

Les nano-matériaux, au cœur de la galaxie nano

L'engouement actuel pour les nanotechnologies se traduit par une croissance significative de l'investissement public en recherche et développement dans la plupart des pays industrialisés. Ainsi entre 1998 et 2003, cet investissement a été multiplié par six en Europe, par huit aux Etats-Unis et au Japon, pour atteindre 3 milliards d'euros au niveau planétaire. Portés par la dynamique des nanotechnologies, briques essentielles à leurs développements, les nano-matériaux devraient générer la plus grande part de ce marché à court et moyen termes.

par Gilles Le Marois (*) et Dominique Carlac'h (**)

Le marché mondial des nanotechnologies, encore dans sa phase d'émergence, est estimé en 2001 à 40 milliards d'euros. En 2010-2015, les enjeux économiques liés à l'avènement des nanotechnologies atteindraient 1 000 milliards d'euros.

On estime que l'impact économique global lié à l'utilisation des nano-matériaux devrait représenter 34 % de ce marché, hors transport et chimie, soit 340 milliards d'euros par an en 2010 [1]. (Figure 1)

Les applications toucheraient toutes les grandes classes de matériaux, comme le montre une étude récente qui prévoit pour chaque classe un doublement du marché américain des nano-matériaux tous les 3 ans. (Figure 2)

Au travers de ces quelques données, on conçoit aisément l'importance straté-

gique que revêt le développement des nano-matériaux. Pour mieux appréhender l'intérêt qu'ils suscitent, encore faut-il comprendre tout d'abord ce qu'est un nano-matériau et en quoi sa spécificité est novatrice.

(*) Gilles Le Marois est Chargé de mission à la Direction générale de l'Industrie, des Technologies de l'Information et des Postes (Digitip/Minéfi) et suit plus particulièrement les matériaux et les nanotechnologies.

(**) Dominique Carlac'h est Directrice de la société *Développement & Conseil*, cabinet spécialisé dans le marketing, la stratégie et le financement des technologies innovantes.

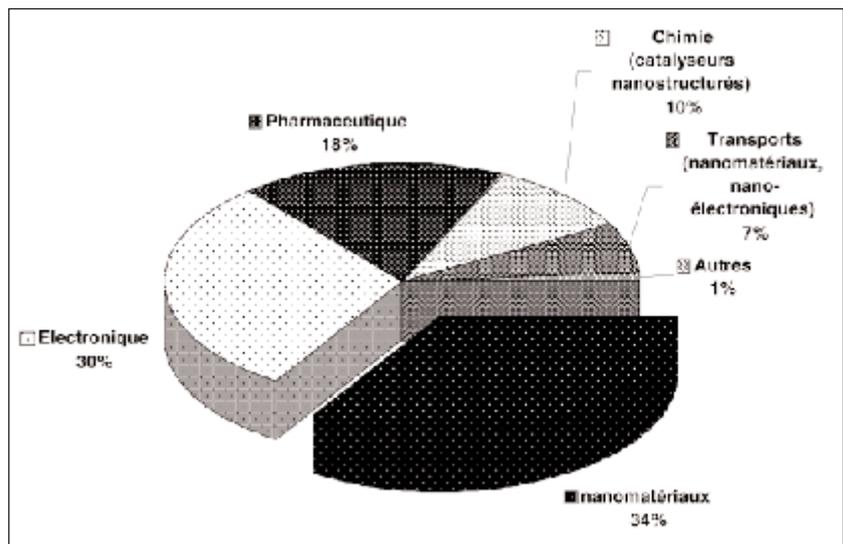


Fig. 1. Impact économique global des nanotechnologies en 2010.

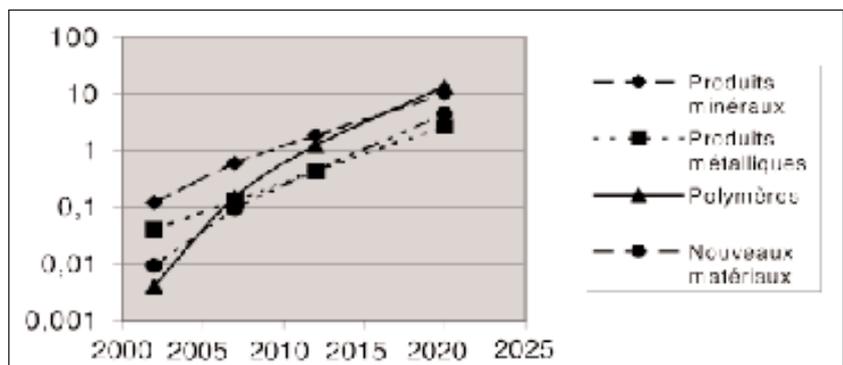


Fig. 2. Evolution du marché américain des nano-matériaux, en milliards d'euros [2].

Terminologie

S'il n'y a pas de réelle définition des nano-matériaux, tant ceux-ci dépendent de l'application visée, on s'accorde généralement pour dire qu'il s'agit de matériaux composés ou constitués de nano-objets qui confèrent à ces matériaux des propriétés améliorées ou spécifiques de la dimension nanométrique (1-100 nanomètres). Ces nano-objets peuvent se présenter sous la forme de particules, de fibres ou tubes, de cristaux ou lamelles, de porosités. Ils sont utilisés soit en tant que tels (par exemple, comme catalyseur en solution ou comme marqueurs sous forme de nanocristaux fluorescents dont la couleur varie en fonction de la taille des particules et de l'éclairage), soit en vue d'élaborer des matériaux.

Différentes techniques sont utilisées pour la fabrication de ces nano-objets (miniaturisation, réaction *in situ*, construction contrôlée à partir d'atomes ou de molécules,...). Elles contribuent essentiellement à augmenter les surfaces de contacts et d'échanges, ce qui offre de nombreux avantages (résistance mécanique accrue, solutions pour le stockage et la production d'énergie, meilleure sensibilité dans le domaine du contrôle et de l'analyse...), à apporter de nouvelles propriétés (quantum effects...) ou de nouvelles fonctionnalités. Par ailleurs l'augmentation de la densité des nano-objets que permet leur petite taille, accroît l'efficacité des charges ainsi introduites (comme c'est le cas dans les crèmes solaires) ou procure un gain de propriété appréciable (allègement des véhicules).

Nano-tubes de carbone

Parmi les nano-objets, les nano-tubes de carbone, de par leurs propriétés mécaniques, thermiques, électriques exceptionnelles, forment une catégorie à part. Ils appartiennent à la famille des fullerènes, troisième forme allotropique du carbone, après le graphite et le diamant, qui a la propriété de former des cages fermées. Le diamètre des tubes obtenus varie entre quelques dizaines et quelques centaines d'Angströms, leur longueur atteignant quelques

microns. Des physiciens viennois ont récemment ouvert un champ d'investigations totalement nouveau en démontrant le caractère ondulatoire de telles molécules. Les nano-tubes de carbone à une ou plusieurs parois peuvent être obtenus par ablation laser, décharge plasma, décomposition catalytique ou par voie chimique (CVD, *Chemical Vapor Deposition*).

Egalement, des dérivés des fullerènes ont été synthétisés : ainsi le sumanène, constitué d'atomes de carbone et d'hydrogène, offre une plus grande souplesse en termes de fonctionnalisation et forme. Il pourrait être utilisé en particulier comme vecteur de relargage spécifique de médicaments. Il a enfin été démontré que l'on pouvait insérer à l'intérieur de ces tubes des particules magnétiques pour une utilisation comme capacité de stockage de grande fiabilité.

De telles structures ne se limitent pas aux seuls composés carbonés. Elles ont été également obtenues à partir de nitrure de bore et de siliciure de molybdène, ce qui ouvre un champ d'investigation immense.

Les nano-matériaux sont généralement regroupés selon trois familles de produits :

- *les matériaux nano-renforcés ou nano-chargés*. Les nano-objets sont incorporés ou produits dans une matrice pour apporter une nouvelle fonctionnalité ou modifier des propriétés mécaniques, optiques, électriques, magnétiques ou thermiques (dans des produits cosmétiques, dans des vernis, peintures, bétons, encres d'imprimerie, dans les matériaux composites, pour la lithographie électronique, etc.).

Parmi les différents procédés utilisés pour la fabrication de nanoparticules, on peut citer un dispositif générant des ondes sonores, adapté à une production en ligne et d'un coût, d'après leurs auteurs, dix fois inférieur à celui d'un broyeur classique.

L'homogénéité de distribution des charges dans la matrice est généralement essentielle et constitue la princi-

Les nano-tubes sont une troisième forme allotropique du carbone, après le graphite et le diamant, qui a la propriété de former des cages fermées

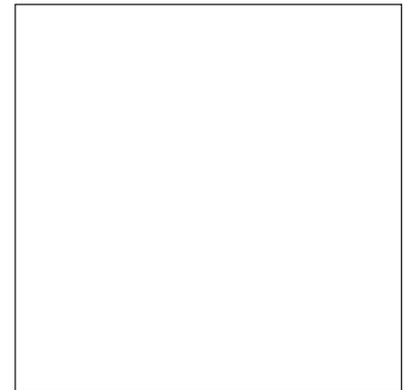


Fig. 3. Revêtement nanostructuré TiN/TiAlN pour outillage. La structure super-réseau ainsi obtenue lui confère des propriétés remarquables. Photo P. Bayle-Guillemaud (CEA-DFRMC).

pale difficulté rencontrée lors de l'élaboration de ce type de matériau.

- *Les matériaux nano-structurés en surface*. Le dépôt de nano-structures ou la réalisation de revêtement à partir de (multi) nano-couches élémentaires de structure finement contrôlée permet de doter la surface de propriétés préalablement déterminées (résistance à l'érosion, résistance à l'oxydation, revêtements hydrophobes, résistance à l'abrasion, etc.) ou de lui conférer de nouvelles fonctionnalités en termes d'aspect, d'adhérence, de dureté, de résistance à la corrosion, de propriétés optiques, électroniques... (Figure 3)

Les procédés de fabrication s'appuient

sur des principes de dépôt physique (PVD, faisceau d'électrons, laser pulsé...) ou chimique (CVD, sol-gel, électro-

greffage). Ces derniers procédés d'élaboration se prêtent particulièrement bien à la fabrication de ce type de revêtements. Au stade de la recherche, on évalue également les possibilités d'auto-organisation de particules en vue de réaliser des nanostructures contrôlées.

- *Les matériaux nano-structurés en volume*. Ce sont des matériaux qui, par leur structure intrinsèque nanométrique (porosité, microstructure, arrangement moléculaire) bénéficient de propriétés physico-chimiques nouvelles ou améliorées (électrode de carbone poreux pour piles à

combustible). Ces matériaux peuvent être obtenus par synthèse directe et auto-assemblage moléculaire (comme par exemple les aimants moléculaires dont la capacité de stockage pourrait atteindre 350Tbits/cm³), ou par modification de leur structure intrinsèque. Ainsi le contrôle de la nanostructure, obtenue par forte déformation, permet de fabriquer des céramiques superplastiques.

Les deux principaux verrous technologiques qui peuvent limiter aujourd'hui leur développement et leur usage sont la stabilité de la nano-structure dans les conditions d'usage et les contrôles de fabrication.

Certains produits peuvent être obtenus en combinant deux familles. Ainsi l'introduction ou la co-déposition de nano-objets au sein de revêtements multi nano-couches permet une véritable fonctionnalisation de la surface. Cette technique est en particulier utilisée pour réaliser des revêtements durcis (exemple : par co-déposition de SiC et d'alumine dans du Ni déposé par électrolyse).

Différents nano-objets peuvent être également élaborés par synthèse biominétique. La présence de cavités dans les gels de protéines globulaires a été ainsi utilisée dans la fabrication de nano-particules de fer superparamagnétique.

Seuls ou en combinaison, les nano-matériaux offrent de nombreuses perspectives et les enjeux économique liés à leur développement semblent d'ores et déjà considérables.

Perspectives et enjeux économiques

Les applications des nano-matériaux sont directement liées à leurs fonctions, caractéristiques, propriétés attendues et se situent souvent en amont d'innovations majeures (ex : nano-tubes de carbone pour les technologies de l'information et de l'énergie, l'optronique). Au travers d'une revue non exhaustive de ces applications, nous verrons qu'elles sont susceptibles d'irriguer la plupart des secteurs industriels et que le soutien à leur développement peut

constituer un garant du maintien et/ou de la croissance de l'activité de ces secteurs [3].

L'industrie microélectronique est l'une des premières concernées. Fortement internationalisée, elle est l'objet d'une forte pénétration japonaise et américaine. En France, l'industrie des semi-

conducteurs, malgré la concurrence internationale, connaît un taux de croissance supérieur au reste de l'industrie et bénéficie d'investissements dynamiques, notamment grâce au niveau élevé de la recherche française. Pourtant, la miniaturisation apparaît souvent comme un véritable casse-tête où chaque étape de fabrication doit trouver des solutions afin de garantir des capacités toujours plus étendues dans des espaces de plus en plus étroits (transistors des microprocesseurs, réseaux d'interconnexion...). Dans ce domaine, les nano-matériaux et les procédés de dépôt peuvent apporter des réponses. L'exemple de la start-up française Alchimer est illustratif de l'apport constitué par les nano-matériaux.

Miniaturiser les composants

Alchimer a été créée en essaimage du Commissariat à l'Énergie Atomique en 2001. Le cœur de métier d'Alchimer est la conception, le développement, la réalisation et la commercialisation de formulations chimiques spécifiques et des

Les applications des nano-matériaux sont susceptibles d'irriguer la plupart des secteurs industriels

menés par Alchimer portent actuellement sur certaines étapes

procédés permettant à ses clients d'intégrer des technologies de fonctionnalisation des surfaces de leurs objets. Les activités d'Alchimer sont orientées autour de trois grands domaines d'application : le biomédical, la microélectronique, l'environnement. Dans le domaine microélectronique, les travaux clés de l'interconnexion cuivre, et en particulier, les étapes de création de couches de germination sur les couches barrières semi-conductrices. En effet, la construction des processeurs d'ordinateurs repose sur un réseau d'interconnexions métalliques entre des transistors dont les dimensions sont aujourd'hui de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. C'est donc à la même échelle qu'une véritable « tuyauterie » doit être



Fig. 4. Electro-greffage.
Photo © CEA-LETI.

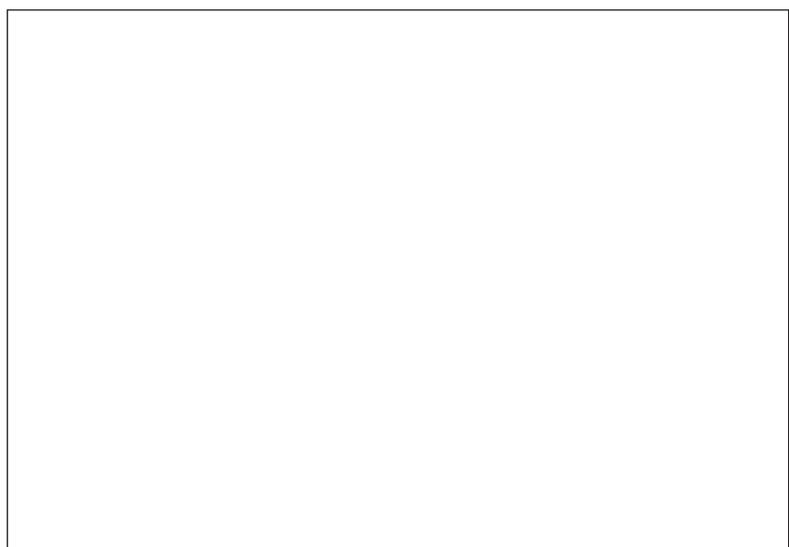


Fig. 5. Electro-greffage.

réalisée, qui ne comporte pas moins de 10 étapes. Mais aujourd'hui, pour réaliser cette prouesse, l'industrie microélectronique a recours à un enchaînement de procédures ne comportant pas moins de 265 étapes. Les travaux d'Alchimer ont permis à cette jeune entreprise de proposer une alternative, jugée très prometteuse, à cette multiplication de phases : l'électro-greffage. Ce nouveau procédé est aujourd'hui en cours de qualification dans l'industrie de la microélectronique. (Figures 4 et 5)

Des écrans enroulables

Toujours dans le domaine de l'électronique, la société Inanov, située à Paris et créée en 2002, a développé grâce à

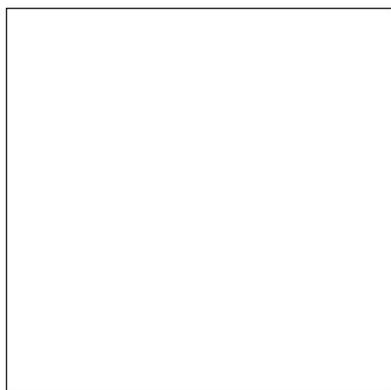


Fig. 6. Émetteur d'électrons en nanotubes de carbone (INANOV).

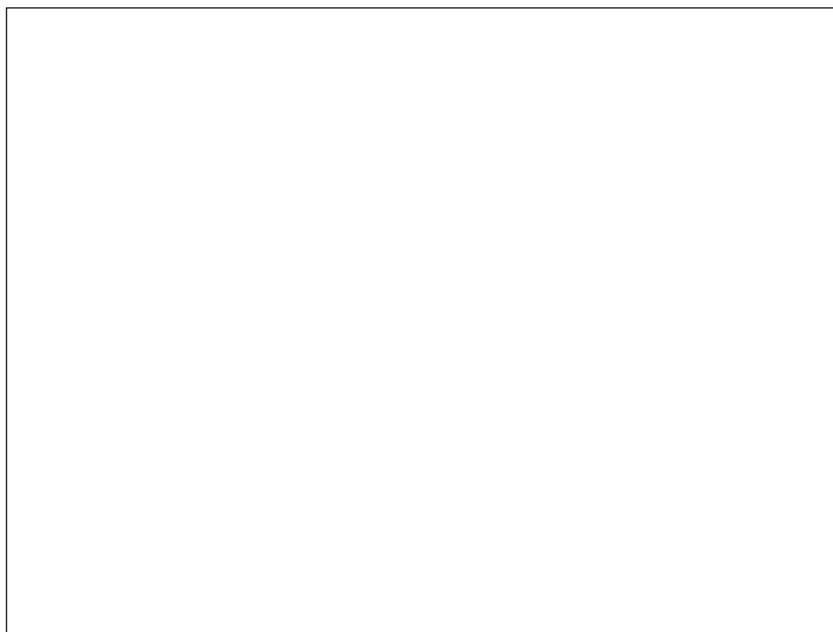


Fig. 7. Poudre de carbone avec catalyseur de Pt utilisée pour les électrodes des piles à membrane (PEM). Photo S. Escribano (CEA-LITEN).

l'apport des nanotechnologies, une nouvelle génération d'écrans numériques. Ces écrans présentent la caractéristique d'être à la fois souples et tactiles. Cette innovation baptisée « Nanopage », offre un très grand format d'affichage sous forme d'un écran enroulable découpable de toute forme. Il s'agit d'une technologie reposant notamment sur des émetteurs d'électrons en nanotubes de carbone (nano-émetteurs), couplés à des microtubes cathodiques disposés en matrice dans une nappe en polymères. Comme illustré ci-dessous, chaque émetteur d'électrons en nanotubes de carbone droits et réguliers mesure 50 nanomètres. (Figure 6)

Le secteur de l'environnement est également concerné en premier lieu. Les dépenses liées à l'environnement en France sont supérieures à 24 milliards d'euros, dont 1 milliard à la charge des entreprises. Elles représentent environ 1,8 % du PIB et génèrent 309 000 emplois. La réduction des émissions de polluants est dans ce domaine un enjeu majeur. La mise en œuvre du protocole de Göteborg (émissions de polluants) devrait coûter 60 milliards d'euros par an d'ici 2010 à l'Union européenne, dont 9

Une alternative, jugée très prometteuse à la multiplication de phases, est l'électro-greffage

milliards pour la France, la majorité (85 %) étant absorbée par les mesures concernant les oxydes d'azote et les composés organiques volatils, responsables de la pollution par l'ozone.

L'utilisation de composants à base de nanoparticules permettra, grâce à un ratio surface/volume favorable, d'absorber davantage de polluants et d'améliorer le rendement cinétique de traitement. Les recherches en cours concernent en particulier les catalyseurs permettant de traiter des effluents à forte teneur en monoxyde de carbone et en oxyde d'azote, les filtres fonctionnalisés par des couches polymères ayant des propriétés de capture de polluants ioniques ou moléculaires, les céramiques nanoporeuses pour la filtration d'air, d'eau ou de polluants et les aérogels qui peuvent piéger des polluants.

Capter les polluants

La start-up Alchimer développe également une expertise dans le domaine de l'environnement. La fonctionnalisation de surfaces conductrices elles-mêmes très diversifiées (grilles, poudres...) par des couches nanométriques, permet la capture de polluants dans le traitement d'effluents liquides ou gazeux. Il a été montré que la taille nanométrique des zones de piégeage présente le double avantage d'être efficace dans le domaine des traces (contaminants radioactifs...) et de générer très peu d'effluents secondaires.

Des avancées importantes dans le secteur de l'énergie sont également attendues. L'enjeu est important pour un secteur qui représente 3 % du PIB, 17 % des investissements industriels et qui génère 230 000 emplois (directs et indirects) soit 6 % des emplois de l'industrie.

Ces avancées visent aussi bien les économies d'énergie, que l'amélioration du rendement des systèmes énergétiques ou le développement des énergies propres.

Ainsi, le stockage et la restitution de l'hydrogène constituent des freins au

tiques ou le développement des énergies propres.

Ainsi, le stockage et la restitution de l'hydrogène constituent des freins au développement des piles à combustible : ces verrous devraient être levés grâce à la maîtrise de la production de nanotubes de carbone, de poudres métalliques nanométriques ou encore de structures nanoporeuses. (Figure 7)

Améliorer la performance des piles à combustibles

A cet égard, les travaux de la *start-up* Nanoledge ont valeur d'exemple. Nanoledge a été créée à Montpellier en 2001 pour fabriquer et commercialiser des nanotubes de carbone. Les nanotubes de carbone permettent d'améliorer les performances des matériaux (propriétés mécaniques, conductrices, etc...).

Nanoledge dévelop-

pe également des applications plus spécifiques à haute valeur ajoutée. Ainsi, Nanoledge travaille à l'augmentation de la performance et de la stabilité du cœur de pile en utilisant des nanotubes dans les électrodes de piles à combustible basse température. Ce sont alors les propriétés de conduction électrique et de surface spécifique des nanotubes qui sont valorisées.

Le faible rendement des piles et batteries limite aujourd'hui leur usage pour les systèmes embarqués : l'accroissement de la surface d'échanges qu'apporte l'intégration en surface de nano-objets «réactifs» comme les spinelles de Li et Mn, devrait lever ce verrou.

L'isolation thermique par des barrières nanostructurées permettra également des économies d'énergie substantielles. D'autres applications sont enfin attendues dans les domaines des systèmes photovoltaïques, de la catalyse....

L'industrie *textile* française, après avoir connu de profondes mutations, s'oriente de plus en plus vers des articles novateurs à forte valeur ajoutée, en particulier les textiles techniques. Le but est alors d'augmenter la qualité et les fonctionnalités des textiles tout en limitant l'augmentation des coûts de production et d'améliorer les propriétés

mécaniques, thermiques, optiques, chimiques...des tissus.

Certaines (nano)technologies sont d'ores et déjà couramment utilisées par la profession : technologie des plasmas pour métalliser les fibres en vue d'augmenter leur conductivité, pour les rendre hydrofuges, pour créer des motifs décoratifs; technologie de greffage radiochimique; électrospinning pour la production de nanofibres.

La recherche en France se concentre aujourd'hui sur le développement de nanocomposites fibres textiles-polymères (qui se caractérisent par leur résistance élevée, leur transparence, leur propriété ignifuge et leur faible poids) et l'incorporation de nanocharges organiques ou minérales à différentes étapes de fabrication du

produit textile, pour différentes fonctionnalités.

Cinquième puissance *chimique*

mondiale et deuxième européenne derrière l'Allemagne, la France doit sans cesse adapter son outil de production aux exigences environnementales et technologiques. Ce secteur est bien entendu à la pointe de développements majeurs dans la synthèse et la mise en œuvre de nano-matériaux susceptibles de trouver des applications dans de nombreux secteurs de l'industrie manufacturière.

C'est dans le domaine de la transformation des *matières plastiques* et des matériaux composites que les nano-matériaux devraient nourrir à court terme les plus grandes espérances commerciales. Les matériaux nanocomposites à matrice polymère présentent des performances particulièrement prometteuses (renforts, allègement, résistances à diverses agressions ...) et trouvent des applications dans les secteurs du textile, des transports et des biens de consommation. Exemple de pluridisciplinarité, leur développement intègre en effet le savoir-faire et les connaissances de la chimie minérale et organique et requiert l'implication de tous les acteurs de la chaîne de production et de commercialisation.

Ces matériaux sont déjà utilisés dans la fabrication de gaines de câbles électriques et de barrières anti-feu (poly-

mères chargés avec des particules d'argile). La recherche dans ce domaine se concentre sur les polymères nanostructurés et l'incorporation de nanocharges de type nanotubes de carbone et nanoparticules minérales (Ti, Si, Phosphates) pour la fabrication de matériaux hybrides.

Ainsi une société japonaise a développé pour ses objectifs optiques, une résine à fort indice de réfraction (2,10) en incorporant des nanoparticules de titane à un polymère aromatique. L'association entre une particule ferromagnétique, KNbO₃ et un polymère a permis la réalisation d'un matériau hybride présentant des propriétés électrorhéologiques exceptionnelles.

Le secteur de l'emballage bénéficie pleinement de ces avancées et offre des solutions en réponse aux réglementations européennes dans ce domaine, comme l'utilisation de matériaux biodégradables présentant une faible perméabilité à l'atmosphère ou de conteneurs plastiques pour le vin, grâce à l'incorporation de nanopoudres céramiques ...

Enfin, dans les domaines de la catalyse (amélioration de la combustion des carburants...), du contrôle chimique (air, eau, sols, substances illicites) et biochimique, la synthèse et l'intégration de nano-objets «actifs» visent à améliorer sensiblement les performances des produits ainsi développés.

Polir les surfaces

Autre exemple de la pénétration des nano-matériaux dans l'industrie chimique : la formulation de poudres pour le polissage de matériaux. A cet égard, on peut citer Baikowski Chimie dont le siège est situé à Annecy. Fondée en 1904, Baikowski Chimie conçoit et fabrique des produits destinés aux marchés des céramiques techniques, du polissage de précision et des additifs fonctionnels. Baikowski travaille sur de nombreuses particules d'oxydes minéraux : alumines, zirconium, terres rares, oxydes mixtes à base d'alumine. Son cœur de métier reste toutefois la fabrication de poudres d'alumine ultrapures, activité sur laquelle Baikowski est *leader* mondial. Ce savoir-faire a permis de développer une gamme de particules abrasives nanométriques pour suspen-

sions polissantes. Ces suspensions sont mises en œuvre dans le polissage de certaines couches métalliques et couches oxydes au cours du processus de fabrication des semi-conducteurs (*Chemical Mechanical Polishing*). Constituée d'un assemblage maîtrisé de deux types de poudres d'alumine : particules d'une quinzaine de nanomètres en mélange avec des particules de taille plus importante (au-delà de 100 nanomètres) la suspension finale permet d'assurer un optimum d'enlèvement de matière et un minimum de création de défauts (rayures).

Les pneumatiques et chambres à air représentent 60 % du chiffre d'affaires de l'industrie française du *caoutchouc*. Dans ce domaine, le Français Michelin est *leader* mondial.

L'introduction de nano-charges (noir de carbone, silice, nanotubes de carbone) dans l'élastomère offre des réponses aux enjeux auxquels cette industrie est confrontée : diminution du poids des pneumatiques, augmentation de leur durée de vie, économie de carburant et réduction des émissions sonores.

Grâce à une stratégie fondée sur le marketing et l'innovation technologique, la France est *leader* mondial dans le domaine des *parfums et cosmétiques*. Les industriels souhaitent innover pour répondre à une clientèle de plus en plus exigeante et préoccupée par son apparence, son corps et sa santé, en améliorant les propriétés des produits cosmétiques telles que la tenue, la brillance, les propriétés optiques...

La cosmétologie utilise des nanoparticules à propriétés rhéologiques ou optiques bien spécifiques, seules susceptibles d'atteindre la densité de dispersion nécessaire pour la fonction recherchée. Ainsi les nanoparticules de dioxyde de titane sont utilisées pour la filtration efficace du rayonnement solaire ultraviolet. Celles à base de dioxyde de zinc interviennent dans la composition de rouges à lèvres pour améliorer leur tenue.

Par ailleurs, l'utilisation de nanoparticules en nano-dispersions ou émulsions est à l'étude. Cette industrie suit également de près les progrès réalisés dans d'autres secteurs (utilisation de nanoparticules dans les peintures et vernis) et les potentialités qui peuvent en

découler pour la cosmétique (verniss à ongles).

Développer une nouvelle génération de cosmétiques

A cet égard, l'exemple de la société DGTec est illustratif. DGTec, entreprise située à Moirans près de Grenoble (38), possède une expérience de plusieurs années dans le domaine des nano-matériaux. Le cœur de métier de DGTec est la mise au point et la production de poudres céramiques de taille nanométrique. Le positionnement produit initial de DGTec est la fabrication de matériaux luminescents appliqués au dépôt par jet d'encre. Ces poudres luminescentes submicroniques sont adaptées au marquage inorganique coloré (traçabilité et logistique), et peuvent servir de charges pour plastiques ou polymères (augmentation de la résistance mécanique, protection de l'intégrité des surfaces). Partant de ce savoir-faire, la société DGTec a étendu sa gamme de procédés et a été en mesure de développer des poudres de plus en plus petites (inférieures à 100 ou même 10 nanomètres) élargissant de ce fait considérablement ses champs d'applications potentielles, notamment vers la cosmétique. L'entreprise moiranaise a ainsi pu développer des pigments colorés nanométriques pour le maquillage, des poudres permettant de garantir la stabilité des suspensions, rendant alors inutile les opérations de mélange avant usage. DGTec s'intéresse également aux bactéricides inorganiques visant à remplacer les bactéricides organiques actuellement utilisés en cosmétique, qui peuvent avoir des effets négatifs sur la santé, notamment du fait de leur durée de vie limitée. Enfin, DGTec met au point des particules permettant de renforcer la résistance des produits cosmétiques (par exemple les vernis à ongles).

Enfin, l'éventuelle toxicité de ces particules réactives, du fait des modifica-

tions de propriétés qui découlent de l'échelle nanométrique, imposent aux entreprises de réaliser des tests spécifiques préalablement à la mise sur le marché de produits intégrant ces particules.

L'industrie du verre plat répond à une demande du bâtiment mais également des secteurs

de l'automobile et des écrans. Dans un environnement très concurrentiel, Saint Gobain est la seule entreprise française de taille internationale. L'emballage de produits de luxe, la cristallerie et verrerie sont largement tournés vers l'exportation. Ces secteurs comptent des entreprises *leaders* sur leurs marchés : Arc international, Baccarat...

La recherche dans ces domaines permet de lutter contre la concurrence des autres matériaux, en particulier le plastique, de renforcer la sécurité et d'améliorer le confort des usagers. Elle vise ainsi à développer des produits utilisant une base verre plus résistants aux chocs. Le meilleur exemple est le verre vitrocéramique qui résulte d'une application directe des nanotechnologies. Il est élaboré par précipitation de nanocristaux dans une matrice verre. Les études se poursuivent sur le contrôle actif de leur transparence par intégration de cristaux liquides. D'une façon générale, le renfort des vitrages ou des verres pour bouteille est un enjeu considérable pour la

filière et nécessite le développement de matériaux composites associant des nano-objets compatibles avec

le verre en phase liquide et matrice verre.

Domaine particulièrement stratégique, les technologies de traitement de surfaces associées à l'intégration de nano-objets se développent rapidement, permettant un véritable contrôle de la composition et une fonctionnalisation des couches à l'échelle moléculaire. Les recherches sont motivées par la demande de fonctions anti-pluie, anti-buée, anti-reflet et autonettoyante pour l'automobile, de meilleur contrôle thermique pour le bâtiment, d'innovations esthétiques...

L'introduction de nano-charges permet la diminution du poids des pneumatiques et l'augmentation de leur durée de vie

L'isolation thermique par des barrières nanostructurées permettra des économies d'énergie substantielles

La balance commerciale française du secteur des *céramiques et des matériaux de construction* est largement déficitaire. Seules les céramiques techniques à forte valeur ajoutée parviennent à satisfaire aux exigences du marché international, grâce au déve-

veloppement de techniques de pointe. L'utilisation de nanotechnologies leur permet d'ores et déjà de s'ouvrir à de nouveaux marchés : nanopoudres pour le polissage de surface en microélectronique, céramiques nanoporeuses pour la filtration et comme support de catalyse.

Appliquées au renfort des céramiques, ces technologies sont particulièrement prometteuses. Elles permettent de conférer au matériau une résistance aux chocs thermiques et mécaniques répondant à son usage. Ce résultat est obtenu soit par dispersion de nanoparticules (SiN dans l'Alumine), de nanofibres..., soit par nanostructuration de la céramique. Ces avancées intéressent le secteur de l'automobile qui cherche à développer des moteurs à haut rendement thermique, économes en énergie et moins polluants.

Le bâtiment est également très attentif aux innovations dans les secteurs industriels déjà cités du verre, des plastiques, du textile et de l'environnement. Mettant en œuvre des nanotechnologies, une société japonaise a développé un film polyester ultra-résistant pour renforcer les surfaces vitrées en cas de séisme. D'autres retombées proches concernent les revêtements nano-structurés anti-salissure et anti-dérapant, les mortiers intégrant des nanoparticules empêchant le développement de microorganismes...

Enfin, l'apparition de bétons souples et à grains très fins devrait révolutionner l'usage de ces matériaux dont les procédés de fabrication s'apparenteraient alors à ceux de la métallurgie.

L'évolution du secteur de la *métallurgie*, qui emploie en France 400 000 personnes, sollicite 35 % des preneurs d'ordre et 20 % des donneurs d'ordre toutes industries confondues, constitue un enjeu socio-économique très impor-

tant. Dans un contexte difficile qui résulte d'une double concurrence des marchés et d'autres classes de matériaux, une véritable stratégie de développement axée sur l'innovation paraît indispensable.

Dans ce contexte l'amélioration des propriétés de surfaces des métaux apporte une valeur ajoutée et donc de nouvelles parts de marchés. Ces améliorations visent à réduire le frottement des pièces mécaniques, à limiter la corrosion, à éliminer les fluides lubrifiants (poste qui coûte cher et qui nécessite l'utilisation de solvants dégraissants), à supprimer l'usage du chrome 6, pour des raisons sanitaires, ou simplement à renouveler l'aspect esthétique des pièces.

Les techniques de revêtements nano-structurés sont particulièrement bien adaptées pour répondre à ces besoins et font l'objet de nombreux développements : dans ce but, un procédé de revêtement multi-nanocouches, alternant couche dure et lubrifiant a été ainsi développé.

A plus long terme, le développement de matériaux métalliques nanostructurés plus performants ouvre de nouveaux

champs d'applications particulièrement prometteurs. Premiers secteurs

du commerce extérieur français et première branche en terme de R&D, les *transports terrestres et aériens*, s'ils bénéficient pleinement des avancées des nano-matériaux dans les différents secteurs précités, sont aussi largement moteur dans leur développement. Soumis en effet à un contexte concurrentiel sévère et à la croisée de nombreuses techniques, ces secteurs ont besoin d'innover, particulièrement dans les domaines de la diminution de la consommation, de l'augmentation des performances et de la durée de vie des pièces, du respect de l'environnement et de la sécurité.

Consommer moins grâce aux nanotechnologies

Pour l'automobile, les nanocomposites et les céramiques nanostructu-

rés permettront d'augmenter la résistance des pièces, leur durée de vie et de diminuer leur poids. Grâce à ces avancées, la voiture consommant 1 litre/100 km n'est plus une utopie. D'autres applications concernent les traitements de surface des vitrages (y compris ceux des phares) pour réfléchir la chaleur, filtrer la lumière..., des structures et des pièces mécaniques pour diverses fonctions déjà énumérées et les catalyseurs ou filtres pour réduire les émissions de polluants. L'avènement de ces technologies est conditionné par le coût de ces matériaux, le secteur ayant comme souci permanent l'optimisation du rapport performance/prix.

Les attendus dans l'industrie aéronautique et spatiale sont similaires. Plus spécifiquement, pour répondre aux sollicitations extrêmes auxquelles sont soumises certaines pièces, ce secteur développe différents types de matériaux à forte valeur ajoutée : des composites à fibres de carbone infiltrés par des nanoparticules de carbone pour utilisation haute température, des composites carbure de silicium pour des environnements très corrosifs et chauds, des bases cuivre renforcées par des nanoprecipités d'oxydes sus-

ceptibles d'absorber des flux thermiques élevé.

Un enjeu économique considérable

Bénéficiant du soutien de la plupart des pays industrialisés, le train des nano-matériaux est en marche. Qu'ils soient renforcés par des nano-objets, nano-structurés en surface ou en volume, ces nouveaux matériaux font déjà l'objet de nombreuses applications et leurs perspectives de retombées économiques à moyen terme sont particulièrement prometteuses. Ces retombées concernent en effet *l'ensemble des secteurs industriels* et devraient contribuer à renforcer la compétitivité de la France et à relancer la croissance.

Ainsi, dans des secteurs où la France occupe un rôle de premier plan sur la scène internationale, comme dans les transports terrestres, les avancées et pro-

grès liés aux nano-matériaux doivent faire l'objet d'une surveillance particulière afin de conforter ce positionnement

de *leader*. On peut alors s'attendre à ce que l'automobile de demain soit un véritable condensé de nanotechnologies,

mettant en œuvre les nano-matériaux pour obtenir un allègement global du véhicule, une motorisation performante et propre ou tout au moins peu polluante et intégrant de multiples fonctionnalités pour la sécurité et le confort.

Autres matériaux particulièrement prometteurs, les nano-composites, qui combinent nano-objet et matrice, ouvrent potentiellement un champ quasi infini en termes de nouvelles applications et fonctionnalités grâce à des combinaisons minérales ou organiques.

Dans d'autres secteurs, le gain technologique devrait être très important. On attend ainsi des progrès significatifs dans les domaines de l'environnement et de la santé qui devraient concourir à une amélioration sensible de la qualité de vie. De même, la grande capacité d'échange et d'interactions qui découle de la structure élémentaire « active » nano-métrique, pourra être exploitée dans le domaine de la catalyse, de la détection chimique et de la production d'énergie.

D'une façon générale, les nano-matériaux disposent d'une capacité structu-

rante qui favorise les innovations à caractère transversal. Leur développement nécessite l'implication concertée

de la part des acteurs publics, des centres de recherche et des industriels et, pour des applications à plus long terme, la poursuite de la prospective sur les technologies « bottom-up ».

L'enjeu économique des nano-matériaux est considérable. Il touche à la compétitivité des entreprises et au maintien de l'emploi industriel en offrant des opportunités sur des marchés fortement rémunérateurs. Bien maîtrisé ce développement devrait être synonyme de mieux-être pour tous.

Ne ratons pas le train, sachons rapidement mettre en place une chaîne du savoir cohérente s'appuyant sur des structures ouvertes vers l'extérieur et réactives, susceptibles de capitaliser et de diffuser le savoir pour mener à bien le développement et l'industrialisation des nano-matériaux. N'oublions pas de consolider nos acquis, en encourageant la prise de brevets et en nous impliquant dans l'élaboration des nouvelles normes internationales qui vont en découler. ●

Grâce à ces avancées, la voiture consommant 1 litre/100 km n'est plus une utopie

[1] Hitachi Research Institute, "Personal Communication", 2001, cité par : M.C. Roco ; W Sims Bainbridge : « Societal implications of nanoscience and nanotechnology », National Science Foundation, mars 2001.

[2] Freedonia Group : « Nanomaterials US Industry Study », juin 2003.

[3] Sessi : Panorama de l'industrie par grands domaines d'activité, Minefi 2003.

BIBLIOGRAPHIE

