

LES NANOTECHNOLOGIES AU CŒUR DE LA COMPÉTITION INTERNATIONALE

PAR

CLAIRE DUPAS-HAEBERLIN (*)

Les nanotechnologies constituent un vaste secteur de R&D et d'innovation, en pleine expansion depuis une vingtaine d'années, concentrant l'ensemble des grandes questions actuelles liées à la recherche, au développement industriel et à la compétitivité. Ces technologies convergentes et intégratives mettent en jeu un ensemble considérable de connaissances et de techniques relevant de multiples domaines. Elles devraient révolutionner nombre d'aspects de notre vie, depuis la médecine jusqu'aux modes de communication, de production industrielle, de sécurité, de gestion de l'énergie et de l'environnement. Les aspects économiques, réglementaires, sociétaux et éthiques de ces technologies deviennent de plus en plus importants au fur et à mesure de leur développement et de l'apparition de nouveaux produits. Des évaluations du volume financier des marchés mondiaux induits par ce secteur tournent autour de 250 milliards de dollars (G \$) en 2009 et de 3 000 G \$ à l'horizon 2020. Les nanotechnologies font donc l'objet d'une compétition internationale acharnée. Plus de 60 pays ont adopté une stratégie de R&D et de soutien aux entreprises dans ce domaine, avec des investissements considérables : ainsi, le gouvernement fédéral américain a investi 12 G \$ sur les nanotechnologies, dont 1,8 G \$ pour la seule année 2011 – aucun secteur de technologies civiles n'aura connu aux Etats-Unis un tel investissement depuis le programme Apollo. Une compétition féroce entre Europe, Etats-Unis, Japon et BRICS s'est instaurée dans ce domaine.

LES « NANOS », UN NOUVEAU PARADIGME

Les nanosciences et nanotechnologies ne forment pas un nouveau domaine scientifique à part entière. Au contraire, un grand nombre des disciplines scientifiques traditionnelles interviennent dans leur développement : physique, chimie, sciences et technologies de l'information et de la communication (STIC), biologie, sciences pour l'ingénieur et jusqu'aux sciences humaines et sociales. Elles constituent cependant un nouveau

(*) Professeur émérite à l'Ecole normale supérieure de Cachan (France).

paradigme, car l'ensemble des propriétés nouvelles qu'elles offrent et qui induisent l'extraordinaire richesse de leurs applications présentes et à venir est dû à la dimension extrêmement réduite des objets nanométriques. Il s'agit donc d'une situation nouvelle et particulière dans le développement des sciences. On entend par « nanosciences » les recherches amont concernant l'observation et l'analyse des propriétés fondamentales originales liées à la très petite taille des objets d'étude et « par nanotechnologies » le contrôle de la matière à cette échelle afin de créer des matériaux, composants et systèmes conduisant à de nouvelles applications.

Le préfixe « nano » a été choisi par la Commission internationale des poids et mesures pour désigner le milliardième (10^{-9}) d'une mesure : un nanomètre (nm) vaut donc un milliardième de mètre. On désigne par « nano-objet » un objet dont au moins l'une des dimensions se situe dans la gamme de 1 à 100 nm. Ces dimensions figurent entre des valeurs macroscopiques qui nous sont familières – ainsi, un cheveu a un diamètre de 30 micromètres environ, soit 30 000 nm – et les dimensions des atomes, de l'ordre de 0,1 nm. Le nanomètre est typiquement l'échelle de la molécule : pour visualiser ces ordres de grandeur, on peut dire qu'une molécule d'eau a le même rapport de taille vis-à-vis d'une pomme que la pomme par rapport à la Terre.

Donnons quelques exemples de nano-objets. Un film métallique d'épaisseur nanométrique est composé de quelques plans atomiques de métal. Une nanoparticule est un assemblage de dimensions nanométriques de quelques centaines à quelques milliers d'atomes. Un nanotube de carbone est un objet tout à fait particulier, constitué par un feuillet d'atomes de carbone enroulé sur lui-même ; il a un diamètre nanométrique, mais peut présenter, comme un cheveu, une longueur plusieurs centaines de fois supérieure à son diamètre. Ces objets très étudiés en recherche fondamentale ne sont pourtant pas de simples curiosités de laboratoire. Il en est ainsi pour les multicouches de métaux magnétiques d'épaisseur nanométrique, dont l'étude des propriétés augmentées de résistance électrique sous champ – la « magnétorésistance géante » – a conduit le Comité Nobel à attribuer le prix Nobel de Physique à Albert Fert (France) et Peter Grünberg (Allemagne) en 2007. Elles ont conduit à une augmentation considérable de la densité d'informations stockées sur les disques durs en permettant de lire ces informations avec la précision et la vitesse requises, ce qui a entraîné un bond en avant dans les capacités de nos ordinateurs. Elles sont aussi à l'origine de mémoires magnétiques d'un type nouveau, les MRAM. Les nanoparticules de certains métaux, une fois fonctionnalisées par des molécules *ad hoc*, peuvent permettre d'atteindre des cibles particulières dans le corps humain en vue de traitements médicaux ciblés. Quant aux nanotubes de carbone, ils pourraient être à l'origine d'une nouvelle révolution des composants électroniques.

Le point essentiel expliquant l'engouement pour les nanosciences et nanotechnologies est que les matériaux sous forme nanométrique présentent

des propriétés très différentes de celles qu'ils possèdent sous forme massive. A ces dimensions, les phénomènes quantiques, indécélables à l'échelle macroscopique, se manifestent pleinement. De plus, les surfaces développées sont beaucoup plus importantes sous forme nanoscopique qu'à l'état massif : ainsi, un cube macroscopique de 1 cm de côté présente une surface totale de 6 cm^2 ; si on le découpe en cubes de 1 nm de côté, la surface totale présentée par ces cubes sera, pour un même volume, de $6\,000 \text{ m}^2$, soit la surface d'un terrain de football. Cette propriété donne lieu à des interactions fortement accrues des nano-objets avec le milieu environnant, conduisant à des applications nouvelles en chimie, en catalyse, en biologie et médecine, ainsi que dans le domaine de l'environnement, avec des aspects positifs, mais aussi des risques nouveaux à maîtriser. Toutes les autres propriétés importantes à l'échelle nano en vue d'applications présentent également des modifications considérables lorsqu'on passe des structures macroscopiques à des formes nanostructurées, comme l'accroissement de propriétés mécaniques (dureté, résistance), allant souvent de pair avec une légèreté accrue.

Fabriquer, observer et manipuler des nano-objets, étudier et comprendre leurs propriétés et leurs interactions avec leur environnement, en particulier avec le vivant, les modéliser et les simuler, en faire des systèmes communicants et dotés d'intelligence, tels ont été et sont encore les grands défis scientifiques indispensables à relever pour développer des applications nombreuses et considérables, mais de façon maîtrisée et contrôlée. Les applications des nanotechnologies sont et seront de plus en plus importantes dans la vie de chaque individu, pour l'industrie et le commerce, pour la santé et la société. Aujourd'hui, des travaux de recherche et de développement sont en pleine explosion sur les applications des nanotechnologies dans le domaine de l'énergie, de la chimie et des capteurs, des matériaux, de l'information et des communications, de la biologie et de la médecine, de l'environnement. Ce séduisant paysage ne doit pas occulter des zones plus sombres, comprenant, en contrepoint des avantages, les risques nouveaux des nanotechnologies pour la santé, l'environnement, le respect de la vie privée ou, plus loin encore et sans céder aux sirènes catastrophistes de la science-fiction, les évolutions de l'espèce humaine. Les défis à relever sont donc immenses et c'est pourquoi la compétition entre grands pays pour le développement et la maîtrise des nanotechnologies apparaît de plus en plus acharnée.

EN FRANCE, UNE R&D BIEN DÉVELOPPÉE

Les nanotechnologies dans la lignée de la microélectronique ou de l'ingénierie moléculaire

Les travaux de recherche et développement sur les nanotechnologies sont actifs et de bonne qualité en France, où ils sont soutenus continûment depuis

de nombreuses années par les pouvoirs publics. Ces travaux sont menés dans les laboratoires publics des universités et des organismes de recherche, CNRS et CEA en premier lieu, mais aussi INSERM, etc.

Les nanotechnologies sont issues à l'origine des progrès de la microélectronique, eux-mêmes tirés par la demande croissante du marché en moyens toujours plus performants de calcul et de communication. C'est en réduisant toujours davantage les dimensions des composants élémentaires semi-conducteurs sur puce, afin d'augmenter la densité d'intégration, suivant en cela la Loi de Moore du doublement de la densité de transistors élémentaires des microprocesseurs sur puce de silicium tous les deux ans (*cf.* le *roadmap* de l'ITRS), qu'on est parvenu aujourd'hui à des dimensions nanométriques. Aujourd'hui, les processeurs sont gravés en 32 nm, la prochaine génération devant descendre à 22 nm : on est bel et bien entré dans l'ère de la nanoélectronique. Il s'agit là de l'approche dite « *descendante* » (*top down*) du domaine des nanotechnologies.

Cette réduction de dimension, ainsi que l'étude des propriétés des composants nanométriques ne peuvent se faire qu'avec des installations d'élaboration et de caractérisation, des « centrales de technologie », avec leurs « salles blanches » très sophistiquées et onéreuses. Dans les laboratoires publics des universités et du CNRS, on compte cinq grandes centrales nationales, à Toulouse, Grenoble, Lille, Besançon et en Ile-de-France, où il en existe en réalité deux qui, situées sur le plateau de Saclay, vont être regroupées dans le cadre des Investissements d'avenir. Du côté industriel, les moyens de production de systèmes à base de semi-conducteurs sont concentrés chez ST Microelectronics (STM), qui occupe la 1^{re} position européenne et la 7^e position mondiale et dont les principales installations en France sont situées à Crolles, près de Grenoble. Les grands fabricants de composants comme STM ne se limitent pas aux processeurs, mais offrent aussi toute une gamme de capteurs de lumière, de mouvement, de pression, d'orientation, de contrôle, aux dimensions micro- ou nanométriques, indispensables dans les produits de communication mobiles, ainsi que dans le domaine des transports, de la santé, de l'environnement. Aujourd'hui, une usine de fabrication de composants en 32 nm a un coût de 3 à 5 milliards de dollars, ce qui explique la concentration industrielle qui s'est opérée au plan mondial au cours des dernières décennies. Enfin, le CEA occupe en France une place essentielle, à l'interface entre la recherche amont et l'industrie, avec ses propres laboratoires de recherche technologique à Grenoble et à Saclay. En créant le pôle MINATEC à Grenoble, le CEA a démontré sa force de frappe en nanotechnologies et a constitué un pôle de R&D et de transfert d'importance européenne, en s'appuyant sur le contexte industriel favorable de la région grenobloise, avec un grand industriel, STM, et de nombreuses PME de haute technologie. Ce pôle est encore en cours d'agrandissement dans le cadre du grand projet de cluster GIANT (*Grenoble Innovation on Advanced New Technologies*), qui inclut la

nanobiologie et d'autres thèmes mettant en œuvre des nanotechnologies comme celui de l'énergie.

Les nanotechnologies ne se limitent toutefois pas aux technologies issues de ou liées à la micro- et nanoélectronique. Bien d'autres secteurs scientifiques et technologiques sont concernés. Cela traduit l'existence d'une autre approche des nanotechnologies, l'approche « *ascendante* » (*bottom-up*). A la base, cette approche consiste à construire des objets nanométriques à partir de briques de base élémentaires de la matière que sont les atomes et les molécules. Il n'est pas surprenant que cette approche soit également bien développée en France, où la chimie supramoléculaire est un axe de recherche très vivant, comme l'a prouvé l'attribution du prix Nobel de chimie au professeur Jean-Marie Lehn en 1987. L'ingénierie moléculaire permet de réaliser un « Lego » avec des molécules, en vue de constituer des matériaux aux propriétés particulières. La manipulation contrôlée des atomes et molécules, l'utilisation de leurs propriétés d'auto-assemblage permettent un design de nouveaux matériaux à l'échelle moléculaire. Cette approche est mieux adaptée que l'approche *top-down* à l'obtention de propriétés chimiques et biologiques ciblées. Elle donne lieu à des applications dans le domaine des matériaux d'une part, des diagnostics et thérapies au cœur des cellules du corps d'autre part.

Une politique de soutien de l'Etat construite sur la durée

Lorsque les Etats-Unis lancent la *National Nanotechnology Initiative* (NNI), en 2000, la France, comme d'autres grands pays européens, est en phase de mise en œuvre de sa politique. En 1999 a été créé le Réseau de recherche en micro- et nano-technologies (RMNT), qui faisait alors partie des Réseaux de recherche et d'innovation technologique (RRIT), dont les objectifs étaient de favoriser, par le financement de projets, des transferts technologiques entre la recherche publique et les entreprises sur des domaines prioritaires. En 2002 est lancée l'Action concertée initiative (ACI) en nanosciences pour soutenir des projets de recherche fondamentale des laboratoires académiques. En 2003, une étape nouvelle est franchie avec la création du réseau national des cinq grandes centrales de micro-nanotechnologies. Ce réseau reçoit des financements afin de lui permettre d'atteindre les standards internationaux et d'assurer son accessibilité à l'ensemble de la communauté de recherche nationale.

En 2005, le RMNT et l'ACI Nanosciences fusionnent pour former le Réseau national de recherche en nanosciences et nanotechnologies (R3N). A la création de l'Agence nationale de la recherche (ANR) en 2006 est lancé le programme PNANO, qui reprend les activités du R3N. L'année 2005 voit également la mise en place des Pôles de compétitivité, parmi lesquels Minalogic (Rhône-Alpes), Solutions communicantes sécurisées (PACA), Photonique (PACA), Microtechniques (Franche-Comté), Sciences et systèmes de l'énergie électrique (Centre) sont fortement impliqués dans le domaine

des nanotechnologies. En 2006 sont labellisés les premiers Instituts Carnot, dont cinq interviennent fortement en nanosciences et nanotechnologies. Le CNRS et le CEA créent également à cette époque un Observatoire des micro-et nanotechnologies (OMNT), dédié à la veille stratégique et s'appuyant sur un réseau de plus de 200 experts. Enfin, parmi les Réseaux thématiques de recherche avancée (RTRA) créés en 2007, trois concernent le domaine des nanosciences et nanotechnologies. Le Triangle de la physique (Orsay) s'appuie sur de très grands instruments de recherche, comme le synchrotron Soleil. Les deux autres RTRA sont les « Nanosciences à la limite de la nanoélectronique » (Grenoble) et le « Centre international de recherche aux frontières de la chimie » (Strasbourg).

L'ANR finance de nombreux projets relevant des nanotechnologies en réponse aux appels d'offres de ses différents programmes. Depuis 2010, les programmes non thématiques (programmes Blanc, y compris international, et Jeunes chercheuses-Jeunes chercheurs) comportent un volet « nanosciences » qui finance des recherches exploratoires et émergentes sur les phénomènes de base à l'œuvre dans des nanostructures et nano-objets originaux. De plus, le programme thématique P2N finance des projets plus appliqués sur des thèmes redéfinis chaque année. Depuis 2012, les réponses à ce programme impliquent nécessairement des partenaires industriels. D'autres programmes de l'ANR, en STIC, énergie, biologie et santé, agro-alimentaire, développement durable, etc. financent aussi des projets comportant des aspects de nanotechnologies. Au total, le montant total du financement sur projet des nanosciences et nanotechnologies par les appels d'offres de l'ANR est de l'ordre de 100 millions d'euros (M€) en 2011, dont 10 millions d'euros de crédits d'infrastructure gérés par l'Agence.

Le déploiement de la politique nationale s'est poursuivi au cours des dernières années. En décembre 2009 a été adoptée pour la première fois, en Conseil des ministres, au terme d'un exercice de réflexion inédit impliquant de nombreux spécialistes, la Stratégie nationale de recherche et d'innovation (SNRI), qui définit trois axes de développement prioritaires pour la période 2009-2012. L'axe intitulé « L'information, la communication et les nanotechnologies » est décliné en « défis », dont celui de « *réussir la révolution des nanotechnologies, dans les domaines de l'électronique, des matériaux et des technologies pour la santé aussi bien que dans celui des énergies renouvelables* ». En 2009 également, le gouvernement a créé, dans le cadre du plan de relance, l'initiative NanoInnov : ce programme, restreint aux trois grands centres situés à Grenoble, Toulouse et en Ile-de-France, a pour but de développer trois centres d'intégration des nanotechnologies sur le territoire national, dont le rôle est de rassembler les compétences et moyens technologiques, de coupler la recherche amont avec le secteur industriel, en prenant en compte les risques potentiels de l'usage de ces technologies et procédés. NanoInnov a bénéficié de crédits à la hauteur de 24 M€ pour financer des projets scientifiques et des actions de formation, auxquels se sont ajoutés 46 M€ en vue de créer un centre d'intégration

sur le plateau de Saclay. Des projets ont été financés dans les trois centres, sur les thèmes des matériaux et de l'énergie, de l'Internet des objets, de la santé et de la qualité environnementale.

Enfin, en 2011 et 2012, les Investissements d'avenir (IA) lancés dans le cadre du Grand emprunt, placés sous la responsabilité du Commissariat général à l'investissement (CGI) et gérés par l'ANR, ont renforcé l'appui de l'Etat au développement des nanotechnologies. Parmi les projets retenus relevant, à des degrés divers, des nanotechnologies, figurent 15 Equipex (Equipements d'excellence) et 24 Labex (Laboratoires d'excellence), répartis dans les principaux centres du territoire. En outre, 6 projets ont été sélectionnés en réponse à l'appel à projets Nanobiotechnologies axé sur la nanomédecine, le diagnostic médical et l'imagerie. Il faut ajouter 3 Instituts de recherche technologique (IRT) offrant des développements en nanotechnologies, à Grenoble (nanoélectronique), Metz-Troyes-Montbéliard (matériaux et procédés) et Toulouse (aéronautique, espace et systèmes embarqués). Enfin, le programme Nanoélectronique lancé dans le cadre du développement de l'économie numérique est un programme pré-industriel de développement instrumental et de recherche industrielle. Des actions complémentaires sont également soutenues par le ministère de l'Economie et les régions.

Au total, on estime que le domaine des nanosciences et nanotechnologies emploie actuellement environ 7 000 chercheurs en France. Le CNRS et le CEA en sont les principaux acteurs nationaux, assurant le développement et l'utilisation des centrales de nanofabrication et de grands instruments de caractérisation. Les nanotechnologies constituent une priorité bien identifiée par l'Etat et soutenue de façon résolue par de nombreux dispositifs, qui, composant aujourd'hui un tableau complexe, élaboré depuis environ quinze ans, confortent les grands pôles de R&D en France dans ce domaine.

VERS UN RENOUVEAU INDUSTRIEL MAJEUR AU PLAN MONDIAL ?

Si la France consent un effort soutenu à la R&D en nanotechnologies, comme toutes les grandes nations développées, c'est en raison de l'énorme potentiel économique attendu de ces nouvelles technologies. On en espère en effet un renouveau industriel majeur dans bien des secteurs. D'ores et déjà, de nombreux produits industriels intègrent des nanomatériaux (pneumatiques automobiles, articles de sport, cosmétiques, etc.) ou des systèmes micro-nanoélectroniques avancés (*smartphones*, écrans d'affichage, etc.). Et les développements futurs semblent immenses. Aujourd'hui, nombre de grands pays industrialisés mettent donc leurs espoirs dans les nanotechnologies pour contribuer à résoudre les grands défis sociétaux et environnementaux auxquels ils sont tous confrontés, avec des solutions miniaturisées plus efficaces, plus économes en matériaux et en énergie, moins onéreuses, plus intégrées et plus durables. Parmi les principaux défis

identifiés, en Europe comme ailleurs, figurent le développement d'un monde intelligent, connecté et sûr, les nouvelles méthodes de production industrielle économes en matières premières, une nouvelle économie de l'énergie, l'alimentation et l'environnement durables ou les problèmes posés par le vieillissement de la population.

Des capacités de calcul aux textiles intelligents

L'accroissement des capacités de calcul des microprocesseurs nécessite, comme on l'a vu, des technologies C-MOS sur silicium poussées à leurs limites. Lorsque les limites fondamentales inhérentes à la réduction des dimensions auront été atteintes, il faudra passer à des technologies entièrement nouvelles, basées sur d'autres types de nanocomposants, par exemple à base de nanotubes de carbone. Il va falloir rapidement aussi remplacer certains constituants des circuits intégrés, comme les couches d'ITO (oxyde d'indium et d'étain, toxique), par d'autres couches nanométriques, comme du graphène. L'augmentation des capacités de communication sans fil fera appel à des nanocomposants fonctionnant à très haute fréquence (térahertz) et à des communications optiques entre puces. La protection des données utilisera la cryptographie quantique et ses nanodispositifs. Le développement de l'électronique nomade, avec des appareils de plus en plus légers et bon marché, nécessite le développement d'affichage sur support souple (plastique, e-papier), incluant de l'électronique intégrée réalisée par impression.

De plus, des besoins énormes vont apparaître en capteurs très petits, légers et autonomes en énergie, pour la sécurité (détection de produits chimiques toxiques, de pollutions environnementales), la santé (*monitoring* en continu sur les personnes), les processus industriels. Les textiles techniques deviendront intelligents, incluant ces capteurs et des systèmes de traitement de leurs données. Les tissus pourront aussi intégrer des revêtements protecteurs (nanofibres ou nanocomposites, nanotraitements de surface). Il y a là des marchés considérables, mais il faudra plusieurs années encore pour que ces développements deviennent compétitifs. Le marché est estimé à 24 G€ en 2015 en Europe. Les entreprises mettant en œuvre ces nouvelles technologies utiliseront peu de main-d'œuvre, avec pour conséquence un faible impact du coût du travail dans les pays européens sur leur compétitivité.

Les nanos au service des populations vieillissantes

On estime à 10 % la fraction de la population des pays de l'OCDE qui sera âgée de plus de 80 ans en 2050 (pour 4 % en 2010). Cet état de fait engendrera une pression accrue sur les économies, car on estime que 1,5 % du PIB de ces pays devra être consacré aux soins des aînés. Les nanotechnologies auront sans nul doute un apport important, que ce soit

dans le domaine du diagnostic et du traitement directement sur la personne – un nouveau mot est ainsi né pour désigner cet ensemble, la « théranostique ». On estime le marché de la délivrance automatique de médicaments *in situ* par des micro-nanosytèmes à 29 G\$ dès 2015.

Des biocapteurs autonomes et connectés peuvent effectuer le *monitoring* du glucose dans le sang, de la pression artérielle de la fonction cardiaque, du mouvement, etc., permettant une réduction des coûts d'analyse et de traitement et de la dépendance des personnes. Pour traiter la maladie d'Alzheimer, une délivrance efficace de médicaments au niveau du cerveau pourra être rendue possible par transport par des nanoparticules à travers la barrière hémato-encéphalique, qu'elles sont seules à pouvoir franchir. De même, des nanoparticules traçables et biodégradables pourront acheminer des molécules de médicaments vers des populations cellulaires ciblées, par exemple dans le cas de tumeurs cancéreuses, de cellules de l'oreille interne très difficilement accessibles ou de cellules rétinienne, en vue de mieux traiter la DMLA. Les nanotechnologies permettront aussi d'installer des implants plus fins, par exemple au niveau de la rétine. Enfin, on attend de grandes améliorations des *pacemakers*, grâce à des nanorubans céramiques qui, produisant de l'électricité à partir des mouvements respiratoires, évitent ainsi le recours à des piles devant être régulièrement changées.

Au total, la nanomédecine sera un secteur industriel-clef, avec les nanomédicaments, le diagnostic et la médecine régénérative. Des obstacles restent cependant à franchir avant son plein développement, comme la maîtrise totale des risques liés à ces technologies ou la protection des données médicales personnelles fournies par les réseaux de capteurs, vis-à-vis des employeurs par exemple. Au plan philosophique et éthique, des interrogations se font aussi jour sur l'éventualité d'améliorations des performances, voire de modifications significatives de l'espèce humaine avec ces technologies (question de l'« homme augmenté »), dont il ne faut assurément pas négliger l'importance et la portée.

Des bâtiments plus économes en énergie

Les nanotechnologies apporteront aussi leur concours à la transformation des techniques de construction, pour des bâtiments plus économes en énergie, réduisant ainsi la facture énergétique globale et les émissions de CO₂. Aérogels et nanomousses très minces et très isolants, films réfléchissants nanostructurés, cellules photovoltaïques organiques à bas coût devraient produire une économie de 15 millions de GWh pour l'Europe. Les techniques de construction évolueront aussi : nanociments réalisés avec beaucoup moins d'émissions de CO₂, alliages métalliques recyclables, peintures antisalissures et antibactériennes, éclairage par des OLED utiliseront toutes l'apport des nanotechnologies. Les applications des nanotechnologies concerneront aussi les transports (véhicules plus légers,

amélioration des batteries pour transport électrique) et l'environnement, avec des dispositifs plus efficaces de filtration de l'air et de l'eau.

Il n'est pas surprenant que l'Allemagne soit le premier déposant de brevets dans ce domaine en Europe, la France étant en 2^e position, mais avec un nombre de brevets trois fois plus faible.

Entreprises, publications et brevets en Europe

Afin d'éclairer les politiques et les entreprises des Etats membres et des Etats associés, ainsi que le Parlement européen et la Commission, cette dernière a lancé, *via* le 7^e Programme-cadre (FP7), un projet intitulé ObservatoryNANO, afin d'étudier la pénétration des nanotechnologies dans l'innovation des entreprises en Europe. Les entreprises européennes mettant en œuvre des nanotechnologies ont été identifiées au moyen de trois critères : l'obtention de fonds européens du programme Nanotechnologies, matériaux et procédés (NMP) du FP7, les publications et les dépôts de brevets dans ce domaine. Au total, 1 540 entreprises européennes ont été ainsi répertoriées. L'étude montre que, sur la période 1998-2009, les entreprises de quatre pays ont produit plus de 10 000 publications : l'Allemagne (plus de 5 000 publications), le Royaume-Uni, la France et la Suisse représentent à eux seuls les 2/3 des publications d'entreprises européennes. Pour les brevets, les entreprises allemandes en ont déposé 3 730 sur la période 2000-2010, soit pratiquement autant que le reste des Etats-membres (3 767) ; la France et le Royaume-Uni ont déposé respectivement 998 et 942 brevets et sont donc loin du score de l'Allemagne. Si on rapporte le nombre de brevets déposés au nombre d'habitants, l'Allemagne arrive toujours en tête, avec 4,55 brevets pour 100 000 habitants, contre 1,55 pour la France et 1,53 pour le Royaume-Uni. On note aussi les bonnes performances de nations plus petites, comme les Pays-Bas (4,37) ou la Suisse (4,06). Enfin, si on s'intéresse à la répartition par grand secteur d'activité, parmi les cinq grands défis sociétaux évoqués précédemment, on note que le plus grand nombre de publications a été réalisé dans le domaine de l'énergie et le plus grand nombre de brevets dans celui de la chimie et des matériaux, suivi par les STIC et la nanomédecine.

En France, une étude récente (2012) de la Direction générale de la compétitivité, de l'industrie et des services (DGCIS) du ministère de l'Economie, des Finances et de l'Industrie (MINEFI) a cherché à faire le point spécifiquement sur « Les réalités industrielles dans le domaine des nanomatériaux en France ». Les nanomatériaux sont ceux qui incluent des nanoparticules ou des nano-objets ou qui sont nanostructurés en surface ou en volume. Ils peuvent intervenir dans de très nombreux secteurs (transport, TIC, défense, santé, luxe, agro-alimentaire, éco-industries, BTP, énergie et industries de santé). L'étude a permis d'identifier quelque 260 entreprises ayant une activité potentielle dans ce domaine et environ 150 en ayant effectivement une, en majorité (62 %) des PME. Sans surprise,

50 % d'entre elles sont situées en Ile-de-France et en Rhône-Alpes, où, comme on l'a vu, les activités de recherche des laboratoires publics sont les plus développées. *In fine*, l'étude met en évidence des réalités industrielles indéniables, mais reposant aujourd'hui encore sur l'utilisation majoritaire de nano-objets « historiques », et montre que l'utilisation de nanotechnologies plus innovantes (nanotubes, nanofils, etc.) en est encore au stade de la pré-industrialisation.

AU PLAN INTERNATIONAL, UN EFFORT IMPORTANT
POUR TOUS LES GRANDS PAYS INDUSTRIALISÉS

Tous les grands pays industrialisés misent sur des développements industriels, médicaux et environnementaux importants découlant de l'utilisation des nanotechnologies. Ils ont donc tous élaboré une stratégie de recherche et d'innovation dans ce domaine et y dédient des soutiens financiers publics importants. Les axes des R&D retenus sont toujours plus ou moins les mêmes : aujourd'hui, on attend des nanotechnologies un apport décisif à la résolution de grandes questions économiques et sociétales, dont nous avons vu des exemples précédemment. On estime que le marché lié aux nanotechnologies était en 2009 de 91 G \$ aux Etats-Unis et de 254 G \$ dans le monde. Les produits mis sur le marché et les personnels impliqués dans la recherche, le développement, la production et la commercialisation paraissent doubler tous les trois ans : une extrapolation simple donnerait ainsi en 2020 un marché de 3 000 G \$ dans le monde, dont 1 200 G \$ aux Etats-Unis, avec six millions d'emplois. Ces estimations doivent évidemment être prises avec la plus grande prudence. Quoi qu'il en soit, ces espoirs motivent les efforts de nombreux Etats, qui ont lancé des politiques volontaristes à la suite des Etats-Unis, comme le Japon en 2001, l'Union européenne (UE), l'Allemagne, la Chine et Taïwan en 2002.

Sans prétendre à l'exhaustivité, nous évoquerons le cas des principaux acteurs que sont les Etats-Unis, le Japon et la Chine, puis l'Europe, avec une attention particulière pour la politique de l'Allemagne et pour les actions structurantes de la Commission européenne.

Les Etats-Unis et la NNI

La National Nanotechnology Initiative (NNI) a été lancée en janvier 2000 au CalTech (California Institute of Technology), institution-phare de la recherche et de l'innovation, par le président Clinton, sous l'impulsion de ses conseillers, parmi lesquels Mihail Roco, qui poursuit aujourd'hui encore les actions de consultation, de réflexion et de programmation stratégique dans ce domaine. Depuis cette date, plus de 12 G \$ ont été investis par l'Etat fédéral dans ce domaine, dont 1,8 G \$ pour la seule année 2010. La NNI définit la programmation et coordonne les actions des différents Départements fédéraux. En 2010, 25 Département fédéraux, dont le

Department of Defence (DoD), et Agences, comme la NASA, le National Institute of Health (NIH) ou la Food and Drug Administration (FDA), participent à la NNI. La National Science Foundation (NSF) lance des appels à projets sur les aspects les plus amont et implique aussi ses centres de recherche. Le Department of Energy (DoE) participe à la stratégie de la NNI *via* ses centres de recherche dédiés à l'énergie (Energy Frontier Research Centers ou EFRCs) et aux Nanosciences (Nanoscale Centers). Quant au National Institute of Standards and Technology (NIST) et à l'Environmental Protection Agency (EPA), ils travaillent à la constitution d'une très grande base de données sur les nanomatériaux ; il s'agit là d'un point très important, car les bases de données rassemblant les spécificités et les caractéristiques techniques de nanomatériaux, de même que les normes de sécurité sur de tels produits peuvent se transformer en de redoutables outils de guerre économique.

Les grands axes de la NNI sont, comme dans les autres pays, d'établir une R&D du meilleur niveau international, de renforcer le transfert des résultats de la recherche vers l'industrie, mais aussi de développer la formation dans ce domaine et de tendre vers un développement responsable de ces nouvelles technologies. La première décennie de la NNI (NANO-1) a été orientée vers l'étude des propriétés nouvelles, à l'échelle du nanomètre, l'élaboration, la caractérisation et l'utilisation de nouveaux composants, l'instrumentation à cette échelle et les procédés de nanofabrication. S'ajoutent à cela des aspects sociétaux et de formation. En 2010, une seconde étape a été définie (NANO-2) et de nouvelles orientations ont été données au programme NNI, axées plus résolument sur l'apport possible des nanotechnologies aux questions énergétiques, environnementales et sociétales, incluant les questions de défense et de sécurité. Un effort important est maintenu sur le transfert technologique et la commercialisation de produits « nanos », standardisés et durables. Si les résultats de ce nouvel effort n'étaient pas à la hauteur des espoirs et des financements mis sur les nanotechnologies, la poursuite de l'effort entrepris au-delà de 2020 pourrait être rediscutée, voire compromise.

Chine, Taïwan, Japon : une compétition acharnée en Asie

Le Japon est un acteur majeur des nanotechnologies depuis les années 1990, dans les tout premiers mondiaux après les Etats-Unis. Il a développé un substrat académique important, puis créé en 2010 un réseau national de cinq grands instituts, au sein des Universités d'Hokkaido, de Tohoku, de Tokyo, d'Osaka et de Kyushu. Il est peu aisé d'avoir accès à des documents décrivant la politique gouvernementale et industrielle japonaise en nanotechnologies au-delà de 2009. Les financements gouvernementaux ont été accrus au cours des « Science and Technology Basic Plans » successifs, avec 245 M\$ en 2000 et 950 M\$ par an depuis 2005, et sont restés à ce niveau depuis. Si les trois premiers plans ont mis l'accent

sur le développement des connaissances fondamentales sur les nanos et l'acquisition des compétences scientifiques et technologiques nécessaires, le quatrième plan (2011–), est, comme pour les Etats-Unis et l'Europe, orienté radicalement sur la résolution des grands défis sociétaux, comme la croissance durable et la qualité de vie : là encore, on attend des nanotechnologies un apport très substantiel dans les domaines de l'énergie, de la santé et de l'innovation industrielle. Les entreprises japonaises sont également très engagées en nanotechnologies et dédient des financements conséquents à la recherche. En 2008, on estime que le financement japonais global incluant celui des universités, des diverses institutions et des entreprises, représentait plus de dix fois le seul financement gouvernemental de la R&D en nanotechnologies.

La Chine veut se placer comme un nouvel acteur important dans le champ des nanotechnologies. Début 2006 a été lancé le « Plan national à long terme (2006-2020) sur le développement scientifique et technologique ». Les nanotechnologies figurent parmi ses axes majeurs, avec pour objectifs essentiels le développement, d'une part, de nouveaux nanomatériaux fonctionnels – la Chine disposant d'une longue tradition dans le domaine des matériaux – et, d'autre part, de nanodispositifs pour la nanoélectronique et la nanobiologie, pour lesquels la Chine présente des faiblesses et lacunes significatives. Les nanotechnologies font l'objet d'un engouement de la part des scientifiques chinois qui va de pair avec les soutiens gouvernementaux. Le financement de la recherche publique a crû de 20 % par an et atteint 600 M\$ en 2007. Plus de 350 universités et une trentaine d'instituts de recherche seraient engagés dans des programmes de R&D en nanotechnologies. Sans surprise, deux grands centres de R&D en nanotechnologies ont été fondés, l'un autour de Pékin, l'autre autour de Shanghai : ces deux centres rassemblent les grandes universités locales et les laboratoires de l'Académie chinoise des sciences (CAS) – universités et laboratoires de la CAS concentrent aujourd'hui près de 85 % de la R&D chinoise sur les nanotechnologies. En termes de nombre de publications, la Chine a dépassé les Etats-Unis dès 2006 : elle est aujourd'hui 1^{re} mondiale en publications et 2^e pour les citations. Pour les brevets, elle est passée de 4 600 en 2005 à 12 000 en 2009 (2^e rang mondial).

Le marché chinois des nanotechnologies est estimé à 31 G\$ en 2010 et 145 G\$ en 2015. Les entreprises chinoises déclarent leur intérêt pour les nanotechnologies, dans les domaines des matériaux, de l'électronique et des communications, des transports et du biomédical, ainsi que dans celui de l'énergie. La Chine étant sur le point de devenir le premier marché mondial de l'automobile, il y a une forte demande en micro- nanocapteurs et actionneurs de tous ordres pour ce marché. On estime à 800 environ le nombre d'entreprises chinoises concernées par les nanotechnologies, aujourd'hui encore surtout pour des produits traditionnels, comme les poudres, revêtements, céramiques, etc. Une centaine d'entreprises étrangères sont installées en Chine, où elles apportent des technologies

avancées. Plusieurs grands parcs industriels destinés à attirer des PME et des investisseurs ont aussi été créés, à Shanghai, Suzhou, Pékin et Tianjin.

Au total, la Chine a commencé à s'intéresser assez tôt aux nanotechnologies, essentiellement dans le domaine des nanomatériaux avancés, qui est l'un de ses secteurs de prédilection, et de l'énergie (photovoltaïque par exemple). Elle présente en revanche des lacunes et faiblesses en nanoélectronique, nanodispositifs et dans le domaine nanobiomédical, pour lesquels l'Etat chinois va investir et espère aussi importer des technologies avancées pour renforcer la recherche et accélérer le processus de développement. Cette situation offre des opportunités pour des entreprises étrangères pour pénétrer le marché chinois, la plupart des matériels scientifiques de fabrication, d'analyse et d'essais étant importés de l'étranger.

Face à la Chine continentale, Taïwan s'est aussi positionnée très tôt et de façon très volontariste sur les nanotechnologies, en misant sur ses atouts sérieux dans le domaine de l'électronique et plus généralement des TIC. Le programme national sur les nanotechnologies devrait avoir reçu 1 G \$ de 2003 à 2014 : la direction de ce programme estime en effet que 1 \$ investi par le gouvernement déclenche 1,53 \$ de financement privé. Quelque 800 entreprises, la moitié d'entre elles avec plus de 100 salariés, développent des produits incluant des nanotechnologies. En 2011, le gouvernement taïwanais a lancé un plan de 1,5 G € pour le développement des biotechnologies, de l'imagerie et du *monitoring*, tous secteurs utilisant largement les nanotechnologies. Les données ci-dessus montrent que Taïwan est un acteur important en nanotechnologies, avec un profil complémentaire de celui de la Chine continentale – électronique à Taïwan contre matériaux en Chine – et une position affirmée en technologies avancées.

L'Allemagne : un plan d'action volontariste

L'Allemagne est sans conteste le champion européen des nanotechnologies et détient le premier rang en termes de nombre de publications et de brevets déposés. Près de 1 000 entreprises allemandes mettent et œuvre des nanotechnologies dans leur production, contre 300 en France (*cf. supra*).

En 2010, le gouvernement fédéral allemand a subventionné les nanotechnologies à hauteur de 400 M€, à travers le financement sur projets d'une part et le soutien institutionnel des organismes de recherche d'autre part : cela représente une hausse de 50 % par rapport à 2006. En 2011, le gouvernement fédéral a adopté un nouveau plan d'action détaillé et très construit en faveur des nanotechnologies devant entrer en vigueur en 2015 (Aktionsplan Nanotechnologien 2015) : les directives qu'il contient, sans toutefois que soient précisés les budgets associés, servent de cadre général pour assurer un développement et une utilisation durables et sûrs des nanotechnologies, compte tenu de leur potentiel économique : ce plan

d'action prend en compte la place de plus en plus importante qu'occupent les nanotechnologies dans la vie des citoyens.

Le plan se caractérise par une approche transdisciplinaire et s'inscrit pleinement dans la logique de la stratégie High-Tech, le programme de coordination stratégique de la recherche scientifique et technologique en Allemagne. Il concerne ainsi les domaines prioritaires définis dans cette stratégie qui ont un lien avec les nanotechnologies : énergie/climat, santé/nutrition, mobilité, sécurité et communication. Il vise à soutenir la recherche et le transfert de technologie dans les domaines précités afin d'assurer la compétitivité, par le soutien des PME et l'aide à la création d'entreprises. Un effort important sera porté sur l'évaluation des risques des nanotechnologies pour l'homme et l'environnement, la protection de l'environnement, des travailleurs et des consommateurs. Le plan s'attache aussi aux points importants que sont l'adaptation des textes de loi, la standardisation et la normalisation des produits, ainsi que la qualification des employés. Enfin, il vise à intensifier la communication et le dialogue avec la société civile et à renforcer encore la position avantageuse de l'Allemagne *via* des coopérations internationales.

Union européenne : de nombreux modes d'action pour une meilleure structuration

L'Europe s'est dotée au cours de la précédente décennie de nombreux outils incitatifs pour développer la recherche et l'innovation en nanosciences et nanotechnologies, favoriser les collaborations entre pays européens et aller vers une meilleure coordination des politiques des Etats membres.

Le NanoAction Plan 2005-2010 avait pour but d'associer recherche, développement et innovation, de disposer d'infrastructures et de pôles européens d'excellence, de renforcer les ressources humaines et la mobilité. Il devait aussi favoriser l'innovation industrielle, avec des produits sûrs et des efforts sur la définition de normes et la protection de la propriété intellectuelle, intégrer la dimension sociétale, protéger la santé publique, l'environnement et les consommateurs. La définition d'une stratégie cohérente et visible au niveau européen devait aussi conduire à une meilleure coopération au niveau international.

En pratique, dans le cadre du 7^e Programme-cadre de R&D (PCRD) 2007-2013 ? les nanosciences et nanotechnologies se retrouvent dans les appels d'offres du programme Nanotechnologies, Matériaux et Procédés (NMP), comme dans le 6^e PCRD 2002-2006. Le programme Information and Communication Technologies (ICT) vient compléter le dispositif au niveau des applications dans le domaine des STIC. Ces programmes comportent également des actions de coordination, les European Research Area Networks (ERANETs), qui correspondent à des appels à projets multilatéraux pour la constitution de réseaux de recherche financés à la fois par la Commission et par les Etats participants. Citons

Euronanomed sur la nanomédecine, Nanosci-Era sur les nano-objets individuels originaux ou CHIST-Era sur les défis à long terme en STIC, comme par exemple l'information quantique.

D'autres programmes ambitieux ont été lancés en 2011. Il s'agit de Flagships, qui orientent les priorités de programmation. Ce nouvel appel européen porte sur la création de structures de type « laboratoires sans murs », certains des thèmes proposés concernant les nanotechnologies, en particulier dans le domaine de la santé et de l'aide aux personnes. Le projet Graphene rassemble pour sa part les meilleures institutions européennes pour évaluer les potentialités d'une nouvelle électronique à base de carbone.

Le NanoAction Plan 2010-2015 marque une évolution vers l'innovation et l'aval industriel, vers une meilleure prise en compte des attentes sociétales, et vise aussi à réduire la fragmentation des efforts européens.

La Commission européenne travaille activement au programme Horizon 2020, qui fera suite au 7^e PCRD et dont une première version a été présentée en novembre 2011. Cet ensemble de mesures visant à promouvoir la recherche, l'innovation et la compétitivité en Europe disposera d'un montant de 80 G€ : près de 6 G€ seront investis dans le développement des capacités industrielles européennes relatives aux « technologies-clefs génériques », lesquelles comprennent la micro- et nanoélectronique, les nanotechnologies, les matériaux avancés, les systèmes de fabrication et de transformation avancés et les biotechnologies. Le développement de ces technologies nécessite une approche pluridisciplinaire à forte intensité de connaissance et de capitaux, dans laquelle les nanotechnologies jouent un rôle important.

LES NANOTECHNOLOGIES, ENTRE ESPOIRS ET RISQUES

Comme nous l'avons vu, le secteur des nanotechnologies apparaît aujourd'hui comme l'un des secteurs cruciaux pour le renouveau de l'industrie mondiale. Il se situe dans le cadre de la poursuite du modèle de croissance basé sur l'innovation. Il peut favoriser la mutation nécessaire de l'industrie française vers une croissance axée davantage vers les PME. Après une première phase de R&D dédiée aux nanostructures passives, puis actives, les développements portent aujourd'hui sur les nanosystèmes intégrés, en contact avec leur environnement et communicants. Et on se dirige résolument vers ce qui est appelé « la convergence NBIC » des nanotechnologies (N), de la biologie (B), de l'information (I) et des sciences cognitives (C). Les réalisations sont de plus en plus complexes, une complexité qui accroît les incertitudes et les risques. Il n'est donc pas possible de limiter la réflexion aux seuls aspects scientifiques et économiques des nanotechnologies. Ces technologies ne pourront véritablement diffuser dans l'industrie et le commerce que si elles répondent aux attentes de la société et des citoyens et si ces derniers parviennent à les accepter et à se les approprier. Le débat public qui s'est déroulé en France sur les

nanotechnologies en 2010, dans des conditions parfois très difficiles, montre qu'on en est encore loin, dans notre pays comme dans d'autres.

L'engagement du gouvernement français en réponse au débat public porte sur trois points principaux, également portés par l'Union européenne et tous les grands pays industrialisés. Le premier concerne la sécurité et la sûreté des nanoproduits tout au long du cycle de vie, jusqu'à leur recyclage. Il est nécessaire d'aller vers une éco-conception de ces nouveaux produits, à toutes les étapes de la chaîne de valeur. Cela peut paraître une évidence *a priori*, mais on en est en réalité très loin. Avant d'en arriver là, il faut développer et multiplier les études de toxicologie et d'éco-toxicologie des nanoproduits, ce qui nécessite des efforts très importants de métrologie, de caractérisation, de traçabilité, de terminologie et de nomenclature, puis de définition de standards et de normes aussi universels que possible, enfin de réglementation, sujets extrêmement importants dans la compétition économique. Pour la sécurité des citoyens, il faut éviter l'apparition de normes locales, à la fois insuffisantes et conduisant à un protectionnisme économique. En ce qui concerne les aspects de toxicologie des nanomatériaux, l'Union européenne a décidé pour l'instant de s'en tenir à la directive Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals (REACH) promulguée en 2007 pour les produits chimiques ; cette situation sera certainement amenée à évoluer quand des progrès auront été faits dans les directions que nous venons de mentionner. La constitution de grandes bases de données internationales et les efforts de modélisation de la vie des produits seront également de la plus haute importance.

Un autre point très important et sujet d'inquiétudes légitimes concerne le stockage et la protection des innombrables données individuelles qui vont être produites par les nano-objets communicants. L'utilisation de ces données doit être soigneusement réglementée et il est peu probable que les règles actuelles, comme celle de la CNIL en France, soient adaptées à ces technologies nouvelles et se montrent suffisantes pour la protection de la vie privée et des libertés individuelles dans l'avenir.

Enfin, l'application des nanotechnologies au vivant, allant jusqu'à la biologie de synthèse, est l'objet des inquiétudes les plus fortes, en raison des possibilités qu'elles offrent et vont offrir de modification des espèces, y compris l'espèce humaine. Là encore, des commissions de bioéthique doivent ouvrir le débat sur ces sujets qui concernent tous les citoyens et la réflexion doit mener à des lois et règlements traduisant la volonté des peuples.

En conclusion, on voit donc que les nanotechnologies ouvrent des espaces encore inconnus et se situent aujourd'hui entre rêve scientifique et économique d'une part, réalité des risques et des inquiétudes d'autre part. Des actions de formation et d'information des citoyens, de communication sur les possibilités ouvertes et les risques encourus seront indispensables si on veut pouvoir bénéficier pleinement du potentiel énorme de ces hautes technologies.

