

Les Nanotechnologies :

enjeux et conditions de réussite d'un projet national de recherche

Rapport du groupe de travail « Nanotechnologies »
de l'Académie des technologies

Membres du groupe de travail :

Christian BORDÉ
Pierre-Étienne BOST
Sébastien CANDEL
Jean-Pierre CAUSSE
Robert CORRIU
Michel COURTOIS
Jean KOVALEVSKY
Jacques LENFANT
Francis LÉVI
Bernard MAITENAZ
Michel POUCHARD
Erich SPITZ
Pierre TOURNOIS
Claude WEISBUCH (animateur)

Secrétaire scientifique : François OZANAM

SOMMAIRE

RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS	4
1. Introduction : Que sont les nanotechnologies ?	6
2. Les enjeux des nanotechnologies	6
2.1. <i>Le renouvellement des domaines techniques</i>	6
2.2. <i>Définition et distinction entre nanotechnologies et nanosciences</i>	7
2.3. <i>La situation actuelle des nanotechnologies</i>	9
2.4. <i>Quelques domaines d'importance des nanotechnologies</i>	10
2.4.1 <i>Les nanotechnologies de l'information et de la communication</i>	10
2.4.2 <i>Les nanobiotechnologies</i>	12
2.4.3 <i>Les nanomatériaux</i>	13
2.4.4 <i>La nanométrie</i>	14
2.5. <i>Les enjeux dans les grands domaines d'application</i>	14
2.5.1 <i>L'énergie</i>	14
2.5.2 <i>La santé</i>	15
2.6. <i>Pour une approche fédératrice, à la fois nécessaire et porteuse de progrès</i>	16
2.7. <i>Un défi pour la France</i>	17
2.8. <i>Une occasion à saisir pour faire évoluer la recherche technologique française</i>	18
3. Une variété de recherches	20
3.1. <i>L'approche par domaines scientifiques</i>	20
3.2. <i>L'approche par domaines d'applications</i>	20
3.3. <i>Les approches suivant les différents acteurs de la recherche</i>	21
3.4. <i>Les différents types de moyens</i>	22
3.5. <i>Micro et nano fabrication : des exemples concrets</i>	24
3.6. <i>L'importance des moyens répartis pour l'industrie de demain</i>	27
3.7. <i>Les différents métiers</i>	27
4. La situation actuelle en France	29
4.1. <i>Points forts et atouts</i>	29
4.2. <i>Les difficultés à surmonter</i>	30
5. Recommandations	34
5.1. <i>Prendre l'initiative d'un grand programme</i>	34
5.2. <i>Mettre à niveau et généraliser les infrastructures indispensables</i>	34
5.3. <i>Investir à bon escient</i>	34
5.4. <i>Organiser la diversité</i>	35
5.5. <i>Voir plus loin</i>	35
5.6. <i>Apprendre à travailler ensemble</i>	36

ANNEXE : UN APERÇU DE LA SITUATION INTERNATIONALE	37
A-1. Les stratégies élaborées dans différents pays	37
A-1.1. <i>L'initiative américaine</i>	37
A-1.2. <i>Les « grands » pays européens : Allemagne et Angleterre</i>	39
A-1.3. <i>Un pays particulièrement performant : la Suisse</i>	42
A-1.4. <i>Un pays en phase de lancement : le Canada</i>	44
A-1.5. <i>L'Union Européenne</i>	45
A-2. Comparaison succincte des positions en France et à l'étranger	47
A-2.1. <i>La politique française actuelle</i>	47
A-2.1.1 <i>Le paysage général :</i>	47
A-2.1.2 <i>Les grandes centrales :</i>	47
A-2.1.3 <i>Les centrales spécifiques :</i>	48
A-2.1.4 <i>Le couplage industrie-université :</i>	48
A-2.1.5 <i>La coordination avec les autres programmes internationaux :</i>	48
A-2.2. <i>Les particularités des modes d'action français</i>	49
BIBLIOGRAPHIE	51

RÉSUMÉ ET RECOMMANDATIONS

Après avoir étudié l'état des connaissances dans le domaine des nanotechnologies, en France et dans les autres pays, l'Académie des technologies s'est convaincue qu'il se préparait une véritable révolution, susceptible d'affecter des branches des activités humaines nombreuses et diverses mais aujourd'hui difficilement prévisibles. Elle recommande vigoureusement aux pouvoirs publics de lancer un « projet national de recherche » dans la perspective esquissée dans ce rapport.

Pourquoi une telle importance pour les nanotechnologies ? La possibilité qui s'offre d'agir à un niveau qui est celui des atomes et des molécules modifie profondément les propriétés de la matière sous toutes ses formes. Cette capacité sans précédent va probablement bouleverser tout ce que l'on conçoit et fabrique, des vaccins aux ordinateurs et des pneus de voiture aux objets que l'on n'imagine pas encore. Mais pour y parvenir, il ne suffit pas de laisser libre cours à l'imagination des chercheurs car la recherche en nanotechnologies est distincte de celle en nanosciences : elle doit être faite en vue des applications et rechercher un impact économique.

C'est un défi majeur pour la France car il faut faire travailler ensemble autour d'objectifs communs de nombreux acteurs (scientifiques et ingénieurs). Comme souvent dans notre pays, il existe des compétences de qualité en nanosciences mais une grande insuffisance dans le domaine de la technologie. Dans la compétition à l'échelle mondiale qui se prépare, les pouvoirs publics ont un rôle déterminant à jouer. Les États-Unis, champions de la libre entreprise, ont lancé un vaste programme fédéral de recherches avec des moyens considérables. La plupart des autres pays ont suivi.

L'Académie milite donc pour la création d'un « projet national de recherches en nanotechnologies » majeur, de caractère interministériel, avec des moyens suffisants, venant compléter et amplifier les actions incitatives actuelles engagées par le Ministère de la Recherche.

Cette action devra se fonder sur des projets pertinents et dûment évalués. Elle ne se contentera pas de soutenir les quelques centres d'excellence bâtis autour de grosses infrastructures. Pour préparer la pénétration en profondeur de ces technologies à venir, il faut agir sur l'ensemble du territoire et pour cela mettre en place les infrastructures de taille moyenne nécessaires au niveau local et régional. On s'appuiera donc sur les universités et les établissements d'enseignement supérieur pour créer ainsi des centres universitaires, de taille intermédiaire (comme il en existe tant à l'étranger). Ces centres devront surtout être largement ouverts sur l'extérieur, donnant en particulier un accès facile aux « jeunes pousses » qui devraient jouer un rôle important dans le transfert de ces nouvelles technologies vers les industries de production.

Le projet devra adopter des procédures à la fois exigeantes, pour utiliser au mieux les moyens disponibles, et variées, pour s'adapter à la diversité des besoins. La mise en compétition des projets devra être pratiquée systématiquement. On pourra aussi inciter les acteurs de la recherche à se regrouper pour présenter des projets cohérents, y compris pour l'attribution d'équipements. On favorisera l'émergence de regroupements interdisciplinaires, essentiels pour aborder de nombreux domaines d'applications. Il faudra aussi rechercher l'implication des industriels dans la conduite de l'initiative, pour participer à un effort prospectif et s'assurer de la pertinence de l'action au plan technologique. Néanmoins, dans la phase actuelle d'émergence des nanotechnologies, il semble indispensable de donner priorité à la recherche exploratoire en finançant des projets originaux et innovants, et pas seulement des projets ciblés. De façon générale, la mise en cohérence et le pilotage des moyens humains, matériels et organisationnels de l'initiative justifiera la création d'une instance temporaire pendant la phase de lancement des nanotechnologies en France.

Ces actions devraient avoir une vocation structurante pour le tissu de recherche français, constituant ainsi une occasion à ne pas laisser passer de le modifier et le moderniser. Le projet devra aussi se préoccuper de créer des formations nouvelles pour les scientifiques et les techniciens. Il ne faut pas oublier non plus les actions de communication pour donner au public une image accessible de la science et de la technologie et de leur apport à notre bien-être.

Pour mener à bien ces actions, l'Académie des technologies formule six recommandations fortes :

1. Lancer un programme majeur, interministériel, destiné à doter le tissu de recherches français d'une organisation et de moyens propres à assurer au pays une position de premier plan dans le domaine des nanotechnologies et de leur mise en œuvre au plan industriel.
2. Lancer un plan d'équipements des universités et des établissements d'enseignement supérieur en équipements mi-lourds pour les nanotechnologies.
3. Attribuer les crédits pour les projets et les infrastructures sur une base compétitive et contractuelle ; affecter une part significative des crédits contractuels au financement de projets ouverts (c'est-à-dire avec un objectif à l'initiative des proposants), de manière à bénéficier de l'inventivité des acteurs de la recherche et de la technologie ; faire de la valorisation un critère d'attribution des infrastructures (en particulier pour favoriser l'émergence et mettre en place des procédures d'accueil pour les jeunes pousses).
4. Créer une structure chargée de coordonner l'initiative nanosciences/nanotechnologies, et d'organiser une réflexion stratégique sur les objectifs à poursuivre ; évaluer régulièrement l'action de cette structure et de ses procédures.
5. Impliquer les industriels dans l'élaboration des objectifs stratégiques et dans leur actualisation.
6. Favoriser les regroupements d'équipes interdisciplinaires et inter-organismes au sein d'instituts fédératifs, dotés de crédits spécifiques et identifiables par des partenaires industriels ; favoriser la création de groupements entre organismes et partenaires locaux pour gérer des infrastructures pour la nanotechnologie et leur personnel technique.

1. Introduction : Que sont les nanotechnologies ?

Il s'agit de l'ensemble des savoir-faire qui permettent de travailler à l'échelle moléculaire pour organiser la matière, brique par brique, jusqu'à l'échelle macroscopique.

La maîtrise de tels savoir-faire ouvre la porte à de nombreuses réalisations (matériaux, systèmes, ...) dont les propriétés sont nettement améliorées par rapport à l'état de l'art actuel, voir totalement nouvelles. Mais il y a loin du potentiel à la réalisation, et disposer de briques de base ne suffit pas à maîtriser l'assemblage et les architectures cruciales pour disposer d'un produit utilisable et performant.

De nouveaux procédés sont donc recherchés, allant de la fabrication de *briques de base* à l'échelle moléculaire jusqu'à leur intégration dans des *architectures* ou *environnements* complexes en vue d'*applications*. Deux démarches existent pour identifier les axes d'effort permettant de maîtriser ces procédés. La première est une approche horizontale qui renouvelle chaque domaine technique (technologies de l'information et de la communication, biotechnologies, matériaux, mécanique et nanosystèmes, métrologie, chimie), où les spécialistes d'un domaine essaient d'affiner des technologies existantes ou d'inventer de nouveaux concepts pour bâtir des outils ou des dispositifs spécifiques à leur champ de compétences. A côté de cette approche horizontale, il existe aussi des approches verticales où le moteur de l'innovation est un domaine d'applications (aéronautique/espace/transports, énergie, environnement, santé), dans ses points durs en particulier. Cette deuxième approche élabore des composants ou des systèmes en vue d'applications spécifiques, le plus souvent complexes, et nécessitant une approche interdisciplinaire pour parvenir à l'objectif recherché. Que l'approche soit verticale ou horizontale, les nanotechnologies permettent d'attaquer des points durs inaccessibles aux capacités techniques actuelles.

2. Les enjeux des nanotechnologies

2.1. Le renouvellement des domaines techniques

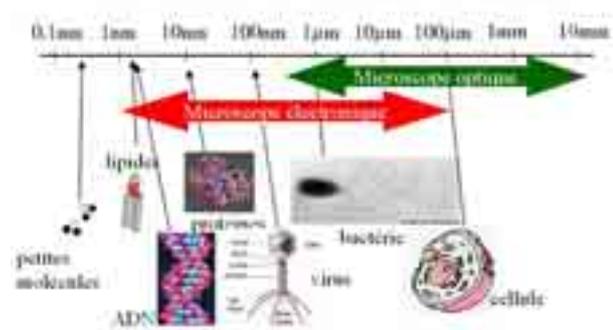
Il est toujours difficile de cerner avec une quelconque exactitude l'impact d'un domaine émergent. Bien souvent, l'impact essentiel se produit dans des domaines d'activités nouveaux, et non pas par remplacement de technologies existantes grâce à une amélioration de performances. L'exemple du transistor vient bien sûr à l'esprit : il était destiné à remplacer les relais et les tubes à vide dans les centraux téléphoniques, sans que ses promoteurs aient envisagé à un quelconque instant des révolutions aussi profondes que celles de la microélectronique, encore moins celle de l'internet.

Jusqu'à présent, plusieurs innovations issues de nanotechnologies ont eu un tel impact dans quelques domaines d'application. Ce sont principalement des objets individuels, comme la diode laser à puits quantiques ou le transistor à grande mobilité, qui, parce qu'ils permettaient de résoudre un point dur dans une application donnée, ont très rapidement connu un développement considérable dans le grand public, et parfois changé les acteurs économiques dominant un marché. Quelques exemples pris dans le domaine des technologies de l'information et de la communication sont brièvement mentionnés à la partie 2.4.



Laser à puits quantique : ce dispositif, dont le cœur est constitué d'un agencement de couches de semi-conducteurs de quelques nanomètres, a permis la mise au point des dispositifs de lecture et d'enregistrement numérique pour le grand public.

La cellule: un monde entre micromètre et nanomètre



La cellule est un objet microscopique bâti à partir d'éléments nanométriques assemblés suivant une hiérarchie élaborée. La complexité de cette architecture lui confère des propriétés d'adaptation bien supérieures à celles des objets bâtis avec une architecture classique. Les chercheurs travaillent à l'élaboration d'objets en tentant de copier cette organisation : c'est l'approche biomimétique, qui commence à se répandre en science des matériaux ou en microélectronique.

Ces innovations à court terme exploitent en général des propriétés ou des phénomènes nouveaux qui apparaissent lorsque la maîtrise de la technique permet de réduire les dimensions des objets fabriqués (comme en microélectronique) ou de mieux contrôler la structure des produits fabriqués (comme pour les matériaux structuraux). Des perspectives plus ambitieuses existent, notamment celles d'élaborer des systèmes complexes reposant entièrement sur une architecture maîtrisée à l'échelle nanométrique, à l'image de l'organisation des systèmes biologiques. Une telle architecture ne permettrait pas seulement une amélioration des performances, mais un bouleversement dans les capacités des systèmes pour assurer des fonctions complexes, avec une efficacité bien supérieure à celle des architectures conventionnelles. Ces espoirs suscitent une activité de recherche intense au niveau mondial, par exemple dans le domaine des machines moléculaires ou des dispositifs biomimétiques, mais les mises en œuvre de tels concepts ne semblent envisageables qu'à long terme.

2.2. Définition et distinction entre nanotechnologies et nanosciences

Littéralement, les *nanotechnologies* constituent un champ de recherches et de développements technologiques impliquant la fabrication de structures, de dispositifs et de systèmes à partir de procédés permettant de *structurer la matière* au niveau atomique, moléculaire ou supra moléculaire, à des *échelles caractéristiques* comprises approximativement entre 1 et 100 nanomètres.

Pour autant, les nanotechnologies ne sont pas une simple étape vers la miniaturisation : elles se caractérisent souvent par la mise en œuvre au sein des dispositifs de *nouvelles lois de comportement* qui émergent et dominent le fonctionnement de l'objet produit. Cette discontinuité dans les principes de fonctionnement est une conséquence directe de l'échelle nanométrique à laquelle la matière est organisée, échelle à laquelle les dispositifs conventionnels connaissent souvent (et pour des raisons variées) des longueurs critiques en deçà desquelles leurs modes de fonctionnement et leurs performances deviennent caduques. Les nouveaux comportements qui interviennent à l'échelle nanométrique font intervenir des effets quantiques, des effets de confinement, l'importance des surfaces

d'échanges, la prédominance de rapports surface/volume ou d'autres effets ou phénomènes mésoscopiques. Ils résultent aussi souvent d'une *hiérarchie d'architectures*, à l'image de beaucoup de processus rencontrés dans les êtres vivants.

En raison de l'apparition de ces comportements nouveaux, les nanotechnologies *suscitent et utilisent* le développement de champs scientifiques nouveaux qui explorent les phénomènes qui apparaissent à l'échelle nanométrique. Ce sont les *nanosciences*. Nanosciences et nanotechnologies s'intéressent donc à la même échelle, et par conséquent partagent et développent des *outils communs*. Elles n'en ont pas moins des *finalités distinctes*. Les nanosciences requièrent la manipulation et le contrôle de la matière –éventuellement jusqu'au niveau atomique– et élaborent des *objets de laboratoire* permettant la mise en évidence et l'étude de *phénomènes* nouveaux. Les nanotechnologies visent à formaliser des *concepts* et des *savoir-faire* permettant d'élaborer des matériaux ou des systèmes dont la fonctionnalité répond à un besoin particulier, en vue d'une application identifiée. Elles se préoccupent des procédés de mise en œuvre pour la *fabrication de masse*, et de *l'impact* qu'aura le produit développé sur le marché. Il en découle que les enjeux, le mode d'organisation de la recherche, le rôle de l'état et des autres acteurs seront différents entre nanosciences et nanotechnologies.¹

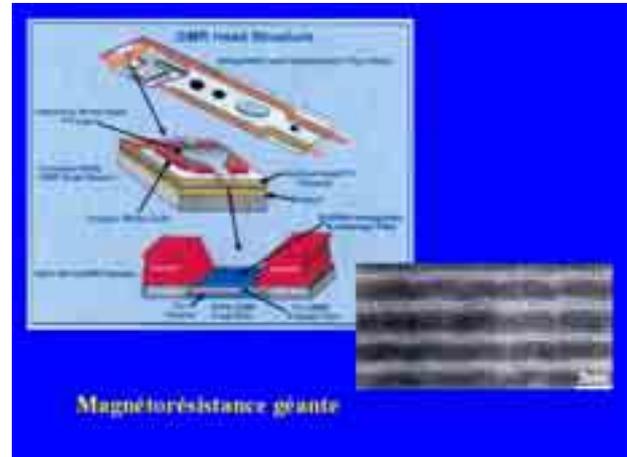
Plusieurs approches scientifiques et techniques permettent de concevoir et de fabriquer des matériaux, des dispositifs ou des systèmes présentant les comportements nouveaux recherchés. Schématiquement, on peut distinguer l'approche privilégiant la *miniaturisation des procédés* de micro fabrication déjà développés (approche dite de « haut en bas » ou « top-down »), et celle privilégiant la mise au point de *techniques d'assemblage* à l'échelle atomique ou moléculaire pour structurer la matière à partir de blocs constitutifs (approche dite de « bas en haut » ou « bottom-up »). Quel que soit le cas de figure, les nanotechnologies impliquent l'incorporation de ces structures à l'échelle nanométrique au sein de matériaux, de composants, de systèmes ou d'architectures plus ou moins complexes pour les amener à l'échelle des objets de tous les jours, dont les fonctions ou les propriétés

¹ Cette distinction entre sciences et technologies est essentielle car elle permet de toucher du doigt un des phénomènes très préoccupant mis en évidence par les indicateurs récents de la recherche et de la technologie, tels ceux produits par l'Observatoire de la Science et de la Technologie (OST, 2002), la National Science Foundation aux États-Unis, ou l'OCDE. Dans les 15 dernières années, la part de l'Europe dans les publications scientifiques mondiales a augmenté, passant de 29,8% à 33,9%, alors que les États Unis passaient de 36,3% à 30,5%. Par contre, en ce qui concerne les brevets européens, la part américaine est passée de 28,7% à 32,1%, alors que l'Europe rétrograde de 50,1% à 42,6%. La tendance est la même sur les brevets américains. Pour la France, les tendances en publications et brevets sont encore plus marquées ! Les fournisseurs de ces statistiques n'expliquent pas ces tendances. Toutefois, il est vraisemblable que l'augmentation des publications européennes ne reflète pas une augmentation relative des budgets, mais plutôt une augmentation de la productivité par chercheur : à l'instar de leurs homologues américains, les chercheurs européens se sont mis à publier abondamment. L'évolution du nombre des brevets est associée à un changement dans l'origine des brevets, en particulier ceux portant sur des technologies émergentes. Jusqu'aux années 80, une grande partie des brevets était déposée par les grands laboratoires de recherche industriels (Bell labs, General Electric, IBM, Xerox, etc. aux États Unis, Alcatel, Thomson, GEC, Marconi, Siemens, Philips, etc. en Europe). Ces laboratoires ont fondu, et ce sont aux États Unis de nouveaux acteurs qui ont pris la relève : les universités (déjà 5 % de tous les brevets américains en 1998) et les jeunes pousses (« start ups »). Pour ces dernières, la propriété intellectuelle est l'arme essentielle pour exister face aux industriels établis, et la prise de brevet est une question de vie ou de mort. Ces deux composantes sont très inférieures en Europe, en particulier du fait du manque de recherche en technologie dans les institutions de recherche, et du manque de création de jeunes pousses, phénomène pas complètement indépendant du précédent. Les nanosciences et nanotechnologies sont au cœur de ce problème, et on y trouve les ingrédients fortifiant cette explication : la recherche en nanosciences est plutôt bien partie, manquent la recherche en nanotechnologies et les jeunes pousses.

découlent directement de la structuration ou de l'agencement réalisés à l'échelle nanométrique.

2.3. La situation actuelle des nanotechnologies

Il est clair que les nanotechnologies n'en sont encore qu'à leurs prémises et n'ont pas atteint un stade de développement avancé dans la plupart des domaines. Leur *impact* sera immense ; il est *déjà mesurable* dans certains domaines, et les développements anticipés ont d'ores et déjà une *base réelle*. Ainsi, les dispositifs à multicouches métalliques exploitant l'effet de « MagnétoRésistance Géante » (MRG) ont eu un impact spectaculaire sur les performances des disques magnétiques commercialisés à partir du milieu des années 1990 pour le stockage de l'information. Ces couches se présentent sous la forme d'un sandwich métallique, dont l'épaisseur totale n'excède pas quelques dizaines de nanomètres et dont le cœur, contrôlé à la couche atomique près, a une épaisseur d'un à deux nanomètres. Plus de dix ans auparavant, l'avènement industriel des lasers à puits quantiques (des structures constituées d'une superposition de couches semi-conductrices de quelques nanomètres contrôlées au plan atomique près) avait permis la popularisation de l'enregistrement audio numérique au sein du grand public, et le développement spectaculaire des télécommunications par fibre optique.



L'incorporation d'un dispositif à magnétoRésistance géante dans les têtes de lecture des disques durs a accéléré la progression de la densité d'enregistrement magnétique de manière spectaculaire. Les couches des matériaux constituant le composant actif ont une épaisseur de quelques atomes seulement.

Un autre exemple de produit pionnier est celui des catalyseurs nanostructurés, qui ont révolutionné la catalyse et dont la mise sur le marché depuis 40 ans a eu un impact considérable en pétrochimie.

Ces percées, ainsi que l'analyse et la compréhension de nombreux systèmes biologiques dont le fonctionnement repose sur une organisation adaptée à l'échelle nanométrique, ont stimulé l'imagination des chercheurs et ingénieurs, et fait émerger de nombreux *objectifs technologiques* à base de nano objets dans la quasi-totalité des domaines d'application : les matériaux et la fabrication, les technologies de l'information, la santé, l'environnement et l'énergie, la chimie, l'aéronautique et les transports, l'agriculture, la défense. Il y a une vingtaine d'années ou plus, certaines de ces applications avaient déjà été envisagées par plusieurs personnalités « visionnaires ». Ces objectifs ont acquis une *crédibilité nouvelle* en raison du développement extraordinaire des nanosciences, permettant l'élaboration, la manipulation et l'étude de *nouveaux objets* nanométriques (assemblages moléculaires, agrégats, nanocristaux, nanotubes, etc.). Ces éléments sont appelés à devenir les briques de base de futurs produits, grâce à de *nouvelles techniques* de caractérisation et de manipulation à l'échelle nanométrique (en particulier à l'aide des microscopies en champ proche qui peuvent atteindre une résolution sub-atomique). Ils impliquent aussi le développement de *capacités de modélisation* et de techniques de *micro fabrication*.

Finalement, on peut remarquer que l'expérience du développement des produits déjà aboutis démontre qu'il ne faut pas s'effrayer de la subtilité, de la complexité, et du niveau de contrôle nécessaires pour aboutir à la réalisation des produits qui constituent les objectifs de la nanotechnologie. La sophistication des outils actuels et les progrès constants auxquels on assiste tant dans les domaines scientifiques que technologiques démontrent que ces objectifs sont *réalistes*, et que lorsque les systèmes développés seront produits en masse, ils pourront l'être à faible coût.

Il faut cependant raison garder : suivant les cas, la mise en œuvre peut venir très vite, comme lorsque l'application fait appel à des composants individuels (cf. les têtes à MRG, les lasers à puits quantiques) ou bien nécessiter des développements lourds, où de nombreuses étapes sont critiques (cf. l'électronique moléculaire pour le traitement universel de l'information).

2.4. Quelques domaines d'importance des nanotechnologies

Pour apprécier la diversité des manières dont les points durs sont abordés dans les différents domaines techniques, nous allons détailler d'abord quelques exemples pris dans le domaine des technologies de l'information et de la communication, et qui permettront de voir quelles sont les différentes façons dont les nanotechnologies peuvent avoir un impact profond sur des domaines techniques entiers. Nous présenterons ensuite plus rapidement quelques exemples empruntés à d'autres domaines.

2.4.1 Les nanotechnologies de l'information et de la communication

Dans ce domaine, les chercheurs et les ingénieurs ont forgé les nanotechnologies suivant trois grandes approches. La première consiste à diminuer de plus en plus les dimensions des objets fabriqués : c'est le cas des transistors dont on poursuit la réduction des dimensions caractéristiques jusqu'à atteindre –pour des prototypes– des largeurs de grilles de commande de l'ordre de 20 nm. La deuxième solution consiste à tenter de mettre en place des assemblages hiérarchiques d'objets nanoscopiques présentant des propriétés remarquables, comme les nanotubes de carbone. Il faut alors tenter de pousser ces assemblages jusqu'à l'échelle macroscopique. La dernière solution consiste enfin à exploiter les propriétés de phénomènes nouveaux qui apparaissent à l'échelle nanométrique, comme cela a été le cas pour les lasers à semi-conducteurs.

La miniaturisation

En ce qui concerne la première approche (le « top-down »), l'état de l'art est déjà remarquable. Un circuit électronique actuel intègre déjà plus de 100 millions de transistors et on fabrique en parallèle quelques dizaines de ces circuits sur la même plaquette de silicium. Les extrapolations de la « roadmap » pour les mémoires laissent entrevoir des densités d'intégration 1000 fois supérieures dans les 15 prochaines années. Les mêmes tendances sont extrapolées pour les autres composants.

L'ensemble de la topologie des circuits est rendue critique par cette baisse continue des dimensions, en particulier pour l'intégrité des interconnexions sur un même circuit. Du coup, au delà des dimensions des circuits eux-mêmes, c'est *l'ensemble de la chaîne de fabrication* qui devient une technologie nanométrique. C'est ainsi que les machines de lithographie optique actuelles, les « steppers », ont une précision mécanique de positionnement de l'ordre de 8 nm, et ce pour des plaquettes de silicium de 300 mm de diamètre. La poursuite

de la miniaturisation au rythme actuel pose des problèmes pour lesquels, à l'horizon de cinq ans environ, on n'entrevoit pas de solution. Cela impliquera des changements d'architecture et/ou l'introduction de procédés nouveaux.

L'électronique moléculaire

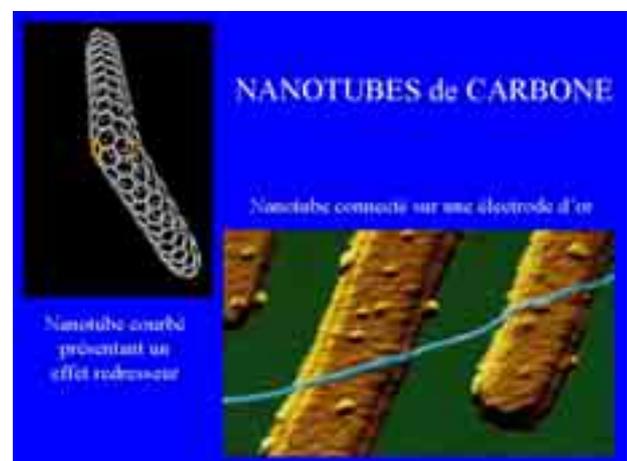
Malgré ses succès ininterrompus, la miniaturisation a donc des limites, puisque l'on sculpte dans un grand volume de matière des motifs de plus en plus petits, avec des difficultés croissantes et des investissements de plus en plus lourds. Il faut à terme repenser complètement le paradigme de la micro fabrication, et on tente maintenant d'aborder le problème de façon inverse en fabriquant des molécules ayant des fonctionnalités électroniques à l'échelle de la molécule unique, telles que effet redresseur ou transistor (approche « bottom up »). La taille en est bien évidemment très réduite, sans doute proche des limites ultimes, et la reproductibilité vient de l'excellente sélectivité de la réaction de synthèse chimique.

Les années récentes ont vu des progrès remarquables. Par exemple, de nombreux systèmes chimiques possèdent un caractère redresseur, en particulier les nanotubes de carbone coudés dans lesquels les chiralités différentes des demi tubes font que l'un possède un caractère métallique et l'autre un caractère semi-conducteur. Ainsi, après avoir mis en évidence le premier effet transistor sur des nanotubes en 1999, une équipe d'IBM a démontré qu'il était possible de réaliser une porte inverseur en 2001 grâce à un dopage sélectif de deux régions d'un nanotube. Même si les principes de base semblent maintenant établis, il reste d'immenses défis à résoudre avant que l'électronique moléculaire devienne une réalité. Par exemple, le positionnement de molécules sur des électrodes et l'établissement d'un contact électrique sont des problèmes globalement mal maîtrisés. Pour passer à des systèmes permettant le traitement de l'information, il faudra pourtant aller bien plus loin :

avoir des contacts électriques entre molécules fiables et reproductibles, élaborer des architectures stables dans le temps, que l'on pourra fabriquer avec un taux de défauts acceptable, mettre au point des systèmes de corrections d'erreur, définir les circuits d'entrée/sortie, etc.

L'exploitation des phénomènes nouveaux

La troisième approche des nanotechnologies pour le traitement de l'information et des communications repose sur l'exploitation des nouveaux effets apparaissant lorsque l'on diminue les dimensions. Ces nouveaux effets permettent une accélération sensible des performances des systèmes lorsque les dispositifs les exploitant s'intègrent naturellement, en tant qu'objets individuels, dans la chaîne de l'information et permettent de s'affranchir des points durs déterminant les performances.



Les nanotubes de carbone sont des objets nanométriques nouveaux. Le contrôle précis de leur structure atomique leur confère des propriétés variées que l'on apprend à maîtriser. En revanche, leur connexion à des électrodes isolées reste un tour de force qui rend difficile l'élaboration d'une architecture complexe.

Cela a été le cas, par exemple, pour les transistors à gaz d'électrons bidimensionnels apparus au début des années 80 chez Thomson–CSF et chez Fujitsu. Lorsque l'épaisseur des couches semi-conductrices devient inférieure à 20 nm, le mouvement des électrons perpendiculairement à la couche est quantifié. L'électron a perdu un de ses trois degrés de liberté et se meut dans le plan des couches : son mouvement est devenu bidimensionnel. Les excellentes propriétés électriques des transistors utilisant cette propriété font qu'ils ont un bruit propre très faible, et qu'ils peuvent donc amplifier des signaux bien plus faibles que les autres types de transistors. Pour cette raison, ces transistors ont mené à une véritable révolution de la diffusion directe de la télévision par satellite : avant, l'émission nécessitait des satellites de forte puissance, relativement lourds, et des antennes de réception de grandes dimensions, typiquement 2 m de diamètre. Avec ces transistors, des antennes de 60 cm et des satellites légers suffisent. Du coup, ce ne sont plus les opérateurs de télécommunications qui contrôlent les satellites, mais les diffuseurs, et chacun peut viser son satellite préféré à partir de son balcon.

2.4.2 Les nanobiotechnologies

Dans le domaine biologique, tout se passe à l'échelle nanométrique, et les systèmes vivants mettent en œuvre des fonctions dont les détails nous échappent souvent, mais que l'on souhaiterait réaliser (par exemple la photosynthèse). Le vivant est donc à la fois un domaine d'application immense des nanotechnologies, puisqu'elles travaillent à la bonne dimension pour s'insérer dans les systèmes, mais aussi une grande source d'inspiration. Grâce aux briques de base que sont le code génétique et les protéines, la cellule (à une échelle de l'ordre du micromètre) possède un système d'architecture et d'organisation de la matière que l'on cherche à imiter. Actuellement, on n'en est qu'aux prémices, mais quelques réalisations de laboratoire montrent déjà le potentiel des nanotechnologies. On sait par exemple organiser la matière en utilisant les propriétés spécifiques du support du code génétique, l'acide désoxyribonucléique. Les liaisons chimiques entre les paires de base constituant l'ADN sont très sélectives : on peut les utiliser pour associer deux à deux des éléments portant chacun un brin d'ADN synthétique complémentaire. On peut ainsi entrevoir la possibilité d'une synthèse chimique organisée à l'échelle moléculaire, et ce à une grande échelle, sorte de « lithographie » moléculaire.

Des phénomènes similaires permettent aussi d'espérer des systèmes de tri chimique moléculaire, par exemple. Plus important encore, ces techniques vont ouvrir la voie à des thérapies extrêmement ciblées, dans lesquelles le médicament est dirigé vers son organe « cible » par l'affinité sélective entre les brins d'ADN, véritables détecteurs de la cible.

Dans le domaine du diagnostic, on cherche aussi à augmenter la sensibilité des biopuces actuelles vers la détection d'un brin unique, en augmentant le signal émis lors de sa reconnaissance : une voie possible est le blocage ou non d'un canal membranaire lors de l'accrochage.



Les chercheurs « copient » actuellement des systèmes biologiques pour réaliser des nanomoteurs moléculaires en immobilisant des enzymes à la surface de solides.

Dans une approche biomimétique, une équipe américaine de l'université de Cornell a fabriqué un moteur moléculaire en fixant une enzyme (l'adénosine triphosphatase) sur un support de nickel et en fixant à l'extrémité de l'enzyme un petit morceau de nickel ; lorsque le milieu est alimenté en adénosine triphosphate, l'enzyme se met à tourner, transformant le petit morceau de nickel en une nanohélice en mouvement. L'objectif à long terme est de disposer de moteurs biocompatibles, capables d'effectuer des opérations d'intérêt médical, par exemple en transportant des médicaments ou en réparant des tissus.

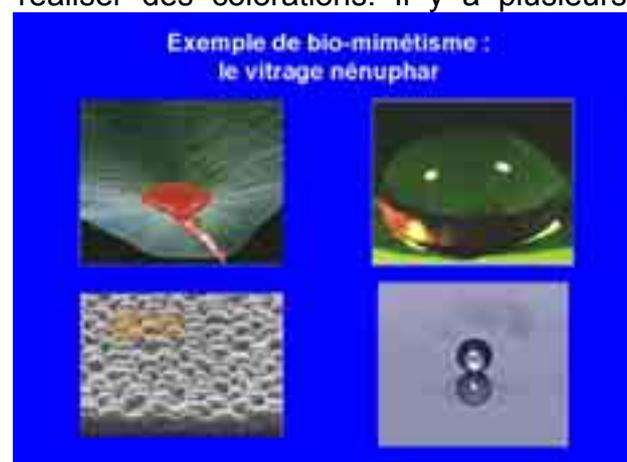
2.4.3 Les nanomatériaux

Dans les matériaux très finement divisés, les propriétés macroscopiques, en particulier mécaniques, changent beaucoup en raison du rôle des interfaces, omniprésentes. Dans les céramiques nanostructurées, les dislocations (à l'origine de la fragilité du matériau) restent bloquées aux interfaces et ne peuvent plus se propager, ce qui rend le matériau ductile, plus résistant, et tolérant aux défauts de fabrication. Cet exemple illustre une propriété rencontrée fréquemment lorsqu'on aborde le domaine nanométrique : les *lois de comportement* macroscopiques changent, même si les *lois physiques microscopiques* restent les mêmes.

La structuration des matériaux à l'échelle nanométrique a aussi de nombreuses applications dans le domaine de l'optique, en particulier pour obtenir des matériaux d'indice faible. L'optique ondulatoire nous apprend qu'en déposant une couche mince d'un matériau d'indice faible sur du verre, on annule la réflexion du dioptre air/verre. Malheureusement, il n'y a pas facilement de matériau d'indice suffisamment faible. Un matériau structuré à une échelle inférieure à la longueur d'onde de la lumière, donc nanostructuré, remplit parfaitement la fonction car il se comporte comme un matériau ayant un indice moyen entre l'air et le verre, en proportion des deux constituants. L'inclusion de vide au sein du matériau fait baisser son indice de réfraction, et la structuration à une échelle suffisamment petite devant la longueur d'onde de la lumière permet de conserver des propriétés diélectriques homogènes dans le domaine optique. Ce principe est utilisé pour réaliser des vitrages anti-réfléchissants.

Depuis longtemps, de nombreux procédés utilisent, de façon plus ou moins empirique, une structuration nanométrique de la matière pour réaliser des colorations. Il y a plusieurs siècles, les mayas ont ainsi créé une couleur bleue très pérenne (puisqu'elle est parvenue jusqu'à nous) en protégeant de l'indigo par inclusion dans des feuillettes de silicate, et en incorporant des nanosphères d'oxyde de fer (de couleur bleue également) dans leurs pigments. De même, depuis l'Égypte antique jusqu'aux designers modernes, on colore le verre en incorporant en son sein des nanocristaux métalliques.

La modification d'un matériau à l'échelle nanométrique peut aussi lui donner de nouvelles propriétés. Ainsi, le dépôt à la surface d'un vitrage de grains nanométriques d'oxyde de titane confèrent



En imitant la microstructure de la feuille de nénuphar, sur laquelle l'eau glisse sans la mouiller, les chercheurs ont structuré la surface du verre à l'échelle de 100 nm et ont conçu un vitrage extrêmement hydrophobe.

à l'ensemble des propriétés photocatalytiques qui lui permettent de dégrader les graisses sous l'action du rayonnement solaire, et d'obtenir un vitrage autonettoyant. De même, la structuration de la surface d'un vitrage à l'échelle nanométrique peut le rendre extrêmement hydrophobe (plus que n'importe quelle modification chimique), ce qui permet d'envisager la réalisation de pare-brises de véhicules ne nécessitant pas d'essuie-glaces.

2.4.4 La nanométrie

Les nanotechnologies sont d'ores et déjà présentes dans un très grand nombre de domaines d'activité. Dans l'application de toute technologie, à un certain moment, on a besoin d'effectuer des mesures. Les produits issus des nanotechnologies ne font pas exception. La nanométrie, discipline nouvelle, représente l'ensemble des actions à mener, dans le domaine des mesures relatives à des éléments de dimensions inférieures au micromètre, pour assurer la conformité des mesures avec des références nationales et internationales reconnues.

Parce qu'ils conçoivent et fabriquent des micro-systèmes, ou parce qu'ils les intègrent dans des macro-systèmes, les industries de la micro-électronique, de l'optique, de la micro-mécanique, de la chimie, de la biologie, etc., utilisent aujourd'hui, et vont utiliser à grande échelle dans les années à venir, des instruments de mesure et de contrôle de très haute définition. De façon très majoritaire, il s'agira de mesurer et de contrôler les dimensions, la forme, les qualités de surface de nanostructures (nanopoints, nanofils, nanotubes, nanosurfaces) et de s'assurer que les produits fabriqués ou acquis ont des propriétés voulues et répétitives. Il s'agira donc en premier lieu, de mesures dimensionnelles incluant souvent la reconnaissance des formes. Mais dans l'avenir, on prévoit et prépare des instruments permettant aussi de mesurer de très faibles masses ou forces, des nombres d'électrons, ou des mouvements de fluides à l'échelle nanométrique, ou encore de caractériser physiquement des matériaux.

À l'heure actuelle, on dispose essentiellement des instruments de visualisation : les microscopes à champ proche, les microscopes à force atomique, les microscopes à balayage électroniques ou à effet tunnel ou encore des microscopes optiques à fente ou avec des systèmes de vision CCD. Il existe aussi des palpeurs utilisés pour décrire les accidents perpendiculaires à la direction de visée. Dans le domaine électrique, c'est l'effet tunnel monoélectron qui permet des déterminations les plus fines des charges et des nanocourants. Des travaux sont en cours pour accroître la diversité des senseurs sélectifs chimiques, biologiques, électromagnétiques, etc., et aussi pour mesurer des très petites forces. Dans tous les cas, il faudra que ces divers instruments soient étalonnés et fréquemment vérifiés, ce qui nécessitera le développement d'étalons.

2.5. Les enjeux dans les grands domaines d'application

Illustrons aussi par quelques exemples l'impact que peuvent avoir les nanotechnologies dans une approche verticale, pour surmonter des points durs d'un système complexe, en vue d'une application donnée.

2.5.1 L'énergie

Les nanotechnologies peuvent contribuer de plusieurs façons aux grands enjeux dans le domaine de l'énergie. Ainsi, par exemple, on a déjà montré que l'on pouvait concevoir des cellules solaires à très bas coût à partir de nanosphères d'oxyde de titane sur lesquelles on

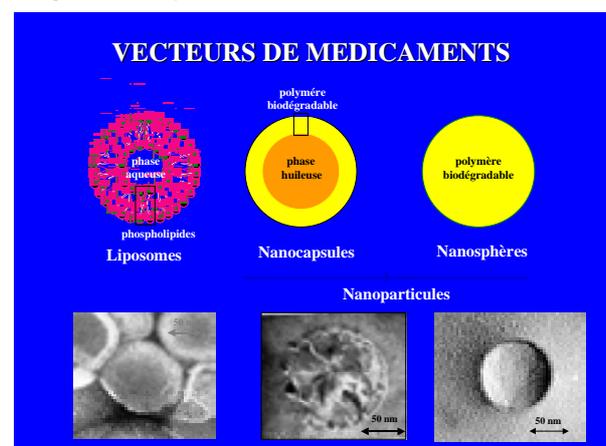
fixe des molécules de colorant. Même si les rendements des réalisations actuelles n'atteignent pas encore ceux des cellules photovoltaïques cristallines, le principe de telles cellules apparaît très séduisant et prometteur, en réalisant une « peinture » photovoltaïque permettant la réalisation de capteurs de grande surface à bas coût. Ce matériau étant très divisé, il échappe aux contraintes de qualité nécessaires pour les matériaux photovoltaïques habituels, qu'ils soient monocristallins, polycristallins ou amorphes.

Un autre domaine dans lequel les nanotechnologies pourraient avoir un impact est celui de l'utilisation rationnelle de l'énergie, comme pour l'éclairage, poste qui représente 10 à 20% de la consommation énergétique des pays industrialisés. Remplacer les lampes à incandescence classiques par des dispositifs électroluminescents à haut rendement constitue donc un enjeu immense. Pour y parvenir, on espère, entre autres, progresser en nanostructurant les matériaux (à l'échelle de la longueur d'onde dans le milieu, typiquement 200 nm) comme cela a déjà été évoqué pour les applications aux télécommunications. On espère ainsi contrôler l'émission de lumière, en la canalisant dans un seul mode optique. Par ces techniques d'extraction de la lumière, on obtiendrait des émetteurs de lumière à très haut rendement quantique, capables de dépasser les lampes à incandescence, pour une complexité bien moindre que celle des lasers. Aux États-Unis, un grand programme est lancé sur l'éclairage par diodes électroluminescentes. Il comporte des volets sur l'obtention de matériaux couvrant toutes les gammes spectrales (que ce soit à base de semi-conducteurs ou de polymères), et sur les techniques d'extraction de la lumière.

Il existe de nombreux domaines où les nanotechnologies vont permettre de dépasser les blocages actuels. Un exemple récent illustre cette perspective : dans les piles à combustible, les électrodes sont un élément critique. Précisément, les chercheurs de NEC au Japon ont obtenu d'excellentes piles avec des électrodes en nanotubes de carbone. L'amélioration par rapport aux électrodes en graphite activé vient de la grande surface développée et de la porosité des électrodes.

2.5.2 La santé

Des percées majeures sont espérées à l'aide des nanotechnologies, par exemple dans le domaine de la vectorisation des médicaments. En utilisant la technique « d'opsonisation », on peut diriger sélectivement des nanoparticules injectées par voie intraveineuse vers le foie. En effet, grâce à leur faible taille, les nanoparticules sont a priori libres de se mouvoir dans tous les organes ; mais elles sont rapidement reconnues comme « corps étrangers » par l'organisme (via la fixation à leur surface de protéines spécifiques). Une fois reconnues, ces particules sont orientées rapidement et sélectivement vers les cellules macrophages du foie. Si ces nanoparticules sont porteuses de molécules actives pour, par exemple, traiter des tumeurs du foie, on peut ainsi acheminer in situ des charges médicamenteuses plus importantes que si on avait dû les diluer dans tout



Des nano-objets peuvent être utilisés comme vecteurs de médicaments pour des applications thérapeutiques. La modification de la surface de ces nanoparticules permet de relâcher sélectivement les médicaments vers les organes cibles.

l'organisme, et de plus préserver d'autres organes du contact de ces molécules qui peuvent être toxiques pour eux. En d'autres termes, on augmente les doses du principe actif dans les organes cibles et on se prémunit des effets secondaires indésirables sur les autres organes. Cette stratégie thérapeutique, actuellement en phase d'essai, a déjà donné des résultats spectaculaires sur les animaux. Elle ne se limite pas au traitement du foie, car en traitant la surface des nanoparticules pour empêcher l'adsorption des protéines qui les dirigent vers le foie, et en fixant au contraire un anticorps spécifique de l'organe cible que l'on souhaite traiter, on peut en principe atteindre n'importe quel organe de façon spécifique.

Un autre grand domaine prometteur est la synthèse de tissus biocompatibles. Ce besoin est à l'origine d'une très grande activité en synthèse nanométrique. En effet, on pense pouvoir insérer des nanomatériaux dans les tissus vivants après les avoir rendus biocompatibles par leur structure et leurs propriétés de surface, de façon à leur permettre de s'insérer dans l'architecture du vivant. On pourrait alors transmettre des fluides vers des endroits choisis, ou bien encore créer des substrats pour activer la régénération de cellules. On peut ainsi espérer sur le long terme réaliser des fonctions de reconstruction de tissus nerveux détruits, ou encore de régénération de la rétine.

2.6. Pour une approche fédératrice, à la fois nécessaire et porteuse de progrès

Il apparaît donc que les *révolutions* causées par les nanosciences et les nanotechnologies auront un impact considérable sur *l'ensemble de la société*. L'impact réel de cette révolution n'est pas encore mesurable, car comme dans de nombreux autres secteurs émergents, l'impact ne proviendra pas de l'amélioration de produits existants, mais bien de nouveaux marchés (que l'on songe aux rapports entre les marchés successifs des transistors, circuits intégrés, informatique personnelle et internet, à chaque fois imprévus, et porteurs de percées immenses). Mais il ne fait aucun doute qu'une *nouvelle ère* se dessine grâce aux nanotechnologies, dont les conséquences seront au moins comparables à celles des effets combinés des évolutions causées au vingtième siècle par le développement de la microélectronique (les Technologies de l'Information et de la Communication), des polymères (la révolution des « plastiques »), de l'imagerie médicale (on observe avant « d'ouvrir ») et de la conception assistée par ordinateur (la révolution des moyens d'étude et de prototypage dans l'industrie).

Dans la plupart des secteurs industriels, les avancées à l'échelle nanométrique apparaissent définir le niveau où se jouera la *compétition industrielle de demain*. C'est exactement la motivation qui a conduit un certain nombre de gouvernements, dont celui des États-Unis, à intervenir à un très haut niveau de financement. Dans ce contexte, chaque pays doit conduire *les évolutions nécessaires* afin d'acquérir une position qui lui permette de participer activement au *nouveau jeu économique* qui se mettra en place.

L'un des éléments clés pour le progrès des nanotechnologies consiste à pouvoir rassembler au sein de mêmes systèmes des éléments dont la fabrication, les propriétés ou le fonctionnement relèvent de *disciplines différentes*. Il apparaît ainsi essentiel de développer des structures efficaces *d'échanges* et de *coopération* entre scientifiques et ingénieurs spécialisés dans différents domaines (physique, chimie, biologie, mathématiques appliquées). Par ailleurs, il faudra orienter de *nombreux professionnels* vers les champs thématiques pertinents pour développer les fondements d'une industrie apte à tirer profit des potentiels créés par les nanotechnologies. De telles évolutions ne vont pas nécessairement de soi. La puissance publique devrait donc inciter les acteurs de la science et de la

technologie à s'organiser de manière adéquate pour préparer le futur, de façon à développer la connaissance et le potentiel humain requis par les nouveaux enjeux.

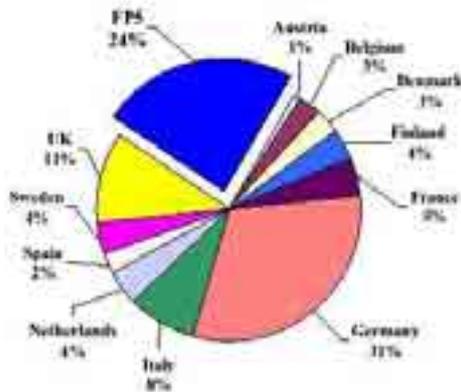
En particulier, les nanotechnologies amènent à redéfinir le positionnement des *universitaires* vis-à-vis de l'industrie. Dans certains domaines de pointe, la sophistication de plus en plus marquée des outils technologiques empêche désormais les centres technologiques universitaires d'avoir un impact direct sur les technologies de production industrielle –les industriels ne dépendent plus de la recherche universitaire pour faire progresser leurs filières–. Cette situation existe déjà en microélectronique où, même aux États-Unis, les sauts technologiques successifs sont conçus, programmés, développés et réalisés par les industriels eux-mêmes. C'est que la réalisation d'un circuit intégré moderne nécessite l'enchaînement parfait d'un millier d'opérations élémentaires délicates, possible dans un environnement stable et pérenne, impossible dans un environnement universitaire changeant. Les universitaires acquièrent alors un rôle double. Ils doivent *explorer* des champs nouveaux du savoir, *découvrir* de nouveaux phénomènes, *concevoir* de nouvelles architectures, *formaliser* des concepts qui permettront aux industriels de développer de nouvelles filières technologiques. Ils doivent par ailleurs mener un effort de *formation* afin de préparer les cadres scientifiques et techniques disposant des compétences nécessaires à l'exploitation et au développement des nanotechnologies. L'exemple de la microélectronique est peut-être un cas limite à cause de la complexité de fabrication des circuits intégrés, mais il n'en reste pas moins vrai que la sophistication actuelle des procédés industriels, même dans les industries dites traditionnelles, conduit à recentrer le rôle des institutions de recherche vers l'exploration et la découverte, la production de connaissances et de savoir faire. Bien entendu, dans cette nouvelle donne, pour assurer l'efficacité de la recherche technologique française, des points de rencontre sont à organiser entre universitaires et industriels (organes de définition et de pilotage des programmes, projets communs, séminaires communs, etc.). Pour les domaines plus « légers » ou nouveaux, le travail en commun ou la création de jeunes pousses (« start-up ») doivent être soutenus fortement.

2.7. Un défi pour la France

À la veille des mutations que l'avènement des nanotechnologies laisse entrevoir, la France doit s'interroger pour examiner les évolutions nécessaires pour affronter la *compétition internationale* dans les meilleures conditions. Des programmes de grande ampleur, spécifiques et dévolus aux nanotechnologies, ont été mis en place dans des pays comme les États-Unis, le Japon, le Canada, l'Allemagne, le Royaume-Uni, la Suède, la Suisse, tous pays où la recherche publique en technologies de pointe est déjà très active. De ce point de vue, au sein d'un environnement international caractérisé par des *investissements massifs*, l'effort français devrait être augmenté significativement pour que la France franchisse dans de bonnes conditions la prochaine révolution industrielle.

Des efforts ont certes été faits en France récemment, mais la situation française présente des *particularismes importants* par rapport aux pays de niveau comparable. Ces particularismes sont parfois un atout pour les évolutions. Par exemple, grâce à leur statut pérenne, les chercheurs français peuvent facilement prendre le risque d'explorer des thématiques nouvelles. Ainsi, dans les domaines des nanosciences, la recherche française est d'un *bon niveau*. En revanche, d'autres caractéristiques semblent plus préoccupantes pour réussir les adaptations nécessaires pour aborder les nanotechnologies. Ainsi, le tissu universitaire français manque d'*infrastructures pour la micro et la nano fabrication*, et la part de *recherche contractualisée* est très faible (en Europe, la France affiche le deuxième budget public de dépenses civiles en Recherche et Développement, mais possède le plus

bas taux de financement sur projet –un facteur trois au dessous de la moyenne européenne–, même après correction de la part salariale). C'est pourtant cette double organisation, la création d'infrastructures, puis la politique contractuelle, toutes deux sous forme compétitive, qui assure partout ailleurs à la fois la qualité des recherches et leur évolution. Ces deux particularités handicapent le développement en France des



Financement public sur contrats de la recherche civile en Europe (année 2000). La part française a été multipliée par 2,8 pour tenir compte des coûts salariaux. La part « FP5 » correspond aux financements attribués dans le cadre du 5^{ème} programme cadre européen (source : Koordinierungsstelle EG der Wissenschaftsorganisationen, avril 2002, pour la Commission Européenne). Le montant total des financements sur projets représente 11 172 M€.

nanotechnologies, car elles empêchent le développement du domaine dans les structures actuelles, et limitent les possibilités d'obtenir des financements –y compris européens– pour mener des projets de recherches dans ce domaine.

Il est primordial de faire en sorte que les équipes françaises ne se cantonnent pas dans l'étude des cas particuliers seuls accessibles par les moyens dont ils disposent. Il faut leur donner les *moyens technologiques* nécessaires pour la formulation et la validation de *nouveaux concepts, pertinents pour l'industrie*. En d'autres termes, il faut permettre à la recherche française de mener des travaux pertinents, de prendre sa part dans les *filières compétitives*, pour développer des activités de qualité, ayant un *impact* technologique.

Un autre phénomène spécifiquement français est la distribution des soutiens financiers aux doctorants, pour la plus grande part les allocations du ministère de la recherche. Alors que dans la plupart des pays les financements des thésards font partie des financements contractuels, en France ces financements sont remis aux instances éducatives (aujourd'hui les écoles doctorales). On se prive ainsi de la mise en phase des formations par la recherche avec les domaines les plus porteurs d'avenir, ou supposés tels puisque identifiés comme faisant l'objet de financement dédiés. Un des problèmes à résoudre dans une action d'ampleur en nanotechnologies sera d'attirer des thésards dans le domaine, malgré la pénurie des vocations scientifiques qui se dessine pour les années à venir.

2.8. Une occasion à saisir pour faire évoluer la recherche technologique française

Les nanotechnologies constituent un concept *fédérateur*, car elles s'adressent à de multiples domaines d'applications. De même, les nanosciences concernent peu ou prou l'ensemble des disciplines scientifiques. Un effort particulier dans le domaine des nanotechnologies offre donc la possibilité *de remodeler en profondeur* le paysage scientifique national. Bien conduit, il peut permettre la mise à niveau nécessaire des équipements, des redéploiements thématiques et humains, de nouveaux secteurs et modes d'interaction avec des industriels, une évolution des structures et des acteurs de la recherche. Cette occasion est *rare*, et elle existe pour un *temps limité*. Elle coïncide en effet avec l'émergence d'un domaine nouveau dont l'*impact* sera *profond*, et elle nécessite la mise en place d'une organisation spécifique pour gérer cet effort et les recompositions qui en découlent.

L'Académie des technologies considère qu'il serait souhaitable de conduire un *programme national spécifique et de grande ampleur* rassemblant les acteurs de la recherche et les industriels pour répondre aux enjeux des nanotechnologies. Pour réussir, cet effort devra d'abord mettre en place de *nouveaux moyens*, suivant une *organisation* qui rassemble et oriente les équipes de recherche des divers organismes et les partenaires industriels. Il s'agit de faire évoluer les structures actuelles pour être plus efficace. Des percées majeures peuvent être attendues de la confrontation de l'approche « top-down » (qui progresse sensiblement grâce aux industriels), et de l'approche « bottom-up » (explorée dans les laboratoires). Ces deux approches sont à la fois concurrentes (lorsqu'elles tentent par leurs méthodes respectives de réaliser la même fonction), et complémentaires (lorsqu'elles conjuguent leur spécificité en vue d'une application donnée). Un des objectifs d'un projet national de recherche doit donc être d'organiser la rencontre entre ces deux démarches. Dans ce contexte, l'analyse de la situation internationale suggère que la puissance publique soutienne les universités et le CNRS avec le souci d'obtenir un effet de levier maximum au plan économique : favoriser les jeunes pousses (« start-up »), créer des réseaux de savoir-faire identifiables par des partenaires industriels et en mesure de collaborer avec eux, constituer un vivier de cadres formés aux nanotechnologies et utilisables par les entreprises. Pour y parvenir, les programmes devront être accompagnés d'une *évaluation continue* des actions engagées.

De façon générale, l'effort devra s'attacher à dégager les moyens nécessaires pour irriguer le tissu scientifique et technique national, afin de tirer profit des capacités intellectuelles, de la créativité et de la vitalité réparties dans *l'ensemble de la communauté*. Il s'agit de promouvoir la *collaboration* entre scientifiques issus de différentes disciplines, la constitution d'équipes possédant une *masse critique* suffisante, en hommes et en moyens matériels, de manière à pouvoir s'orienter à l'échelle universitaire vers des études *pertinentes* en termes de retombées industrielles et d'impact sur la société et l'économie. Le développement d'activités dans le domaine des nanotechnologies au sein des universités doit par ailleurs apporter à celles-ci de nombreux avantages sous la forme d'*effets induits* : par exemple, la mise à niveau de leurs infrastructures doit permettre aux universités de se restructurer pour aborder de nouvelles thématiques accéder à de nouvelles sources de financement, et d'avoir les moyens de former efficacement les cadres scientifiques et techniques réclamés par l'industrie.

Comment doit être menée l'action ? D'une façon générale, il existe une variété d'approches aux domaines des nanotechnologies, nécessitée par les différences entre domaines, entre acteurs, etc. Cette *diversité*, source de richesses, est essentielle en termes d'impact : les nanotechnologies ont une pertinence pour de multiples domaines et sont associées à de nombreux phénomènes et concepts originaux. En retour, les modes d'intervention et d'organisation nécessaires aux nanotechnologies doivent pouvoir revêtir des formes diverses suivant les domaines ou les approches concernés. En d'autres termes, il n'y a pas de solution universelle qui réponde à l'ensemble des besoins. Il faut plutôt penser à des *structures souples* et des innovations de *procédures* qui permettent de s'adapter et de répondre à la diversité des objectifs et des approches.

3. Une variété de recherches

3.1. L'approche par domaines scientifiques

Schématiquement, l'approche de l'échelle nanométrique par domaine scientifique relève soit des nanosciences, soit d'une approche « de bas en haut ». L'approfondissement des connaissances dans un domaine scientifique donné a conduit beaucoup de chercheurs, en France comme ailleurs, à s'intéresser aux phénomènes nouveaux qui interviennent à l'échelle mésoscopique. Dans ce cadre, le chercheur essaie de faire une *découverte*. Il s'intéresse aux *phénomènes* nouveaux, et fait appel à son *inventivité*. Un exemple caractéristique est celui de la chimie : par essence, la chimie est une nanoscience, et ce depuis toujours ! Les chimistes synthétisent des objets à l'échelle du nanomètre –l'échelle des molécules–. Mais les phénomènes nouveaux –le domaine des nanosciences– sont maintenant recherchés par l'assemblage des molécules et la construction organisée d'édifices. Les nanosciences supposent ici le passage à des dimensions plus grandes que celles des simples molécules, la *complexification* des objets étudiés et la synthèse de nouveaux systèmes moléculaires. L'éclosion de nanotechnologies grâce à cette nouvelle nanochimie nécessite de passer à la *fonctionnalité* : la maîtrise de la *relation composition/architecture/ fonctionnalité* est essentielle, et nécessite la formation de projets ou d'équipes interdisciplinaires. Dans le même ordre d'idées, on pourrait également citer les manipulations de nano-objets –tels les nanotubes de carbone– qui constituent un champ de recherches très actif pour les physiciens des nanosciences. Au cours de la dernière décennie, ces objets sont devenus disponibles et synthétisables en grande quantité. Les physiciens cherchent maintenant à les manipuler et à les connecter électriquement en vue d'étudier leurs propriétés, et par la suite de réaliser des assemblages. Là encore, il s'agit de passer d'un objet isolé à un *objet intégré* dans son environnement ou au sein d'un système plus complexe. C'est seulement alors que l'on pourra parler d'une nanotechnologie à base de nanotubes.

En résumé, dans une approche par domaine scientifique, les nanosciences se consacrent prioritairement aux *procédés* d'élaboration des assemblages, ou aux *propriétés fondamentales* des objets nanométriques réalisés. Elles restent encore ouvertes sur un large champ d'applications potentielles, et ne se focalisent pas en vue de l'optimisation d'un système à une *fonctionnalité* donnée. Le passage à des nanotechnologies nécessite recherche de fonctionnalités, pluridisciplinarité, identification de pertinence, outils de validation, etc.

3.2. L'approche par domaines d'applications

L'approche du monde nanométrique à partir d'un domaine d'application relève généralement du champ des nanotechnologies. Il s'agit d'une démarche réalisée le plus souvent « du haut vers le bas », et qui suppose l'application connue. Elle démarre après avoir identifié des marchés correspondant à des *besoins* non satisfaits, et, par conséquent, la recherche de la *pertinence* est un élément obligatoire pour répondre à ces besoins. L'approche à partir de l'application va rechercher en priorité à obtenir une *fonction* déterminée à partir d'un assemblage d'éléments à l'échelle nanométrique. Un exemple caractéristique est celui de l'élaboration des lasers solides dans la technologie des semi-conducteurs. Le contrôle de la croissance des matériaux semi-conducteurs à la couche atomique près et l'exploration des propriétés fondamentales des hétérostructures ainsi obtenues ont permis aux scientifiques

et aux ingénieurs, à partir du milieu des années 1980, de développer une véritable « ingénierie de structure de bandes » permettant de décliner les propriétés de dispositifs en fonction de l'agencement des couches déposées dans la partie active du composant. Dans le domaine des lasers à semi-conducteurs, ce savoir-faire et le développement des outils correspondants ont permis l'optimisation des lasers existants –lasers à bas seuil– et l'invention de nouveaux composants –lasers « à cascade quantique » dans le domaine de l'infrarouge moyen–.

En somme, dans leur approche à partir des *défis* posés par les applications, pour exploiter les *possibilités* offertes par la nanotechnologie, les ingénieurs et les scientifiques cherchent à élaborer une *invention*. Pour cela, ils doivent définir des *concepts* à partir des phénomènes mis en évidence dans le cadre des nanosciences. Ils s'appuient sur la *modélisation* et développent des *outils*. De façon générale, ils cherchent à transférer ou exploiter des *phénomènes nouveaux* au sein de dispositifs ou de structures.

Comme déjà mentionné, cette approche par domaine d'application n'épuise pas le sujet, ne serait-ce que parce que les champs d'application de nouvelles technologies sont imprédictibles, même pour des inventions dont on croyait connaître le champ d'application. L'approche ouverte, non finalisée, est donc une composante essentielle d'une action de grande ampleur.

3.3. Les approches suivant les différents acteurs de la recherche

Dans le monde de la recherche publique, on peut distinguer au moins deux types d'organismes qui envisagent la recherche suivant des logiques distinctes : les organismes « généralistes » et les universités, dont les objectifs sont de promouvoir une recherche de qualité dans différents domaines, et les organismes à « vocation appliquée » dont la mission est définie en termes d'objectifs précis dans un domaine particulier. En France, le CNRS est un exemple typique d'organisme généraliste, et l'INRIA un exemple d'organisme à vocation plus appliquée. Dans un organisme comme le CNRS, la recherche et l'évaluation s'organisent autour des *individus*. Les chercheurs sont encouragés à faire valoir leur créativité et leur impact personnel sur les travaux menés ; ils doivent régulièrement fournir des rapports et des programmes de recherches personnels, et sont fortement incités à recruter et encadrer des étudiants. Cette approche favorise le foisonnement et l'émergence d'idées nouvelles, il rend plus difficile l'émergence de projets collectifs. Dans un organisme comme l'INRIA, la structure mise en place autour de projets favorise le travail en *équipes* mais rend peut-être moins facile l'émergence d'initiatives individuelles originales. La proximité avec le monde économique a aussi pour conséquence la rotation rapide des équipes, les chercheurs dont le savoir-faire est immédiatement exploitable étant davantage sollicités par l'industrie.

Les deux approches ont leurs mérites, comme le prouvent les succès remarquables enregistrés par des chercheurs ou des équipes de l'un ou l'autre bord, en particulier dans le domaine des nanosciences. Dans l'un et l'autre cas, un élément essentiel d'efficacité est l'ouverture au monde extérieur –université et/ou industrie–. Les évolutions nécessaires pour s'adapter aux nanotechnologies ne doivent donc pas privilégier un système d'organisation plutôt qu'un autre. Il y aurait même des avantages substantiels à imaginer de nouvelles structures ou procédures qui permettraient aux deux approches de *coexister* pour conjuguer leurs avantages. Là encore, il apparaît essentiel de faire preuve de pragmatisme et de souplesse.

Par ailleurs, à côté des organismes de recherche publics, le rôle du monde industriel est déterminant. Même si l'industrie est moins engagée dans le domaine de la recherche fondamentale de nature « stratégique » ou « exploratoire », les entreprises tiennent une place particulière dans le développement des nanotechnologies. On peut là encore distinguer deux cas de figure. Les « jeunes pousses » se créent le plus souvent sur l'initiative de chercheurs, issus des organismes publics ou de laboratoires industriels, pour valoriser un concept élaboré dans le cadre de l'organisme ou de la société (lorsque celle-ci ne va pas développer elle-même le produit). Ces entreprises ne disposent pas au départ de moyens lourds de fabrication, et doivent au contraire profiter d'un adossement à un centre de technologie suffisamment ouvert et accessible pour valider leurs concepts, élaborer leur prototypes, éventuellement produire des échantillons. Ces jeunes entreprises valident donc en général des concepts novateurs et élaborent des produits nouveaux, en s'appuyant sur des infrastructures et des savoir-faire de production existants. Pour elles, l'activité de création de propriété intellectuelle est essentielle, car c'est ce qui leur permet d'exister et de se développer par rapport aux grands groupes.

Au contraire, les industriels disposant des moyens lourds de micro et nano fabrication s'engagent dans des programmes lourds de développement technologique, pour rendre leurs filières de plus en plus performantes et rester compétitifs dans leur cœur de métier. Le cas le plus typique est celui des industriels de la microélectronique. Là, les industriels deviennent les inventeurs et les dépositaires de savoir-faire de grande complexité et haute technicité, d'une ampleur telle que les centres universitaires, même les plus grands au monde, ne peuvent plus y contribuer significativement. Les raisons en sont des coûts énormes immobilisés dans la mise sur pied d'un ensemble de fabrication à l'échelle industrielle, sur lequel doivent être continûment optimisés les procédés nés de nouvelles recherches. En revanche, ces industriels, confrontés à la fois à l'immensité des champs scientifiques pertinents et à des impératifs drastiques de contrôle des coûts, se reposent maintenant sur la recherche universitaire pour élaborer et formaliser pour eux les nouveaux concepts, les nouvelles « briques » sur la base desquels ils développeront leurs savoir-faire et de nouveaux produits.

3.4. Les différents types de moyens

La recherche en nanotechnologies nécessite une variété de moyens permettant l'élaboration de nano objets, leur caractérisation et la mesure de leurs propriétés physiques, isolés ou assemblés, et la démonstration de fonctionnalités.

Beaucoup de ces outils sont courants dans les laboratoires, d'autres sont plus rares. Certains, tout à fait critiques, manquent le plus souvent dans notre pays. Il s'agit en particulier des outils de micro et nano fabrication.

Commençons par infirmer une idée reçue: pour faire des nanotechnologies, il n'est pas forcément nécessaire de disposer de moyens ultimes, comme des salles blanches ultra-propres. Certains laboratoires de pointe aux États-Unis vont jusqu'à faire fonctionner certains de leurs équipements dans des salles normales! La grande propreté n'est nécessaire que lorsque l'on fabrique des éléments comportant de nombreuses opérations technologiques (les défauts dus aux poussières s'ajoutent alors pour chaque étape), ou bien lorsque le dispositif à fabriquer est de grande surface et que de petits défauts sont rédhibitoires à son bon fonctionnement. L'un ou l'autre de ces cas est très rarement rencontré dans des activités de recherche en nanotechnologie.

Quelle que soit la problématique abordée ou l'environnement du laboratoire, l'extrême petitesse de l'échelle nanométrique impose au chercheur d'utiliser des *moyens technologiques* de manipulation, de fabrication ou de caractérisation adaptés au monde de « l'infiniment » petit. Il existe une grande variation de moyens dédiés à l'échelle nanométrique, et la taille de ces moyens (en particulier en investissements) est aussi très variable.

Il existe tout d'abord des moyens dévolus à la *recherche en technologie dans l'approche « top-down »*, pour développer les techniques ultimes de fabrication à l'échelle nanométrique. Ces *infrastructures du premier niveau* regroupent l'ensemble des instruments nécessaires à la fabrication de structures complexes avec des dimensions latérales pouvant descendre en dessous de 100 nanomètres. Elles mettent en œuvre les techniques de lithographie et de gravure les plus modernes. Elles ont aussi pour objectif de faire progresser les connaissances en méthodes et outils de nano fabrication. La constitution de telles plates-formes technologiques représente des *investissements lourds*. En raison de leur prix (une plate-forme représente un investissement d'environ 20 à 30 M€), ces équipements ne peuvent avoir qu'une vocation régionale ou nationale, ce qui requiert de les doter d'un mode de fonctionnement permettant l'ouverture la plus large possible vers l'extérieur.

On peut ensuite identifier une deuxième classe de besoins en moyens de taille intermédiaire, que l'on peut qualifier de *d'infrastructures de deuxième niveau*. Il s'agit principalement d'*ateliers de nano fabrication*, permettant l'élaboration de nouveaux objets à l'aide de procédés de nano fabrication maîtrisés, qui n'ont pas nécessairement de capacités pour la production de masse mais qui opèrent à une échelle nettement sub-micronique, comme par exemple la gravure par faisceau d'électrons. De tels ateliers représentent des équipements mi-lourds importants (environ 3 à 6 M€). Ils sont nécessaires aux équipes impliquées dans des projets en nanosciences ou en nanotechnologies pour élaborer les objets de leurs études, ou à de jeunes entreprises pour le développement de prototypes. Cet accès aisé à la fabrication est essentiel, tant dans la recherche de phénomènes nouveaux dans toutes les disciplines (biologie, physique, chimie), que pour la formalisation des concepts et la mise au point de procédés ou d'objets nouveaux.

Enfin, on peut également identifier une vaste classe d'applications en nanotechnologies pour lesquelles il est essentiel de disposer d'*ateliers de micro fabrication*. Ces *infrastructures de troisième niveau* n'ont pas les capacités de fabrication ou de structuration de la matière à l'échelle nanométrique. Mais nombre d'objets nanométriques peuvent être produits voire assemblés par des techniques physiques ou chimiques accessibles à l'échelle de nombreux laboratoires, et seules la mise en forme, l'isolation, le découpage, la prise de contacts, ou l'encapsulation des composants ou dispositifs réalisés requièrent la mise en œuvre de techniques de micro-fabrication standard. Les infrastructures de troisième niveau représentent des équipements mi-lourds d'importance moindre que les infrastructures de second niveau (environ 1 à 3 M€). Elles doivent être largement disponibles et ouvertes au plan local, afin de permettre aux équipes –ou aux jeunes entreprises– de valider des modes d'élaboration et d'assemblage, ou de caractériser les fonctions et les propriétés de nouveaux objets. Elles sont très répandues à l'étranger, dans pratiquement chaque établissement, voire chaque département de recherche pour les universités les mieux dotées.

Dans le domaine des nanotechnologies, les ateliers de micro et nano fabrication (c'est-à-dire les infrastructures de deuxième et troisième niveau) ont un rôle identique à celui qu'ont joué les ateliers d'électronique ou de mécanique des laboratoires il y a une vingtaine d'années.

Ce sont des outils qui servent à des utilisateurs de toutes disciplines, par exemple physiciens pour l'étude de nanotubes, chimistes pour l'électronique moléculaire, biologistes pour des études fondamentales de la cellule ou appliquées pour créer de nouvelles générations de biopuces. Ces ateliers permettent de fabriquer les objets de recherche dont on a besoin tous les jours. A titre de comparaison, on peut estimer à une dizaine maximum le nombre de tels ateliers dans les universités et écoles d'ingénieurs françaises, à comparer à la quarantaine en Grande Bretagne, souvent de plus grande taille, et irriguant pourtant un tissu de recherche universitaire plus petit.

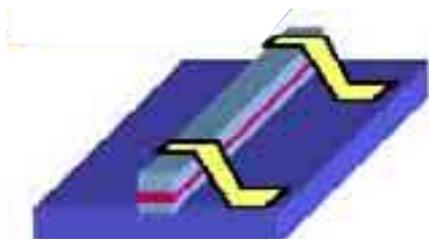
Enfin, à coté de moyens de caractérisation lourds (par exemple microscopes électroniques à haute résolution), il existe un certain nombre d'outils *légers* de *mesure* et de *caractérisation*, dont la disponibilité a permis l'essor des nanosciences. Ces outils sont en permanence améliorés par les scientifiques, car certains aspects –comme la nanoconnectique– sont encore balbutiants. Ces outils peuvent être relativement diversifiés, mais il faut souligner le rôle central joué par les microscopies de proximité (microscopes à effet tunnel, à force atomique, optique en champ proche). Chaque laboratoire développant une activité pertinente en nanotechnologie doit pouvoir disposer de tels moyens « légers ».

3.5. Micro et nano fabrication : des exemples concrets

Les infrastructures ont donc une importance cruciale pour le développement d'une activité pertinente en nanotechnologies. Néanmoins, face à cette réalité, on oppose souvent des arguments s'appuyant sur le coût très important de ces infrastructures. Ce coût conduirait à la nécessité de « rationaliser » les dépenses en concentrant les investissements sur un petit nombre de plates-formes. Une telle objection ne correspond pas à la réalité des faits. Beaucoup de besoins courants peuvent être couverts par des infrastructures relativement modestes, et c'est le parti pris par la plupart des pays concurrents pour dynamiser le domaine. Quels sont les besoins en nano et micro fabrication « courants », en quoi consistent les ateliers de micro fabrication de niveau 2 et 3 ? Essayons de répondre à ces questions à partir d'exemples concrets.

Comme exemple de besoin nanotechnologique de routine, on peut considérer la mesure de conductance d'un gaz bidimensionnel d'électrons au sein d'un nanofil semi-conducteur (figure ci-dessous, à gauche) ou la réalisation d'un cristal photonique (figure ci-dessous, à droite).

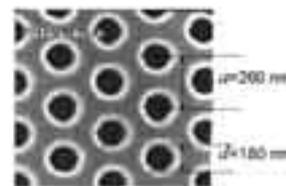
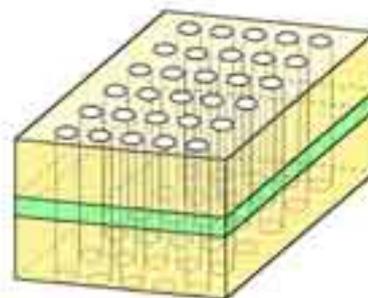
Dans le premier cas, il faut réaliser un fil semi-conducteur extrêmement étroit pour avoir des effets intéressants (quelques dizaines de nanomètres), et ensuite définir des contacts métalliques bien localisés (donc petits eux aussi), dans l'autre on veut écrire des trous de 100 nm de diamètre environ, avec une période de 200 nm, dans un matériau optique, ces trous permettant de guider la lumière par les réflexions cohérentes se produisant sur les interfaces matériau-air.



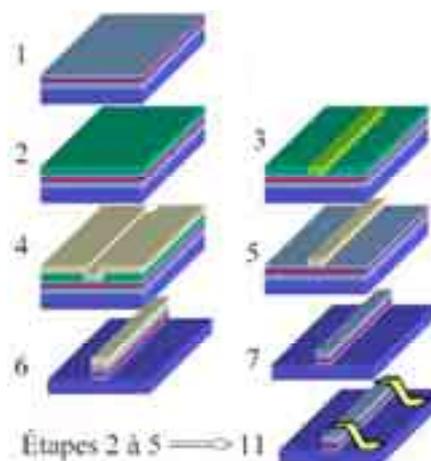
Exemples de nano-objets :

ci dessus : schéma de principe pour la mesure de conductivité d'une couche bidimensionnelle d'électrons (en rouge) au sein d'une structure semi-conductrice en forme de nanofil.

ci-contre : schéma de principe d'une nanostructure pour l'optique intégrée. Les photons sont confinés verticalement au sein d'une couche de haut indice optique au milieu de la structure, et guidés horizontalement par un cristal photonique à deux dimensions. En dessous, vue de dessus au microscope électronique d'une réalisation en arséniure de gallium.

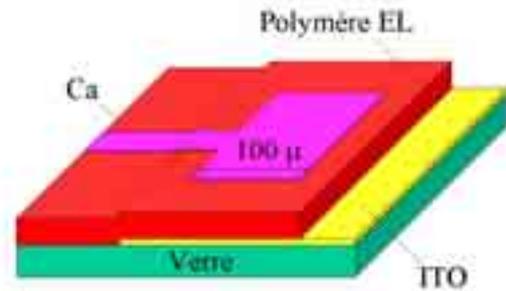
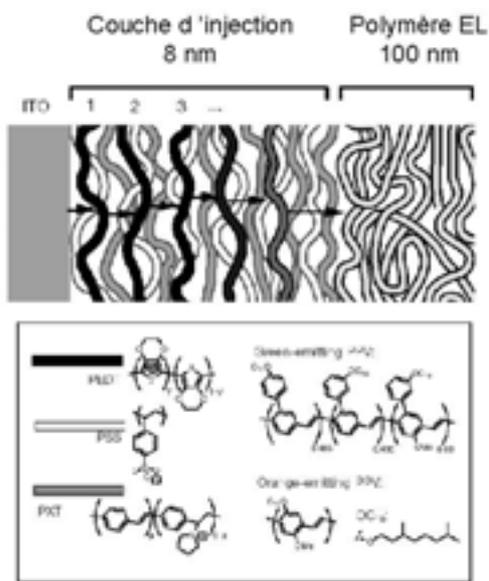


La figure ci-contre montre la succession des étapes à réaliser. Détaillons la pour le nanofil. On part de la structure semi-conductrice bidimensionnelle (étape 1), et on dépose une résine photosensible (étape 2) que l'on va insoler avec une précision de 10 nm (le plus souvent grâce au faisceau d'électrons d'un microscope électronique appelé masqueur). On grave la résine insolée, et on dépose une couche métallique (étape 4). En attaquant sélectivement la résine non insolée on enlève le métal qui a été déposé dessus, et ne reste que le fil métallique qui a été déposé dans la tranchée gravée de résine (étape 5). C'est le procédé « lift-off » de dépôt localisé. On grave alors sélectivement la surface du semi-conducteur non protégée par le métal, et on grave ensuite sélectivement le métal (étape 7). On va enfin réaliser les contacts métalliques par une succession d'étapes similaires : dépôts (de matériaux métalliques, d'isolants, et de résine), insolation et gravure. Pour réaliser le cristal photonique, on a une succession d'opérations similaires avec dépôts de résines, insolation, gravure sélective. La technologie est ici assez répétitive ; une fois que l'on sait réaliser les objets aux bonnes dimensions, la recherche porte sur l'étude de matériaux différents, des géométries variées, et peu ou pas sur l'amélioration du procédé.



Les étapes de nanofabrication du dispositif de mesure d'une structure semi-conductrice en forme de nanofil.

En ce qui concerne les micro fabrications de routine pour étudier des nano objets, un exemple peut être celui des polymères électroluminescents, très étudiés pour faire des écrans plats de prochaine génération : un des problèmes majeurs est de contrôler les architectures de couches pour améliorer l'efficacité de l'injection des porteurs de charge à partir d'électrodes. On dépose donc par des techniques d'auto organisation à l'échelle moléculaire des couches successives de polymères (figure ci-dessous, à gauche), dont on observe les structures par des techniques de microscopie, et on mesure les propriétés électriques et optoélectroniques par des structures permettent de réaliser des contacts électriques. La seule chimie ne permet pas de valider l'approche choisie pour fabriquer la structure. Il faut démontrer la fonctionnalité électro-optique, en l'occurrence une électroluminescence à haut rendement. Mais cela suppose de nombreuses études électriques et électro-optiques préliminaires avec des structures du type représenté ci-dessous, à droite.



A gauche : Schéma de principe d'une interface nanostructurée dans une diode électroluminescente organique. L'interface est constituée de six couches déposées successivement par auto-assemblage moléculaire pour faciliter l'injection des charges et optimiser la diode. La couche de polymère électroluminescent est déposée par centrifugation.

Ci-dessus : Schéma de principe d'une structure pour l'étude des diodes électroluminescentes organiques.

Là encore on utilise des techniques de dépôt de couches et de résines, des insulations, des gravures. La différence avec la nano fabrication précédente est que les dimensions sont nettement plus grandes. La technique d'insolation est alors la lithographie optique, et les machines de gravure sont aussi beaucoup moins sophistiquées.

Dans les deux types de fabrication, il n'y a pas besoin de grande propreté, comme dans l'industrie. Dans le premier cas, les structures occupent une surface très faible sur une puce. La plupart des poussières sont en dehors des structures, et comme on peut fabriquer les structures de manière très redondante, on en trouve toujours des bonnes. Dans le deuxième cas, les structures ont souvent de grandes dimensions (100 microns et plus) et une poussière ne constitue généralement pas un défaut rédhibitoire.

Le coût des machines est donné dans les deux tableaux ci-dessous, et sont indicatifs car très dépendants des choix effectués. La quote-part du coût d'un bâti d'épitaxie par jets moléculaires (nécessaire dans l'exemple du nanofil semi-conducteur pour obtenir la structure de départ à l'étape 1) n'est que très partielle dans de tels sujets, car la productivité de telles machines est bien supérieure à celle de la technologie qui vient après pour réaliser des nanostructures. Les structures semi-conductrices de départ peuvent souvent être acquises soit par des coopérations, soit directement sur le marché. Ce coût de machine est donc souvent non pertinent. Par contre, on peut avoir besoin d'une variété de machines de dépôts métalliques ou isolants, ce qui augmente le budget correspondant.

EXEMPLE D'INFRASTRUCTURE DE NIVEAU 2	
Équipement	Coût (k€)
Masqueur électronique	1 000
Gravure (ICP ou CAIBE)	700
Dépôt et révélation résines	100
Bâti de dépôts (métaux, isolants)	500
Observation (dont MEB)	300
Salle blanche 100 m ²	600
TOTAL	3 200

EXEMPLE D'INFRASTRUCTURE DE NIVEAU 3	
Équipement	Coût (k€)
Lithographie optique	200
Gravure (RIE)	200
Dépôt et révélation résines	100
Bâti de dépôts (métaux, isolants)	500
Observation (dont MEB)	300
Salle blanche 50 m ²	300
TOTAL	1 600

3.6. L'importance des moyens répartis pour l'industrie de demain

Le rôle de la puissance publique pour créer les conditions favorables au développement et à la pérennisation de l'entreprise devient encore plus important aujourd'hui que dans le passé. En France comme ailleurs, l'industrie est confrontée à une compétition intense et s'éloigne de la recherche exploratoire. Cela ne rend que plus importante la recherche publique, qui a de plus en plus la responsabilité de la base scientifique et technique du pays. Ceci concerne en particulier les nanotechnologies qui constitueront la base de demain. Cette situation découle de l'accroissement de la compétition internationale, qui réduit les marges, rend plus difficile le dégagement de valeurs ajoutées pouvant financer la recherche à long terme, et contraint les entreprises à afficher des résultats financiers suffisants pour être en mesure de préserver leur indépendance et leurs capacités de financement. Cependant, cette situation résulte plus fondamentalement d'un changement de paradigme de l'innovation : si quelques percées industrielles peuvent encore résulter de percées scientifiques, la plupart des innovations proviennent aujourd'hui de fusion de technologies préexistantes. De plus la quantité de technologies mises en œuvre par un industriel est telle que s'il devait poursuivre toutes les pistes, il ne le pourrait pas (même les plus grands états ne le peuvent plus), et il y aurait beaucoup de chances que ses découvertes profitent à d'autres qu'à lui-même. Dans ces conditions, pour percer technologiquement, les industriels devront de plus en plus confronter leurs savoir-faire et leurs procédés à de nouveaux concepts ou de nouvelles méthodes élaborés par d'autres. Cette évolution est mondiale, et la plupart des pays industrialisés connaissent le même phénomène.

Face à ce changement de positionnement par rapport à la recherche à long terme opéré par les grands groupes industriels, de grands pays comme les États-Unis ont réagi (ce qui est d'autant plus remarquable vu le credo « libéral » de l'état) : la puissance publique s'est investie dans un soutien massif à la recherche dans les domaines stratégiques pour l'avenir, au premier rang desquels les instances d'évaluation américaines ont promu les nanotechnologies. L'idée sous-jacente est d'organiser une vaste exploration de ce nouveau domaine pour permettre aux entreprises américaines de profiter des concepts et savoir-faire démontrés et validés par les acteurs de la recherche. Ce vaste plan de soutien aux nanotechnologies irrigue largement l'ensemble de la communauté scientifique et technique du pays, pour préserver et accroître l'avance technologique et la compétitivité de l'industrie américaine.

Dans ce contexte, une part de plus en plus grande de l'innovation passe par les « jeunes pousses » (start up) issues du milieu de la recherche universitaire. Encore faut-il qu'elles trouvent un terrain propice. Une motivation essentielle pour mettre à niveau les infrastructures universitaires sera d'aider localement les « jeunes pousses » dans les toutes premières phases de prototypage et d'amorçage, lorsqu'elles n'ont pas encore de moyens propres. Cette fonction peut bien sûr être couplée aux efforts des régions pour encourager les incubateurs. Les moyens décentralisés de micro ou de nano fabrication trouvent alors tout naturellement leur place comme moyen d'incitation et de soutien aux « jeunes pousses ».

3.7. Les différents métiers

Un dernier point, presque évident, rend très diversifiée l'approche par les chercheurs des problèmes à l'échelle nanométrique : il s'agit tout simplement de leur *métier*, ou de leur *formation*. Un biologiste ne raisonne pas comme un physicien, qui aborde lui même les

problèmes d'une façon très différente de celle adoptée par un chimiste. Ceci peut paraître un problème, une différence qu'il conviendrait de gommer ou au moins d'atténuer pour négocier le virage des nanotechnologies. En effet, la complexité des architectures, l'interdépendance entre la fabrication des objets et leur caractérisation induit dans le cadre des nanosciences des couplages entre disciplines beaucoup plus fréquents que dans d'autres domaines. En nanosciences, il existe certes des problèmes qui relèvent du champ quasi exclusif d'une discipline, mais il en existe aussi beaucoup plus qui imposent une *approche interdisciplinaire*. Ceci est encore plus vrai dans le domaine des nanotechnologies, où les contraintes associées à un objectif donné nécessitent l'emploi de techniques et l'élaboration de concepts faisant appel au savoir faire et aux acquis de différentes disciplines.

Néanmoins, cet idéal d'un espéranto scientifique interdisciplinaire, la maîtrise par un seul individu des nanosciences ou des nanotechnologies, paraît illusoire car elle ne saurait être que superficielle, et serait donc, en fait, néfaste. De plus, très souvent, une approche interdisciplinaire d'un problème se révèle optimale quand plusieurs *professionnels d'horizons différents* collaborent sur un même problème en gardant chacun leur *spécificité* et leur mode de raisonnement. La richesse se crée dans la diversité des approches et l'approfondissement disciplinaire d'un même problème. Une des clés d'une approche efficace en nanotechnologie consiste plutôt à rassembler les meilleurs spécialistes de différentes disciplines, et à les faire travailler de manière *coopérative* sur un problème donné. En d'autres termes, il s'agit de développer une intégration sur un même projet des méthodes spécifiques des uns et des autres, d'organiser les échanges, de coordonner les efforts. De cette manière, on tire réellement profit de la *diversité* apportée par les différentes disciplines, on crée des *effets de levier* et on répond à des besoins de façon adaptée, dans leur *globalité*. Pour y parvenir, il est toutefois essentiel que les chercheurs de disciplines différentes puissent *communiquer* entre eux. Cela suppose une communauté d'intérêts, mais aussi des notions élémentaires des fondements des autres disciplines. En d'autres termes, si la « spécialisation pluridisciplinaire » est en elle-même un non-sens, il est par contre capital que la formation des étudiants à leur entrée à l'université demeure ou redevienne suffisamment généraliste pour rendre possible les collaborations futures interdisciplinaires.

4. La situation actuelle en France

4.1. Points forts et atouts

L'évolution vers une recherche en nanotechnologies de bon niveau nécessite des adaptations, sinon des mutations. Il est indispensable dans un premier temps d'analyser ses forces et ses faiblesses, de manière concurrentielle au niveau international, puis de définir une politique amenant les individus, les structures et les institutions au niveau souhaité.

L'atout principal de notre pays, dans ce contexte, est constitué par *le bon niveau de sa recherche dans le domaine des nanosciences*. Il existe en France des équipes pionnières et de très haut niveau dans plusieurs domaines, par exemple : les nanotechniques de caractérisation et de manipulation, l'élaboration et l'étude de nano-objets (agrégats, nanotubes), le magnétisme, les matériaux nanoporeux, l'électronique moléculaire et les mesures des propriétés mécaniques de l'ADN. D'après une étude de R. Compano et A. Hullmann,² la France se situerait au cinquième rang mondial des publications scientifiques du domaine dans la période 1997-1999, et au quatrième rang en ce qui concerne les brevets de la période 1991-1999 (c'est-à-dire à un bien meilleur rang que pour les brevets toutes disciplines confondues). Il faut noter que ce résultat flatteur est obtenu sur une période d'amorçage de l'activité, avant la rupture provoquée par le lancement de programmes spécifiques dans de nombreux pays.

Par conséquent, même si par rapport à d'autres pays comparables, la France a pris un certain retard dans la mise en place d'un programme de grande ampleur en nanotechnologies, elle dispose d'une bonne base dans le domaine des nanosciences. En d'autres termes, les chercheurs français ont globalement bien pris le virage des nanosciences.

Par ailleurs, une activité de veille stratégique a été mise en place à l'observatoire des micro et nanotechnologies, au LETI à Grenoble. Les documents produits sont tout à fait remarquables, mais l'on peut s'interroger sur la politique de diffusion contrôlée qui limite l'impact de cette activité, alors qu'elle devrait irriguer largement le tissu national des laboratoires publics, des grandes et petites entreprises.

En ce qui concerne les infrastructures, les pouvoirs publics ont mis sur pied un réseau de grandes centrales dédiées aux nanotechnologies. Ce réseau comprend quatre centrales académiques, déjà toutes dotées d'un plateau technologique appréciable. En sus, le pôle Minatec a été créé « ex-nihilo », mais étroitement –et géographiquement– adossé au LETI. A partir de 2003, un effort particulier continuera de financer ces grandes centrales à hauteur de 100 M€ sur trois ans. En contrepartie, le ministère a demandé à ces centrales d'adopter un fonctionnement ouvert, c'est-à-dire de consacrer une partie de leur activité (au moins 15%) à des projets portés par des équipes extérieures. L'effort sur les grandes centrales est substantiel et mérite d'être relevé. On peut toutefois s'interroger sur son adéquation pour offrir à un grand nombre de chercheurs les moyens de travailler efficacement dans le domaine.

² Ramon Compano et Angela Hullmann, « Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators », *Nanotechnology* 13 (June 2002) 243-247.

4.2. Les difficultés à surmonter

Lorsque l'on veut lancer des appels d'offre d'envergure, même si l'on mobilise des moyens financiers, un certain nombre de facteurs structurels empêchent d'atteindre l'efficacité souhaitée. Il s'agit de surmonter ces difficultés.

L'insuffisance des infrastructures : Comme suggéré ci-dessus, la concentration des infrastructures dans de grandes plates-formes technologiques ne peut donner l'accès aux moyens nécessaires qu'à un nombre limité de chercheurs. Or, il faudrait en inciter un grand nombre à entreprendre de vrais projets nanotechnologiques. Avec le réseau des centrales technologiques de premier niveau, on reste très loin de la mobilisation que permettent les moyens technologiques à l'étranger. Sur la base des chiffres du ministère, on arrivera à soutenir l'activité de 200 à 300 chercheurs, en comptant qu'une centrale irrigue trente chercheurs internes et autant à l'extérieur. Même en comptant les huit centrales de deuxième rang que le ministère a l'intention de mettre en place,³ on doublera le nombre de chercheurs concernés.

A la fin de ce plan d'équipement, on sera encore très loin des possibilités qu'ont la majorité des chercheurs à l'étranger en matière de moyens de micro et nano fabrication délocalisés. De plus, même si on le souhaitait, la structuration en grande plate-forme ne permettrait pas de satisfaire beaucoup plus de chercheurs que prévu. Il existe en effet un problème qualitatif sous-jacent, car il est difficile de faire fonctionner une plate-forme technologique de premier niveau en centre de services de la même façon qu'un grand instrument de caractérisation. En effet, de nombreux besoins feront appel à des ressources en procédés de micro ou nano fabrication très variés, souvent bien établis, pour lesquels l'innovation ne se situe pas dans la fabrication, qui s'apparente à une prestation de services. De tels besoins s'insèrent mal dans le cadre défini pour les infrastructures de premier niveau et les saturerait rapidement, alors que leur mission est de rester à la pointe de l'innovation technologique. En d'autres termes, la mission principale dévolue aux grandes centrales les incite à fonctionner en centre dont l'ouverture est limitée, ainsi que le définit aujourd'hui le ministère.

Si on analyse en détail la plupart des projets nanotechnologiques, disposer d'un atelier de micro ou de nano fabrication est essentiel pour développer une activité pertinente. C'est une condition requise pour démarrer un sujet, cela devient essentiel pour valider un nouveau concept, et c'est indispensable pour obtenir des financements et prendre une part active sur les sujets essentiels des contrats.⁴ Par contre, les besoins en technologie de micro et nanofabrication « ultime » sont rares et peuvent être satisfaits par un recours limité à la seule étape critique dans une grande plate-forme. Les besoins en infrastructures nouvelles sont donc urgents à satisfaire, et ils concernent des centres délocalisés de deuxième et troisième niveau.⁵ Ces équipements ne sont pas nécessairement des salles blanches au sens habituel (« ultra propres », comme cela est nécessaire dans l'industrie), mais des équipements pour la fabrication, la manipulation à l'échelle nanométrique et l'insertion (ou

³ Voir Annexe § A-2.1.3

⁴ Les britanniques ont compris l'enjeu très tôt puisque, dès les années 80, ils se fixaient des objectifs ambitieux de recherches de contrats dans les programmes européens grâce à un effort d'équipement délibéré de leurs universités. Aujourd'hui, ces universités ont toutes un ou plusieurs *ateliers de micro et de nano fabrication*, pas nécessairement au niveau ultime de la nanotechnologie, mais de très bon niveau.

⁵ En Grande-Bretagne, pays de taille et de niveau comparable à la France, on trouve une quarantaine d'infrastructures de deuxième niveau. On peut donc estimer à ce niveau les besoins en France, ce qui conférerait à ces centres une vocation régionale.

l'interfaçage) d'objets nanométriques dans un environnement à plus grande échelle permettant la mesure ou la fonction.

La création de ces infrastructures décentralisées de taille intermédiaire apparaît indispensable pour promouvoir efficacement le développement en France des nanotechnologies. Elles sont indispensables pour permettre aux chercheurs de faire des démonstrations ou de valider certains concepts en vue d'applications, bref pour promouvoir une recherche exploratoire de qualité. Se contenter de financer des projets sans les infrastructures nécessaires ne peut conduire les chercheurs qu'à se limiter à des sujets peu en rapport avec les enjeux technologiques. Ces infrastructures auront donc une *vocation structurante* pour le tissu de recherche français. Elles sont essentiellement assimilables à un équipement mi-lourd (1 à 6 M€), facilement rentabilisables sur un campus où 20 à 40 personnes seraient impliquées. Dans un domaine en émergence et à vocation très interdisciplinaire comme les nanotechnologies, ceci apparaît comme la solution la plus efficace pour profiter au maximum de la créativité de l'ensemble des équipes de recherches (les « bonnes idées » peuvent germer partout).

L'implication des industriels : Même si peu d'entreprises affichent une stratégie explicite vis-à-vis des nanotechnologies, quelques grandes firmes françaises sont déjà actives dans le domaine (ST Microelectronics, Alcatel ou Thalès dans les filières « top-down » des technologies de l'information et des communications, Saint-Gobain, Rhodia, Essilor ou Lafarge dans les domaines des matériaux), car les nanotechnologies constituent un prolongement immédiat au cœur de leur métier. D'autres entretiennent une veille scientifique et industrielle, mais la perception des enjeux est encore diffuse. Cette situation diffère de celle observée à l'étranger : dans un pays comme l'Allemagne, les grands groupes industriels se positionnent tous dans les réseaux thématiques mis en place au niveau fédéral, et aux États-Unis, suite à l'effort de réflexion collective préalable au lancement du grand programme « National Nanotechnology Initiative », les grands industriels ont tous mûri et affichent une stratégie explicite pour leur activité dans le domaine des nanotechnologies. En France, il est probable qu'en l'absence d'initiative spécifique, et même pour les grandes entreprises qui entretiennent traditionnellement une forte activité de recherche, la situation d'attente se prolonge en raison de la conjoncture actuelle.

Pour avancer, toute action destinée à promouvoir efficacement les nanotechnologies devra à la fois sensibiliser les entreprises aux enjeux des nanotechnologies et inciter les chercheurs à élaborer des concepts valorisables par les entreprises, de façon à favoriser, le moment venu, les transferts vers les domaines d'application. On peut légitimement penser que ces transferts seront assurés de façon déterminante par des jeunes pousses (« start-up »), entreprises directement créées pour la valorisation des innovations. C'est ce que l'on observe dans les pays étrangers pour les nouvelles technologies dans des secteurs industriels émergents. On touche là aussi une difficulté propre à notre pays, dans la mesure où jusqu'à présent, la valorisation technologique de l'innovation est principalement restée l'apanage des grands groupes industriels. L'implication des jeunes pousses dans l'innovation et les transferts technologiques sont restés relativement marginaux. Il est probable que cette évolution ne se fera pas naturellement, et que là aussi il faudra agir sur les mentalités et aider au changement. En résumé, pour valoriser la mise en œuvre industrielle des résultats issus d'un effort en nanotechnologies, pour surmonter certains handicaps culturels propres à notre pays, une politique spécifique d'aide à la valorisation devra être entreprise.

La mise en place d'une politique d'aide à la valorisation est particulièrement importante dans les premières phases du développement des nanotechnologies, parce que tout laisse

penser que l'émergence des nanotechnologies sera une période particulièrement active en innovations, en rupture avec les technologies précédentes. Ceci rend assez difficile la définition de projets finalisés trop précis, faute du recul nécessaire. C'est cette pression pour identifier la mise en œuvre industrielle probable qui a fait dériver le programme du réseau en micro et nanotechnologies (RMNT) vers une action presque uniquement consacrée aux microtechnologies. Il faut aujourd'hui, comme le font les grands pays, lancer les chercheurs sur des voies nouvelles, en encourageant l'imagination et l'originalité dans la plupart des projets. Néanmoins, on peut estimer qu'après une période transitoire, les potentialités, les outils et les méthodes seront mieux cernés. Il sera alors plus facile de définir des objectifs précis et d'obtenir une implication des industriels au moyen d'aides ciblées. A contrario, l'un des enjeux de la période exploratoire sera de mettre sur pied des procédures permettant aux industriels de s'intéresser aux nanotechnologies, pour se construire une vision stratégique, mais aussi pour aider la puissance publique à orienter ses financements pour soutenir le domaine de façon pertinente, sans que les entreprises soient à ce stade des bénéficiaires importants de l'aide publique.

La faiblesse des ressources et l'inadéquation des procédures : La répartition et le suivi de l'attribution de contrats et de moyens sont en France comme à l'étranger les outils à la disposition de la puissance publique pour soutenir un domaine qu'elle juge prioritaire. La faible part contractualisée de la recherche dans notre pays mène à une incitation au changement insuffisante, car souvent elle ne peut pas apporter les moyens financiers nécessaires, en particulier lorsqu'il s'agit de technologie. Pour financer leurs projets ou équipements, les laboratoires français doivent donc faire intervenir de multiples bailleurs de fonds, dont certains, comme les régions, ne disposent pas de système d'évaluation suffisant et se reposent sur l'accord des organismes partenaires pour cautionner la pertinence des projets qu'ils soutiennent. De leur côté, organismes et universités ont une autonomie limitée dans leurs choix stratégiques, car ils n'ont pas les moyens de les assumer financièrement. De façon générale, cette insuffisance des aides se conjugue à des difficultés de procédures. Par exemple, l'interdisciplinarité est essentielle quand on veut faire des technologies. L'organisation de la recherche publique s'y prête encore assez mal.

De même, un effort de création d'ateliers de micro ou nano fabrication, bien que hautement souhaitable, devra surmonter plusieurs difficultés. Le problème du financement des coûts de fonctionnement de ces infrastructures est certainement un point dur. Les régions contribuent à l'investissement scientifique et technologique, mais ne peuvent participer ni à leurs coûts de fonctionnement, ni à la dotation en personnels techniques de haut niveau. Dans les universités et au CNRS, le recrutement de personnels spécifiques pour servir de nouveaux centres de ressources technologiques est difficile dans le statut actuel des personnels scientifiques et techniques. En effet, le redéploiement de ces personnels s'avère difficile, et les nouveaux recrutements ne sont pas toujours arbitrés par les instances responsables de la mise en place des infrastructures (en particulier dans les universités).

Sur un autre plan, on peut remarquer que la plupart des pays concurrents et partenaires qui cherchent à développer un domaine d'activités dans un secteur aussi concurrentiel n'hésitent pas à recruter à l'étranger et au meilleur niveau des chefs de file capables d'orienter l'activité technologique d'un centre de recherches et de fédérer autour d'eux des collaborateurs de qualité, permettant ainsi à leur institution hôte d'être immédiatement compétitive sur la plan international. La possibilité de faire venir –ou revenir– en France de telles « locomotives » constituerait un atout supplémentaire permettant d'arriver plus rapidement et plus sûrement au bon niveau. Il serait donc souhaitable d'imaginer des

procédures permettant aux universités ou aux organismes de recherches, dans des cadres institutionnels à définir, de proposer des « lots » (« packages », c'est-à-dire : chaire, postes de collaborateurs, aide technique, accès aux infrastructures, budget au bon niveau) susceptibles d'attirer dans les universités et les organismes français des scientifiques de premier plan mondial pour conduire des projets identifiés en nanotechnologies.

De façon générale, des procédures originales et efficaces seront nécessaires pour optimiser la conduite d'un programme de soutien aux nanotechnologies, une évaluation continue des procédures du programme lui-même paraissant indispensable. Comme le montrent les actions entreprises dans d'autres pays, des solutions pragmatiques impliquant les organismes existants et des structures de coordination nationale sont possibles. Par exemple, l'initiative américaine NNI est coordonnée par un comité dépendant du conseil national de la science et de la technologie, mais les moyens sont attribués par l'intermédiaire des organismes ministériels et des grandes agences nationales de financement de la recherche (DoD, DoE, NSF, NASA, NIH, etc.).⁶ Ce type d'organisation a montré son efficacité dans les pays où le système de financement est essentiellement contractuel. Mais en France où les moyens pérennes sont attribués par les organismes, l'organisation devra être différente, en particulier pour résoudre les problèmes d'infrastructures et de personnel. Dans cette situation, une piste –déjà utilisée lors de la création de l'INSU pour gérer les infrastructures d'observation de l'univers– pourrait être la création d'une instance particulière. Cette instance⁷ serait créée pour une durée limitée afin de résoudre les problèmes d'infrastructures et de personnel pendant la phase de lancement des nanotechnologies en France. Elle serait appelée à se fondre dans les instances traditionnelles au bout de cinq ou dix ans.

En conclusion, on peut donc estimer que l'action publique en France vis-à-vis des nanotechnologies souffre principalement d'être sous-critique. La concentration des moyens sur quelques grands centres ne peut pas suffire pour développer le domaine de manière significative : il faut permettre à la plupart des chercheurs et ingénieurs de disposer des moyens indispensables à une activité pertinente. Il existe donc un besoin urgent de redéployer l'action d'une manière plus efficace, en incitant notamment chercheurs et ingénieurs à se regrouper efficacement. Ceci ne peut se faire qu'en développant une politique définissant des objectifs explicites d'efficacité et de qualité. Dans cet esprit, l'Académie des technologies formule quelques recommandations fortes.

⁶ Il est intéressant de remarquer que lors de l'évaluation de l'initiative NNI en juin 2002, il a été recommandé de créer un fonds spécial géré par la direction de la science et de la technologie pour financer exclusivement des projets en nanosciences et nanotechnologies à l'intersection des champs de compétences des différents organismes, pour dépasser les barrières institutionnelles et favoriser l'interdisciplinarité.

⁷ Il pourrait s'agir d'un Institut National des Nanosciences et Nanotechnologies, agence de moyens et de contrats sans laboratoires, capable de coordonner le programme entre les institutions et d'attribuer directement certaines aides et personnels.

5. Recommandations

5.1. Prendre l'initiative d'un grand programme

Pour donner au pays les meilleures chances d'aborder en bonne position les défis technologiques futurs, l'Académie des Technologies considère qu'un ambitieux projet national de recherche⁸ sur les nanotechnologies est nécessaire. Il s'agirait d'un vaste programme destiné à mettre en place les infrastructures indispensables au niveau local et régional, encourager la recherche fondamentale dans le domaine des nanosciences et l'exploration de nouveaux concepts en nanotechnologies, favoriser la recherche exploratoire en vue d'applications ciblées et la valorisation des innovations, et définir des objectifs stratégiques.

Recommandation 1 : lancer un programme majeur, interministériel, destiné à doter le tissu de recherches français d'une organisation et de moyens propres à assurer au pays une position de premier plan dans le domaine des nanotechnologies et de leur mise en œuvre au plan industriel.

5.2. Mettre à niveau et généraliser les infrastructures indispensables

Pour permettre à la recherche française de trouver sa place dans la recherche européenne et auprès des industriels, au niveau scientifique et technologique qui doit être le sien, il faut disposer de moyens comparables à ceux des partenaires/concurrents. Les besoins en infrastructures nouvelles concernent en priorité des centres délocalisés de taille intermédiaire pouvant offrir aux équipes s'impliquant dans le domaine l'accès facile à un atelier de nano ou de micro fabrication adapté à leurs besoins.

Recommandation 2 : lancer un plan d'équipements des universités et des établissements d'enseignement supérieur en équipements mi-lourds pour les nanotechnologies (infrastructures de niveau 2 ou 3).

5.3. Investir à bon escient

Pour permettre aux acteurs de la recherche nationale d'être compétitifs dans le domaine, il est essentiel de dégager les financements contractuels qui font défaut actuellement. L'aide doit être conduite de manière diversifiée, sous forme d'appels d'offres demandant aux laboratoires de s'associer (entre eux ou avec des industriels) pour attaquer tel ou tel « point dur », ou d'appels à propositions moins précisément ciblés, pour laisser émerger des projets originaux et innovants. Par ailleurs, une politique efficace de valorisation dans le domaine doit permettre aux « jeunes pousses » (start-ups) de bénéficier d'un accès facile aux ateliers

⁸ Par « projet national de recherche », on entend ici une décision de politique de recherche majeure, interministérielle, visant à amener la recherche française en nanosciences et nanotechnologies, ainsi que les infrastructures nécessaires, au même niveau que dans les pays comparables. L'enjeu consiste à faire évoluer les travaux d'un nombre substantiel d'équipes de recherches vers des thématiques orientées vers la création de connaissances ou d'applications à fort *potentiel économique* et permettant de répondre aux attentes des entreprises et à des *demandes de la société*. Les actions actuelles du Ministère de la recherche, tout à fait bienvenues, ne sont pas du tout au niveau souhaitable.

de micro et nanofabrication pour amorcer leurs activités (réalisations de démonstrateurs, prototypage).

Recommandation 3 : attribuer les crédits pour les projets et les infrastructures sur une base compétitive et contractuelle⁹ ; affecter une part significative des crédits contractuels au financement de projets ouverts (c'est-à-dire avec un objectif à l'initiative des proposants), de manière à bénéficier de l'inventivité des acteurs de la recherche et de la technologie ; faire de la valorisation un critère d'attribution des infrastructures (en particulier pour favoriser l'émergence et mettre en place des procédures d'accueil pour les jeunes pousses).

5.4. Organiser la diversité

Pour assurer la cohérence d'une grande initiative « Nanotechnologies », une structure doit coordonner le programme entre les nombreuses institutions opérationnelles concernées, et dans certains cas attribuer directement certaines aides, en particulier pour les projets à forte composante interdisciplinaire, ou pour mettre en œuvre des moyens de fabrication. Cette instance, qui pourrait être un « Institut National des Nanosciences et Nanotechnologies », devrait être créée pour une durée limitée, afin de mettre en place les moyens humains, matériels et organisationnels pendant la phase de lancement des nanotechnologies en France. Une telle instance devrait naturellement organiser une réflexion stratégique sur les évolutions du domaine, et publier régulièrement les objectifs identifiés et la stratégie mise en place pour les atteindre.

Recommandation 4 : créer une structure chargée de coordonner l'initiative nanosciences/nanotechnologies, et d'organiser une réflexion stratégique sur les objectifs à poursuivre ; évaluer régulièrement l'action de cette structure et ses procédures.

5.5. Voir plus loin

Pour mener une politique cohérente, l'effort de prospective doit être continu, de façon à pouvoir orienter le programme et l'adapter en permanence aux sujets émergeant dans le domaine, qui est extrêmement mouvant. Il faut aussi confronter les savoir-faire continûment améliorés par les industriels –pour la miniaturisation par exemple–, aux nouveaux concepts et procédés issus de la recherche – l'auto-assemblage par exemple –. Pour permettre des interactions constructives entre les différents acteurs et assurer la pertinence des objectifs retenus, il semble essentiel d'impliquer des industriels dans la définition des objectifs stratégiques du programme.¹⁰ L'effort prospectif doit donc associer scientifiques, technologues, représentants des ministères et industriels.

Recommandation 5 : impliquer les industriels dans l'élaboration des objectifs stratégiques et dans leur actualisation.

⁹ Des procédures compétitives (appels d'offres) incitent les acteurs à se regrouper et à afficher des projets cohérents (on ne peut pas raisonnablement tout faire partout). Une part de redondance pour les infrastructures est inévitable pour être efficace.

¹⁰ L'organisation mise en place par les industriels des semi-conducteurs (MEDEA, successeur de JESSI), qui définit les axes d'actions européennes, constitue un point de comparaison intéressant. Dans ce cas, les industriels du secteur ont mis des moyens et défini des objectifs, ce qui a permis d'obtenir un impact positif dans le secteur.

5.6. Apprendre à travailler ensemble

Pour que la recherche française s'engage résolument dans le domaine des nanotechnologies, il faut assouplir les structures actuelles et favoriser les regroupements des chercheurs et des équipes atteignant des masses critiques.¹¹ Le caractère interdisciplinaire des nanotechnologies impose d'inciter les acteurs de la recherche à se regrouper au delà des clivages traditionnels, et d'adopter des modes d'organisation nouveaux au sein et entre les institutions.

Recommandation 6 : favoriser les regroupements d'équipes interdisciplinaires et inter-organismes au sein d'instituts fédératifs, dotés de crédits spécifiques et identifiables par des partenaires industriels ; favoriser la création de groupements entre organismes et partenaires locaux pour gérer des infrastructures pour la nanotechnologie et leur personnel technique.

¹¹ Certains domaines d'applications –en particulier lorsqu'on arrive au stade préindustriel– nécessitent la formation de consortiums avec *une masse critique* et des acteurs de *disciplines variées* qui pour certaines ne sont pas impliquées naturellement dans le domaine (par exemple des mécaniciens pour résoudre certains aspects technologiques rencontrés dans les dispositifs de stockage magnétique). A cet égard, on peut remarquer qu'aux États-Unis, la taille caractéristique des équipes engagées dans le domaine des nanotechnologies, souvent dirigées par des jeunes professeurs de la classe d'âge 35-45 ans, est d'une vingtaine de personnes (seniors, post-doctorants, thésards), ce qui permet de mener de véritables projets technologiques. En Europe, le laboratoire de chaire attaché à la durée du mandat d'un professeur est souvent la règle. Ces professeurs ont plutôt 40-50 ans, et disposent parfois d'équipes encore plus importantes, constituées par montée en puissance à partir du « package » de départ du professeur. Celui-ci aura le plus souvent été recruté en compétition avec d'autres institutions prestigieuses. En France, ceci n'est pas transposable, et il faudra trouver de nouveaux modes d'organisation pour arriver au même résultat.

ANNEXE : UN APERÇU DE LA SITUATION INTERNATIONALE

Les nanotechnologies ont été reconnues par de nombreux pays comme un enjeu technologique majeur pour le futur, justifiant un effort particulier pour soutenir le domaine, structurer la recherche, mettre en place des infrastructures, des réseaux et des centres spécifiques, favoriser l'émergence des entreprises ou la valorisation des découvertes en termes d'application. Cet effort se justifie par le souci de placer le pays le mieux possible dans la compétition internationale, afin d'acquérir ou de consolider une position favorable dans le futur.

Malgré la profusion de documents, il est impossible de faire des comparaisons quantitatives: les documents ne donnent que des visions partielles, (on ne trouve pas de synthèse américaine comprenant les efforts régionaux, parfois très importants), les données ne recouvrent pas les mêmes éléments (les infrastructures sont le plus souvent financées en dehors des programmes de nanotechnologie, c'est le cas à peu près inverse en France), la part de frais de personnel varie considérablement (quasi nulle en France, essentielle dans certains pays).

L'ampleur de la tâche visant à constituer une synthèse quantitative comprenant chercheurs impliqués, infrastructures, etc., est telle qu'aucun service scientifique d'ambassade sollicité n'a voulu faire cette synthèse pour le pays de son ressort. Les éléments suivants seront donc le plus souvent qualitatifs, avec les éléments quantitatifs incomplets que nous avons pu rassembler.

A-1. Les stratégies élaborées dans différents pays

A-1.1. L'initiative américaine

En janvier 2000, le président Clinton a officiellement lancé la « National Nanotechnology Initiative » (NNI). Cet effort d'une ampleur budgétaire considérable vise à assurer aux États-Unis la prééminence dans le domaine, considéré comme stratégique, des nanosciences et nanotechnologies, et la compétitivité économique à long terme du pays. Il marque une rupture, à la fois au plan national et international, dans le soutien financier accordé au domaine, ce qui fait de la NNI une référence internationale. L'initiative proprement dite représente l'ensemble de l'effort budgétaire fédéral aux institutions américaines, et les structures d'évaluation, de pilotage et d'attribution de ces aides.

L'initiative américaine possède un caractère multidisciplinaire très marqué. Elle soutient de nombreuses disciplines comme la physique, la chimie, la biologie, la science des matériaux et les sciences de l'ingénieur, mais met aussi en place de nouveaux environnements pour favoriser une collaboration interdisciplinaires entre les sciences dures et les sciences du vivant. Le soutien s'effectue sans remise en cause majeure de l'organisation américaine de soutien à la recherche : les aides sont attribuées par l'intermédiaire des agences existantes (NSF, NIH, EPA, DoE, DoD, NASA, etc.). L'initiative est pilotée par un comité réunissant les représentants du gouvernement et des agences de financement. Ce comité est chargé de coordonner la planification des programmes et la politique budgétaire, de définir la mise en

place et d'organiser l'évaluation de l'initiative au niveau global (l'évaluation des projets eux-mêmes restant à la charge des agences de financement).

Un autre aspect saillant de l'initiative américaine réside dans l'important effort de réflexion qu'elle suscite et entretient au sein de la communauté scientifique et technique américaine, ainsi qu'un réel souci d'information du plus grand nombre sur les motivations, les orientations et la stratégie retenues. L'initiative américaine a été précédée d'un effort de réflexion stratégique de trois ans, donnant lieu à la publication de plusieurs rapports thématiques, sous l'égide d'un comité provisoire. L'initiative elle-même anime et entretient cet effort de réflexion. Des rapports thématiques et des rapports sur l'avancement et les évolutions stratégiques des programmes sont régulièrement publiés et mis à la disposition de tous les publics sur Internet. Un réel effort de sensibilisation du public et de communication vers les non-spécialistes est aussi accompli¹².

La mise en place du programme se décline suivant cinq grands axes :

- la recherche fondamentale (recherches financées à partir de projets sur des thèmes laissés à l'initiative des proposant),
- des « grands défis » (recherches sur des thématiques identifiées privilégiées),
- la création de centres d'excellence,
- les infrastructures de recherches (équipements mi-lourds),
- la recherche sur l'impact des nanotechnologies sur la société et l'éducation (anticiper les transformations à venir, définir les formations à mettre sur pied, etc.).

En 2001, dans la première année budgétaire de l'initiative, un peu plus de 30% des fonds alloués ont été consacrés au premier axe, et une somme équivalente au second. Un tiers des fonds alloués ont par ailleurs été consacrés, à parts sensiblement égales, à la création de centres d'excellence et à l'aide aux infrastructures. Le dernier axe n'a reçu que moins de 5% des crédits. Globalement, 2000 projets universitaires ont été soutenus par l'initiative.

Thématiquement, les projets soutenus sont très divers : biosystèmes, dispositifs et systèmes à l'échelle nanométrique, nouvelles structures, nouveaux outils et nouveaux phénomènes à l'échelle nanométrique, simulation, modélisation et théorie des phénomènes multi-échelles et multi-phénomènes, nanomatériaux, nano-électronique, -optoélectronique et -magnétisme, santé, procédés à l'échelle nanométrique pour la préservation de l'environnement, énergie, métrologie, bio-dispositifs. De façon remarquable, la part du soutien spécifiquement réservé aux infrastructures est relativement faible, car la plupart des proposant ont déjà accès au sein de leurs institutions à des infrastructures adaptées¹³. Les projets de soutien aux infrastructures concernent soit l'établissement de centres nationaux ouverts très largement à des utilisateurs de toutes disciplines (en fabrication et en simulation), soit des nouvelles constructions au sein de quelques instituts avec des prescriptions particulières en matière d'isolation aux diverses sources de parasites pour la mesure et la manipulation à l'échelle nanométrique. Enfin, les centres d'excellence sont conçus comme des entités permettant d'établir des partenariats particulier entre universités, laboratoires nationaux et industriels. De façon générale ces centres ont aussi un rôle d'appui à des programmes de formation universitaire et d'information scientifique du public.

¹² On pourra consulter par exemple l'excellente brochure éditée pour le public : « Nanotechnology - shaping the world atom by atom », <http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Public.Brochure/>

¹³ Les infrastructures ont été financées soit par des programmes précédents, soit par des initiatives des états. Mentionnons par exemple l'Institut des nanosystèmes de Californie, à cheval sur les universités de Los Angeles et Santa Barbara, doté de 100 millions de dollars sur quatre ans par l'état de Californie, et censé trouver sur la période des financements complémentaires (« matching funds ») de 200 millions de dollars sur programmes de recherche fédéraux, collaborations industrielles, mécénat, etc.

L'aide distribuée dans le cadre de l'initiative est quasi-exclusivement réservée aux institutions académiques (les universités reçoivent 65% des fonds distribués, les laboratoires gouvernementaux 30%, l'industrie à peine 5%). Néanmoins, la nette augmentation du financement accordé aux institutions dans le cadre de l'initiative a été suivie d'une augmentation dans des proportions similaires dans les financements accordés par les entreprises de capital-risque dans le secteur des nanotechnologies.

Il faut noter enfin que le programme « NNI » ne concerne que l'initiative fédérale en faveur des nanotechnologies. En sus, un grand nombre d'états ont aussi considéré qu'ils devaient aussi soutenir l'essor de ce domaine stratégique au plan local, et ont lancé des programmes très significatifs d'aide aux nanotechnologies. Par exemple, en 2000, l'état de Californie a choisi de mettre sur pied des « instituts pour la science et l'innovation ». Ces instituts sont créés suite à un appel d'offres compétitif émis par les services du gouverneur. Le consortium UCSB/UCLA mentionné plus haut a été choisi pour le premier institut. Entre autres, les états de Pennsylvanie, de New-York, du Nouveau Mexique, du Texas, de Washington, du Colorado ont mis sur pied divers programmes, initiatives ou alliances régionales dont l'objet principal est de coordonner au niveau local les différents acteurs économiques et académiques intéressés au domaine, et de participer à la levée des fonds pour différents projets ou instituts. Il est difficile de faire un inventaire exhaustif de toutes ces actions, et d'évaluer leur importance exacte par rapport à l'effort fédéral. Néanmoins, le passage en revue de quelques exemples comme celui de UCSB/UCLA montre que ce soutien est loin d'être négligeable, et qu'il vient le plus souvent compléter les financements fédéraux en mettant un accent particulier pour favoriser le couplage entre les centres académiques et les entreprises.

A-1.2. Les « grands » pays européens : Allemagne¹⁴ et Angleterre¹⁵

La Grande Bretagne est certainement l'un des premiers pays à avoir compris l'intérêt des nanotechnologies et à avoir lancé des programmes spécifiques dans le domaine dès les années 1980. Paradoxalement, elle n'a pourtant pas acquis une position dominante (pas même en Europe), car cet effort précoce ne s'est pas poursuivi sur la durée : le milieu des années 1990 a vu les nanotechnologies passer au second plan des priorités affichées de la politique scientifique britannique, et c'est seulement au tournant du millénaire que le domaine a été de nouveau affiché au premier plan des priorités. Néanmoins, malgré cette pause durant la deuxième moitié des années 1990, l'effort précoce fait par le pays lui donne actuellement une assise particulièrement solide (notamment au niveau des infrastructures), et des atouts non négligeables pour reprendre la compétition dans le peloton de tête. Le gouvernement s'est d'ailleurs engagé dans une politique de soutien résolue au domaine.

Le premier programme d'envergure britannique, la « National Initiative On Nanotechnology » (NION), a démarré dès 1986. Ce programme, lancé par le Ministère de l'Industrie et du Commerce (DTI), a été suivi à partir de 1990 environ par un programme nanotechnologies « LINK » du DTI (LNP), par un programme nanotechnologies (NMP) du Conseil

¹⁴ Une grande partie des informations concernant l'Allemagne est basée sur des notes rédigées par Nicolas Cluzel, chargé de mission au sein du service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France à Berlin, et aimablement fourni par Marcel Berveiller, conseiller pour la science et la technologie.

¹⁵ Une partie des informations concernant le Royaume-Uni est basée sur le rapport « Les nanotechnologies en Grande-Bretagne » rédigé en septembre 1998 par Sandrine Peltier et Pierre Jaumier pour le Service Science et Technologie de l'Ambassade de France à Londres, et sur le rapport « Nanotechnology in the UK » produit en 2001 par « Institute of Nanotechnology » et aimablement fourni par Gilbert Balavoine, conseiller pour la science et la technologie à l'Ambassade de France à Londres.

de la Recherche en Sciences Physiques et de l'Ingénieur (EPSRC, à l'époque SERC), et par des programmes de l'Agence de recherche pour la Défense (DERA, alors DRA). Tous ces programmes se sont achevés au milieu de la décennie. Les financements de ces temps héroïques étaient loin d'être négligeables : ainsi, de 1988 à 1994, 10 M€ ont été investis en moyenne chaque année dans le soutien aux nanotechnologies. Cet effort a permis de créer au sein des universités britanniques une solide infrastructure dédiée à la manipulation et à la fabrication aux échelles micro- et nanométriques. On peut dénombrer une trentaine de salles blanches dans les universités britanniques, dont sept au moins sont de capacité nanométrique affirmée, au meilleur niveau mondial. En plus, on compte au moins huit salles blanches pour la micro ou nano fabrication de systèmes en nanobiotechnologies, biopuces et « lab on chip » de tout type en particulier.



Carte (non exhaustive) des implantations des infrastructures pour la nanotechnologie en Grande-Bretagne (sont omises les infrastructures spécifiquement dédiées aux biotechnologies). Les infrastructures majeures (plates-formes de premier niveau) sont repérées par les étoiles rouges. Les points bleus correspondent à des infrastructures de niveau 2 ou 3.

A partir de 1993, le DTI a lancé un exercice prospectif destiné à définir les priorités gouvernementales en matière de recherche et développement. Curieusement, parmi les 16 priorités alors retenues ne figuraient pas les nanotechnologies. Les bailleurs de fonds, appliquant scrupuleusement les recommandations, n'ont alors pas renouvelé leurs programmes dans le domaine. Les sociétés savantes ont cherché à alerter le gouvernement sur les dangers d'un tel oubli (notamment le POST, bureau parlementaire de la science et de la technologie), mais c'est seulement lors du deuxième exercice prospectif, six ans plus tard (en 1999), que les nanotechnologies ont de nouveau été affichées au premier rang des priorités.

Ce revirement a amené le Ministère de la Défense et les Conseils de Recherches (agences de moyens gouvernementales) à accorder en 2001 des moyens spécifiques pour 6 années consécutives à deux programmes Collaboratifs Interdisciplinaires de Recherches (IRC). Le premier regroupe six universités et un institut médical autour de l'université d'Oxford ; il est centré sur les aspects biologiques des nanotechnologies. Le second regroupe trois universités et est emmené par l'université de Cambridge. Il s'intéresse aux propriétés des nanostructures et aux dispositifs correspondants. Ces deux programmes sont financés à hauteur d'un montant total de 27 M€ sur 6 ans. En parallèle, le gouvernement a décidé de créer un Centre d'Innovation Universitaire (UIC) dans le domaine des nanotechnologies. Un tel centre est un institut régional organisé autour d'un partenariat avec des industriels, et en 2001, le gouvernement a accordé un financement de plus de 10 M€ pour la création de ce

centre dans la région de Newcastle. Enfin, de nombreux projets de recherches sont soutenus par les agences ou directement par le ministère. En 2002, le gouvernement britannique évalue à environ 50 M€ le soutien qu'il accorde aux nanotechnologies par l'intermédiaire de ses agences de moyens (les « Research Councils »). Il affiche son intention de porter à court terme ce montant à 80 M€ annuels.

En Allemagne, la puissance publique a entrepris de soutenir les nanotechnologies pour développer une économie liée à la conception, la production et la commercialisation de produits issus de la recherche dans des secteurs d'activité variés. Le but avoué est de soutenir le marché du travail et de créer de nouveaux emplois en Allemagne. Grâce au soutien efficace de la puissance publique, à un niveau d'infrastructures excellent en fabrication et en outils de caractérisation, et à une longue tradition en recherche appliquée, l'Allemagne est actuellement reconnue comme le chef de file européen en matière de nanotechnologies.

Depuis 1998, le soutien public allemand aux nanotechnologies s'est notamment traduit par la mise en place et le financement de plusieurs réseaux de compétences. Il s'agit d'un effort incitatif particulier, qui s'ajoute aux projets financés traditionnellement par la puissance publique (centres de recherches collaboratifs à long terme, programmes à moyen terme locaux ou supra-régionaux, etc.), au sein desquels les projets « nano » sont actuellement très bien représentés. Dans le cas des réseaux, la durée de financement est conçue comme une phase d'amorçage, ou comme un cycle normal d'évolution. Cette stratégie de financement ne constitue pas une spécificité « nano », mais traduit une volonté d'enclencher une évolution durable (pas seulement une action pointilliste). En revanche, l'effort financier mérite d'être souligné : 36 M€ sont investis chaque année, ce qui est d'autant plus remarquable que les réseaux financés disposent déjà d'un équipement de bon niveau en micro et nano fabrication. Deux types de réseaux ont été créés : six réseaux fédéraux, financés pendant 5 ans par le ministère fédéral de l'enseignement et de la recherche (BMBF), et un réseau régional financé par la société allemande pour la recherche (DFG) pour une durée de 12 ans. Les réseaux fédéraux possèdent les caractéristiques suivantes :

- les 6 centres de compétence regroupent des industriels (pour moitié environ), des instituts universitaires et des instituts de recherches ; ils regroupent de 30 à 110 partenaires (60 en moyenne) ; même s'ils ont souvent une forte base régionale, les réseaux s'étendent presque tous à l'échelle nationale ;
- un coordonnateur (institut universitaire dans la moitié des cas, institut de recherches dans l'autre moitié) veille à l'organisation des recherches entre les partenaires en s'attachant à favoriser leur caractère pluridisciplinaire ;
- les réseaux sont organisés autour de thèmes assez larges¹⁶, ce qui induit des recouvrements thématiques partiels entre réseaux ;
- il existe une volonté explicite de tirer profit des recherches menées dans le domaine en termes économiques ; pour cela les réseaux sont financés pour une période d'amorçage

¹⁶ Les thèmes des réseaux sont : *nanostructures latérales de taille inférieure à 100 nm* (avec un accent particulier sur les méthodes et des applications visées surtout en électronique), *couches fonctionnelles ultra-minces* (avec des applications très diversifiées : électronique, optique, biomédical et médical, mécanique et protection, nano-systèmes), *travaux surfaciques d'ultra-précision* (avec un accent sur la caractérisation et les procédés d'usinage des surfaces), *nano-analyse* (avec un fort accent sur les mesures de microscopie à sonde locale, pour des applications très diversifiées : électronique, optique, chimie, pharmacie, biotechnologies, protection de l'environnement), *nano-optoélectronique* (particulièrement tourné vers le développement de nouveaux lasers), et *nano-chimie* (les aspects matériaux, là aussi déclinés pour des applications multiples : médecine, pharmacie, génie des surfaces, détection, catalyse, électronique, énergétique, composites, nanoparticules).

de 5 ans à l'issue de laquelle ils sont censés pouvoir dégager en leur sein les ressources nécessaires, en particulier grâce aux produits innovants qui auront été développés ; dans cette optique, le rôle des partenaires industriels est considéré comme crucial dans la deuxième phase de la période d'amorçage ;

- pour les aider à établir leur autonomie à terme, trois des six réseaux ont obtenu le soutien d'investisseurs (sociétés de capital-risque ou sociétés de soutien à la recherche) ; un quatrième a accueilli au sein du consortium plusieurs sociétés de capital-risque et de conseils.

Par ailleurs, le réseau régional soutenu par la DFG est centré sur les universités de Karlsruhe et les instituts de recherches voisins. Ce « centre des nanostructures fonctionnelles » est financé sur 12 ans à hauteur d'un peu plus de 5 millions d'euros par an. Aucun partenaire industriel ne fait partie du réseau, qui vise à organiser une activité centrée sur les matériaux nanostructurés, la nanophotonique, la nanoélectronique, et les matériaux moléculaires, y compris les hybrides biologiques. L'idée est de financer un pôle sur la durée pour permettre une évolution vers une organisation pluridisciplinaire de la recherche.

Enfin, il faut noter que les réseaux mentionnés ne couvrent pas l'ensemble de l'effort allemand dans le domaine des nanotechnologies. Par exemple, il existe ainsi des réseaux sur les matériaux métalliques et céramiques nanostructurés, sur les nanoparticules en phase gazeuse, sur la mise en œuvre des particules découpées sur mesure. Tous ces autres réseaux ont bénéficié de financements significatifs (qui s'ajoutent aux 36 millions d'euros annuels). Un des aspects les plus frappants de tous ces consortiums est l'implication des universitaires et des centres académiques dans une recherche de nature véritablement technologique.

A-1.3. Un pays particulièrement performant : la Suisse¹⁷

La Suisse est un pays de taille modeste, mais qui occupe une place non négligeable dans le domaine des nanotechnologies. Les indices de performances de la production scientifique et technique placent d'ailleurs le pays à la première place.¹⁸ Les raisons de ce succès ne sont pas seulement historiques (la découverte des microscopies de proximité s'est faite à Zurich au début des années 1980), mais tiennent aussi à une organisation particulièrement efficace de la recherche.¹⁹ Les infrastructures sont abondantes, avec six salles blanches de micro fabrication dans *chacune* des écoles polytechniques (Zürich et Lausanne), des salles blanches dans la plupart des universités (Neuchâtel, Bâle, etc.), deux salles blanches spécifiques pour la nanofabrication à Zurich et Neuchâtel.

Les nanosciences ont rapidement été identifiées en Suisse comme un domaine méritant d'être soutenu en raison de ses applications technologiques potentielles. Sur le plan général (c'est-à-dire en dehors des programmes thématiques plus focalisés), le soutien aux nanotechnologies s'est organisé en deux temps. Un programme portant sur la chimie et la physique des surfaces à la fin des années 1980 ayant montré la diversité et la complexité des phénomènes à l'échelle microscopique, le Fonds National Suisse (agence de moyens dépendant de la Confédération) a d'abord lancé en 1994 un Programme National de

¹⁷ Une grande partie des informations concernant la Suisse est tirée d'une documentation aimablement fournie par Georges Crozat, attaché pour la science et la technologie à l'Ambassade de France à Berne.

¹⁸ Voir Ramon Compano et Angela Hullmann, « Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators », *Nanotechnology* 13 (June 2002) 243-247.

¹⁹ Globalement, en Suisse, le secteur privé assure 70% de la recherche. Ici, on se contente d'évoquer le soutien public aux domaines des nanosciences et nanotechnologies.

Recherches principalement voué à la recherche de base. Ce programme a débuté début 1996 et a duré 4 ans et demi. Il était d'un montant relativement modeste (10 M€ pour l'ensemble du programme)²⁰. Il a été vraiment interdisciplinaire et a obtenu un certain nombre de résultats remarquables.²¹ 90 équipes ont soumis un projet sommaire début 1995 ; parmi elles, 40 ont été sélectionnées par un groupe d'experts pour présenter un véritable projet. Dans une deuxième phase à mi-programme, 27 autres projets ont été sélectionnés. Six domaines ont été couverts par le programme : nano-électronique, nano-mécanique, nano-biophysique, nano-chimie, nano-optique, nano-outils et nano-méthodes. Bien qu'ouvert à des équipes de toute origine, les participants au programme venaient presque tous des universités ou des institutions académiques.

Dans un deuxième temps, à partir de l'année 2000, des programmes d'autres types ont été lancés. Le plus remarquable est sans doute le Programme de Technologie Orientée TOP NANO 21 lancé par le Conseil des Écoles Polytechniques Fédérales et la Commission pour la Technologie et l'Innovation (émanation de l'Office fédéral de la formation professionnelle et de la technologie (OFFT), organisme chargé du transfert des technologies proches des applications pratiques à l'interface entre la recherche et l'économie). Le programme est prévu pour une durée de 4 ans et son enveloppe financière est de l'ordre de 40 M€. Fin 2001, 140 projets étaient soutenus. Mais il faut souligner que ce programme est loin de représenter l'ensemble de l'effort suisse dans le domaine des nanotechnologies. Entre autres, le Fonds National Suisse a lancé en 2001 des Programmes de Recherche Nationaux (NCCR) destinés à offrir une interface entre des institutions de recherches et l'industrie. Ces programmes représentent un effort financier d'environ 300 M€ sur 4 ans, dont un peu plus de la moitié est pris en charge par le gouvernement fédéral. Deux de ces programmes relèvent des nanotechnologies (le programme « nanosciences », et le programme « photonique quantique ») et représentent environ 20% de l'effort financier du gouvernement fédéral. Le programme « nanosciences » regroupe 8 institutions académiques, une centrale de services privée à but non lucratif (le Centre Suisse pour l'Électronique et la Microtechnologie) et une entreprise (IBM Zurich). Il dispose pour ses 4 premières années d'un budget équivalent à TOP NANO 21, dont le tiers provient de fonds fédéraux et le tiers de fonds propres de l'Université de Berne, chef de file du programme. Le programme « photonique quantique » dispose quant à lui d'un budget de l'ordre de 22 M€ sur 4 ans.

Le programme TOP NANO 21 s'adresse aux institutions académiques et à l'industrie. L'expertise en est assuré par un groupe d'experts internationaux de premier plan. L'un des objectifs prioritaires est la promotion d'une coopération interdisciplinaire –la formation de domaines d'excellence– entre scientifiques et ingénieurs, avec pour objectif à plus long terme de former des « nano-ingénieurs ». TOP NANO 21 se concentre sur :

- l'élargissement de l'horizon scientifique des établissements de recherche dans les domaines d'importance et le renforcement de l'attention portée à la technologie ;
- le renforcement de l'économie suisse par le développement et la mise en valeur de nouvelles technologies nanométriques ;
- le soutien aux préparatifs à la création de nouvelles entreprises ;
- l'intégration du thème « Nanomètre » dans l'enseignement.

Ces quatre approches laissent un large place aux propositions créatives et originales des chercheurs et entrepreneurs. La motivation d'un tel choix est de laisser le maximum de

²⁰ Ce montant est sensiblement identique à celui de l'Action Concertée CNRS/Ministère de la Recherche/CEA lancée début 2002 en France.

²¹ Le rapport final abrégé du projet peut être consulté sur : <http://www.snf.ch/NFP/NFP36/RFFranzoesisch.pdf>

créativité s'exprimer dans les projets. Les propositions émanent des universités, et le soutien est accordé sous la forme de projets individuels (n'impliquant que les auteurs de la proposition), de projets d'alliance (projet majeur impliquant une entreprise partenaire), ou d'une étude de faisabilité (en prélude à un projet majeur, chercheurs et partenaires industriels sont soutenus pour apprendre à travailler ensemble, évaluer les risques et les chances d'aboutir du projet). Les raisons de cette politique sont explicites : la puissance publique souhaite créer un environnement favorable à l'éclosion d'une myriade de projets, et laisser ensuite l'industrie structurer le marché. En d'autres termes, le programme souhaite donner aux acteurs la meilleure connaissance possible des besoins de l'industrie, sans pour autant faire du programme un instrument de soutien direct aux entreprises.

A-1.4. Un pays en phase de lancement : le Canada²²

Le Canada ne paraît pas très en avance dans le domaine des nanotechnologies, et jusqu'à présent, on assiste surtout à l'inventaire des activités –fragmentées– des équipes dans le domaine, et à des annonces. Ainsi, 2001 a vécu deux annonces majeures : le projet de l'Institut National des Nanotechnologies (INN), mené conjointement par le gouvernement fédéral et le gouvernement provincial d'Alberta, et le projet NanoQuébec qui regroupe six universités québécoises soutenu par le gouvernement provincial par l'intermédiaire de Valorisation-Recherche Québec (VRQ), un organisme destiné à rapprocher la recherche universitaire de l'innovation. La première phase du projet NanoQuébec représente un effort annuel de 2,5 M€ pendant trois ans. Ce financement est réparti sur une vingtaine de projets.

L'INN représente un effort financier d'environ 85 M€ réparti sur cinq ans, à parité entre gouvernement fédéral et gouvernement provincial. Au delà de la phase de lancement des cinq premières années, le gouvernement fédéral prévoit de maintenir une dotation budgétaire annuelle de 8,5 M€ pour l'institut. C'est actuellement le projet canadien le mieux identifié au sein du domaine. Ses promoteurs ont tenté d'évaluer quel sera l'état de l'art dans cinq ans lorsque l'institut sera tout à fait opérationnel, de définir les secteurs qui pourront avoir un impact positif pour l'innovation et l'économie en Alberta, et ceux dans lequel l'institut pourra être compétitif et même chef de file au plan mondial. Ils ont ainsi sélectionné les thèmes de recherches qu'ils souhaitent développer : les nano-systèmes adaptatifs et programmables pour des applications en génie des protéines et dans le domaine des matériaux intelligents, les matériaux programmables et les matériaux adaptatifs. Des débouchés sont ainsi espérés dans les domaines des sciences de la vie, des technologies de l'information et de la communication, et de l'énergie. L'institut est actuellement en phase de lancement. L'évaluation du projet scientifique de l'institut par une assemblée d'experts internationaux doit être organisée courant 2002, et à la fin de l'année les premiers groupes de recherche doivent débiter leurs travaux sur un site provisoire. Le recrutement d'au moins une « locomotive » de premier plan au niveau international est prévu pour le début 2003, la livraison des locaux définitifs à l'été 2005 et l'évaluation internationale des projets de recherches et des équipes fin 2005. L'institut serait complètement en place début 2006.

Au Canada, dans des proportions sans doute encore plus grandes qu'aux États-Unis, les gouvernements fédéraux et provinciaux, financent conjointement la recherche en général, et en nanotechnologies en particulier. La puissance publique distribue ses financements soit

²² Une grande partie des informations concernant le Canada est tirée du document « Nanotechnologies : aperçu de la situation au Canada » élaboré par la Mission pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France à Ottawa, et aimablement fourni par Jean Sarrazin, conseiller pour la science et la technologie.

directement, soit par l'intermédiaire de fondations privées, soit encore par l'intermédiaire d'institutions communes entre acteurs du secteur public (gouvernements, universités, etc.) et du secteur privé. Du fait de cette fragmentation, et de l'absence d'un organisme qui coordonne ou supervise l'effort national, il est difficile de cerner exactement l'ampleur du soutien aux nanotechnologies. Qualitativement, on peut seulement remarquer que l'ensemble des acteurs du système canadien d'aides à la recherche a des actions en nanotechnologies à des titres divers. Sont ainsi concernés 6 des 16 instituts du Conseil National de la Recherche au Canada (CNRC, le principal organisme de recherche fédéral), une des agences de moyens (le CRSNG, spécialisé notamment dans les sciences de l'ingénieur), la Fondation Canadienne pour l'Innovation (qui finance les infrastructures), et 4 des 20 réseaux de centres d'excellence (partenariat de recherche et développement entre universitaires, secteur privé, gouvernement, organismes du secteur de la santé). Au niveau provincial, des efforts notables existent en Ontario, au Québec et en Alberta. On peut donc conclure qu'il existe au Canada une mobilisation certaine dans le domaine des nanotechnologies, mais que faute d'un effort de coordination ou simplement de réflexion commune entre les différents acteurs (chercheurs et bailleurs de fonds), il est difficile d'évaluer l'effort entrepris et d'identifier le domaine au sein des recherches en cours.

A-1.5. L'Union Européenne

Jusqu'à récemment, les nanotechnologies ne faisaient pas partie des objectifs prioritaires affichés par l'Union Européenne. Ceci ne veut pas dire que le soutien au domaine était inexistant, mais il s'exprimait plus ou moins marginalement au travers de programmes dévolus à des priorités exprimées différemment. La situation a radicalement changé lors de la phase d'élaboration du 6^{ème} Programme Cadre de Recherche et Développement (PCRD), où les nanotechnologies constituent l'un des objectifs thématiques majeurs du programme, identifiant ainsi la priorité accordée au domaine au plan européen.

L'évaluation du soutien aux nanotechnologies dans le cadre du 4^{ème} PCRD (1994-1998) est difficile à faire, en raison de l'absence d'identification du domaine lui-même lors de l'exécution du programme.²³ Toutefois, cette époque marque le début au niveau européen d'une réflexion identifiant les nanotechnologies comme un secteur clé pour l'avenir, recensant les efforts plus ou moins fragmentaires entrepris par les différents états européens et analysant les freins qui empêchent le développement du domaine au niveau européen.²⁴ Cette prise de conscience s'est poursuivie pendant l'exécution du 5^{ème} programme cadre (1998-2002), au cours duquel le soutien accordé par l'Union Européenne au domaine est évalué à environ 45 M€ par an. Dans le 5^{ème} PCRD, les nanotechnologies intéressent virtuellement les quatre programmes thématiques et les trois programmes horizontaux mis sur pied par la commission. La majeure partie de ce soutien s'opère par le

²³ La commission estime à environ 80 le nombre des projets concernant les nanotechnologies soutenus dans le cadre du 4^{ème} PCRD. Néanmoins, lorsque l'on recherche dans la base de données « ESPRIT » (pour l'époque concernée) les projets se référant aux nanotechnologies, on n'en trouve que trois.

²⁴ On pourra par exemple se rapporter à l'article d'I. Malsch, « L'importance des approches interdisciplinaires : le cas de la nanotechnologie », IPTS Report N°13 (avril 1997), Séville (Espagne). L'auteur y explique déjà que l'essor du domaine nécessite : i) la mise en place de réseaux verticaux, orientés vers les applications de la nanotechnologie dans les différents secteurs industriels, et des réseaux horizontaux, de portée interdisciplinaire, permettant d'échanger les informations sur les progrès effectués et d'organiser la formation ; ii) un effort organisationnel pour coordonner les initiatives de recherche nationales, identifier les sujets clés des programmes de recherche pluridisciplinaires, et inciter au renforcement des liens entre les disciplines concernées ; iii) une politique d'aide aux PME hautement spécialisées issues de la recherche universitaire sur la nanotechnologie.

biais du financement direct de projets de recherches. Les objets de ces projets sont extrêmement variés : dispositifs pour la nanoélectronique, magnétorésistance géante, nanotubes de carbone, capteurs biologiques, diagnostic à l'échelle moléculaire, matériaux nano-composites, microscopie à force atomique, etc.

A l'occasion du 6^{ème} PCRD (2002-2006), l'Union Européenne affiche explicitement un soutien fort aux nanotechnologies, intégrant le fruit des réflexions menés lors des années précédentes, en vue de créer un environnement favorable à la recherche et au développement dans le domaine des nanotechnologies. Cet objectif serait poursuivi à l'aide d'actions multidisciplinaires, au premier rang desquelles on trouve des projets de recherches à long terme impliquant normalement à la fois des partenaires académiques et des partenaires industriels. Sur un financement total de 17 500 M€, 1 300 M€ devraient être consacrés à la priorité « nanotechnologie et nanosciences, matériaux multifonctionnels fondés sur la connaissance, et nouveaux procédés et dispositifs de production », dont semblerait-il environ 700 M€ à la recherche en nanotechnologie.²⁵ Par ailleurs, sur le plan thématique, les nanotechnologies concernent aussi d'autres priorités du 6^{ème} PCRD, notamment « les sciences du vivant, la génomique et les biotechnologies pour la santé » et « les technologies de la société de l'information ».

L'objectif affiché du programme serait de traduire la place importante occupée par l'Europe dans le domaine des nanosciences en un véritable avantage concurrentiel pour l'industrie. Pour cela, le programme voudrait promouvoir l'établissement d'une industrie européenne à forte composante de recherche et développement technologique autour des nanotechnologies, et promouvoir l'adoption des nanotechnologies dans les secteurs industriels existants. Par ailleurs, le programme voudrait mettre en place une politique active d'encouragement des entreprises industrielles et des PME, y compris les « jeunes pousses », notamment par la promotion d'interactions durables entre l'industrie et le milieu de la recherche sous la forme de consortiums menant des projets de masse critique importante. Pratiquement, le programme mettra en œuvre des outils nouveaux : il soutiendra des « projets intégrés » pour resserrer les liens entre la recherche et l'innovation, en encourageant la coopération entre la recherche et l'industrie. Il financera aussi des « réseaux d'excellence » destinés à promouvoir une intégration durable des acteurs publics dans le domaine de la recherche en nanotechnologie. On peut toutefois s'interroger sur l'adéquation de ces nouveaux outils pour le soutien à l'innovation et aux transferts de technologie. La mise sur pied de vastes consortiums paraît en effet peu adaptée aux exigences de souplesse et de rapidité auxquelles sont confrontées les PME et les jeunes pousses.²⁶

En résumé, le 6^{ème} PCRD voit à la fois l'émergence des nanotechnologies comme une grande priorité identifiée, et l'émergence de nouveaux outils pour gérer le soutien à la recherche au niveau européen. Mais il paraît acquis que ces changements ne vont pas modifier la répartition des rôles entre le soutien européen et les soutiens nationaux. La création des infrastructures n'est considérée comme une priorité à gérer au niveau européen que pour les très grands équipements à vocation transnationale. A l'inverse, l'introduction

²⁵ L'Union Européenne ambitionne d'être ainsi à la hauteur de l'initiative américaine (qui consacre environ cette somme aux nanotechnologies pour l'année fiscale 2003), compte tenu du fait qu'elle finance environ le quart des dépenses publiques contractuelles de la recherche civile en Europe.

²⁶ Pour cette raison, aux États-Unis, une partie du soutien est explicitement réservée aux actions en faveur des petites entreprises de technologie, au travers de programmes spécifiques comme les programmes SBIR ou STTR.

des nouveaux outils de gestion et le recensement des compétences mis en place dans le 6^{ème} PCRD paraissent favoriser encore plus que par le passé l'orientation des financements vers les équipes déjà « en place » dans le domaine, ayant démontré au préalable leur savoir faire, et disposant déjà des infrastructures nécessaires à la mise sur pied d'une activité de bon niveau en nanotechnologie. En d'autres termes, la politique mise en place dans le 6^{ème} PCRD est essentiellement dirigée vers un soutien efficace au développement des activités et au fonctionnement des infrastructures existantes, mais pas à leur initiation.

A-2. Comparaison succincte des positions en France et à l'étranger

A-2.1. La politique française actuelle

A-2.1.1 Le paysage général :

Jusqu'à l'an passé, les actions de soutien au domaine étaient relativement isolées et de faible ampleur financière. C'étaient essentiellement certains programmes interdisciplinaires du CNRS (Ultimatech, Matériaux, ...) et certaines ACI du ministère. En sus, la Direction de la Technologie a mis en place le Réseau Micro- et Nano- Technologie (par pour favoriser le partenariat public-privé, en assurant le couplage recherche-industrie dans le domaine (depuis trois ans, la puissance publique a engagé un soutien d'environ 32 M€ au travers de ce réseau). Le souci de mieux coordonner les actions et de les rendre plus conséquentes a conduit les différents acteurs à se regrouper à partir de 2002 au sein de l'AC Nanosciences et Nanotechnologies, permettant à cette action concertée de réunir un budget de 10 M€, soit environ trois fois plus que les soutiens aux projets mis en place précédemment par les différents partenaires. De plus, dans l'effort français, il convient de ne pas oublier les actions du CEA autour du LETI et du pôle Minatec. Même si, dans ce dernier cas, la part des microtechnologies a été dominante jusqu'à présent, la part des nanotechnologies va en s'amplifiant. Enfin, on peut mentionner la mise en place du réseau Nirvana pour fédérer les efforts dans le domaine des nanomatériaux.

La puissance publique souhaite mener de front des actions en nanosciences et des actions en nanotechnologie. Concrètement, cette volonté se traduit par des programmes communs entre Direction de la Recherche et Direction de la Technologie au sein du ministère. Dans le futur, il est prévu de continuer et amplifier l'action mise en place avec l'Action Concertée « Nanosciences et Nanotechnologies », c'est-à-dire : de soutenir les projets, de favoriser la constitution d'équipes transversales, et de soutenir des formations universitaires aux nanotechnologies, au niveau maîtrise/master en particulier.

A-2.1.2 Les grandes centrales :

Dans le cadre précédent, le ministère a décidé un effort substantiel de remise à niveau du réseau des grandes centrales de technologie pour les porter à un niveau compétitif. Ce réseau est constitué de quatre centrales académiques (Institut d'Électronique Fondamentale à Orsay, Laboratoire de Physique des Nanostructures à Marcoussis, Institut d'Électronique et de Microélectronique du Nord à Lille et Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes à Toulouse) et le pôle Minatec organisé autour du LETI (à Grenoble). L'effort financera les grandes centrales académiques à hauteur de 100 M€ sur trois ans. Selon le

ministère, leur mission est d'assurer la recherche technologique de base et la recherche amont en nanotechnologies. Le ministère a demandé à ces centrales d'adopter un fonctionnement ouvert, c'est-à-dire de consacrer une partie des moyens qui leur sont alloués (dans la limite de 15%) à des projets exogènes. Ces projets seraient des projets de recherche pour lesquels il n'existe pas d'intérêt direct de la part de la centrale. Celle-ci se contenterait de vérifier la compatibilité technique du projet avec les moyens dont elle dispose, et d'en examiner les implications financières. La propriété intellectuelle du projet et sa maîtrise scientifique resteraient entre les mains des proposant auxquels, dans les limites financières prévues et sous réserve des possibilités techniques, le soutien serait dû. Bien entendu, les équipes extérieures restent invitées, si elles le souhaitent, à intéresser les équipes des centrales à leurs projets et à les mener en collaboration avec elles.

A-2.1.3 Les centrales spécifiques :

En sus des grandes centrales nationales de technologie, le ministère a prévu de mettre en place des centrales de régionales de proximité dite « centrales spécifiques ». Ces centrales, constituées en réseau, apporteront aux équipes du domaine un soutien supplémentaire à celui fourni par les grandes centrales. Elles seraient dotées d'équipements spécifiques, travailleraient en liaison avec les grandes centrales, et seraient particulièrement concernées par la formation.²⁷ Ces centrales ne bénéficieraient pas d'outils aussi variés que les grandes plates-formes nationales, mais d'outils spécifiques leur permettant d'être compétitives dans un domaine choisi. Elles permettraient à leurs utilisateurs d'aborder le « nano » en leur fournissant, à l'échelle régionale, des moyens d'interface entre les objets nanométriques et les systèmes de mesure. Par ailleurs, elles fourniraient aux universités des moyens pour l'enseignement. Actuellement, huit centres spécifiques ont été qualifiés au titre des nanotechnologies. Ce sont les pôles de Nancy/Strasbourg, Besançon, Lyon, Grenoble, PACA-Marseille, Montpellier, Bordeaux/Limoges et Rennes. Toutefois, aucun financement n'est encore prévu pour remettre à niveau leur équipement.²⁸

A-2.1.4 Le couplage industrie-université :

Il s'agit d'un aspect dont la puissance publique veut se préoccuper. Au sein du ministère de la recherche, cet aspect relève principalement du champ d'actions de la Direction de la Technologie, qui a mis en place le RMNT. On peut toutefois relever qu'au sein de ce réseau, le fait de privilégier des critères essentiellement inspirés de préoccupations industrielles a provoqué un glissement des programmes retenus vers des actions de développement à court terme, du coup principalement dans le domaine des microtechnologies. D'autre part, il semble qu'il y ait peu de concertation entre les ministères de la recherche et de l'industrie pour harmoniser leurs actions de soutien aux infrastructures pour la nanotechnologie.

A-2.1.5 La coordination avec les autres programmes internationaux :

Sur le plan général, des contacts limités ont été établis entre les représentants du ministère français et les responsables des actions en nanosciences et nanotechnologies à l'étranger :

²⁷ en collaborant notamment avec le Comité National de Formation en Microélectronique (CNFM), qui coordonne déjà le réseau des centres universitaires de ressources disposant de moyens spécialisés en microélectronique

²⁸ Seule une enveloppe de 75 k€ a été réservée dans le cadre de l'Action Concertée Nanosciences et Nanotechnologies pour permettre leur mise en réseau.

- lors de la visite en France au mois de juillet 2002 des représentants de la NNI, il a été convenu d'organiser très prochainement un atelier franco-américain commun sur 2 ou 3 thématiques en cours de discussions ;
- il existe des contacts avec les responsables canadiens pour une visite en France d'une délégation « Nanosciences-Nanotechnologies » programmée le 18 novembre 2002.

Par ailleurs, des contacts ont été pris avec des partenaires européens en vue de coopérer sur le plan des infrastructures, en particulier pour permettre aux équipes des pays partenaires d'accéder aux centrales technologiques de l'un ou l'autre des pays. Des échos favorables ont été enregistrés de la part des responsables espagnols et italiens, mais les partenaires allemands ou néerlandais, les mieux équipés, n'ont pas souhaité donner suite. Ceci montre que l'utilisation et le partage des instruments de nanofabrication n'obéissent pas à la même logique que les grands instruments comme les accélérateurs de particules ou les synchrotrons.

A-2.2. Les particularités des modes d'action français

Les nanotechnologies sont un domaine émergent, dont le cycle recherche / valorisation technologique / industrialisation ne fait que démarrer. L'analyse des indicateurs scientifiques et techniques montre que, grâce à son activité en nanosciences, la position de la France sur la ligne de départ n'est pas mauvaise.²⁹ Compte tenu des enjeux et des programmes engagés par la plupart des pays concurrents / partenaires, on ne peut bien sûr que se réjouir du réveil de l'action publique en France. Elle n'en reste pas moins encore très insuffisante si l'on se réfère aux actions à l'étranger, et à des spécificités contraignantes :

- en ce qui concerne les infrastructures, même au terme des actions entreprises, le nombre de chercheurs ayant accès à des moyens technologiques restera faible : 200 à 300 environ dans les grandes centrales académiques (en comptant les chercheurs appartenant aux laboratoires où sont implantées les centrales, et en tenant compte de la part de 15% consacrée aux projets exogènes), sans doute autant dans les centrales de deuxième rang.
- la mobilisation des institutions est insuffisante, et par là-même celle des chercheurs. L'impact des mesures en cours sur les outils à la disposition du plus grand nombre reste marginal³⁰. Les crédits incitatifs alloués jusqu'à présent par le ministère sont loin d'être au niveau de ceux accessibles aux équipes étrangères. Cette faiblesse générale des crédits contractuels en France est encore plus sensible dans le domaine des nanotechnologies, en raison de la priorité affichée dans tous les autres pays. En France, l'effort en faveur du domaine annoncé dans le cadre du budget 2003 marque une rupture positive en termes de moyens financiers. Encore faut-il qu'il soit déployé de la façon la plus efficace pour rattraper le retard pris par rapport aux autres pays industrialisés.

²⁹ D'après l'étude de R. Compano et A. Hullmann mentionnée plus haut, la France se situerait au cinquième rang mondial des publications scientifiques du domaine dans la période 1997-1999, et au quatrième rang en ce qui concerne les brevets de la période 1991-1999 (c'est-à-dire à un bien meilleur rang que pour les brevets toutes disciplines confondues). Il faut noter que ce résultat flatteur est obtenu sur une période d'amorçage de l'activité, avant la rupture provoquée par le lancement de programmes spécifiques dans de nombreux pays.

³⁰ Dans l'évaluation du soutien, on oublie souvent de distinguer l'aide aux projets et le financement des infrastructures.

- Le choix de concentrer l'ensemble de ses moyens pour soutenir quelques grandes centrales est décalé par rapport à l'étranger où cette démarche n'est plus la règle depuis 10 ans. La stratégie développée par la plupart des pays en matière de nanotechnologies est au contraire de s'appuyer surtout sur un réseau d'infrastructures délocalisées et redondantes, et de soutenir un maximum de projets favorisant l'innovation. Même lorsque, pour les opérations d'envergure, le nombre de programmes lancés est nécessairement restreint, le financement est important, et les procédures choisies incitent au regroupement du plus grand nombre possible d'acteurs (disposant chacun de leurs propres infrastructures) sur des projets cohérents (comme en Suisse, en Grande-Bretagne ou en Allemagne par exemple).
- Une grande partie des financements se fait hors appel d'offres. Ce parti pris prive la puissance publique d'importants effets de levier sur lesquels s'appuient la plupart des pays partenaires. La compétition organisée, l'incitation au regroupement (parfois explicitement organisée au sein de certaines procédures comme en Suisse) sont des outils d'optimisation de l'aide publique. Dans la mesure où les appels d'offres sont suffisamment ouverts, l'aide publique touche ainsi le plus grand nombre et a plus de chances d'être attribuée prioritairement aux projets les plus dynamiques et les plus innovants.
- L'absence de synergie entre les différentes institutions favorise l'émiettement de l'aide et l'absence de cohérence. Ceci est vrai pour les organismes de recherche dont les champs d'intervention se recoupent, sans pour autant qu'une concertation favorise une conduite harmonisée des actions thématiques de chacun (en biologie par exemple, le CNRS, le CEA et l'INSERM –pour ne parler que des grands organismes publics– conduisent leurs efforts plus ou moins indépendamment les uns des autres). Ceci est vrai aussi au niveau de la tutelle, lorsque le ministère de la recherche ignore presque tout des efforts entrepris par le ministère de l'industrie pour mettre sur pied une plate-forme technologique régionale ouverte aux industriels. Cet état de fait n'est pas spécifiquement français, mais il est remarquable de constater que pour soutenir les nanotechnologies, certains pays ont réussi à rationaliser et rendre cohérents une bonne partie de leurs efforts en organisant des programmes inter-organismes (comme aux États-Unis l'initiative « NNI »). Ainsi, aux États-Unis, les états – qui restent évidemment maîtres de leurs propres programmes– inscrivent le plus souvent leur soutien en complément du soutien fédéral (et industriel), afin de maximiser leur impact.

Il devient donc urgent d'agir au bon niveau pour soutenir les nanotechnologies afin de maintenir la compétitivité du pays. Il paraît essentiel à cet égard de faire évoluer certains modes d'intervention pour optimiser le soutien et dépasser certaines limitations.

Les exemples des programmes entrepris à l'étranger depuis quelques années constituent à cet égard des expériences intéressantes, dont il convient de s'inspirer en gardant bien à l'esprit qu'il faut toujours les adapter aux spécificités françaises.

BIBLIOGRAPHIE

Éléments de R&D généraux :

« Science et Technologie - Indicateurs 2002 », Rapport de l'Observatoire des Sciences et Technique, sous la direction de Rémi Barré et Laurence Esterle, Economica (Paris) 2002.

« Chiffres Clés 2001 - Édition spéciale : Indicateurs pour l'étalonnage des politiques nationales de recherche », Direction Générale de la Recherche, Commission européenne (Luxembourg) 2001.

« Science and Engineering Indicators – 2002 », National Science Foundation (Arlington) 2002 (consultable sur <http://www.nsf.gov/sbe/srs/seind02/start.htm>).

Stefanie Schelhowe, « R&D Project Funding in the EU- governmental investments in EU member states in the year 2000 », Koordinierungsstelle EG der Wissenschaftsorganisationen (Brussels) avril 2002.

« Investing in innovation – A strategy for science, engineering and technology », HM Treasury, Department of Trade and Industry, and Department for Education and skills (London) July 2002.

C. Haigneré, « Le projet de budget civil de recherche et de développement technologique (BCRD 2003) », conférence de presse du 25 septembre 2002 (compte-rendu consultable sur <http://www.recherche.gouv.fr/discours/2002/plf2003.htm>).

Éléments sur les politiques pour les nanotechnologies :

Ramon Compano et Angela Hullmann, « Forecasting the development of nanotechnology with the help of science and technology indicators », Nanotechnology 13, 243-247, 2002.

M. C. Roco, « International Strategy for Nanotechnology Research and Development », J. Nanoparticle Research 3, 353-360, 2001.

I. Malsch, « L'importance des approches interdisciplinaires : le cas de la nanotechnologie », Institute for Prospective Technological Studies (Séville), Report N°13, avril 1997 (consultable sur <http://www.jrs.es/pages/iptsreport/vol13/french/Tec1F136.htm>).

« Societal implications of nanoscience and nanotechnology », National Science Foundation, March 2001, (consultable sur <http://www.nsf.gov/home/crssprgm/nano/nsfnireports.htm> et publié par Kluwer Acad. Pub., 2001).

N. Tinker, « 2001 business of nanotech survey », Nanobusiness alliance (New York) October 2001.

« National Nanotechnology Initiative – the initiative and its implementation plan », National Science and Technology Council, June 2002.

« Small wonders, endless frontiers : review of the National Nanotechnology Initiative », National Research Council, June 2002 (consultable sur <http://www.nsf.gov/home/crssprgm/nano/nsfnireports.htm>).

« Mapping excellence in nanotechnologies – preparatory study », European Commission (nanotechnology expert group and Eurotech data), décembre 2001.

« Joint EC/NSF workshop on nanotechnologies (Toulouse, 19-20 october 2000) », European Communities (Luxembourg) 2001 (consultable sur http://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/nano_workshop_001020_proceedings.pdf).

« Nanotechnology – Revolutionary opportunities and societal implications » (3rd Joint EC/NSF workshop on nanotechnologies, Lecce, 31 janvier-1^{er} février 2002), European Communities (Luxembourg) 2002 (consultable sur http://ftp.cordis.lu/pub/nanotechnology/docs/nano_workshop_001020_proceedings.pdf).

« Nanotechnology in the European Research Area », European Commission, brochure consultable sur <http://www.cordis.lu/nanotechnology>, may 2001.

« TOP Nano 21 - Second Annual Report 2001 », Board of the Swiss Federal Institutes of Technology (ETH, Zurich) and Commission for Technology and Innovation (Bern) 2001.

« Programme National de Recherches Nanosciences », Résumé final 1996-2000, Lucien Trueb (ed.), Swiss National Science Foundation (Bern) 2000.

« Profils des Pôles de recherche nationaux 2001/2002 », Fonds national suisse (Berne) 2001.

« Micro and Nano Technology in Switzerland - an Overview », Nano for People Newsletter - Special Issue May 2002, Judith Light Feather (Pub) 2002 (consultable sur <http://nanocomputer.org/reviews/SwissReview.pdf>)

S. Peltier et P. Jaumier, « Les Nanotechnologies en Grande-Bretagne », Service Science et Technologie de l'Ambassade de France à Londres, septembre 1998.

« Nanotechnology in the UK », The Institute of Nanotechnology (Stirling, UK) 2001.

N. Cluzel, « Programme incitatif du BMBF dans le domaine des nanotechnologies », Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France à Berlin, janvier 2002.

« Le Centre des Nanostructures Fonctionnelles », Service pour la Science et la Technologie de l'Ambassade de France à Berlin, 2002.

« Nanotechnologies : un aperçu de la situation au Canada en avril 2002 », Mission pour la Science et la Technologie, Ambassade de France au Canada, 2002.

« The need for measurement and testing in nanotechnology », Danish Institute of Fundamental Metrology (rapport du groupe d'expert rattaché au thème « Croissance compétitive et durable » du 5^{ème} PCRD), février 2002 (consultable sur <http://europa.eu.int/comm/research/fp5/pdf/hleggrowth-nanotechnology.pdf>).

R. W. Siegel, E. Hu and M. C. Roco (eds.), « Nanostructure science and technology – R&D status and trends in nanoparticles, nanostructured materials and nanodevices », Interagency Working Group on Nanoscience, engineering and technology (Washington) september 1999.

« Condensed matter and materials physics – Basic research for tomorrow's technology », National Academy Press (Washington) 1999.

Publications et revues choisies sur les nanotechnologies :

« Nanotechnology - shaping the world atom by atom », Interagency Working Group on Nanoscience, engineering and technology (Washington) september 1999 (brochure consultable sur <http://www.wtec.org/loyola/nano/IWGN.Public.Brochure/>).

« Nanosciences – Au cœur des molécules », Pour la Science 290 (numéro spécial décembre 2001).

« A look inside nanotechnology (special issue) », The AMPTIAC Newsletter vol. 6 n°1, US Defense Information Systems Agency, 2002.

« International Technology Roadmap for Semiconductors » (consultable sur <http://public.itrs.net/Files/2001ITRS/Home.htm>).

R. Compano, « Technology roadmap for nanoelectronics » (2nd edition : november 2000), European Communities (Luxembourg) 2001.

« Nanomatériaux », Observatoire Français des Techniques Avancées (Paris) Octobre 2001.

« Frontiers in surface and interface science », Surface Science 500 (numéro spécial), 2002.

G. Timp, « Nanotechnology », Springer, 1999.

N. Taniguchi, « Nanotechnology : integrated processing for ultra-precision and ultra-fine products », Oxford University Press, 1996.

H. S. Nalwa, « Nanostructured materials and nanotechnology », Academic Press, 2002.

« Hierarchical structures in biology as a guide for new materials technology », National Academy Press (Washington) 1994.

P. K. H. Ho, J.-S. Kim, J. H. Burroughes, H. Becker, S. F. Y. Li, T. M. Brown, F. Cacialli and R. H. Friend, « Molecular-scale interface engineering for polymer light emitting diodes », Nature 404, 481-484, 2000.

R. H. Baughman, A. A. Zakhidov and W. A. de Heer, « Carbon nanotubes – the route toward applications », Science 297, 787-792, 2002.

P. Vettiger, G. Cross, M. Despont, U. Drechsler, U. Dürig, B. Gostmann, W. Häberle, M. A. Lantz, H. E. Rothuizen, R. Stutz, and G. K. Binnig, « The Millipede – Nanotechnology entering data storage », IEEE Transactions on nanotechnology 1, 39-55 (2002).

X. Duan, J. Wang and C. M. Lieber, « Synthesis and optical properties of gallium arsenide nanowires », Applied Physics Letters 76, 1116-1118, 2000.

M. Biswas and S. S. Ray, « Recent progress in synthesis and evaluation of polymer-montmorillonite nanocomposites », Advances in Polymer Science 155, 167-221 (2001).

C. R. Lowe, « Nanobiotechnology : the fabrication and applications of chemical and biological structures », Current Opinion in Structural Biology 10, 428-434 (2000).

R.K. Soong, G. D. Bachand, H. P. Neves, A. G. Olkhovets, H. G. Craighead, and C. D. Montemagno, « Powering an inorganic nanodevice with a biomolecular motor », Science 290, 1555-1558, 2000.

T. Klaus-Joerger, R. Joerger, E. Olsson and C.-G. Granqvist, « Bacteria as workers in the living factory : metal-accumulating bacteria and their potential for materials science », Trends in Biotechnology 19, 15-20 (2001).

R. Venkatasubramanian, E. Siivola, T. Colpitts and B.O'Quinn, « Thin-film thermoelectric devices with high room-temperature figures of merit », Nature 413, 597-602 (2001).

A. Hagfeldt and M. Grätzel, « Molecular photovoltaics », Accounts of Chemical Research 33, 269-277 (2000).

I. Brigger, C. Dubernet and P. Couvreur, « Nanoparticles in cancer therapy and diagnosis », Advanced Drug Delivery Reviews 54, 631-651 (2002).

Sites internet remarquables

Site du programme américain : <http://www.nano.gov>

Site de compilation de sites : <http://www.zyvex.com/nano>

Site du programme de nanobiotechnologies de Cornell : <http://www.nbtc.cornell.edu>

Site du centre californien de nanosciences : <http://www.cnsi.ucla.edu/mainpage.html>