères	Gadolinium	Prohance

Source : [24].

- transporter du matériel génétique sans limitation de taille,
- possibilité d'administrations répétées, car il n'existe pas de réponse immunitaire spécifique,
- peu d'intégration dans le génome, donc absence de risque de recombinaison virale.

La délivrance de vaccins

Les nanoparticules sont utilisées dans l'élaboration d'un vaccin afin :

- d'administrer les antigènes par la muqueuse : la voie parentérale induit principalement une immunité cellulaire et humorale alors que la voie muqueuse (voie orale, voie nasale) est plus appropriée à une immunité mucosale efficace,
- de développer une réponse immune après injection unique de vaccin,
- d'améliorer l'efficacité des vaccins en associant aux antigènes vaccinaux des nanoparticules pour leur conférer des capacités soit de stimuler la réponse immunitaire ou au contraire de modérer le système immunitaire pour obtenir un effet thérapeutique optimal sans effets indésirables [18, 10, 8, 50]. Ces systèmes permettent donc d'augmenter le temps d'exposition des antigènes vis-à-vis des cellules réceptrices et d'en optimiser et contrôler la réponse [18] en favorisant les interactions antigènes-anticorps-cellules immunitaires sur un même site que constitue la nanoparticule.

L'hyperthermie médicale

Les nanoparticules font l'objet de recherches dans le domaine de l'hyperthermie médicale.

Le principe de l'hyperthermie médicale est de détruire des cellules humaines notamment tumorales en leur appliquant une élévation de température pendant quelques heures. Ainsi, en Allemagne, le Pr Maier-Hauff a soigné un glioblastome (tumeur cérébrale) après avoir injecté

des nanoparticules magnétiques à base de fer dans le cerveau. Sous anesthésie générale, ces nanoparticules, absorbées plus rapidement par les cellules tumorales que par les cellules saines, ont été chauffées grâce à un champ magnétique extérieur. Les cellules tumorales soumises à un tel traitement ont été détruites [4].

Les particules d'or ont la particularité de chauffer lorsqu'on les éclaire. Elles peuvent être fonctionnalisées pour dépister une tumeur cancéreuse par la greffe d'une sonde spécifique constituée par un agent de contraste à base de gadolinium. Il suffit ensuite de détecter la tumeur et de l'irradier avec un faisceau de lumière : les particules d'or ainsi chauffées détruisent les cellules tumorales.

Dans cette optique, l'équipe du professeur West, de la Rice University, a mis au point un système de nanoballes en or capables de détruire certains cancers inopérables. Ces nanoballes constituées de particules de silice de 110 nm de diamètre recouvertes d'une couche d'or s'échauffent quand des rayons infrarouges sont envoyés [4]. ❖

Un secteur à fort potentiel économique

Dans les pays industrialisés, les nanosciences ont pris un essor considérable. Ce domaine tend à prendre une place prépondérante dans la science et la technologie du début du XXI^e siècle et, si l'on peut considérer que le XX^e siècle a été celui du développement de la microélectronique, le XXI^e siècle sera, sans aucun doute, celui des nanotechnologies. Rares sont les domaines qui vont échapper à la « nano-offensive » !

Ce grand mouvement n'est pas spontané. Il est mû par des efforts de recherche considérables : en 2006, les dépenses mondiales de recherche et développement consacrées aux nanotechnologies se sont élevées à 11,8 milliards de dollars, dont 5,8 sur fonds publics, 5,3 sur fonds privés et 0,7 en capital-risque [55]. Aux États-Unis, en 2006, les dépenses fédérales de recherche et développement ont été de 1,8 milliard de dollars, en Europe de 2,1 (dont 500 millions en provenance des fonds communautaires), de 1,7 en Asie (dont la moitié au Japon) et de 200 millions de dollars répartis sur d'autres régions du monde (Russie, Australie...). En regard de ces dépenses, les perspectives économiques annoncées sont colossales : on estime qu'à l'horizon 2014, 15 % de l'activité manufacturière mondiale sera concernée par les nanotechnologies, soit un enjeu de l'ordre de 2 600 milliards de dollars et 2 000 000 d'emplois.

Ces estimations couvrent des domaines très variés et il convient de clarifier ce que l'on entend par « nanotechnologies ». Ce terme recouvre des champs de connaissances et d'activités très diversifiés : quoi de commun en effet entre les nanomatériaux (terme aujourd'hui largement utilisé mais aux contours encore flous), la nanoélectronique, la nanobiologie, la nanomédecine... ? Il y a bien la taille, mais cela ne concerne vraiment que les nanoparticules et à condition d'y associer la modification consécutive d'au moins une propriété... De plus, s'agissant des impacts de cette nouvelle activité humaine (objet du présent dossier), les conséquences sont également très variées et appellent évidemment des analyses et réponses différenciées. Les nanomatériaux font l'objet d'interrogations sur la sécurité sanitaire (d'abord des travailleurs exposés, puis de la population générale) et environnementale (directement par dissémination de nanoparticules ou indirectement au cours du cycle de vie des produits). La nanoélectronique (et les nanosystèmes et nanocomposants associés) est plutôt confrontée à des craintes sociétales (dérives liberticides), alors que nanobiologie et nanomédecine font l'objet de réserves relatives aux risques de transgression et transhumanisme.

Cet article vise à faire un panorama très rapide des perspectives économiques, en termes de marché et de

création d'emplois, associées aux nanotechnologies. Les principales données numériques citées proviennent de rapports ou bases de données récents traitant de ce sujet [55-37], auxquels le lecteur pourra se référer pour de plus complètes informations.

Un impact économique et industriel multi-domaines

Les nanotechnologies ont franchi une première étape décisive : elles sont passées de la phase de découverte (de 1980 à 2000) à la phase de commercialisation. Elles concernent désormais de nombreux secteurs industriels, les plus emblématiques étant l'industrie pharmaceutique qui commercialise des médicaments nanostructurés (certains anticancéreux), l'énergie avec des électrodes de batteries grand public et les revêtements qui recouvrent bon nombre des objets qui nous entourent comme par exemple les carrosseries des automobiles.

Bien que par définition invisibles à l'œil nu, les nano-objets sont donc déjà dans notre quotidien. L'industrie des loisirs a été dans les premières à profiter des propriétés mécaniques des nanotubes de carbone pour alléger raquettes de tennis, clubs de golf, skis et autres équipements sportifs.

Il est maintenant bien connu que le dioxyde de titane est utilisé comme filtre anti-UV dans les crèmes solaires et que l'industrie des pneumatiques compte beaucoup sur des matériaux nanostructurés pour minimiser les frottements roue/sol (sans pénaliser la sécurité) et par conséquent la consommation de carburant.

La microélectronique est également très utilisatrice de nano-objets, comme les nanolasers dans les lecteurs de DVD ; les capacités de stockage d'information sont décuplées grâce à la miniaturisation et la nanostructuration va accélérer le développement d'objets communicants multi-applications. Enfin, les nanosystèmes potentialisent les capacités des systèmes d'identification et de localisation, et par conséquent sont amenés à jouer un rôle croissant dans les technologies de traçabilité des produits, la sécurisation des modes de paiement et d'échange d'information en ligne.

Dans le domaine de la santé, des prothèses, implants ou valves cardiaques en nanomatériaux biocompatibles sont déjà, ou en voie d'être, utilisés. La vectorisation des médicaments suscite également de grands espoirs en limitant les effets secondaires de certaines chimiothérapies très invalidantes.

Perspectives de marché

C'est au début des années 2000 que les premières évaluations de marché ont vu le jour. Ainsi aux États-Unis en 2001, la NSF (National Science Foundation) [40] a évoqué une perspective de marché de 1 000 milliards

Louis Trepied

Chargé de missions, ministère de l'Économie, de l'Industrie et de l'Emploi, Direction générale des entreprises

Les références entre crochets renvoient à la bibliographie p. 77.

de dollars à l'horizon 2015. D'autres scénarios révèlent des chiffres plus modestes, comme les 150 milliards du Mitsubishi Institute (2002) [33] pour 2010, ou plus optimistes comme les 2 600 milliards de Lux Research (2004) [54] pour 2014. En fait, ces disparités proviennent du champ couvert par les estimations ainsi que de la part de valeur ajoutée directement attribuée aux nanotechnologies dans les produits. Le graphe ci-dessous, extrait d'un rapport de la Commission européenne de 2006 [53], résume l'ensemble des prévisions et illustre bien l'imprécision de tels chiffrages. Néanmoins, même en s'en tenant aux scénarios les plus timides, il y a bel et bien un potentiel économique attaché aux nanotechnologies.

Sur la période 1999-2003, ce sont les secteurs de la nanobiologie et des nanosystèmes qui représentent la part majoritaire du marché (figure 2), mais, en termes de perspectives, les nanomatériaux et la nanoélectronique devraient rapidement prendre les premières places (figure 3).

De tels renversements de marché ne peuvent s'observer qu'au prix de variations rapides des taux de croissance des divers secteurs et donc d'une très forte adaptabilité des outils de production. Il n'en reste pas moins que la prédominance annoncée des nanomatériaux est surprenante au regard de la croissance des pays émergents, tels la Chine et l'Inde, dont les besoins en nouvelles technologies de la communication (informatique, téléphonie mobile) vont conduire à une explosion des secteurs industriels concernés, essentiellement l'électronique plus que les matériaux *stricto sensu*. Enfin, il faut garder à l'esprit le paramètre d'acceptabilité sociale des nanotechnologies, susceptible de perturber durablement la croissance du secteur, sans oublier non plus les dispositifs réglementaires qui progressivement vont se mettre en place pour prévenir

les risques sanitaires et environnementaux prêtés aux nanomatériaux.

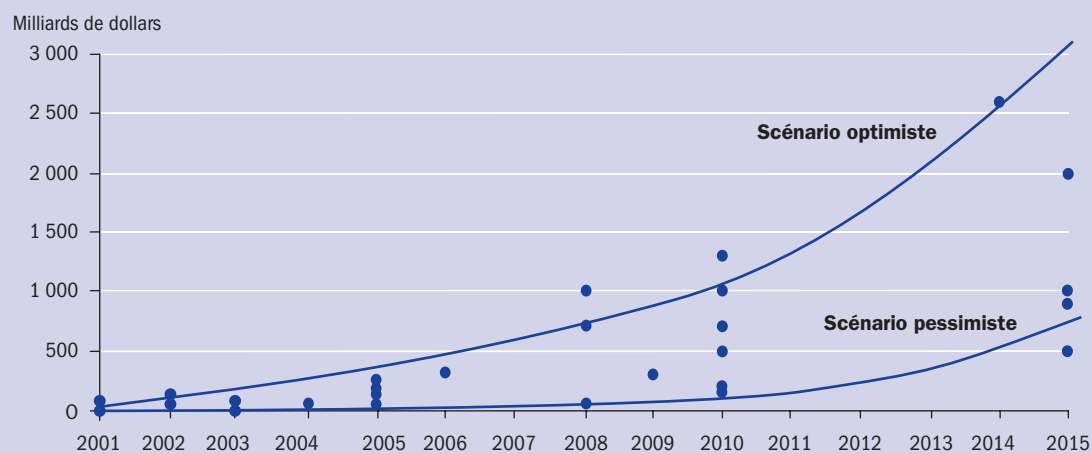
En tout état de cause, il est probable que la croissance des nanotechnologies n'impactera pas de la même manière les grandes zones mondiales. Que ce soit pour des raisons de taux de croissance globale des économies ou d'acceptabilité des risques associés aux nanotechnologies (et par voie de conséquence en raison du caractère plus ou moins contraignant des législations à venir), il semble se confirmer que la zone Asie-Pacifique verra les plus forts taux de croissance, alors que les États-Unis et l'Europe seront sur des trajectoires similaires, traduisant tout à la fois la similitude de leurs développements et des attitudes voisines face aux risques soulevés par les nanotechnologies. La figure 4 traduit ces perspectives par zones géographiques.

Perspectives en termes d'emplois et de création d'entreprises

Les prévisions de la NSF [40] font état d'environ 2 000 000 de travailleurs dans les nanotechnologies à l'horizon 2015. Ces emplois seraient répartis de la façon suivante : 0,8 million aux États-Unis, 0,5 au Japon, 0,4 en Europe, 0,2 en Asie hors Japon et 0,1 sur les autres zones. À ces emplois directs il convient d'ajouter environ 5 millions d'emplois indirects, ce qui illustre globalement le poids de l'activité économique autour des nanotechnologies. Néanmoins, comme en ce qui concerne les volumes de marché, ces chiffres sont très dispersés et, par exemple, Lux Research [54] prévoit plutôt 10 millions d'emplois directs et indirects en 2014. Quoi qu'il en soit, le poids en termes de ressources humaines est considérable et l'on peut retenir qu'environ 10 % des emplois manufacturiers seront liés aux nanotechnologies d'ici 2015.

figure 1

Compilation des prévisions de marché (en milliards de dollars) des nanotechnologies



Source : [53]

Ces emplois seront positionnés dans un vaste spectre d'entreprises, allant des *startups* aux grands groupes, en couvrant l'ensemble des PME. De grands groupes

historiques sont déjà largement présents dans ce secteur, les plus motivés étant les chimistes (Bayer, BASF, Arkema, Rhodia...), mais s'y trouvent également des groupes

figure 2

Marché mondial des nanotechnologies en 2003 (en milliards de dollars)

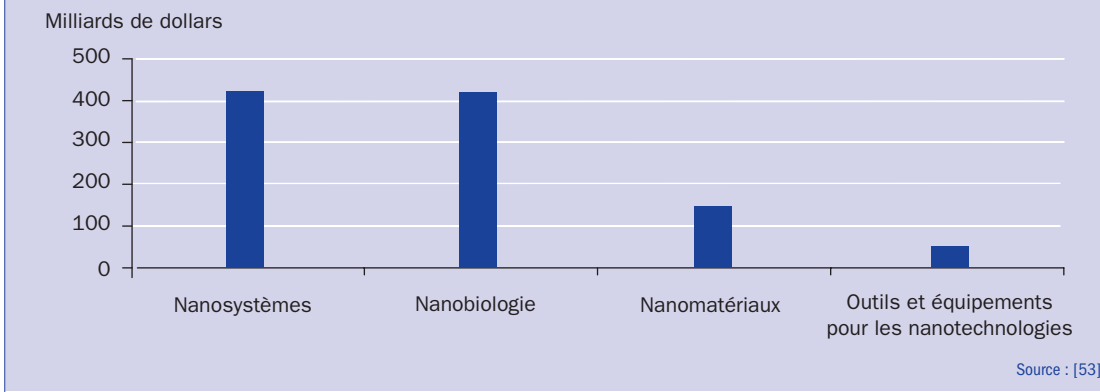


figure 3

Projections en 2015 du marché mondial des nanotechnologies (en milliards de dollars)

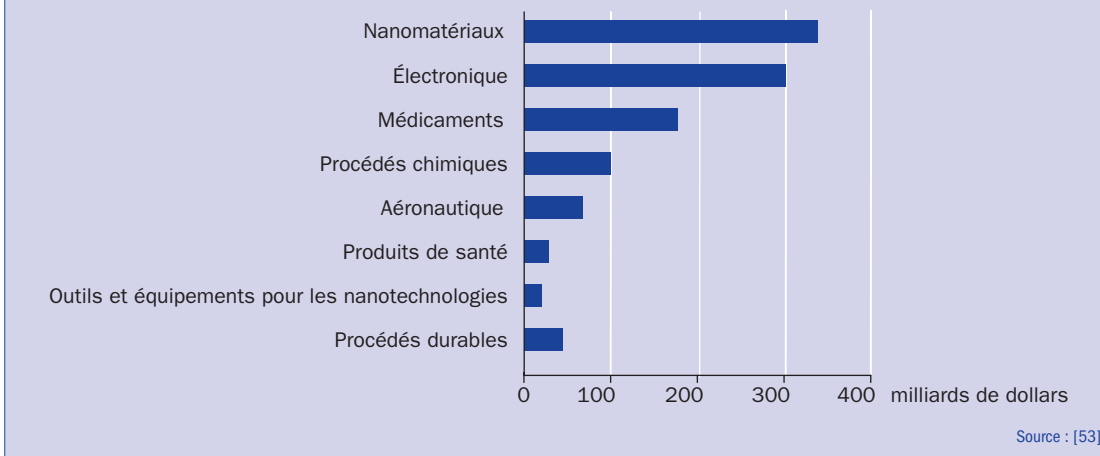
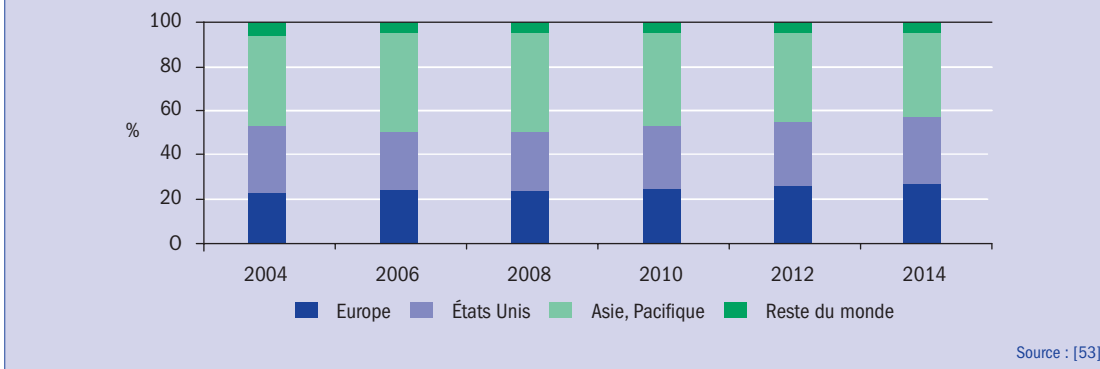


figure 4

Répartition des parts de marché en fonction des zones géographiques



utilisateurs comme General Electric, Philips et beaucoup d'autres. Une étude plus fine (NanoInvestorNews [37]) montre cependant que ce champ concerne majoritairement des entreprises récentes et la plupart du temps créées à cette fin, comme représenté sur la figure 5.

Ces entreprises sont pour un tiers impliquées dans la production et la transformation des nanomatériaux, pour un autre tiers en nanobiologie et pour le dernier tiers sur les nanosystèmes et nanocomposants.

Bien évidemment, l'activité nanotechnologie dépasse largement le cadre des entreprises privées évoquées ci-dessus. La recherche publique est très présente, mais l'on constate que les approches gouvernementales dépendent beaucoup des pays considérés. Ainsi, en Europe et au Japon, la recherche publique joue un rôle très important. En France, en 2006, les dépenses publiques affectées aux nanotechnologies avoisinaient les 350 millions de dollars, à comparer aux 505 de l'Allemagne et 180 du Royaume-Uni [55]. Les fonds communautaires européens dédiés aux nanotechnologies s'élevaient à 626 millions de dollars en 2006, à comparer aux 1 775 des États-Unis et 1 650 de la zone Asie (Japon, Corée, Chine, Taïwan, Inde). À noter que, pour une comparaison non biaisée, il faut ajouter,

en Europe, les fonds communautaires et les dépenses nationales, ce qui en 2006 représente environ 1 800 millions de dollars. Globalement, les grandes zones mondiales investissent des sommes très voisines, bien qu'au niveau des pays les implications soient plus contrastées.

Conclusion

Comme cela vient d'être montré ci-dessus, les nanotechnologies sont incontestablement un secteur à fort potentiel économique. Il est peut-être utile de mettre en regard les perspectives de ce marché avec d'autres marchés mondiaux.

Le marché mondial de la chimie (pharmacie comprise) s'élevait en 2005 à 1 800 milliards d'euros, celui de l'automobile à 1 100 milliards d'euros en 2007 et celui de la sidérurgie à 800 milliards d'euros. Cette comparaison éclaire les perspectives pour les nanotechnologies et, bien sûr, permet de comprendre les appétits qu'elles suscitent. Mais, en retour, cela souligne également la nécessité d'un développement responsable, permettant de bénéficier des fruits de la croissance tout en respectant les impératifs de sécurité sanitaire et environnementale. ☼

figure 4

