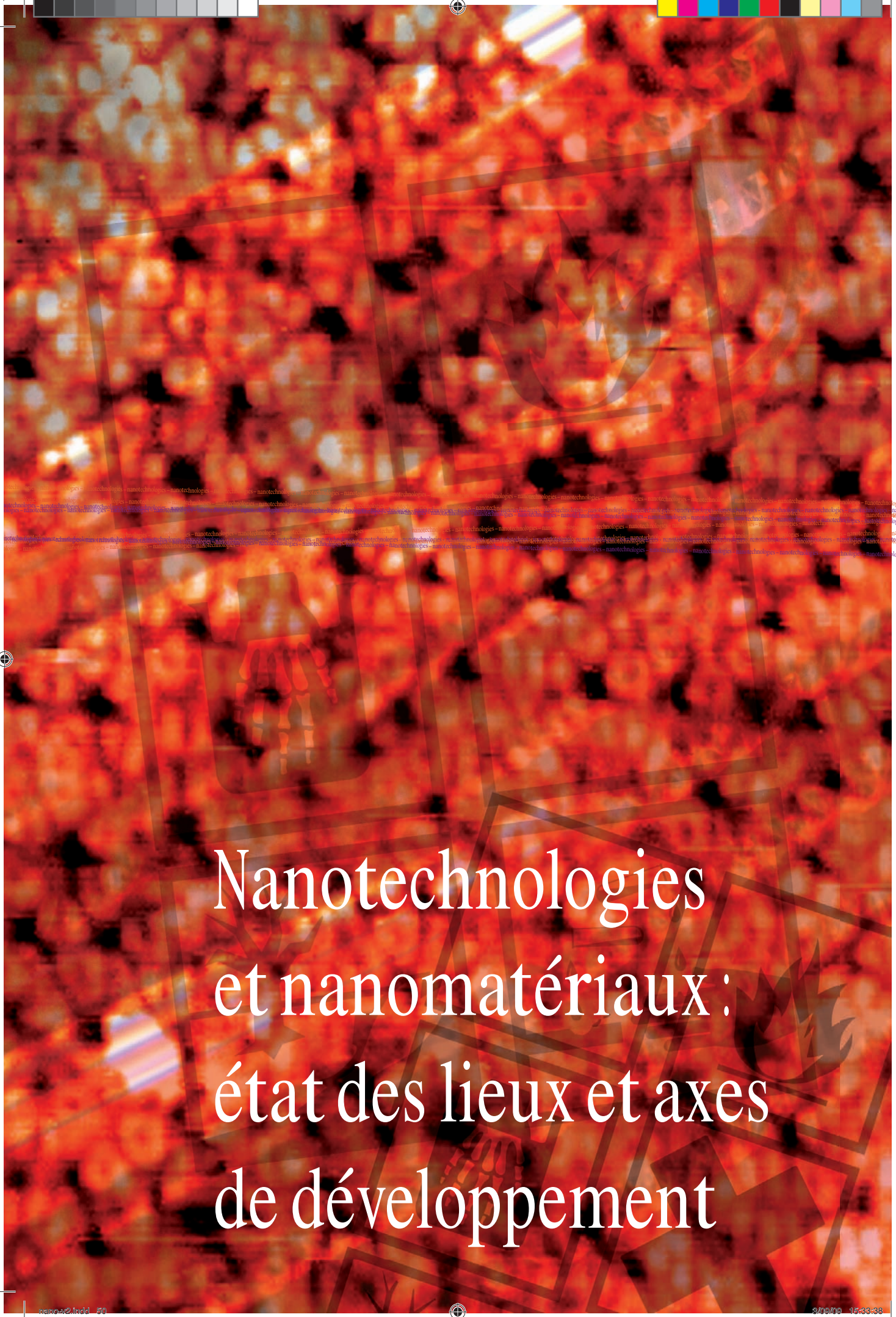


Nanotechnologies et nanomatériaux : état des lieux et axes de développement

nano-v2.indd 50 3/09/09 15:33:38

Risques
pour la santé et l'environnement

Comment caractériser le danger et l'exposition ? 52

Exposition de la population et atteinte à l'environnement 54

Exposition des travailleurs 62

EXPLICATION

Exemple de risques : utiliser des solvants

Vous venez de repeindre le plafond de votre appartement. Quelques taches ont sali le sol. Vous entreprenez donc de les nettoyer avec un solvant dégageant du chlorure de méthyle. Il fait froid dehors et vous n'avez pas ouvert les fenêtres.

Le danger : utilisation de produits chimiques volatils contenant du chlorure de méthyle.

L'exposition : local non ventilé

Les risques : intoxication par les solvants et malaise.

Les moyens de prévention :

– utilisation d'un autre solvant (réduction du danger) ;

– ne pas utiliser plus de produits que nécessaire ;

– ventiler le local (réduction de l'exposition) ;

– ne pas prolonger l'opération (limitation de la durée d'exposition).

PRECISION

L'évaluation des risques s'est développée au début des années 1980 comme « une démarche méthodique de synthèse des connaissances scientifiques disponibles en vue d'évaluer les effets sur la santé résultant d'une exposition d'une population ou d'individus à une substance, un agent ou une situation dangereuse » (Académie des sciences américaine, 1983). Elle s'est peu à peu imposée au niveau international comme l'outil de référence pour évaluer les risques sanitaires chimiques, biologiques et radiologiques liés à l'environnement.

EXPLICATION

Une taille variable en fonction des résultats attendus

Les applications des nanoparticules sont nombreuses et leurs effets dépendent généralement de leur taille. Les propriétés d'un matériau (résistance, absorption…) peuvent être modifiées en introduisant, lors de sa fabrication, des particules de taille nanométrique bien définie. Contrôler la taille, la morphologie et l'environnement chimique des nanoparticules permet de modifier les propriétés macroscopiques du matériau.

L'utilisation de nanomatériaux est appelée à s'étendre de façon importante dans les prochaines années du fait des nouvelles propriétés physiques, chimiques ou biologiques qui sont apportées à cette échelle. Ces nanomatériaux constituant une nouvelle source d'exposition, il est légitime de se poser la question du risque qu'elle représente pour l'homme et pour les écosystèmes.

Pour pouvoir évaluer un **risque** (industriel, sanitaire ou environnemental), il est nécessaire de connaître précisément le danger, c'est-à-dire la source potentielle de dommages ou de préjudice pour une personne, un bien ou l'environnement et l'exposition, c'est-à-dire la situation dans laquelle une personne, un bien ou l'environnement se retrouvent soumis à un danger. Le risque désigne la probabilité qu'un dommage se réalise à la suite d'une exposition à un danger.

Une fois cette connaissance acquise, il est possible de mettre en œuvre des moyens de prévention, c'est-à-dire des mesures qui permettent de réduire le risque, soit en diminuant l'exposition de la personne, soit en diminuant le danger (produits de substitution).

Toutefois, en situation d'incertitude, lorsque toutes les données nécessaires sur les dangers ou l'exposition ne peuvent être connues, des mesures de précaution doivent être prises.

Cette démarche d'évaluation des risques doit impérativement être mise en œuvre à toutes les étapes du **cycle de vie** des produits issus des nanotechnologies : fabrication, transport, usages, élimination (déchets, déchets ultimes), récupération, valorisation. Pour cela, il appartient de connaître précisément tous les producteurs (et importateurs) et les industriels qui manipulent ces nanomatériaux. Il faut également identi er les catégories de populations concernées (consommateurs, travailleurs…). En n, les lières d'élimination et de recyclage doivent être recensées. Tout ce corpus d'information devra être actualisé en permanence pour tenir compte des évolutions.

Du fait de leur singularité, l'évaluation des risques présentés par les éléments constitués de particules à l'échelle nanométrique ou en intégrant, ne manque pas de soulever des questions nouvelles, de méthodes et d'outils, à toutes les étapes de la démarche d'évaluation des risques.

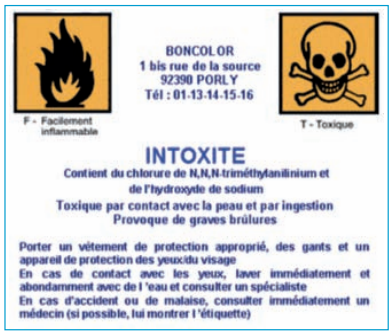
Comment caractériser le danger et l'exposition ?

Cette étape exige d'identi er précisément les propriétés physiques et chimiques spéci ques aux nanomatériaux considérés et de collecter les données résultant de tests en laboratoire pour déterminer leurs e ets sur la santé et l'environnement.

Classiquement, toute démarche pour caractériser le danger d'une substance chimique exige d'être en mesure de connaître le plus exactement sa dénomination, sa composition chimique et son niveau de pureté mais aussi ses caractéristiques physiques et chimiques (ex : poudre gel, acide caustique, taille des particules). Dans le cas des nanomatériaux, la di culté tient au fait que, pour les distinguer les uns des autres et les di érencier des substances chimiques conventionnelles, il faut tenir compte de propriétés spéci ques comme la **taille** moyenne des nanoparticules et ses variations, leur forme (sphère, bre), l'arrangement de leurs cristaux, l'état énergétique de leur surface, l'existence d'un revêtement ou de contaminants externes, leur capacité à s'agréger et/ou à s'agglomérer…

Des travaux de **normalisation** (création en 2005 du comité technique de l'ISOTC 229 « nanotechnologies ») sont en cours a n de lister des paramètres permettant d'identi- er et de classer les nanomatériaux puis de documenter les études de toxicité et de risques.

Par ailleurs, l'élaboration d'une nomenclature dédiée aux nanomatériaux, tenant compte de certains de ces paramètres, est à l'étude. Une fois disponible et accessible, elle permettra d'avancer dans l'évaluation des risques liés à ces éléments. (voir *Moyens déjà mis en œuvre ou envisagés*, pages 111 et 112)



Étiquette normalisée d'un produit chimique

Avant de donner lieu à des mesures d'étiquetage précis, les nanoparticules doivent faire l'objet de travaux de normalisation et de classi cation.

DEFINITION

Qu'est ce qu'une norme ?

Il s'agit d'une règle commune soit juridique, soit technique. Dans ce cas, elle concerne les caractéristiques d'un produit ou service et son mode de fabrication et de commercialisation.

Une norme n'est pas obligatoire, sauf si elle est intégrée dans une loi ce qui est très souvent le cas. Si ce n'est pas le cas, chaque entreprise est libre ou non de la respecter.

Elle est définie par un organisme de normalisation indépendant des fournisseurs, par opposition au standard proposé par un consortium de fabricants ou d'éditeurs.

Les normes prennent le nom de l'organisme : ISO (International standards organization), CEN (comité européen de normalisation), NF (normes françaises).

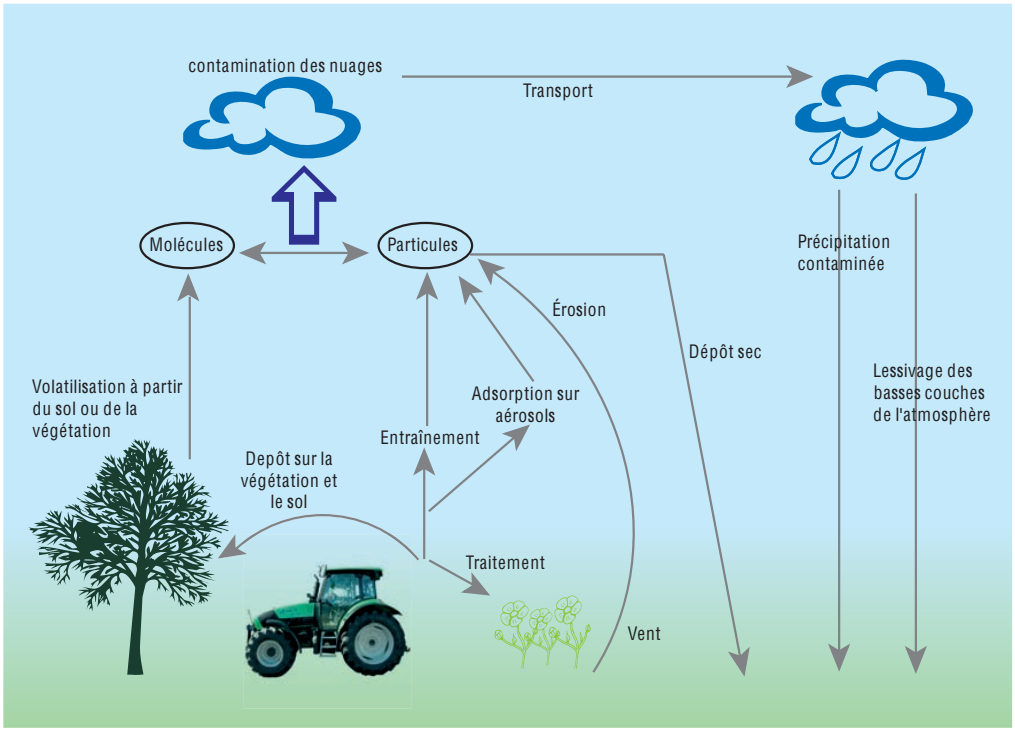
DEFINITION

***L'analyse du cycle de vie** (ACV) est un outil d'évaluation des impacts environnementaux potentiels d'un produit, bien ou service, depuis l'extraction des matières premières qui le composent jusqu'à son élimination en fin de vie, en passant par les phases de distribution et d'utilisation : cette méthode est normalisée au niveau international, série des normes ISO 14 040. (voir* Pistes de travail *page 113)*

Dans ce cadre, l'Afsset a été saisie en juin 2008 afin d'étudier l'impact environnemental des nanomatériaux.

Dispersion d'un polluant dans l'environnement

Les principaux modes de di usion des nanoparticules dans l'environnement.



nano-v2.indd 53 3/09/09 15:33:42

EXPLICATION

*Les **tests** classiques de toxicité*

Classiquement, et selon les lignes directrices de l'OCDE, les tests visant à déterminer le seuil de toxicité d'une substance chimique sont, par exemple, définis ainsi : la dose létale 50 pour un test chez la souris est la recherche de la dose qui provoque la mort de 50 % des souris. Si la dose observée dépasse le seuil admis, la substance sera considérée comme toxique.

EXPLICATION

Protection des travailleurs : des recommandations dès 2006

Suite à la demande des pouvoirs publics, l'Afsset a émis un rapport et des recommandations en 2006 sur la prévention des risques liés aux nanomatériaux, notamment en termes de :

- connaissance des nanoparticules et nanomatériaux ;

- coordination de la recherche ;

- détection des nanoparticules ;

- toxicologie, épidémiologie, caractérisation des expositions humaines et évaluation des risques sanitaires ;

- moyens de protection individuelle et collective ;

- normalisation et réglementation ;

- formation et information.

ILLUSTRATION

*Les différentes formes du **dioxyde de titane***

Le dioxyde de titane sous forme de poudre micrométrique est utilisé comme opacifiant dans différents produits comme les comprimés blancs, les crèmes cosmétiques ou les emballages.

Mais il est aussi employé sous forme nanométrique dans différents types d'applications pour lesquelles il possède des caractéristiques différentes : pour une activité de dépollution, on le trouve à l'état cristallin et pour une activité de filtre ultraviolet dans les cosmétiques, il subit un traitement de surface par une autre substance chimique.

Concernant la collecte des données toxicologiques permettant de déterminer les e ets des nanomatériaux sur la santé et l'environnement, des travaux sont en cours pour véri er la pertinence des **tests** habituellement menés sur les substances chimiques. En e et, la détection et le dosage spéci que des nanomatériaux nécessitent des outils spéci ques qui tous ne sont pas encore harmonisés ou développés. Cette collecte de données, sans parler de la préparation des échantillons pour mener les tests, dépend étroitement de la collaboration des milieux industriels et de la recherche.

Par ailleurs, le développement considérable des nanomatériaux dans le domaine de la santé et les perspectives ouvertes dans le secteur alimentaire posent la question de leur dissémination dans l'organisme (Voir *L'alimentation et l'agriculture* pages 24 à 34). En e et, du fait de leur petite taille et de leur énergie de surface, ces particules peuvent franchir les barrières naturelles de l'organisme jusqu'à pénétrer dans les cellules en s'étant ou non préalablement liées aux protéines circulantes de membranes, ce qui peut-être un facteur favorisant l'atteinte des noyaux et de l'ADN. Quelques études montrent le pouvoir de certaines particules à s'accumuler dans des organes comme le foie, le rein et le cerveau. Ainsi, la position française, exprimée au niveau international, en termes d'études prioritaires à mener est la suivante :

- les études de toxicocinétiques ou ADME (absorption, distribution, métabolisation et excrétion) a n d'identi er les organes cibles en fonction des nanomatériaux ;
- les études de génotoxicité, compte tenu du manque de données de la littérature ou des données contradictoires et en raison des risques cancérigènes et sur la reproduction.

Exposition de la population et atteinte à l'environnement

En matière d'évaluation du risque sanitaire des nanomatériaux manufacturés, on distingue l'exposition de la population via l'utilisation ou la consommation de produits en contenant ainsi que via l'environnement, déchets, eaux de consommation, air, sols (pages 54 à 61), et celle des **travailleurs** (pages 62 et 63).

Il s'agit, à cette étape, de distinguer les di érentes voies possibles d'exposition (par ingestion, par respiration ou par la peau) et d'évaluer quelle quantité du nanomatériau est susceptible d'être considérée comme dangereuse, en fonction de la voie d'exposition, de sa fréquence et de sa persistance dans l'organisme.

Rappelons que les nanoparticules possèdent des propriétés spéci ques, di érentes de celles de leurs équivalents chimiques de taille micrométrique, qui déterminent notamment leur réactivité au sein de systèmes biologiques et environnementaux. Pour n'en citer que deux : la nature du milieu dans lequel elles se trouvent (plus ou moins acide, conducteur ou isolant…) peut in uer sur leur comportement et leur relation aux éléments qui les entourent ; pour une même substance, il peut donc exister plusieurs formes, ayant chacune des propriétés di érentes (cf. exemple **dioxyde de titane**). Une caractérisation physique et chimique est donc absolument nécessaire, ne serait-ce que pour pouvoir mener des tests toxicologiques et comprendre l'impact toxicologique de ces substances sur les systèmes biologiques.

On peut globalement distinguer deux types d'exposition de la population aux nanomatériaux : les expositions directes (nanomatériaux dans les produits d'hygiène corporelle, les médicaments, les emballages alimentaires, les vêtements…) et indirectes (aux nanoparticules ou nano-objets se retrouvant dans l'environnement et résultant de l'usure ou de la n de vie des nanomatériaux contenus, par exemple, dans les pneumatiques, les encres, les essences, ou déposés sur les vitrages, les panneaux solaires…).

Actuellement, un premier inventaire non exhaustif des produits commerciaux contenant des nanomatériaux est accessible dans une base de données internationale (Woodrow Wilson Institute). 800 produits au moins, dont beaucoup de grande consommation, ont déjà été recensés. La population dans son ensemble est donc potentiellement concernée. Une meilleure connaissance des usages va devoir se développer.

Les programmes français

De nombreux travaux de recherche en France dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies s'appuient sur le réseau des centrales technologiques. Ils sont également menés dans le cadre des programmes soutenus par l'ANR et dans les pôles de compétitivité.

L'ANR soutient plusieurs programmes :

– **le programme P3N** (programme national en nanosciences et nanotechnologies) subventionne des projets de recherche fondamentale et appliquée, nanocomposants, micro-nanosystèmes, nanobiotechnologies, nanomatériaux, instrumentation et métrologie, modélisation et simulation. Un volet est dédié à l'impact et aux risques des nanotechnologies pour la santé et l'environnement ainsi qu'aux aspects éthiques et sociétaux. À titre d'exemples :

  – Aquanano (2007), transfert de nanoparticules manufacturées dans les aquifères : développement d'une méthodologie et identi cation des processus ;

  – Nanobench (2007), Assessing the S&T economic and social impact of nanotechnologies ;

– **le programme matériaux et procédés** vise la recherche de nouveaux matériaux et de procédés industriels, l'amélioration de leurs performances techniques et économiques et encourage le transfert de technologie vers l'industrie. Les nanomatériaux occupent donc une bonne place dans ce programme ;

– **le programme SEST (santé environnement et santé travail)** a pour but de révéler l'impact, encore peu connu, des facteurs environnementaux sur la santé humaine, en mesurant l'exposition à ces facteurs et en identi ant leur rôle dans l'origine ou l'aggravation de certaines maladies. Ce programme s'intéresse en particulier à l'éventuelle toxicité des nanoparticules. À titre d'exemples, les programmes suivants peuvent être cités :

  – Nanofeu (2007), impact des nanocharges sur le comportement au feu ;

  – Signanotox (2007), signatures toxicologiques de nano-objets manufacturés sur des cellules humaines après inhalation ou ingestion ;

PRECISION

Nanogenotox

À signaler, dans le programme européen de santé publique 2008-2013, une action conjointe publiée en février 2009 sur la sécurité des nanomatériaux sous présidence française de l'Union européenne en décembre 2008. La France a assuré la coordination de cette action, qui a fait l'objet d'un appel d'offres, et a présenté un dossier pour un programme dénommé Nanogenetox visant à établir une méthodologie robuste relative à la détection de molécules potentiellement génotoxiques, c'est-à-dire pouvant compromettre l'intégrité du génome. Quinze nanoparticules déjà sur le marché et utilisées dans divers produits (silice, dioxyde de titane et nanotubes de carbone) vont être soigneusement caractérisées au plan physique et chimique et faire l'objet de tests. Cette action, sur trois ans, regroupe 17 institutions et 13 États membres.

PRECISION

L'Afsset soutient, depuis 2004, plusieurs programmes en santé environnement.

En 2007 :

– impact sur cellules rénales des nanoparticules manufacturées ;

– devenir des nanoparticules minérales manufacturées dans les milieux aquatiques.

En 2006 :

– Nanop : niveaux, déterminants et variabilités des nanoparticules dans l'environnement intérieur ;

– évaluation in vitro de la réactivité des particules fines et ultrafines.

En 2004 :

– toxicité respiratoire des nanotubes de carbone (université catholique de Louvain).

nano-v2.indd 55 3/09/09 15:33:44

EXPLICATION

Exigence de traçabilité et connaissance des risques

L'étiquetage des produits finis utilisés par le consommateur est un élément contribuant à la traçabilité. Le Grenelle environnement a envisagé l'étiquetage des produits finis contenant des nanoparticules manufacturées mis à la disposition du public. Cette option n'a pas été retenue compte tenu des contraintes règlementaires au plan communautaire relatives à l'étiquetage des produits chimiques et du manque actuel d'informations sur les dangers réels. En revanche, il a été proposé de porter cette question au niveau européen. Notons que la mise en exergue systématique de la présence de nanoparticules pourrait induire dans l'esprit du consommateur une suspicion de risque alors même que les travaux internationaux sur ce sujet sont toujours en cours et leurs conclusions attendues.

EXPLICATION

Les fullerènes et l'eau

Il a été montré que le fullerène (C_{60}), très peu soluble, réagit avec l'eau pour former des agrégats colloïdaux ayant des diamètres compris entre 5 et 500 nm (nC_{60}). Les agrégats sont relativement stables pendant 15 semaines dans des milieux aqueux représentatifs des eaux douces. Ils sont en revanche instables dans un milieu aqueux caractéristique des eaux salées. (Voir L'eau *pages 26 et 27)*

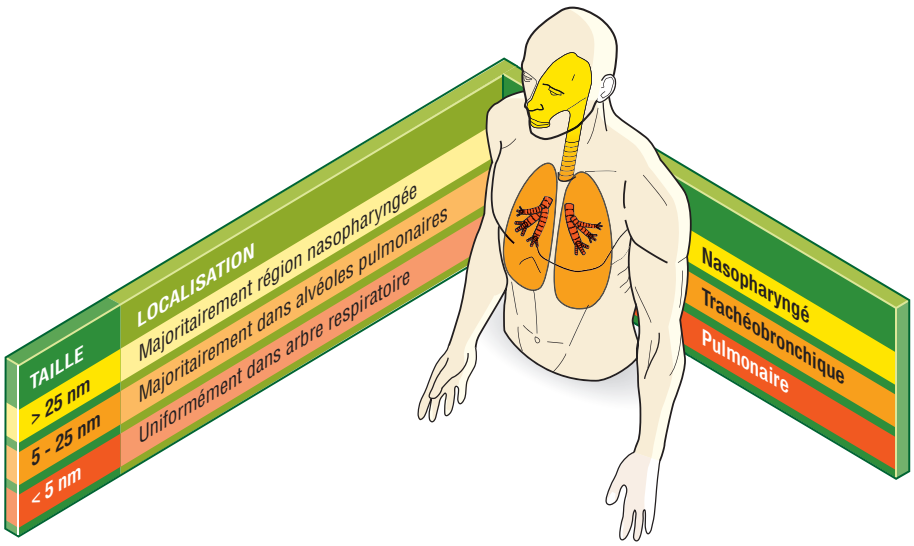
Trois voies d'exposition : respiratoire, à travers la peau et orale

La voie respiratoire constitue la voie d'entrée privilégiée des nanoparticules en raison de leur taille. Les quelques données disponibles jusqu'ici montrent qu'elles se répartissent dans les voies respiratoires en fonction de leur diamètre. Toutefois, l'appareil respiratoire semble présenter une barrière e cace et le passage des nanoparticules entre les poumons et le sang serait limité. On l'estime, à partir de données expérimentales chez l'animal, à environ 1 % des nanoparticules inhalées. Le dépôt des nanoparticules peut se produire à tous les niveaux de l'appareil respiratoire depuis le nez jusqu'aux alvéoles.

La présence de nanoparticules dans de nombreux produits cosmétiques ou paramédicaux amène à s'interroger sur l'exposition à travers la peau. Aujourd'hui, il semble que la peau intacte constitue une barrière e cace : les particules ne passeraient pas la couche cornée de l'épiderme, même si une accumulation dans les follicules pileux (qui produisent les poils) est observée. L'exposition au travers d'une peau lésée n'a pas encore été étudiée avec précision. Toutefois, selon la lésion, les nanoparticules sont susceptibles de pénétrer dans l'organisme via le derme et le réseau des veinules (vaisseaux sanguins de la peau) qu'il contient ainsi que les terminaisons nerveuses.

L'exposition par ingestion de nanoparticules peut se produire en mangeant des aliments contaminés, en avalant des particules inhalées ou en portant à la bouche une main contaminée. L'évaluation de l'exposition est limitée par l'absence de méthodes validées et applicables en routine permettant la détection, l'identification et la quantification des nanoparticules dans la matrice alimentaire.

Le comportement des nanoparticules dans l'eau est très important pour apprécier leur toxicité. Elles peuvent avoir, par rapport à leurs homologues microscopiques, une moindre capacité à se dissoudre et une plus



Exposition d'une personne à l'inhalation de nanoparticules

La caractérisation de la pénétration des nanoparticules dans l'appareil respiratoire dépend de leur taille.

grande tendance à s'agglomérer lorsqu'on les disperse.

Il est important de préciser que les nanoparticules se présentent rarement sous une forme unitaire mais le plus souvent sous la forme d'un agglomérat ou d'un agrégat de nanoparticules, d'une taille, par conséquent, supérieure à celle de la nanoparticule elle-même. Il ne faut néanmoins pas négliger la possibilité que ces agglomérats-agrégats se décomposent lorsqu'ils pénètrent dans l'organisme et que des nanoparticules unitaires passent ainsi l'ensemble des barrières. Par ailleurs, les nanoparticules en agrégats conservent leurs propriétés spécifiques.

Toxicité : des données expérimentales pour mener des évaluations

Les données dont on dispose aujourd'hui sur la toxicité des nanoparticules proviennent en partie des études épidémiologiques et expérimentales sur les particules nes et ultra- nes de la pollution atmosphérique et des études expérimentales portant sur les nanoparticules manufacturées telles que les nanoparticules d'oxyde de titane, de noir de carbone, les nanotubes de carbone…

Les premières montrent une association entre les polluants sous forme particulaire présents dans l'air et les maladies pulmonaires telles que l'asthme et la bronchite chronique et cardiovasculaires. Toutefois, la plupart du temps, la composante nanométrique de la pollution atmosphérique n'a pas été spéci quement mesurée et il n'est donc pas possible de séparer les e ets spéci quement liés aux particules plus grosses. Cependant les études expérimentales montrent clairement que les nanoparticules sont plus toxiques que les particules plus grosses de taille micrométriques pour la même composition. Ceci est clair pour les nanoparticules d'oxyde de titane et de noir de carbone. Pour les particules nes et ultra nes atmosphériques, la toxicité observée a été attribuée en partie aux contaminants adsorbés (collés) en surface de la particule.

De nombreuses études chez l'animal ont montré que la toxicité pulmonaire des nanoparticules était plus importante que celle observée avec la même quantité de particules de même nature mais plus grosses. Leur toxicité tient à leurs propriétés de surface ainsi qu'à leur taille et leur forme.

EXPLICATION

La disponibilité des informations : une préoccupation des agences de sécurité sanitaire

Les agences et instituts concernés par des études sur les nanotechnologies (Afssa, Afssaps, Afsset, InVS) font part des difficultés qu'elles rencontrent pour répondre aux saisines, en raison du manque de spécificité des méthodes d'essais toxicologiques et du manque de méthodes validées concernant la caractérisation et la mesure. Ces agences souhaiteraient également une diffusion de l'information et la facilitation de l'accès au savoir concernant la production, les usages, les bénéfices et les risques des nanomatériaux de la part notamment des industriels les utilisant ou les fabriquant. L'obligation d'enregistrement vivement défendue par la France devrait pallier certaines de ces difficultés. (voir Règlementation *page 111)*

Crèmes et cosmétiques contenant des nanoparticules font l'objet de tests spéci ques avant leur mise sur le marché.

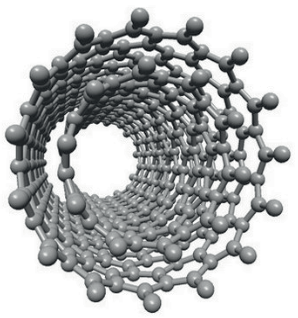
nano-v2.indd 57 3/09/09 15:33:45

EXPLICATION

Les diverses formes des nanotubes de carbone

Une étude a montré que les propriétés physico-chimiques des nanotubes de carbone (page 17) dépendent de leur environnement (sols, eaux de surface, eaux souterraines, végétaux, animaux…).

Ceci implique que chaque écosystème est exposé à un type différent de nanotubes de carbone.



EXPLICATION

Quelle valeur donner aux résultats des tests menés sur le rat ?

Plusieurs études par inhalation chez le rat montrent que les nanoparticules ont la capacité de passer de l'épithélium nasal (la paroi interne du nez) au bulbe olfactif (zone du cerveau où sont analysées les odeurs captées par le nez). Par ailleurs, il n'est pas certain que ce que l'on observe chez le rat puisse s'appliquer à l'homme : les rats respirent par le nez uniquement, leur muqueuse nasale est olfactive à 50 % (contre 5 % chez l'homme) et le poids de leur bulbe olfactif est proportionnellement 177 fois plus élevé que chez l'homme. Néanmoins, une étude ancienne chez le singe a montré un passage de nanoparticules d'or (50 nm) par cette voie.

Toutefois, certains spécialistes discutent les conditions de réalisation de l'expérience

Rappel

Quelques particularités des nanoparticules

- **Elles agissent par leur surface. Et, comme plus une matière est divisée, plus elle tend à être active, l'e et des nanoparticules dépend largement de la super cie de leur surface extérieure.**
- **Leur forme joue un rôle : les premiers résultats montrent, par exemple, que les bres sont plus nocives que les sphères car plus susceptibles d'e ets mécaniques (piqûres) et plus di ciles à dégrader et à éliminer par l'organisme.**
- **Elles peuvent très aisément transporter des substances collées (adsorbées) à leur surface.**
- **Toutes ne sont pas solubles.**

Des premiers travaux suggèrent que leur taille les amène à suivre des « chemins » di érents des particules microscopiques au sein de l'organisme (franchissement des barrières poumon sang, sang cerveau, placenta…)

La majorité des études *in vivo* publiées à ce jour porte sur le rat, qui n'est pas toujours le modèle le plus pertinent pour l'exposition humaine, d'autant plus que la majorité des expériences ont été e ectuées par instillation directe des substances par la trachée, ne reproduisant pas ainsi les conditions normales d'inhalation. La communauté scienti que n'est pas unanime à reconnaître la validité des résultats d'une étude montrant qu'une substance reconnue habituellement comme peu toxique, le dioxyde de titane, présente une toxicité pulmonaire plus importante lorsqu'elle est de dimension nanométrique.

Parmi les di érents nanomatériaux, les chercheurs s'intéressent aux **nanotubes de carbone** (lire page 17) dont certains présentent une similitude de forme avec les bres minérales de type amiante. Il a été montré que les plus grands nanotubes mettaient plus de temps à être éliminés par les poumons. Toutefois, ce résultat est diversement accueilli car certains agglomérats évoqués par les études sont, chez l'homme, normalement ltrés par des dispositifs au niveau du nez (alors qu'ils ont été instillés et non inhalés par le rat lors de l'expérience).

Concernant les produits cosmétiques, l'Afssaps a mené une enquête auprès des industriels de la cosmétique en 2008. Il ressort des réponses obtenues que les produits cosmétiques sont susceptibles de renfermer notamment des nanoparticules insolubles et/ou biopersistantes telles que les dioxydes de titane et de fer et des oxydes de zinc, d'argent et d'or. Toutes les catégories de produits (crèmes, gels, lotions, savons…) peuvent contenir des nanoparticules. Concernant l'évaluation des risques, l'Afssaps insiste sur le fait que les outils analytiques appropriés sont insu samment pertinents pour quanti er ces nanoparticules et mesurer leur biodégradabilité. De plus, l'interdiction de l'expérimentation animale sur les produits nis et sur les ingrédients est e ective depuis mars 2009 (7e amendement de la directive 76/768/CEE) bien qu'il n'existe actuellement aucune méthode d'essai in vitro validée pour évaluer la toxicité à long terme des nanomatériaux. De même, la littérature disponible ne permet pas d'exclure un passage, aussi faible soit-il, des particules dans la peau viable. L'Afssaps s'interroge sur le devenir des nanoparticules en cas d'accumulation dans les follicules pileux et sur le risque lié aux applications sur une peau lésée.

Seules quelques études ont abordé la toxicité des nanoparticules après ingestion orale. Les résultats sont souvent discordants et ne permettent pas de conclure à un e et dose, à un e et taille, à une relation entre les caractéristiques physico-chimiques de la particule et la toxicité. C'est pourquoi toute évaluation de nanomatériau devra être conduite au cas par cas, en prenant en

nano-v2.indd 58 3/09/09 15:33:47

considération ses propriétés spéci ques, di érentes de celles du matériau conventionnel correspondant.

De manière générale, la toxicité des nanoparticules sur l'ensemble de l'organisme (systémique) est encore insu samment explorée.

Par ailleurs, concernant les risques de cancer, les données liées aux nanomatériaux manufacturés sont encore peu nombreuses. Les premiers résultats concernant les fullerènes et le dioxyde de titane sont contradictoires. Plusieurs études *in vitro* suggèrent un potentiel carcinogène de ces deux substances sous l'action des UV mais aucune augmentation de l'incidence de cancers n'a été mise en évidence *in vivo*. Plusieurs études sont parues en 2008, notamment sur la capacité des nanotubes à induire des tumeurs pulmonaires chez les rongeurs. Une similitude d'action a été avancée pour certains nanotubes (plutôt longs et rigides) et l'amiante. Toutefois, là encore, les conditions de l'expérience (doses et mode d'administration) ne permettent pas, selon quelques spécialistes, de conclure à un risque cancérogène chez l'homme.

En conclusion, il apparaît qu'il ne su t pas de considérer l'espèce chimique des nanoparticules (en quoi sont-elles faites ?) et la concentration maximum admissible (combien de milligrammes par mètre cube pour obtenir tel e et négatif ?) comme on le fait habituellement dans les études de toxicité. Les travaux à mener doivent permettre de comprendre leur devenir une fois qu'elles ont pénétré dans l'organisme, les réactions qu'elles provoquent, la manière dont elles sont éliminées ou non.

Il n'est donc pas possible aujourd'hui de mener une évaluation pertinente des risques sanitaires potentiels liés aux nanoparticules manufacturées pour la population en général. Comparativement aux substances chimiques conventionnelles, les données épidémiologiques et toxicologiques valides tout comme les caractéristiques des expositions des populations ne peuvent être générées du fait de méthodes et d'outils de mesure adaptés encore insu sants.

La maîtrise du risque industriel

La très grande majorité des produits sont combustibles sous forme de poudre et peuvent donner lieu à des explosions appelées communément explosions de poussières. Or, comme les particules sont plus réactives à l'échelle nanométrique que micrométrique, la maîtrise des risques d'accidents liés à la production et à l'utilisation des nanomatériaux représente un enjeu important pour le développement de ces nouvelles technologies.

Aujourd'hui, pour réduire ces risques sur les populations et l'environnement, les industriels concernés par tous les produits poudreux ont l'obligation de recourir à des systèmes de con nement similaires à ceux qui existent dans les industries liées à des produits dangereux (chimiques hautement toxiques, pharmaceutiques, issus du nucléaire, viraux ou hautement pathogènes…).

Des études sur les nanoparticules et leurs mécanismes d'agglomération et de dispersion sont en cours au niveau européen et international. Elles s'inscrivent dans une démarche de gestion des risques à travers le principe de précaution (mentionné à l'article 5 de la charte française de l'environnement, ayant valeur constitutionnelle) mais sont également impératives compte tenu du développement rapide de certains types de nanomatériaux.

EXPLICATION

Risques alimentaires : au cas par cas

Les agences européenne (AESA) et française (Afssa) de sécurité sanitaire des aliments, dans des avis récents (février et mars 2009 respectivement), constatent la faiblesse des données sur la toxicité par ingestion des nanoparticules dans les applications alimentaires et recommandent que leur évaluation se fasse au cas par cas. Elles rappellent enfin le haut degré d'incertitude associé aux évaluations individuelles tant que des méthodes prenant en compte les spécificités des nanomatériaux n'auront pas été établies.

Les deux agences recommandent notamment le soutien de travaux de recherche en matière de caractérisation, détection et mesure des nanomatériaux manufacturés dans les matrices alimentaires.

EXPLICATION

Des nanopoudres sous haute surveillance

Pour développer les connaissances indispensables à l'évaluation des risques générés par ces particules, l'Institut national de l'environnement industriel et des risques (Ineris) a participé à plusieurs projets nationaux et internationaux (Nanoris, Nanosafe 2) qui ont notamment montré que la diminution de la taille des particules pouvait impliquer une forte augmentation de la réactivité des nanomatériaux par rapport aux poudres micrométriques, ainsi qu'une sensibilité fortement accrue à l'inflammation par étincelle. Il est cependant apparu que les tests et méthodes standards habituellement employés pour évaluer le risque d'inflammation et d'explosion des micropoudres tendaient parfois à sous-évaluer fortement certains paramètres de sécurité.

nano-v2.indd 59 3/09/09 15:33:47

Les risques pour l'environnement

De nombreux usages conduisent déjà à l'introduction de nanoparticules dans l'environnement, soit intentionnellement (traitement de dépollution de sols ou d'eaux par exemple), soit accidentellement suite à l'altération de produits en contenant ou à une pollution. La prévision de leur impact sur l'environnement nécessite de déterminer leur toxicité vis-à-vis des organismes et leur devenir et comportement dans l'environnement.

Peu de données existent à l'heure actuelle pour apprécier de manière certaine la mobilité, le devenir et les éventuels e ets toxiques des nanoparticules dans les eaux et sur les organismes aquatiques

Les impacts sur l'air, les sols et les eaux

Compte tenu de leur taille, les nanoparticules pourraient être facilement dispersées par voie atmosphérique, transportées sur de longues distances puis redéposées loin de leur lieu d'émission. Toutefois, du fait de leur réactivité chimique élevée, il semble qu'elles tendent à xer d'autres polluants et donc à se déposer plus rapidement sur le sol même s'il existe, à cet égard, des di érences entre les particules ultra nes, issues par exemple de la combustion, et les nanoparticules industrielles.

Il existe peu d'études spéci ques concernant la mobilité des nanoparticules dans les sols. Néanmoins, du fait de leur taille, elles y sont potentiellement mobiles. Par ailleurs, leurs propriétés de surface leur confèrent celle de xer certains polluants comme les métaux lourds ou divers pesticides et pourraient donc favoriser tout autant leur transport dans les sols que leur capture lors d'une opération de dépollution. La formation de ces complexes peut aussi s'accompagner de changements des propriétés toxiques des nanoparticules. La combinaison de ces phénomènes peut entraîner des modi cations de la qualité du sol et des eaux souterraines.

Des nanoparticules se retrouvent aussi dans des eaux de surface suite au ruissellement et au lessivage de sols contaminés, aux dépôts de particules transportées par voie atmosphérique ou à un déversement accidentel. On ne sait pas aujourd'hui si, en milieu aqueux, leur structure physique, et donc leurs propriétés, peuvent être modi ées, y compris, par exemple leur capacité à se dissoudre dans l'eau.

En outre, si les industries spécialisées disposent sans doute de données permettant d'apprécier l'e cacité et les risques associés à l'usage de nanotechnologies dans le traitement des eaux, peu de données publiques

sont disponibles à l'heure actuelle (Voir *Applications – L'eau* pages 26 et 27).

En conclusion, dans l'environnement, les nanoparticules sont soumises à di érents mécanismes qui a ectent leur mobilité et leur devenir. Leur étude en laboratoire est limitée par le fait qu'il est di cile de reproduire à l'identique les diverses conditions environnementales qu'elles peuvent rencontrer, en particulier lorsqu'il s'agit des agrégats qu'elles tendent à former spontanément dans la nature.

L'impact sur la faune et la ore

S'agissant de l'impact des nanoparticules sur le monde vivant, diverses études ont été menées sans qu'il soit possible de tirer des conclusions générales.

La première étude de toxicité des nanoparticules sur un vertébré non mammifère date de 2004 (fullerène vis-à-vis de la perche truitée). Si de nombreux organismes aquatiques ont fait l'objet de recherches, les données d'e ets écotoxiques les concernant sont actuellement quasi inexistantes.

Les connaissances relatives aux micro-organismes sont abondantes, vraisemblablement du fait de l'e et bactéricide de certaines nanoparticules. En revanche, très peu de travaux existent concernant leur toxicité vis-à-vis des plantes. Néanmoins, compte tenu de leur taille, les végétaux pourraient logiquement les absorber dans les sols et dans les airs. Quel impact ont-elles alors sur ces derniers, du fait de la présence de polluants adsorbés à leur surface ou piégés dans leur structure ? Des études sur l'e et du dioxyde de titane à l'échelle nanométrique sur l'épinard font apparaître des e ets, comme des inhibitions de germination, de croissance et de synthèse de chlorophylle, que la micropoudre du même composé ne présente pas.

Sans qu'il soit toutefois possible de dégager de conclusion générale, divers impacts ont également été observés sur les crustacés et les poissons dans plusieurs études : altérations du développement embryonnaire chez le poisson zèbre (Danio rerio), altérations des capacités respiratoires chez la truite arc-en-ciel exposée à des nanotubes de carbone monoparois, phénomènes de mortalité chez des amphibiens exposés à une forte concentration de nanotubes de carbone à double paroi.

En conclusion, les connaissances sur l'écotoxicité des nanoparticules sont encore aujourd'hui très limitées, rendant délicate l'évaluation des risques pour les écosystèmes liés à leur utilisation. Compte tenu du développement de l'utilisation de ces composés et des e ets de leur relargage dans les milieux, il est aujourd'hui nécessaire de développer d'une part les études de caractérisation de l'écotoxicité et d'autre part d'a ner les connaissances concernant leur devenir dans l'environnement a n de préciser les niveaux d'exposition potentielle des organismes.

En attendant l'élaboration de lignes directrices spéci ques, les essais devront être réalisés conformément aux lignes directrices existantes. Les travaux actuellement menés au sein de l'Iso (TC 229) pourront sans doute contribuer à répondre à ces questions et fournir des outils adéquats. (voir pages 111 et 112)

nano-v2.indd 61 3/09/09 15:33:52

REPERES

Sans caractérisation du danger, quelle prévention ?

Via l'enregistrement prévu par le règlement REACH (Registration, Évaluation, Autorisation and Restriction of Chemicals) et le nouveau règlement sur la classification, l'étiquetage et l'emballage, qui prévoit la classification des substances dangereuses dès leur mise sur le marché quel que soit le tonnage, et sous réserve de disposer d'un système d'identification et de caractérisation des nanomatériaux, il deviendra possible de connaître les nanomatériaux présentant des dangers, fabriqués et mis sur le marché.

Cependant la réglementation actuelle rend la mise à disposition de cette fiche obligatoire uniquement pour les substances présentant des dangers avérés. Une démarche est initiée dans le cadre de la normalisation internationale afin de constituer des fiches spécifiques de sécurité pour les nanomatériaux renseignées avec les données disponibles. Par ailleurs, leur mise à disposition même en l'absence de dangers sur la base du volontariat des industriels est explorée. Cette démarche volontaire est préconisée par l'association des industries allemandes depuis 2008.

CHIFFRES

Selon une étude, réalisée par l'Institut national de recherche et de sécurité (INRS) en 2007, 2 000 à 4 000 travailleurs sont susceptibles d'être exposés aux nanomatériaux dans des installations françaises de production de nanoparticules manufacturées.

L'Agence française de sécurité sanitaire de l'environnement et du travail (Afsset) précise, en juillet 2008, que ce nombre croît de manière significative si on y associe les effectifs des industries qui utilisent ou incorporent ces nanomatériaux en vue de fabriquer des produits industriels ou de grande consommation.

Dans les laboratoires de recherche publique, 7 000 personnes seraient susceptibles d'y être exposées, dont près de 2 300 seraient tout particulièrement concernées.

EXPOSITION DES TRAVAILLEURS

Le développement extrêmement rapide des nanomatériaux et des nanotechnologies induit l'exposition d'un nombre croissant de travailleurs, tant dans les domaines de la production et de l'utilisation industrielle que dans les laboratoires de recherche. Il est donc impératif de mettre en place des dispositifs d'évaluation des risques qui doivent conduire à l'élaboration de lignes directrices en matière de prévention.

En milieu professionnel, le poumon est le principal organe cible des nanoparticules. Au poste de travail, la fraction inhalée sera d'autant plus importante que l'activité physique est intense.

La détermination de l'exposition aux nanomatériaux est un sujet complexe, faisant l'objet de ré exions depuis déjà quelques années au niveau international. Les principales dif- cultés rencontrées par les spécialistes de médecine du travail pour progresser dans les aspects normatifs de mesure de l'exposition des opérateurs sont liées aux inconnues sur les mécanismes de réponse biologique, au caractère multiforme d'une même substance (taille, cristallinité, morphologie, chimie de surface…) et aux équipements de mesure qui, bien que nombreux, ne sont pas spécialisés dans une seule des grandeurs à mesurer.

Des mesures en attendant des données plus précises

Devant ces di cultés, le Comité de la prévention et de la précaution (CPP) a préconisé, dès 2006, l'introduction, aux postes de travail où sont manipulées des nanoparticules, d'un ensemble de dispositions protégeant les travailleurs, sans attendre la mise en évidence de la toxicité ou de l'innocuité de ces composés.

Les dispositions **recommandées** portent sur l'obligation de contention dans des systèmes clos chaque fois que cela est possible, la limitation et l'évaluation des expositions, l'exclusion des postes de travail concernés des femmes enceintes et allaitant, la mise à disposition de moyens collectifs et individuels de protection, la collecte, l'évacuation et le traitement sûrs des déchets, l'information des travailleurs, de leurs représentants et des organismes de contrôle et, en n, une surveillance médicale spéciale.

L'Afsset recommande, quant à elle, dans son rapport de juillet 2008, la mise en œuvre de bonnes pratiques et rappelle, qu'au vu des incertitudes quant aux e ets sanitaires des nanoparticules, il est plus prudent de déclarer les nanoparticules en « niveau de danger inconnu » et d'appliquer à leur manipulation les procédures de sécurité sanitaire qui sont utilisées pour diminuer l'exposition aux matières dangereuses.

Les principes de nanosécurité proposés par l'Afsset, a n de prévenir spéci quement les risques potentiels liés aux nanomatériaux, comportent l'application d'une stratégie de priorité dans les mesures de prévention conformément au principe Stop (substitution, technologie, organisation, protection), la signalisation des risques, l'archivage et la traçabilité des informations concernant l'exposition résiduelle et les conditions de travail des salariés, le mesurage de l'ambiance des locaux ou du personnel, le suivi

nano-v2.indd 62 3/09/09 15:33:52

médical et la formation des travailleurs et la mise en application des moyens de prévention conformément aux règles en vigueur pour le transport des marchandises dangereuses.

Concernant l'e cacité des équipements de **protection individuelle**, les premières études réalisées notamment par l'INRS (ND 2 288) et le CEA concernant des médias ltrants (de type P3) conduisent à estimer que ces protections respiratoires seraient e caces pour la rétention des nanoparticules. À ce stade, il semble que l'e cacité du média ltrant augmente avec la diminution de la taille des particules jusqu'à un point critique probable mais non déterminé pour l'instant (lire ci-contre).

En 2007, on estime, en France que 7 000 personnes sont susceptibles d'être exposées aux nanomatériaux dans les laboratoires de recherche publics.

EXPLICATION

Une recommandation de con nement

Le Haut Conseil de santé publique (HCSP), saisi par la direction générale de la santé sur les nanotubes de carbone, a rendu un rapport et un avis le 9 janvier 2009 dans lequel il recommande, en particulier dans l'attente d'une procédure d'enregistrement, d'évaluation et, le cas échéant, d'autorisation, et en vertu du principe de précaution, que la production des nanotubes de carbone et leur utilisation pour la fabrication de produits intermédiaires ou de produits de consommation et produits de santé soient effectuées dans des conditions de confinement strict, visant à protéger les travailleurs d'une exposition lorsque ces activités présentent un risque d'aérosolisation et/ou de dispersion. Cette recommandation s'applique aussi aux laboratoires de recherche.

EXPLICATION

Une évaluation en cours

***L'Afsset** a été saisie par les ministères de tutelle, en juin 2008, pour évaluer le risque des nanomatériaux représentatifs du marché et couvrant l'ensemble des voies d'administration, en prenant tout particulièrement en compte l'analyse complète du cycle de vie (y compris les déchets).*

EXPLICATION

Des masques adaptés

*En matière de **protection individuelle** des travailleurs, il est, en tout état de cause, essentiel de veiller à l'étanchéité des masques au niveau de la jointure avec le visage. C'est la raison pour laquelle certaines organisations professionnelles préconisent l'utilisation de masques à ventilation assistée ou à adduction d'air, afin d'assurer une surpression à l'intérieur du masque qui évite l'entrée d'air par des fuites éventuelles de jonction. Des études complémentaires sont en cours de réalisation pour confirmer ces données et vérifier en particulier l'efficacité des gants et vêtements de travail.*

nano-v2.indd 63 3/09/09 15:33:53

Nanotechnologies et nanomatériaux : état des lieux et axes de développement

nano-v2.indd 64 3/09/09 15:33:56

Recherche, innovation
et développement économique

L'état des lieux et les enjeux actuels 66

Se positionner pour l'avenir 70

Quelques industries intéressées par les nanomatériaux :

- industries manufacturières ;
- automobile (dont les pneumatiques, les revêtements de carrosserie) ;
- aéronautique (fuselage, aménagement des cabines, pièces mécaniques, dont les pièces chaudes des réacteurs) ;
- chimie (encres, peintures et vernis, carburants, plasturgie) ;
- systèmes de production d'énergie ;
- équipements ménagers ;
- articles de sport et de loisirs ;
- construction (génie civil et bâtiment) ;
- textiles ;
- cosmétique (ltres anti UV, crèmes dermoprotectrices) ;
- alimentation (vectorisation, emballages actifs).

Quelques domaines et produits intéressés par l'électronique et les technologies de l'information :

- nanolasers dans les lecteurs de DVD, objets communicants multi-applications, systèmes de localisation et d'identi cation (dont traçabilité) ;
- sécurisation des modes de paiement ;
- échange d'information en ligne ;
- microsystèmes électromécaniques ;
- optique adaptative ;
- micro uidique (imprimantes à jets d'encre).

Quelques domaines et produits intéressés par la nanobiologie :

- distributeur d'insuline ;
- biopuce à ADN ;
- analyse biomédicale ;
- ingénierie tissulaire ;
- neurochirurgie ;
- chirurgie ophtalmique.

Quelques domaines intéressés par la nanomédecine :

- diagnostic (imagerie et monitoring) ;
- traitement (implants, vectorisation et délivrance des médicaments) ;
- suivi médical (monitoring de la réponse thérapeutique) ;
- prévention (revêtements antimicrobiens, dermocosmétiques, ltres).

En ouvrant la voie à la manipulation de la matière à l'échelle de l'atome, les nanosciences et les nanotechnologies constituent un enjeu de développement majeur au XXIe siècle. Au-delà des applications existantes, des milliers d'autres sont à l'étude ; comme pour tout processus d'innovation, il est di cile de savoir précisément lesquelles aboutiront.

Exemple de surface hydrophobe

Presque tous les secteurs industriels sont ou seront concernés par les apports des nanotechnologies. Aujourd'hui, certaines propriétés, comme l'hydrophobie, qui permet à une surface de repousser l'eau, sont déjà largement exploitées dans de nombreux produits.

Bien que les nanotechnologies ne constituent pas en soi une découverte scienti que théorique – la mécanique quantique régissant les comportements des atomes et des molécules a été découverte dans les années 1920 – l'étendue des applications est telle qu'une partie des communautés scienti que et économique n'hésite pas à employer le terme de révolution technologique.

Cette révolution aurait toutefois des caractéristiques di érentes de celles qui l'ont précédée, comme l'invention de la machine à vapeur, la di usion du courant électrique ou plus récemment, la création de l'électronique et des ordinateurs. En e et, elle s'exprime de manière di use et peu apparente, au sens où les nanotechnologies ne vont pas, compte tenu de leur échelle, déboucher sur un ou

nano-v2.indd 66 3/09/09 15:34:01

quelques dispositifs spéci ques (comme le moteur à explosion, l'ampoule électrique ou les ordinateurs), mais vont largement être intégrées, en faible quantité et sans parfois être visibles, dans des produits déjà existants pour les améliorer. En ce sens, les nanotechnologies apparaissent, à certains, comme une simple évolution technologique. Cependant les potentialités o ertes sont colossales et déboucheront très probablement, à l'image de l'informatique, sur des pratiques et des usages nouveaux qu'il reste aujourd'hui impossible de prévoir.

L'ÉTAT DES LIEUX ET LES ENJEUX ACTUELS

Les nanotechnologies s'adressent à des secteurs industriels très diversi és. Elles ont néanmoins en commun de mettre en œuvre des techniques à une échelle nanométrique. À cette échelle, on l'a vu, la matière possède des propriétés originales, di érentes de celles des échelles micro et millimétriques.

L'apport de la recherche en nanosciences

Visant à comprendre les lois qui régissent le comportement des objets à l'échelle nanométrique, les nanosciences mobilisent et génèrent des connaissances dans de nombreuses disciplines. Les nanosciences et les nanotechnologies concernent trois domaines principaux :

- la nanoélectronique, considérée au sens large comme le traitement de l'information à l'échelle nanométrique. Elle succède à la révolution de la microélectronique qui avait déjà rapproché la physique et la mécanique et devrait concerner bientôt la biologie. On décrit les phénomènes de base liés aux dimensions nanométriques notamment dans l'électronique quantique et moléculaire, le nanomagnétisme et l'électronique de spin et la nanophotonique ;
- les nanobiotechnologies représentent la rencontre entre macromolécules du vivant et nano-objets, du fait de la similarité d'échelle. La rencontre se fait dans les deux sens, en s'inspirant du vivant (biomimétisme) pour développer de nouveaux matériaux et en utilisant les e ets des nanomatériaux sur le vivant. Les nanobiotechnologies constituent donc un champ d'expériences et de développement considérable, depuis les composants jusqu'aux systèmes multiformes et complexes ;
- les nanomatériaux. Il s'agit de contrôler précisément la morphologie et les dimensions des particules et des substances a n de produire des matériaux dotés de nouvelles propriétés. La nanochimie va pouvoir toujours mieux contrôler l'organisation de la matière en termes de propriétés physiques, chimiques ou biologiques.

Les nanosciences et nanotechnologies requièrent également des compétences transversales :

- la nanosimulation pour modéliser, simuler de manière réaliste et prédictive le comportement d'assemblages d'atomes dans une vision multi-échelles et multiphysiques ;
- l'instrumentation et la métrologie à l'échelle nano : la caractérisation des matériaux et structures à l'échelle nanométrique est indispensable pour comprendre et maîtriser leurs propriétés ;
- la sécurité à l'échelle nano : le domaine couvre les méthodologies, moyens de caractérisation, protection et études de toxicologie nécessaires à la gestion des risques liées à la manipulation de nanomatériaux. Il s'agit également de la mise en sécurité des procédés d'élaboration de nanomatériaux et de traitements des produits en n de vie.

Des enjeux majeurs en termes de compétitivité

Pour tirer parti de ces nouvelles propriétés, chercheurs et industriels ont imaginé deux voies : procéder par miniaturisation, voie dite descendante ou top-down ou directement par assemblage d'atomes, voie ascendante ou bottom-up. (Lire page 13).

Ces procédés s'appliquent, de fait, à des activités di érentes : la démarche descendante conduit à l'élaboration et la mise en œuvre de nanomatériaux comme produits intermédiaires de transformation ; la démarche ascendante concerne surtout les technologies de l'information. Dans les deux cas, les potentialités d'innovation sont très importantes et elles touchent tout autant les procédés de mise en œuvre que les produits.

Pour valoriser ce potentiel d'innovation, il faut toutefois mobiliser des moyens considérables et recourir à la production de masse qui permet ainsi de rentabiliser les investissements. Les nanotechnologies apparaissent paradoxales : d'une part, certaines de leurs applications envahissent des produits à faible valeur ajoutée technique mais massivement consommés (articles de sport, revêtements pour carrosserie automobile, surfaces autonettoyantes) et d'autre part, elles permettent la réalisation de systèmes complexes de très haute technicité, mais produits de façon plus ciblée, comme tout ce qui touche à la nanoélectronique ou à la nanobiologie.

Par ailleurs, la compétition internationale s'intensi e et le positionnement dé nitif des pays émergents et des pays très développés dans le leadership durable des nanotechnologies est loin d'être établi. Il est donc crucial de se positionner sur ce secteur,

nano-v2.indd 67 3/09/09 15:34:01

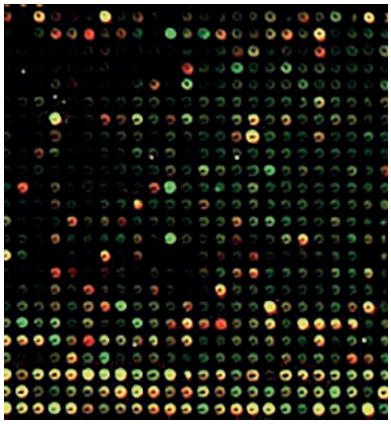
que ce soit en amont sur les activités de recherche (pour disposer d'une recherche compétitive au niveau mondial) et en aval sur la valorisation des inventions. Seuls les pays qui résoudront ce double challenge seront des acteurs économiquement viables sur le long terme.

Ce contexte, marqué par l'incertitude sur le positionnement des acteurs et la concurrence exacerbée, impose aux décideurs publics de se positionner sur certains créneaux et d'y a ecter les moyens nécessaires. Les choix d'investissements doivent être guidés non seulement par les critères classiques de retour économique (chi re d'a aires, emplois créés), mais également, sur ce segment très sensible, par la confrontation à l'acceptabilité sociétale. Ne serait-il pas contre-productif de lancer des produits issus de nanotechnologies n'apportant pas un avantage concurrentiel ou socio-économique indiscutable, en raison notamment du coût des recherches à mener et du poids de la balance béné ces risques des nanotechnologies ?

Le succès résulte de la résolution gagnante d'une équation à trois inconnues : du côté de la science et de la technologie, ce qui est possible techniquement ; du côté de la société, ce qui est acceptable et souhaitable par le citoyen ; et, du côté du marché, ce qui est susceptible de répondre à une demande du consommateur. C'est au travers de cette problématique que doit s'évaluer la pertinence de la recherche appliquée.

Un marché di cile à cerner, mais très actif

L'apport des nanotechnologies intéresse trois secteurs clés : les matériaux, l'électronique et les technologies de l'information et de la communication et les sciences du vivant et la santé que l'on peut scinder en deux sous-secteurs, la nanobiolologie et la nanomédecine. Leur utilisation, dans ces di érents secteurs intéresse en outre la défense et la sécurité (Lire pages 44 à 48).



Les biopuces et les puces à ADN

Le secteur médical sera l'un des grands utilisateurs des nanotechnologies, comme dans des applications diagnostiques. Biopuces et puces à ADN permettront, si les traitements suivent, de personnaliser de plus en plus la médecine.

Aux abords de l'année 2000, les applications des nanotechnologies sont passées, dans certains secteurs, dans une phase de commercialisation plus accentuée. Toutefois, dresser un état des lieux objectif du marché n'est pas aisé car il dépend du périmètre de l'évaluation. Les données disponibles conduisent en e et à compter plusieurs fois les mêmes produits : très en amont, lors de la commercialisation des nanomatériaux de base, puis en aval lors de chaque étape de la réalisation des produits intermédiaires et naux. En n, certains industriels demeurent très discrets sur leurs activités dans ce domaine, tant sur leurs procédés que sur l'intégration de ces technologies ou matériaux dans leur production.

Des perspectives de marché très prometteuses

Signalons, à titre préliminaire, que les données présentées ici ont été évaluées avant la crise nancière et économique en cours. Des ajustements seront donc nécessaires en fonction de son évolution sachant qu'en participant à l'e ort de sortie de crise, les nanotechnologies auront un impact économique.

Les premières évaluations de marché datent des années 2000. Ainsi, aux États-Unis, la NSF (National Science Foundation) a évoqué une perspective de marché de 1 000 milliards de dollars à l'horizon 2015. D'autres scénarios font état de chi res plus modestes (150 milliards pour le Mitsubishi Institute en 2010) ou plus optimistes (2 600 milliards pour Lux Research en 2014). En fait, ces disparités proviennent du champ couvert par les estimations, ainsi que de l'évaluation de la part de valeur ajoutée directement attribuée aux nanotechnologies dans les produits.

Il est probable que la croissance des nanotechnologies n'aura pas le même impact sur les grandes zones mondiales. Que ce soit pour des raisons de taux de croissance globale des économies ou d'acceptabilité des risques associés aux nanotechnologies, il semble se con rmer que la zone Asie-Paci que verra les plus forts taux de croissance. Les États-Unis et l'Europe, quant à eux, seront sur des trajectoires comparables, traduisant tout à la fois la similitude de leurs développements et des attitudes voisines face aux risques soulevés par les nanotechnologies.

Que ce soit en termes de marchés actuels ou de prospective (chi res d'a aires et emplois),

les nanotechnologies sont indubitablement un secteur majeur de l'activité mondiale. Les estimations font apparaître des sommes très élevées avoisinant à présent les 750 milliards d'euros, à comparer aux chi res d'a aires d'autres marchés : en 2005, le marché mondial de la chimie (pharmacie comprise) était de 1 800 milliards d'euros, celui de l'automobile de 1 100 milliards d'euros et celui de la sidérurgie de 800 milliards d'euros.

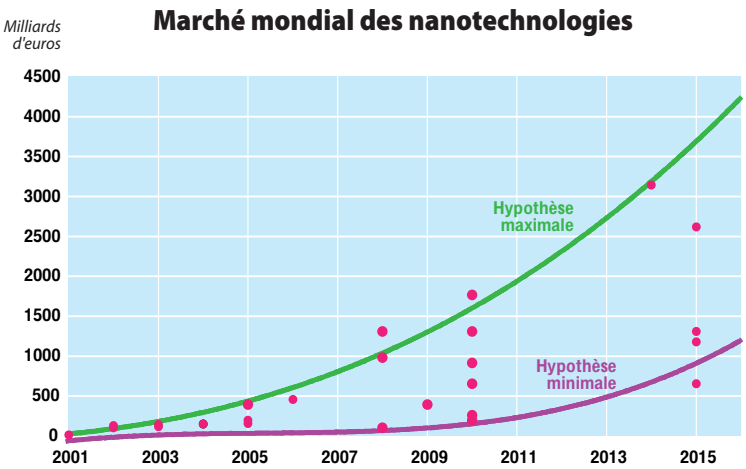
Cette comparaison permet de comprendre les intérêts que suscitent les nanotechnologies et, en retour, souligne la nécessité de s'assurer que leur déploiement répond aux exigences d'un développement responsable et qu'il respecte les impératifs de sécurité sanitaire et environnementale.

Un impact sur l'emploi et la création d'entreprises

Les prévisions de la NSF font état d'environ 2 millions de travailleurs dans le secteur des nanotechnologies à l'horizon 2015. Ces emplois seraient répartis de la façon suivante : 0,8 million aux États-Unis, 0,5 au Japon, 0,4 en Europe, 0,2 en Asie (hors Japon) et 0,1 sur les autres zones. À ces emplois directs, il convient d'ajouter environ 5 millions d'emplois indirects, ce qui illustre globalement le poids de l'activité économique autour des nanotechnologies. Néanmoins, comme pour les volumes de marché, ces chi res sont très variables selon les études. Lux Research prévoit, par exemple, plutôt 10 millions d'emplois directs et indirects en 2014. Quoiqu'il en soit, le poids en terme de ressources humaines, dans un vaste spectre d'entreprises, des start-up aux grands groupes, est considérable et on peut retenir qu'environ 10 % des emplois manufacturiers seront liés aux nanotechnologies d'ici à 2015.

Certains groupes sont déjà très présents dans ce secteur, comme des groupes chimiques mais également des groupes industriels utilisateurs. Cependant, il apparaît que ce champ concerne majoritairement des entreprises récentes et la plupart du temps créées à cette n. Ces entreprises sont, pour environ un tiers, impliquées dans la production et la transformation des nanomatériaux, pour un autre tiers en nanobiologie et pour le troisième sur les nanosytèmes et nanocomposants.

Certaines études (Lux Research notamment) estiment à 10 millions le nombre d'emplois directement et indirectement liés aux nanotechnologies en 2014, des start-up aux grands groupes. D'ici à 2015, elles pourraient mobiliser 10 % des emplois manufacturiers.



Source : The economic development of nanotechnology, European Commission

Évolution du marché des nanotechnologies

Les perspectives d'évolution du marché des nanotechnologies sur la période 2001-2015 (d'après « The economic development of nanotechnology – an indicators based analysis » EC DG Research, 28 novembre 2006).

nano-v2.indd 69 3/09/09 15:34:02

Se positionner pour l'avenir

Les nanotechnologies ont fait l'objet d'une intense activité scienti que, technologique et politique depuis dix ans. Tous les pays développés ont reconnu l'importance d'investir dans les nanotechnologies pour garantir la compétitivité économique, dans un environnement mondial extrêmement concurrentiel.

Une quatrième révolution industrielle ?

L'histoire est jalonnée de grandes ruptures technologiques. Sans remonter à l'Antiquité, l'histoire manufacturière comporte des phases jalonnées par des révolutions industrielles. Chacune d'elles se caractérise par la conjonction de conséquences économiques (prise de parts de marché et augmentation consécutive du niveau de vie) et de conséquences sociales (bouleversements des modes de vie antérieurs).

Ainsi, la première révolution de 1830 (qui s'appuie sur l'essor du charbon, de la métallurgie, du textile et de la machine à vapeur) est marquée par une concentration sans précédent des moyens de production et, en miroir, par les problèmes sociaux liés au développement des grands ensembles industriels et urbains.

La deuxième révolution (n du XIXe siècle) est marquée par l'émergence de l'électricité, de la mécanique, du pétrole et de la chimie. Cette rupture associe innovations technologiques et nouveaux modes de production (taylorisme). La troisième, après la crise économique de 1929, voit apparaître de nouveaux moyens de communication et d'échange, via la téléphonie et les nouvelles technologies, qui tirent parti de l'électronique et trouvent leur apogée avec le développement de masse du transistor à base de silicium.

Cette troisième révolution est vraiment celle du XXe siècle et nous en mesurons à peine les e ets, dont le phénomène de la globalisation. À noter également que le XXe siècle est celui de la prise de conscience des conséquences du développement industriel sur la sécurité sanitaire et environnementale, après plusieurs crises mémorables.

C'est dans ce contexte qu'émergent les nanotechnologies. Elles entraîneront, comme pour les évolutions majeures des trois derniers siècles, de nouveaux changements économiques et sociaux. Il importe qu'elles répondent aux besoins de la société, au choix des individus en tant que citoyens et consommateurs, et recueillent leur consentement.

Les trois blocs, USA, Japon, Europe, se trouvent à présent confrontés à une forte concurrence de la Chine, mais aussi d'autres pays émergents particulièrement dynamiques, de taille comparable à la France, comme la Corée du Sud et Taiwan.

La France au 5e rang mondial

Le nombre de publications constitue l'un des principaux indicateurs de performance du niveau d'innovation d'un pays.

Dans le concert international, la France, avec 3 526 publications nanos en 2006 se situe au 5e rang mondial. Elle sou re néanmoins, comme le montre une analyse du cabinet américain Lux Research, d'un dé cit chronique de capacité d'exploitation économique des résultats de la recherche. Elle est en e et classée, avec le Royaume-Uni, dans la catégorie des tours d'ivoire, c'est-à-dire des pays qui disposent d'une recherche fondamentale de haut niveau mais ne parviennent pas en tirer des béné ces sur le plan économique via le dépôt de brevets et la création d'entreprises. En outre, la France ne présente aucune évolution positive dans ce classement à l'échéance 2012 mais plutôt une régression vers la catégorie dite « minor league ». C'est donc sur ce point particulier qu'elle doit produire un e ort majeur pour passer de la recherche fondamentale au réel développement économique. Sans impulsion majeure à brève échéance, la France n'a aucune chance de jouer à moyen terme un rôle majeur au niveau international dans le domaine des nanotechnologies.

Le volume de publications en nanotechnologies a plus que triplé en 10 ans : 63 440 publications dans le monde en 2006, contre 20 852 en 1996. La production scienti que mondiale sur cette décennie est de plus de 420 000 publications.

Une analyse plus détaillée sur les dernières années montre cependant une dynamique

di érente selon les pays. Si la production scienti que reste relativement stable aux États-Unis et semble amorcer un déclin au Japon depuis 2005, la production scienti que **chinoise** dans le domaine des nanotechnologies est en pleine croissance.

Des technologies militaires convoitées

Au plan mondial, de nombreux pays s'intéressent aux applications militaires des nanotechnologies. Les États-Unis gurent en première ligne, avec un e ort de recherche d'environ 350 millions d'euros par an pour les nanotechnologies militaires (soit 34 % du budget alloué globalement aux nanotechnologies par ce pays) et la création d'un institut dédié (*Institute for Soldier Nanotechnology*).

Par comparaison, l'e ort militaire français reste modeste, tant en valeur absolue que relative : environ 20 millions d'euros par an, soit seulement 7 % du budget total consacré par la France aux nanotechnologies.

Les États-Unis sont suivis par le Japon, le Royaume-Uni, l'Allemagne et Israël. Il est néanmoins di cile, dans la masse d'applications évoquées publiquement, de faire la part entre les applications réelles et les projections futuristes ou purement spéculatives, voire tenant de la désinformation. La Chine, l'Inde et la Russie investissent aussi fortement dans ces technologies, mais l'ampleur et le contenu de leurs programmes restent mal connus.

En n, de nombreux pays émergents, comme le Brésil ou l'Afrique du Sud, ou du Sud dont l'Iran, l'Algérie, le Nigéria et l'Arabie Saoudite, s'intéressent aussi aux nanotechnologies pour des objectifs déclarés de souveraineté nationale. Sans doute y voient-ils un moyen de contrebalancer la puissance occidentale en investissant dans le développement de technologies du futur.

Les programmes de l'Union européenne

Au niveau européen, la coopération entre États, pas toujours aisée de manière bilatérale, ne peut que tirer béné ce, en particulier pour la recherche, des programmes et dispositions mis en œuvre dans le cadre de l'Union et permettre aux nouveaux entrants de s'ouvrir davantage à ces aspects et s'associer à leurs enjeux.

Les programmes nancés par l'**Union européenne** s'articulent notamment au sein du programme-cadre de recherche et de développement technologique (PCRDT), autour des réseaux ERA Net et autour des plates-formes technologiques européennes, ETP pour European Technological Plateform.

EXPLICATION

Une accélération en Chine

L'éveil chinois en matière de nanotechnologies est relativement récent, puisque la période 2005-2006 représente près de la moitié de la production scientifique chinoise de ces dix dernières années dans le domaine (20 000 publications en 2005-2006 sur les 44 400 publications entre 1996 et 2006). En 2005, la Chine avait déjà largement dépassé le Japon. En 2006, la Chine représente 16,6 % de la production scientifique mondiale sur les nanotechnologies, juste derrière les États-Unis (17,4 %), qu'elle devrait dépasser dans les années à venir si les tendances actuelles de croissance pour la Chine et de relative stabilité de la production scientifique pour les États-Unis se maintiennent.

REPERES

*Les fonds dédiés par l'**Union européenne** aux nanotechnologies s'élevaient à 530 millions d'euros en 2006, à comparer aux 1,775 milliard de dollars des États-Unis et 1,650 milliard de dollars consacrés par les pays de la zone Asie (Japon, Corée du Sud, Chine, Taïwan, Inde).*

La photonique étudie la lumière et développe les technologies capables de la contrôler, notamment dans le but de transmettre des informations via des faisceaux lumineux. Elle concerne de très nombreux secteurs. Un pôle de compétitivité lui est consacré dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

nano-v2.indd 71 3/09/09 15:34:07

REPERES

JTI – Joint Technological Initiative

Un JTI est un partenariat public-privé, concentré sur une thématique industrielle donnée, avec un objectif bien défini, s'adressant à un marché important mais où les acteurs européens ont des faiblesses. Il est financé par des fonds publics et privés.

Le paysage de la recherche européenne en matière de nanotechnologies

Parmi les programmes de recherche communautaires, le septième programme-cadre de recherche et de développement technologique, 7e PCRDT, de l'Union européenne s'étendra de 2007 à 2013 et constitue le programme de recherche publique le plus important au monde. Dans ce cadre, le programme NMP (nanosciences, nanotechnologies, matériaux, procédés) est nancé par la Commission européenne et consacré aux nanotechnologies et nanosciences, matériaux multifonctionnels, nouveaux procédés et systèmes de fabrication et leur intégration pour améliorer la sécurité et la qualité de la vie.

Un programme transversal dans le cadre du 7e PCRDT est consacré à l'amélioration des rapports entre sciences et société.

Les réseaux ERA Net ont été lancés par la Commission européenne pour encourager l'implication des États membres à travers des programmes nationaux. Il s'agit de créer, dans une thématique donnée, un consortium d'organisations ou d'agences nationales de nancement de la recherche a n de coordonner leurs programmes, mettre en commun leurs ressources et nancer des projets de recherche multinationaux. Parmi eux :

- le réseau NanoSci-Era Net, coordonné par la France (CNRS) depuis 2004, nance des projets de recherche fondamentale à long terme dans toutes les thématiques en favorisant l'interdisciplinarité. NanoSci-ERA compte 13 partenaires et 5 partenaires associés, appartenant à 12 pays ;

- le réseau MNT ERA Net soutient des projets de recherche en microtechnologie (nanoélectronique, nanobiotechnologie, micro et nanosystèmes, composants optiques, nanomatériaux, sources d'énergie, capteurs, instrumentation, modélisation de simulation). MNT ERA Net est constitué de 17 agences nationales ou régionales de nancement de la recherche ;

- le réseau Euronanomed, ERA-Net coordonné par la France (CEA) vise le développement des concepts de la nanomédecine. Il a été lancé en 2009 et compte 24 partenaires de 17 pays.

- les plateformes technologiques européennes ou ETP (European Technological Plateform) sont des initiatives proposées conjointement par l'industrie et par la Commission européenne a n de dé nir des priorités et une stratégie commune en matière de recherche, de technologie et de développement dans une thématique donnée. Elles jouent un rôle clé dans l'alignement de la recherche institutionnelle sur les besoins de l'industrie, sont mises en place dans le 7e PCRD et ont pour but d'assurer à l'Europe une position de leadership dans la recherche et l'industrie.

Parmi ces plateformes ETP :

- le programme ENIAC (European Nanoelectronics Initiative Advisory Council) est une **Joint Technological Initiative** (JTI) centrée sur la nanoélectronique. Il a pour but d'augmenter l'intégration, la miniaturisation et la fonctionnalité des dispositifs électroniques. D'autres activités liées à la stratégie industrielle y sont encouragées, l'innovation, la normalisation, la coopération internationale, la formation et l'appui aux PME ;

- le programme Photonics21 regroupe la majorité des acteurs européens de la photonique. Il a pour but la coordination des activités de recherche et développement dans des thématiques comme les technologies d'information et de communication, l'éclairage et l'a chage, les technologies de fabrication, la science de la vie et la sécurité ;

- le programme NanoMedicine vise à développer les applications des nanotechnologies dans les sciences du vivant, plus précisément le diagnostic médical, la détection précoce, la prévention des maladies, le traitement et le suivi médical. Trois thématiques y sont présentes : diagnostic et imagerie, vectorisation des médicaments et médecine régénérative.

À signaler, dans le programme européen de santé publique 2008-2013, une action conjointe publiée en février 2009 sur la sécurité des nanomatériaux sous l'impulsion de la présidence française de l'Union européenne en décembre 2008. Cette action a fait l'objet d'un appel d'o res. La France en a assuré la coordination et a présenté un dossier pour un programme dénommé Nanogenetox visant à établir une méthodologie robuste relative à la détection de molécules potentiellement génotoxiques, c'est-à-dire pouvant compromettre l'intégrité du génome. Quinze nanoparticules déjà sur le marché et utilisées dans divers produits (silice, dioxyde de titane et nanotubes de carbone) vont être soigneusement caractérisées au plan physique et chimique et faire l'objet de tests. Cette action, sur 3 ans, regroupe 17 institutions et 13 États membres.

La place de la France

En dehors du nombre de publications, vu plus haut, le positionnement de la France peut s'apprécier grâce aux indicateurs que sont la création de start-up, la valorisation de la recherche et le transfert de ses résultats vers l'industrie, le nancement (public, privé), les moyens mobilisés (humains et matériels) et l'e cacité de l'organisation.

La France a mis en place un ensemble de dispositifs de soutien à l'innovation : 5 pôles de compétitivité directement concernés par les micro et nanotechnologies et plusieurs **instituts Carnot**. Néanmoins, en 2005, la France déposait seulement 1,5 % des brevets dans le monde et se positionnait derrière des pays tels que la Corée du Sud et Taiwan. Ainsi, le nancement de la recherche privée est très inférieur en pourcentage à celui consenti dans d'autres pays. Les conditions d'une stratégie de valorisation e cace vers l'industrie ne sont donc pas réunies. Les freins à la création, et surtout au développement des start-up, sont bien réels en comparaison avec les pays comme les États-Unis, le Canada, le Royaume-Uni ou Israël.

Un nancement public important, mais une structuration variable selon les champs

Dans les programmes-cadres européens de recherche et développement (au sein des 6e et 7e PCRD), la position française est inégale : plutôt forte dans le programme **ICT**, elle l'est beaucoup moins dans le programme **NMP**. Les entreprises françaises n'ont pas réussi à s'établir comme coordinateur dans l'appel NMP spéci que aux PME. Ceci contraste avec la bonne performance des laboratoires publics et des grandes entreprises sur les champs micro et nanoélectroniques.

Le niveau des dépenses publiques en France est signi catif, les programmes variés et relativement larges. La structuration est toutefois variable selon les champs.

REPERES

Les instituts Carnot

Le réseau des instituts Carnot a pour mission de développer des partenariats de recherche avec les acteurs socio-économiques (grands groupes, PME, start-up, collectivités territoriales) et de favoriser les transferts de technologies.

REPERES

Micro et nanotechnologies : un effort croissant

En 2008, l'Agence nationale de la recherche (ANR) a consacré 83 m€ aux nanosciences et nanotechnologies soit 12,5 % du volume de ses appels.

EXPLICATION

Mise en réseau, mise à niveau

La France a mis en place des groupements de recherche C'Nano assurant une mise en réseau des laboratoires et des deux réseaux de centrales technologiques (grandes centrales et centrales de proximité), couvrant l'ensemble du territoire. Les investissements effectués dans ces centrales ont permis de remettre à niveau les équipements indispensables au développement de filières innovantes et adaptés aux besoins industriels.

REPERES

Programme ICT

Programme-cadre européen dans les technologies de la communication

Programme NMP

Programme-cadre européen nanosciences, nanotechnologies, matériaux et nouvelles technologies de production.

nano-v2.indd 73 3/09/09 15:34:09

Le plan Nano-Innov

Présenté le 5 mai 2009 par le Gouvernement, le plan Nano-Innov vise à mettre en place une stratégie d'innovation dans les nanotechnologies.

Il repose notamment sur la création de centres d'intégration des nanotechnologies à Grenoble, Saclay et Toulouse, où la recherche fondamentale travaillera avec les entreprises pour mettre au point des technologies, déposer des brevets, créer des produits.

Dès 2009, 70 M€ seront consacrés à ce plan.

Pour assurer une allocation e cace et pertinente des crédits du plan de relance, la ministre chargée de l'enseignement supérieur et de la recherche a également installé un comité de pilotage du plan Nanotechs Nano-Innov.

Composé de trois collèges d'égale représentation (nanosciences, nanotechnologies et industriels), il est chargé :

- de la rédaction des appels à projets de l'Agence nationale de la recherche, nancés par le plan de relance dans le domaine des nanotechnologies. L'agence est, pour sa part, chargée de la mise en œuvre de ces appels à projets ;
- de la répartition des nancements d'équipements de recherche en nanosciences et nanotechnologies prévus dans le plan ;
- de la coordination des travaux de recherche technologique en nanotechnologies et de l'interface avec la communauté scienti que des nanosciences, notamment dans le cadre des centres d'intégration technologique, comme celui de Saclay.

Il aura également un rôle actif de proposition, notamment de toute initiative nationale ou européenne permettant :

- d'assurer une coordination de l'e ort national de recherche dans ce domaine (travaux des laboratoires, investissements, appels à projets…) dans la durée, prenant en compte les autres initiatives nationales, européennes et internationales aussi bien en nanotechnologies qu'en nanosciences ;
- de renforcer le transfert de technologies entre la recherche publique et l'industrie française et assurer une politique cohérente de la propriété intellectuelle des entités publiques en la matière ;
- d'améliorer la connaissance du grand public sur les nanotechnologies, leurs utilisations et leur gouvernance, en particulier dans le cadre du présent débat public ;
- de développer les formations nécessaires à l'émergence d'une véritable lière industrielle française dans ce domaine ;
- et, en n, de créer une coordination européenne plus forte sur les nanotechnologies, notamment dans le cadre d'un projet de communauté de la connaissance qui pourrait être présenté au comité directeur de l'Institut européen de technologies (IET).

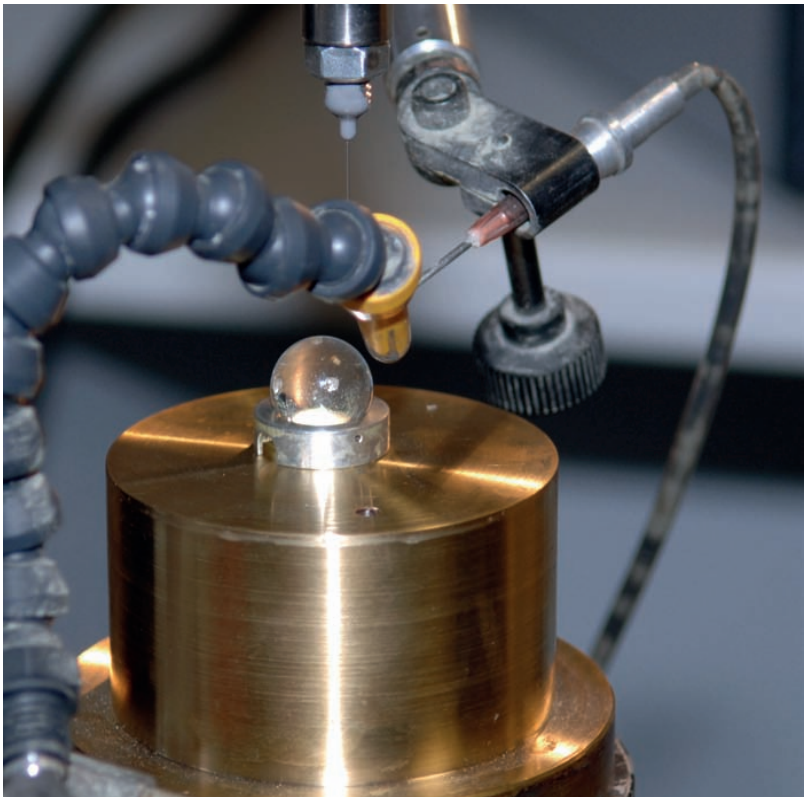
nano-v2.indd 74 3/09/09 15:34:09

Les **grands instruments**, principalement les sources de rayonnement synchrotron et de neutrons, servent à la caractérisation des nanomatériaux et matériaux nanostructurés.

En micronanotechnologies pour les sciences du vivant, la situation de la France est contrastée avec des forces en recherche (biophysique, biomicro uidique, nanoparticules et vectorisation) mais une faiblesse liée au nombre insu sant d'industriels en instrumentation biomédicale. Ce marché est actuellement dominé par les États-Unis. Mais depuis peu se développent en France des start-up issues de la recherche, moteur privilégié du développement de l'innovation.

La France dispose d'atouts incontestables en micronanoélectronique avec une solide recherche de base universitaire, un centre de recherche technologique majeur en microélectronique CEA-LETI (laboratoire d'électronique et de technologie de l'information) et un investissement public et privé considérable (supérieur à 1 milliard d'euros).

Dans le champ des matériaux innovants, qui concerne à la fois la mécanique, la chimie et la biologie, une collaboration étroite s'est établie entre les laboratoires académiques et les industriels. Malgré la forte incitation de partenariat et de transfert soutenue par **l'ANR**, la structuration est di cile à mettre en place compte tenu de la diversité des thématiques et des produits.



La micronanoélectronique, au carrefour de la micromécanique, de la microélectronique et des nanotechnologies, est un secteur de pointe pour la France. Elle déploie quatre axes de recherche fondamentale et technologique décisifs : le développement de solutions pour fabriquer de nouveaux composants, la révolution des objets intelligents, l'électronique hybride et l'intégration matériel logiciel (systèmes embarqués).

EXPLICATION

Les grands instruments en France

Quatre de ces grands instruments existent en France : le synchrotron Soleil et le laboratoire Léon Brillouin basés à Saclay, l'institut Laue Langevin et l'European Synchrotron Radiation Facility basés à Grenoble.

Les évolutions récentes, ou à venir, de ces centres les ouvrent encore davantage aux nanosciences.

le synchrotron Soleil et le laboratoire Léon Brillouin basés à Saclay

DEFINITION

Agence nationale de la recherche (ANR)

Agence de financement de projets de recherche qui s'adresse à toute la communauté scientifique, aussi bien aux laboratoires publics qu'aux entreprises. La mission de l'agence est de financer des projets de recherche originaux (répondant aux appels qu'elle lance) et d'encourager le partenariat entre ces acteurs.

L'ANR organise chaque année des appels à projets sur des domaines thématiques spécifiques. Les projets sont sélectionnés sur des critères de qualité scientifique, auxquels s'ajoute la pertinence économique dans le cas des projets de recherche appliquée faisant intervenir des entreprises.

nano-v2.indd 75 3/09/09 15:34:09

Les programmes français

De nombreux travaux de recherche en France dans le domaine des nanosciences et nanotechnologies s'appuient sur le réseau des **centrales technologiques**. Ils sont également menés dans le cadre des programmes soutenus par l'ANR et dans les **pôles de compétitivité**.

L'ANR soutient plusieurs programmes :

– **le programme P3N** (programme national en nanosciences et nanotechnologies) subventionne des projets de recherche fondamentale et appliquée, nanocomposants, micronanosystèmes, nanobiotechnologies, nanomatériaux, instrumentation et métrologie, modélisation et simulation. Un volet est dédié à l'impact et aux risques des nanotechnologies pour la santé et l'environnement ainsi qu'aux aspects éthiques et sociétaux. À titre d'exemples :

– Aquanano (2007), transfert de nanoparticules manufacturées dans les aquifères : développement d'une méthodologie et identi cation des processus ;

– Nanobench (2007), Assessing the S&T economic and social impact of nanotechnologies ;

– **le programme matériaux et procédés** vise la recherche de nouveaux matériaux et de procédés industriels, l'amélioration de leurs performances techniques et économiques et encourage le transfert de technologie vers l'industrie. Les nanomatériaux occupent donc une bonne place dans ce programme ;

– **le programme SEST (santé environnement et santé travail)** a pour but de révéler l'impact, encore peu connu, des facteurs environnementaux sur la santé humaine, en mesurant l'exposition à ces facteurs et en identi ant leur rôle dans l'origine ou l'aggravation de certaines maladies. Ce programme s'intéresse en particulier à l'éventuelle toxicité des nanoparticules. À titre d'exemples, les programmes suivants peuvent être cités :

– Nanofeu (2007), impact des nanocharges sur le comportement au feu ;

– Signanotox (2007), signatures toxicologiques de nano-objets manufacturés sur des cellules humaines après inhalation ou ingestion ;

– Nanodetect (2006), synthèse, détection et toxicologie de nanoparticules métalliques (Au, Ag, Pt) ;

– NTCTOX (2006), évaluation de l'in uence de la nature des nanotubes de carbone sur la santé humaine et l'environnement ;

– Respinttox (2006), e ets des nanotubes de carbone sur l'appareil respiratoire. Rôle de leurs caractéristiques physico-chimiques ;

– Nanotox (2005), toxicologie des nanoparticules, in uence de la taille, de la composition chimique et de la réactivité de surface sur leurs e ets pulmonaires et rénaux ;

– Casisurf (2005), caractérisation in situ de la surface des aérosols ns et ultra ns.

Cinq des pôles de compétitivité comptent les nanotechnologies parmi leurs thématiques :

– **Minalogic**, situé dans la région Rhône-Alpes (Grenoble), est structuré autour des solutions miniaturisées intelligentes pour l'industrie qui résultent de l'association des micronanotechnologies et du logiciel embarqué. Procédés développés : anticipation des ruptures technologiques de la nanoélectronique, maîtrise de la conception des circuits complexes, interface des puces avec leur environnement et création des outils de développement. Secteurs visés : de l'automatisation des processus industriels à l'électronique de grande consommation en passant par les systèmes d'optimisation de la consommation d'énergie, la chaîne de l'image ou le monde de la connectivité et de la mobilité.

Les partenaires Minalogic : plus d'une centaine de partenaires, des laboratoires publics appartenant au CNRS, CEA, Inria, l'Institut national polytechnique de Grenoble et l'université Joseph Fourier et de grands groupes industriels comme STMicroelectronics, e2v, Philips, Freescale, Thales, Air liquide, Schneider, Hewlett-Packard, Bull, Sun Microsystems, France Télécom, Xerox, Mentor Graphics et des PME comme Soitec, Sofradir, Memscap, Teem Photonics, Tronic, Soisic, Iroc ;

Les principaux centres de recherche en nanotechnologies en France.

– **SCS (Solutions Communicantes Sécurisées)**, situé dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, vise l'intégration des matériels et des logiciels pour transmettre, échanger et traiter des informations de manière sécurisée et able. Applications dans la téléphonie mobile numérique, les télécommunications par satellite, la carte à puce, l'étiquette électronique (RFID), les transactions électroniques, la géolocalisation. S'adresse aussi à la banque, la distribution, la santé, le tourisme, la sécurité et la défense.

Les membres de SCS : des laboratoires publics appartenant au CNRS, École centrale de Marseille, École des mines de Saint-Étienne, Eurecom, ENST, Inria, universités de Marseille, université de Nice, des grands groupes industriels comme Alcatel Space, Altran, Amadeus, Atmel, France Télécom, Gemalto, Hewlett-Packard, IBM, In neon, NXP, Oracle, Safran, SAP, STMicroelectronics, Texas Instruments et des PME comme Apsis, DataComsys, IBS, Impika, Orsay Physics, Polymage, Shaktiware, Trusted Logic, Visioscopie ;

– **S2E2 (sciences et systèmes de l'énergie électrique)**, situé dans la région Centre, vise l'ensemble de la chaîne de valeur de l'énergie électrique et s'adresse aux marchés suivants : énergies nouvelles, équipements grand public et nomades, bâtiment résidentiel et tertiaire, équipements industriels…

Les membres de S2E2 : des laboratoires publics appartenant au CNRS, CEA, université de Tours, université d'Orléans etdes industriels comme ST Microelectronics, Legrand, Thermor, Dalkia, A2E Technologies, Vermon, Mecagis ;

– le pôle **Photonique**, situé dans la région Provence-Alpes-Côte d'Azur, est spécialisé dans les systèmes complexes d'optique et d'imagerie dédiés aux milieux hostiles (observation de l'espace et de la Terre, optique marine et sous-marine, outils photoniques pour la fusion nucléaire) et à des marchés connexes (microélectronique, sciences de la santé, environnement et risques naturels et industriels, procédés industriels).

Les membres du pôle **Photonique** : une vingtaine de laboratoires publics appartenant à L'ifremer, CNRS, DGA, Inria, Ensam et une centaine d'entreprises comme Thales Alenia Space, Eurocopter, Thales Microsonics, ST Microelectronics, Texas Instruments, Atmel, Siemens, Bertin technologies, Seso, Dassault Systèmes, Image Technologies, Nano Physics, Valmeca, Sema Group, Comex, Cégelec, Cybernetix ;

– le pôle **MicroTechniques**, situé à Besançon (Franche-Comté), est centré autour du savoir-faire de l'usinage au sens large (automobile, téléphonie, aéronautique, électroménager, secteur biomédical…). Il s'adresse aux domaines industriels où les volumes, les poids, les dimensions des composants et des produits diminuent en augmentant leur densité fonctionnelle.

Les membres du pôle Microtechniques : des laboratoires, CNRS, ENSMM, institut Femto-ST, université de Franche-Comté, université de technologie de Belfort-Montbéliard et un grand nombre de PME comme Alcis, Cheval Frères, Digital Surf, Imasonic, Micro Mega, NanoJura, Optec, Photline Technologies, Silmach, Statice Santé.

Trois **réseaux thématiques de recherche avancée** (RTRA) ont également été créés dans le domaine des nanosciences :

– **Nanosciences à la limite de la nanoélectronique** (Grenoble) fédère les initiatives du CEA, du CNRS, de l'INPG et de l'UJF pour les thématiques électronique quantique, magnétisme, photonique, matériaux, sciences du vivant, caractérisation et métrologie, modélisation ;

– **Triangle de la physique** (Orsay) rassemble les laboratoires du triangle géographique Palaiseau-Orsay-Saclay (université Paris sud XI, CNRS, École polytechnique, CEA, Onera, Iota, ENSTA et Sup'Elec) dans les domaines optique, physique de la matière diluée et condensée, physique des milieux complexes, nanophysique et physique statistique ;

– **Centre international de recherche aux frontières de la chimie** (Strasbourg) rassemble l'université Louis Pasteur, le CNRS et les sociétés BASF (chimie) et Bruker (instrumentation) dans le domaine de la chimie en interface avec la physique, les matériaux et la biologie.

DEFINITION

Pôles de compétitivité

Un pôle de compétitivité rassemble, sur un territoire donné, des entreprises, des laboratoires de recherche et des établissements de formation pour développer des synergies et des coopérations.

D'autres partenaires, dont les pouvoirs publics, nationaux et locaux, ainsi que des services aux membres du pôle sont associés.

L'enjeu : s'appuyer sur les synergies et des projets partenariaux et innovants pour permettre aux entreprises impliquées de prendre une position de premier plan dans leurs domaines, en France et au niveau international.

DEFINITION

Centrales technologiques

Le réseau national de grandes centrales technologiques vise à fournir aux chercheurs les technologies nécessaires (salles blanches, équipements et instrumentation…) à la réalisation des projets de recherche et de développement des laboratoires. Il est complété par des centrales de proximité, de moindre envergure, qui complètent, à l'échelle locale, l'infrastructure des grandes centrales.

Elles sont réparties sur l'ensemble du territoire.

nano-v2.indd 77 3/09/09 15:34:12

Grâce aux grandes centrales technologiques et aux centrales de proximité (voir les cartes), des programmes de R&D partenariale e caces ont pu se développer en France. Le pays possède en outre un leadership européen sur le marché des composants pour systèmes embarqués qui le met en position de faire évoluer le contenu de la stratégie de recherche européenne en électronique et dans le domaine de l'interface matériel logiciel.

Le poids de la recherche publique

L'activité nanotechnologique dépasse largement le cadre des applications industrielles évoquées dans cette partie. La recherche publique est également très présente mais les approches gouvernementales dépendent beaucoup des pays considérés.

Ainsi, en Europe et au Japon, la recherche publique joue un rôle très important. En France, en 2006, les dépenses publiques a ectées aux nanotechnologies avoisinaient les 300 millions d'euros, à comparer aux 430 de l'Allemagne et aux 150 du Royaume-Uni.

Les fonds communautaires, qui s'élevaient à 530 millions d'euros en 2006, ont atteint 1,1 milliard d'euros en 2007 (voir page 72, 7e PRCD). Globalement, les grandes zones mondiales investissent des sommes très voisines, bien qu'au niveau des pays les implications soient plus contrastées.

Quelques pistes pour l'avenir

Le secteur de la micronanoélectronique est actuellement un secteur dans lequel la recherche est très active. Des développements sont ainsi attendus en matière d'électronique embarquée et d'objets intelligents. Ces recherches nécessitent une coordination qui regroupe les représentants des industriels et du monde académique. Relever ce dé passe par la création d'une infrastructure de recherche de niveau international ouverte à la fois aux chercheurs et aux industriels, autour de grandes et petites plates-formes d'équipements, de fabrication et d'instrumentation.

Il est par ailleurs essentiel de tirer parti du potentiel des nanotechnologies en biologie et en santé. Pour y parvenir, il est envisagé de disposer d'une interface forte avec le monde clinique pour rapprocher ces technologies des patients en lien avec les grands enjeux des sciences du vivant à l'ère post-génomique : compréhension du fonctionnement de la cellule à l'échelle nanométrique, convergence avec la biologie des systèmes.

Le développement des nanomatériaux innovants doit également être focalisé sur des champs d'application à forts enjeux sociétaux (énergie durable, en particulier e cacité énergétique des bâtiments et des transports, environnement, diminution des impacts des matériaux sur l'environnement). Le consensus des scienti ques et des industriels doit être recherché autour des feuilles de route qui serviront de base à la programmation du domaine.

nano-v2.indd 78 3/09/09 15:34:13

Le projet de révision de la stratégie nationale de développement durable (SNDD) préparé pour la nouvelle période 2009-2012 a mis en évidence l'intérêt de mieux intégrer le développement durable dans les orientations de la recherche et d'encourager la structuration de la communauté des chercheurs autour de ses enjeux. La SNDD souligne la nécessité de prendre ceux-ci en compte dans les orientations stratégiques des établissements de recherche, comme les aspects économiques, environnementaux et sociaux dans l'évaluation des programmes et projets de recherche appliquée. Favoriser la recherche est un préalable à l'amélioration de l'e cacité et de la sobriété des technologies. Au-delà, le développement de l'expertise scienti que, la sollicitation des forums d'experts, le développement d'une culture délibérative autour des grandes questions scienti ques, peuvent contribuer à atteindre un tel objectif.

La dynamique du Grenelle environnement doit être prise en compte pour coordonner, au plan national, la recherche sur l'étude et la maîtrise d'impacts éventuels des nanotechnologies : caractérisation, détection, traçabilité et toxicologie des nanomatériaux, impact potentiel des nanomatériaux sur l'environnement (écotoxicologie, cycle de vie, procédés sûrs de fabrication, récupération et traitement des déchets). Il est également indispensable de renforcer la base scienti- que permettant de dé nir le bon niveau des mesures de prévention, lorsqu'elles sont nécessaires, pour la sécurité du personnel, du public et de l'environnement. En n, il est impératif de favoriser les actions en relation avec le public pour échanger sur les usages et pour expliquer les e orts de recherche, les béné ces et les éventuels risques, les aspects juridiques et éthiques relevant des nanosciences et des nanotechnologies.

nano-v2.indd 79 3/09/09 15:34:13