

ETUDE PROSPECTIVE SUR LES NANOMATERIAUX

Etude réalisée par
DEVELOPPEMENT & CONSEIL

Pour le compte du MINEFI / DIGITIP / SIMAP

DIGITIP

Synthèse

Mai 2004

Dominique CARLAC'H
Yves HEMERY

SOMMAIRE

1	Objectifs et contexte de l'étude	5
1.1	Objectifs de l'étude.....	6
1.2	Le périmètre d'analyse et le déroulement de l'étude.....	7
2	Définitions et données de cadrage des nanomatériaux	9
2.1	Définitions techniques des nanomatériaux	10
2.2	L'économie des nanotechnologies et le positionnement des nanomatériaux	17
2.3	Les industries utilisatrices visées par le développement des nanomatériaux	28
3	Les nanomatériaux en France : besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics	37
3.1	Méthodologie des enquêtes	38
3.2	Les réponses des industriels fabricants de nanomatériaux et de la recherche aux besoins des industriels utilisateurs : l'enquête « montante »	40
3.3	Une prise en compte des travaux des laboratoires de recherche publics pour élargir les perspectives : l'enquête « descendante »	53
4	Recommandations	57
4.1	La détermination des thématiques en faveur du développement des nanomatériaux.....	58
4.2	Les enjeux transversaux au développement des nanomatériaux	92
4.3	Les objectifs de soutien à la filière des nanomatériaux	94
4.4	Premières déclinaisons opérationnelles afin de favoriser le développement des nanomatériaux en France.....	97
5	Conclusions de l'étude prospective sur les nanomatériaux.....	99
6	Annexes	103
6.1	Le comité de pilotage de l'étude	103
6.2	Sources documentaires utiles	106
6.3	Abréviations du document et glossaire des termes.....	109
6.4	Tables des illustrations et des tableaux.....	110
6.5	Annotations référencées dans le document	111

1 Objectifs et contexte de l'étude

La Direction Générale de l'Industrie, des Technologies de l'Information et des Postes (DIGITIP) a dressé le bilan français des nanomatériaux à travers une analyse des attentes des industriels et des réponses et suggestions des laboratoires publics de recherche.

Cette étude est avant tout destinée à favoriser un dialogue constructif entre industriels, acteurs de la recherche et partenaires institutionnels afin de faire profiter les acteurs français des opportunités offertes par le développement des nanomatériaux. En effet, la conquête de l'infiniment petit ouvre à l'industrie des perspectives extrêmement larges. Grâce à leurs propriétés originales, les nanomatériaux confèrent des fonctions nouvelles à de nombreux produits traditionnels. Leur développement permettra d'atteindre d'importants gains de productivité et d'ouvrir de nouvelles perspectives en accédant à une technologie innovante.

L'objectif final de cette étude prospective est de disposer d'une base de travail permettant d'asseoir :

- le soutien aux entreprises industrielles pour le passage à l'utilisation des nanomatériaux,
- le soutien aux efforts de R&D des acteurs scientifiques et industriels pour développer de nouveaux matériaux, de nouvelles fonctionnalités, pour améliorer les propriétés des matériaux, développer les procédés de mise en oeuvre correspondants et mettre au point les outils de contrôle et équipements spécifiques.

1.1 Objectifs de l'étude

Les quatre objectifs de l'étude sont précisés comme suit :

- évaluer les opportunités technologiques et économiques pour les nanomatériaux dans le tissu industriel français à relativement court terme,
- identifier les freins techniques, scientifiques, économiques et environnementaux à leur développement et à leur industrialisation,
- proposer des initiatives pour mieux intégrer les compétences amont-aval,
- disposer des données nécessaires pour rapprocher les industriels de la définition des objectifs de R&D pour stimuler l'innovation et permettre le développement des synergies requises.

Pour répondre à ces objectifs, Développement & Conseil a proposé une analyse en cinq phases matérialisées par le graphique ci-après.

Rappel des objectifs

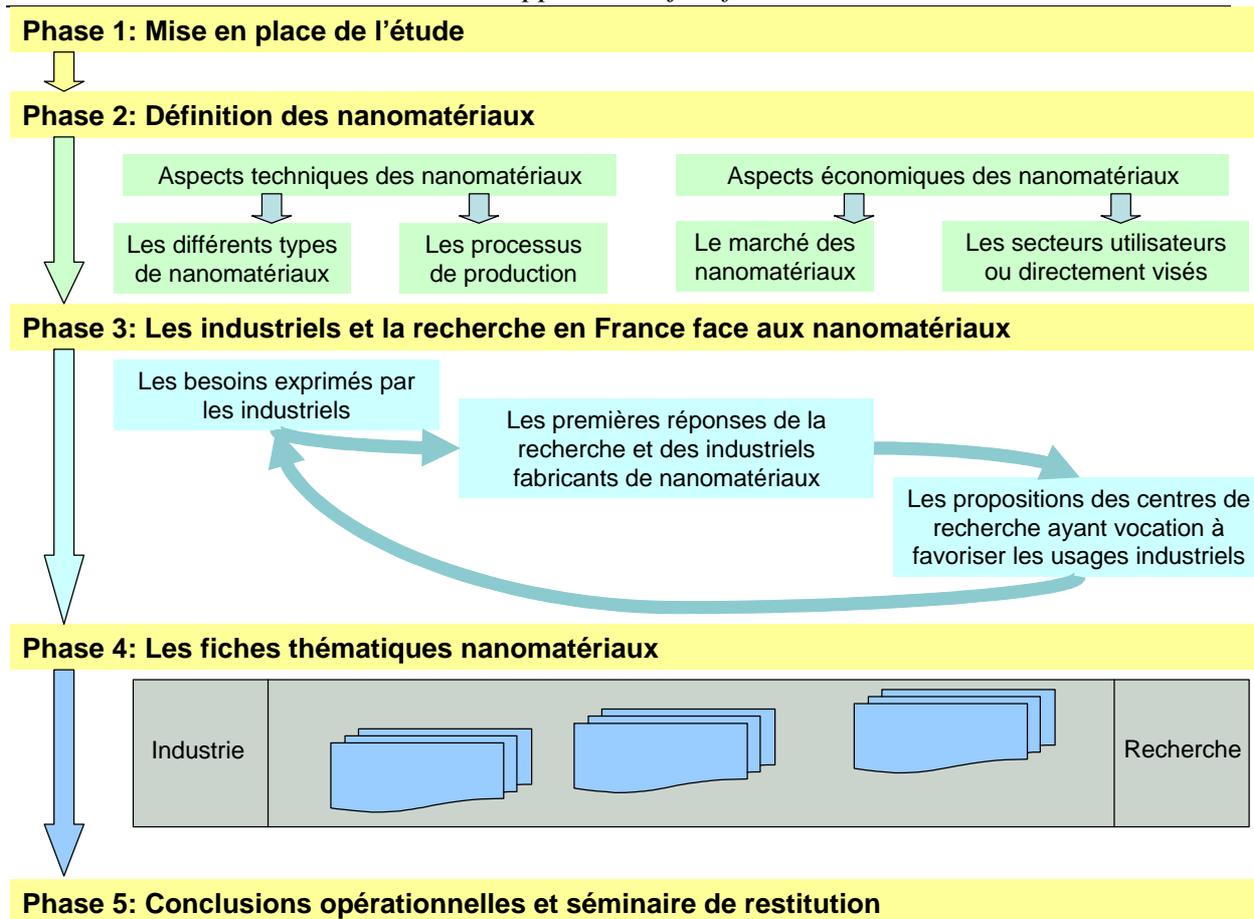


Figure 1 : Démarche de réalisation de l'étude sur les Nanomatériaux

En adoptant la démarche proposée par Développement et Conseil, la Digitip a favorisé le retour d'informations du terrain, conduisant à solliciter à la fois près d'une centaine d'industriels mais aussi 70 laboratoires de recherche Français.

1.2 Le périmètre d'analyse et le déroulement de l'étude

Un comité de pilotage, formé à l'initiative de la DIGITIP, a été mis en place pour suivre, orienter et valider les différentes étapes de l'étude. Il regroupait à la fois des représentants de l'Etat, d'organismes de recherche et d'industriels impliqués dans le développement des nanomatériaux.

L'analyse a été largement ouverte sur l'ensemble des secteurs industriels du fait du caractère transversal des nanomatériaux.

Deux secteurs supplémentaires ont été ajoutés en cours d'étude à la demande du Comité de pilotage de l'étude, ces secteurs étant initialement exclus du cahier des charges car largement couverts par des études nationales et internationales:

Rappel des objectifs

- Le secteur des Technologies de l'information et de la communication (TIC),
- Le secteur de la Santé.

L'intégration de ces deux secteurs se justifie principalement par leur importance dans le domaine des nanomatériaux, conduisant à tirer la demande industrielle et à matérialiser des axes de recherches susceptibles d'être transférés à d'autres secteurs de l'industrie.

Les informations et données sur ces deux secteurs ont de fait un caractère parcellaire et sont susceptibles d'être complétées par la lecture d'analyses spécifiques (voir références et sources d'informations en annexe).

L'analyse s'est déroulée sur le second semestre 2003 et le premier trimestre 2004.

L'étude prospective sur les nanomatériaux a fait l'objet de la remise de trois documents :

- 1- Le « Document d'étude », regroupant l'ensemble des analyses qui ont fait l'objet d'une présentation au cours de l'étude ;
- 2- Le « Document de synthèse », présentant les principales conclusions,
- 3- Le « 4 pages », présentant de manière synthétique et visuelle les principaux points de l'analyse.

2 Définitions et données de cadrage des nanomatériaux

NB : Les chiffres romains figurant dans le texte renvoient à des notes explicatives en fin de document

2.1 Définitions techniques des nanomatériaux

2.1.1 Description et définitions

2.1.1.1 Définition des nanomatériaux

On retient la définition suivante: un nano-matériau est composé ou constitué de nano-objets (dont la taille est comprise entre 1 et 100 nm) qui présentent 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-tubes de carbone, de par leurs propriétés mécanique, électronique, piézoélectrique, etc exceptionnelles font partie d'une catégorie d'objets à part tant leur potentiel d'applications est très vaste.

Les nano-objets sont utilisés soit en tant que tels (comme catalyseur, pour transporter des médicaments, pour le polissage de wafers et disques durs en microélectronique...), soit en vue d'élaborer des matériaux. Ces matériaux peuvent être regroupés selon 3 familles de produits :

- les matériaux nano-chargés ou nano-renforcés,
- les matériaux nano-structurés en surface,
- les matériaux nano-structurés en volume.

2.1.1.2 Les familles de produits par nano-objets

Les nano-charges et 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, magnétiques ou thermiques (dans des produits cosmétiques, dans des vernis, peintures, béton, encre d'imprimerie, etc.). Les composites chargés en nano-tubes de carbone en sont un bon exemple.

Ces nano-objets sont déjà utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Par exemple :

- **les fumées de silice** dans le béton, pour améliorer sa fluidité et ses propriétés mécaniques,
- **l'alumine ultra fine** destinée au polissage des wafers et disques durs en microélectronique,
- **le noir de carbone** utilisé dans les encres d'imprimante et les pneumatiques,
- **les pigments colorés** organiques et minéraux pour les peintures et vernis,
- **les nano-particules de dioxyde de titane** comme protection au rayonnement ultraviolet dans les crèmes solaires.

Cette catégorie de nanomatériaux inclut également les nano-charges naturelles telles que par exemple l'argile, la cellulose, le mica ou encore le calcaire.

Les matériaux nano-structurés en surface

La réalisation d'un revêtement à partir de nano-couches élémentaires ou de multi nano-couches 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,
- de dureté,
- d'adhérence (tribologie),
- de résistance à la corrosion,
- de propriétés optiques et/ou électroniques.

Les procédés de fabrication s'appuient sur des principes de dépôt physique (PVD, faisceau d'électrons, ablation laser...) ou chimique (CVD, épitaxie, sol-gel,...). Ce dernier procédé d'élaboration se prête particulièrement bien à la fabrication de ce type de revêtements.

Actuellement, le développement de cette catégorie de nanomatériaux est en phase d'industrialisation.

De tels revêtements existent déjà, par exemple pour :

- colorer des emballages en verre,
- apporter une fonction autonettoyante,
- renforcer la surface des polymères.

Les matériaux nano-structurés en volume

Ce sont des matériaux qui, par leur structure intrinsèque nanométrique (porosité, microstructure) bénéficient de propriétés physiques particulières (céramique plus ductile par exemple, propriétés optiques, diélectriques améliorées) et parfois d'une grande surface d'échange (céramiques mésoporeuses par ex.).

Le raffinement de la microstructure, jusqu'à obtenir une nanostructure, peut être obtenu par forte déformation du matériau. Les deux principaux verrous technologiques qui peuvent limiter aujourd'hui leur développement et leur usage sont la stabilité de la nano-structure à haute température et les procédés de fabrication.

Les matériaux de type biomimétiques (ailes de papillon, en ce qui concerne les propriétés optiques sélectives en fréquence, les coraux ou la nacre pour les propriétés mécaniques,...) et les matériaux obtenus par auto-assemblage moléculaire font également partie de cette catégorie.

2.1.1.3 Synthèse sur les définitions des nanomatériaux

Tableau 1 : La définition des nanomatériaux

Type de nanomatériaux	Définition
<i>Les nanomatériaux</i>	Un nano-matériau est composé ou constitué de nano-objets (dont la taille est comprise entre 1 et 100 nm) qui présentent des propriétés spécifiques de l'échelle nanométrique.
<i>Les nano-objets</i>	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. Ils sont utilisés soit en tant que tels soit en vue d'élaborer des matériaux. Ces matériaux peuvent être regroupés selon 3 familles de produits : <ul style="list-style-type: none">• les matériaux nano-chargés ou nano-renforcés,• les matériaux nano-structurés en surface,• les matériaux nano-structurés en volume.
<i>Les matériaux nano-renforcés</i>	Les nano-objets sont incorporés ou produits dans une matrice pour apporter une nouvelle fonctionnalité, ou modifier des propriétés physiques. Les nano-composites en sont un bon exemple.
<i>Les matériaux nano-structurés en surface</i>	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).
<i>Les matériaux nano-structurés en volume</i>	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.

2.1.2 Les procédés de fabrication des nanomatériaux

Depuis un demi-siècle environ, sont apparues des techniques nouvelles de refroidissement rapide, de chimie dite douce, techniques sol-gel par exemple, qui permettent d'accéder à des tailles de grain beaucoup plus faibles.

D'autres méthodes de production sous arc électrique, laser, plasma ou micro-ondes ont permis d'accéder à des matériaux particuliers de très petite taille.

Il a été ainsi possible d'obtenir des tailles de grain de dimensions de l'ordre des tailles caractéristiques des défauts qui gouvernent certaines propriétés comme :

- les dislocations (propriétés mécaniques),
- les parois de Bloch (propriétés ferromagnétiques),
- les phénomènes qui n'interviennent qu'à l'échelle du nanomètre ou en dessous (effet tunnel, effets de « confinement » lorsque la taille des particules est inférieure à la longueur d'onde des particules – électrons, photons – qui interviennent dans le phénomène étudié). Ces dimensions, selon les cas, varient entre quelques nanomètres et 100 nanomètres.

En parallèle de cette démarche de miniaturisation, dite "top-down", se développe une autre démarche, dite "bottom-up", qui consiste à construire de façon contrôlée à partir d'atomes et de molécules de nouveaux édifices et structures. Les procédés d'élaboration de ces matériaux constituent un champ d'investigation nouveau qui reste à développer.

Les procédés actuels permettant l'élaboration de nano-objets sont classés en 3 grandes catégories :

- élaboration par voie physique,
- élaboration par voie chimique,
- élaboration par méthode mécanique.

Compte tenu de la complexité des applications et de l'évolution rapide des techniques, il paraît difficile de donner une liste exhaustive des procédés utilisés ou en développement. Quelques exemples parmi les procédés les plus couramment utilisés pour la fabrication de nano-objets sont présentés ci-après.

2.1.2.1 Elaboration par voie physique

L'élaboration des nano-particules (amas) peut être réalisée à partir d'une phase vapeur. Cette phase est extraite d'un matériau source par chauffage (fusion en creuset ou sans creuset), par bombardement (faisceau d'électrons, pyrolyse laser). Dans la plupart des cas, la vapeur du solide que l'on souhaite former est refroidie par collisions avec un gaz neutre et devient donc fortement sursaturante (condensation en gaz inerte). Le matériau est collecté le plus rapidement possible sur une paroi froide, de façon à éviter la croissance ou la coalescence des amas. Souvent, l'appareil d'élaboration dispose d'un sas réunissant la chambre de collecte des poudres et le dispositif de compaction afin d'éviter toute pollution atmosphérique. Les poudres nanométriques sont en effet très réactives ; elles peuvent même dans certains cas être pyrophoriques¹.

Une autre voie d'obtention de nano-poudres consiste à utiliser l'action de micro-ondes sur des poudres de taille millimétrique. Cette technique a comme avantages d'être non polluante et adaptée à une production en continu de poudres de toute nature.

Les nanotubes de carbone peuvent être obtenus par ablation laser, décharge plasma ou décomposition catalytique.

Enfin, des couches minces d'épaisseur nanométrique peuvent être réalisées par la voie PVD (Physical Vapor Deposition) ou par croissance épitaxiale.

2.1.2.2 Elaboration par voie chimique

Sont listées ci-dessous quelques techniques de fabrication par voie chimique couramment utilisées.

Les réactions en phase vapeur

Les matériaux précurseurs vaporisés sont introduits dans un réacteur CVD (Chemical Vapor Deposition) dans lequel les molécules de précurseurs sont adsorbées à la surface d'un substrat maintenu à une température adaptée. Les molécules adsorbées sont soit décomposées thermiquement, soit elles réagissent avec d'autres gaz ou vapeurs pour former un film solide sur le substrat.

Cette technique est utilisée pour l'élaboration de certains nanomatériaux tels que les quantum dots de semiconducteur, les matériaux nanostructurés céramiques, les nanotubes de carbone, le diamant.

Les réactions en milieu liquide

La synthèse en milieu liquide est le plus souvent effectuée à partir d'une solution aqueuse ou organique contenant les réactants. La précipitation des nanoparticules est obtenue par une modification des conditions de l'équilibre physico-chimique. Sont distinguées :

- la co-précipitation chimique, technique facile à mettre en oeuvre et la plus utilisée pour des productions industrielles à fort volume de matériaux de base bon marché,
- l'hydrolyse permettant de produire des particules fines, sphériques avec une pureté chimique améliorée, une meilleure homogénéité chimique et un contrôle de la taille des particules.

Les techniques sol-gel

Les techniques sol-gel permettent de produire des nanomatériaux à partir de solutions d'alkoxydes ou de solutions colloïdales. Elles sont basées sur des réactions de polymérisation inorganiques.

L'intérêt du procédé sol-gel réside dans la possibilité de contrôler l'homogénéité et la nanostructure au cours des premières étapes de fabrication.

Cette technique permet la production de pièces massives mais aussi de dépôts superficiels sur des plaques ou des fibres. Elle est également utilisée pour la production de composites fibreux.

Les matériaux issus du procédé sol-gel couvrent presque tous les domaines des matériaux fonctionnels : optique, magnétique, électronique, super conducteur à haute température, catalyseur, énergie, capteurs, etc.

Avantages : cette technique permet de contrôler efficacement la taille des particules et l'homogénéité de la distribution des particules. Ce procédé est réalisé à des températures plus basses que pour les autres procédés.

Inconvénients :

- coût élevé des matériaux de base,
- faible rendement et produits de faible densité,
- résidus de carbone et autres composés, certains composés organiques étant dangereux pour la santé.

Le procédé de sol-gel est divisé en 3 branches :

- procédé de sol-gel à base de silice,
- procédé d'alkoxyde de métal,
- procédé de type Pechini.

Applications : céramiques inorganiques et matériaux en verre, matériaux amorphes et nanostructurés, oxydes multicomposés.

2.1.2.3 Elaboration par méthode mécanique

Mécanosynthèse

La technique dite de mécanosynthèse consiste généralement à broyer des poudres micrométriques (1 à 30 μm) de plusieurs alliages pour les incorporer.

La caractéristique essentielle de cette technique est de permettre l'obtention de nano-précipités ou nano-objets dispersés de façon homogène au sein de la matrice.

Elle est par ailleurs adaptée à la production de matériaux en quantité qui s'expriment en kilogrammes, voire en tonnes, contrairement aux autres techniques.

Consolidation et densification

Lors d'un travail mécanique intense (métaux et intermétalliques uniquement), le processus qui permet de convertir un matériau pulvérulent en une pièce massive comporte deux étapes : une opération de compactage mécanique et une opération de frittage, libre ou sous charge.

- compactage à froid : Opération qui peut s'effectuer soit par pressage à sec, soit, dans les cas difficiles, par addition d'un lubrifiant ou par pressage humide. Le compactage humide est bien adapté aux céramiques et surtout aux oxydes. Avantage du compactage humide : gain considérable sur la température ou le temps de frittage.
- frittage : opération qui permet, par diffusion atomique à chaud, d'établir des ponts de matière entre les grains et ensuite de réduire la porosité.
- par Compression Isostatique à Chaud (CIC): on réalise ainsi les deux opérations ci-dessus en une seule étape.
- croissance des grains pendant la densification : l'enjeu le plus important pour les procédés de frittage des nanomatériaux est d'éviter la croissance des grains pendant la densification.

Forte déformation

*Les nanomatériaux en France :
besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics*

La forte déformation d'un matériau cristallin (métal, céramique) provoque un raffinement de sa structure jusqu'à obtenir une taille de grains de quelques dizaines de nm. Différentes techniques peuvent être utilisées (par torsion, extrusion...).

Ce raffinement permet généralement d'améliorer les propriétés de ténacité et de ductilité du matériau.

2.1.2.4 Synthèse des principaux procédés d'élaboration des nanomatériaux

Tableau 2 : Les trois principaux procédés d'élaboration des nanomatériaux

Type de procédés	Définitions
<i>La voie physique</i>	L'élaboration de nano-particules peut être réalisée par l'action de micro-ondes ou à partir d'une phase vapeur extraite d'un matériau source par chauffage (fusion en creuset ou sans creuset, pyrolyse laser) ou par bombardement. L'ablation laser, la décharge plasma ou la décomposition catalytique sont des techniques plus spécifiquement utilisées dans la fabrication de nanotubes de carbone. Enfin, des couches minces d'épaisseur nanométrique peuvent être réalisées par PVD (Physical Vapor, Deposition).
<i>La voie chimique</i>	Les techniques de fabrication par voie chimique les plus couramment utilisées sont : <ul style="list-style-type: none">• les réactions en phase vapeur : Réaction dans un réacteur CVD (Chemical Vapor Deposition),• les réactions en milieu liquide,• les techniques sol-gel.
<i>Les méthodes mécaniques</i>	Les techniques mécaniques d'élaboration des nanomatériaux sont : <ul style="list-style-type: none">• <u>la mécano-synthèse</u>, technique de broyage qui permet en particulier l'obtention de nano-précipités ou nano-objets dispersés de façon homogène au sein de la matrice,• <u>les opérations de compactage et de frittage</u>,• <u>les techniques de forte déformation</u> (torsion, extrusion...) développées pour l'obtention de nano-cristaux et nano-structures.

2.2 L'économie des nanotechnologies et le positionnement des nanomatériaux

2.2.1 Introduction : données mondiales sur les nanomatériaux dans le domaine des nanotechnologies

La Commission Européenne a estimé que le marché mondial des nanotechnologies en 2001 était légèrement supérieur à 40 milliards d'euros^{II}. En 2008, le marché global des produits issus des nanotechnologies devrait atteindre plus de 700 milliards d'euros^{III}. En 2010-2015, les enjeux économiques liés à l'avènement des nanotechnologies au niveau mondial devraient atteindre 1 000 milliards d'euros par an et concerner directement l'emploi de près de 2 millions de personnes^{IV}.

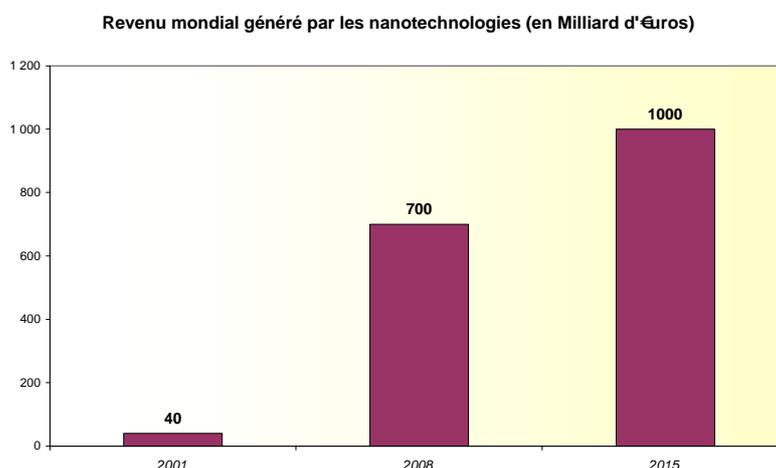


Figure 2 : Revenu mondial généré par les nanotechnologies

Dans ce vaste domaine que représentent les nanotechnologies, les outils ont connu le plus fort démarrage, sur un laps de temps très court. Ils ont constitué un passage obligé afin d'être en mesure de « voir » à échelle nanométrique. Dès que les premiers outils ont été disponibles, les nanomatériaux ont constitué le premier axe de développement des nanotechnologies.

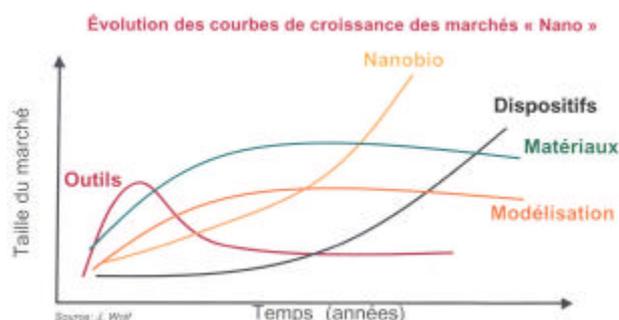


Figure 3 : Croissance des marchés des nanotechnologies

*Les nanomatériaux en France :
besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics*

Alors que l'impact économique mondial des biens et services lié aux nanotechnologies devrait être équivalent à 1 000 milliards d'euros en 2010, les nanomatériaux, ainsi que leurs procédés de mise en œuvre, devraient générer la plus grande part de ce marché. Ainsi l'impact économique global lié à l'utilisation de nanomatériaux devrait représenter 34 %, hors transport et chimie, de l'impact économique global des nanotechnologies, soit 340 milliards d'euros par an^V. Ce poids augmente de façon importante si la part des nanomatériaux utilisés dans le domaine de la chimie et du transport est comptabilisée.

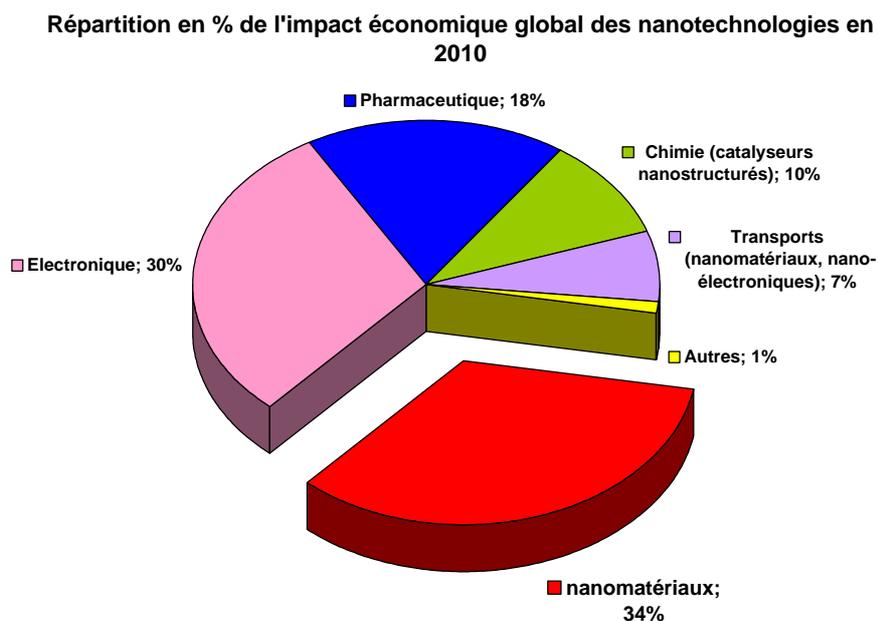


Figure 4 : Impact économique des nanotechnologies en 2010

Les nanomatériaux représentent actuellement les meilleures opportunités économiques à court et moyen terme des nanotechnologies^{VI}. Entre 1997 et 2000, la croissance de l'investissement public sur les nanomatériaux a atteint 133 % pour les Etats-Unis, 104 % pour le Japon et 46 % pour l'Europe^{VII}.

Au sens strict, le marché des nanomatériaux (et non pas l'impact économique des nanomatériaux) est encore dans sa phase d'émergence.

Les exemples suivants concernant le marché des nanoparticules et des composites illustrent bien la dynamique du secteur:

Le marché mondial des nanoparticules pour des applications biomédicales, pharmaceutiques et cosmétiques a été estimé à 85 millions d'euros en 2000 et devrait atteindre 126 millions d'euros en 2005, soit un taux de croissance annuel moyen de 8,3 %^{VIII}. 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.

Le marché mondial des nanoparticules pour des applications liées à l'énergie a été estimé à 54,5 millions d'euros en 2000 et devrait 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 anti-rayures, céramiques structurales, revêtement par vaporisation thermique^{IX}.

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^X.

2.2.2 Financement des nanotechnologies et initiatives dans les nanomatériaux

2.2.2.1 L'Amérique du Nord

Le marché américain des nanomatériaux a été évalué à 109 millions d'euros en 2000. Dès 2007, celui-ci devrait atteindre 900 Millions d'euros et 30 milliards d'euros en 2020^{XI}.

Globalement, les Etats-Unis investissent dans la recherche et développement des nanotechnologies à travers la NNI (National Nanotechnology Initiative), la DARPA (Défense) et les collectivités territoriales. La NNI a été officiellement lancée en 2000. Le budget alloué à ce programme n'a cessé d'augmenter^{XII} :

- en 2001 : 370 millions d'euros,
- en 2002 : 530 millions d'euros,
- en 2003 : 620 millions d'euros,
- en 2004 : 800 millions d'euros.

Ces budgets n'incluent pas toujours l'ensemble des dépenses de personnel correspondant à ces activités, ce qui compliquent les comparaisons. On estime par ailleurs que la contribution du secteur privé américain est de l'ordre du double de l'investissement public.

Le Ministère de la Défense, le Ministère de l'Energie et la *National Science Foundation* concentrent près de 80 % de ce budget.

Au sein du département de la Défense, les thématiques de recherche sont très fortement axées sur les nanomatériaux (nano composites, auto assemblage, les revêtements nanostructurés, les céramiques et métaux...).

Le milieu industriel s'est lui aussi associé à cet effort, aussi bien au niveau des grandes entreprises que des start-up avec le soutien des capitaux-risqueurs. Entre 1999 et 2002,

*Les nanomatériaux en France :
besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics*

environ 50 sociétés de financement de l'innovation américaines ont investi dans des compagnies nanotechs^{XIII}. Les industriels américains se sont rassemblés en 2001 en association, la NanoBusiness Alliance, dont l'objectif est de promouvoir l'émergence de l'industrie et de la technologie du « petit », et de développer une série d'initiatives pour soutenir et renforcer l'économie des nanotechnologies.^{XIV} :

Les départements et les agences gouvernementales multiplient les projets dans ce domaine à travers les NSECs (Nanoscale Science and Engineering Centers) et les NSRCs (Nanoscale Science Research Centers)^{XV}. Certains centres de la NSEC sont dédiés à des recherches relatives aux nanomatériaux, par exemple le Center for Directed Assembly of Nanostructures, Rensselaer Polytechnic Institute dont les objectifs et les thématiques de recherche sont les suivants :

- les composites, transport thérapeutique et capteurs,
- les gels et nanocomposites polymères,
- les architectures de bio-molécules nanostructurées,
- les modèles et théories multi-échelles.
- la caractérisation de matériaux nanostructurés.

L'un des objectifs scientifiques et techniques proposé par la NNI est également « l'obtention de nanomatériaux plus légers à propriétés mécaniques améliorées, autoréparables, pour véhicules ainsi que des matériaux "intelligents"^{XVI}.

Historiquement (depuis les années 90), les thèmes de recherche ayant suscité la plus grande attention au sein des centres interdisciplinaires liés aux nanotechnologies, portent pour la plupart sur les nanomatériaux :

- matériaux métalliques et céramique nanostructurés,
- manipulation moléculaire de macromolécules polymérisées,
- techniques d'auto-assemblage par chimie douce,
- procédé de vaporisation thermique et chimique pour revêtements nanostructurés,
- matériaux nanostructurés pour procédés liés au domaine de l'énergie tels que catalyse et magnétisme faible,
- nano-usinage,
- miniaturisation de systèmes aérospatiaux.

Suite à ces recherches, des technologies commercialement viables sont d'ores et déjà en place : nanoparticules céramiques, métalliques et polymères ; alliages nanostructurés ; colorants et cosmétiques ; composants électroniques (média d'enregistrement, disques durs...).

2.2.2.2 L'Asie

En Asie, excepté au Japon, les budgets alloués aux nanotechnologies sont très nettement inférieurs à ceux proposés aux Etats Unis. Le tableau ci-dessous présente les financements des nanotechnologies en Asie en 2002 qui dépassent le milliard d'euros^{XVII}.

Tableau 3: Financements nationaux des nanotechnologies en 2002 en Asie

Japon	654
Chine	174
Taiwan	97
Corée	131
Singapour	35
Total	1091

En millions d'euros

Les budgets pour l'année 2003 sont d'environ 1.3 milliard d'euros pour la zone asiatique, dont environ 870 millions pour le Japon.

Au Japon, les institutions publiques et les grandes entreprises constituent les principales sources de financement des nanotechnologies. Les petites et moyennes entreprises jouent un rôle mineur. Les activités de recherche sont généralement rassemblées dans des groupes industriels, de grandes organisations gouvernementales ou des laboratoires universitaires.

Les deux principales organisations gouvernementales finançant les nanotechnologies sont le Ministère de l'Economie, du Commerce et de l'Industrie (METI) et le Ministère de l'Education de la Science, des Sports et de la Culture (MEXT). De nouveaux projets sont lancés, dont le développement **du programme Nanomatériaux** du METI incluant les thématiques suivantes : carbone nanostructuré, nanofabrication et métrologie.

Les japonais ont été les premiers à lancer des programmes de recherche coordonnés sur les nanomatériaux au début des années 90. **Ils ont depuis conservé ce rôle de précurseur, tout particulièrement dans le domaine des nanocomposites^{XVIII}.**

Au niveau de l'industrie, six grands groupes japonais fortement positionnés dans le domaine de l'électronique ont été les premiers à investir dans la recherche en nanotechnologies.

Comme aux Etats-Unis, des technologies ont pu être commercialisées relativement tôt. Ainsi dès 1998, Nihon Shinku Gijutsu (ULVAC), spécialisé dans la fabrication d'équipements de pulvérisation et d'évaporation, produisait déjà pour une valeur annuelle de plus de 4 millions d'euros, des nanoparticules pour l'électronique et l'optique^{XIX}.

2.2.2.3 L'Europe

Le financement européen du développement des nano-matériaux

En Europe, si la constitution d'un réel système organisé et collaboratif sur les nanotechnologies fait réellement acte de naissance en 2002 avec le 6^{ème} Programme Cadre (PCRD), la Communauté Européenne et certains pays membres ont néanmoins tenté de stimuler la recherche sur les matériaux avancés dès le début des années 90^{XX}.

- le programme Brite/Euram a favorisé la réflexion sur les matériaux et les technologies pour l'innovation des produits, et a pu à ce titre être parfois partiellement dédié aux nanomatériaux,
- le programme Phantoms (Physique et technologie des systèmes mésoscopiques) a été créé en 1992 pour stimuler la nanoélectronique, la nanofabrication, l'optoélectronique et la commutation électronique,
- la Fondation Européenne pour la Science (ESF) a financé en 1995 un réseau NANO sur le thème « Synthèse en phase vapeur et procédés de synthèse de nanoparticules » afin de favoriser l'échange entre les communautés scientifiques travaillant sur les matériaux et sur les procédés de pulvérisation. NANO a rassemblé 18 centres de recherche,
- en 1996, un Consortium européen sur les nanomatériaux a été fondé avec un centre de coordination situé à Lausanne. L'objectif du consortium était de soutenir la recherche fondamentale destinée à lever des verrous technologiques et d'améliorer la communication entre les chercheurs et l'industrie,
- NOEME, un réseau d'excellence des matériaux organiques pour l'électronique créé en 1992 a présenté des programmes liés aux nanotechnologies.

Entre 1998 et 2002, le PCRD a permis de financer des projets portant sur les nanotechnologies.

Le budget total du 5^{ème} PCRD s'est monté à 14 960 millions d'euros. A travers certaines thématiques prioritaires, les nanotechnologies ont bénéficié de financements d'une valeur de 100 millions d'euros sur 5 ans.

Tableau 4 : Répartition des budgets du 5ème PCRD par thématique

	Budget total de la thématique prioritaire	Financement alloué aux nanotechnologies	Nombre de projets "nano" identifiés
Technologies pour la société de l'information	3 600 M€	51 M€	38 (nanoélectronique)
Croissance compétitive et durable	2 705 M€	39 M€	31 (nanomatériaux)
Qualité de la vie et gestion des ressources du vivant	2 413 M€	6 M€	4 (nanobiotechnologies)
Energie, environnement et développement durable	2 125 M€	4,5 M€	3

*Les nanomatériaux en France :
besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics*

Au regard des budgets antérieurs, la mise en place du 6^{ème} PCRD (2003-2006) apparaît comme l'ouverture d'une nouvelle opportunité. En effet, à travers le 6^{ème} Programme Cadre, l'Europe a débloqué un budget total de 17 500 millions d'euros, dont 11 285 millions d'euros

destinés à soutenir sept thématiques prioritaires dans le domaine des sciences de la vie, des technologies de l'information, de l'aéronautique et de l'espace, de la qualité et sécurité alimentaire, de l'environnement et du développement durable, de la citoyenneté et gouvernance et enfin, dans le domaine des nano-matériaux-procédés (NMP), thématique dotée d'un budget de 1300 M€

l'European Nanobusiness Association estime que les nanotechnologies, au sens strict, devraient en réalité bénéficier pour cette période d'un budget total compris entre **610 et 781 M€** à travers l'ensemble des thématiques prioritaires.

Pour la thématique NMP, trois appels d'offres ont été lancés en 2003, chaque appel s'appuyant sur un programme de travail décliné en quatre grands domaines:

- nanosciences et nanotechnologies
- matériaux multifonctionnels
- procédés de production et outils
- intégration des technologies des deux domaines précédents.

Le programme complet est consultable sous <http://www.cordis.lu/fp6/nmp.htm>

Pour répondre aux objectifs du programme, la Commission s'est doté de nouveaux instruments: PI (projet intégré) et RX (réseau d'excellence)

- les projets intégrés visent, soit à augmenter la compétitivité économique de l'Europe, soit à renforcer le développement durable.
- les réseaux d'excellence sont destinés à promouvoir et renforcer l'intégration et développer un véritable espace européen de la recherche (EER).

Globalement avec 12% de coordinations des projets européens retenus après le premier appel, la France se situe en 3^e position derrière l'Allemagne (21%) et la Grande Bretagne (12.5%). Sa contribution globale pour cette thématique devrait être de l'ordre de 67 M€

Tableau 5 : 6^e PCRD, résultats du premier appel d'offres pour la thématique NMP

Appel d'Offres	Instruments	Coordinations françaises éligibles	Coordinations françaises retenues
FP6-2002-NMP-1	PI	18	0
	RX	30	5
	STREP	44	10
	CA	2	2
	SSA	2	0
TOTAL		96	17

Tableau 6 : 6é PCRD, résultats du premier appel d'offres: projets retenus à coordination française

Instrument	Titre	Sujet	Coordination
RX	POLYSACCHARIDES	Réseau polysaccharide	ENSMP
RX	NANO2LIFE	Nano-biotechnologies	CEA
RX	CMA	Alliages métalliques complexes	CNRS-Nancy
RX	NANOMEMPRO	Membranes nano	CNRS-Montpellier
RX	FAME	Matériaux hybrides	CNRS-Bordeaux
STREP	MUSTWIN	Emetteur ultra-sons pour imagerie et analyse	THALES
STREP	DETEX	Capteur chimique pour la détection d'explosifs	CEA/DAM
STREP	CORNEA ENGINEERING	Reconstruction 3D de la cornée par génie tissulaire	CNRS-RA
STREP	SELF-CLEANING GLASS	Verres auto-nettoyants	Saint-Gobain Recherche
STREP	HARDECOAT	Revêtements décoratifs	ENSMM-Besançon
STREP	BARP+	Pancréas bio-artificiel pour diabétique	Centre EU Etudes Diabète
STREP	ASTERIXE	Technologies de surfaces pour environnement extrême	CEA/DRT
STREP	X-TIP	Analyse chimique 2D à l'échelle nano	ESRF
STREP	MATECO	Revêtements PACVD contre la corrosion	HEF
STREP	ANSWER	Nanomatériaux pour émission IR	THALES
CA	SHAPE-RISK	Conception de systèmes industriels	INEIR
CA	PIAM	Moulage par injection de polymères	ARDMPI/ECM

Pour cette thématique prioritaire, la majorité des projets retenus à coordination française concernent directement ou indirectement les nanomatériaux.

Exemples d'initiatives nationales en faveur des nanotechnologies et nanomatériaux

L'Allemagne

Pour 2003, le soutien public aux nanotechnologies est estimé à environ 200M€ Ce budget est dédié aux nanomatériaux (1/4), aux technologies optiques, de communication, de fabrication, aux biotechnologies, à la nanoélectronique et aux microsystèmes.

Le BMBF (Ministère de l'Education et de la Recherche) a mis en place 6 centres de R&D consacrés aux nanotechnologies qui ont pour mission de conseiller et d'aider les entreprises dans leurs travaux de R&D en nanotechnologies. Les principaux axes de développement concernent la structuration latérale, les nanotechnologies dans l'optoélectronique, les couches ultraminces fonctionnelles, les matériaux nanostructurés, les nanotechnologies chimiques, les nanobiotechnologies, la nanoanalytique, et les procédés de fabrication haute précision.

Le Royaume Uni

Le montant annuel du soutien public en 2003 est estimé à 70 M€ Le Royaume Uni soutient cinq programmes de recherche dédiés à la thématique Micro-Nanotechnologie.

Par ailleurs, la Grande Bretagne, par le "UK Nanotechnology Initiative", vise à développer un réseau de centre de compétences et soutenir des projets de R&D coopératifs à l'échelle nationale et régionale.

2.2.2.4 Projets de recherche en nanomatériaux, financés directement par la France

Plus de 200 centres de recherche français travaillant dans le domaine des nanomatériaux ont été identifiés lors de l'étude, marquant ainsi une large implication nationale. Le budget publics consacré aux nanotechnologies, d'après une étude récente de l'IGAENR, s'élève à 210 M€^{XXI}. Il est essentiellement constitué par des crédits d'intervention alloués via le fonds national de la science (FNS) et le fonds de la recherche et de la technologie (FRT) et au travers des subventions allouées aux grands opérateurs publics de recherche (ANVAR, CEA, CNRS, INSERM, Universités...).

Sont citées ci après les principales initiatives françaises dans les domaines des nanotechnologies et en particulier des nanomatériaux :

- *Programme Nanosciences-Nanotechnologies et Grandes Centrales*

Ce programme initié par le MRNT vise à mieux coordonner les actions dans ce domaine et les rendre plus conséquentes. Il poursuit 3 objectifs :

- soutenir des activités de recherche dans le cadre de projets de recherche ou projets intégrés sur les nano-sciences et nano-technologies,
- développer 4 grands centres de compétences ayant une taille critique compétitive à l'échelle mondiale et permettant la mise en commun d'équipements pour des projets "amont" et l'accueil de scientifiques :
 - Minatec Grenoble : En janvier 2002 et à l'initiative du CEA, un pôle d'innovation en Micro et nanotechnologies a été installé à Grenoble qui a pour vocation finale de devenir le centre européen de la recherche dans ce domaine
 - LAAS Toulouse,
 - IEMN Lille,

*Les nanomatériaux en France :
besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics*

- IEF/LPN Paris.
 - promouvoir le développement de clusters au travers d'activités de recherche multi-disciplinaires à l'échelle locale. 8 centres spécifiques qualifiés au titre des nanotechnologies apporteront un soutien de proximité.
- *Réseaux R2IT et Initiatives Euréka*
 - les réseaux de recherche et d'innovation technologique (R2IT), en particulier le Réseau National des Matériaux et Procédés (RNMP), le Réseau Micro-Nano-Technologies (RMNT), soutiennent des projets initiés par une entreprise ou un laboratoire de recherche, soit selon une procédure de type "bottom-up".
 - selon la même procédure, l'initiative Euréka vise à promouvoir la coopération entre les entreprises européennes pour développer des produits, procédés ou services innovants, proches du marché.

Il s'agit dans les 2 cas de lieux privilégiés où s'exprime la "demande", point de départ de toute prospective.
- *EPIC, EPST, Institutions, Industrie*
 - diverses actions et réflexions sont également engagées par les établissements publics pour soutenir la recherche et promouvoir ces disciplines. On peut ainsi citer les programmes interdisciplinaires Ultimatech, Matériaux du CNRS, les actions du CEA autour des micro-nano-technologies (Nanotec 300), de la science des matériaux (l'initiative Nirv@na), de la nano-physique et de l'ingénierie moléculaire.
 - dans le domaine des matériaux, les industriels français (principalement Rhodia, Air Liquide, Snecma, L'Oréal, EADS, Michelin) et les centres techniques (CSTB, CETIM, IFTH, ARAMM) et la DGA mènent également une veille active sur le sujet.

2.2.2.5 Synthèse des ordres de grandeurs concernant les nanomatériaux au sein des nanotechnologies sur les différentes zones géographiques

- les nanotechnologies sont en très forte croissance sur l'ensemble des zones géographiques.
- dans le monde, 30% des industriels impliqués dans le domaine des nanotechnologies ont une activité dédiée aux nanomatériaux.
- l'analyse des projets européens montre que 33% des projets européens PCRD répertoriés dans la thématique « nanotechnologie » traitent une problématique nanomatériaux.

Une photographie fin 2002 est présentée dans le tableau suivant. Il ressort que 50% des start-up nanotechnologiques aux USA et en Europe ont une activité dédiée aux nanomatériaux.

Tableau 7 : Les ordres de grandeur dans le monde des nanomatériaux au sein des nanotechnologies en 2003

		USA	Asie	Europe
Nombre de start-up et création d'entreprises en nanotechnologies		150^{XXII}	(4% des start-up mondiales selon estimation Minanet)	50^{XXIII}
Nombre de structures centrées sur les nanotechnologies	<i>R&D</i>	110^{XXIV}	110^{XII}	170^{XII}
	<i>Industriels</i>	360^{XII}	130^{XII}	170^{XII}
Nombre de start-up travaillant dans les nanomatériaux (hors instrument de caractérisation)		80^{XXV}	Non déterminé	25^{XVII}
Positionnement sur les axes technologiques : axes thématiques prioritaires et différentiant dans les nanomatériaux^{XXVI}	<i>Nano-renforcés</i>	1 - Catalyse 2 - Les nanocomposites	1 - Les nanocomposites 3 - Catalyse	2 - Catalyse
	<i>Les nano-structurés en surface</i>	1 - Revêtements de surface	2 - Revêtements de surface	1 - Revêtements de surface
	<i>Les nano-structurés en volume</i>	Nanostructurés		

2.3 Les industries utilisatrices visées par le développement des nanomatériaux

La dénomination des secteurs industriels français retenus pour analyser les enjeux du développement des nanomatériaux a été précisée à partir d'une déclinaison de la Nomenclature Economique de Synthèse (NES). « Adoptée par l'Insee en 1994, c'est une double nomenclature nationale - d'activités économiques et de produits - agrégée, pertinente pour l'analyse économique. Les regroupements constitués sont un dénominateur commun pour la présentation des statistiques économiques agrégées, valables pour tous les domaines : ils visent à refléter, autant que possible, le comportement d'agents (acteurs) confrontés à leur marché^{XXVII} ».

Le recentrage vers les secteurs étudiés dans le champ de l'étude nanomatériaux a été effectué à partir de trois stades d'analyses :

- au stade de l'étude documentaire, par une première détermination des secteurs prioritairement concernés par les nanomatériaux,
- au stade de l'analyse des projets détectés dans le PCRDR, permettant d'intégrer les secteurs concernés par des travaux de recherche et n'étant éventuellement pas ressortis de la recherche documentaire,
- au stade des entretiens téléphoniques et en face à face avec des experts, afin d'identifier les secteurs faisant remonter des enjeux ;

La mise en cohérence des trois stades de l'analyse a permis de finaliser les secteurs prioritairement concernés par les nanomatériaux et de préciser les enjeux de leur développement, les données économiques, la position de la France sur ces secteurs, ainsi que des exemples de projets issus de l'analyse spécifique des projets nanomatériaux financés par le PCRDR.

Ce recentrage successif fait ressortir 10 secteurs industriels (hors TIC et Santé) faisant l'objet d'une analyse des enjeux du développement des nanomatériaux. Bien que ne correspondant pas à un secteur d'activité de la NES, du fait de leur caractère transversal, 2 autres secteurs - l'énergie et l'environnement - ont été ajoutés. Sur ces 12 secteurs, la France dispose d'une position particulièrement favorable dans les domaines de l'énergie, de l'automobile, de l'aéronautique, du caoutchouc et de la cosmétique. L'ensemble de ces secteurs, listés ci-après, représente environ 1,9 million d'emplois.

Principaux secteurs concernés par le développement des nanomatériaux (hors TIC et Santé)

1. L'environnement	7. L'aéronautique et le spatial
2. L'énergie	8. Le verre et les articles en verre
3. Le textile	9. Les céramiques et les matériaux de construction
4. La chimie	10. Le caoutchouc
5. La cosmétique et la parfumerie	11. Les matières plastiques
6. L'automobile	12. La métallurgie

Les enjeux technico-économiques sont précisés pour l'ensemble des secteurs afin de mettre en perspective l'apport potentiel des nanomatériaux et matérialiser leur caractère transversal. De part l'étendue des secteurs industriels visés, les enjeux et axes de recherche n'ont pas de caractère exhaustif.

2.3.1 L'environnement

Les enjeux dans le secteur de l'environnement

- réduire les émissions des polluants,
A titre d'exemple, le **protocole de Göteborg** vise à réduire les polluants (SO₂, NO_x, particules solides) ayant un impact sur l'acidification et l'eutrophisation. Sa mise en œuvre devrait coûter 60 milliards d'euros par an d'ici 2010 à l'Union Européenne, dont 9 milliards à la France, la majorité (85%) étant absorbée par les mesures concernant les oxydes d'azote et les composés organiques volatiles, responsables de la pollution par l'ozone.
- traiter les effluents,
- purifier les gaz (séparation ultime).

Les axes de recherches dans le domaine des nanomatériaux susceptibles de répondre à ces enjeux

Le ratio surface-volume des nanoparticules est par définition particulièrement élevé. C'est pourquoi un catalyseur à base de nanoparticules peut (ad)absorber davantage de matière, ce qui améliore sa performance. Des recherches sont en cours concernant des :

- membranes organiques nano-fonctionnelles pour la séparation et la purification des gaz,
- catalyseurs permettant de traiter des effluents à forte teneur en monoxyde de carbone et en oxyde d'azote,
- filtres fonctionnalisés par des couches polymères ayant des propriétés de capture de polluants ioniques ou moléculaires,
- céramiques nanoporeuses pour la filtration d'air, d'eau ou de polluants,
- aérogels qui peuvent piéger des polluants.

2.3.2 L'énergie

Les enjeux des nanomatériaux dans le secteur de l'énergie

- rendre plus performants les systèmes énergétiques,
- développer des énergies propres,
- favoriser les économies d'énergies.

Les axes de recherches dans le domaine des nanomatériaux susceptibles de répondre à ces enjeux

- matériaux pour le stockage de l'hydrogène : les nanotubes de carbone par exemple ou encore les poudres métalliques,
- barrières thermiques nanostructurées (ex: aérogels), dans un objectif d'économie d'énergie,
- exemples d'applications :
 - les piles à combustibles,
 - les systèmes photovoltaïques,
 - la catalyse.

2.3.3 L'industrie textile

Les enjeux

Les fabricants de textiles visent à maintenir leurs parts de marché. Pour cela, ils cherchent à innover sur leurs produits en améliorant ou apportant de nouvelles propriétés à leurs textiles. Les principaux objectifs sont de :

- augmenter la qualité et les fonctionnalités des textiles sans augmenter de façon considérable les coûts de production,
- améliorer les propriétés mécaniques, barrières, intégrer des objets communicants, améliorer la tenue à la teinture, etc.

Axes de recherche associés

- Mise en place d'un projet RMNP ayant pour objectifs :
 - d'identifier les fonctionnalités que les nano-charges existantes ou en développement peuvent apporter au textile,
 - valider la viabilité industrielle de ces nanoparticules,
 - explorer les potentialités et les freins technologiques d'incorporation des nanoparticules organiques ou minérales dans les différentes étapes de fabrication des produits textiles (extrusion/filage, ennoblement, enduction, imprégnation),
 - mettre en évidence la faisabilité technico-économique permettant entre autres la sélection des couples (matrice/nano-charges) et des procédés de transformation adaptés,
 - comprendre comment bien disperser les nano-charges dans la matrice pour une mise en œuvre optimisée dans les différents procédés de transformation.
- Développement de nanocomposites fibres-polymères qui se caractérisent par leur résistance élevée, leur transparence, leurs propriétés ignifuges ainsi que leur très faible poids.

2.3.4 L'industrie chimique

Les enjeux

- Développer des nanocomposites à matrice polymère. L'approche est pluridisciplinaire. Elle intègre le savoir faire et les connaissances de la chimie minérale et organique. Ces développements requièrent l'implication de toute la chaîne industrielle :
 - les fournisseurs de matières premières (plastiques, nanoparticules),
 - les fournisseurs de formulations,
 - les transformateurs,
 - les fournisseurs de procédés,
 - les utilisateurs finaux.
- Elargir les domaines d'applications des polymères,
- Améliorer certaines propriétés des matériaux existants en fonction de la demande des clients sans en détériorer d'autres, par exemple pour :
 - alléger des structures,
 - améliorer les propriétés optiques (transparence),
 - augmenter la durabilité des matériaux,
 - renforcer les structures
 - résister au feu
 - résister aux températures élevées
 - résister aux chocs thermiques
 - offrir une perméabilité des structures (films barrières)
- Répondre à la demande du client en favorisant les partenariats de façon à prendre en compte, dès la fabrication du matériau, les conditions d'applications finales,
- Développer de nouveaux catalyseurs, par exemple pour améliorer la combustion des carburants,
- Se développer sur des marchés dynamiques à fort volume ou à très forte valeur ajoutée.

Axes de recherche associés

- Lorsque économiquement cela se justifie, les industriels se lancent dans des recherches sur l'élaboration et les applications de nouveaux matériaux tels que :
 - l'association de monomères et de nanoparticules : la nanostructuration des polymères permet l'auto-organisation des particules,
 - les nanocomposites à matrice polymère (étude sur les applications des nano composites à matrice polymère et charges lamellaires, par exemple pour des matériaux anti-feu ou des films barrières),
 - la production de nanotubes de carbones,
 - les nanoparticules minérales (titane, silicium, phosphate).

2.3.5 L'industrie de la cosmétique et de la parfumerie

Les enjeux

Les industriels de la cosmétique 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 :

- les propriétés optiques,
- la tenue,
- la transparence,
- la brillance.

Axes de recherche associés

- études sur l'utilisation de nanoparticules en nano dispersions et en microémulsions.
- études sur les potentialités, dans les produits cosmétiques, de nanoparticules développées ou déjà utilisées dans d'autres secteurs. Par exemple, les études concernant l'utilisation de nanoparticules dans les vernis ou les peintures intéressent les industriels de la cosmétique pour une utilisation dans les vernis à ongles.
- études sur l'impact des nanoparticules sur l'organisme humain.

2.3.6 L'industrie automobile

Les enjeux

Les industriels de l'automobile cherchent constamment à :

- réduire le poids de leurs véhicules,
- augmenter la résistance des pièces automobiles aux environnements sévères, à la rayure,
- augmenter la tenue à la température de certaines pièces,
- diminuer la consommation d'essence,
- limiter l'émission de gaz à effet de serre,
- augmenter la sécurité et le confort des passagers d'un véhicule.

Les nanomatériaux peuvent répondre à ces attentes grâce aux nanocomposites et aussi aux dépôts de couches minces. L'industrie automobile est à l'initiative de nombreuses recherches de l'industrie chimique, des céramiques et de la métallurgie.

Axes de recherche associés

- Les nanocomposites à matrice polymère permettent d'augmenter la résistance des matériaux tout en diminuant le poids des pièces. La recherche portant sur le remplacement des métaux thermoplastiques techniques par des nanocomposites à matrice polymère (en particulier polyoléfine) est très active dans le domaine de l'automobile (par exemple du polypropylène chargé de nanoparticules de Montmorillonites).
- Actuellement, les véhicules automobiles ne consomment pas la totalité du carburant du fait d'une combustion incomplète des gaz. Les nanomatériaux sont envisagés comme composants d'électrodes afin d'accroître leur durée de vie et augmenter le rendement de la combustion de carburants. Les céramiques nanostructurées à haute ténacité devraient permettre d'accroître le rendement thermique des moteurs.

- Des couches de polymères d'épaisseur nanométrique déposées sur le pare-brise permettent d'améliorer par exemple, les propriétés thermiques des vitrages (pour un habitacle athermique) ou créer la fonction anti-pluie.
- Des batteries Métal-Hydrure de Métal constituées par du Nickel nanocristallin ont été envisagées pour diminuer le nombre de rechargements nécessaires afin d'accroître l'autonomie de véhicules électriques.
- Parce qu'ils présentent une large surface d'échange, les nanoparticules sont chimiquement extrêmement réactifs. Ils peuvent donc être envisagés pour le traitement d'effluents à forte teneur en monoxyde de carbone et en oxyde d'azote (applications pour pot catalytique par exemple)

2.3.7 La construction aéronautique et spatiale

Les enjeux

- améliorer la performance et la légèreté des matériaux de structure,
- gagner des parts de marché,
- réduire le cycle de fabrication en diminuant les opérations d'assemblage,
- améliorer la durée de vie, la performance et la consommation des moteurs. Un des objectifs est d'augmenter la résistance à la température des pièces, de façon à diminuer voire éliminer (solution idéale) les circuits de refroidissement pour gagner en énergie, rendement et performance.

Axes de recherche associés

A moyen terme (10 ans) : amélioration des procédés de dépôts de surface réalisés sur pièces mécaniques. Les principaux revêtements intéressants ont un rôle de :

- protection mécanique,
- protection contre la corrosion,
- protection contre les agressions chimiques,
- barrière thermique.

A long terme (>10 ans) : recherche sur des matériaux métalliques ou composites à matrice céramique, métalliques ou polymères, à forte valeur ajoutée.

Composite Carbone-Carbone utilisé dans les freins. Addition de nanotubes de carbone pour améliorer le coefficient de frottement et les propriétés mécaniques des pièces

Composite Carbure de silicium (matrice carbure de silicium + fibre de carbone) utilisé pour des pièces très sollicitées thermiquement, dans les chambres de combustion où la température s'élève à 2000°C. L'addition de nanotubes de carbone dans la matrice composite permet d'améliorer la conductivité thermique

2.3.8 L'industrie du verre et des articles en verre

Les enjeux

- Remplacer les vitrages actuels et les verres pour bouteille par des vitrages en verre renforcé grâce à des composites à matrice verre.
- Protéger la surface des verres avec des revêtements dotés de nano-particules fonctionnelles

Les recherches sont motivées en priorité par la demande des fonctionnalités suivantes :

- le contrôle thermique,
- la fonction anti-pluie (des revêtements hydrophobe à base de produits fluorés),
- les propriétés optiques : la fonction réfléchissante (fine couche de nanoparticules actives de TiO₂ sur pare brise), coloration, antireflet, absorption des UV,
- la fonction autonettoyante.

Axes de recherche associés

- Créer de nouveaux produits verriers avec de nouvelles fonctionnalités en modifiant la surface du verre plutôt qu'en changeant sa composition : recherche sur le procédé sol-gel qui permet de réaliser des revêtements multi couches et des revêtements multi composants.
- Verre renforcé par des nano-particules additionnées : composite matrice en verre.
- Revêtements de surface intégrant des nanoparticules fonctionnelles.

2.3.9 L'industrie des produits céramiques et des matériaux de construction

Les enjeux

- Renforcer les céramiques par des nanoparticules, les rendre plus tenaces,
- L'industrie du bâtiment cherche à améliorer le confort de l'habitat. En France, 18 000 personnes décèdent d'accidents domestiques. Des programmes sont en cours pour créer l'intelligence dans le bâtiment, grâce à l'intégration de capteurs miniaturisés.
- Les professionnels de l'habitat cherchent également à étudier la thermique dans sa globalité. Les bâtiments sont conçus avec de plus en plus de vitrages, qui nécessitent l'apport de nouvelles technologies pour augmenter le confort d'été et d'hiver.
- Dans le génie civil et pour les grands ouvrages, les coefficients de sûreté sont très élevés. Il devient nécessaire de renforcer les matériaux de construction.

Axes de recherche associés

- Recherche sur l'ajout de nanopoudres aux céramiques. Par exemple : des nanoparticules de nitrure de silicium pour renforcer l'alumine
- Dans le bâtiment individuel, de nombreuses études sont en cours pour rechercher de nouvelles fonctionnalités par traitements de surface intégrant des nanoparticules : l'industrie du bâtiment cherche ainsi à réaliser des revêtements anti salissure, anti dérapant, plus résistants.
- Recherche sur les nanomatériaux déjà utilisés ou développés pour étudier les potentialités d'utilisation dans le bâtiment.
- Le bâtiment est très attentif aux innovations dans l'industrie :
 - du verre pour l'isolation thermique mais aussi pour de nouvelles fonctionnalités telles que : les vitrages auto réfléchissants, autonettoyants, anti-pluie,
 - de la biologie (étude sur l'intégration de nanoparticules pour empêcher le développement de microorganismes dans les mortiers),
 - des plastiques : les polymères anti-feu intéressent l'industrie du bâtiment, comme les polymères chargés avec des nano-particules d'argile qui augmente la résistance des matériaux,
 - du textile : la recherche sur les textiles anti bactériens peut intéresser le bâtiment pour la réalisation de revêtements de sols spécifiques,
 - de l'environnement avec les aérogels étudiés pour le stockage de l'hydrogène ou pour piéger les polluants. Des plaques d'aérogel ultra minces placées dans les doubles vitrages augmenteraient l'isolation thermique tout en gardant la transparence.

2.3.10 L'industrie du caoutchouc

Les enjeux

- Diminuer le poids des pneumatiques,
- Augmenter leur durée de vie,
- Economiser le carburant,
- Réduire les émissions sonores,
- Recycler les pneus en fin de vie.

Axes de recherche associés

- Améliorer les propriétés mécaniques des élastomères (améliorer la résistance à la rupture et à l'usure, augmenter le module élastique, mieux dissiper une partie de l'énergie de frottement)
- Caractériser le noir de carbone et les particules de silice comme charge pour les pneumatiques
- Mettre en œuvre un procédé d'élaboration d'élastomère chargé à l'échelle industrielle.

2.3.11 La transformation des matières premières plastiques

Les enjeux

- Trouver un compromis entre :
 - Les propriétés du nanomatériau avant transformation,
 - les propriétés attendues après transformation,
 - les conditions d'application du matériau final.
- Utiliser des polymères nano-structurés ou des nano-composites dans les outils de transformation de plastiques sans perturber profondément l'outil de production.
- Ne pas modifier les propriétés des polymères nanostructurés lors de la phase de transformation
- Obtenir, au préalable de la phase d'extrusion, des polymères nanochargés sous forme de grains. L'enjeu se situe en amont de la chaîne de fabrication du polymère au niveau de la phase de polymérisation en présence de nano-charges ou du mélangeage
- Intégrer les nano-charges au moment opportun lors de la transformation d'un polymère par injection de façon à obtenir les propriétés attendues

Axes de recherche associés

- Adapter les procédés industriels de transformation existants aux contraintes des nanomatériaux.

2.3.12 L'industrie de la métallurgie et de la transformation des métaux

Les enjeux

- Améliorer les propriétés de dureté, de résistance à la corrosion,
- Diminuer le frottement des pièces mécaniques par des revêtements utilisant des nanomatériaux,
- Réduire voire éliminer les fluides lubrifiants : le lubrifiant est un poste lourd dans la fabrication d'une pièce. Il est nécessaire d'utiliser le lubrifiant pour ensuite l'enlever de la pièce avec un solvant (problème d'environnement). 90% des métaux fabriqués nécessitent l'utilisation de lubrifiants
- Développer des outils de coupe plus durs, plus résistants à l'abrasion et à l'érosion à partir de nanocristaux. Ces outils permettent également d'usiner plus rapidement et d'accroître ainsi la productivité en réduisant les coûts de production.
- Remplacer le chrome 6 pour des raisons environnementales.

Axes de recherche associés

- recherche au niveau de la formulation des dépôts, par exemple du dépôt monocristallin par voie humide pour la réparation de générateur nucléaire
- réalisation d'outils pour l'usinage beaucoup plus résistants tout en diminuant l'utilisation de lubrifiant,
- réalisation d'outils d'emboutissage, par exemple le projet allemand poursuivi en collaboration avec des constructeurs automobiles allemands qui consiste à déposer des couches en nanocomposite très dures.

**3 Les nanomatériaux en France : besoins des industriels et savoir
faire des laboratoires de recherche publics**

L'analyse terrain permettant de mettre en perspective les attentes des industriels et le savoir faire des laboratoires a été réalisée en deux temps :

1. Une enquête auprès des industriels sur les nanomatériaux, les attentes des industriels étant ensuite confrontées aux laboratoires impliqués dans les nanomatériaux et aux industriels fabricants des nanomatériaux (enquête « montante »),
2. Une enquête élargie auprès des laboratoires de recherche, conduisant à mettre en avant les applications innovantes qui pourraient faire l'objet de développements industriels ultérieurs (enquête « descendante »).

3.1 Méthodologie des enquêtes

3.1.1 Méthodologie de l'enquête « montante »

Cette partie présente les besoins exprimés par les industriels utilisant ou pouvant utiliser des nanomatériaux. Ces besoins ont été par la suite confrontés aux acteurs de l'offre, à savoir les laboratoires de recherche publics et les producteurs de nanomatériaux.

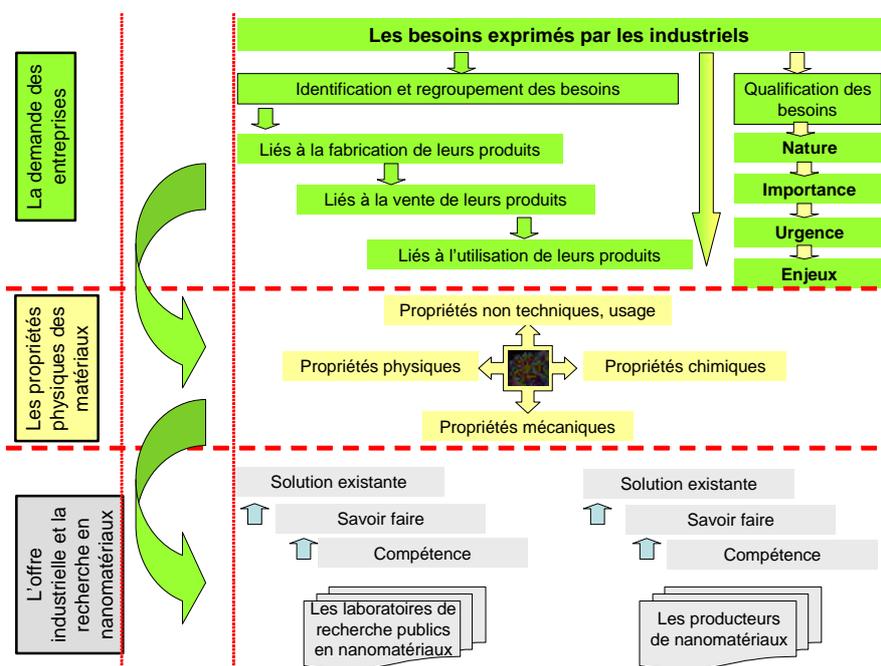


Figure 5: Méthodologie de l'enquête montante

L'identification des entreprises potentiellement utilisatrices de nanomatériaux a pu se faire en particulier grâce aux bases de données exhaustives sur les entreprises inscrites au registre du commerce et des sociétés et repérées par les codes NAF retenus précédemment pour chacun des secteurs.

L'identification des compétences scientifiques et des fabricants de nanomatériaux a pu se faire à partir de différentes sources d'information : base de données, annuaires spécialisés, etc.

3.1.2 Méthodologie de l'enquête « descendante »

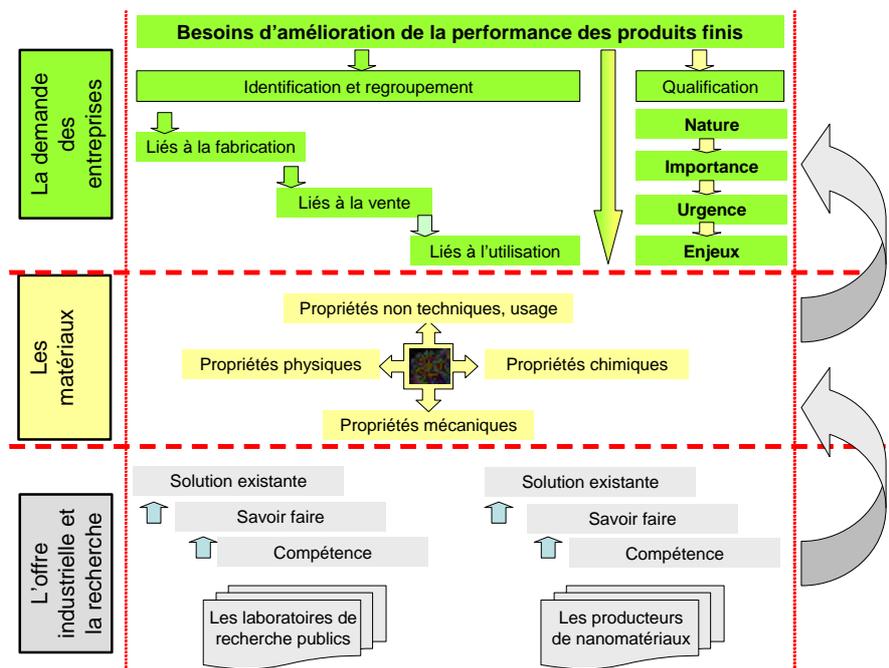


Figure 6 : Méthodologie de l'enquête descendante

L'enquête a été réalisée auprès des laboratoires impliqués dans la R&D nanomatériaux. 205 laboratoires ont été identifiés et consultés. Cependant malgré deux relances, seulement 70 laboratoires ont répondu à notre enquête.

3.2 Les réponses des industriels fabricants de nanomatériaux et de la recherche aux besoins des industriels utilisateurs : l'enquête « montante »

3.2.1 Les besoins des industriels pour améliorer les caractéristiques de leurs produits finis

3.2.1.1 Une expression des besoins d'amélioration des produits finis

Les utilisateurs se sont prononcés sur les besoins d'amélioration de leurs produits finis ayant une origine associable aux matériaux utilisés.

Les besoins d'amélioration de leurs produits ayant une réponse technique portent avant tout sur les propriétés liées à l'utilisation de leurs produits finis, dans une moindre mesure sur la fabrication de leurs produits finis et les aspects marketing.

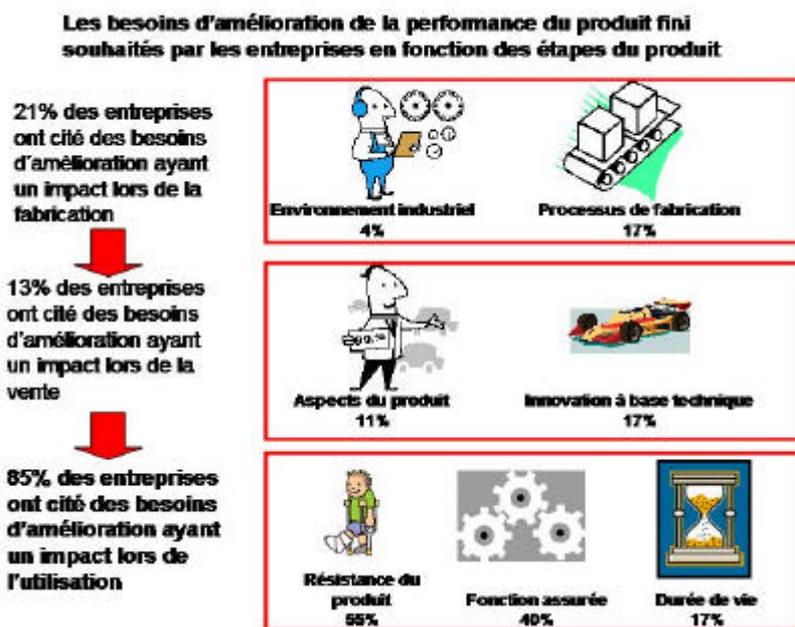


Figure 7 : Besoins d'améliorations de leurs produits exprimés par les industriels

Les besoins les plus urgents cités par les entreprises concernées, ayant une connotation matériaux, sont par exemple les suivants.

Aéronautique : réduire le poids et résoudre les problèmes de tribologie.

Il serait utile d'améliorer les caractéristiques des matériaux classiques : thermoplastique, thermodurcissables, utilisés en aéronautique : PEEK, PEI, PAI.

Cela passe par l'augmentation des caractéristiques mécaniques, de la conductivité, de la tenue au feu. Pour les pièces de fixations, l'enjeu est de passer du métallique aux composites avec les mêmes performances. L'objectif final étant de réduire le poids.

Résoudre des problèmes de tribologie est un enjeu actuel. Par exemple, pour les systèmes de conditionnement d'air situés près des moteurs d'avion. Ces pièces sont très sollicitées mécaniquement.

Biomédical : augmenter la durée de vie des implants orthopédiques.

Les durées de vie des prothèses orthopédiques sont comprises entre 15 et 20 ans. Au delà, les prothèses sont à changer. L'allongement de la durée de vie repose sur une résistance à l'usure et un accroissement des propriétés mécaniques.

Caoutchouc : poids et durée de vie des pneumatiques.

L'ajout de charges appropriées dans le caoutchouc permettra de réduire le poids du pneu, limiter l'utilisation de nouveaux renforts et accroître la durée de vie des pneumatiques.

Céramique et construction : améliorer la durabilité des ouvrages en béton.

L'augmentation de la durabilité des ouvrages de travaux publics ou pour l'habitat permettra de diminuer les dépenses relatives à l'entretien de ces ouvrages.

Chimie : élargir les domaines d'applications des polymères pour répondre aux exigences de plus en plus pointues des utilisateurs.

Cosmétique : innover

L'innovation constante pour le consommateur final est une obligation. En effet, l'innovation représente de 25 à 30 % des ventes.

Energie : améliorer le rapport puissance/poids et plus généralement le rendement des systèmes.

Environnement : contrôler en ligne les effluents gazeux et mieux capter les polluants à l'état de traces.

Métaux : répondre rapidement aux exigences des clients

L'augmentation des performances des composants passifs magnétiques de puissance est un axe actuel. La demande des clients est souvent moteur du développement de nouveaux produits. Par exemple, la recherche concernant les bandes amorphes à fonction magnétique a trouvé son point de départ dans une demande client.

Plastiques : améliorer la qualité du Polypropylène

Le polypropylène est le matériau de prédilection pour son avantage de prix. Mais il présente des inconvénients de qualité ce qui nuit à l'image des pièces d'aspect. Il serait très utile

d'augmenter sa stabilité dans le temps, en température, sa stabilité dimensionnelle et de parvenir à une augmentation de la plage de tolérance.

Textile : allier résistance et discrétion.

Il s'agit de mettre au point des produits qui soient suffisamment fins pour être discrets voire transparents tout en assurant leurs fonctions et disposant d'une résistance accrue. L'aspect esthétique du produit ne doit pas se détériorer durant la durée de vie du produit. Développer des produits biocompatibles peut présenter un avantage.

Améliorer les propriétés existantes des vêtements, par exemple des vêtements qui soient hydrofuges, imperméables, déperlent. Le besoin est satisfait pour le moment grâce à des technologies à l'échelle micrométrique. Le besoin doit être satisfait tout en respectant l'environnement et des critères de prix.

TIC : améliorer la sécurité et les performances.

La miniaturisation et l'intégration aussi bien au sens composant que produit.

Par exemple, les composants doivent intégrer un maximum de fonctions sur une surface réduite de silicium.

Verre : performance et compatibilité.

Améliorer les performances électriques et les performances mécaniques permettra d'agrandir leur domaine d'utilisation.

3.2.1.2 Les propriétés physico-chimiques des matériaux

Les besoins d'amélioration des produits finis liés aux matériaux ont été rapprochés des grandes propriétés physico chimiques des matériaux lors des entretiens avec les industriels.

Différentes propriétés devraient faire l'objet d'améliorations :

Les propriétés mécaniques, citées par 68% des entreprises contactées

- améliorer la stabilité mécanique des matériaux,
- augmenter les propriétés élastiques et plastiques (flexion, traction, allongement, ductilité, ...),
- améliorer les propriétés de frottement (abrasion, tribologie du matériau, adhérence, glissement, collage),
- améliorer la dureté des matériaux (la tenue aux rayures, ...).

Les propriétés physiques, citées par 58% des entreprises contactées

- améliorer les propriétés optiques des matériaux (brillance ou aspect mat, protection solaire, transparence, ...)
- augmenter les propriétés magnétiques des matériaux
- améliorer les propriétés électriques des matériaux
- améliorer les propriétés thermiques des matériaux (température de fusion, résistance au feu, conductivité thermique, effets thermiques, isolation thermique...)
- poursuivre la miniaturisation.

Les propriétés chimiques, citées par 42% des entreprises contactées

- Protéger les matériaux contre les agressions chimiques (corrosion, ...)
- Améliorer la propriété barrière du matériau (perméabilité, ...)
- Favoriser les réactions chimiques (catalyse, électrolyse,...)
- Favoriser la recyclabilité et le respect de l'environnement (traitements des fumées, contrôle des rejets, détecter de nouveaux polluants, absorber davantage de polluants...)

A un niveau de détail plus fin, les trois premières propriétés physico-chimiques annoncées portent sur les propriétés thermiques, la dureté et les frottements.

Améliorer les propriétés thermiques des matériaux (la température de fusion, la résistance au feu, la conductivité thermique, les effets thermiques, l'isolation thermique...).

Les entreprises ont présenté ce thème comme le plus important afin de répondre aux besoins d'amélioration des caractéristiques de leurs produits finis. Cette demande émane d'un nombre diversifié de secteurs, conduisant à des motivations différentes.

Améliorer la dureté des matériaux (la tenue aux rayures, ...)

La dureté des matériaux est le second axe technique mis en avant par les industriels pour répondre à leurs besoins d'amélioration de la qualité des produits finis.

Cette problématique technique est déclinée différemment selon les secteurs d'activité. La dureté repose principalement sur la limitation des rayures et sur la résistance lors de l'usage.

Améliorer les propriétés de frottement (abrasion, tribologie du matériau, adhérence, glissement, collage)

L'amélioration des propriétés de frottement est le troisième thème le plus cité par les industriels utilisateurs. La maîtrise des frottements concerne aussi bien la diminution des frictions des pièces moteurs, que son augmentation pour améliorer l'adhérence.

Les enjeux en terme de volume de production sont annoncés comme forts quelles que soient les propriétés concernées.

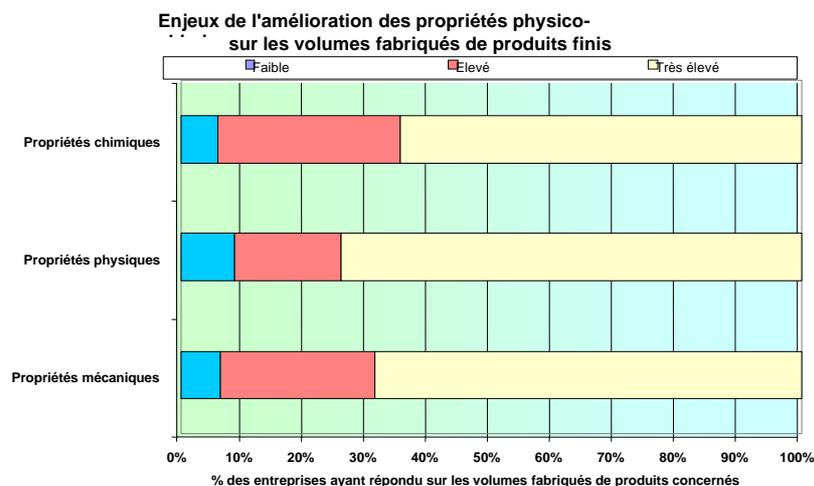


Figure 8 : Les volumes de produits finis concernés par les améliorations des propriétés physico-chimiques des matériaux

3.2.2 Les réponses des spécialistes en nanomatériaux aux besoins exprimés par les industriels

Tous les laboratoires et les centres de compétences s'accordent à dire que l'amélioration des propriétés des matériaux existants n'est qu'une infime partie des possibilités techniques des nanomatériaux. Ainsi nous avons pu faire ressortir un certain nombre d'axes de recherche plus prospectifs sur les nanomatériaux.

Nous avons, dans un premier temps, illustré les réponses des centres de recherche et des fabricants de nanomatériaux pouvant répondre aux attentes évoquées par les utilisateurs potentiels. A chaque propriété physico-chimique à améliorer correspond une liste non exhaustive d'axes de recherches susceptibles de répondre aux besoins des industriels.

Une première réponse aux propriétés mécaniques: l'amélioration des propriétés élastiques et plastiques, de frottement et augmentation de la dureté des matériaux

Les compétences des centres d'expertises et les fabricants de nanomatériaux sont significatives en termes d'amélioration des propriétés mécaniques et en particulier pour l'amélioration :

- des propriétés élastiques et plastiques (flexion, traction, allongement, ductilité)
- de la dureté des matériaux,
- des propriétés de frottement (abrasion, tribologie du matériau, adhérence, ..)

L'offre proposée par les fabricants de nanomatériaux et centres d'expertises pour répondre à ces problématiques repose sur :

- l'intégration de nanocharges minérales, métalliques, céramiques,
- l'intégration de nanotubes
- des nanocomposites
- des matériaux massifs nanostructurés

En terme de nanocharges, on peut citer par exemple :

- les nanopoudres de céramiques pour charges dans des plastiques ou des polymères
- les nanopoudres d'oxyde d'aluminium
- les nanoparticules d'oxyde de titane,
- les nano particules d'argile
- les nano poudres de carbure de tungstène

En terme de nanocomposites :

De nombreux travaux sont réalisés autour des nanocomposites à matrice polymères ou métalliques renforcés par des nanocharges minérales ou organiques notamment avec la silice (de ce point de vue, on se heurte au problème de brevet et approvisionnement en Montmorillonite, argile la plus utilisée, cependant l'utilisation d'argile de synthèse comme la laponite ou la perovskite permet de contourner ce brevet) ou encore par des nanotubes de carbones.

Toutefois, des problèmes persistent au niveau :

- de la dispersion des nano particules ou des nanotubes de carbone dans la matrice pour accroître les caractéristiques du composite
- la mise en forme du composite (par exfoliation par exemple)
- de l'approvisionnement des nanocharges

Malgré ces problématiques, des produits sont actuellement disponibles tels que des nanocomposites à matrice polypropylène renforcés par des charges nanométriques.

En terme de nanomatériaux pour les structures :

Actuellement d'importantes recherches sont en cours sur l'élaboration des structures utilisant des nanomatériaux de différentes nature (métaux et alliages, intermétalliques, céramiques oxydes, céramiques non-oxydes, composites,...). Par exemple des recherches sont réalisées sur des matériaux tels que :

- les intermétalliques (aluminures et siliciures): propriétés structurales et anticorrosion à haute température
- les carbures et Nitrures: propriétés structurales
- les alliages cuivre

La réalisation de ces matériaux denses nécessite une bonne maîtrise de leur élaboration et leur caractérisation. Il s'agit de développer des procédés d'élaboration permettant la fabrication de matériaux denses à grains nanostructurés, homogènes ayant les propriétés voulues et pour lesquels la structure peut être contrôlée à l'échelle nanométrique. Des travaux sont en cours sur différents procédés d'élaboration impliquant un courant électrique de forte intensité (1500 à 8000 A) tels que :

- la technologie SPS (Spark Plasma Sintering),
- le MAFAPAS (Mechanically Activated Field Activated Pressure Assisted Synthesis).

Une première réponse aux propriétés physiques

L'amélioration des propriétés barrières, optiques et de la stabilité mécanique des matériaux

Les laboratoires s'attachent à l'amélioration des propriétés barrières, optiques et à la stabilité mécanique des matériaux.

Des nanocomposites sont développés ou fabriqués pour l'amélioration des propriétés barrières des matériaux. Par exemple, dans le domaine du packaging, l'augmentation des propriétés barrières est très fortement demandée. Il faut éviter le déplacement de certaines molécules à travers le packaging. Il faut donc diminuer la perméabilité. Les nano charges permettent de réduire la perméabilité de 5%/ à la matrice de base. Aujourd'hui, les problèmes de mises en oeuvre ne sont pas encore tous résolus.

L'amélioration de la stabilité peut également être résolue par des nanocomposites notamment à base d'oxyde mixte, d'oxyde de titane, d'oxyde de silicium ou encore d'oxyde de nickel.

L'amélioration des propriétés optiques des matériaux est possible grâce à :

- des particules d'oxyde de titane dans les produits cosmétiques notamment qui jouent un rôle UVA protecteur à 20-30 nm,
- des céramiques nanométriques
 - o pour rendre les céramiques translucides pour le domaine de l'éclairage
 - o comme charges dans des plastiques ou des polymères permettant de conserver la brillance, la transparence car il n'y a pas d'interaction entre la lumière visible et des particules dont la taille est plus petite que la longueur d'onde
- des nanopoudres minérales : sulfure de plomb, silice, titane, zircone
- l'élaboration de nano particules luminescente (oxydes, terres rares) ; particules colloïdales de 5 à 500 nm.

L'amélioration des propriétés électriques des matériaux

Les axes de recherches pour améliorer ou modifier les propriétés électriques reposent sur différents types de nanomatériaux. Par exemple :

- la fabrication de nanoparticules magnétiques riches en oxyde de fer.
- le développement de céramiques fonctionnelles : mélange de composés oxydes pour produire des nanocomposites
- les nanotubes de carbone pour rendre conducteur un matériau composite par adjonction d'une petite quantité de nano tubes; l'intérêt étant de réaliser par exemple :
 - o des matériaux plus légers que le cuivre mais aussi conducteur, par exemple pour des applications aérospatiales
 - o des films polymères chargés disposant de propriétés conductrices suffisantes pour réaliser, par exemple, des films anti statiques pour l'emballage ou des écrans de blindages électrostatiques (quelques fractions de pourcent de nanotubes de carbone pouvant suffire).
- des matériaux massifs à propriétés électriques et diélectriques à base par exemple de :
 - o oxydes de structure pérovskite ;
 - o oxydes de structure spinelle associant propriétés électriques et magnétiques
 - o oxydes de structure fluorine, utilisés comme combustibles des centrales électro-nucléaires

L'amélioration des propriétés thermiques des matériaux

Face à l'amélioration des propriétés thermiques les laboratoires évoquent principalement, et ce malgré les problèmes de manipulation, les nanotubes de carbones présentant une conductivité thermique très élevée associée à une forte résistance mécanique.

Les nanotubes de carbones peuvent ainsi servir par exemple :

- à réaliser des films plastiques pour évacuation de chaleur avec 30 fois moins de charges que si l'on utilisait des particules métalliques : applications en électronique.
- à accroître la conductivité thermique de la céramique ou du cuivre
- à la fabrication de nanocapteurs pour détection de molécules, réactifs à la présence de certaines molécules par modification de la conduction thermique et électrique.

Dans le domaine de la câblerie, les propriétés anti feu sont très importantes. Des développements sont en cours et une offre existe pour proposer des nano composites polymères à propriété ignifugeante. L'enjeu consiste à trouver la bonne charge qui permettra de modifier et d'améliorer ces propriétés.

L'amélioration des propriétés magnétiques des matériaux

L'amélioration des propriétés magnétiques est rendue possible grâce notamment à :

- l'utilisation de nanoparticules, par exemple des nanoparticules magnétiques riches en oxyde de fer. Les nanomatériaux fabriqués sont en réalité des véhicules nanométriques susceptible d'être déplacés grâce à des aimants. Les nanoparticules sont fabriquées à partir d'une technologie propre de polymérisation d'émulsions monodispersées. Ces nanomatériaux permettraient de greffer des molécules et pourraient être utilisés en immuno diagnostic, en biologie moléculaire.
- des matériaux massifs nano structurés à base de fer, de nickel ou de cobalt, d'oxyde de structure spinelle. L'un des principaux intérêts est d'accroître les capacités des supports d'enregistrement tout en en diminuant la taille.

Des travaux sont en cours par étudier les propriétés magnétiques de certains matériaux par exemple :

- sur Fe-Ni pour tester l'influence de la nano structure sur le cycle de magnétisation ;
- sur Fe-Si pour tester l'influence de la nano structure et du broyage sur l'extension des caractéristiques magnétiques. Il s'agit de passer aux nano composites (métaux dans céramiques) pour accroître les capacités de supports d'enregistrement et réduire la taille des support simultanément.

Poursuivre la miniaturisation

Les problématiques de miniaturisation concernent principalement la micro électronique où le développement des nanomatériaux (et des nanotechnologies en général) jouera un rôle de plus en plus important. Les procédés actuels de dépôts (CVD, PVD) et de miniaturisation (lithographie optique) sont proches de leurs limites et on ne pourra rapidement descendre en dessous des dimensions actuelles avec les technologies et matériaux existants.

Dans cette optique, des travaux sont actuellement en cours par exemple sur :

- la synthèse de nouveaux matériaux,
- des technique d'électro-greffage permettant de réaliser des couches conductrices ou semi-conductrices,
- des dépôts de cuivre.

Une première réponse aux propriétés chimiques

Favoriser les réactions chimiques

Dans le domaine de la catalyse, de très nombreux progrès restent à réaliser dans le domaine de la conception, de la durée de vie et de la réactivité des nanomatériaux pour la catalyse. Toutefois, il faut noter les développements et la percée récente des nanomatériaux carbonés et des mésoporeux.

Dans tous les domaines de la catalyse, la synthèse « sur mesure » et la stabilisation de nanoparticules de métaux, d'oxydes, de sulfures (ou autres) sont des problématiques cruciales pour le développement de nouveaux procédés.

Des travaux portent sur les catalyseurs nanométriques tels que :

- des catalyseurs obtenus par réaction de complexes organométalliques (contrôle à l'échelle atomique).
- les nanotubes de carbones dont la surface spécifique est très importante ; elle permet l'accroche d'un grand nombre de particules
- le Cu₃Si qui permet une amélioration très large du rendement de la réaction chimique et qui plus est à basse température
- des nanopoudres d'oxyde d'aluminium,
- des nanopoudres minérales : sulfure de plomb, silice, titane, zircone

Une offre commerciale existe auprès des fournisseurs de poudres céramiques techniques poreuses pour la catalyse.

Favoriser la recyclabilité et le respect de l'environnement (traitements des fumées, contrôle des rejets, détecter de nouveaux polluants, absorber davantage de polluants...)

Le traitement des déchets et effluents est rendu possible grâce à par exemple:

- des membranes de filtration qui traitent toutes sortes de fluides pour tous les secteurs industriels dont la biopharmacie, les biotechnologies, l'agroalimentaire, l'industrie chimique et la pétrochimie, le traitement des effluents nucléaires.
- des couches en zéolite constituant des cages très petites de 0.2 à 1nm pour piéger les particules et permettre de fractionner les gaz
- à la fonctionnalisation de surfaces conductrices (grille, poudres, ...) permettant la capture de polluants dans le traitement des effluents liquides ou gazeux.

3.2.3 Les freins et moteurs au développement des nanomatériaux

3.2.3.1 L'avis des industriels utilisateurs

Quatre grandes familles de freins et de moteurs ont été identifiées :

- Procédé (mélangeage, conditionnement des nanomatériaux, procédés de projection de nanopoudres, outils de production à adapter...)
- Sanitaires/Environnement (impact sur la santé, impact sur l'environnement, le transport, la manipulation par opérateur, ...)
- Economiques (respect du prix du produit final, comparabilité économique du produit final, coût d'enregistrement des nouveaux produits, ...)
- Juridiques (brevet, réglementation actuelle des produits finis, ...)

Ces freins et moteurs peuvent a priori agir aussi bien en faveur du développement des nanomatériaux que constituer des éléments de résistance à leur utilisation.

Une analyse croisée du nombre d'entreprises ayant cité ces thèmes permet d'illustrer :

- les familles à dominante « moteur » :
 - o les aspects économiques
 - o le processus de production et les implications techniques.
- les familles à dominante freins :
 - o les aspects juridiques et réglementaires
 - o les aspects sanitaires

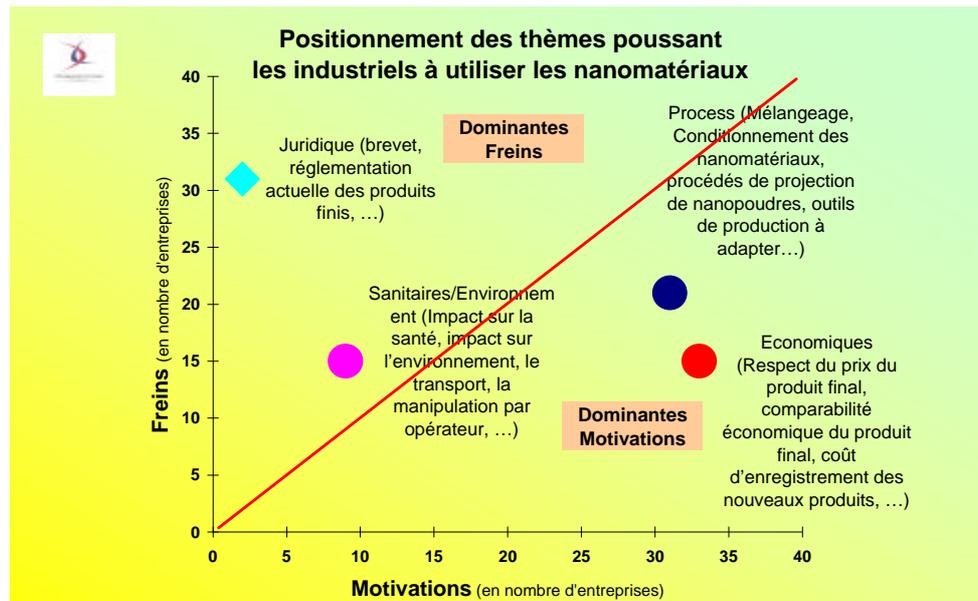


Figure 9 : Positionnement des thèmes poussant les industriels à utiliser les nanomatériaux

Les freins « juridiques » (brevet, réglementation actuelle des produits finis, ...).

Un ensemble de normes doivent être respectées afin de passer de l'existence à l'usage d'un nouveau matériau. Par exemple,

- dans l'aéronautique, la validation des technologies peut être très longue : nécessité de valider la fiabilité des pièces, les phases de qualification dans l'aéronautique sont très longues,
- dans le secteur de la chimie, les nanotubes de carbone semblent soulever les mêmes problématiques réglementaires que l'amiante.
- pour le textile médical, les cahiers des charges en phlébologie sont anciens. Ils spécifient un poids que doit respecter le produit plutôt qu'une résistance. Or si on fait des bas plus fins mais qui ont la même résistance que des bas plus épais, ils ne répondront pas au cahier des charges,
- dans le secteur médical, l'utilisation de nouveaux matériaux implique une validation clinique extrêmement lourde, que seule une grande structure peut soutenir.

Les freins « Sanitaires/Environnement » (Impact sur la santé, impact sur l'environnement, le transport, la manipulation par opérateur, ...)

Au delà de l'aspect réglementaire, les aspects sanitaires constituent un préalable indispensable. Par exemple, les problèmes liés à la manipulation, comme cela est le cas dans le secteur de la céramique ou de la construction et au transport des nanopoudres non fixées, sont considérés comme dangereux (poussière, besoin de protection pour les personnes qui manipulent). Pour le secteur cosmétique, les industriels doivent valider la compatibilité cutanée mais aussi régler les problèmes de manipulation de poudres extrêmement fines. Dans le secteur de l'énergie, la mise en œuvre des procédés sécurisés d'un point de vue environnemental et sanitaire est très longue, conduisant en particulier à des développements d'outils de métrologie, de filtration, de contrôle, de protection physique pour maîtriser la sûreté et la sécurité des installations.

3.2.3.2 L'avis des fabricants et des centres d'expertise

La compétence remontant des entretiens est particulièrement développée sur les aspects processus de production et conditions sanitaires.

Les axes de progrès par rapport au processus de production

Les laboratoires se concentrent en particulier sur les problématiques de mélangeage et de dispersion des nano-objets dans une matrice.

L'une des solutions envisagées pour résoudre les problèmes de dispersion des nanoparticules dans une matrice est de procéder à l'enrobage des particules nanométriques facilitant leur dispersion par modification de leurs propriétés de surface.

Une autre solution envisagée (et mise en œuvre au niveau industriel) est de développer des techniques d'exfoliation des nanocharges, ce qui nécessite une bonne compréhension rhéologique du système.

Au niveau de la production de masse, la difficulté reste la faible disponibilité des nanomatériaux.

Les axes de progrès vis-à-vis des problématiques sanitaires

Les risques toxicologiques des nanomatériaux soit sur l'homme (travailleur exposé) soit sur les écosystèmes ne sont pas étudiés systématiquement. Des travaux démarrent dans le cadre du programme national ECCO sur les risques toxicologiques et environnementaux. Cette problématique préoccupe les laboratoires et les fabricants qui se disent, pour certains, avoir les compétences pour y répondre. La quantité infinitésimale de nano particules utilisée apportent parfois une réponse directe à cette problématique sanitaire, par exemple :

- les particules magnétiques riches en oxyde de fer ne sont pas dangereuses. Elles sont non toxiques pour les cellules en manipulation in vitro. En outre les quantités utilisées sont faibles,
- les nanotubes sont utilisés en quantité infinitésimale. Leur encapsulation réduit fortement leur éventuelle nocivité.

Les axes de progrès vis-à-vis de la notion économique

Cette notion économique est plus abordée comme une contrainte plutôt que comme un frein. Tous les laboratoires et fabricants s'accordent à dire que les nanomatériaux impliquent un coût supplémentaire par rapport à l'existant. Toutefois, le prix au kilo n'est pas significatif. Il est nécessaire d'aborder le prix des nanomatériaux par une nouvelle approche qui est de corrélérer le prix à la fonction.

3.2.4 Conclusions intermédiaires : analyse des zones de convergence existantes ou à créer entre les attentes des industriels et les compétences scientifiques et techniques en France dans le domaine des nanomatériaux

Un des besoins récurrents évoqué par les laboratoires est la nécessité de collaborer avec les industriels pour comprendre leur besoin et ainsi aller plus loin dans l'élaboration ou la caractérisation des nanomatériaux. Cet échange serait également un moyen évident pour montrer les larges possibilités des nanomatériaux qui peuvent être utilisés pour des nouvelles fonctions et applications.

De leur côté, les industriels utilisateurs sont relativement ouverts aux contacts, si tant est que les laboratoires travaillent sur des problématiques les concernant directement.

La convergence des priorités sur l'amélioration des propriétés physico chimiques ayant un impact sur les produits finis de l'entreprise est relativement forte, les professionnels ressentant une utilité toujours annoncée comme forte sur la presque totalité des besoins d'amélioration des propriétés physico-chimiques annoncées des entreprises.

Le développement des nanomatériaux passe aujourd'hui par une recherche de compromis entre les différentes propriétés conduisant à ne pas dégrader les propriétés existantes tout en améliorant d'autres.

Les aspects non liés aux propriétés intrinsèques des matériaux font l'objet d'une relative convergence entre les acteurs de l'offre et ceux de la demande vis-à-vis des nanomatériaux.

Les laboratoires travaillent sur deux grandes thématiques importantes pour les industriels utilisateurs :

- le besoin d'intégration des contraintes du processus de production
- la prise en compte des aspects sanitaires et environnementaux

Par exemple, la prise en compte des problématiques du processus de production passe par :

- le mélangeage des nanopoudres
- la manipulation des nanocharges
- la disponibilité des produits par l'industrialisation des procédés de fabrication

L'aspect sanitaire est relativement transversal. Il est pris en compte soit par des laboratoires spécialisés mais aussi par l'intégration des risques toxicologiques lors des développements.

De part le caractère innovant des nanomatériaux, la problématique de prix est encore repoussée au second plan.

Les recherches sur l'industrialisation des procédés permettront à terme de faire baisser les prix par la production d'un volume significatif.

Les industriels semblent globalement avoir bien intégré les possibilités offertes par les nanomatériaux (sans toutefois intégrer l'ensemble des éléments liés aux innovations de rupture). En effet, les attentes face au développement de ces matériaux portent sur les besoins d'industrialisation et l'avantage économique qu'ils pourraient en tirer.

Ces deux motivations, industrialisation et avantage compétitif seront des moteurs forts pour le développement des nanomatériaux.

En revanche, les aspects juridiques et sanitaires devront faire l'objet d'une attention particulière étant avant tout ressentis comme des freins au développement des nanomatériaux.

3.3 Une prise en compte des travaux des laboratoires de recherche publics pour élargir les perspectives : l'enquête « descendante »

Cette partie matérialise, de façon non exhaustive, le passage potentiel de travaux des laboratoires vers la sphère industrielle (enquête « descendante »).

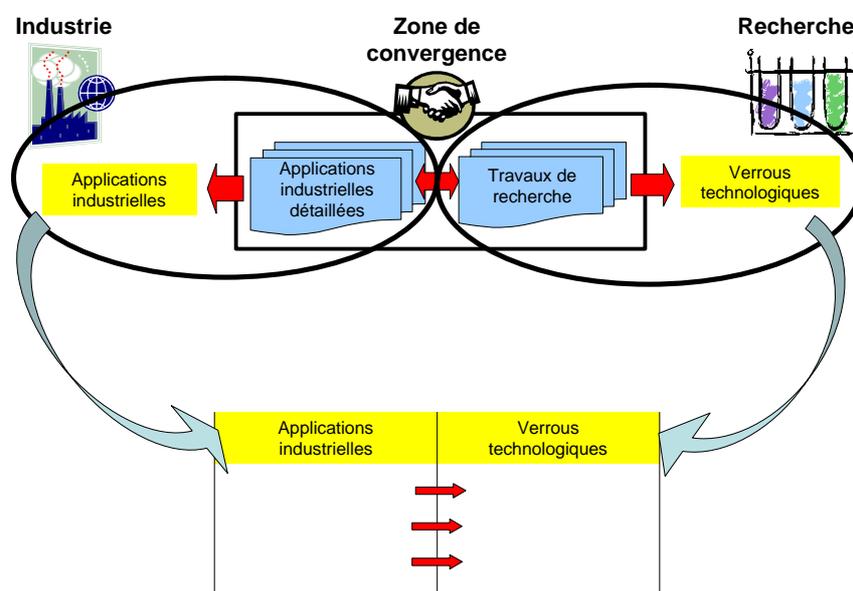


Figure 10 : Les applications et les verrous identifiés auprès des laboratoires de recherche publics

Les entretiens ont fait ressortir un ensemble de verrous liés aux applications cités par les laboratoires interrogés. Les verrous technologiques, identifiés également par les laboratoires, sont précisés dans le tableau suivant.

Tableau 8 : Synthèse des applications des nanomatériaux et verrous associés cités par les laboratoires de recherche publics lors des entretiens

Applications		Verrous
Revêtements (Vitrages intelligents : fonction autonettoyante, anti reflet)	→	Modélisation et maîtrise de l'auto organisation des nano objets pour l'optimisation des performances
Améliorer le spectre des propriétés des matériaux existants (Nanocomposites polyoléfinés à base de nanoparticules d'argile)	→	Fonctionnalisation des polyoléfinés, séparation des nanocharges (étape d'exfoliation), dispersion des nanocharges
Améliorer le spectre des propriétés des matériaux existants (les nanotubes de carbone)	→	Procédés d'élaboration à l'échelle industrielle pour augmenter la disponibilité des nanotubes et la reproductibilité des performances des nanotubes
Améliorer le spectre des propriétés des matériaux existants (nanocomposites organique/inorganique élaborés par chimie douce sol-gel ou complexation)	→	Contrôle de la structure du réseau inorganique et sa stabilité au cours du temps (problème inhérent à la mise en œuvre in situ de la phase inorganique), Validation de la durabilité de ces structures
Revêtements (Films céramiques nanostructurés ou nanocomposites élaborés par PVD et/ou CVD)	→	Capacité à élaborer des multicouches à l'échelle nanométrique en contrôlant parfaitement leur composition et leur texture ainsi que la rugosité des interfaces avec une excellente reproductibilité
Améliorer le spectre des propriétés des matériaux existants (Nanocomposites à matrice métallique et matrices polymères, renforcées par des nanotubes)	→	Compréhension et optimisation des mouvements de charges électriques (diffusion piégeage) dans les composites à nanotubes de façon à éviter la forte localisation de charges piégées pouvant être à l'origine des amorces de rupture
Filtration-Détection-Capture de polluants (utilisation des matériaux nanoporeux)	→	Procédés de synthèse (nanoparticules, matériaux massifs, couches), caractérisation
Filtration-Détection-Capture de polluants (utilisation des biocapteurs)	→	Préparation des matériaux (fixation des fonctions d'ancrage biologique, encapsulation, fonctionnalisation de surface) ; mise en forme
Catalyse (Nouveaux catalyseurs pour accroître le rendement, réduire les besoins énergiques)	→	Coûts de fabrication ; caractérisation et maîtrise des paramètres de stabilité et de durabilité
Catalyse (Matériaux catalytiques récupérables et recyclables)	→	" Procédé de synthèse (fixation d'espèces catalytiques organométalliques sur support organique, minéral (zéolite) ou sol-gel) ; étude et caractérisation pour obtenir les ligands appropriés

Les nanomatériaux en France :
besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics

Applications		Verrous
Catalyse (nouvelles réactions, sélectivité)	→	Modélisation (comprendre de façon détaillée les mécanismes des réactions catalytiques) ; concevoir, de manière rationnelle, de nouveaux catalyseurs plus spécifiques et plus actifs (passer notamment par la fonctionnalisation de surface)
Nouvelles sources d'énergie (Stockage d'hydrogène par membranes microporeuses à base de silice et nanopoudres en zircon)	→	Procédé de synthèse (manipulation des nanopoudres très réactives ; Contrôle et maîtrise des post-traitements thermiques associés à la génération de la microporosité)
Nouvelles sources d'énergie (Stockage d'hydrogène par nanocéramiques - obtenue par PECVD- et membranes polymère-plasma)	→	Procédé de synthèse (contrôle et maîtrise) ; caractérisation (durabilité, stabilité des matériaux)
Nouvelles sources d'énergie (Elaboration de cellules photovoltaïques par sensibilisation de particules de semi-conducteur nano-cristallines ; Elaboration d'un nouveau type de cellule solaire solide)	→	Procédé de synthèse (maîtrise de l'organisation de la structure ; optimisation)
Molécules fonctionnalisées pour le biomédical (immunocapteurs)	→	Fonctionnalisation biologique ; organisation contrôlée et stable des nano objets
Molécules fonctionnalisées (par exemple, les laboratoires sur puce, biocapteurs)	→	préparation des matériaux (fixation des fonctions d'ancrage biologique, l'encapsulation, la fonctionnalisation de surface) ; associations spatialement contrôlés de nanoparticules paramagnétiques et de biomolécules
Métallurgie (mise en forme de matériaux)	→	Procédé de synthèse et compréhension (Méconnaissance des mécanismes qui vont gérer la plasticité et la difficulté de maîtriser le phénomène)
Actionneurs (films piézoélectriques, clusters magnétiques)	→	Procédés de synthèse (dépôt des clusters magnétiques devant combiner grande densité et bonne isolation entre chaque clusters) ; Caractérisation, modélisation (compréhension des paramètres notamment de compatibilité chimique et homogénéité des nanomatériaux)
Actionneurs (molécules « nano robots »)	→	Compréhension et maîtrise des phénomènes à exploiter
Ecrans d'affichages	→	Procédés de synthèse (coûts et capacités)
Stockage de l'information (MRAM)	→	Procédés de synthèse (coûts)
Stockage d'information (mémoires ferromagnétiques, stockage d'information 3D tout optique)	→	Procédés de synthèse ; caractérisation, modélisation (comportement des nanostructures magnétiques mal maîtrisé, Incompatibilité avec les semi conducteur classiques quant au transport des électrons)

*Les nanomatériaux en France :
besoins des industriels et savoir faire des laboratoires de recherche publics*

Applications		Verrous
Stockage d'information (utilisation des plasmons de surface)	→	Maîtriser ; durée de vie du plasmon ; matériel d'élaboration cher
Nouveaux matériaux semi conducteurs pour l'électronique	→	Procédés de synthèse (maîtrise, reproductibilité) ; caractérisation, modélisation (compréhension des phénomènes impliqués)
Electronique de spin appliquée aux semi-conducteurs	→	Compréhension des matériaux semi conducteurs ferromagnétiques très incomplète, et de nombreuses questions sont ouvertes sur le plan théorique et expérimental
Sources optiques (sources simples)	→	Procédés de synthèse (coûts)
Sources optiques (cryptographie)	→	Procédés de synthèse (fabrication de boîtes quantiques à l'échelle du laboratoire mais pas à l'échelle industrielle)
Optoélectronique (traitement de l'information tout optique)	→	Compréhension et maîtrise des propriétés optiques des matériaux ; Procédés de synthèse des nanomatériaux et d'élaboration des couches minces ; modélisation et chimie
Sources optiques (lasers moléculaires TISB)	→	"Contrôle des mécanismes d'autoformation des boîtes quantiques ; réaliser les boîtes en plusieurs séquences de composition, température"
Autres systèmes optiques (optiques nanométriques)	→	Maîtrise des procédés de densification des nanomatériaux
Autres systèmes optiques (photonique et utilisation des plasmons de surface)	→	Recherches amont (compréhension, maîtrise)

La mise en perspective de ces citations de laboratoires publics sur les applications des nanomatériaux, associées à leurs verrous technologiques, permet d'élargir les thématiques pouvant profiter aux industriels par le biais d'un travail collaboratif avec les laboratoires.

4 Recommandations

Trois étapes ont permis d'orienter les recommandations de propositions d'actions sur le développement des nanomatériaux. Ces trois étapes reposent sur :

- 1- La détermination des thématiques les plus à même de stimuler le développement des nanomatériaux et leur qualification par des exemples remontant des industriels.
- 2- L'identification des enjeux transversaux au développement des nanomatériaux.
- 3- Les objectifs de soutien de la filière nanomatériaux par les politiques publiques répondant aux attentes des industriels et des laboratoires de recherche, orientant les propositions d'actions.

Ces objectifs ont fait l'objet d'une première déclinaison opérationnelle afin de favoriser le développement des nanomatériaux en France.

4.1 La détermination des thématiques en faveur du développement des nanomatériaux

Une synthèse de toutes les analyses menées au cours de l'étude s'est traduite par l'élaboration de fiches thématiques. Le regroupement en 9 fiches thématiques s'appuie sur une grande diversité des usages des nanomatériaux.

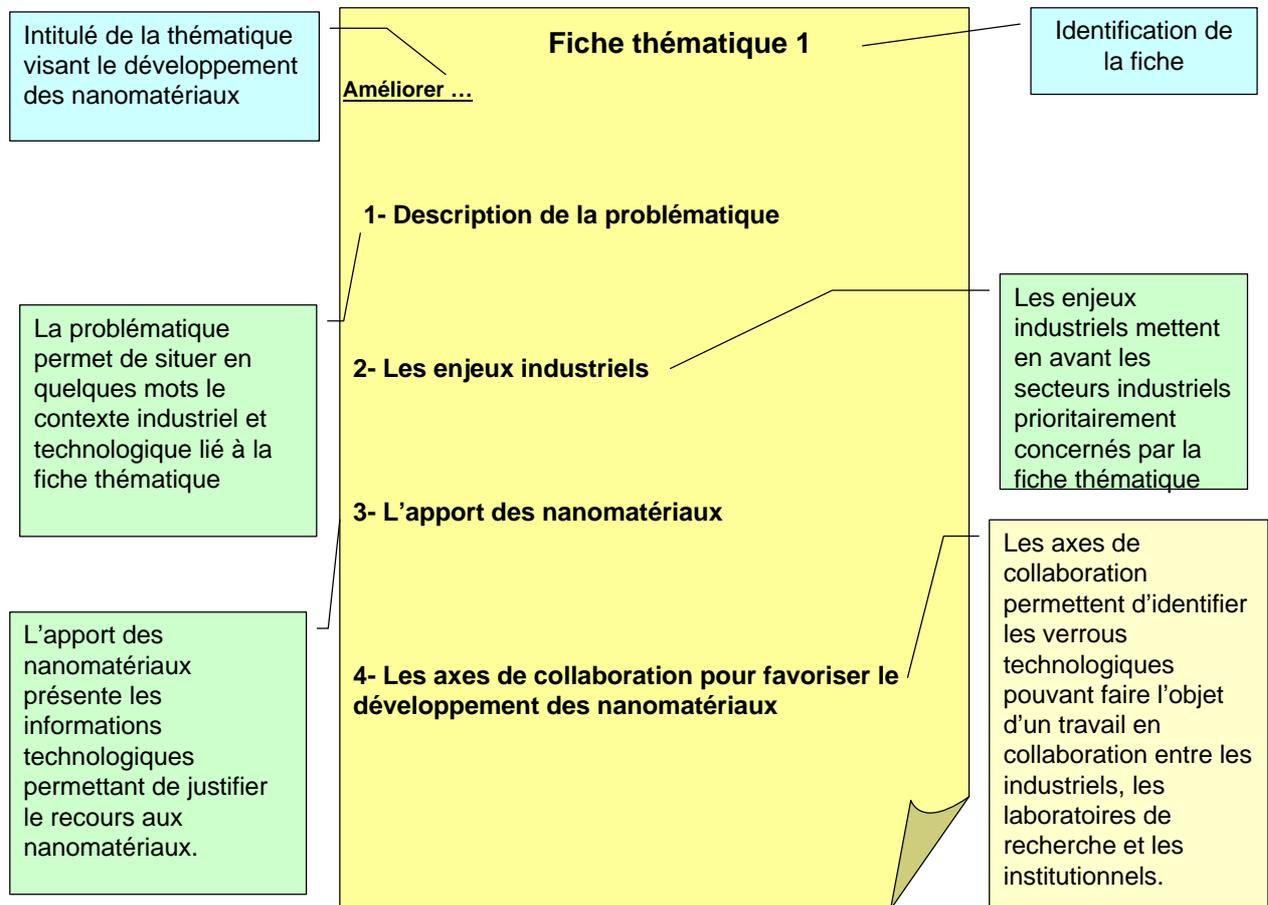
La synthèse en 9 fiches repose sur le traitement de nombreux avis d'interlocuteurs de la filière nano-matériaux : une centaine d'industriels et 70 laboratoires de recherche publics. Les 9 fiches ont été ensuite enrichies à partir d'avis d'industriels français de dimension internationale fortement impliqués sur la thématique.

Les fiches thématiques associent donc, sur une problématique commune, plusieurs secteurs industriels et plusieurs axes de recherche. Elles ne doivent toutefois pas exclure d'autres sujets intéressants pour le développement des nanomatériaux. En effet, le caractère émergent des nanomatériaux s'accompagne d'une évolution rapide des enjeux technologiques et économiques.

Trois familles de fiches sont présentées :

- Fiche 1 : fiche illustrant l'apport des nanomatériaux pour l'amélioration des propriétés des matériaux existants (besoins transversaux à tous les industriels). L'apport des nanomatériaux est souvent incrémental.
- Fiches 2 à 7 : fiches associant l'apport des nanomatériaux à des domaines d'application spécifiques. L'apport des nanomatériaux peut introduire une rupture technologique.
- Fiches 8 et 9 : fiches portant sur les nanomatériaux en tant qu'une des composantes d'un apport plus global des nanotechnologies (TIC et Santé, ces secteurs n'étant pas pris en compte dans le cahier des charges de l'étude, ils ont été ajoutés lors du déroulement pour apporter un éclairage, de ce fait, très partiel)

Le contenu des fiches thématiques



Les fiches présentées sont les suivantes :

Fiche thématique 1 : Améliorer le spectre des propriétés des matériaux existants

Fiche thématique 2 : La catalyse

Fiche thématique 3 : Les dispositifs d'affichage

Fiche thématique 4 : Filtration-Détection-Capture de polluants

Fiche thématique 5 : Les nouvelles sources d'énergie

Fiche thématique 6 : Les matériaux métalliques et les alliages

Fiche thématique 7 : L'optique

Fiche thématique 8^(*) : Les molécules fonctionnalisées pour la santé

Fiche thématique 9^(*) : L'électronique

(*): éclairage partiel

4.1.1 Fiche thématique 1 : Améliorer le spectre des propriétés des matériaux existants

1- Description de la problématique

La demande d'amélioration des propriétés des matériaux existants est une demande récurrente de la part des industriels, quel que soit leur domaine d'activité.

Face à cette demande, il est possible de :

- renforcer des matériaux classiques en leur incorporant des nanoparticules ayant des propriétés particulières et déterminées (cela suppose de maîtriser l'organisation des nanoparticules à l'échelle des nanomatériaux),
- modifier les surfaces en déposant une couche de matériaux nanoparticulaire ou nanostructurée,
- modifier des formulations pour les liquides (peintures et vernis) en leur incorporant des nanomatériaux.

2- Les enjeux industriels

Les propriétés que les industriels souhaitent le plus souvent améliorer concernent, les propriétés mécaniques, chimiques, thermiques, électriques ou optiques.

De part son rôle en amont des applications, le secteur de la Chimie est directement concerné par la thématique.

La plupart des secteurs industriels sont concernés et pourraient être associés à cette thématique.

Au-delà de cet intérêt général, il existe un fort enjeu dans de multiples secteurs, dont :

1. L'automobile où l'amélioration des matériaux utilisés aura un impact sur l'allègement, le développement de moteurs à haut rendement (réduction de la consommation), la diminution des frictions, les propriétés barrières aux hydrocarbures (environnement), l'augmentation de la sécurité (résistance aux chocs, renforts, réduction de l'impact au choc piéton) et enfin sur la fiabilité et la qualité (abrasion, aspect). En terme industriel, l'industrie automobile en France emploie un total de 277 000 salariés. Avec plus de 5,6 millions de véhicules, la France représente 10% de la production automobile mondiale, près de 70% de la production étant exporté. Environ 2 milliards d'euros sont dépensés chaque année en R&D.

2. L'aéronautique où l'enjeu est de pouvoir utiliser des matériaux combinant toujours mieux légèreté et résistance : toute la compétitivité aéronautique se joue sur cet aspect poids / qualité. L'industrie aéronautique et spatiale est structurée autour du pôle EADS. L'Europe se situe globalement comme le deuxième constructeur mondial d'avions civils, impliquant 112 entreprises en France pour un effectif de 85 000 salariés, dont des sous traitants disposant d'un savoir faire reconnu au niveau international.

3. Les matériaux pour l'outillage de production où l'impact sera la réduction des coûts des chaînes de production (par moins de maintenance ou de réparation, moins de consommation de lubrifiant...). Cette activité est intégrée dans le domaine plus vaste de la métallurgie, représentant environ 362 000 salariés.

4. Le textile où face à une concurrence bon marché et de qualité médiocre, l'enjeu est d'apporter plus de technicité aux vêtements (caractère anti-odeur, anti-transpiration, intégration d'objets communicants, ...). Les mutations de l'industrie textile au niveau international engagées depuis près de 30 ans conduisent à concentrer sur le territoire national des entreprises s'orientant vers les articles novateurs, dont les textiles techniques. Le secteur textile en France emploie 98 000 salariés dans près de 1 300 entreprises.

5 L'emballage (avec une dépense annuelle de 300-400 € par habitant) pour lequel la demande concerne l'allègement pour une réduction des déchets, les matériaux fonctionnels (bactériostatique), la sécurité et la traçabilité. Les attentes des industriels sont larges avec des problématiques aussi diverses que l'étanchéité, le toucher, les aspects sensoriels, les propriétés barrières ou encore les propriétés de surfaces.

6 Les revêtements (peinture, vernis) avec un fort développement de bases aqueuses sans solvants (plus respectueux de l'environnement) et une demande de réduction d'épaisseur, d'augmentation de la valeur d'usage (durabilité, abrasion). Les nanoparticules contribuent très fortement à ce secteur (silices, oxydes métalliques). Citons par exemple la filière bois qui demande des vernis de très haute performance pour garantir la durabilité en extérieur.

7 L'industrie pneumatique qui vise à améliorer l'adhérence et la barrière au gaz (sécurité), à diminuer la résistance au roulement (environnement). L'industrie pneumatique en France est au premier rang mondial. Les silices nanométriques haute dispersion contribuent à ce secteur de façon déterminante.

8 L'hygiène et la beauté par le développement de nanoparticules fonctionnelles (par exemple absorbeur UV, transparent dans le visible), de modifiant rhéologiques, de fonction bactériostatique (sécurité-santé). La France est au premier rang mondial dans ce secteur.

Au niveau international, les Etats-Unis semblent disposer des produits commerciaux les plus avancés. Le Japon est de même concerné ; les matériaux renforcés viennent en troisième position des thèmes les plus financés, derrière l'électronique moléculaire et les microsystèmes. Mais dans le détail, ce sont les nanotubes de carbone et les fullerènes qui constituent un axe de développement fort pour la réalisation de matériaux composites.

Les industriels estiment que le volume mondial de nanocomposites sera de l'ordre de 900 000 tonnes à l'horizon 2009 contre un tonnage de quelques milliers de tonnes en 2003. Sur ce thème, de nombreux colloques, conférences internationales, réseaux ont vu le jour depuis quelques années. A noter que le temps moyen de développement de matériaux nouveaux est en général de l'ordre de 5 ans minimum et de 10 ans en règle générale car la chaîne de valeur (du matériau jusqu'à l'application finale) est complexe et fait intervenir un très grand nombre d'acteurs qui ont chacun leur délai de réaction propre (3 à 5 ans pour l'automobile).

3- L'apport des nanomatériaux

Deux grands types de nanomatériaux peuvent répondre à la demande des industriels :

- les nanocomposites à matrices polymères, métalliques ou céramiques,
- les revêtements nanostructurés,
- les matériaux nanostructurés.

Il faut noter aussi l'usage des nanomatériaux pour des applications de type peinture, vernis, cosmétiques conduisant à valoriser des propriétés spécifiques (résistance, effet barrière, propriétés conductrices, ...) par ajout au sein d'une matrice liquide ou pâteuse.

a) Les nanocomposites à matrices polymères, métalliques ou céramiques

Il est possible de renforcer des matériaux classiques grâce à des nanoparticules ayant des propriétés particulières et déterminées. Dans les nanocomposites, les nanoparticules sont incorporées ou produites dans une matrice pour apporter une nouvelle fonctionnalité ou modifier des propriétés mécaniques, optiques, magnétiques ou thermiques.

De nombreux travaux sont réalisés autour des nanocomposites à matrices polymères, métalliques ou céramiques renforcés par des nanocharges minérales, fibreuses ou plaquettaires, siliceuses, argileuses

(Montmorillonite, argile la plus utilisée) ou organiques (whiskers de cellulose), voire des nanotubes de carbone. Les argiles sont des structures stables courantes. Pour leur part, les nanotubes (comme les fullerènes) ont une production de volume encore difficile à maîtriser. La valorisation des sources renouvelables, les whiskers de cellulose en particulier, ont fait l'objet de développements industriels ces dernières années. En revanche, les retombées industrielles restent encore limitées (principalement du fait d'une sensibilité à l'eau limitant les usages).

Plus spécifiquement sur les applications polymères, l'imperméabilité aux gaz et l'ignifugation des matrices polymères sont des axes forts et transversaux pour lesquels les nanomatériaux pourraient apporter des solutions.

Les propriétés des nanocomposites dépendent de celles des nanoparticules comme par exemple :

- Les nanotubes de carbone qui proposent une combinaison de plusieurs propriétés physiques : conduction thermique, conduction électrique mais aussi légèreté, résistance mécanique, absorption optique, propriétés piezoélectriques.
- Des minéraux lamellaires synthétiques, une alternative aux Montmorillonites d'origines naturelles, qui garantissent pureté et constance de qualité.
- Les poudres d'oxydes simples et mixtes et les poudres métalliques (Fe, Ni, Co, Al)
- Des silices nanométriques haute dispersion, déjà largement utilisées à l'échelle industrielle pour le renforcement des caoutchoucs.
- Les nanofils polymères conducteurs qui permettent une amélioration des propriétés mécaniques et de la résistance au cisaillement.
- Les nanoparticules fonctionnelles minérales d'oxydes métalliques (Ti,Ce) en tant qu'absorbants UV et charges de renforcement pour la résistance à l'abrasion.
- Les nanofils et nanocâbles coaxiaux à base de bore et de silicium qui offrent une inertie chimique améliorée, ce qui permet d'envisager des applications en conditions extrêmes ou encore d'assurer une bonne reproductibilité et une plus grande durée de vie des matériaux élaborés.
- Des précurseurs nanométriques pour l'élaboration de matériaux mésoporeux (par exemple support de catalyse), de haute surface spécifique et de stabilité thermique suffisante dans des conditions d'utilisation.

b) Les revêtements nanostructurés

La réalisation d'un revêtement à partir de nanocouches élémentaires ou de multi nanocouches 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,
- de dureté,
- d'adhérence ou de glissement (tribologie),
- de résistance à la corrosion,
- de propriétés optiques.

Les revêtements nanostructurés peuvent apporter de nouvelles fonctionnalités (exemple : les vitrages intelligents) ou améliorer des propriétés physiques de matériaux classiques (exemple : les revêtements pour améliorer les propriétés mécaniques et la résistance à la corrosion de pièces structurales).

Des perspectives intéressantes se présentent pour les nanostructures utilisées en couches minces en particulier les couches élaborées par voie sol gel. De telles couches existent déjà pour apporter des fonctions nouvelles de type autonettoyantes, coloration de surface, dureté, tribologie,.... Les nanocomposites peuvent être obtenus sous forme de couches minces multi-fonctionnelles.

De nombreux travaux sont consacrés aux propriétés optiques des nanomatériaux. L'objectif est d'analyser les propriétés optiques des films minces, de comprendre comment se forment les films minces et quelles sont leurs potentialités.

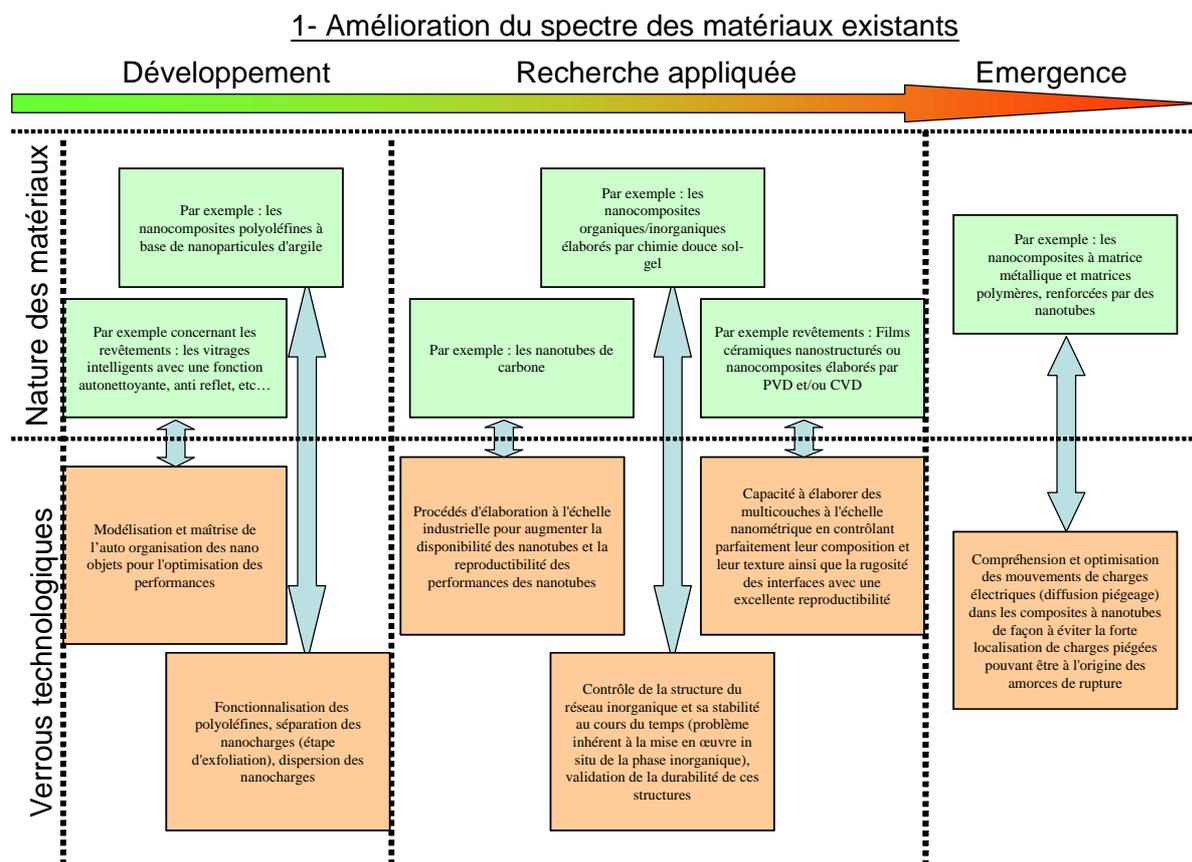
Parallèlement, des travaux sur les outils de coupes sont en cours. La caractéristique majeure des couches minces est non seulement la résistance à l'usure mais encore la résistance à la corrosion. Ces propriétés d'usage rendent ces matériaux particulièrement intéressants pour des applications mécaniques en conditions sévères, telles que l'usinage.

c) Les matériaux nanostructurés

La structuration à l'échelle nanométrique des matériaux, comme les céramiques, leur confère des propriétés ductiles et tenaces voire superplastiques.

Tolérants aux défauts de fabrication et résistants aux chocs thermiques, ils seront utilisés par exemple dans la réalisation de moteurs thermiques à haut rendement, très économes en carburant et favorisant une combustion complète, limitant ainsi les rejets de polluants.

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à court terme :

a) Les axes concernant les nanocomposites

Les travaux relatifs aux verrous technologiques à lever avant un transfert industriel concernent principalement les procédés de fabrication des nanocomposites. Il s'agit d'une part, de résoudre des problèmes techniques liés à :

- la production de nanoparticules avec un degré de pureté chimique, une concentration et une stabilité requise par les applications (verrous technologiques sur les procédés),
- la dispersion des nanoparticules ou nanotubes de carbone dans une matrice pour permettre la pleine expression des propriétés recherchées à l'échelle macroscopique,
- l'exfoliation des nanoparticules lamellaires avant ou pendant l'intégration dans la matrice,

Et d'autre part, des problématiques économiques liées à :

- la réduction des coûts de fabrication,
- l'augmentation de la capacité de production (procédés permettant des quantités industrielles).

b) Les axes concernant les revêtements

Les travaux de recherche à poursuivre concernent principalement :

- l'industrialisation des procédés de dépôts,
- la capacité à élaborer des couches minces à l'échelle nanométrique en conservant les propriétés finales attendues.

La technique sol gel est en développement dans la réalisation de revêtements mais est encore loin d'atteindre ce qui est réalisé par les techniques plasmas en continu (dépôts métalliques, dépôts sur outils, vitrages athermiques, fonctionnalisation avant collage...).

c) Les axes concernant les matériaux nanostructurés

Les travaux concernent essentiellement le contrôle de la nanostructure pour les différents procédés et sa stabilité dans les conditions d'usage.

Plus généralement:

Si de nombreux efforts sont portés vers la recherche, les industriels de la chimie proposent encore une offre commerciale représentant des volumes limités.

L'un des verrous récurrent est d'aboutir à une solution technologiquement et économiquement concurrentielle, permettant à terme des volumes compatibles avec des processus industriels fortement capitalistiques. Les travaux doivent idéalement associer des industriels de la chimie, des transformateurs, des secteurs utilisateurs et des laboratoires de recherche.

L'identification et la sélection des applications sont des facteurs déterminants pour l'implication des industriels. Une sélection rigoureuse doit être effectuée par le croisement de critères technologiques, d'usage, de marché adressable et d'identification des barrières spécifiques éventuelles comme les aspects environnementaux, la santé et la sécurité.

La solution devrait venir de coopérations de recherche, intégrant le triptyque : élaboration - caractérisation - propriétés d'usage.

Trois verrous principaux sont à lever pour le passage vers l'industrie :

- Coût compatible avec un usage industriel,
- Reproductibilité des processus et maîtrise des procédés,
- Maîtrise des propriétés.

Par ailleurs, les industriels interrogés estiment qu'il est indispensable d'organiser plus de coopération dans la filière des nanocomposites, entre :

- les fournisseurs de matière première,
- les formulateurs,
- les transformateurs,
- les fournisseurs de procédés,
- les utilisateurs finaux.

Il serait souhaitable d'enclencher une action de diffusion de l'information par secteur industriel, ceci afin de faciliter la pénétration des nanomatériaux.

Pour la problématique des revêtements nanostructurés, des collaborations sont envisageables faisant intervenir différents acteurs spécialistes par exemple :

- des procédés (sol gel, les dépôts métalliques minces...),
- de la tribologie,
- des couches fonctionnelles.

4.1.2 Fiche thématique 2 : La catalyse

1- Description de la problématique

La catalyse est une action par laquelle une substance accélère une réaction chimique par sa seule présence, en se retrouvant intacte à l'issue de celle-ci. Cette substance, appelée catalyseur, est utilisée en très petite quantité par rapport aux produits réactifs en présence.

L'association provisoire du catalyseur avec les réactifs permet un abaissement de l'énergie nécessaire à la réaction. Le catalyseur offre aux réactifs en jeu un parcours énergétique simplifié ou diminué, donc plus économique, tout en garantissant le même résultat final.

Il existe une très grande variété de catalyseurs, chacun adapté à la réaction souhaitée. Selon qu'ils sont solubles ou non dans le milieu réactionnel en jeu, on parle de catalyse homogène ou de catalyse hétérogène. Du point de vue industriel, les catalyseurs hétérogènes mis en oeuvre sont les plus employés car ils présentent de nombreux sites qui sont activés de nombreuses fois de façon consécutive et sont plus facilement récupérables. La catalyse hétérogène concerne la science des matériaux, et plus particulièrement les nanomatériaux, la science des surfaces et des interfaces.

Pour être performants, les catalyseurs doivent être actifs et sélectifs afin de tendre vers zéro déchet et respecter l'environnement.

2- Les enjeux industriels de la catalyse

En catalyse, les nanomatériaux sont déjà très largement développés, d'abord pour l'industrie pétrolière ou pétrochimique, puis pour les applications catalytiques courantes comme les pots catalytiques des véhicules à moteur, les réacteurs d'hydrodésulfuration, d'hydrogénation ou de déshydrogénation en phase gazeuse ainsi que les réacteurs d'oxydation ménagée ou totale des hydrocarbures.

Les enjeux économiques et environnementaux sont considérables et transversaux aux activités industrielles, les procédés catalytiques étant majoritairement utilisés dans l'industrie.

L'industrie Chimique en France, hors pharmacie et cosmétique, emploie environ 126 000 personnes au sein de 666 entreprises. Le bon positionnement de l'industrie chimique française au niveau international, 5^{ème} position mondiale, tient avant tout à la rapidité d'adaptation des outils de production par les industriels.

En plus de l'industrie pétrolière et chimique, l'utilisation des nanomatériaux catalytiques concernent d'ores et déjà l'énergie, la transformation de polluants tels les composants organiques volatiles (COV) dans des cheminées et la post-combustion catalytique des véhicules à gaz, diesel ou à essence.

3- L'apport des nanomatériaux dans la catalyse

Les catalyseurs nanostructurés, à grande porosité, comme les oxydes mésoporeux à agents structurant tensioactifs, présentent une très grande surface d'échange.

Ces catalyseurs permettent également de favoriser des réactions nouvelles. Indirectement, grâce à l'utilisation de ces catalyseurs, il est possible de créer des matériaux nanostructurés dont la structure et les propriétés mécaniques seront parfaitement contrôlées.

Les recherches actuelles concernant les nanomatériaux dans le domaine de la catalyse visent à :

- développer de nouveaux catalyseurs non « empoisonnables » et peu coûteux,
- développer des supports de catalyseurs,

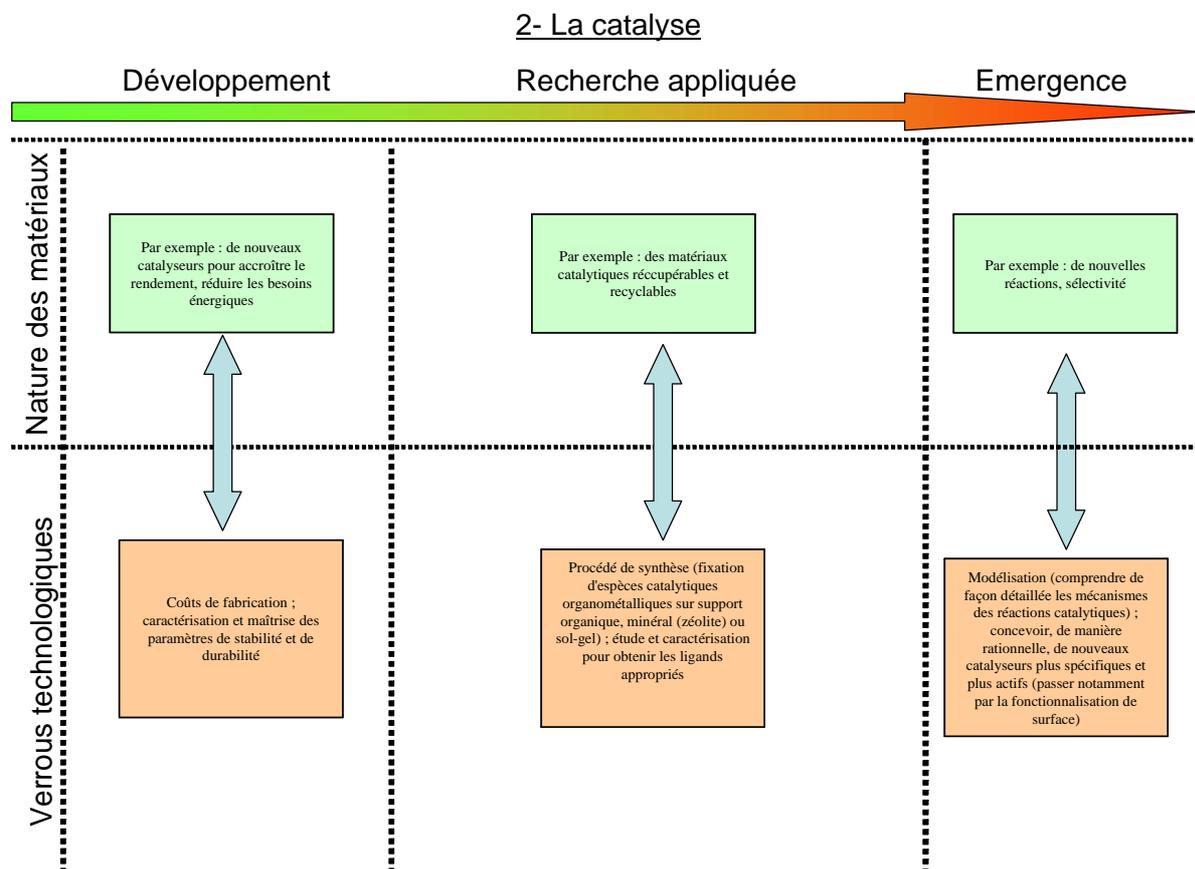
- améliorer la préparation contrôlée de matériaux catalytiques,
- favoriser leur caractérisation physico-chimique,
- comprendre les mécanismes réactionnels.

Le besoin d'améliorer la réactivité et la sélectivité se traduit par des recherches sur des catalyseurs nanométriques obtenus à partir de nanopoudres de différentes natures, en particulier les nanoparticules métalliques. Une utilisation de plus en plus fréquente des nanomatériaux/nanostructures en catalyse est aussi liée, de la même manière qu'en filtration, à un souci d'accroître la sélectivité.

L'augmentation de la performance des réactions catalytiques passe également par une baisse de la température de réaction.

Plus marginalement, d'autres nanomatériaux que les nanoparticules trouvent leurs applications dans le domaine de la catalyse comme par exemple les nanocomposites, les nanoplots autoorganisés ou encore les nanotubes de carbone.

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à court terme :

Deux constantes agissent sur le développement de l'usage des nanomatériaux en catalyse, souvent associées à la température (fonctionnement à « froid ») et à la sélectivité (action sur des espèces chimiques déterminées) :

- la perte de surface initiale, souvent constatée après une hausse de température,
- la maîtrise de la dispersion des nanoparticules au sein des catalyseurs.

Les collaborations entre les industriels et les laboratoires ont pour objectifs de :

- *Démontrer l'intérêt industriel des procédés*

Cette démonstration intègre des critères économiques, technologiques et d'intérêt industriel sur les usages.

Il est nécessaire par exemple de vérifier les performances supplémentaires, de valider une durée de vie compatible avec les usages et de stabiliser les éléments nanométriques dans les matériaux pendant usage et après vieillissement (recyclabilité et pollution).

- *Améliorer les procédés de fabrication*

Une offre commerciale existe déjà concernant des nanopoudres céramiques et métalliques appliquées à la catalyse. Toutefois, des travaux de développement sont à mettre en oeuvre pour améliorer les procédés de fabrication des nanopoudres et réduire les coûts de fabrication.

Ces progrès dans l'élaboration et la mise en oeuvre des nanopoudres pour la catalyse resteront vains si aucun effort n'est fait dans le développement des outils de caractérisation à l'échelle atomique et moléculaire des matériaux et des intermédiaires réactionnels.

- *Caractériser les nanomatériaux utilisés en catalyse*

De nombreux progrès restent à faire concernant la durée de vie et la réactivité des nanomatériaux pour la catalyse. L'application conjointe de plusieurs méthodes physiques devrait permettre d'améliorer la sélectivité en composition et forme/morphologies des nano-objets pour la catalyse.

Il semble également nécessaire de valider la durabilité et de contrôler le vieillissement des structures nanométriques et en particulier pour les nanocomposites organiques/inorganiques élaborés par chimie douce (pour lesquels il faut aussi tenir compte des problèmes de coût et de productivité à maîtriser).

4.1.3 Fiche thématique 3 : Les dispositifs d'affichage

1- Description de la problématique

Le domaine de l'affichage connaît ces dernières années de profondes évolutions en particulier avec l'apparition des écrans plats venant de plus en plus se substituer aux écrans cathodiques. Les objectifs principaux assignés aux écrans plats sont de réduire les coûts, accroître les performances et innover avec la mise au point d'écrans souples si l'usage le justifie ou sur tous supports adaptés (écrans imprimés).

Différentes technologies (LCD principalement et Plasma) se sont développées pour répondre à deux préoccupations principales :

- les affichages nomades, souvent associés à une dimension modeste,
- les écrans pour les utilisations collectives ou grand public.

Les axes de développement sont déjà largement identifiés et poursuivis :

1. Réalisation d'écrans souples et tactiles très haute définition de toutes tailles (du cinéma à la téléphonie) et de toutes formes.

La souplesse de l'écran le rend moins fragile, plus résistant à un usage mobile ou mieux adapté à l'affichage en grand format pour lequel sa légèreté est un atout. La souplesse de l'écran lui permettra de s'enrouler et des formats de tailles confortables pourront être proposés même pour de petits produits comme la téléphonie et les assistants personnels.

2. Optimisation des luminophores utilisés dans les écrans plasma en vue de réduire le coût et accroître les performances.

La technologie des panneaux à plasma est l'une des voies pour la réalisation de dispositifs d'affichages plats, de plus grande dimension avec un angle de vision important. Ce dernier point constitue un avantage par rapport au LCD (utilisant des cristaux liquides). Dans les panneaux à plasma, l'adressage de chaque point de l'écran est effectué matriciellement et non plus par une technique de balayage. Le confort visuel est ainsi amélioré. Le développement de ces dispositifs exige la mise au point de nouveaux matériaux luminophores performants et/ou l'amélioration des performances des luminophores déjà utilisées par les autres technologies (CRT, FED). Les luminophores utilisés dans les prototypes sont des matériaux mis au point pour les tubes à rayons cathodiques. Leurs propriétés ne sont pas complètement adaptées (brillance trop faible, dégradation d'image due au vieillissement prématuré, rémanence trop importante due au déclin de fluorescence trop long).

Il est impératif dans ce domaine d'innover et de trouver de nouveaux matériaux qui présentent un rendement de fluorescence élevé sous excitation par des rayonnements situés dans l'ultraviolet sous vide, une stabilité chimique vis-à-vis de cette excitation, enfin un temps de vie de la fluorescence très court.

2- Les enjeux industriels

L'application des nanomatériaux aux écrans plats est certainement l'une des plus abouties.

Les écrans plasma à luminophores nanométriques sont d'ores et déjà à l'ordre du jour. Des sociétés françaises produisent aujourd'hui des écrans à une échelle pratiquement industrielle par une technologie originale de nouveaux types de luminophores nanodispersés.

Le secteur directement concerné est celui des industries des technologies de l'information et de la communication (TIC).

Les TIC sont un secteur économique particulièrement dynamique, avec un taux de croissance de près de 10 à 11% par an pour les équipements. Les technologies de l'information et la communication représentent près de 290 000 emplois industriels en France.

3- L'apport des nanomatériaux

L'utilisation de grains de tailles nanométriques peut conduire à augmenter la définition de nouveaux dispositifs de visualisation.

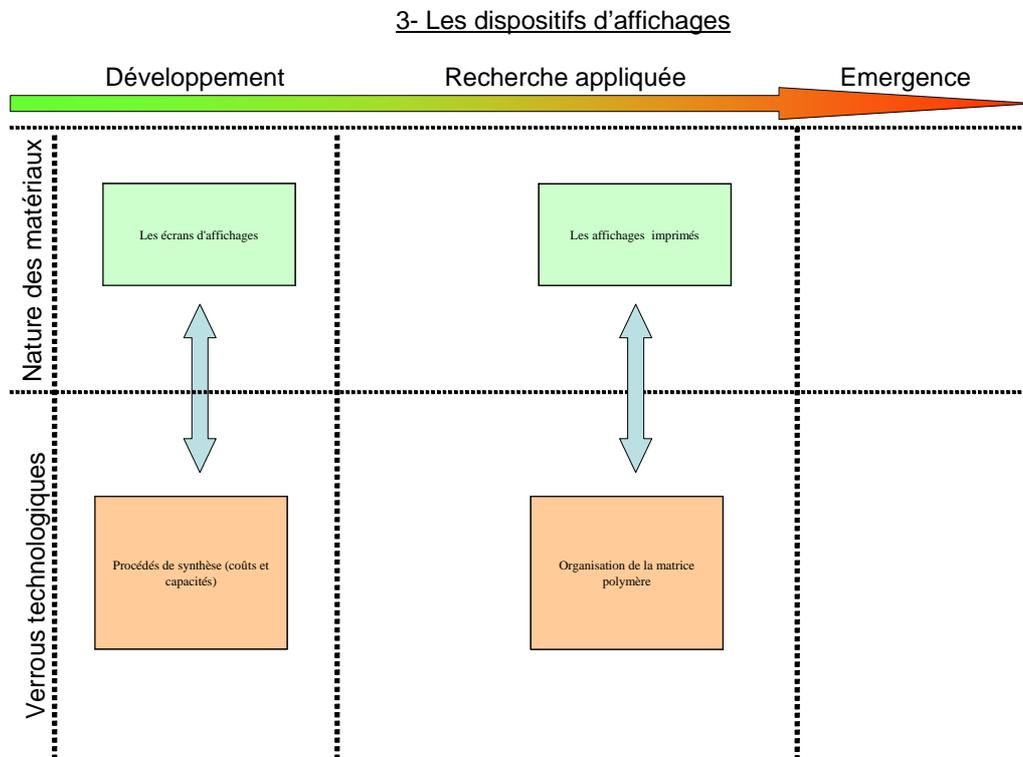
Les nanotubes de carbone sont utilisés pour la réalisation d'écrans souples et tactiles de très haute définition.

Les nanotubes peuvent être utilisés comme émetteurs d'électrons. Les électrons ainsi émis excitent les luminophores déposés à la surface d'un écran. L'avantage d'utiliser ce type d'émetteur (dit froid) est de réduire la consommation d'énergie.

En ce qui concerne les écrans souples, une des voies prometteuses est celle de l'encre électronique, où des nanoparticules sont encapsulées avec un fluide porteur dans un polymère. Par action d'un champ électrique, on déplace ces particules dans le champ de vision, ce qui permet d'avoir une fonction d'affichage, par exemple si l'on utilise deux types de particules de charges opposées et de couleurs différentes. Les particules doivent être nanométriques afin d'éviter leur sédimentation (dans ce cas, les forces du mouvement brownien sont plus fortes que la force de la pesanteur).

Concernant les écrans à plasma, l'utilisation de nano particules luminescentes permet de réduire les coûts. En effet, l'efficacité lumineuse des luminophores nanométriques est comparable à celle des luminophores classiques malgré une taille réduite ; ainsi, des performances équivalentes sont obtenues avec une moindre quantité de luminophores.

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à court terme :

Les derniers écueils (en cours de franchissement) à la généralisation de la technologie des écrans plasma à luminophores nanométriques concernent la mise en œuvre de procédés industriels ayant une capacité de production à grande échelle. Des développements sont toutefois nécessaires pour optimiser ces procédés de fabrication et réduire les coûts de production.

Les technologies d'impression "jet d'encre" envisagées, à base de matrices polymères conductrices (technologie issue de l'électronique), devraient permettre à terme la réalisation de dispositifs d'affichages sur des supports variés.

4.1.4 Fiche thématique 4 : Filtration-Détection-Capture de polluants

Conceptuellement, le recours aux nanomatériaux appliqués à la technologie de séparation ou de purification représente beaucoup d'avantages, notamment pour la réduction d'échelle des installations industrielles et pour certaines économies de produits chimiques ajoutés pour les traitements. Dans la pratique, les acteurs de la filtration manquent encore de données sur le temps nécessaire permettant de lever les verrous d'un transfert vers l'industrie à coûts compétitifs. La voie la plus pragmatique semble consister à adapter les solutions existantes en utilisant des matériaux hybrides pour exploiter le potentiel des nanomatériaux à des coûts industriels. Un autre enjeu de l'utilisation des nanomatériaux dans le domaine de la filtration repose sur la nécessité de développer des outils permettant de modéliser et de simuler à échelle moléculaire. Dans ce domaine, de nombreux travaux sont actuellement en cours aux Etats-Unis, spécifiquement dédiés à la filtration, représentant une grande part de la recherche pré-industrielle et industrielle.

1- Description de la problématique

Outre les techniques traditionnelles de dépollution, des solutions de filtration par membranes organiques se sont développées. Des recherches sur la fabrication de membranes minérales issues de nanomatériaux synthétisés sans solvants organiques ont également vu le jour.

Trois enjeux essentiels sont mis en avant pour la filtration de demain :

- Accroître la durée de vie des membranes (5 à 10 ans)
- Filtrer à l'échelle moléculaire : notamment pour la capture des molécules ou l'échange ionique dans le traitement des effluents gazeux, liquides ou solides. L'enjeu industriel consiste à identifier le nanomatériau le plus compétitif sur chaque type d'effluent :
 - *effluents gazeux* : les familles de matériaux nanoporeux offrent un potentiel à exploiter ;
 - *effluents liquides* : les matériaux organométalliques basés sur la chimie supra-moléculaire offrent des possibilités pour capter des ions métalliques en solution liquide (intéressants dans le cas des effluents de centrales électriques)
 - *décontamination de solides* contaminés par un produit à toxicité élevée (dioxine par exemple) : les nanomatériaux présentent l'intérêt d'être à l'échelle des molécules à éliminer.
- Séparer les gaz en ligne : grâce notamment aux matériaux nanoporeux avec contrôle de topologie.

2- Les enjeux industriels

L'environnement est le secteur principalement concerné par cette application. La réduction des émissions de polluants est dans ce domaine un enjeu majeur. La mise en œuvre du protocole de Göteborg devrait coûter 60 milliards d'euros par an d'ici 2010 à l'Union Européenne, dont 9 milliards pour la France, la majorité (85%) étant absorbée par les mesures concernant les oxydes d'azote et les composés organiques volatiles, responsables de la pollution par l'ozone.

L'enjeu de cette action vis-à-vis des industriels est lié au traitement de l'eau, au traitement des effluents industriels ainsi qu'à la détection de polluants.

Au niveau international, on peut citer la création au Japon en juillet 2001 de la société de recherche BNRI, filiale de Mitsui. Cette dernière a pour mission de conduire des recherches dans le domaine des membranes nano-poreuses et se charge de leur commercialisation. Cette thématique est également étudiée aux USA dans le cadre du programme « Chemical Industry Vision2020 ».

En France les membranes inorganiques de nanofiltration (TAMI) sont couramment utilisées dans l'industrie alimentaire sans dénaturer les propriétés organoleptiques : vins sans alcool, jus de fruits clarifiés, lait ...

3- L'apport des nanomatériaux

L'utilisation de composants à base de nanoparticules présentant un ratio surface/volume favorable, permet d'adsorber 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, les aérogels qui peuvent piéger des polluants et les biocapteurs électrochimiques appliqués à la détection de polluants.

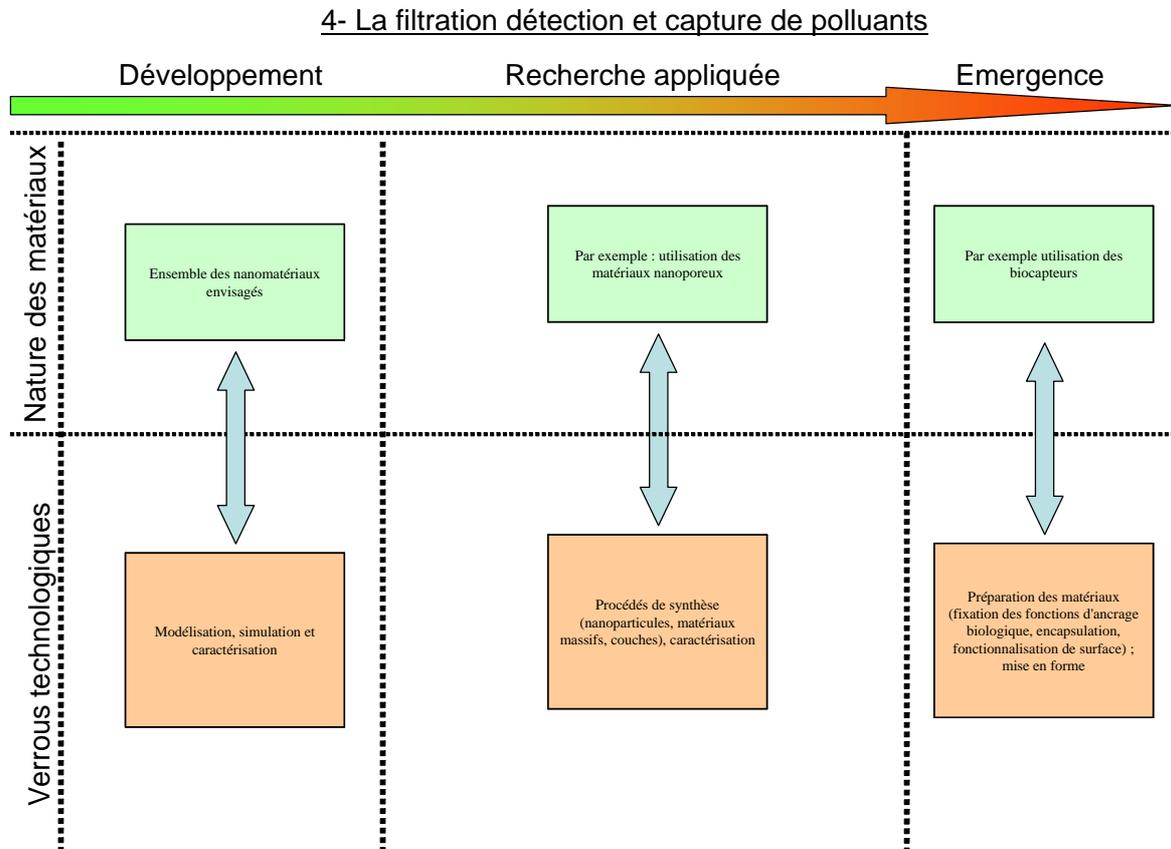
La nanofiltration est utilisée pour piéger les polluants à échelle de traces que les procédés conventionnels ne permettent pas d'éliminer. Cette technique répond aux besoins des industriels qui désirent opérer des séparations au niveau moléculaire. Le développement récent des nanomatériaux s'inscrit en effet dans cette logique d'accroissement de la sélectivité (applications aux salles blanches, électroniques et médicales).

Les principales recherches pour la nanofiltration reposent sur le **développement de membranes poreuses nanostructurées** (céramiques, ou à base de chimie supra-moléculaire par exemple). Ces structures poreuses agissent par adsorption et/ou chimisorption. Elles laissent passer les petites molécules au travers des pores et retiennent les plus grosses par effet de taille. Ces membranes céramiques ont une durée de vie plus longue que les membranes polymères et ont également la capacité de filtrer des particules plus fines.

Même si les recherches sont nombreuses au niveau des membranes céramiques, certains laboratoires poursuivent leurs travaux sur les matériaux polymères pouvant être utilisés dans la filtration et la séparation d'effluents et de gaz. Il s'agit en général **de couches minces polymères nanostructurées** déposées à la surface des supports de filtration afin d'augmenter la sélectivité dans la séparation et la détection d'espèces.

Corollairement, les capteurs conçus à base de nanomatériaux permettent d'accroître la précision de détection de polluants.

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux :



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à moyen terme :

Dans cette application «filtration, détection et capture des polluants », les travaux de développements à engager concernent principalement la modélisation, la simulation, la caractérisation, la maîtrise et la reproductibilité des procédés d'élaboration :

- de membranes céramiques
- des précurseurs nanométriques utilisés dans la fabrication des nanomatériaux poreux massifs
- de couches minces polymères nanostructurées.

4.1.5 Fiche thématique 5 : Les nouvelles sources d'énergie

Les enjeux pour les nouvelles sources d'énergie s'appliquent à deux domaines principaux : la pile à combustible et les batteries. Les enjeux nationaux et européens sont souvent évoqués pour la pile à combustible, et dans une moindre mesure pour les batteries. Pourtant, concernant les batteries, les enjeux liés à l'introduction des nanomatériaux sont très forts car ils permettent l'augmentation significative de leur puissance, sur un marché où la demande est forte.

1- Description de la problématique

La nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre (notamment de CO₂ et CH₄) pour pallier une partie des problèmes climatiques conduit à de profondes évolutions dans le domaine de l'énergie. On recherche des moyens de production d'énergie moins polluants, notamment en accentuant la part des énergies renouvelables.

Un autre facteur clef vient des réserves limitées en énergies fossiles (pétrole, gaz naturel, charbon). Ces énergies fossiles sont pour la plupart des pays industrialisés un facteur de dépendance énergétique important.

Enfin, l'accroissement de la population mondiale et l'industrialisation des pays en voie de développement vont entraîner à terme une augmentation des besoins énergétiques.

2- Les enjeux industriels

Les secteurs industriels directement visés sont l'énergie et l'environnement.

L'enjeu est important pour le secteur de l'énergie 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.

Les dépenses liées à l'environnement en France sont supérieures à 24 milliards d'euros représentant environ 1,8% du PIB et générant 309 000 emplois. Les dépenses réalisées par les entreprises Françaises représentent près de 1 milliard d'euros.

L'impact concerne aussi bien l'amélioration du rendement des systèmes énergétiques que le développement des énergies propres et renouvelables.

Dans le domaine automobile, malgré les progrès des moteurs en terme de consommation, les besoins globaux en pétrole sont en augmentation du fait de la croissance du nombre des véhicules au niveau mondial et de l'augmentation des distances parcourues.

L'impact industriel de cette action sera fortement démultiplié au niveau industriel, favorisant les applications nomades par une disponibilité d'énergie accrue.

3- L'apport des nanomatériaux

La pile à combustible :

Des travaux se concentrent depuis plusieurs années sur de nouvelles sources d'énergie et en particulier sur la pile à combustible. L'intérêt du recours à l'hydrogène résulte d'une part de sa forte capacité énergétique massique et d'autre part de son caractère non polluant.

L'hydrogène est un gaz difficile à produire dans des conditions économiques favorables et difficile à stocker et à distribuer. Concernant le stockage, le verrou devrait être levé principalement grâce à la maîtrise de la production de matériaux poreux céramiques à structure nanométrique permettant d'entreposer l'hydrogène en toute sécurité. Pour utiliser l'hydrogène, des cinétiques rapides d'accès et de récupération du gaz sont recherchées, elles nécessitent une grande surface spécifique du matériau.

Les batteries :

Les batteries à grande densité énergétique sont aussi visées par les nanomatériaux. Les batteries conventionnelles sont utilisées dans presque toutes les applications qui requièrent une alimentation électrique : automobiles, ordinateurs portables, téléphones mobiles, jouets, montres, applications militaires et spatiales, ferroviaires, aviation. La capacité de stockage des différentes batteries utilisées conventionnellement est plutôt faible, nécessitant une mise en charge fréquente. Leur durée de vie est également faible. Deux options s'offrent alors pour augmenter la puissance des batteries :

- travailler sur l'encombrement, notamment en diminuant l'épaisseur de l'électrode ;
- travailler directement sur le matériau. Sur cette option, les nanomatériaux offrent des possibilités d'augmentation des capacités grâce à l'augmentation de la surface d'interaction entre les matériaux actifs et les électrolytes. Toutefois, l'augmentation de ces interactions génère également davantage de réactions parasites, entraînant des réactions d'autodécharge. Un des enjeux techniques du recours aux nanomatériaux dans le domaine des batteries revient alors à maîtriser les interactions de surface entre matériaux et électrolyte.

L'intégration des nanomatériaux offre un bon potentiel d'augmentation des capacités des batteries, particulièrement si on les introduit dans les électrodes. Pour ces composants, les nanomatériaux peuvent être intégrés :

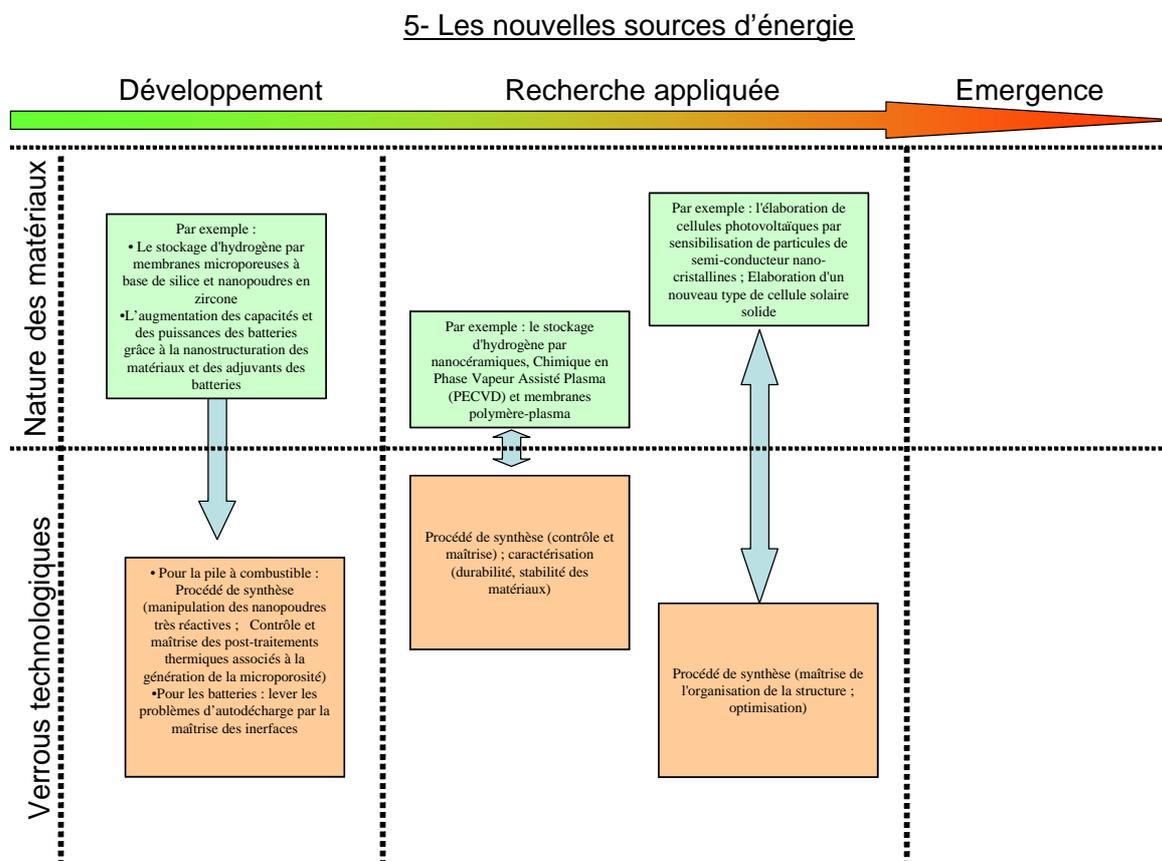
- soit comme matériaux actifs, les nanomatériaux offrant alors des capacités et des puissances plus importantes, mais toutefois avec des phénomènes d'autodécharge.
- soit comme adjuvants conducteurs. Dans ce cas, la substitution du carbone traditionnel se fait au profit de nanotubes de carbone, qui permettent de mieux capter les électrons du matériau actif, offrant ainsi une meilleure conductibilité et donc des batteries plus puissantes. Toutefois, l'inconvénient réside dans les perturbations liées à l'augmentation des surfaces d'interaction.

L'intégration des nanomatériaux offre toutefois suffisamment de perspectives d'augmentation de puissance pour que l'on poursuive des travaux tant sur les matériaux actifs des batteries que sur les adjuvants. Mais la démarche doit être itérative pour optimiser l'apport des nanomatériaux. Ainsi, aujourd'hui, les travaux sur les adjuvants semblent être les plus probantes.

Le photovoltaïque :

Des travaux de recherche à moyen terme sur les nanomatériaux concernent aussi l'énergie solaire, avec par exemple l'élaboration de cellules photovoltaïques à haut rendement par sensibilisation de particules de semi-conducteurs nanocristallines et l'utilisation de nanosphères d'oxyde de titane.

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à moyen terme :

Les céramiques ne sont pas les seuls nanomatériaux à être étudiés pour le stockage d'hydrogène. Des recherches concernant les matériaux suivants sont également en cours :

- des membranes base polymère conductrices de protons : obtenues par Dépôt Chimique en Phase Vapeur Assisté Plasma (PECVD),
- des nanocomposites à matrice polymère hybride fonctionnalisés par des nanoparticules minérales

Dans l'application stockage d'hydrogène, des axes de collaboration entre industriels et laboratoires pourraient concerner les procédés d'élaboration des couches minces polymères nanostructurées déposées à la surface des supports de filtration. Le transfert vers l'industrie est envisagé après 2010. Des développements sont à réaliser au niveau :

- des procédés d'élaboration en particulier au niveau du procédé de synthèse par dépôt chimique en phase vapeur assisté plasma (PECVD)
- de la caractérisation des polymères

Dans le domaine du photovoltaïques, de nombreux développements restent à faire pour un transfert industriel à court terme.

Les axes de collaboration dans la filière

- Sur la pile à combustible

Les réseaux nationaux soutiennent de nombreux projets sur la thématique des nouvelles sources d'énergie, en particulier le réseau "Piles à Combustibles" (PACo) et le Réseau National Matériaux et Procédés (RNMP).

PACo couvre la production de l'hydrogène, le stockage-transport-distribution jusqu'à son utilisation finale, ainsi que les aspects « sécurité et réglementation ».

- Sur les batteries

La France bénéficie d'une expertise reconnue, matérialisée par son rôle de coordinateur du Réseau d'Excellence ALISTORE, rassemblant 17 laboratoires de 10 pays, et travaillant sur la nanostructuration de tous les composés de la batterie.

4.1.6 Fiche thématique 6 : Les matériaux métalliques et les alliages

1- Description de la problématique

Les matériaux métalliques et les alliages utilisent depuis de nombreuses années les propriétés nanométriques des matériaux.

Sous réserve de stabilité de la nanostructure, les nanomatériaux ouvrent la perspective d'améliorer les propriétés des matériaux métalliques, d'obtenir des alliages nouveaux, des verres métalliques, d'élaborer des intermétalliques, des matériaux à nano grains ou encore des composites à matrice métallique.

2- Les enjeux industriels

Les enjeux sur les matériaux métalliques ou les alliages concernent avant tout la création de valeur sur des fonctions accessibles avec les matériaux, plus que sur les matériaux en tant que tels. Cette prise en compte de la fonction assurée par les matériaux conduit à intégrer la préoccupation du produit final et du prix admissible, très en amont des développements, favorisant une approche « coût complet » (matériaux, transformation, usage, recyclage).

Trois aspects sont à considérer :

- les modifications de structure,
- les procédés de traitement de surface,
- les procédés d'élaboration et de mise en forme, comme la métallurgie des poudres par exemple.

Les modifications de structures pourraient être obtenues par exemple par adjonction de nanocharges. Le gain immédiat serait par exemple le poids à propriété équivalente ou encore la tenue à la température, par exemple dans les secteurs aéronautiques ou automobiles. Les matériaux ainsi modifiés permettraient de valoriser les propriétés sur des produits de dimensions compatibles avec les usages des clients (jusqu'à l'aile d'avion et au-delà).

La fonctionnalisation des surfaces est une voie active. Elle vise à agir sur une partie limitée des matériaux afin de s'adapter aux besoins spécifiques des produits lors de leur fabrication, comme l'assemblage entre matériaux de nature différente, de leur usage tel le durcissement local des matériaux, ou encore d'ajouter des propriétés fonctionnelles, telles les propriétés barrières.

La métallurgie des poudres est un procédé qui permet l'obtention d'alliages nouveaux et de pièces à moindre coût. La mécano-synthèse, une voie réaliste pour l'élaboration industrielle de nanostructures, rend possible l'élaboration d'intermétalliques, de matériaux à nano-grains ou encore de composites à matrice métallique renforcés par des nanoprécipités.

Un autre enjeu dans la métallurgie concerne la réalisation d'outils de coupe durant plus longtemps, permettant l'usinage d'une plus large gamme de matériaux et usinant plus vite.

La métallurgie, représentant plus de 360 000 emplois en France, est constituée par 5 secteurs d'activité : la sidérurgie et première transformation de l'acier, le travail des métaux non ferreux, la fonderie, les services industriels du travail des métaux, la fabrication de produits métalliques. En dehors des « services aux industriels du travail des métaux » qui s'exercent sur le territoire national, la position de la France en matière de classement à l'export se situe entre la cinquième place (sidérurgie) et la dixième place (travail des métaux non ferreux, activité soumise à la variation des cours en matière première et aux pressions des grands donneurs d'ordre de l'automobile et de l'aéronautique). Les Etats-Unis, la Chine, le Japon, l'ex-URSS et l'Allemagne constituent les principaux concurrents. Les investissements réalisés par la métallurgie concernent à la fois l'amélioration des outils et des contrôles en ligne, et la réduction des nuisances environnementales. Les dépenses totales intérieures de

recherche et développement de la métallurgie ont été de 3,2 millions d'euros en 2000. Le secteur de la fonderie pour sa part a de plus en plus tendance à s'externaliser ou même à se délocaliser pour renforcer la présence des unités de production à proximité des donneurs d'ordre (particulièrement l'automobile).

D'autres secteurs profiteront directement des avancées de la métallurgie, principalement l'automobile, l'aéronautique et la construction.

En métallurgie, l'Europe reste en pointe des développements par rapport aux Etats-Unis. Au Japon, il est intéressant de constater que la métallurgie tient la cinquième position des efforts de R&D nanomatériaux, derrière l'électronique moléculaire et la photonique.

3- L'apport des nanomatériaux

Les nanomatériaux laissent entrevoir de nouvelles possibilités en métallurgie.

Lors de la mise en forme des matériaux, le mouvement des dislocations contrôle la déformation. Avec une structure nanométrique, ce phénomène n'interfère pas. Le matériau fait preuve d'une élastoplasticité quasi parfaite, voire d'une superplasticité.

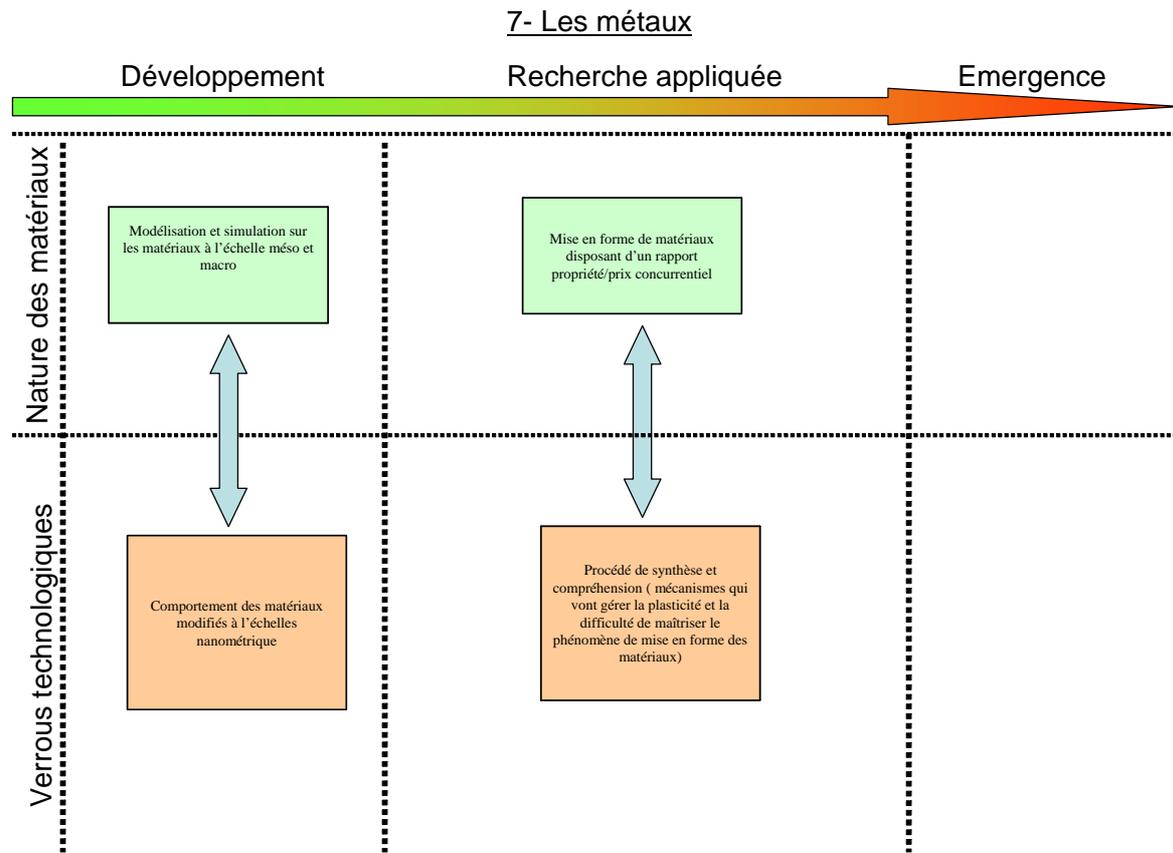
A partir d'une pièce donnée densifiée à l'échelle nanométrique, il est possible d'ajuster la taille des cristallites pour gérer un paramètre lors de la mise en forme.

En métallurgie des poudres, l'utilisation de poudres très fines permet d'abaisser la température de frittage, ce qui simplifie également l'outillage. Cette utilisation permet également de réaliser des assemblages à plus basse température et de limiter ainsi les problèmes de fragilité à l'interface.

En traitement de surface, des travaux sur les revêtements pour des outils de coupe permettent d'illustrer l'apport des nanomatériaux. L'élaboration de matériaux en couches minces par des technologies sous vide (PACVD, magnétron, ablation laser et couplage de ces techniques...) a connu un très fort développement au cours de ces dernières années. En particulier, toute une famille de couches sur la base des DLC (diamond like carbon) a été développée, présentant d'excellentes qualités mécaniques dans la mesure où la température reste modérée et la surface "humide". La maîtrise des conditions de dépôt conduit à la fabrication de couches dont les propriétés peuvent être optimisées en vue d'une application donnée. Citons par exemple, les couches minces TiN/CrN nanostructurées élaborées par la technique PVD. La caractéristique majeure de ces couches est non seulement la résistance à l'usure mais encore la résistance à la corrosion. Ces propriétés d'usage rendent ces matériaux particulièrement intéressants pour des applications mécaniques en conditions sévères, telles que l'usinage et la mise en forme.

Ce type de couche peut être envisagé comme lubrifiant solide (maîtrise du frottement, réduction de l'usure et des débris émis), en particulier dans des applications où tout autre lubrifiant est exclu (mécanismes travaillant dans le vide spatial par exemple, micromachines...).

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à moyen terme :

Des travaux de développement dans la mise en forme des matériaux sont nécessaires pour améliorer leur plasticité mais aussi pour aboutir à des solutions économiquement acceptables par les industriels. Dans le domaine des revêtements minces, la maîtrise des conditions de dépôt est une condition nécessaire à une utilisation à l'échelle industrielle. Cette maîtrise des procédés de dépôt conduit à la fabrication de couches dont les propriétés peuvent être optimisées en vue d'une application donnée. Un autre verrou à lever, lié à la maîtrise des procédés de manière industrielle, est le coût des technologies de dépôt sous vide et par conséquent des matériaux en couches minces. Les coûts des traitements de surface PVD sont élevés si on les compare aux coûts des technologies de dépôt par voie humide.

Les axes de collaboration dans la filière

A court terme, la collaboration pourrait s'orienter autour :

- des matériaux de structure, conduisant à modéliser les comportements des matériaux à l'échelle la plus large possible, (macroscopique),
- de la fonctionnalisation de surface, conduisant par exemple à développer des procédés compatibles avec des lignes de production des industriels de la métallurgie (fort volume-faible coûts).

Les besoins en terme de procédés de mise en forme sont importants et nécessitent le travail en commun d'équipes complémentaires :

- des thermodynamiciens capables de prédire la stabilité des structures,
- des cinéticiens,
- des mécaniciens des solides,
- des spécialistes de la formation des textures,
- des spécialistes de la recristallisation, et plus particulièrement des chercheurs connaissant le comportement des métaux de structure hexagonale comme le titane, le zirconium, le magnésium.
- des industriels afin d'intégrer très en amont les contraintes de coûts liées à une industrie de fort volume.

4.1.7 Fiche thématique 7 : L'optique

1- Description de la problématique

Le domaine de l'optique concerné par les nanomatériaux est principalement les sources lumineuses, telles que la lumière blanche, les lasers et les émetteurs UV, IR pour l'électronique.

Un certain nombre d'innovations sont attendues dans le domaine des sources lumineuses. Concernant les lasers les besoins se traduisent par :

- des lasers plus petits et plus puissants,
- des lasers silicium ; facilitant l'intégration entre la microélectronique et l'optique,
- des lasers bleus ou des multiplicateurs de fréquence pour accroître la performance de la lecture optique.

Dans un contexte d'économie d'énergie, la réduction de la consommation d'énergie est très recherchée. Elle peut également être obtenue grâce aux sources de lumière blanche à haut rendement, par exemple les diodes émettrices de lumière (DEL) monochromatiques à puits quantiques assurant un blanc polychrome. Par ailleurs, les nanopoudres luminophores devraient également jouer un rôle significatif dans le développement de sources lumineuses de grande surface.

Les besoins en matière de sources UV et IR concernent la cryptographie et l'augmentation des débits de transmission. La réalisation de sources à un photon, capables de générer de façon contrôlée des impulsions lumineuses contenant un photon unique doit permettre de répondre à ces objectifs.

Les besoins sont également identifiables dans le domaine de la détection de gaz à l'état de trace, notamment pour le contrôle de la pollution. Ces besoins poussent au développement de nouvelles sources lasers qui émettent dans le moyen infrarouge (longueurs d'ondes comprises entre 2 et 20 μm). Là encore, la réalisation de sources à un photon doit permettre d'atteindre des niveaux de détection très bas.

2- Les enjeux industriels

Deux secteurs industriels sont particulièrement concernés par les développements de moyen terme :
- les Nouvelles Technologies de l'Information et de Télécommunications (NTIC), principalement pour la transmission des informations,
- l'environnement, par la possibilité de détection de polluants et la réalisation d'économies d'énergie.

Le secteur de l'environnement représente en France environ 390 000 emplois contre 290 000 pour les activités industrielles des technologies de l'information et de la communication.

3- L'apport des nanomatériaux

a) Dans la fabrication des lasers

Des travaux permettent de concevoir des lasers à partir de boîtes quantiques (le silicium sous la forme de cristaux nanométriques à la capacité d'émettre de la lumière).

b) Dans la fabrication des sources blanches

L'utilisation de nanomatériaux (sels d'arséniure, de nitrure, de phosphate) permettra d'augmenter par 10 le rendement énergétique des sources blanches tout en augmentant leur durée de vie.

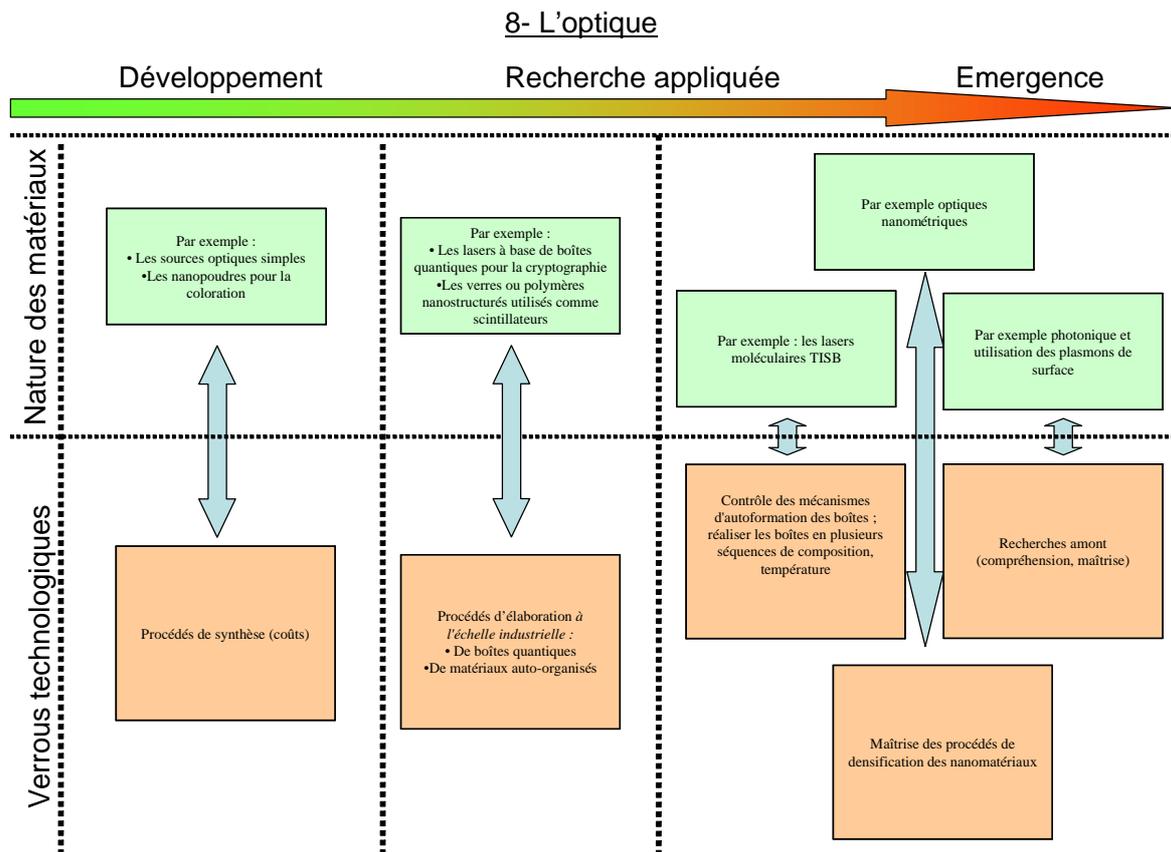
c) Dans la fabrication des émetteurs IR

Fabrication d'émetteurs infrarouges sous la forme de couches minces.

L'utilisation de couches minces de semi-conducteurs pour fabriquer des lasers infrarouges a été proposée très tôt. Il a fallu néanmoins attendre le développement des techniques d'épitaxie par jets moléculaires ou de dépôt chimique de composés organométalliques en phase vapeur.

d) Dans la coloration et dans la filtration des UV et des IR pour des polymères ou des verres Grâce à l'intégration de nanoparticules métalliques ou semiconductrices.

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux en optique



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à moyen et long terme :

- Concernant les problématiques touchant aux NTIC (transmission d'information notamment) : Pour la réalisation de lasers à base de boîtes quantiques (notamment pour la cryptographie), la collaboration entre les laboratoires et les industriels sur les procédés de fabrication est nécessaire : il s'agit de maîtriser l'industrialisation des procédés de synthèse. Concernant les lasers moléculaires et les transitions Inter sous bandes, des collaborations recherche-industrie pourront être engagées en matière de :

- contrôle des mécanismes d'autoformation des boîtes quantiques,
- maîtrise des contraintes dans les matériaux,
- réalisation des boîtes quantiques en plusieurs séquences de composition,
- cristallogénèse du SiC en phase vapeur qui nécessite encore des progrès de productivité (épaisseur et largeur des monocristaux).

- Concernant les problématiques autres que les NTIC (médical, verre notamment) : D'autres axes de collaboration doivent viser la maîtrise des conditions d'élaboration de matériaux en plus grande quantité, notamment par des travaux sur les procédés d'auto-organisation.

4.1.8 Fiche thématique 8 : Les molécules fonctionnalisées pour la santé

Les enjeux et les possibilités offertes par les nanomatériaux dans la biologie sont très fortes et touchent de très nombreuses applications. Toutefois, les experts industriels et scientifiques ne peuvent encore détailler précisément l'apport des nanomatériaux appliqués à la biologie du fait de la nécessité d'une compréhension accrue de phénomènes sur les nanomatériaux eux-mêmes. Deux préalables doivent ainsi être étudiés :

- savoir fabriquer à échelle industrielle les nanomatériaux
- savoir mesurer ce qu'ils apportent, dans le but de ne les intégrer que s'ils offrent une réelle augmentation des performances par rapport à des solutions conventionnelles.

1- Description de la problématique

Prévenir, traiter, guérir sont les objectifs principaux de la médecine qui cherche à aller toujours plus loin :

- déceler une molécule biologique dans un échantillon qui peut en contenir des millions,
- analyser des nanolitres, voire des picolitres,
- développer des traitements toujours plus efficaces et mieux tolérés.

Trois domaines semblent les plus prometteurs pour utiliser le bénéfice des nanomatériaux :

1) dans le domaine du diagnostic (marqueurs capables de cibler, différencier un certain type de molécules ou protéines ...). Une attention particulière touche les bioprocresseurs (signal sur une bio-propriété). Mais des verrous doivent être levés pour connaître plus précisément les nanobiomatériaux afin de pouvoir ensuite mesurer leur impact sur le métabolisme. Les connaissances sont aujourd'hui insuffisantes dans le domaine de la pharmacocynétique ou dans l'analyse de propriétés d'absorption des bionanomatériaux par le métabolisme.

2) dans le domaine du médicament, où l'enjeu majeur réside dans la démonstration et la mesure de l'apport du nanomatériau.

3) dans le domaine de la réparation.

2- Les enjeux industriels des molécules fonctionnalisées

L'industrie pharmaceutique, représentant environ 100 000 emplois en France, est le secteur directement concerné. Par extension, le matériel médico-chirurgical pourra utiliser les travaux conduits, ce secteur représentant 25 000 emplois en France.

Au niveau international, la très grande majorité des entreprises créées aux Etats-Unis dans le domaine des nanomatériaux est positionnée sur le secteur des molécules fonctionnalisées pour le biomédical et les laboratoires sur puce.

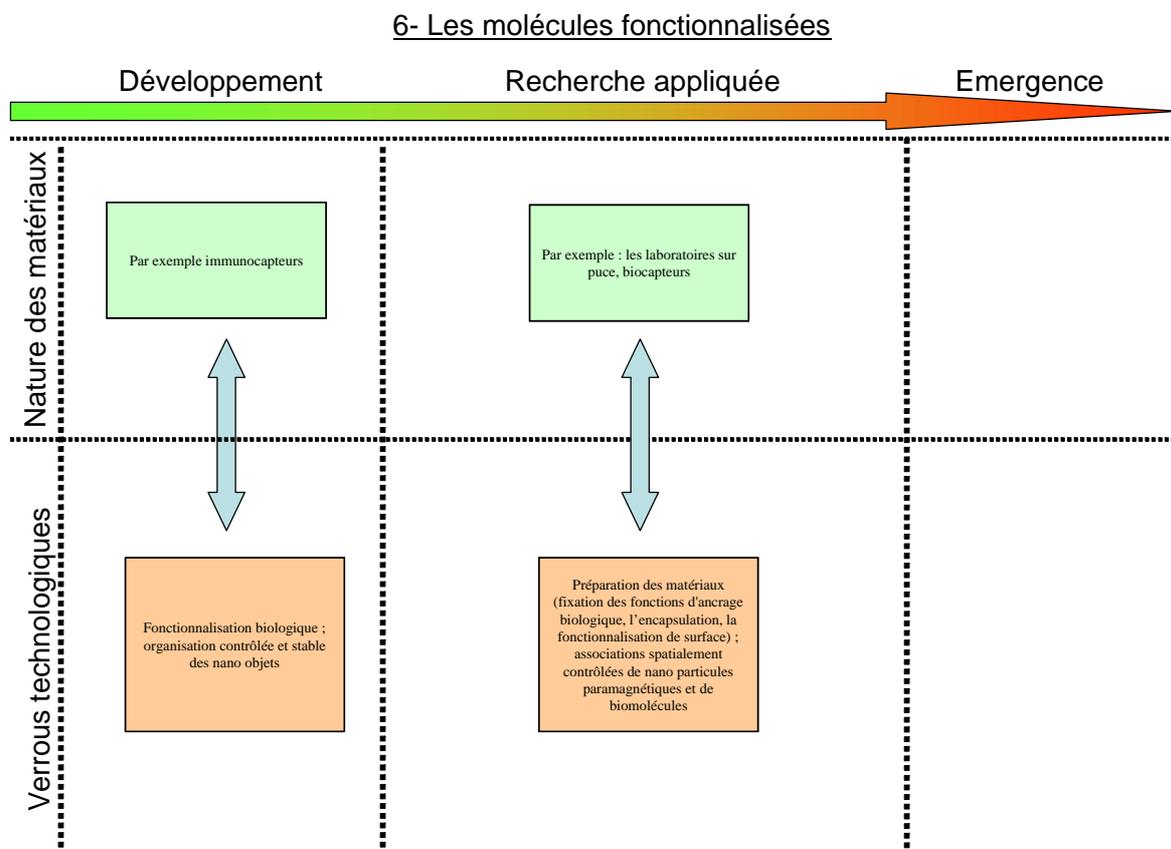
3- L'apport des nanomatériaux

Les nanotechnologies manipulent des objets à l'échelle de l'atome ou du groupement d'atomes. Les molécules, l'ADN, les protéines ou les virus sont d'une taille inscrite dans un même ordre de grandeur, le nanomètre. Il devient, par conséquent, possible et donc prometteur de faire interagir les matériaux à l'échelle atomique avec les systèmes du vivant.

Grâce aux nanomatériaux, il est envisageable par exemple de :

- immobiliser des molécules d'intérêt biologique (enzymes, anticorps, ADN) dans un film de latex pour l'élaboration de biocapteurs,
- encapsuler des "quantum dots" (nanocristaux) dans un film de latex fonctionnalisé pour l'élaboration de traceurs biologiques fluorescents ou d'agents de contraste pour l'IRM,
- développer de nouveaux matériaux biodégradables et fonctionnalisés et des nanomatériaux par autoassemblage de molécules amphiphiles ou polymères (liposomes, nanoémulsions, nanoparticules). Ces systèmes, appelés vecteurs, sont capables, après administration chez l'homme, de libérer de manière ciblée dans un tissu ou une population cellulaire déterminée la molécule active. Sont concernés des médicaments (anticancéreux, peptides et protéines thérapeutiques, ou les gènes) ou des vaccins
- amplifier les phénomènes de reconnaissances biologiques (immunoréaction, hybridation, catalyse enzymatique),
- fonctionnaliser des surfaces et des nanoparticules métalliques par des assemblages et matériaux moléculaires à l'aide de ligands récepteurs pour des applications visant la détection et l'analyse d'ions et de molécules (immunocapteurs, biopuces, laboratoire sur puce),
- travailler sur la nano-architecture contrôlée (polymères, latex et minéraux) pour obtenir des objets dissymétriques bi fonctionnels utilisables comme agents tensioactifs (stabilisation d'émulsions en cosmétique). L'intérêt étant ici triple : minimiser l'utilisation des tensioactifs actuels, toxiques ; réduire les coûts (une particule peut remplacer, à iso propriétés, un ensemble d'agents tensioactifs) ; introduire de nouvelles propriétés pour parvenir à des émulsions plus stables ou pour stabiliser des émulsions non stabilisables avec des tensioactifs classiques.

4- Les axes de collaboration pour favoriser le développement des nanomatériaux



Illustrations par les axes de collaboration liés aux verrous technologiques qui devraient être résolus à moyen terme :

Les principaux axes de collaboration concernent :

- la préparation des matériaux (fixation des fonctions d'ancrage biologique, l'encapsulation, la fonctionnalisation de surface),
- les associations spatialement contrôlées de nanoparticules paramagnétiques et de biomolécules.

A moyen terme les produits à sortir des laboratoires sont :

- des immunocapteurs
- des vecteurs biodégradables
- des laboratoires sur puces
- des bioprocresseurs.

4.1.9 Fiche thématique 9 : L'électronique

Le domaine de l'électronique est un domaine devant être traité différemment de tous les autres domaines d'application des nanomatériaux, et ce, pour trois raisons :

- L'électronique a un rôle moteur dans le développement des nanomatériaux. Il ne possède pas un caractère exclusivement prospectif et s'appuie déjà sur un état de l'art remontant à au moins 20 ans :
 - travaux aboutis pour les salles blanches sur l'ultra propreté pour la *manipulation et l'élaboration de matériaux* ;
 - travaux aboutis sur les *procédés de fabrication des matériaux*, par dépôt, par croissance ou par gravure ;
 - travaux aboutis en *métrologie*, pour la mesure des épaisseurs de couches, en composition, volume et d'une manière plus générale, pour la mesure des propriétés de la matière à échelle nanométrique.

Aujourd'hui encore, les experts s'accordent à dire qu'environ la moitié des travaux de recherche sur les nanomatériaux concernent l'électronique.

- L'électronique a un effet d'entraînement et de transfert très fort sur tous les autres domaines d'application des nanomatériaux en ce sens qu'il a déjà travaillé, ou il travaille encore, sur toutes les grandes problématiques liées au développement des nanomatériaux : élaboration, caractérisation, modélisation, simulation, processabilité, méthodes de mesure et de contrôle. Ainsi, les quelques start up oeuvrant dans le monde nanomatériau viennent souvent du monde de l'électronique, et des NTIC d'une manière plus générale.
- L'électronique est aujourd'hui intrinsèquement « nano », et pas seulement dans la dimension matériaux mais dans toutes ses dimensions technologiques : l'électronique est avant tout nanotechnologique. En témoigne la road map ITRS qui oriente pour la vingtaine d'années à venir les travaux R&D des acteurs de la filière, et qui intègre parmi d'autres axes les matériaux comme une des composantes de l'avancée du secteur, appliqué tant sur les mémoires, que sur les procédés de calcul ou encore la génération des hautes fréquences.

De ce fait, vouloir extraire les enjeux spécifiques du développement des nanomatériaux dans le domaine de l'électronique est assez vite réducteur du fait de l'interaction et l'imbrication des problématiques matériaux à d'autres problématiques nanotechnologiques. En outre, il est assez difficile de vouloir ordonner dans le temps des priorités de développement des nanomatériaux à court, moyen, long terme dans la mesure où les avancées reposent d'une part sur des itérations entre problématiques matériaux et problématiques non matériaux, et d'autre part, sur des itérations entre sphère scientifique et sphère industrielle.

Ce préalable étant posé, si l'on veut toutefois essayer de focaliser l'attention sur les enjeux spécifiques du développement des nanomatériaux pour l'électronique, on constate qu'ils reflètent assez fidèlement les attentes des autres secteurs d'application, à savoir :

- Au niveau des propriétés des nanomatériaux : amélioration des propriétés électriques, magnétiques, thermiques et quantiques
- Au niveau de leur utilisation : intégration des matériaux dans de petits volumes (par exemple en micro/nanolithographie)
- Au niveau de leur processabilité : compatibilité des nanomatériaux et des procédés de fabrication.

1- Description de la problématique

L'électronique constitue donc un volet à part entière dans le développement des nanomatériaux. En effet, les besoins de miniaturisation ont logiquement conduit à favoriser des développements vers des tailles nanométriques pour faire évoluer les composants existants à cette échelle.

Tous les industriels du domaine des Technologies de l'Information sont dans l'attente, voire en recherche, de solutions éprouvées susceptibles de prolonger la loi de Moore après 2007, date annoncée comme nécessitant une rupture dans la manière de fabriquer les composants silicium qui seront alors nanométriques. En revanche, les technologies de substitution au Silicium restent du domaine de la recherche.

Certaines sous-thématiques du domaine de la microélectronique peuvent être citées pour illustrer des enjeux spécifiques des nanomatériaux : l'électronique de spin, l'optoélectronique, les actionneurs par exemple.

2- Les enjeux industriels associés

L'industrie de la microélectronique cherche sans cesse à miniaturiser : mettre plus de composants sur une puce pour une rapidité accrue et des capacités plus importantes. L'enjeu de 2007 concerne la réalisation de dispositifs de 43 nm et l'intégration de près de 10 milliards de transistors sur une puce.

L'industrie du semiconducteur sur la scène internationale se livre une concurrence exacerbée par un contexte de relative récession. Dans ce contexte et au sein d'un marché mondial estimé à près de 200 milliards d'€uros, la France et l'Europe connaissent des difficultés pour rivaliser avec les Etats-Unis et le Japon. Les semiconducteurs ont un poids significatif dans l'économie, jouant un véritable rôle d'effet levier. Ainsi, on estime que pour 30 milliards d'€uros de semiconducteurs achetés par les équipementiers, 200 milliards de chiffre d'affaires de ventes sont réalisés par la vente de téléphones portables et 500 milliards sont réalisés chez les opérateurs.

Le marché français n'a pas été épargné par les fluctuations bien que les semiconducteurs soient présents de plus en plus souvent et dans une proportion de plus en plus importante dans la vie quotidienne des ménages.

Si la France est confrontée aux difficultés inhérentes au secteur dans son contexte mondial, elle dispose néanmoins :

- d'atouts industriels réels dans le domaine de la microélectronique et des semiconducteurs avec une dizaine d'unités de production,
- d'un potentiel scientifique non négligeable, assez largement implanté sur le territoire

En matière de stockage d'information l'objectif est de concevoir des mémoires sans cesse plus denses, plus fiables, à accès plus rapide ; ceci tout en réduisant simultanément la dimension des supports.

Deux grands marchés sont concernés par le stockage d'information:

- Le marché actuel des disques durs qui représente environ 50 milliards d'euros, la part prise par les têtes de lecture représentant plus de 10 %.
- Le marché des mémoires électroniques qui représentait en 2002 environ 25 milliards d'euros. Il se décompose en trois secteurs :
 - Les mémoires pour appareils nomades, domestiques et grand public (agendas électroniques, appareils photos), pour lesquelles le facteur dominant est la recherche d'un composant à faible coût. Ce secteur représente 9 milliards d'euros en 2002. On peut raisonnablement penser que c'est le premier auquel d'adresseront les produits MRAM.
 - Les mémoires pour ordinateurs (DRAM, SRAM) qui sont le résultat d'un compromis performance / coût. Ce secteur représente 15 milliards d'euros en 2002.
 - Les mémoires pour applications militaires et spatiales qui représentent un marché plus marginal en volume

Les activités industrielles du secteur des technologies de l'information et de la communication représente environ 290 000 emplois en France.

3- L'apport des nanomatériaux pour l'électronique

- *Enjeux technologiques*

L'électronique utilisant des matériaux conventionnels (silicium) côtoie ses limites : c'est une technologie planaire, donc limitée dans la densité des performances ; elle subit des pertes en ligne lors d'une transmission et présente une sensibilité à la diaphonie ; l'augmentation du nombre de connections va rendre la gravure critique ; la bande passante est limitée ; les problèmes de dissipation de chaleur sont de plus en plus difficiles à résoudre. Pour faire évoluer cette science, développer les nouveaux matériaux est indispensable.

Les problèmes majeurs soulevés par la miniaturisation des composants concernent en priorité la diminution des dimensions et le changement radical des matériaux que cela induit au niveau des transistors (diélectrique de grille en oxyde métallique, grille métallique à haute conductivité, semiconducteur à mobilité non dégradée, voire augmentée grâce aux contraintes mécaniques) et des interconnexions (diélectrique de très faible permittivité, métaux à haute conductivité). La question de la limite physique des transistors se pose en terme de matériaux, mais aussi d'architectures (transistor FINFET, double grille, ou « surrounded gate »).

La recherche de performances croissantes en terme de rapidité d'exécution et de faible consommation rend plus cruciale le problème de la dissipation de la chaleur.

Enfin la fiabilité est le caractère corollaire de tous les nouveaux matériaux à intégrer dans une filière CMOS.

Les nouveaux matériaux à considérer pour la microélectronique ne se limitent pas aux matériaux semi-conducteurs; les matériaux métalliques sont de plus en plus à prendre en compte.

- *Rôle des nanomatériaux*

Les nanomatériaux sont la réponse naturelle à la miniaturisation et aux problèmes qui en découlent.

Concernant les problèmes d'interconnexion entre composants d'un micro circuit électronique : les dimensions visées de quelques nanomètres rendent les techniques de lithographie inadaptées. Plusieurs techniques de dépôts sont étudiées :

- la PVD ("physical vapor deposition"),
- l'ALD ("atomic layer chemical vapor deposition") qui sera probablement la solution retenue pour les prochaines générations de puces, mais elle n'a pas prouvé sa faisabilité pour déposer des couches de germination,
- l'électrodeposition de films organiques sur des surfaces conductrices et semi conductrices pourrait constituer une véritable solution alternative peu coûteuse a priori, car elle ne nécessite pas l'utilisation d'équipements sous vide contrairement à l'ALD et la PVD.

Face aux problèmes de dissipation de la chaleur (aujourd'hui solutionnées par le SiC), les nanotubes de carbone pourraient (s'ils étaient compétitifs et stables à une température suffisante) apporter une réponse très satisfaisante.

Les nanotubes de carbone pourraient également remplacer le silicium dans la conception de diodes ou dans les circuits à l'échelle du nanomètre avec cet avantage que l'on pourrait moduler la bande interdite (GAP - chiralité) dans ces circuits et avoir accès à une puissance bien supérieure.

Les nanomatériaux organiques pourraient, quant à eux, répondre aux impératifs de performances et permettre :

- de concevoir des composants électroniques à hauts degrés d'intégration,

- remplacer le silicium et être intégrés dans des composants électroniques tels que les cellules photovoltaïques, les transistors à effet de champ ou les diodes électroluminescentes. Le champ d'applications est grand : circuits intégrés, dispositifs pour l'affichage (écrans plats) ou encore en microélectronique logique,
A l'inverse des semi-conducteurs minéraux, les semi-conducteurs organiques peuvent être déposés sous forme de films minces selon des techniques peu coûteuses et sur des supports flexibles.

4.2 Les enjeux transversaux au développement des nanomatériaux

Les fiches thématiques permettent de faire émerger des enjeux transversaux au développement des nanomatériaux.

Une nécessaire maîtrise technologique

Certains enjeux technologiques transversaux au développement des nanomatériaux émergent, principalement :

- caractériser à échelle nanométrique, pour une meilleure compréhension des phénomènes intrinsèques liés aux nanomatériaux,
- modéliser et simuler à échelle moléculaire voire sur des objets de dimensions plus importantes,
- maîtriser et reproduire des procédés de préparation et d'élaboration des nanomatériaux à échelle industrielle,
- disposer des méthodes et outils de mesure de l'impact technique des nanomatériaux, au sein des pièces dans lesquels ils sont introduits.

Par comparaison, on constate que ces enjeux transversaux sont cohérents avec ceux du programme nanomatériaux du METI japonais, axé sur la nanofabrication et la métrologie.

Un intérêt venant de nouvelles fonctions

Des constantes relevant de l'utilisation des nanomatériaux se dégagent :

- l'exploitation de la miniaturisation permet d'obtenir des produits finis plus petits et d'agir aux plus près des propriétés des nanomatériaux à valoriser afin de fournir de nouvelles fonctionnalités,
- le ratio surface/volume des nanomatériaux permet d'augmenter les performances et la sélectivité des produits dans lesquels ils sont introduits. Cette constante est stigmatisée dans une fiche thématique : celle dédiée à la catalyse,
- le développement des nanomatériaux repose sur une logique multi-matériaux : mélanges de matériaux organiques, inorganiques, polymères, métalliques,
- les nanomatériaux permettent d'envisager une réduction des coûts énergétiques,
- les nanomatériaux offrent des perspectives environnementales paradoxales : ils permettent de traiter la pollution à échelle moléculaire tout en n'étant pas évalué quant à leurs impacts sanitaires,

- les nanomatériaux peuvent à court terme être exploités dans une approche incrémentale afin d'améliorer les propriétés mécaniques, électriques, magnétiques et thermiques des matériaux conventionnels.

Une démarche itérative pour transférer le savoir faire

Le développement récent des nanomatériaux s'accompagne d'incertitudes sur l'échelle de temps d'un usage des nanomatériaux par l'industrie (se pose en particulier la préoccupation de coût compétitif de la solution industrielle au regard d'alternatives). En effet, le passage de la recherche vers l'industrie semble davantage itératif que linéaire, et ce, à deux niveaux :

- itérations entre sphère de la recherche et sphère industrielle,
- itérations entre problématiques matériaux et problématiques d'intégration, économiques,....

Il est actuellement difficile de se prononcer sur le nombre d'itérations nécessaires pour aboutir à une solution industriellement utilisable.

Trois démarches pourraient favoriser le rapprochement entre le besoin industriel et l'offre de la recherche :

- des transferts technologiques à partir des travaux engagés dans le domaine de l'électronique car il représente 50% des recherches sur les nanomatériaux et dispose d'un recul de plus de 20 ans sur des travaux pionniers en la matière,

- une capitalisation du savoir et un échange des connaissances à partir d'initiatives existantes : par une information sur les enjeux et perspectives des nanomatériaux auprès des réseaux de recherche et d'innovation technologique (RNMP, RNMT, ...), au travers du programme "Matériaux" du CNRS, du réseau Nano de la Fondation Européenne pour la Science (ESF), du réseau Noeme, des programmes interdisciplinaires Ultimatech, Nanotec 300 du CEA, des projets européens (6^e PCRD et initiatives Euréka) et de l'initiative Nirv@na,

- une approche transversale entre les industriels leaders dans leurs domaines respectifs afin de favoriser les échanges d'expériences sur les « nanopropriétés » (rassemblant les fournisseurs, formulateurs et utilisateurs) permettant d'associer les laboratoires de recherche sur des thématiques communes.

4.3 Les objectifs de soutien à la filière des nanomatériaux

Répondant aux enjeux transversaux, quatre objectifs structurent les actions à enclencher afin de dynamiser la filière des nanomatériaux. Ils répondent à la fois aux besoins des industriels et des laboratoires de recherche publics, en s'appuyant sur la dynamique des acteurs publics.

Objectif 1 : Développer l'information afin d'amplifier le dialogue entre les acteurs industriels et les acteurs de la recherche.

Les entretiens réalisés au cours de l'étude auprès des industriels et des laboratoires publics ont fait ressortir une faiblesse du processus de diffusion de l'information au sein de la filière.

L'enquête approfondie conduite auprès des laboratoires de recherche publics concernés par les nanomatériaux a montré, qu'en fait, la distance entre ces laboratoires et l'industrie repose avant tout sur un écart culturel et sémantique. En effet, les travaux effectués au sein des laboratoires semblent à même, non seulement de répondre à certaines attentes exprimées par les industriels, mais aussi d'aller bien au delà de ces attentes en devenant force de proposition.

Cette distance entre la recherche et les industriels conduit à rechercher un rapprochement des deux sphères afin de favoriser un dialogue opérationnel.

L'information devient alors un objectif nécessaire pour dynamiser le développement de l'usage des nanomatériaux, conduisant à faciliter d'un côté l'expression d'un ensemble de besoins auxquels les laboratoires sont déjà à même de répondre (actions de court terme, voire de moyen terme) et de l'autre à encourager les échanges sur les innovations de rupture (actions de long terme, voire de moyen terme).

Cet objectif vise à :

- 1- faire connaître les enjeux et les perspectives des nanomatériaux aux industriels,
- 2- faire partager le savoir-faire français pour favoriser des partenariats entre industriels et laboratoires de recherche.

L'information autour des nanomatériaux visera particulièrement à rassembler les acteurs de la chaîne du savoir, permettant :

- d'identifier et favoriser la mise en relation entre les compétences nécessaires pour mener à bien le développement et l'industrialisation d'un nanomatériau jusqu'à son application finale,
- de favoriser le caractère diffusant des recherches d'un secteur à un autre et de développer les transferts de technologie,
- d'accentuer la communication autour du transfert des résultats de la recherche vers l'industrie.

Objectif 2 : Encourager l'innovation industrielle afin de diffuser le savoir-faire sur les matériaux présents au sein des laboratoires et susceptible de développements industriels

Le développement des nanomatériaux est récent. En effet, bien que certaines applications fassent déjà l'objet d'applications industrielles depuis de nombreuses années, les outils de caractérisation des nanomatériaux, la maîtrise de l'ensemble du processus de production et la valorisation des nouvelles propriétés sont émergentes.

L'une des spécificités des nanomatériaux est le fort lien devant exister entre les étapes de recherche sur les matériaux, conduisant à caractériser et à produire de nouveaux matériaux plus performants, et les étapes industrielles, imposant des contraintes de volume et de coûts mais aussi d'intégration au sein d'un processus de production déterminé (approvisionnement, stockage, manipulation, transformation, recyclage).

La dynamique d'innovation pourrait être stimulée à plusieurs niveaux, par exemple :

- par la mise en oeuvre d'initiatives de collaborations industrielles à caractère international,
- par une implication plus forte des groupes industriels français souhaitant utiliser ou fabriquer des nanomatériaux, dans la définition et le suivi des travaux conduits dans les laboratoires de recherche,
- par une implication des PME dans l'utilisation et la diffusion des nanomatériaux,
- par l'affirmation d'un appui à la création d'entreprises dans le domaine des nanomatériaux.

L'encouragement de l'innovation permettra :

- o de favoriser la compétitivité des entreprises par l'utilisation des nanomatériaux,
- o de gagner ou maintenir des parts de marché par exemple en :
 - innovant par l'intégration de nanomatériaux dans les produits des industriels,
 - réduisant le cycle de fabrication par la diminution de certaines opérations (d'assemblage par exemple), ce qui est possible avec les nanomatériaux.
- o de consolider la compétitivité des secteurs de premier plan en France
- o de développer des alliances dans les secteurs stratégiques pour l'économie nationale ou fortement concurrentiels.

Objectif 3 : Favoriser la recherche et développer la formation sur les nanomatériaux afin de positionner les entreprises françaises sur une technologie d'avenir.

Au cours de l'étude réalisée auprès d'une centaine d'industriels, les besoins exprimés ont fortement concerné l'amélioration des propriétés. L'innovation de rupture liée au développement des nanomatériaux est plus faiblement perçue.

Parallèlement, les laboratoires de recherche ayant répondu^{xxviii} ont mis en avant un ensemble d'applications identifiées à partir de leurs travaux et ayant des déclinaisons industrielles. Ces applications concernent non pas un secteur industriel mais un ensemble de secteurs, répondant de fait à la vocation transversale et structurante des travaux liés à la recherche sur les nanomatériaux.

Favoriser la recherche constitue un objectif susceptible de répondre à la fois à la diffusion à terme de l'usage des nanomatériaux au sein des entreprises et au maintien d'un positionnement sur des travaux de recherche sur des matériaux présentant un potentiel très élevé en terme d'impact industriel.

L'intégration de formations sur les nanomatériaux au sein des cursus des étudiants favorisera la diffusion industrielle. En effet, les profondes modifications impliquées par l'usage des nanomatériaux et le potentiel de rupture venant de leurs usages imposent de nouveaux modes de raisonnement, des connaissances pluridisciplinaires et le développement de nouveaux systèmes de calculs. Les formations de haut niveau permettront de développer des procédés d'industrialisation testés et développés au sein de laboratoires.

Objectif 4 : Favoriser l'implication de l'industrie dans des actions de réglementation et de normalisation afin de faciliter la diffusion des nanomatériaux.

Le développement et l'utilisation des nanomatériaux constituent un réel défi pour de nombreuses professions.

En effet, les évolutions voire les ruptures associées aux nanomatériaux conduisent à repenser l'ensemble de la chaîne réglementaire et à adapter la normalisation. Pratiquement tous les secteurs économiques sont concernés.

Cet objectif de développement d'une réglementation et d'une normalisation spécifiques aux nanomatériaux permettra aux industriels de produire et d'utiliser les nanomatériaux avec une sécurité accrue, favorisant de fait les usages.

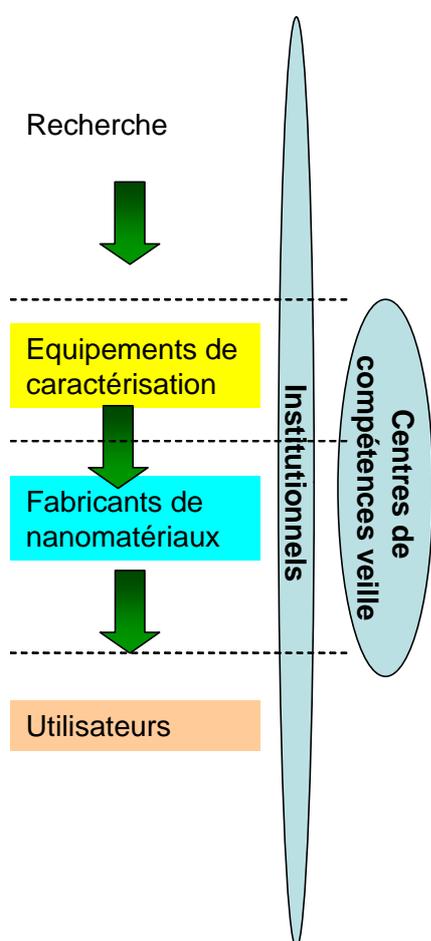
Corollairement, la réglementation et la normalisation permettront de maîtriser les émissions des polluants et de minimiser les risques sanitaires éventuellement associés aux nanomatériaux.

4.4 Premières déclinaisons opérationnelles afin de favoriser le développement des nanomatériaux en France

Le séminaire de restitution de juin 2004 vise à sensibiliser les industriels, les laboratoires et les centres techniques et permet :

- 1- une diffusion des résultats et des conclusions de l'étude,
- 2- un premier échange sur les besoins des différentes catégories d'acteurs, facilitant les prises de contacts et l'intégration des avis.

Au-delà de ce séminaire, des actions de court terme pourront être initiées.



Les déclinaisons de ces actions visent prioritairement à faire converger les attentes scientifiques et techniques spécifiques afin de décloisonner la filière des nanomatériaux.

Ce décloisonnement de la filière passe dans un premier temps par une stimulation des échanges entre laboratoires de recherche publics et les industriels.

Deux actions prioritaires sont ainsi proposées :

- 1- L'initiation d'une concertation nanomatériaux orientée par les 9 fiches thématiques, par la mise en place, pour chaque thématique, de groupe de travail réunissant les acteurs de la filière
- 2- Le développement et la mise à disposition sur internet d'une base de données « Acteurs de la filière des nanomatériaux », qui sera progressivement mise à jour.

Figure 11 : La filière "Nanomatériaux"

5 Conclusions de l'étude prospective sur les nanomatériaux

La taille nanométrique

Un nano-matériau est composé ou constitué de nano-objets (dont la taille est comprise entre 1 et 100 nm) qui présentent des propriétés spécifiques à l'échelle nanométrique. En parallèle de la démarche de miniaturisation, dite "top-down", se développe une autre démarche, dite "bottom-up", qui consiste à construire de façon contrôlée à partir d'atomes et de molécules de nouveaux édifices et structures.

Un marché à fort potentiel de développement

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 devrait atteindre plus de 700 milliards d'euros. En 2010-2015, les enjeux économiques liés à l'avènement des nanotechnologies au niveau mondial atteindront 1 000 milliards d'euros par an et concerneront directement l'emploi de près de 2 millions de personnes. Les nanomatériaux, ainsi que leurs procédés de mise en œuvre, devraient générer la plus grande part de ce marché. Ainsi l'impact économique global lié à l'utilisation de nanomatériaux devrait représenter 34 %.

Une volonté européenne de soutien aux nanomatériaux

En Europe, la Communauté Européenne et certains pays membres ont tenté de stimuler la recherche sur les matériaux avancés dès le début des années 90 mais la constitution d'un réel système organisé et collaboratif sur les nanotechnologies, intégrant les nanomatériaux, fait acte de naissance en 2002 avec le 6^{ème} Programme Cadre (PCRD).

La France se situe plus généralement en troisième position en Europe dans le domaine des nanomatériaux sur plusieurs critères.

	Europe	Allemagne	Royaume Unis	France
Nombre de start-up et création d'entreprises en nanotechnologies	50	18	11	10
Nombre de start-up travaillant dans les nanomatériaux (hors instrumentation)	25	7	7	5
Nombre de projets européens du 5^e PCRD financés dans le domaine des nanomatériaux (hors instrumentation) et participation des pays	92	55	47	36

Un besoin d'intégration des compétences « amont-aval »

Lors de l'enquête réalisée au niveau national, les laboratoires de recherche évoquent la nécessité de collaborer avec les industriels pour comprendre leurs besoins et ainsi aller plus loin dans l'élaboration ou la caractérisation des nanomatériaux. Cet échange serait également un moyen évident pour montrer les larges possibilités des nanomatériaux qui peuvent être utilisés pour des nouvelles fonctions et applications.

L'utilisation des nanomatériaux par l'industrie s'accompagne d'une démarche itérative entre les laboratoires (devant intégrer au stade de la recherche les contraintes des industriels), les industriels des nanomatériaux, et les industriels des secteurs destinataires des nanomatériaux.

Pour leur part, les industriels semblent globalement avoir bien intégré les possibilités offertes par les nanomatériaux, sans toutefois s'appropriier l'ensemble des éléments liés aux innovations de rupture. En effet, les attentes face au développement de ces matériaux portent sur les besoins d'industrialisation et l'avantage économique qu'ils pourraient en tirer. Ces deux motivations seront des moteurs forts pour le développement des nanomatériaux.

De part le caractère transversal des nanomatériaux, les enjeux technico-économiques couvrent directement ou indirectement l'ensemble des secteurs industriels au niveau national.

Des thématiques développant des synergies entre les industriels et la recherche

Les thématiques matérialisant les enjeux des nanomatériaux et leur déclinaison opérationnelle pourront s'appuyer sur des démarches de politique publique en cours au niveau national et international, favorisant particulièrement le décloisonnement et le maillage des acteurs de la filière.

Répondant à cette logique de décloisonnement, les recommandations intègrent quatre dimensions complémentaires :

- les fiches thématiques, ayant vocation à favoriser un dialogue entre tous les acteurs de la filière autour de neuf thématiques identifiées,
- les enjeux transversaux, ayant vocation à faire émerger des tendances propres aux nanomatériaux,
- les objectifs de soutien, largement ouverts sur les mesures transversales de soutien aux entreprises industrielles initiées par les partenaires publics,
- la déclinaison de court terme des recommandations, en associant des partenaires publics, des laboratoires de recherche et des partenaires privés autour de la volonté commune d'utilisation industrielle des nanomatériaux.

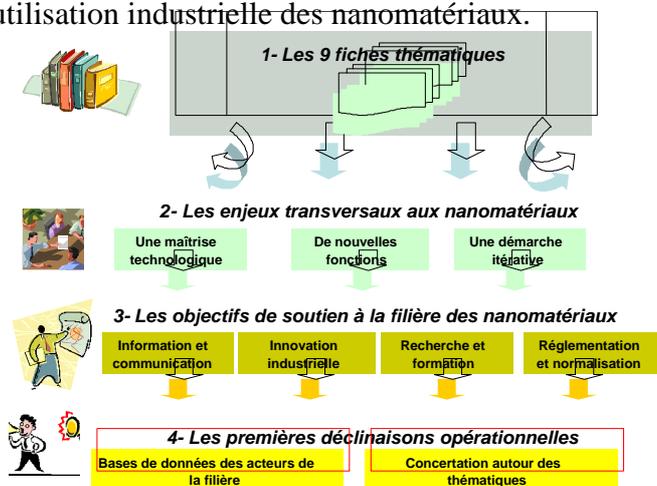


Figure 12 : Les quatre dimensions des actions en faveur du développement des nanomatériaux

6 Annexes

6.1 Le comité de pilotage de l'étude

Pilote de l'étude pour la DIGITIP

Gilles LE MAROIS

12 rue Villiot – 75572 Paris Cedex 12

DiGITIP

Le Bervil, 12 Rue Villiot – 75572 Paris Cedex 12

DIGITIP OSI

Grégoire POSTEL-VINAY

DIGITIP SIMAP

Michel MUSSINO

DIGITIP SIMAP

Jacques THERNIER

DIGITIP STSI

Ivan FAUCHEUX

DIGITIP STSI

Hubert GALINAT

Membres du Comité de Pilotage, hors DiGITIP

(classement alphabétique, les adresses sont précisées avec l'accord des personnes citées)

AIR LIQUIDE

Jean FRIEDT

Air Liquide Electronics - 75 Quai d'Orsay – 75007 Paris

ANVAR

Sylvie DUMARTINEIX

Direction de la Technologie - 43 rue Caumartin – 75436 Paris cedex 09

ARAMM

Jean-Claude PREVOT et Yves BERTAUD

Savoie -Technolac - BP 292 - 73375 Le Bourget du Lac Cedex

ATOFINA

Michel GLOTIN

4-8 Cours Michelet - La Défense 10 – 92091 Paris La Défense Cedex

CEA/DRT

Frédéric SCHUSTER

CETIM

Michel CARTON

52 Avenue Félix Louat – 60304 Senlis Cedex

CNRS

Fabienne PELLE

CSTB

Robert COPE

84 Avenue Jean Jaurès - Champs sur Marne – 77421 Marne La Vallée Cedex 2

CSTB Enveloppe et Revêtements - Caractérisation Physique des Matériaux 24 rue Joseph Fourier – 38400 Saint Martin d'Hères	Daniel QUENARD
DARPMI	Daniel LALANNE et Bernard HYON
DGA Direction des systèmes de forces et de la prospective Service des stratégies techniques et des technologies communes Département Matériaux 303 Armées	Christine LEVY
DRRT-RA	Jean-Pierre LAHEURTE
EADS 12 rue Pasteur - BP 76 – 92152 Suresnes Cedex	Didier LANG
ENSMP Ecole des Mines de Paris UMR CNRS 7635 Rue Claude Daunesse - BP 207 – 6904 Sophia Antipolis Cedex	Alain BURR
ENSMP UMR-CNRS 7633 - BP 87 – 91003 Evry Cedex	Alain THOREL
ENSMP	Jean-Pierre TROTTIER
Fédération de la Plasturgie	Corinne HEMBERT
Futuris/ANRT	Constant AXELRAD
IFTH 2 rue de la Recherche - Bp 637 – 59656 Villeneuve D'Ascq Cedex	Laurence CARAMARO et Pascal RUMEAU
L'OREAL	Dominique ESCLAR
MRNT/DR Direction de la Recherche -1 rue Descartes -75231 Paris Cedex	Jean-Louis ROBERT
Ecole Polytechnique	Claude WEISBUCH
RHODIA Rare Earth and Silicas Systems ZI, 26 rue Chef de Baie – 17041 La Rochelle Cedex	Bruno ECHALIER
SAINT-GOBAIN	Hervé ARRIBART
SNECMA	Alain LASALMONIE

Pour Développement et Conseil

Dominique Carlac'h
57 chemin du Vieux Chêne – 38 240 MEYLAN Zirst
et son équipe : www.develop-conseil.com

Expert technique indépendant, associé à la réalisation de l'étude
Claude CHIANELLI
2 rue de la Croix de Mission – 77140 Nemours

Dominique Carlac'h, Directrice de Développement et Conseil, tient à remercier l'ensemble des membres du comité de pilotage pour leur soutien actif lors de l'étude et les différentes relectures des documents. Les experts scientifiques et industriels ayant exprimé leur avis sont également chaleureusement remerciés pour leur contribution.

6.2 Sources documentaires utiles

INN [Canada]

http://nint-innt.nrc-cnrc.gc.ca/home/index_f.html

Institut National de Nanotechnologie du Conseil National de Recherches Canada

Réseau Matériaux Québec [Québec]

<http://reseaumateriauxquebec.ca/fr/home.asp>

Répertoire des conférences et manifestations liées au développement des matériaux au Québec

California Council on Science and Technology [USA]

<http://www.ccst.us/ccst/pubs/nano/biblio.html#reports>

Bibliographie annotée d'études et analyses internationales et américaines concernant les nanosciences

Nanojournal.org [USA]

<http://www.nanojournal.org>

Site répertoriant les publications d'articles dans le domaine des nanotechnologies

NNI : National Nanotechnology Initiative [USA]

<http://www.nano.gov/>

Organe du gouvernement américain chargé du financement des nanotechnologies aux Etats-Unis

Mission pour la Science et la Technologie [France-USA]

<http://www.france-science.org/home/hp.asp>

La Mission pour la Science et les Technologies propose des articles portant sur les nanotechnologies et nanomatériaux aux Etats-Unis, via l'ambassade de France.

Nanobusiness Alliance [USA]

<http://www.nanobusiness.org/>

La nanobusiness alliance propose des publications relatives aux marchés liés au développement des nanotechnologies

Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials By Design: From Fundamentals to Function [USA]

http://www.chemicalvision2020.org/pdfs/nano_roadmap.pdf

Site Internet consacré à l'industrie Chimique. Le lien renvoie plus spécifiquement à une étude portant sur les enjeux des nanomatériaux pour l'industrie chimique

Hitachi Research Institute (HRI) [Japon]

<http://www.hitachi-hri.com/english/>

Serveur technologique du Groupe Hitachi

Nanomaterials Laboratory [Japan]

http://www.nims.go.jp/nanomat_lab/

Répertoire des groupes de recherche japonais en nanotechnologies et nanomatériaux

MINANET [Europe]

<http://www.minanet.com/index.asp>

Site de la Commission Européenne répertoriant les activités de recherche dans les micro et nanotechnologies en Europe

ENA : European Nanobusiness Association [Europe]

<http://www.nanoeurope.org/index2.html>

Association destinée à promouvoir la compétitivité de l'industrie européenne dans le domaine des nanotechnologies

NANOFORUM [Europe]

<http://www.nanoforum.org/>

Source d'information européenne sur les nanotechnologies. Propose notamment un glossaire des nanotechnologies

Nanotechnologies and nano-sciences, knowledge-based multifunctional materials and new production processes and devices [Europe]

<http://www.cordis.lu/fp6/nmp.htm>

Site Internet de la Commission Européenne dédié à la priorité thématique 3 du 6^{ème} PCRD consacré aux nanosciences et aux nanomatériaux

Institute of Nanotechnology [UK]

<http://www.nano.org.uk/>

Institut britannique des nanotechnologies proposant des publications, des images nano, des liens et une bibliographie d'ouvrage et études

CMP CIENTIFICA [Espagne]

<http://www.cmp-cientifica.com/>

CMP Cientifica organise des conférences et réalise des rapports sur la problématique des nanotechnologies. On trouve notamment sur ce site le catalogue des publications et la liste des manifestations nanotechnologies organisées.

Groupe Français d'Etudes et d'Applications en Polymères [France]

<http://www.gfp.asso.fr/>

Institut de promotion du développement des polymères dans les organismes d'enseignement et de recherche et au sein du tissu industriel français.

ARAMM [France]

<http://www.agmat.asso.fr/>

L'Agence Rhône-Alpes de la Maîtrise des Matériaux a pour objectif d'appuyer les entreprises dans le choix et la mise en œuvre de matériaux et de participer au développement de matériaux et procédés innovants

Nirv@na [France]

<http://www.ecriin.asso.fr/pages/agenda/program/nanoris0615.html>

Nouvelle initiative de recherche pour la valorisation des architectures nanostructurées et adaptatives

MINATEC – CEA/Léti [France]

<http://www.minatec.com>

Pôle d'innovation et d'expertise majeur en Europe pour les micro et nanotechnologies

Financement des nanosciences et nanotechnologies [France]

<http://www.rdt5962.org/membres/Veille/LV07-2.pdf>

Rapport au Ministre de la Jeunesse de l'Education et de la Recherche (2004)

NANOMICRO [France]

<http://www.nanomicro.recherche.gouv.fr/>

Portail nanosciences du Ministère de la Recherche

Club Nano-Micro technologies [France]

<http://www.clubnano.asso.fr/>

Association dont l'objectif est la diffusion des connaissances et la mise en relation du monde de la recherche et des industriels

RMNT [France]

<http://www.rmnt.org/>

Réseau de recherche en Micro et Nano Technologies : programme de soutien au développement de projet dans le domaine des micro-nano technologies

RNMP [France]

<http://www.recherche.gouv.fr/technologie/reseaux/materiaux.htm>

Réseau National Matériaux et Procédés : programme de soutien au développement de projet dans le domaine des matériaux et procédés

Les nanotechnologies [France]

<http://www.annales.org/ri/tab-ri.html>

Numéro Spécial des Annales des Mines consacré aux nanotechnologies paru dans la série « Réalités industrielles », février 2004

La Lettre de la DiGITIP [France]

http://www.telecom.gouv.fr/documents/lettre_digitip.htm

Le n° 24, paru le 24 mars 2004 est consacré aux nanomatériaux

6.3 Abréviations du document et glossaire des termes

<u>ANVAR</u>	Agence Nationale de la Valorisation de la Recherche
<u>ARAMM</u>	Agence Rhône-Alpes pour la maîtrise des matériaux
<u>CEA</u>	Commissariat à l’Energie Atomique
<u>CETIM</u>	Centre Technique des Industries Mécaniques
<u>CNRS</u>	Centre National de la Recherche Scientifique
<u>CSTB</u>	Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
<u>DARPMI</u>	Direction de l’Action Régionale et de la Petite et Moyenne Industrie
<u>DGA</u>	Délégation Générale pour l’Armement
<u>DIGITIP</u>	Direction générale de l’industrie, des technologies de l’information et des postes
<u>DRRT</u>	Délégation Régionale à la Recherche et à la Technologie
<u>DRT</u>	Direction de la Recherche Technologique
<u>ENSMP</u>	Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris
<u>FPL</u>	Fédération des Polyméristes Lyonnais
<u>IFTH</u>	Institut Français Textile Habillement
<u>MRNT</u>	Ministère de la Recherche et des Nouvelles Technologies

6.4 Tables des illustrations et des tableaux

Tableaux

<i>Tableau 1 : La définition des nanomatériaux</i>	12
<i>Tableau 2 : Les trois principaux procédés d'élaboration des nanomatériaux</i>	16
<i>Tableau 3: Financements nationaux des nanotechnologies en 2002 en Asie</i>	21
<i>Tableau 4 : Répartition des budgets du 5ème PCRD par thématique</i>	22
<i>Tableau 5 : 6^e PCRD, résultats du premier appel d'offres pour la thématique NMP</i>	23
<i>Tableau 6 : 6^e PCRD, résultats du premier appel d'offres: projets retenus à coordination française</i>	24
<i>Tableau 7 : Les ordres de grandeur dans le monde des nanomatériaux au sein des nanotechnologies en 2003</i>	27
<i>Tableau 8 : Synthèse des applications des nanomatériaux et verrous associés cités par les laboratoires de recherche publics lors des entretiens</i>	54

Illustrations

<i>Figure 1 : Démarche de réalisation de l'étude sur les Nanomatériaux</i>	7
<i>Figure 2 : Revenu mondial généré par les nanotechnologies</i>	17
<i>Figure 3 : Croissance des marchés des nanotechnologies</i>	17
<i>Figure 4 : Impact économique des nanotechnologies en 2010</i>	18
<i>Figure 5: Méthodologie de l'enquête montante</i>	38
<i>Figure 6 : Méthodologie de l'enquête descendante</i>	39
<i>Figure 7 : Besoins d'améliorations de leurs produits exprimés par les industriels</i>	40
<i>Figure 8 : Les volumes de produits finis concernés par les améliorations des propriétés physico-chimiques des matériaux</i>	44
<i>Figure 9 : Positionnement des thèmes poussant les industriels à utiliser les nanomatériaux</i>	50
<i>Figure 10 : Les applications et les verrous identifiés auprès des laboratoires de recherche publics</i>	53
<i>Figure 11 : La filière "Nanomatériaux"</i>	97
<i>Figure 12 : Les quatre dimensions des actions en faveur du développement des nanomatériaux</i>	101

6.5 Annotations référencées dans le document

Les annotations sont précisées dans le document en chiffres romains et font référence aux commentaires ci dessous.

^I Techniques de l'ingénieur Nanomatériaux : structure et élaboration

^{II} OCDE Observateur : *Les nanotechnologies changent d'échelle* », Direction de la science, de la technologie et de l'industrie, 06 juin 2003

^{III} N. Tinker (NBA Executive Vice President) : « 2001 Business of nanotech survey », *NanoBusinessAlliance*, octobre 2001.

^{IV} M.C. Roco, National Science Fondation –Chair U.S. National Science and Technology Council's subcommittee on Nanoscale Science, Engineering and Technology (NSET) : "International Strategy for nanotechnology research", in *Journal of nanoparticles*, n° 3, vol 5-6, 12/2001, pp 353-360.

^V Hitachi Research Institute, "Personal Communication", 2001, cite par : M.C. Roco ; W Sims Bainbridge : « Societal implications of nanoscience and nanotechnology », *National Science Foundation*, march 2001

^{VI} Source : *Secor* : « Projet Nanotechnologies de la Table métropolitaine d'emploi-Québec », novembre 2002.

^{VII} A. Thorel, Maître de recherche à l'École des Mines de Paris, chef de projet « Matériaux » des Grandes Ecoles : « Rapport sur l'atelier : Nanomaterials : towards engineering applications », Montréal 22-25 octobre 2000.

^{VIII} *Business Communications Company Inc* : "Opportunities in Nanostructured Materials : biomedical pharmaceuticals and cosmetic applications", août 2001.

^{IX} *Business Communications Company Inc* : "Opportunities in Nanostructured Materials : energy, catalytic and structural applications", décembre 2001.

^X « Nanocomposites à charges lamellaire et matrice polymère », 2003 compte rendu d'un atelier de prospective sur le sujet, *Belgium Polymer Group, ARAMM, INSA-Lyon, FPL*.

^{XI} *Freedonia Group* : « Nanomaterials US Industry Study », juin 2003.

^{XII} NNI Initiative, *National Nanotechnology Investment in FY 2003*, <http://www.nano.gov/2003budget.html>

^{XIII} S. Hagège : « Des nanosciences au nanobusiness, un modèle à l'américaine », *Ambassade de France aux Etats-Unis, Mission pour la science et la technologie*, 09/2002.

^{XIV} S. Hagège, ouvrage référencée ci dessus

^{XV} S. Hagège, ouvrage référencée ci dessus

^{XVI} J. Boileau : "Nanotechnologies et Défense", *Défense*, n° 96, décembre 2001.

^{XVII} I Asia Pulse, CMP-Cientifica, repris par Dr. Cristina Roman : "It's ours to lose, an analysis of EU Nanotechnology funding and the Sixth Framework Programme", *ENA (European Nanobusiness Association)*, 3rd October 2002.

^{XVIII} E. Gaffet : « Nanomatériaux », *Innovation 128*, 1998.

^{XIX} M.C. Roco : « Research Programs on nanotechnology in the world », in : *Nanostructure science and technology, R&D status and trends in nanoparticles, nanostructured materials, and nanodevices*, Chapitre 8, WTEC, 09/1999.

^{XX} M.C. Roco, ouvrage reference ci-dessus

^{XXI} Rapport de l'IGAENR n° 2004-002 "Le financement des nanotechnologies et des nanosciences: l'effort des pouvoirs public en France, comparaisons internationales", janvier 2004.

^{XXII} Nanobusiness Alliance 2002

^{XXIII} « European Micro & Nano technologies status : Minanet analysis », Hanovre, 8 avril 2003 :

http://minanet.com/documents/European_Micro_Nano_Status_Minanet_analysis_v2.pdf

^{XXIV} The nanotechnology opportunity Report 2nd edition June 2003

^{XXV} Calcul à partir des activités des start-up impliquées dans les nanotechnologies

^{XXVI} R.W. Siegel : "Nanostructure science and technology, a worldwide study", *National Science and Technology Council (NSTC) et WTEC*, 1999.

^{xxvii} Définition officielle citée INSEE. http://www.insee.fr/fr/nom_def_met/definitions/html/nomenclature-econom-synthese.htm