



Nanotechnologies et nanomatériaux : état des lieux et axes de développement



Applications

actuelles et envisagées

L'eau	26
La santé	28
L'alimentation et l'agriculture	31
Les produits d'usage courant	34
L'électronique et les technologies de l'information	38
L'énergie	41
La biorehabilitation et la réduction des pollutions	44
La défense nationale et la sécurité intérieure	46
Conclusion	49



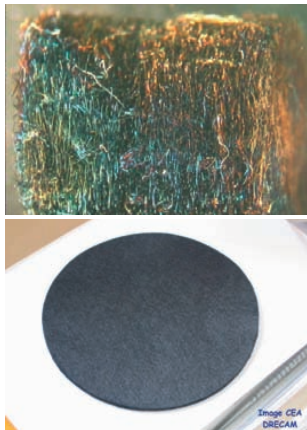
[illegible]

DÉFINITION

Les pores sont des cavités à l'intérieur d'une roche ou d'un matériau. Ils peuvent être remplis de gaz ou de fluide partiellement récupérable en comprimant le matériau. L'éponge est un exemple de matériau présentant des pores. Le passage d'un fluide à travers une substance poreuse permet de le débarrasser des impuretés plus grosses que la taille moyenne des pores. Les **nanopores** permettent ainsi de filtrer l'eau avec une efficacité supérieure aux filtres micrométriques conventionnels.

DÉFINITION

Les **adsorbants** (à ne pas confondre avec les absorbants) présentent une structure extrêmement poreuse. Grâce à leurs propriétés physiques, ils captent et stockent l'eau et l'humidité dans leurs orifices microscopiques. Ils sont insolubles dans l'eau. Le gel de silice compte parmi les principales substances adsorbantes.



Feutre

Grâce à des pores de taille nanométrique, ce filtre retient bactéries et virus lors d'opérations de dépollution des eaux

Depuis une dizaine d'années, les nanotechnologies sont passées de l'empirisme, puis de la recherche (1980-2000) au développement et à la commercialisation. Si la plupart des applications qui concernent la vie quotidienne sont encore en développement, elles représentent déjà des enjeux économiques importants. Les derniers inventaires, sans doute pas exhaustifs, font état d'environ 800 produits commercialisés contenant des nanotechnologies. (Source : Woodrow Wilson Institute)

Aujourd'hui, aucun produit de consommation courante n'est entièrement constitué à partir de nanotechnologies, mais nombreux sont ceux qui en contiennent une petite quantité suffisant à changer leurs propriétés.

Cette partie passe en revue – de façon non exhaustive – différents secteurs dans lesquels les nanotechnologies trouvent des applications, ainsi que les perspectives qu’elles leur ouvrent dans un avenir proche et plus lointain. L’exploitation des propriétés de la matière à cette échelle ne fait que débiter. De nouvelles propriétés seront probablement découvertes qui généreront des applications inédites ou modifieront les performances et les conditions de production ou d’utilisation de produits existants.

L'EAU

Parce que les nanoparticules sont réactives et interagissent avec les molécules situées à leur proximité, leur emploi dans les processus de dépollution et de potabilisation de l'eau fait depuis plusieurs années l'objet de recherches intenses.

Des nanofiltres pour purifier l'eau

Une des images les plus utilisées pour représenter un filtre est celle d'un tamis ou d'un filtre à café : plus les espaces par lesquels l'eau

peut passer sont réduits, plus la filtration est efficace car les impuretés plus petites sont retenues. Cette image, quoi qu'imparfaite, permet de comprendre l'intérêt d'utiliser des **nanopores** comme agents filtrants.

Ainsi, des membranes céramiques nanoporeuses sont utilisées pour assurer un meilleur filtrage et la fourniture d'eau potable propre. Leurs nanopores retiennent et éliminent, en effet, bactéries et virus.

Des filtres à base de nanotubes de carbone sont en cours de développement afin d'améliorer le rapport efficacité prix des nanofiltres.

Des nanoparticules comme agents de dépollution

D'origine industrielle, humaine ou naturelle, la pollution des nappes phréatiques est un problème sanitaire auquel les nanotechnologies pourraient apporter certaines solutions. En effet, les techniques classiques de dépollution (pompage, traitement en surface...) coûtent cher et sont d'une efficacité faible car certains contaminants sont peu mobiles, denses ou parfois peu solubles dans l'eau ; ils migrent alors vers le fond de la nappe. Le résultat est une pollution latente, chronique, avec une source difficile à localiser ou trop profonde pour qu'un traitement économiquement viable soit possible.

Les propriétés des nanoparticules, telles que leur rapport surface volume ou encore leurs capacités d'interactions de surface constituent une perspective d'amélioration de ces processus. Des résultats intéressants contre des contaminants organiques et inorganiques ont déjà été obtenus avec des nanoparticules de fer et des **adsorbants** de taille nanométrique mais demandent à être confirmés. Les particules de fer sont aussi étudiées pour la dégradation des polluants organiques récalcitrants (comme les



Applications

actuelles et envisagées

27

hydrocarbures) et certains **xénobiotiques** contenus dans l'eau polluée de régions industrielles ou agricoles.



Nanopoudre de SiO_2 utilisée dans les processus de dépollution

Certaines nanopoudres, très réactives, comme la nanopoudre de dioxyde de silicium (SiO_2), sont utilisées dans les processus de dépollution.

Enfin, à la croisée entre dépollution et fourniture d'eau potable, des expérimentations utilisant des nanoparticules d'oxyde de fer pour absorber l'arsenic naturellement contenu dans l'eau de certaines régions tropicales comme le Bangladesh sont en cours.

Toutefois, l'utilisation et la généralisation de procédés de dépollution ou de filtration intégrant des nanotechnologies supposent une bonne compréhension préalable du comportement des nanoparticules dans l'environnement afin de s'assurer qu'elles ne sont pas, elles-mêmes, sources d'effets non maîtrisés qu'il faudra traiter par la suite. Ce phénomène de relargage est détaillé pages 52 à 63 et pages 103 à 109.

DÉFINITION

Un **xénobiotique** est une molécule chimique fabriquée par l'homme et que les êtres vivants ne produisent pas eux-mêmes. Les xénobiotiques (comme les composés chlorés et nitrés) sont en général très toxiques et persistent dans l'environnement.

Des membranes céramiques nanoporeuses sont déjà utilisées pour assurer un meilleur filtrage dans la fourniture d'eau potable. Des nanoparticules sont à l'étude pour la dépollution des eaux des nappes phréatiques.



[illegible]

LA SANTÉ

Durant les prochaines décennies, les populations de nombreux pays industrialisés vont voir s'accroître deux évolutions : l'allongement de la durée de vie et le développement de modes de vie sédentaires. Sauf à agir sur les déterminants de la santé et renforcer la prévention, la combinaison des deux affectera nettement les systèmes de soins et de santé : certaines maladies liées au style de vie seront à la fois plus précoces et plus fréquentes, tandis que l'exigence du « bien vieillir » se généralisera. Néanmoins, les coûts des soins de santé ne pourront pas augmenter indéfiniment.

Des nanoparticules d'oxyde de fer sont déjà utilisées comme agents de contraste pour l'imagerie par résonance magnétique (IRM).



L'innovation, dans un contexte économique contraint, impose donc la prise en compte de l'ensemble du cycle lié à la santé (prévention, dépistage, diagnostic, traitement, suivi). En permettant dans certains cas de raccourcir ou optimiser ce cycle, les nanotechnologies et nanobiotechnologies contribuent au développement de produits innovants en santé. Pour le futur, leurs promesses sont considérables mais exigent aussi que leurs effets soient bien appréhendés (Voir *Comment caractériser le danger et l'exposition* pages 52 à 54).

Diagnostic : vers une meilleure visualisation

Lors des étapes de prévention, de dépistage et de diagnostic, l'enjeu est de mieux visualiser et mieux détecter des anomalies à l'échelle moléculaire.

En améliorant significativement le contraste entre lésions et tissus sains, elles permettent de détecter des métastases du foie, des ganglions lymphatiques métastatiques, ou de préciser un diagnostic dans les maladies inflammatoires ou dégénératives.

D'autres perspectives sont envisageables dans le domaine de l'imagerie médicale. Des nanoparticules dotées de propriétés précises – comme la fluorescence – pourront servir de marqueurs : introduits dans l'organisme, ils aideront à mieux identifier et cibler les molécules ou les cellules que l'on souhaite observer.

Il est même envisagé d'améliorer prochainement les analyses grâce à une détection ultrasensible permise par les nanostructures. Un des objectifs est, par exemple, de pouvoir détecter des molécules indiquant très tôt le développement de certains cancers. Véritable signature de la maladie, leur détection pourrait faciliter la prise en charge précoce des patients pour augmenter les chances de guérison, à condition que cette détec-



Applications

actuelles et envisagées

29

tion s'inscrive dans une politique de santé publique et s'accompagne d'une stratégie thérapeutique accessible et efficace, le tout à un coût acceptable.

Les tests de grossesse constituent aujourd'hui le premier marché pour les nanotechnologies en santé : leurs nanoparticules d'or permettent d'attraper les molécules de l'hormone de grossesse et de les fixer en quelques minutes seulement sur la bandelette test.

Thérapie : mieux cibler et réduire les effets secondaires

Les formes traditionnelles d'administration des médicaments ne sont plus adaptées aux nouvelles molécules à fort potentiel thérapeutique qui nécessitent d'être acheminées vers le site de leur action (une tumeur, par exemple), au niveau des tissus ou des cellules.

C'est pourquoi le développement de la **vectorisation** de médicaments, c'est-à-dire leur acheminement par des véhicules tels que les **protéines** ou les **liposomes**, est un enjeu majeur. Les nanotechnologies sont appelées à y jouer un rôle important, en protégeant la molécule et en contrôlant sa libération.

Aujourd'hui déjà, il est possible d'améliorer la solubilité de certains médicaments et leur capacité à cibler plus spécifiquement les cellules malades en les encapsulant dans des structures creuses nanométriques. Ce principe a été appliqué avec succès dans plusieurs approches thérapeutiques, dans le traitement du cancer en particulier.

Une *start-up* française a, par exemple, associé dans un médicament prescrit dans certains cancers du sein chimiorésistants,

EXPLICATION

La vectorisation est l'une des stratégies d'acheminement de substances actives dans l'organisme. L'objectif : utiliser des nanovecteurs qui concentrent des molécules médicamenteuses ou des suppléments vitaminiques et peuvent atteindre spécifiquement des cellules ou organes cibles. Pour cela, des travaux sont menés sur la façon de les intégrer à des aliments dont le goût et la texture demeurent attrayants pour le consommateur, mais aussi sur les moyens de protéger les substances actives lors de leur transport vers les cibles et de permettre leur diffusion (relargage) et leur action dans l'organisme au bon moment.

DÉFINITION

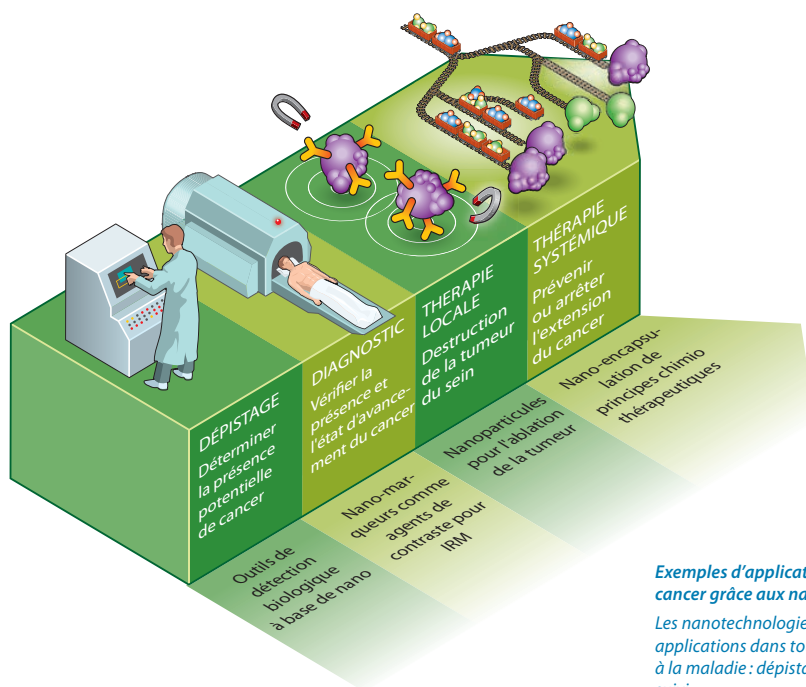
Protéines

Molécules constituées de longues chaînes d'acides aminés (les éléments de base), elles sont présentes dans tous les organismes vivants et les virus. Elles jouent un rôle primordial (construction et réparation de l'organisme, notamment). On les retrouve sous différentes formes : enzymes, hormones, récepteurs, neurotransmetteurs...

DÉFINITION

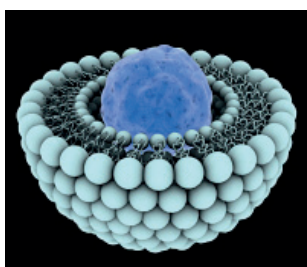
Liposome

Vésicule artificielle, imitant l'enveloppe de la cellule vivante. Elle possède la capacité d'encapsuler et de protéger, par exemple, des protéines ou du matériel génétique. Cette propriété fait que les liposomes sont utilisés comme vecteurs ou transporteurs en pharmacologie et en génétique.



Exemples d'applications dans le traitement du cancer grâce aux nanotechnologies

Les nanotechnologies peuvent trouver des applications dans toutes les phases du cycle lié à la maladie : dépistage, diagnostic, traitement, suivi.



Modélisation informatique d'un liposome

Comme le montre cette modélisation, l'une des applications des nanotechnologies en matière de traitement pourrait consister à encapsuler un médicament (figuré en bleu) dans une enveloppe artificielle (liposome) qui l'achemine spécifiquement à l'endroit de l'organisme où il est relargué pour agir.

Deux voies thérapeutiques contre le cancer

Une équipe du CNRS a imaginé de coupler les nanoparticules formées spontanément par le squalène, un composé naturel à l'origine du cholestérol, à un médicament. Elle espère faciliter son injection par voie intraveineuse ou son entrée dans la cellule, ce qui diminue les résistances au médicament.

Les premiers résultats obtenus sur l'animal en associant un anticancéreux au squalène sont encourageants. L'étude de la toxicologie de ce composé est déjà prévue et devrait faire l'objet d'un essai clinique de phase I.

Une autre équipe du CNRS a mis au point un dispositif ultrasensible, intégrable sur une puce, permettant de détecter les moindres interactions entre biomolécules.

L'objectif est de détecter de très faibles quantités de marqueurs cancéreux. Le dispositif est basé sur des nano-électrodes, dont la taille de 30 nanomètres de large est comparable à celle des biomolécules à détecter. Leur capacité à conduire le courant électrique est modifiée par la présence de nanobilles d'or de 90 nanomètres de diamètre, greffées sur les protéines. En étant capable de joindre les électrodes, elles exaltent la réponse électrique.

Ce dispositif est en cours de validation au sein du Cancéropôle de Toulouse pour le diagnostic en cancérologie.

une protéine, l'albumine, avec un agent déjà couramment utilisé. Sans solvant, il provoque moins d'effets secondaires. Un autre médicament, constitué d'un agent thérapeutique encapsulé dans un liposome, permet de diminuer les effets secondaires du traitement utilisé pour lutter contre les cancers ovariens. En dehors des indications en cancérologie, c'est cette même stratégie liposomale qui est également utilisée pour réduire les effets toxiques sur les reins que provoquait la formule classique d'un fongicide.

Parmi les applications actuelles, citons les propriétés des nanocristaux d'argent, qui constituent une barrière antimicrobienne très efficace, utilisées par les fabricants de pansements. Ou encore l'injection de nanoparticules magnétiques dans les tumeurs que l'on active par un champ magnétique externe pour détruire, par effet thermique, les cellules cancéreuses qu'elles ont ciblées.

Les nanotechnologies ont également des applications vaccinales. Il s'agit de créer des virosomes, pseudoparticules virales dépourvues de tout matériel génétique et com-

portant les antigènes vaccinaux. Ce type de présentation des antigènes aux cellules immunitaires est particulièrement efficace. Plusieurs vaccins de ce type sont déjà sur le marché, notamment les vaccins anti-papillomavirus, visant à prévenir certains cancers du col de l'utérus.

Demain, il sera possible d'envisager la conception de médicaments optimisant à la fois le ciblage des cellules malades, l'efficacité thérapeutique et la diminution des effets secondaires, le tout intégré dans la formulation du médicament.

Les dispositifs médicaux, prothèses ou implants bénéficient eux aussi des avancées des nanotechnologies. Optimiser les propriétés fonctionnelles des matériaux en modifiant de manière significative la structure de leur surface, par exemple, permet d'améliorer la biocompatibilité et de réduire le caractère invasif de ces dispositifs.

Enfin, en médecine régénératrice, les nanotechnologies vont dans le sens d'un meilleur contrôle des techniques cellulaires et tissulaires (différenciation de cellules souches, culture de tissus *ex vivo*, réimplantation *in vivo* contrôlée...).

Vers une médecine plus personnalisée

Les nanotechnologies contribuent également aux sciences biologiques et médicales car elles fournissent les moyens de mieux constater la complexité du vivant, et donc d'intervenir sur ses dysfonctionnements en prenant en compte les spécificités biologiques de chaque organisme. Elles apportent des moyens déterminants pour concevoir des traitements sur mesure.



Applications

actuelles et envisagées

31

L'ALIMENTATION ET L'AGRICULTURE

Au-delà de la simple satisfaction d'un besoin vital qui assure la santé et la survie, l'acte de se nourrir, au travers des rites alimentaires, relève de l'identité culturelle et sociale. Il ouvre aussi sur des sujets comme la qualité des éléments ingérés et leur parcours au plus profond de l'organisme, les modes de consommation alimentaire, l'équilibre biologique et la relation entre l'homme et la nature. L'émergence des nanotechnologies dans le domaine de l'agriculture et de l'alimentation questionne donc notre rapport à la nourriture.

La question des nanosciences et nanomatériaux a des interfaces diverses avec l'alimentation et l'agriculture, qui constitue le substrat initial de la production alimentaire.

Les nanomatériaux peuvent intervenir dans l'aliment lui-même par ajout, en tant qu'ingrédients dont les diverses propriétés seront évoquées ci-après, ou à l'extérieur de l'aliment, dans des éléments qui ont pour objet d'accroître le contrôle et la sécurité sanitaire de l'aliment (matériels de stockage, matériaux d'emballage).

Quant aux applications au domaine agricole, elles ont trait tant à la protection végétale qu'à la santé et à l'alimentation animale (médicaments vétérinaires, produits phytosanitaires...).

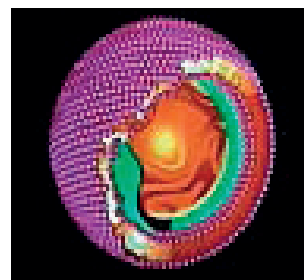
Enfin, l'agriculture est particulièrement concernée par les questions liées au cycle de vie et au devenir final des nanomatériaux manufacturés. Il s'agit d'un enjeu important pour les pratiques agricoles, la présence résiduelle de nanomatériaux dans l'environnement pouvant potentiellement s'accompagner d'une pollution des produits agricoles à visée alimentaire.

Les premières applications dans les aliments

Les premières applications qui apparaissent sur le marché européen et mondial concernent essentiellement les compléments alimentaires (vitamines ou oméga 3 nanoencapsulés, par exemple) ou les aliments fonctionnels. Ces aliments contiennent des composés biologiquement actifs présentés comme améliorant la santé ou réduisant le risque de maladies (comme l'huile de colza enrichie aux phytostérols nanoencapsulés commercialisée avec l'allégation d'une réduction optimisée du taux de cholestérol).

L'utilisation des nanotechnologies vise à obtenir une dispersion dans l'eau de substances insolubles, à protéger de façon ciblée des molécules sensibles dans les procédés de transformation ou à libérer des composés intervenant dans la **flaveur** ou la formation de couleurs.

Une autre application intervient dans les aliments courants : la silice est utilisée sous forme nano comme additif antiagglomérant. Cet additif est autorisé et employé depuis



Encapsulation d'une molécule active dans une molécule d'enrobage

Certaines applications alimentaires, en particulier dans le domaine des produits qui combinent aliments et médicaments (aliments) peuvent tirer parti de la technique d'encapsulation.

DÉFINITION

Flaveur

La flaveur correspond à l'ensemble des sensations perçues lors du flairage ou de la mise en bouche de l'aliment.

Si les nanotechnologies sont peu utilisées dans ce secteur, les pratiques agricoles ne doivent pas ignorer les questions liées au cycle de vie et au devenir final des nanomatériaux manufacturés dont la présence dans l'environnement peut atteindre des produits à visée alimentaire.



Nanotechnologies et nanomatériaux : état des lieux et axes de développement



DÉFINITION

La **biodisponibilité** est un terme utilisé pour exprimer la proportion d'une substance qui va effectivement être assimilée et agir dans l'organisme par rapport à la quantité absorbée.



**Barquette de salade recyclable
et compactable**

Les emballages alimentaires sont l'un des secteurs dans lequel les nanotechnologies trouvent déjà de nombreuses applications : plus de rigidité, de stabilité thermique, de transparence, des propriétés bactéricides, protection contre les effets de l'air et de la lumière...

DÉFINITION

Matériaux actifs et intelligents

Les matériaux actifs sont des matériaux destinés à prolonger la durée de conservation ou à maintenir ou améliorer l'état de denrées alimentaires emballées. Par exemple, ils empêchent la formation des gaz qui endommagent le produit ou libèrent des agents conservateurs ou antioxydants.

Les matériaux intelligents contrôlent l'état des aliments ou leur environnement. Ils peuvent par exemple changer de couleur si le produit n'est plus frais ou s'il est périmé.

DÉFINITION

Technologies de type RFID

RFID pour Radio Frequency Identification : technologies utilisées pour stocker et récupérer des données à distance grâce à des « étiquettes électroniques », qui se présentent sous la forme de balises métalliques minuscules voire invisibles à l'œil nu, réagissant aux ondes radio. Ces technologies, utilisées notamment à des fins d'identification, sont censées remplacer à terme les codes-barres.

plusieurs dizaines d'années. Désormais, il est utilisé couramment à l'état nanoparticulaire, la forme utile étant en fait constituée d'agrégats d'une échelle supérieure.

Les nanotechnologies offrent une large gamme de structures permettant une formulation ciblée des aliments. Les matières actives obtenues peuvent en effet présenter une meilleure efficacité sensorielle, une meilleure stabilité, être mieux diffusées et voir globalement leur **biodisponibilité** augmentée. Ainsi, la quantité globale de matière nécessaire est moindre du fait qu'une plus grande quantité de matière active est assimilée. Il est de surcroît possible de rendre les produits plus faciles à manipuler (en poudre, suspension). Dans certains cas, l'obtention du produit fini est enfin moins coûteuse en énergie.

Protection et traçabilité dans les emballages

Le domaine des matériaux au contact des aliments (emballages, surfaces de découpes, parois de réfrigérateurs, etc.) est celui dans lequel se concentrent la plupart des applications déjà transposées à l'échelle commerciale.

L'incorporation de nanoparticules (le plus souvent des feuillets d'argiles) dans des matériaux d'emballage est employée pour améliorer les propriétés mécaniques (gain de rigidité, transparence, stabilité thermique) ou réduire le passage des gaz ou des arômes. De plus, des travaux de recherche et développement sur l'utilisation d'oxydes de zinc pour bloquer les rayons UV sont en cours.

De nouveaux matériaux, dits **matériaux actifs** font appel à des nanoparticules d'argent à l'effet antibactérien (fixateurs-éliminateurs du fer indispensables au métabolisme bactérien) pour limiter la prolifération de bactéries

sur l'aliment, et ainsi diminuer les risques d'intoxication pour le consommateur.

Enfin, les **matériaux intelligents** peuvent incorporer des nanocapteurs permettant la détection de contaminations microbiennes (les salmonelles par exemple) ou d'arômes représentatifs d'une maturité du produit (pour les fruits en particulier). La détection se traduit alors par un changement de couleur du capteur sur l'étiquette. Rapide, cet outil permet de suivre l'évolution de la qualité de l'aliment jusqu'à sa consommation, sans transfert d'échantillons au laboratoire.

L'apport des nanotechnologies à l'évolution des **technologies de type RFID** appliquées aux emballages permet en outre de témoigner du respect de la chaîne du froid ou d'assurer la traçabilité de l'animal à la denrée alimentaire.

L'analyse du cycle de vie des emballages constitue un outil important en terme d'évaluation de l'impact environnemental des nanomatériaux. Les emballages actifs peuvent en particulier avoir un impact sur l'écologie microbienne, du fait de l'action continue des agents antibactériens qu'ils contiennent (lire page 53).

Des applications dans les cultures et l'élevage

Des axes de recherche se mettent en place en production végétale. Comme dans d'autres domaines, pour optimiser les conditions de production et limiter l'impact sur l'environnement, il est envisagé d'utiliser des films – ou membranes – sélectifs (filtrant notamment les métaux lourds) pour les productions végétales sous abris et le traitement des eaux.

Les nanotechnologies permettent également de développer des engrais dont l'épandage est facilité et la biodisponibilité accrue ou retardée, ce qui permet à la fois une limitation de la quantité d'engrais utilisée et une



Applications

actuelles et envisagées

33

utilisation optimale de la plante en fonction de son cycle de vie. Certains produits phytosanitaires appelés éliciteurs pourraient être développés pour déclencher les mécanismes d'autodéfense de certains végétaux et ainsi limiter l'impact de maladies des plantes. Ces produits devront être autorisés avant de faire l'objet d'une mise sur le marché.

Certaines de ces applications étant en contact avec le milieu naturel donc en conditions ouvertes, il convient d'étudier de manière approfondie l'impact que pourraient avoir les produits issus des nanotechnologies ainsi que leurs résidus de toutes natures, en particulier sur l'eau, les sols, la biodiversité et sur les conditions de travail des personnels concernés. Les risques d'atteintes à la santé et à l'environnement suite à un relargage durant l'utilisation sont évoqués dans *Exposition de la population et atteinte à l'environnement* pages 54 à 61.

On trouve également des applications dans l'alimentation animale à des fins nutritionnelles avec l'exemple de feuillets nanostructurés d'argiles et algues vertes utilisés comme additifs détoxifiants, adsorbants de toxines. Les autorités européennes ont demandé une évaluation spécifique de cet additif considéré comme nouveau et devant faire l'objet d'une autorisation.

Enfin, les mêmes potentialités que celles précédemment énoncées pour les produits de santé

pour l'homme, se retrouvent dans le domaine de la médecine vétérinaire. Pour l'heure, aucun médicament vétérinaire relevant des nanotechnologies n'a été soumis à autorisation en Europe.

Vers une réalité commerciale : quelles applications, quelles garanties ?

En ce qui concerne l'ajout volontaire aux aliments de nanomatériaux manufacturés, la majorité des applications seraient encore au stade de la recherche et il n'y aurait pas véritablement de réalité commerciale. Cela ressort des conclusions de l'Afssa, dans son avis à ce sujet de mars 2009, mais également d'une enquête menée par les services de la direction générale de la concurrence, de la consommation et de la répression des frau-



**Stockage des produits laitiers
dans le réfrigérateur
d'un restaurant collectif**

L'incorporation au revêtement des réfrigérateurs de nanomatériaux à effet antimicrobien vise à limiter la prolifération de bactéries.



Immobilisation d'un veau pour des soins

Les soins vétérinaires sont un des domaines d'application potentielle des nanotechnologies.



[illegible]

PLUS PRÉCISÉMENT

Le Conseil national de l'alimentation est une instance consultative indépendante qui réunit tous les acteurs de la chaîne alimentaire (associations de consommateurs et d'usagers, producteurs agricoles, secteurs de la transformation et de la distribution, restauration collective, salariés de l'agriculture et de l'agroalimentaire et personnalités qualifiées). Elle débat des questions liées à l'alimentation et formule des propositions d'orientations et d'actions en matière de politique alimentaire.



Des nanotubes de carbone entrent dans la composition du cadre de certaines raquettes de tennis pour leur conférer à la fois légèreté et solidité.

des (DGCCRF), à titre exploratoire en 2008, en s'appuyant sur un contrôle déclaratif et documentaire auprès des opérateurs. La DGCCRF a constaté que, si de nombreuses applications sont en cours de développement, seuls quelques produits relevant des nanotechnologies, cités dans les paragraphes précédents, sont actuellement sur le marché national dans le domaine alimentaire.

Le Conseil national de l'alimentation constate par ailleurs dans son avis du 10 juin 2009 qu'il s'agit d'un domaine très actif de recherche en agroalimentaire.

Indépendamment des inventaires d'aliments « nanos » que l'on peut trouver sur Internet sans pour autant pouvoir en vérifier le caractère réellement nano, la diffusion en Europe de tels produits est limitée du fait de l'encadrement réglementaire. Dans tous les cas, les garanties d'innocuité pour le consommateur passent par le respect d'une réglementation stricte, déjà en place (lire *Réglementation des aliments* page 107) : toute formulation sous forme de nanomatériaux, présente dans un ingrédient, aliment, additif, doit faire l'objet d'une autorisation préalable de mise sur le marché, délivrée par les autorités après réalisation d'une évaluation scientifique du risque par l'agence française ou européenne de sécurité sanitaire des aliments selon les cas. Les emballages, quant à eux, doivent être inertes (ne pas relarguer de substances vers les aliments qu'ils protègent) pour être déclarés aptes au contact alimentaire.

Le fabricant est, d'après la réglementation européenne et française, le premier responsable de la mise sur le marché de produits sûrs. Le contrôle s'opère aujourd'hui par des enquêtes à visée déclarative ou documentaire. Le développement et la mise au point de méthodes validées et applicables en routine permettront de détecter, quantifier et caractériser les nanoparticules dans les matrices alimentaires.

LES PRODUITS D'USAGE COURANT

Certaines nanoparticules ou nanostructures sont utilisées dans des produits de consommation courante depuis des décennies, bien avant que le préfixe nano ne vienne les identifier en tant que tels. Ainsi, le noir de carbone sert à augmenter la durée de vie des pneumatiques dont le caoutchouc s'use très vite. D'autre part, les liposomes, dont on a vu plus haut l'utilité pour les médicaments, sont utilisés dans des crèmes hydratantes en cosmétique depuis le début des années 1990.

Les nanotechnologies font donc déjà partie de la vie courante comme le montrent les quelques exemples suivants, pris dans le domaine des équipements de sport, des cosmétiques, des peintures et vernis, des textiles et du bâtiment.

Résistance et légèreté dans les équipements de sport

De par leur structure simple et stable, les nanotubes de carbone possèdent des propriétés physiques, mécaniques intéressantes : ils sont cent fois plus résistants que l'acier et six fois plus légers. Ils sont donc utilisés par les fabricants d'équipements sportifs, dans des matériaux composites qui allègent sans fragiliser certaines raquettes de tennis ou de badminton, des clubs et des balles de golf, des battes de base-ball, des crosses de hockey, des cadres de vélos...

Filtrer ou réagir aux UV dans les cosmétiques

Les propriétés des nanomatériaux et l'utilisation de structures telles que les liposomes (page 29) ont abouti à de nombreuses applications en particulier dans l'élaboration des crèmes solaires. Certaines particules



Applications

actuelles et envisagées

35

(**dioxyde de titane**, de cérium ou de zinc) ont la particularité de filtrer les UV et de ne presque pas diffuser la lumière visible.

De plus, en séchant, certaines s'agglomèrent pour former une structure en réseau qui augmente la tenue de la crème sur la peau lors de l'exposition à l'eau.

Des fonds de teint utilisent également des pigments (tels que le dioxyde de titane dopé au fer) qui présentent un noircissement réversible selon la longueur d'onde et l'intensité de la lumière. Ainsi, le produit adapte sa couleur à l'intensité des UV et le maquillage reste identique sous une lumière naturelle ou artificielle.

D'autres produits, comme les crèmes anti-âge, ont aussi été développés sur la base des propriétés de certaines nanoparticules : les particules d'oxyde de silicium et de zinc captent des enzymes qui dessèchent la peau. Dans le domaine de l'hygiène dentaire, le silice nanoparticulaire est utilisé dans certains dentifrices.

Le nouveau règlement européen relatif aux produits cosmétiques prévoit des dispositions particulières pour les nanomatériaux (lire le détail de la réglementation page 111).

Des peintures et vernis résistants à l'abrasion et à la corrosion

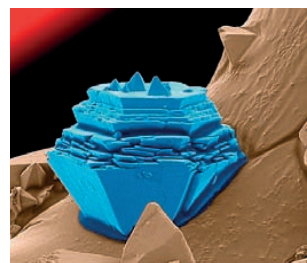
Certaines nanoparticules, intégrées comme additifs dans les peintures et revêtements, accroissent la résistance à l'abrasion ou aux rayures et augmentent la protection contre les UV et la corrosion. Un liant constitué de particules de **polymères** incluant des nanoparticules de titane entre par exemple dans la composition de certains revêtements de façade anti-âge. Elles leur confèrent une double propriété : ils ne ramollissent pas sous le soleil de l'été et échappent à l'encrassement au contact de la pollution ; à la surface de la façade, une organisation des molécules la rend autonettoyante sous l'action de la pluie.

Des nanoparticules d'oxyde de cérium peuvent également être utilisées dans des vernis pour protéger du vieillissement les façades en bois, tout comme des nanoparticules à base d'oxyde de zinc pour augmenter la protection contre les UV.

Dans le secteur automobile, où la longévité des peintures est un enjeu important, un

EXPLICATION

Le **dioxyde de titane** (TiO_2) est une molécule connue des scientifiques pour accélérer de nombreuses réactions chimiques, notamment celles faisant intervenir des particules organiques (poussières, particules des pots d'échappement, salissures). Le dioxyde de titane est aussi utilisé dans les crèmes solaires car il possède la propriété d'arrêter les rayons ultraviolets provoquant les coups de soleil et le bronzage.



Nanocrystal d'oxyde de zinc intégré à une crème solaire

Les nanocristaux d'oxyde de zinc, comme celui-ci, sont intégrés dans des crèmes solaires : ils filtrent les UV et ne diffusent presque pas la lumière visible, ce qui permet de produire une crème transparente et évite le blanchissement après son application.

DÉFINITION

Les **polymères** sont les molécules de base utilisées dans la fabrication du plastique. Ils sont devenus l'élément essentiel d'un nombre très important d'objets, dans lesquels ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Ils peuvent être classés d'après leurs propriétés thermomécaniques : thermoplastiques, qui deviennent malléables une fois chauffés ; thermodurcissables, qui durcissent sous l'action de la chaleur ou par ajout d'un additif ; élastomères, qui sont déformables de manière réversible. Le terme désigne des matières abondantes et variées, des protéines les plus ténues aux fibres de kevlar haute résistance. Certains polymères sont utilisés en solution, comme dans les shampoings, d'autres forment des matériaux solides, comme ceux utilisés par l'industrie automobile, par exemple.



La nanoélectronique peut associer une grande puissance de calcul à une baisse de consommation des circuits, ce qui ouvre la voie à des concepts nouveaux d'utilisation du téléphone, au service des futures évolutions d'internet (internet des objets).





Applications

actuelles et envisagées

37

Des matériaux de structure aux propriétés accrues

Dans l'industrie automobile, de nombreux nanomatériaux sont utilisés en vue de réduire le poids des véhicules de 20 à 50 % et d'abaisser la consommation de carburant. L'ensemble des matériaux qui remplacent progressivement l'acier et les métaux, comme les polymères, peuvent être renforcés par des nanomatériaux. Cet ajout permet également d'augmenter la résistance des pièces automobiles aux rayures.

Dans les aciers, la nanostructuration se traduit par une augmentation de la résistance mécanique, notamment de la résistance à l'usure des outils de coupe, dont la durée de vie augmente. Les crampons des alpinistes sont par exemple couramment équipés de pointes en **acier nanostructuré** qui assurent une meilleure pénétration dans la glace.



Des nanotubes de carbone améliorent les performances de certains aciers : meilleure résistance mécanique et à l'usure pour les outils de coupe, plus grande pénétration dans la glace pour la pointe des crampons d'alpinistes.

Plus généralement, le gain de résistance mécanique est utile pour les **matériaux dits de structure**. Il entraîne une diminution des épaisseurs à performance identique. Il en résulte un allègement du poids qui constitue un critère déterminant dans certains secteurs d'application comme l'aéronautique.

Pour des applications comme les turbines à gaz (production électrique ou application aéronautique), la présence de particules d'oxydes nanométriques permet à l'acier de conserver une résistance mécanique même à très haute température (environ 1 000 °C pour certains aciers).

Enfin, certains bétons tirent déjà des avantages des nanomatériaux lors de leur fabrication. L'introduction de fumée de silice augmente leur fluidité et améliore leurs propriétés mécaniques. Des aérogels de silice renforcent leur pouvoir d'isolation thermique et des nanoparticules de dioxyde de titane les rendent autonettoyants : elles provoquent, sous l'action des rayons UV de la lumière du soleil, la décomposition des dépôts organiques responsables de la salissure des bâtiments.

EXPLICATION

Aciers nanostructurés

On distingue les aciers renforcés par des particules de taille nanométrique (par exemple par des oxydes) et les aciers présentant une structure intrinsèque de taille nanométrique dans la masse.

EXPLICATION

Matériaux de structure

Matériaux garantissant l'intégrité de la structure aux différents efforts mécaniques comme le poids, les forces centrifuges, la poussée du vent... Le béton, l'acier et le bois utilisés dans les charpentes sont des matériaux de structure.



L'église du Jubilé à Rome (photo), comme la cité des Beaux-Arts de Chambéry, sont des exemples d'utilisation d'un béton non salissant intégrant des nanoparticules de dioxyde de titane.



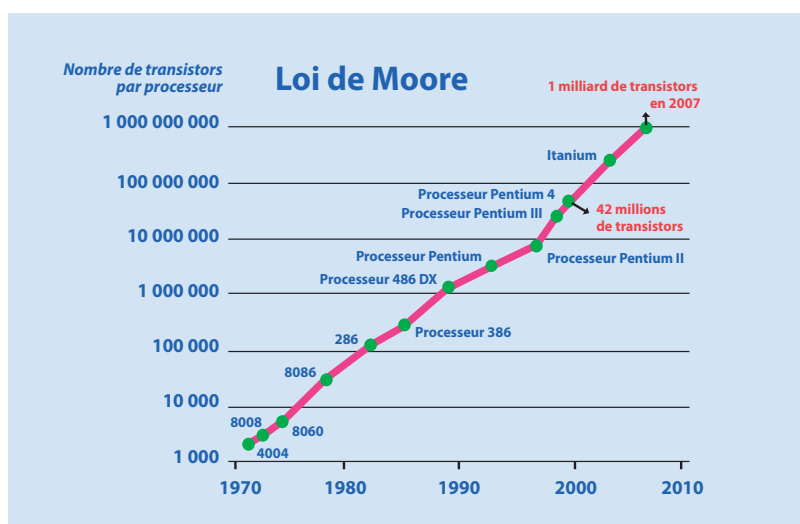
3/09/09 15:33:18



Applications

actuelles et envisagées

39



La révolution de la magnétorésistance géante (GMR)

En 1957, la capacité des premiers disques n'était que de 5 mégaoctets ; aujourd'hui, elle avoisine le **téraoctet** (un million de fois plus importante). Ces performances n'auraient jamais été atteintes sans l'effet de magnétorésistance géante (GMR). Cette découverte a ouvert un nouveau champ scientifique : la **spintronique**. Son impact dans la technologie de l'information est déjà considérable. Les capacités de stockage et de rapidité de lecture des disques durs ont été modifiées très significativement : la densité d'informations est augmentée d'un facteur 100 et l'efficacité énergétique accrue.

L'émergence de la GMR, et sa forme plus achevée et quantique, la TMR (Tunnel Magnéto-Résistance), ont permis le développement de dispositifs de très petite taille, aujourd'hui utilisés couramment, comme les mémoires Flash et les lecteurs MP3.

La loi empirique de Moore

En 1965, Gordon Moore, ingénieur et cofondateur d'Intel, constate que la complexité des semi-conducteurs proposés dans les ordinateurs d'entrée de gamme double tous les ans, à coût constant depuis 1959, date de leur invention. En 1975, il estime que, grâce au progrès de la photolithographie, le nombre de transistors des microprocesseurs sur une puce de silicium a de fortes chances de doubler tous les deux ans. Cette prédiction s'est révélée jusqu'à présent exacte. Entre 1971 et 2001, la densité des transistors a doublé tous les 18 mois et les ordinateurs sont de plus en plus puissants. En 1965, le circuit le plus performant comportait 64 transistors. En 2007, ce chiffre a atteint le milliard.



Albert Fert et Peter Grünberg, deux figures incontournables de la nanoélectronique, récompensés en 2007 par le prix Nobel de physique pour leur découverte de la magnétorésistance géante (Giant Magneto-Résistance - GMR) en 1988.

DÉFINITION

Téraoctet

Un Téraoctet (To en français, TB pour terabyte en anglais) est égal à mille milliards d'octets, soit un billion (attention, à ne pas confondre avec le terme anglais billion qui, lui, correspond à notre milliard).

REPÈRES

La spintronique

La magnétorésistance géante (Giant Magneto-Résistance, GMR) est une découverte majeure d'Albert Fert (université de Paris sud - Orsay) et de Peter Grünberg (centre de recherche de Jülich en Allemagne) en 1988. Elle leur a valu de recevoir le prix Nobel de physique en 2007 et a ouvert le champ de la spintronique.

La magnétorésistance géante est un effet quantique observé dans les structures de films d'épaisseurs nanométriques, composées d'une alternance de couches ferromagnétiques et de couches non magnétiques.

En appliquant un champ magnétique externe, on peut changer la polarisation du spin des électrons (le sens de rotation des électrons sur eux-mêmes) et coder ainsi l'information. La précision de cette opération autorise une densité de stockage très importante.



3/09/09 15:33:19



Applications

actuelles et envisagées

41

L'ÉNERGIE

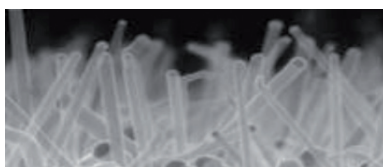
Le développement durable est **un enjeu du XXI^e siècle** : comment assurer le développement économique répondant aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs ? Pour y parvenir, il faut pouvoir notamment accroître l'efficacité énergétique de la société et assurer une production d'énergie moins dépendante des ressources fossiles, moins polluante et qui mette à profit des ressources renouvelables.

Cela passe notamment par la réduction de la consommation des logements, des véhicules, des appareils électriques et le déploiement d'un bouquet diversifié axé sur des énergies durables (renouvelables, partiellement recyclables ou consommant le moins possible de ressources).

Les nanotechnologies figurent parmi les solutions envisagées aujourd'hui dans de nombreux secteurs économiques, en particulier ceux des transports et du bâtiment, et dans le développement de systèmes de production, de conversion et de stockage d'énergie qui permettent à notre société de relever ces défis.

Réduire l'énergie consommée dans le bâtiment et les transports

La maison à énergie positive de demain respectera les demandes de ses occupants (confort, loisir, bien-être) tout en optimisant la consommation et la production d'énergie. Dans cette vision, les nanotechnologies amènent des innovations majeures. On peut en effet envisager une alimentation en énergie solaire efficace, en améliorant le rendement des panneaux **photovoltaïques**, tout en réduisant l'effet sur l'environnement et en diminuant les coûts.



Des nanofils de silicium dans les futures cellules solaires Source CEA.

Beaucoup d'espoirs sont fondés sur les sources d'énergie durables. Or, aujourd'hui, le rendement moyen des cellules photovoltaïques utilisées dans les panneaux solaires courants est de l'ordre de 5 à 10 %. Même dans les procédés très coûteux, réservés à des applications comme celles du secteur aérospatial, leur rendement ne dépasse pas 20 %. Ce faible rendement s'explique par le fait que les cellules, composées de silicium massif, n'absorbent utilement qu'une fraction des rayons lumineux qui composent la lumière.

Des chercheurs envisagent de dépasser cette limite et de tirer un meilleur parti de cette source d'énergie renouvelable. Ils s'appuient, pour cela, sur le fait qu'à une échelle de nanostructuration, certains matériaux sont capables d'absorber l'ensemble du spectre solaire. À l'état de nanofils, un matériau comme le silicium absorbe, par exemple, des couleurs différentes du spectre en fonction de son diamètre. Un empilement constitué de nanofils de différents diamètres, dans des arrangements particuliers, pourrait donc absorber la totalité du spectre solaire et permettre un rendement des cellules voltaïques de demain d'au moins 50 %.

De même, on peut imaginer de gérer l'intermittence de certaines sources d'énergie (solaire, éolienne...) grâce à des systèmes de stockage (batteries) dont les performances et la durée de vie seront augmentées grâce aux nanocomposites lithium. La production locale d'énergie sans connexion au réseau d'électricité pourrait être généralisée par des **piles à combustible** utilisant des nanomatériaux.

L'isolation des bâtiments, quant à elle, pourrait être renforcée par l'utilisation de nanomatériaux ultraporeux ou à changement de phase (qui absorbent l'excès de chaleur dans la journée et la restituent la nuit ou quand il fait froid). Enfin, la nanoélectronique pourrait être sollicitée pour mettre en œuvre le concept d'intelligence ambiante

REPERES

Un enjeu du XXI^e siècle

Selon les prévisions de l'Agence internationale de l'énergie, la demande d'énergie primaire devrait croître de presque 60 % d'ici à 2030, correspondant, à technologies constantes, à une hausse du même ordre de grandeur des gaz à effet de serre.

Le groupe 1 du Grenelle environnement a rappelé la réalité incontestable du changement climatique et de ses impacts, ainsi que l'épuisement à venir des ressources fossiles.

La France s'est engagée pour la division par quatre de ses émissions de gaz à effet de serre d'ici à 2050.

Les objectifs fixés par le Conseil européen permettent de mettre en place les étapes intermédiaires à l'horizon 2020 : réduction de 20 % des gaz à effet de serre, baisse de 20 % de la consommation d'énergie, et augmentation jusqu'à 20 % d'énergies renouvelables dans la consommation d'énergie globale.

ILLUSTRATION

Cellules photovoltaïques

Plusieurs voies de recherches sont en cours d'études pour réduire le coût des cellules photovoltaïques et en augmenter l'efficacité :

- dépôts successifs de couches d'épaisseurs nanométriques ;
- emploi de silicium possédant une structure interne nanostructurée ;
- emploi d'autres minéraux que le silicium, voire des molécules biologiques mimant la photosynthèse des plantes ;
- dopage de cellules de silicium par l'incorporation en très faible concentration d'éléments chimiques (manganèse par exemple).

DÉFINITION

Les piles à combustibles produisent de l'électricité en convertissant de l'hydrogène et de l'oxygène en eau. Inventées au milieu du XIX^e siècle, leur utilisation reste limitée en raison du coût élevé de leur composants (elles utilisent du platine et d'autres métaux) et de la difficulté à produire de l'hydrogène à des coûts économique et énergétique corrects. Les applications potentielles majeures sont la voiture électrique, les batteries et l'alimentation des objets électriques nomades.





Applications

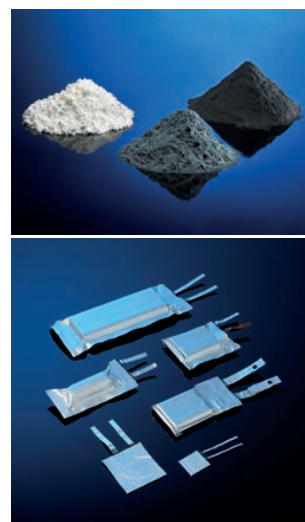
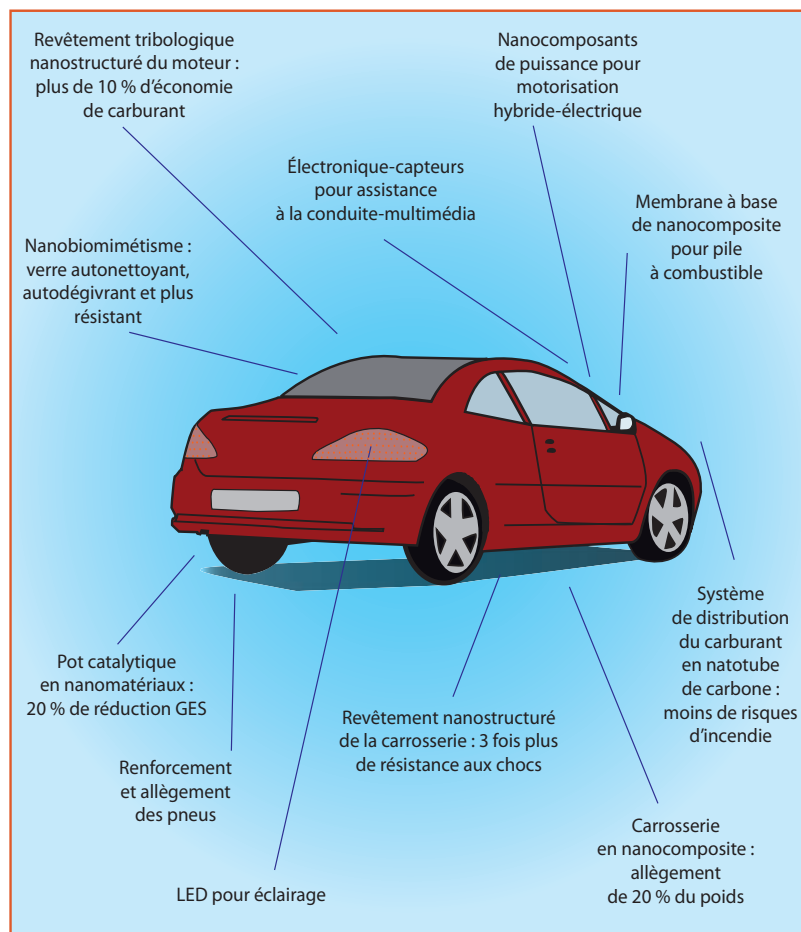
actuelles et envisagées

43

Pour reproduire ces processus, les scientifiques ont recours notamment aux propriétés catalytiques de métaux nobles comme le platine. Mais, les réserves étant limitées, sa rareté et son prix constituent des freins au développement de cette méthode d'ailleurs gourmande en énergie. Une autre solution pourrait sortir des laboratoires. En 2007, des chercheurs sont en effet parvenus à produire de l'hydrogène en utilisant un catalyseur à base de cobalt avec une efficacité supérieure aux systèmes comparables à base de métaux nobles.

Différentes pistes, fondées sur l'utilisation de procédés à base de nanomatériaux, permettent d'imaginer, pour le futur, une réponse aux défis posés par les exigences du développement durable en ce début de XXI^e siècle. Elles concourent à dessiner un monde où l'autonomie énergétique serait prépondérante à toutes les échelles : de l'individu à l'État, en passant par les régions et les villes.

De multiples applications des nanotechnologies devraient dessiner les nouvelles caractéristiques des voitures de demain.



Nanopoudres et batteries lithium-ion

Les batteries lithium-ion, déjà utilisées pour les ordinateurs portables et les téléphones mobiles, et des associations de nanopoudres de lithium, de fer et de phosphate permettront de réduire la taille des batteries.

ILLUSTRATION

Tirer parti de la **biomasse**

L'une des méthodes utilisées pour transformer cette biomasse en biocarburants avait déjà été employée durant la Seconde Guerre mondiale par les Allemands, pour produire de l'essence et du fioul à partir du charbon et du bois.

Aujourd'hui, la gazéification à haute température (800-1 000 °C), qui permet d'obtenir un gaz de synthèse ensuite transformé par des réactions catalytiques en biocarburants comme le diesel, est grande consommatrice d'énergie. Il est donc envisagé d'utiliser des nanoparticules qui permettraient d'augmenter la réaction catalytique et donc l'efficacité du procédé.

Une autre voie, plus exploratoire pour l'instant, consisterait à concevoir des nanocomplexes organométalliques comme catalyseurs de photosynthèse artificielle qui, par analogie avec la synthèse chlorophyllienne des végétaux, permettraient la production de biocarburants.







Applications

actuelles et envisagées

45

Limitier la consommation de ressources et la production de déchets

Dans l'industrie, les nanotechnologies peuvent permettre de créer des objets qui rendent davantage de services en utilisant moins de matière première et d'énergie. La miniaturisation constante des appareils électroniques, à laquelle contribue la nanoélectronique, permet une réduction des quantités de matière utilisées (un ordinateur ne pèse plus que quelques kilogrammes et effectue des milliards d'opérations à la seconde alors que son prédécesseur des années quatre-vingt pesait environ dix kilos et était 1 000 fois plus lent).

La réduction de la consommation d'énergie est déjà effective dans bien des objets courants : remplacement des lampes à incandescence par des diodes électroluminescentes beaucoup moins gourmandes en électricité, ou des écrans cathodiques par des systèmes à cristaux liquides, dix fois moins consommateurs... Enfin, le développement de composants nanoélectroniques de faible consommation pour des systèmes de calcul efficaces énergétiquement constitue un enjeu majeur. Toutefois, à ce jour, une autre difficulté demeure malgré ces améliorations : l'absence préjudiciable de prise en considération du cycle de vie des matériaux dans le domaine des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC).



Améliorer le traitement des pollutions

La décontamination des sols et des eaux est aujourd'hui un domaine en plein essor. Il reste toutefois à en améliorer l'efficacité et à en réduire le coût. Pour la dépollution de l'air, les nanotechnologies font espérer une amélioration des processus de catalyse en sortie de cheminées et des **pots d'échappement**, voire de réacteurs d'avions. De même, elles permettraient de développer des filtres spécifiques à intégrer en sortie de cheminées pour optimiser le filtrage des composés organiques volatils (hydrocarbures) et des substances chlorées.

Le sujet de la dépollution de l'eau est abordé aux pages 26 et 27.

Une détection et un suivi plus fiables

Les nanotechnologies pourraient enfin permettre le développement de capteurs fiables et bon marché pour détecter et suivre l'évolution de molécules spécifiques ou de micro-organismes.

Seraient concernées des applications comme la détection de particules dangereuses dans les usines (protection des travailleurs) et dans les habitations (produits toxiques émanant des peintures ou d'un nouvel objet, fuites de produits d'entretien...). Mais elles pourraient également servir à la surveillance des écosystèmes. Pourquoi ne pas imaginer, par exemple, de mesurer de façon fine et continue des émissions de gaz produits par les micro-organismes vivant dans un lac afin de suivre l'évolution des populations de bactéries et détecter très tôt une prolifération du type verdissement des eaux ?

Les cristaux de taille nanométrique (2 à 100 nm) à la base des diodes électroluminescentes (LED) les rendent dix fois plus économes que les ampoules à filament.

DÉFINITION

Les **pots catalytiques** insérés à **l'échappement** des voitures ont pour but de réduire les émissions de certains gaz toxiques tels que le monoxyde de carbone, les oxydes d'azote et les particules diesel produits lors de la combustion du carburant. Ils sont composés de céramique sur laquelle sont implantés des métaux précieux (platine, rhodium, osmium, palladium) lieux des réactions chimiques avec les gaz d'échappement. Si leur efficacité est avérée, les pots catalytiques actuels présentent des limites : non-élimination du CO₂, encrassement, inefficacité lors des premiers kilomètres, relargage dans l'environnement de certains métaux ainsi que de particules ultrafines dont certaines, produites non intentionnellement, sont de taille nanométrique. Les nanotechnologies peuvent, en ce domaine, contribuer à une amélioration de la protection de l'environnement, à condition que la recherche et l'innovation permettent de limiter drastiquement le relargage de particules ultrafines par les pots catalytiques.



De meilleurs pots catalytiques et des filtres à particules nanostructurés devraient contribuer à réduire la pollution de l'air

[illegible]

Drone libellule

En matière de sécurité du territoire, le drone libellule illustre les capacités de miniaturisation offertes par les nanotechnologies.



LA DÉFENSE NATIONALE ET LA SÉCURITÉ INTÉRIEURE

La réalisation et le succès des différentes missions de défense nationale et de sécurité intérieure (sécurité publique, sécurité civile, police judiciaire, protection du territoire et des citoyens, opérations extérieures de maintien de la paix et de lutte contre le terrorisme, assistance et protection des ONG...) s'appuient aujourd'hui sur des technologies de plus en plus avancées ; parmi elles, les nanotechnologies.

Les enjeux sont importants puisque leur maîtrise et la connaissance approfondie des menaces qui y sont associées assurent le maintien de notre sécurité, mais garantissent également notre indépendance technologique et donc notre souveraineté.

Les armées utilisent déjà des produits et technologies intégrant des éléments à l'échelle nanométrique : pneumatiques aux renforts carbonés, revêtements anticorrosion ultramines, systèmes de communication électronique à base de circuits intégrés... De plus, et d'une manière générale, la miniaturisation et la réduction de l'encombrement à performances égales, permises grâce aux nanotechnologies, sont un facteur important pour les systèmes d'armes.

L'équipement du combattant est un exemple d'utilisation future de textiles fonctionnalisés : on peut ainsi imaginer des tissus faits à partir de matériaux qui ne laissent aucune substance les traverser ou les imprégner et qui offrent diverses fonctions grâce à l'intégration de capteurs, de systèmes de communications ou de visualisation.



Applications

actuelles et envisagées

47

La Défense a en outre des besoins beaucoup plus spécifiques que les nanotechnologies satisfont en améliorant de façon significative les performances de certaines fonctions. Citons, par exemple, des technologies déjà en service dans les forces armées ou sur le point de le devenir comme les dispositifs de vision nocturne, les matériaux qui permettent de rendre les avions furtifs aux radars ou encore les matériaux de blindage nanostructurés qui associent rigidité renforcée et légèreté.

Comme dans le domaine civil, le potentiel des applications futures des nanotechnologies est extrêmement vaste.

Vers une meilleure protection du combattant

La protection du combattant est un sujet très large qui couvre de nombreuses technologies. On peut ainsi imaginer, dans un avenir relativement proche, la tenue du combattant avec des textiles faits à partir de matériaux qui ne laissent aucune substance les traverser ou les imprégner, offrant diverses fonctions grâce à l'intégration de capteurs, de systèmes de communications ou de visualisation (écran souple). Et pourquoi pas des armures souples grâce à des matériaux capables de s'épaissir aux chocs ?

De nouveaux concepts utilisant des nano-objets sont à l'étude comme des détecteurs chimiques ou biologiques, qui pourront progressivement devenir individuels, autonomes et peu consommateurs en énergie, communicants, sélectifs et présentant une haute sensibilité en temps réel.

Même si les performances requises en matière de microsources d'énergie diffèrent entre applications civiles et militaires, les nanotechnologies interviendront dans l'élaboration de microbatteries, de micropiles à combustible mais aussi dans l'élaboration de dispositifs

de récupération d'énergie (énergie solaire, mécanique, thermique). Elles devraient également permettre d'envisager des progrès significatifs pour le soutien médical à distance, notamment dans la surveillance des conditions physiologiques du combattant, les contre-mesures préventives, la dispense de premiers soins à distance ou la vectorisation de substances thérapeutiques.

Enfin, d'autres dispositifs de protection à base de nanotechnologies sont en cours d'étude ou de validation, en particulier contre les agressions lasers, pour la sécurisation de la mise à feu des munitions ou pour la détection d'explosifs. Les **technologies térahertz** (THz), envisagées pour la détection d'engins explosifs improvisés, peuvent être aussi considérées comme faisant partie des nanotechnologies dans la mesure où les composants qui y sont développés font intervenir des grandeurs de dimensions nanométriques.

Des systèmes d'armes plus performants

Les nanomatériaux sont présents dans tous les systèmes d'armes et font l'objet d'une attention particulière pour de nombreuses applications comme le renforcement et l'allègement de structures à taille ou à performances égales, la tenue à haute température y compris en environnement hostile, des capacités de camouflage évoluées et le comportement vis-à-vis des contaminations nucléaires, biologiques et chimiques (NBC). Un certain nombre de matériaux intéressent également les militaires, comme ceux susceptibles de participer à la détection de la contamination ou à la décontamination, les matériaux énergétiques, qu'ils soient pyrotechniques ou propulsifs, ou les matériaux autoréparants et autocicatrisants.

DÉFINITION

Technologies térahertz

Les rayonnements térahertz (ondes électromagnétiques entre 100 GHz et 30 THz) ont un fort pouvoir pénétrant. Ils permettent potentiellement de voir à travers de nombreux matériaux non conducteurs, tels que la peau, les vêtements, le papier, le bois, le carton, les plastiques...

Ils trouvent des applications comme les télécommunications à hauts débits, les réseaux sans fils, des radars, la surveillance de l'environnement, les tests biomédicaux, l'observation astronomique, la sécurité, etc..



La **criminalistique** regroupe l'ensemble des techniques mises en œuvre par la justice et les forces de police et de gendarmerie pour établir la preuve du crime et identifier son auteur (anthropométrie, médecine légale, toxicologie, etc.) (Larousse)

Des apports en matière de sécurité intérieure

Comme toute nouvelle technologie (informatique, téléphonie mobile...), les nanotechnologies trouvent un débouché au profit des forces de sécurité intérieure. Corrélativement, ces avancées sont aussi utilisées, parfois même avec de l'avance, au service d'objectifs répréhensibles par des malfaiteurs... De fait, ces applications sont de plus en plus portées par le marché civil, aujourd'hui très dynamique, puis « détournées » par les forces de sécurité intérieure.

À moyen terme, les technologies de miniaturisation, en particulier en électronique, pourraient permettre de doter les services de capteurs discrets, voire totalement dissimulables. De même, les développements actuels permettent d'espérer rapidement la mise en œuvre de balises miniaturisées, moins consommatrices et donc de forte autonomie. Le domaine de l'investigation et de la surveillance devrait être le grand bénéficiaire de ces avancées, comme il l'a déjà été de celles de l'électronique.

À plus long terme, l'amélioration des performances et de l'encombrement des moyens de liaisons, tant phoniques que de données, pourrait favoriser une plus grande mobilité des fonctionnaires. A contrario,

on peut redouter que la banalisation de ces technologies ne mette à la disposition des malfaiteurs les plus aguerris des systèmes de contre-mesure, de détection, voire des moyens similaires pour supporter leurs activités.

Dans d'autres domaines, les nanotechnologies doivent permettre de réaliser des avancées sans contreparties. Dans celui de la protection des fonctionnaires notamment les technologies spécifiques aux matériaux résistants (nanotubes et céramique) permettront à la fois d'alléger et de renforcer les équipements de protection individuels et collectifs : gilets pare-balles et pare-coups, vitrages blindés, etc. Par ailleurs, les nanomatériaux devront permettre l'élaboration de nouveaux moyens de **criminalistique**, et favoriser des gains sensibles dans le domaine de la recherche de traces : détection plus fine des indices (révélation de traces papillaires par des poudres spécifiques par exemple), exploitation plus rapide des découvertes, en particulier en matière d'exploitation *in situ* des ADN (grâce à des nanopuces issues des biotechnologies).

Enfin, la mise en œuvre à venir des objets « intelligents », embarquant dans des puces de type RFID ou assimilées des informations d'identification ou de traçage, devrait changer les modes de travail dans la lutte contre les trafics et les contrefaçons.



Applications

actuelles et envisagées

49

CONCLUSION

Les nanotechnologies représentent un domaine vaste de recherche et de développement qui n'est nullement orienté vers des activités particulières. Elles apparaissent diffuses, comme l'a souligné ce chapitre, et préparent une importante mutation industrielle. L'amélioration des propriétés de la matière à l'échelle nanométrique impacte déjà certains produits industriels et impactera bon nombre de produits futurs.

L'exemple de la maison de demain

Ce dernier exemple résume les changements que pourrait induire l'application de certaines nanotechnologies à la maison devenue maison à énergie positive. Pour atteindre

les objectifs d'efficacité énergétique, de durabilité et de moindre maintenance des constructions, il faudra innover dans toutes les directions. Des tuiles solaires aux vitres autonettoyantes et aux surfaces antibactériennes, en passant par des matériaux superisolants ultrafins, les nanotechnologies pourraient à terme s'insérer dans tous les produits de construction.

La maison du futur sera une maison à énergie positive à double titre. Elle sera productrice d'énergie (solaire, biomasse, éolien) pour ses besoins propres et même au-delà, notamment pour la recharge des batteries des moyens de transport (véhicule électrique) et elle sera moins consommatrice en énergie grâce à une isolation thermique poussée et amortissant les cycles thermiques (nanomatériaux à changement de phase), à des systèmes d'éclairage basse consom-

mation (diodes électroluminescentes) et à une gestion intelligente et optimisée des ressources (réseaux de nanocapteurs et nanoactionneurs).

La maison de demain gagnera également en facilité d'entretien (vitres autonettoyantes, peinture résistante aux UV et aux intempéries, surfaces antibactériennes dans les cuisines et salles de bain...) et, grâce aux technologies multimédias basées sur la nanoélectronique, elle deviendra communicante et intelligente pour le confort ambiant des occupants, les tâches ménagères, les loisirs, le télétravail, l'aide au maintien à domicile...

La maison à énergie positive
Vers un habitat plus économe grâce à l'intégration ciblée de nanotechnologies ?

