



Développement et régulation des NANO technologies



DÉVELOPPEMENT ET RÉGULATION DES NANOTECHNOLOGIES



MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE,
DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET
DE LA MER

MINISTÈRE DE L'ÉCONOMIE,
DE L'INDUSTRIE ET DE L'EMPLOI

MINISTÈRE DU TRAVAIL,
DES RELATIONS SOCIALES,
DE LA FAMILLE, DE LA SOLIDARITÉ
ET DE LA VILLE

MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE

MINISTÈRE DE LA DÉFENSE

MINISTÈRE DE LA SANTÉ ET DES SPORTS

MINISTÈRE DE L'ALIMENTATION,
DE L'AGRICULTURE
ET DE LA PÊCHE



Dossier du **maître d'ouvrage**
sur des options générales
en matière de
développement
et de **régulation**
des **nano** technologies

introduction

Plusieurs constats préoccupants pour le citoyen et les pouvoirs publics marquent ce début de XXI^e siècle au premier rang desquels la raréfaction des ressources naturelles, le renchérissement de leurs coûts d'exploitation, les émissions polluantes et leurs conséquences sur le climat et la santé ou le vieillissement de la population.

Les progrès de la science, l'amélioration de la connaissance et les facilités de communication laissent entrevoir des possibilités de maîtriser ces évolutions rapides ou leurs conséquences. La prise de conscience de l'imbrication des aspects liés à l'environnement, à l'économique et au social, et leur approche globale ont permis l'émergence du concept de développement durable et sa mise en œuvre politique.

Dans ce contexte, marqué en outre par la concurrence internationale, les nanotechnologies offrent de nombreuses perspectives : susceptibles d'entraîner des économies de matière première et de coûts, performantes dans certaines applications médicales, permettant d'améliorer les qualités et l'accès par tous à de nombreux produits, elles peuvent apporter des réponses à des problèmes collectifs et satisfaire de nombreux besoins individuels. Si elles restent le sujet de nombreuses controverses, elles n'en sont pas moins devenues un enjeu majeur dans la recherche et le développement et bénéficient de financements prioritaires au sein de tous les pays ambitieux en matière de hautes technologies.

Cependant ces technologies, qui s'appuient sur des nanomatériaux et nano-objets fabriqués pour les propriétés particulières qui

s'expriment à l'échelle du nanomètre, soit du milliardième du mètre, sont à ce jour largement inconnues du grand public alors que des usages sont déjà répandus, et posent de très nombreuses questions, parmi lesquelles : de quoi s'agit-il exactement ? Où les trouve-t-on ? Quels sont leurs bénéfices et leurs limites ? Auront-elles au bilan des effets plutôt positifs ou négatifs considérant leur impact potentiel sur la santé, l'environnement, l'économie, l'emploi, le bien être, les libertés fondamentales ? Que deviendront-elles après utilisation des produits qui les intègrent ? Quels pourront être leurs impacts sur l'équilibre entre les pays, pour la place du nôtre sur la scène internationale ? Quelles sont les possibilités de choix individuel et collectif à ce stade de leur développement et dans un contexte de mondialisation ? Vont-elles bouleverser notre mode de vie ? Quels en sont les risques ? Quelles précautions élémentaires faut-il prendre ?

Depuis cinq ans, en France, plusieurs initiatives, ancrées sur la recherche et sa valorisation, ont été prises par les pouvoirs publics et des organismes compétents sur les plans scientifique et technique, afin d'appeler l'attention sur l'importance de cette innovation technologique majeure et ses enjeux. Des avis ont été sollicités auprès d'instances spécialisées (agences de sécurité sanitaire notamment) sur des aspects touchant à la prévention des risques pour la santé, et auprès de comités d'éthique.

En 2007, le temps fort du Grenelle environnement, rassemblant aux côtés des représentants de la Nation les partenaires de la société civile (professionnels, experts,



Nanotechnologies et nanomatériaux : état des lieux et axes de développement

Les quatre premiers chapitres du dossier apportent une information synthétique sur ces technologies et leurs applications. Les propriétés spécifiques des particules et objets à l'échelle nanométrique permettent de nombreuses applications, dans des domaines très diversifiés, résumées dans ce dossier et situées en terme d'enjeux pour la recherche et le développement économique. Une présentation de l'état des connaissances concernant les risques associés, pour la santé et l'environnement, complète cet état des lieux.

Nanotechnologies et nanomatériaux : état des lieux et axes de développement

Champ
et définitions

8

26

Applications

actuelles et envisagées

Risques
pour la santé
et l'environnement

52

66

Recherche,
innovation
et développement
économique



Nanotechnologies et nanomatériaux : état des lieux et axes de développement



Champ et définitions

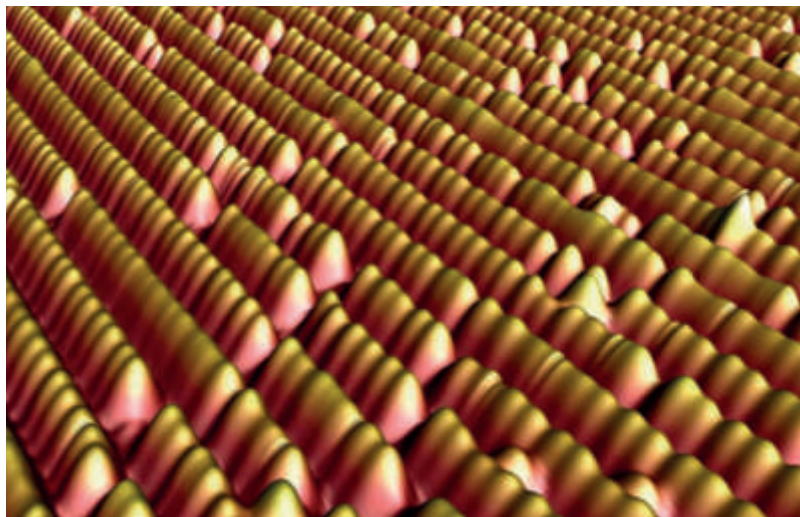


Au-delà de la taille, de nouvelles propriétés

Nanosciences et nanotechnologies ne se présentent pas comme de nouveaux champs disciplinaires. Elles se caractérisent plutôt comme une forme d'appréhension nouvelle de disciplines classiques déjà existantes. Pour autant, elles ne sont pas une simple étape de la miniaturisation : elles se caractérisent par la mise en œuvre au sein des nano-objets, nano-dispositifs ou nano-systèmes de nouvelles lois de comportement et de nouvelles propriétés qui apparaissent et déterminent leur fonctionnement.

En effet, à cette échelle, les matériaux et les systèmes peuvent révéler des caractéristiques qu'ils n'ont pas lorsque la taille est plus importante. Pour comprendre et exploiter ces propriétés, il faut faire appel aux lois de la physique quantique, qui prédit des phénomènes parfois inhabituels, comme l'**e et tunnel**.

Chaînes d'atomes d'or sur une surface de silicium observées au microscope à e et tunnel.



Ainsi, les lois de la mécanique quantique montrent que les nanomatériaux possèdent aussi très souvent des propriétés optiques (absorption de la lumière par exemple), électriques et magnétiques différentes de celles de leurs homologues macrostructurés. Ils se prêtent par exemple au déclenchement de la réaction **catalytique**. Une grande partie de la chimie utilise les interactions de surface (lire l'encadré sur les produits émergents) : on comprend dès lors l'avancée considérable que constituent les nanotechnologies.

Outre les effets particuliers issus de la mécanique quantique, d'autres propriétés inhérentes aux nano-objets proviennent en grande partie de leur grand rapport surface volume comparativement aux objets de plus grande taille.

CITATION

Heinrich Rohrer, prix Nobel de physique en 1986, décrivait ainsi la nanoscience : « Elle s'intéresse aux nano-objets individualisés dont il convient de mesurer, de comprendre mais aussi de modifier sélectivement les propriétés ; ces nano-objets, on souhaite par ailleurs pouvoir les manipuler, les positionner et les usiner. Il s'agit donc du développement de nouveaux concepts permettant de traiter ces nano-objets et tout spécialement une grande collection d'entre eux ».

DEFINITION

L'e et tunnel

L'e et tunnel est un effet déroutant se produisant à l'échelle du nanomètre. Il désigne la propriété que possède un objet quantique de franchir une barrière de potentiel, franchissement impossible selon la mécanique classique. Prenons un exemple imagé : d'après les lois de la mécanique classique, il est impossible à un ballon de football de passer par-dessus une colline si on ne lui donne pas une énergie initiale suffisante (un coup de pied...). Il montera à une certaine hauteur, puis redescendra en rebroussant chemin. La mécanique quantique permet de montrer qu'un électron, même si son énergie est insuffisante, a une probabilité non nulle de franchir la colline : il peut passer de l'autre côté comme s'il avait trouvé un tunnel (voir aussi microscope à e et tunnel page 16)

DEFINITION

Catalyse

Action d'un élément qui accélère ou ralentit une réaction chimique, sans lui-même se modifier. Les secteurs du raffinage, de la pétrochimie, de la chimie de spécialité et de la chimie fine, par exemple, sont sans cesse à la recherche de catalyseurs plus actifs (permettant d'économiser de l'énergie), plus sélectifs (générant moins de sous-produits), à durée de vie accrue et à coûts plus compétitifs.



la gamme <100 nm), ce qui représente entre 1 et 2 nanogrammes de matière.

Les nanoparticules manufacturées n'ont toutefois pas attendu la fin du XX^e siècle pour voir le jour. Bien avant l'utilisation du préfixe nano, les premières nanoparticules que l'homme a émises datent d'il y a 500 000 ans, quand l'humanité a commencé à maîtriser le feu. La fumée contient en effet de la suie constituée de recombinaisons d'atomes de carbone issus de la décomposition, à très haute température, des molécules élémentaires du bois.

D'autres produits ont été créés par l'homme en recourant aux propriétés de l'infiniment petit sans qu'il soit encore conscient du véritable potentiel offert à cette échelle. On sait par exemple que les femmes de l'Antiquité se teignaient les cheveux d'un noir profond grâce à une teinture, qui comportait des cristaux de sulfure de plomb (galène) d'une taille d'environ 5 nanomètres. Ces nanoparticules, présentes en milliards dans une poudre très fine, étaient suffisamment petites pour pénétrer à l'intérieur du cheveu et se substituer à la mélanine, qui le colore naturellement.

De même, on a découvert que la dureté exceptionnelle des fameuses épées de Damas, dont le tranchant était redouté des croisés, était due à la présence, dans leur acier, de nanotubes de carbone de fer, encapsulés dans des nanotubes de carbone. Celles-ci résultaient de divers traitements thermiques d'un minerai de fer très chargé en carbone, provenant d'Inde. Si cet exemple permet de montrer que les nanotubes de carbone avaient déjà été utilisés empiriquement au Moyen Âge, il souligne surtout une propriété précieuse des nanoparticules : la capacité à modifier les caractéristiques des matériaux massifs lorsqu'ils sont incorporés dans ceux-ci à des doses infinitésimales.

Plus récemment, et dans un registre moins guerrier, les chercheurs ont découvert que les vitraux de certaines cathédrales contiennent des nanoparticules. En effet, les artistes verriers de l'époque obtenaient diverses couleurs du verre en y incorporant de l'or. Il s'avère que leurs techniques leur permettaient de maîtriser la taille des particules d'or qui se formaient dans le verre en fusion et que c'est cette taille qui donnait les différentes couleurs.



Vitrail, épée de Damas,

Des produits ont été créés par l'homme en recourant aux propriétés de l'infiniment petit sans qu'il soit encore conscient du véritable potentiel offert à cette échelle. On a retrouvé des nanotubes de carbone dans des épées produites avant le XI^e siècle. Les verriers du Moyen-Âge, pour réaliser des vitraux, avaient constaté que, selon le temps de broyage, l'or, réduit à l'état de poudre très fine, changeait de couleur.

DEFINITIONS

Plusieurs termes, qui font encore débat aux niveaux scientifique, juridique et politique, sont employés pour décrire la technologie et les matériaux utilisés à l'échelle nanométrique. Ils ont comme caractéristique commune leur dimension approximative entre 1 et 100 nm dans au moins une des trois dimensions et ils font intervenir de nouvelles propriétés physiques et chimiques spécifiques à cette petite échelle.

Nanomatériaux : terme générique utilisé pour les matériaux dont la structure interne ou externe est de dimension nanométrique dans au moins une des trois dimensions. Les nanomatériaux incluent les nano-objets.

Nano-objet : objet de dimension nanométrique dans au moins une des trois dimensions, en particulier les nanoparticules, les nanotubes et les nanoplaques (ou nanofeuillets).

Nanoparticule : nano-objet ayant les trois dimensions à l'échelle nanométrique. Il convient de distinguer les nanoparticules d'origine naturelle (poussières volcaniques par exemple), les nanoparticules d'origine humaine non intentionnelles (particules émises lors de combustion par exemple) et les nanoparticules manufacturées.

Nanosystème : système résultant de l'assemblage de plusieurs composants d'échelle nanométrique. Si les nanomatériaux existent à l'heure actuelle, les nanosystèmes verront le jour dans un futur plus ou moins éloigné.

Champ et définitions

13

Deux grands types d'approche : réduire ou construire

Historiquement, le nanomonde réunit plusieurs communautés scientifiques : celles des physiciens, des chimistes, des biologistes, des métallurgistes, des céramistes et plus généralement des sciences des matériaux. Les spécialistes de la *matière divisée* ont constaté que l'ajout de microstructures modifie fortement leurs propriétés. Les physico-chimistes de la *matière molle* ont, de leur côté, mis en évidence les propriétés de la matière construite à partir d'agrégats auto-organisés.

Ainsi, les matériaux et composants nanométriques sont généralement obtenus de deux manières différentes.

L'*approche descendante* ou top-down consiste à réduire vers le nanomètre les dimensions critiques des éléments existant déjà aux tailles macro ou microscopiques. Ainsi les matériaux de taille nanométrique peuvent être obtenus à partir de matériaux massifs par des méthodes telles que les techniques de broyage, de compactage et de forte déformation.

Les nanocomposants sont, quant à eux, obtenus par différentes méthodes physiques ou chimiques. Un exemple emblématique est celui des composants électroniques où la diminution constante des dimensions conduit à une augmentation de la vitesse de fonctionnement et de la capacité de stockage des ordinateurs et puces (voir la loi de Moore page 39). Les progrès enregistrés par cette approche tiennent à une amélioration des techniques de fabrication qui sont devenues de plus en plus précises.

Cependant, plus on s'approche des dimensions nanométriques, plus la miniaturisation trouve ses limites. En effet, d'une part, les phénomènes physiques mis en jeu aux échelles nanométriques sont différents des phénomènes physiques observés à l'échelle macroscopique ; d'autre part, dans plusieurs domaines d'activités comme la nanoélectronique, il devient difficile de réaliser ces structures à des coûts raisonnables.

La deuxième, dite *approche ascendante* ou bottom-up, consiste à assembler des briques élémentaires (atomes, molécules...) afin d'obtenir des nano-objets artificiels exploitables pour leurs propriétés. Il est ainsi possible de synthétiser des nanoparticules, c'est-à-dire des assemblages d'une centaine d'atomes.

Parmi les nano-objets synthétisés par l'approche ascendante, les nanotubes de carbone ont été le sujet de nombreuses études à cause de leur potentiel d'applications multiples (résistance mécanique, propriétés électroniques, optiques, etc.). La synthèse et l'exploitation d'autres éléments simples ont déjà été démontrées en laboratoire, mais les perspectives d'applications sont encore lointaines.

C'est ainsi que le concept de moteur moléculaire a vu le jour : le transport contrôlé de molécules d'un endroit à un autre sur une surface est désormais une quasi-réalité.

Si l'approche descendante a déjà fait ses preuves, puisque des composants électroniques de dimension nanométrique font désormais partie des processeurs et des téléphones portables, les perspectives d'applications de l'approche ascendante, souvent encore au stade du concept ou de prototypes de laboratoires, sont plus lointaines.

Il existe une méthode intermédiaire permettant de déplacer de plus grandes quantités d'atomes en s'appuyant sur la manipulation de nanoparticules (et non plus d'atomes seuls) ou en faisant appel à l'auto-organisation. Cette méthode est appelée métasynthèse.

EXPLICATION

La matière divisée

Domaine des chercheurs (chimie, environnement, informatique...) qui se consacrent à l'étude de toutes les formes divisées de la matière (suspensions, gels, pâtes, solides poreux, bres, composites, couches minces ou agrégats). Leur objectif : comprendre comment cet état de division contrôle la manière dont le matériau s'organise, se déforme, réagit, s'use, se corrode et vieillit.

EXPLICATION

La matière molle

La physique de la matière molle décrit les propriétés de fluides complexes et de systèmes moléculaires organisés de manière intermédiaire entre un liquide et un solide. Les échelles de taille pertinentes sont entre 1 nm et 100 nm.

DEFINITION

Le microscope à effet tunnel a été inventé en 1981 par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, prix Nobel de physique, et utilise les interactions qui se produisent entre deux molécules très proches. Ainsi, lorsqu'une pointe nanométrique conductrice passe près d'une surface, un courant électrique très faible se crée permettant d'imaginer les atomes ou d'obtenir une information sur leur nature chimique (voir aussi définition de l'effet tunnel page 9).

L'ATOME AU CŒUR DE LA RECHERCHE EN NANOSCIENCES

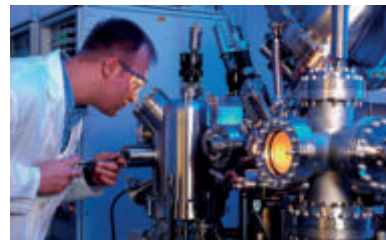
Avant de mettre à portée l'échelle nanométrique dans diverses applications (évoquées des pages 38 à 40), il est nécessaire au préalable de connaître et de maîtriser les caractéristiques de la matière à cette échelle. Si la théorie de la mécanique quantique décrivant les lois qui régissent le mouvement des atomes, formulée dans les années 1920, permet de relativement bien décrire les nanoparticules et nano-objets (briques de base pour de futures applications), il n'en reste pas moins qu'une description par l'expérience reste indispensable, avant de mieux les comprendre et les maîtriser.

Les nanosciences sous-tendent les connaissances des propriétés de la matière et de sa manipulation. Elles permettent de fournir les méthodes et les outils nécessaires pour que se développent pleinement et, en sécurité, les nanotechnologies, c'est-à-dire la création de produits et d'objets exploitant les propriétés de l'échelle nanométrique.

Voir et manipuler la matière à l'échelle nanométrique, l'exemple du microscope à effet tunnel

Observer et manipuler sont deux aspects indispensables pour comprendre un phénomène. Ainsi, en rendant possible l'observation des cellules, le microscope traditionnel, mis au point par Robert Hooke en 1665, a permis à la biologie et à la médecine d'avancer considérablement dans la compréhension du fonctionnement du vivant. **Le microscope à effet tunnel** puis le microscope à force atomique sont deux outils permettant d'observer la matière à l'échelle atomique

et, sous certaines conditions, de la déplacer, atome par atome. Ces outils, associés à des logiciels de modélisation et de calcul, constituent actuellement les yeux et les bras des scientifiques dans l'exploration de la matière : sans eux, il ne serait pas possible d'étudier précisément l'agencement de la matière et les propriétés inédites présentes à la surface des atomes essentielles à de nombreuses applications en cours de développement.



Microscope à effet tunnel

Le microscope à effet tunnel, inventé en 1981, permet d'observer la surface de la matière à l'échelle des atomes et de les déplacer sous certaines conditions.

Étudier les différentes formes de la matière

Comprendre la structure et l'agencement des particules est l'une des missions essentielles des nanosciences. En effet, chaque structuration donne à la matière des propriétés spécifiques : l'eau, par exemple, présente des caractéristiques (solidité, transparence, conduction de l'électricité...) bien différentes selon qu'elle est liquide ou gelée, c'est-à-dire si les molécules qui la composent sont libres de se déplacer ou figées en cristal.

Les agencements du carbone sont actuellement l'un des secteurs les plus dynamiques en nanosciences. Il s'agit d'étudier les façons dont les atomes de carbone peuvent s'assembler entre eux, puis de déterminer les propriétés qui en découlent.



Champ et définitions

17

Comprendre le mouvement des nanoparticules

Le mouvement d'une particule de taille nanométrique est très différent du mouvement d'une particule de grosse taille comme une poussière ou une balle. Aux échelles micro et nanométrique, intervient en effet le phénomène d'agitation thermique qui joue un rôle important et parfois même prépondérant dans le positionnement des particules.

L'agitation thermique correspond au fait qu'à l'échelle nanométrique, toute particule est

en mouvement incessant. Cette agitation est liée à la température : plus un objet est chaud, plus les particules qui le composent sont agitées. Dans un cristal, les atomes, liés les uns aux autres, sont ainsi en vibration constante, la fréquence et l'amplitude de la vibration déterminant des caractéristiques importantes comme la conductivité ou l'absorption de la lumière.

Dans un gaz, chaque particule, par exemple de **fullerène**, se déplace en permanence : il en résulte des collisions incessantes entre les particules et un mouvement d'ensemble complexe à prévoir. Les mouvements et les

REPERE

Nanotubes et fullerènes

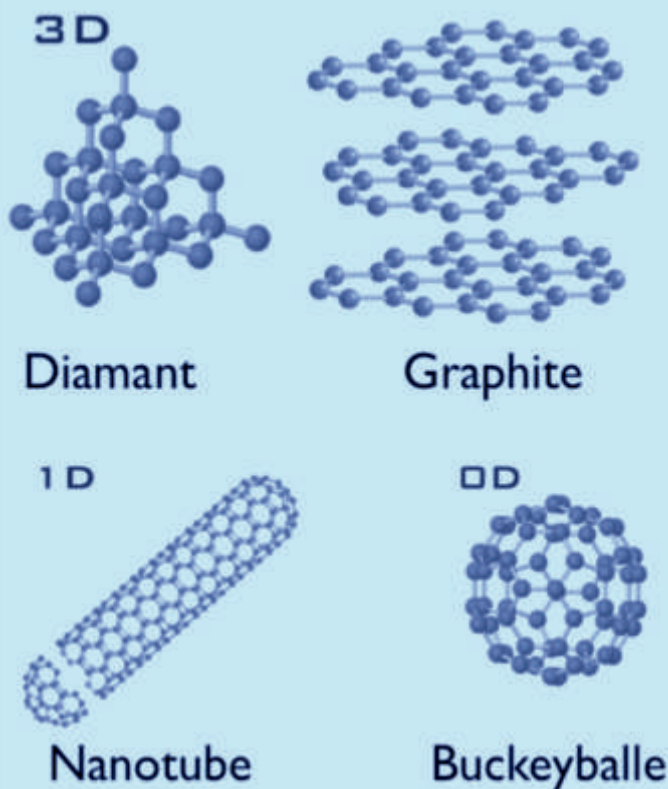
Jusqu'en 1985, on ne connaissait que deux matériaux constitués de carbone pur : le graphite et le diamant. Puis deux nouveaux agencements, qui vont ouvrir des perspectives inédites, vont être découverts : les fullerènes, en 1985, par Harold Kroto, Robert Curl et Richard Smalley (prix Nobel de chimie en 1996) et les nanotubes de carbone, en 1991, par Sumio Iijima.

Les deux semblent voués à une utilisation croissante dans les matériaux du XXI^e siècle (voir aussi dans Risques pour la santé et l'environnement pages 56 à 59 les données relatives à leur toxicité).

L'agencement des atomes de carbone

Parmi les différents types d'agencement connus du carbone, quatre donnent lieu à des applications dans la vie courante :

- l'agencement en cristal, qui donne les diamants. La formation d'un tel cristal nécessite des conditions de température et de pression particulières qui se trouvent peu fréquemment dans le manteau de la terre ;
- l'agencement en feuillet, qui donne le charbon ou le graphite utilisé communément dans les pointes de crayon. Il s'agit de l'agencement commun du carbone soumis à des conditions de pression et de température peu élevées ;
- l'agencement en nanotube de carbone où les feuillets d'atomes se referment sur eux-mêmes pour donner des tubes creux. Ces tubes, qui ne se forment naturellement qu'en quantité infime, présentent des caractéristiques très intéressantes qui dépendent de la taille du tube et de sa longueur : grande résistance à l'étirement, conductivité, absorption... ;
- l'agencement en fullerène (ou buckyball) où les atomes de carbone s'ordonnent sous forme de ballon de football de 60 atomes. Ces fullerènes présentent des caractéristiques radicalement différentes des autres formes et pourraient constituer des vecteurs pour transporter des molécules emprisonnées en leur sein.





Champ et définitions

19

Ces procédés se distinguent également par leur capacité de production. Certains sont déjà très largement utilisés dans l'industrie ; d'autres sont spécifiques aux activités de laboratoire.

Les méthodes physiques de fabrication des nanoparticules font toujours intervenir le changement d'état vapeur-liquide en phase saturée en atomes ou en ions métalliques, suivi d'une trempe rapide à partir de ces états. La condensation brutale de la vapeur métastable dans un gaz inerte (généralement l'argon) favorise la germination de très petits agrégats dont la croissance est à l'origine de la production de poudres ultra-fines. La vitesse de refroidissement et la densité de la sursaturation locale influencent la finesse des poudres obtenues.

Dans **les procédés chimiques d'élaboration** des nanoparticules, une réaction utilisant des réactifs appropriés favorise la germination, limite au maximum la croissance des grains et peut modifier la géométrie, voire la nature des produits formés.

Les méthodes mécaniques, issues directement de procédés bien maîtrisés pour des matériaux classiques, sont probablement celles qui sont le plus utilisées et qui conduisent aux plus fortes productivités (plusieurs tonnes / heure). Elles sont connues sous le terme générique de « mécanosynthèse », réactive (c'est-à-dire accompagnée de réactions chimiques modifiant la nature de la poudre) ou non.

Après avoir été produites, les nanopoudres doivent être conditionnées. En effet, elles sont très pulvérulentes et présentent la propriété d'occuper spontanément l'espace disponible et, de façon antagoniste (mais non contradictoire), en raison de leur forte énergie de surface, elles ont spontanément tendance à s'agglomérer. Il convient également de prévenir les risques d'explosion, toujours très présents en raison de la forte réactivité de surface des nanoparticules. Les nanopoudres sont donc méticuleusement stockées.

Une fois produites, les nanopoudres doivent être consolidées pour réaliser des objets. Diverses méthodes sont disponibles, dont le frittage classique, mais qui, en général, en raison des hautes températures associées à la compression, détruisent une bonne partie de la structure nanométrique. Des méthodes associant compaction et activation par plasma ou encore compression et décharge électrique sont les plus utilisées et conduisent à des pièces qui peuvent être « proches des cotes » et utilisées moyennant un très léger usinage final.



Les procédés chimiques d'élaboration des nanoparticules

Quelques considérations générales s'appliquent à ces procédés chimiques : la synthèse peut s'opérer en phase solide, liquide ou gazeuse ; les synthèses en phase liquide ou solide demandent des quantités importantes de réactifs et de produits ; en phase gazeuse, la production de nanopoudres est faible et dispersée dans un grand volume de gaz. Les grandes productivités sont donc difficiles à atteindre.

Les procédés chimiques sont les suivants :

- **les réactions en phase vapeur.** Le procédé CVD (*Chemical Vapor Deposition*) repose sur une réaction chimique entre un composé volatil du matériau à déposer et la surface du substrat à recouvrir. Elle peut être activée par un chauffage du substrat (CVD thermique) ou par l'action d'un plasma électrique (CVD assistée plasma). Le procédé est mis en œuvre dans une chambre de dépôt, généralement sous pression réduite.

Cette technique permet d'élaborer des couches minces de matériaux de natures très diverses (carbures, nitrides, oxydes, alliages métalliques, etc.). Elle permet également la synthèse de masse de nano-objets tels que des nanotubes de carbone ;

- **les réactions en milieu liquide.** La synthèse en milieu liquide est réalisée à partir de la mise en solution de réactifs qui vont conduire à la formation des nanoparticules, dont la taille est contrôlée par l'utilisation de surfactants ou en réalisant la réaction à l'intérieur de nanoréacteurs. Ce procédé permet d'obtenir des quantités industrielles de nanopoudres ;

- **les techniques sol-gel.** Elles permettent de produire en conditions industrielles des nanomatériaux à partir de solutions d'alkoxydes ou de solutions colloïdales. Les matériaux sont élaborés sous forme de monolithes, de nanopigments cristallisés ou de couches minces. Ce sont des techniques fondées sur des réactions de polymérisation inorganiques. Les techniques sol-gel sont utilisées dans de nombreux domaines : optique, magnétique, électronique, supraconducteurs à haute température, catalyseurs, et plus particulièrement céramiques inorganiques et matériaux en verre, matériaux amorphes et nanostructurés, oxydes multicomposés ;

- **les réactions en milieu solide.** De nombreux procédés de synthèse reposent sur les transformations à l'état solide, comme l'obtention d'oxydes mixtes à partir de poudres (nanométriques) des oxydes purs correspondant ($Y_2Ti_2O_7$, à partir d' Y_2O_3 et TiO_2), ou bien par réaction sur des sites spécifiques, comme Fe_2O_3 au sein d'une matrice polymère. Tous ces procédés sont toutefois peu productifs et ne permettent d'obtenir que des quantités limitées de produits. Ils sont donc aujourd'hui limités aux activités de développement ;

- **les fluides supercritiques** avec réaction chimique. Les procédés utilisant les fluides supercritiques (CO_2 ou eau avec réaction chimique) permettent d'ajuster continuellement les propriétés physico-chimiques du milieu réactionnel sur une grande échelle par ajustement des paramètres pression et température sur de petites échelles. La maîtrise des propriétés physico-chimiques du milieu permet alors de contrôler la réaction chimique et ainsi l'élaboration du matériau. Ces procédés permettent la synthèse de matériaux inorganiquement divisés, comme les métaux, les oxydes et les nitrides. Néanmoins, leur faible productivité les cantonne actuellement aux activités de développement.

Les procédés mécaniques de fabrication des nanoparticules (la mécanosynthèse)

La mécanosynthèse consiste à broyer des poudres micrométriques (1 à 50 μm) de plusieurs alliages. Elles sont introduites dans un conteneur scellé, agité fortement en présence de billes en acier ou en tungstène dont le mouvement accroît l'énergie du système. La matière est alors amenée en continu jusqu'à l'obtention de la taille nanométrique désirée. C'est selon ce type de procédés que sont produits les alliages dits ODS (*Oxydes Dispersed Strengthening*), constitués d'une dispersion nanométrique homogène d'oxydes dans une matrice métallique (déjà utilisés dans les applications transport et énergie). L'intérêt de cette technologie consiste à permettre l'élaboration de matériaux nanostructurés ou nanorenforcés sans recours à la manipulation de nanopoudres.

Deux grandes voies de conditionnement des nanoparticules

Il existe deux grandes voies de conditionnement : le conditionnement en phase liquide et l'agglomération en granules micrométriques. La première vise à mettre en suspension les nanopoudres dans des solutions de natures diverses (eau, alcool, solvant, polymères ou des polymères visqueux) mais dépendant des transformations ultérieures.

La seconde consiste à former des agglomérats à partir d'une transformation à l'état solide comme l'atomisation-séchage (séchage de suspensions) ou la granulation par trempe rapide (*freeze-granulation*). Dans les deux cas on obtient un milieu sécurisé du point de vue sanitaire et environnemental qui doit être redivisé à l'échelle nanométrique avant transformation en objets fonctionnels pour ne pas perdre les avantages de la nanostructuration.

