

2

NANOSCIENCES ET NANOTECHNOLOGIES

Pascale LAUNOIS

Henri Benisty

Alain Berthoz

Robert Corriu

Claire Dupas

Albert Fert

Philippe Grangier

Claude Henry

Christian Joachim

Christine Joblin

Philippe Kapsa

Isabelle Ledoux-Rak

Jean-Yves Marzin

Jean-Pierre Nozières

Bernard Pannetier

Alain Pérez

Didier Stievenard

Christophe Vieu

Jacques Yvon

Joseph Zyss

Les nanosciences et les nanotechnologies connaissent depuis une quinzaine d'années un formidable essor, grâce au développement de nouveaux outils d'élaboration, d'observation et d'analyse.

Le terme « nano » est utilisé en référence à l'échelle du nanomètre, et plus largement pour les dimensions nettement submicroniques. Aux très petites échelles, de nouveaux phénomènes apparaissent (effets de taille, effets quantiques, etc.). Les nanosciences s'intéressent d'une part, aux nouveaux phénomènes au niveau des nano-objets, et d'autre part, aux interactions entre objets nanométriques. Les travaux des chercheurs vont de la réalisation, de la synthèse chimique et de l'étude du nano-objet individuel, pour remonter à ses propriétés intrinsèques, à la réalisation et à l'étude d'assemblées de nano-objets en interaction ou non suivant la densité d'intégration. Les nanotechnologies – formalisation des concepts et procédés des nanosciences en vue d'applications – ont d'ores et déjà de larges domaines d'application en microélectronique et dans le domaine des matériaux, et un ensemble de champs prospectifs auront sans aucun doute dans les décennies à venir des retombées sociétales et économiques majeures, en accroissant les possibilités dans les domaines pré-cités, mais aussi par exemple en biotechnologie, en photonique ou dans les technologies de l'information.

Les nanosciences et nanotechnologies constituent-elles un domaine nouveau ? Alors que l'on utilise depuis des siècles des nanomatériaux tels que les verres et les céramiques, et que la chimie fait appel à des molécules de tailles diverses, ce qui a surtout changé c'est la possibilité de synthétiser de manière de mieux en mieux contrôlée, d'observer, de manipuler et de comprendre les nano-objets et leur assemblage. Notre conception du rôle du nano-objet en a été modifiée : de composante élémentaire du système macroscopique, il est devenu un individu actif à part entière, avec une fonction spécifique. Lorsque des objets ont la même taille que des molécules chimiques ou biologiques, ou lorsque l'une de leurs dimensions au moins devient très inférieure aux longueurs d'onde caractéristiques des phénomènes qui s'y produisent, la juxtaposition d'effets possibles ouvre une multitude de champs de recherche, offrant des fonctionnalités nouvelles, et s'enrichissant de compétences complémentaires. La dimension des objets mis en jeu est un facteur fondamental de la multi-disciplinarité du domaine. La créativité est essentielle, et bénéficie des apports complémentaires des diverses disciplines.

Le foisonnement de la recherche est tel que ce rapport ne prétend absolument pas à l'exhaustivité. Nous présentons simplement ici un certain nombre de sujets dans lesquels le CNRS a un rôle important à jouer. Dans chaque cas, des questions ouvertes ou verrous technologiques sont identifiés, et l'aspect pluridisciplinaire des approches – associant chimistes, physiciens, biologistes ou mathématiciens – est souligné. Après la discussion scientifique, nous concluons sur les aspects stratégiques.

1 – SITUATION SCIENTIFIQUE, TECHNOLOGIQUE ET QUESTIONS SUR QUELQUES THÈMES

1.1 NANO-OBJETS OU MOLÉCULES UNIQUES : ÉTUDES ET MANIPULATION

Les nano-objets sont la « pierre de base » des nanosciences et nanotechnologies. Nous en illustrons ici l'intérêt, de la manipulation de molécules uniques, des propriétés originales d'agrégats d'atomes ou de « nouvelles » molécules, les nanotubes de carbone, au rôle crucial des nanoparticules de la poussière interstellaire en astrophysique.

1.1.1 Manipulation de molécules

L'objectif est de fabriquer et d'étudier des molécules qui doivent, chacune, remplir une fonction. Les règles de « design » dépendent de la propriété à étudier, du dispositif à réaliser ou de la machine à maîtriser. Notre imagination est ici très anthropomorphique : machine mécanique à l'échelle d'une molécule (brouette moléculaire, moteur moléculaire, araignée moléculaire, bras moléculaire, etc.), machine à calculer dans une molécule (architecture hybride, semi-classique ou quantique), dispositif de mesure (ampèremètre dans une molécule, etc.). Mais on peut aussi s'intéresser au transport tunnel à longue portée, au magnétisme sur un seul atome ou à l'intérieur d'une molécule, à la communication par photon virtuel entre deux atomes ou deux molécules, etc. Les règles de design vont donc de la stratégie simple d'assemblage de pièces au contrôle quantique où il n'y a plus de pièce.

Par ailleurs, un problème important qui se pose à la chimie est de réaliser des molécules complexes qui puissent résister aux techniques

d'apport au milieu support de l'expérience ou de la technologie. Ce problème se pose par exemple pour une surface solide où la sublimation classique détruit les molécules intéressantes. Pour les études sous vide, on sera donc amené à utiliser/découvrir de nouvelles techniques de dépôt ou à réaliser la synthèse chimique sur place. N'oublions pas non plus, dans le cas d'un support solide, la fabrication des supports. On assiste actuellement à un renouveau dans la maîtrise de surfaces particulières, par exemple en utilisant une monocouche d'isolant sur une surface métallique pour l'électronique mono-moléculaire.

Les retombées technologiques pourraient être nombreuses. Citons l'électronique moléculaire ultime, à savoir mono-moléculaire, les robots moléculaires de surface puis peut-être capables d'être guidés dans un gel. Ces robots trouveraient leurs applications en biologie (nano-médecine) ou dans le développement durable (digesteur moléculaire). Enfin, les nano-communications n'en sont qu'à leur début.

1.1.2 Un nouvel objet : le nanotube de carbone

Les nanotubes de carbone, découverts en 1991 sont des feuilles de graphène roulées mono ou multicouches, de dimension macroscopique dans une direction et de taille nanométrique dans les deux autres. Les connaissances autour de ces objets qui intéressent de nombreux physiciens, chimistes et biologistes de tous pays évoluent très rapidement et des applications sont déjà identifiées.

Les nanotubes de carbone présentent des qualités exceptionnelles pour le transport électronique. Selon leur structure (diamètre, hélicité), ils sont conducteurs ou semiconducteurs. Du point de vue fondamental, quantification de la conductance, blocage de Coulomb et magnéto-transport ont pu être mis en évidence. Par ailleurs, l'électronique à base de nanotubes a connu des avancées fulgurantes ces quelques dernières années, avec la réalisation de transistors, diodes ou mémoires RAM avec des nanotubes.

Leurs propriétés mécaniques (module d'Young bien meilleur que celui de l'acier, possibilité de grandes déformations en flexion et torsion) et leur faible poids font des nanotubes une composante intéressante de matériaux composites « ultra-forts » et légers. La mise en forme des nanotubes dans des matériaux composites, pour utiliser leurs propriétés mécaniques ou électriques, fait l'objet de nombreux travaux concertés des chimistes et des physiciens. Leur emploi en nanotribologie, comme lubrifiant, pourrait aussi être intéressant. Enfin, le faible diamètre et le grand rapport d'aspect des nanotubes sont extrêmement favorables à l'émission d'électrons. Des dispositifs d'éclairage à base de nanotubes sont sur le marché, et des prototypes d'écrans plats à base de nanotubes ont déjà été réalisés.

Les propriétés de dopage, remplissage, fonctionnalisation ou greffage des nanotubes apparaissent aussi très importantes. Ainsi, la variation de la conductance électrique des nanotubes semi-conducteurs quand ils sont exposés à certains gaz pourrait permettre de réaliser de nouveaux capteurs chimiques très sensibles. Notons aussi que les nanotubes, très stables, peuvent être utilisés comme creusets de réactions chimiques en milieu confiné. Par ailleurs, la connexion à la biologie se développe, avec l'utilisation possible des nanotubes comme supports de synthèse de molécules biologiques, pour leur transport, ou comme biosenseurs.

Malgré les avancées citées ci-dessus, certains verrous importants doivent être relevés, comme la synthèse dirigée de nanotubes tous de même structure et propriétés, qui est encore un problème non résolu. Il nous faudra aussi maîtriser la chimie de fonctionnalisation des nanotubes, pour les trier, les manipuler ou pour établir des interfaces avec d'autres milieux chimiques ou biologiques. Enfin, la connectique entre nanotubes est un verrou majeur à dépasser pour espérer réaliser un jour une nanoélectronique à base de nanotubes. Parmi les voies prometteuses, on peut citer la croissance dirigée et l'autoassemblage de nanotubes fonctionnalisés.

1.1.3 Agrégats

L'élaboration de nano-objets aux structures et propriétés originales, contrôlées, est un objectif important. Les agrégats d'atomes sont des édifices formés de quelques dizaines à quelques milliers d'atomes (~1 à quelques nanomètres de diamètre), qui constituent des états intermédiaires de la matière, entre les molécules et les solides massifs. Au plan fondamental, des progrès décisifs ont été accomplis dans la compréhension de leurs propriétés spécifiques. Citons par exemple les effets quantiques de taille dans les métaux dus au confinement des électrons dans un volume réduit, ou les effets de structure géométrique induisant des arrangements atomiques différents de ceux des solides. Les propriétés optiques, électroniques, ou magnétiques peuvent aussi revêtir des aspects spectaculaires en fonction de la taille de l'objet : les plasmons de surface confèrent une couleur aux agrégats, les structures en cages (type fullères) conduisent, pour des matériaux covalents semiconducteurs comme le silicium, à des propriétés électroniques inédites (large bande interdite quasi directe), les moments magnétiques peuvent varier avec la taille et notamment, des matériaux non magnétiques peuvent présenter un moment magnétique lorsque la taille du système décroît. À l'aide d'agrégats mixtes (Co-Sm, Fe-Pt), des nanostructures à très forte anisotropie magnétique sont obtenues, qui sont de bons candidats pour repousser la limite superparamagnétique dans la réalisation de nouveaux composants de stockage de haute densité (\geq Tbits/inch²). Les agrégats sont aussi des systèmes modèles pour développer les concepts relatifs à la fragmentation et aux transitions de phase à l'échelle nanoscopique par le biais d'études sur l'évaporation, la fission ou la ségrégation. Leurs propriétés dynamiques jusqu'à l'échelle de la femtoseconde sont abordées.

De façon générale, le domaine des agrégats est exemplaire d'approches expérimentales et théoriques couplées, ces dernières bénéficiant des développements des méthodes et outils informatiques pour modéliser des systèmes réalistes de plus en plus gros. Expérimentalement, les méthodes de synthèse

des agrégats (« bottom-up ») ont progressé et permettent de préparer tous les types d'agrégats, même les plus réfractaires, voire des systèmes complexes tels que les agrégats mixtes. Le défi à venir va consister à utiliser ces briques élémentaires pour réaliser des nano-composants (électroniques, optiques, magnétiques), des matériaux nanostructurés (nano-métallurgie), des nano-catalyseurs. Pour certaines applications il faudra organiser des agrégats fonctionnalisés sur des substrats fonctionnalisés.

1.1.4 Nano-objets en astrophysique : poussière interstellaire

Les nanoparticules qui peuplent le domaine dit nanométrique (de 1 à 20 nanomètres) représentent une composante importante de la matière interstellaire absorbant de manière très efficace les photons ultraviolets des étoiles pour ré-émettre cette énergie dans l'infrarouge. Ces nanoparticules auraient également une contribution majeure dans le chauffage du gaz par effet photoélectrique et dans le bilan chimique en offrant une surface importante pour la catalyse de réactions comme celle fondamentale de la formation de l'hydrogène H₂. Si la présence de macromolécules de type hydrocarbures aromatiques polycycliques et de grains de silicates de taille sub-micronique semble confirmée, la nature des nanoparticules est moins bien connue : nanoparticules carbonées de type carbone amorphe hydrogéné, nanodiamants ou agrégats d'hydrocarbures aromatiques polycycliques, nanoparticules de silicium et de métaux (fer, etc.).

Pour l'astrophysicien/l'astrochimiste, le problème se pose ainsi :

– Quel type de nanoparticules trouve-t-on (taille, composition, morphologie) ?

– Comment se forment ces nanoparticules ? Même si une partie peut provenir des environnements chauds et denses des enveloppes d'étoiles évoluées, des mécanismes à basse température et densité sont nécessaires.

– Quelles sont les propriétés physiques et chimiques de ces nanoparticules isolées ?

– Quel est l'effet sur ces nanoparticules des conditions environnementales : irradiation par rayonnement ultraviolet-X, par des particules énergétiques, couplage avec le gaz, érosion dans les chocs, coagulation ?

En laboratoire, deux approches sont utilisées : la simulation expérimentale de processus cosmiques et l'analyse des mécanismes individuels. Ceci nécessite souvent des dispositifs expérimentaux complexes pour approcher les conditions du milieu interstellaire, par exemple utilisant la technique de piège à ions refroidis. Le problème de la production des nanoparticules se pose également ainsi que celui de l'extraction de nanoparticules de matériaux d'origine extraterrestre. Pour l'étude des constantes optiques et plus généralement des propriétés physiques et chimiques, il faut réussir à travailler sur des nanoparticules isolées. Toutes ces questions, pour être résolues, doivent être abordées de manière interdisciplinaire par la communauté des nanosciences.

1.2 NANOPHYSIQUE ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION

Les technologies de l'information ont connu des progrès considérables et sont encore appelées à se transformer dans les années/décennies à venir. Nous discutons ici quelques domaines exploratoires particulièrement étudiés au CNRS.

1.2.1 Nanoélectronique

L'évolution vers des systèmes électroniques de très faibles dimensions sera durable car de nouveaux phénomènes physiques vont pouvoir être exploités. Le transport électronique aux échelles proches de l'échelle atomique est encore mal connu mais incroyablement riche. Les électrons sont des particules quantiques dotées d'une charge électrique et d'un spin.

Leurs niveaux d'énergie dans des petites structures sont quantifiés et l'on sait maintenant préparer des boîtes quantiques semi-conductrices, réalisations contrôlées de véritables « atomes artificiels ». D'autre part, du fait du faible nombre d'électrons en jeu, l'écrantage est peu efficace et les approximations d'électrons indépendants ne sont plus justifiées. Que ce soit dans les nanostructures semi-conductrices, métalliques ou supraconductrices, la décennie qui s'achève a permis d'identifier de nombreux phénomènes nouveaux. À côté d'effets « parasites » comme la fuite tunnel d'électrons dans les circuits MOS (Semiconducteurs Métal-Oxyde) ultimes, on a vu apparaître certaines fonctionnalités nouvelles comme le blocage de Coulomb – conséquence directe de la quantification de la charge –, ou la quantification de la conductance, les quasi-particules à charge fractionnaire et, à un degré encore futuriste, l'ingénierie d'états quantiques dans les nanosystèmes solides et les circuits électriques quantiquement cohérents. Les enjeux sont l'information et la communication mais aussi la métrologie.

Les enjeux en nanoélectronique sont à la fois de pousser les circuits actuels aux limites de la miniaturisation et de préparer les nouvelles générations. Sans être exhaustif, on peut identifier quelques lignes de forces. La nanoélectronique en technologie silicium couvre entre autres les nano-MOSFETs (FET : transistor à effet de champ) et les dispositifs logiques ou mémoires émergents (dispositifs mono-électron ou tunnel résonnant) à base de silicium. L'échelle nanométrique demande une recherche sur de nouvelles architectures mais aussi de nouveaux matériaux pour les isolants de grille comme les diélectriques à forte permittivité. Utiliser l'atome ou la molécule comme brique électronique élémentaire (*Voir* § 1.1.1) est une voie ultime et de récents progrès expérimentaux et numériques ont permis d'en montrer la faisabilité. Il manque encore une compréhension de base du transport électronique dans une molécule organique et la maîtrise de l'interface métal-molécule. L'électronique à base de nanotubes, édifice moléculaire « idéal », a connu des avancées fulgurantes ces dernières années (*Voir* § 1.1.2). L'étude des

boîtes et fils quantiques est une thématique très amont où l'Europe et tout particulièrement la France ont une présence forte. C'est le cas pour le transport quantique dans les métaux et semi-conducteurs à une ou zéro dimension, les systèmes hybrides formés de conducteurs couplés à des supraconducteurs ou ferromagnétiques intégrant des fonctionnalités supraconductrices et magnétiques. Cet effort a déjà mené à des avancées conceptuelles significatives. La prise en compte des corrélations électroniques et de la dynamique quantique à haute fréquence reste un enjeu important pour les années à venir. Un autre enjeu est la maîtrise des circuits électroniques élémentaires pour l'information quantique. Spin et charge dans les boîtes quantiques, charge et flux magnétique dans les circuits à nanojonctions Josephson, ont récemment marqué des progrès très rapides avec notamment l'observation d'oscillations de Rabi et l'intrication de 2 états qubits (« bits quantiques »). L'un des enjeux majeurs dans ce champ est l'identification et la maîtrise des processus de « décohérence » et de bruit ultime, ainsi que la maîtrise de la manipulation et de la détection de ces états quantiques.

La recherche en nanoélectronique fait appel à l'ensemble des sujets de nanofabrication, nanophysique et physique mésoscopique, nano-caractérisation et recherche de matériaux nouveaux (nanotubes, diélectriques à faible ou forte permittivité, etc.). La simulation/modélisation est maintenant présente à tous les niveaux et est encore appelée à se développer.

1.2.2 Nanomagnétisme et électronique de spin

La spintronique (ou électronique de spin) est un sujet en plein développement à travers le monde. La France occupe une bonne place dans le domaine avec un important potentiel en Recherche et Développement amont. Alors que l'électronique classique est basée sur le contrôle de courants de charge, l'électronique de spin manipule des courants de spin en exploitant l'influence du spin sur le transport électronique dans des nanostructures magnéti-

ques associant matériaux magnétiques et non-magnétiques. Le caractère « nano » des structures est imposé par les longueurs d'échelle en jeu, ce qui explique que le développement de la spintronique a été intimement lié au progrès des nanotechnologies.

La première manifestation d'effet de spintronique a été la magnétorésistance géante ou GMR, découverte en 1988. Dans des multicouches alternant un métal magnétique et un métal non magnétique, un changement de résistance important est observé lorsque les aimantations des couches magnétiques successives basculent d'un état antiparallèle en champ nul à un état parallèle aligné en champ appliqué. Des structures artificielles plus complexes, appelées vannes de spin et permettant un effet de magnétorésistance géante dans des champs très faibles (une dizaine d'Oersted), ont ensuite été développées pour réaliser des détecteurs de champ ultra-sensibles. Aujourd'hui, la quasi-totalité de la production des têtes de lecture / écriture pour disques durs (1 milliard de têtes par an) est constituée de têtes à GMR. Les applications comme capteurs de champ pour l'automobile et l'aéronautique sont également en plein essor.

Un effet de magnétorésistance semblable à la GMR, appelé magnétorésistance tunnel ou TMR, est observé dans des jonctions tunnel (métal ferromagnétique/isolant/métal ferromagnétique). On observe aussi une variation importante de la résistance lorsque les directions relatives des aimantations des couches ferromagnétiques varient. La forte variation de magnétorésistance et l'impédance élevée (de 0.1 à 100 kilo-Ohm) ont conduit au développement de mémoires à accès aléatoire non volatiles (MRAM – Magnetic Random Access Memories) pour une mise sur le marché de composants fonctionnels à l'horizon 2004- 2005.

Paradoxalement, alors que des applications doivent apparaître bientôt sur le marché, les mécanismes physiques en jeu dans la TMR sont encore loin d'être bien compris. Il apparaît maintenant que la TMR dépend non seulement de la polarisation en spin du ferromagnétique mais aussi de la structure électro-

nique de l'isolant et surtout du caractère des liaisons électroniques à l'interface métal/isolant. Il est probable que des TMR plus élevées pourront être obtenues avec d'autres isolants que l'alumine essentiellement utilisée jusqu'à présent. Également, un autre enjeu important est la recherche de matériaux ferromagnétiques demi-métalliques (c'est-à-dire métalliques pour une direction de spin et isolants pour l'autre) pour lesquels on peut attendre une polarisation de l'effet tunnel proche de 100 %. Diverses pistes sont suivies pour obtenir des matériaux demi-métalliques de température de Curie suffisamment élevée au regard des applications. Finalement, on peut également mentionner que l'injection de spins par effet tunnel conditionne d'autres développements de l'électronique de spin comme par exemple l'injection de spins dans une nanoparticule ou une boîte quantique (dispositifs combinant blocage de Coulomb et de spin, bits quantiques).

La commutation d'une cellule de mémoire magnétique (MRAM) s'effectue aujourd'hui dans un temps de quelques nano-secondes. Réduire ce temps de commutation est un enjeu important et les recherches sur la dynamique du renversement de l'aimantation de petits éléments magnétiques sont en plein développement. Ainsi des commutations par précession cohérente dans des impulsions de champ magnétique de seulement une centaine de pico-secondes ont été obtenues. Une autre possibilité intéressante est le renversement d'aimantation sans application de champ magnétique mais seulement par transfert de spins à partir d'un courant polarisé en spin. Le déplacement de parois de domaines par un courant, autre effet de transfert de spin, pourrait également avoir des applications intéressantes.

Un gros effort de recherche en électronique de spin est fait actuellement pour intégrer matériaux magnétiques et semi-conducteurs dans une même hétérostructure, dite « hybride ». L'objectif technologique est d'obtenir des composants d'électronique de spin ou d'opto-spintronique combinant des fonctions de stockage permanent d'information, de traitement logique et de communication sur une même puce (micro-processeur reprogrammable par exemple). Une autre voie est l'élaboration de semi-conducteurs

ferromagnétiques dans lesquels le courant est intrinsèquement polarisé en spin. Une autre direction de recherche intéressante est l'injection de spin dans des boîtes quantiques (plusieurs concepts d'ordinateur quantique (Voir § 1.2.4) proposent l'intrication d'états de spin dans un réseau de boîtes quantiques).

L'intégration actuelle des semiconducteurs en spintronique implique nécessairement une collaboration accrue entre communautés du magnétisme et des semiconducteurs. De façon plus générale, la spintronique a aussi besoin d'une pluridisciplinarité chimie/physique pour le développement de procédés de fabrication. Dans le champ applicatif, des connexions avec les domaines de la biologie et de la médecine ont également été ébauchées.

Les verrous pour les années à venir se situent dans plusieurs domaines :

- matériaux : recherche de matériaux demi-métalliques pour obtenir des polarisations de spin proches de 100 % à température ambiante, recherche de semiconducteurs ferromagnétiques à température ambiante, intégration de métaux ferromagnétiques et de semiconducteurs dans une même structure, intégration possible de nanotubes de carbone (Voir § 1.1.2) en spintronique ;

- nanotechnologies : développement de méthodes de fabrication utilisant la lithographie électronique ou des microscopies de proximité (nanoindentation, etc.) pour la réalisation de transistor spintronique, de nanocontact pour magnéto-résistance balistique ou pour injection de spin dans une nanoparticule ou une boîte quantique ;

- concepts : développements de concepts pertinents de transistor à spin, de dispositifs d'opto-spintronique et de dispositifs associant blocage de Coulomb et de spin, de qubits à spin, étude de solutions pour l'enregistrement de très haute densité ;

- applications : un problème général est l'intégration de dispositifs de spintronique dans les filières de microélectronique ; également les dimensions sub-100 nanomètres, accessibles en laboratoire (objet unique) posent d'autres

problèmes à l'échelle du démonstrateur (objets multiples, par exemple mémoire magnétique 1 Mbit) où l'on doit contrôler les dispersions en taille et ordonnancement d'un grand nombre d'objets.

1.2.3 Nanophotonique

Diverses sortes de matériaux nanostructurés présentent des réponses optiques très singulières, qui dépendent toutefois drastiquement (au-delà d'une simple loi d'échelle) de changements de dimensions nanométriques : les sphères métalliques, les opales, les microcavités, par exemple. La microscopie en champ proche trouve ici sa place, offrant une connaissance locale des propriétés optiques. Les techniques de photomanipulation d'objets micro- et nanométriques, comme les « pincés optiques », très en vogue en biologie, ou l'orientation tout optique mettant en jeu des interactions non linéaires, relèvent dans une large mesure du domaine de la biophotonique.

L'échelle des cristaux photoniques ou des manipulation de plasmons sur or ou argent convient aux méthodes de fabrication parallèles de la microélectronique, ce qui apporte un grand potentiel d'application, dont l'exploitation débute à peine, en commençant naturellement par l'optoélectronique sur semi-conducteur. À l'image des objets industriels de l'optique intégrée (visant au traitement de signaux pour les télécommunications surtout), le physicien peut aujourd'hui concevoir et réaliser des bancs optiques complexes sur puce, exploitant les nanostructures photoniques et éventuellement électroniques. L'ordinateur quantique (Voir § 1.2.4) pourrait se baser sur cette approche. À plus court terme, une voie applicative d'intérêt concerne les matériaux hybrides multifonctionnels. L'insertion de nanoparticules inorganiques à propriétés laser dans une matrice polymère organique à propriétés non linéaires permettrait par exemple d'associer dans un même matériau des fonctionnalités de type modulation électro-optique et de type amplification laser.

On peut aussi mentionner divers apports

de la nanophotonique pour la nanofabrication (Voir § 1.5) : lithographies ultimes, par projection ou par sondes locales, lithographie en volume à deux photons, etc.

Les verrous pour les années à venir sont :

- le contrôle de l'émission spontanée (rythme, statistique, directionnalité), dans le prolongement des études faites en physique atomique, qu'on peut appliquer à des boîtes quantiques de semi-conducteurs, jusqu'aux fluorophores de la biophotonique, en lien avec la cryptographie quantique ;

- les matériaux :

- (i) structures hybrides métal-diélectrique : potentiel et limites (pertes) des plasmons dans l'interaction matière-lumière, connaissance et contrôle déterministe des effets de « points chauds » dans les assemblées d'îlots d'argent ou d'or, liés au SERS (effet Raman renforcé).

- (ii) connaissance des effets de structuration nanométrique sur l'interaction onde-matière dans les matériaux non-linéaires, électro-optiques, etc.

- (iii) Matériaux hybrides à base d'organiques, de sol-gel : potentiel applicatif ? (optique intégrée ? sources ? etc.)

Une dernière série de questions, appliquées, tient à la recherche de meilleur couplage onde-matière ou onde-onde à l'aide de nanostructurations.

- (i) Pour les sources : quelle augmentation de rendement peut en résulter ?

- (ii) Pour l'optique intégrée et les fibres optiques microstructurées : il s'agit de faire suivre à la lumière guidée des virages, des changements de taille transverse sur mesure, à l'aide de nanostructuration ou de cristaux photoniques.

1.2.4 Ordinateur quantique et information quantique

L'information quantique est basée sur un concept apparu au cours des 20 dernières années, qui a en un certain sens un caractère

assez révolutionnaire : on peut en utilisant la physique quantique concevoir de nouvelles façons de calculer et de communiquer, dont les « règles du jeu » ne sont plus celles que l'on connaît classiquement. Il en résulte par exemple de nouvelles méthodes de cryptographie dont la sécurité s'appuie sur les bases même de la physique, et de nouvelles méthodes de calculs qui peuvent être exponentiellement plus efficaces. Ces nouvelles idées conduisent à de nouveaux algorithmes, et aussi à de nouvelles architectures de calcul, qui sont basées sur des « portes logiques quantiques » sans équivalents classiques. Un but central des recherches en cours est de découvrir les lois et les techniques qui permettent de manipuler ces objets, sans perdre leur « cohérence quantique », qui est à l'origine de leurs capacités accrues de traitement de l'information.

Une des raisons du dynamisme actuel de l'information quantique est son caractère très interdisciplinaire. En effet, la rencontre entre la théorie de l'information et la mécanique quantique – qui constitue le cœur de « l'information quantique » – conduit à l'apparition d'un langage nouveau, commun aux algorithmiciens, aux informaticiens, et aux physiciens de nombreuses disciplines (physique du solide, physique atomique et moléculaire, optique quantique, etc.). De plus, les lois quantiques régissant le comportement des nanoobjets, les nanosciences se trouvent être le domaine privilégié d'application de ces concepts.

Il existe actuellement deux domaines principaux d'application de ces concepts quantiques, dont les problématiques et les stades d'avancement sont différents :

(i) la cryptographie quantique, dont le principe est de transmettre une « clé secrète » indéchiffrable en utilisant les propriétés quantiques de la lumière. Ce domaine a progressé rapidement au cours des dix dernières années, et la question actuelle est celle de l'intégration de protocoles quantiques dans une infrastructure globale de gestion de la confidentialité.

(ii) le calcul quantique, basé sur des opérations logiques effectuées sur des systèmes quantiques à deux états, les « bits quantiques »

ou « qubits ». Les idées les plus prometteuses pour réaliser une telle « ingénierie quantique » sont activement explorées expérimentalement, et sont basées sur la manipulation d'objets quantiques individuels (photons, atomes, ions, spins, boîtes quantiques, etc.), ou de nanocircuits quantiques (jonctions Josephson). À terme il devrait devenir possible d'assembler des tels objets à grande échelle, et plusieurs approches ont été proposées. On peut ainsi remarquer qu'un effort très important de nano-fabrication a été lancé par des équipes australiennes et américaines, avec l'objectif – extrêmement audacieux – d'implanter, de détecter et de contrôler l'état quantique d'ions individuels dans une matrice de silicium.

1.3 NANOMATÉRIAUX

Si nanosciences et nanotechnologies évoquent à priori la « high-tech », elles couvrent de fait un champ beaucoup plus large avec les nanomatériaux qui jouent un rôle clé dans de nombreux domaines, comme l'automobile, l'aéronautique, le bâtiment, le conditionnement, la tribologie, la catalyse, l'environnement, etc. D'importantes mutations sont en cours, qui pourraient renouveler complètement le domaine. Nous l'illustrons avec les progrès récents de la compréhension des mécanismes de catalyse ou la synthèse des matériaux adaptatifs, qui sera un enjeu majeur pour les chimistes.

1.3.1 Nanocatalyse

La catalyse a été très longtemps un domaine où l'empirisme était roi. En effet, de par leur très grande complexité, les mécanismes des réactions catalytiques hétérogènes ne pouvaient être approchés que très qualitativement. Les modèles réactionnels tirés des études sur monocristaux ne peuvent pas toujours s'appliquer à la catalyse réelle. Les catalyseurs réels sont constitués de particules métalliques de un à quelques nanomètres

supportées (le plus souvent) sur des oxydes : il faut alors tenir compte de l'hétérogénéité intrinsèque des catalyseurs réels. C'est ce que l'on appelle : « material gap ». D'autre part les réactions catalytiques réelles ont lieu à la pression atmosphérique (voire plus) alors que les études de surfaces se passent sous ultravide, c'est ce que l'on nomme : « pressure gap ». Les recherches actuelles visent à combler ces deux fossés.

- Le « material gap » : les catalyseurs modèles supportés.

L'hétérogénéité des catalyseurs réels provient de la taille nanométrique des particules métalliques, de leur morphologie et de la présence du support. Des résultats importants ont été obtenus récemment sur les effets de morphologie et de support, en utilisant des catalyseurs modèles préparés par croissance d'agrégats métalliques sur des monocristaux d'oxyde. En fait ce que l'on appelle communément effets de taille en catalyse revêt en réalité plusieurs aspects intriqués. Quand la taille diminue, la réactivité change par l'augmentation de la proportion de sites d'arêtes qui chimisorbent plus fortement les molécules. La morphologie et donc la proportion des différentes facettes, ayant des réactivités différentes, peut changer avec la taille. Un troisième effet qui dépend de la taille est la capture des molécules physisorbées sur le support. Pour étudier finement les effets de taille il faudrait idéalement avoir une taille unique. Pour des agrégats intéressants pour la catalyse (au moins 50 atomes) une nouvelle voie s'ouvre par la croissance sur une surface nanostructurée, les agrégats nucléant suivant un réseau régulier ce qui rend les conditions de croissance identiques pour chaque agrégat d'où il résulte une distribution de taille extrêmement étroite. Une autre voie pour fabriquer un réseau d'agrégats est de créer artificiellement un réseau de défauts sur la surface sur laquelle on dépose des agrégats préparés en jet. Une troisième voie est de fabriquer directement un réseau de particules en poussant à leur limite les techniques de nanolithographie : nanolithographie électronique, nano-impression ou encore nanolithographie colloïdale. Une variante de la lithographie colloïdale est d'utiliser directement l'auto-

assemblage de colloïdes métalliques. Les ligands peuvent être éliminés par un plasma réactif très doux sans détruire l'arrangement des agrégats. Ces deux dernières méthodes, relativement peu onéreuses, pourraient être transférées vers l'industrie pour des catalyseurs spécifiques par exemple ultra-sélectifs (en particulier énantio-sélectifs), pour les capteurs de gaz ou les piles à combustible. Enfin, au lieu d'utiliser une assemblée d'agrégats, on peut aussi penser utiliser un agrégat unique et tester sa réactivité. On n'est pas encore arrivé à ce stade mais des études se développent intensément sur ce sujet en utilisant les sondes champ proche.

Le développement fulgurant des moyens de calculs ouvre maintenant la porte à la simulation de réactions chimiques sur une surface ou sur un agrégat libre mais aussi sur un agrégat supporté. La dynamique moléculaire permet de simuler actuellement les agrégats supportés de quelques nanomètres. Par des calculs *ab initio* il est maintenant possible de déterminer les barrières énergétiques correspondant aux étapes élémentaires d'une réaction catalytique. Il est donc devenu possible de prévoir les propriétés catalytiques d'un métal ou d'un alliage en fonction de sa structure et de sa composition ce qui ouvre la porte à une approche rationnelle de la conception d'un catalyseur.

- Le « pressure gap » : les études *in situ* sous pression

Le « gap » de pression est en train d'être comblé rapidement. En effet, il est maintenant possible d'étudier des surfaces par STM (microscopie à effet tunnel) et AFM (microscopie à force atomique) sous pression allant de l'ultravide à la pression atmosphérique. Il devient alors possible de suivre l'évolution de la morphologie des particules de catalyseur lors d'une réaction chimique. Les molécules adsorbées peuvent être détectées par des méthodes optiques permettant de travailler de l'ultravide jusqu'à la pression atmosphérique. C'est le cas de la spectroscopie infrarouge avec modulation de polarisation et surtout la génération de somme de fréquence. Il est maintenant possible de suivre l'évolution de la structure interne d'un agrégat au cours d'une

réaction chimique en utilisant un microscope électronique à haute résolution environnemental. Deux microscopes de ce type existent : le premier au Danemark, le second en France. Enfin sur des assemblées de particules il est possible d'étudier in situ en temps réel l'évolution de la structure et de la morphologie au cours d'une réaction chimique en utilisant la diffraction des rayons X en incidence rasante (GIXS) et la diffusion des rayons X aux petits angles en incidence rasante (GISAXS). De beaux résultats ont été obtenus récemment à l'ESRF (synchrotron, Grenoble) sur la croissance sous vide et devraient être étendus sous pression de gaz.

1.3.2 Des nano-objets aux nanomatériaux et matériaux adaptatifs

La synthèse de certains nanoobjets peut d'ores et déjà s'effectuer à partir des acquis de la chimie citons les réalisations de clusters moléculaires magnétiques à très fort spin ou de moteurs moléculaires (*Voir* § 1.1.1), par exemple. Au-delà, un but essentiel à atteindre est la synthèse de nanomatériaux et, à terme, l'accès aux matériaux adaptatifs.

L'inclusion est la voie la plus utilisée pour la préparation des nanomatériaux. Les nanocomposites obtenus sont réalisés par encapsulage ou inclusion de nanoobjets dans une matrice organique ou minérale, et correspondent au mélange de deux phases. Le contrôle des interactions matrice-nanoobjet est un sujet de recherche actif.

Les méthodes d'assemblage, qui impliquent des liaisons chimiques fortes (covallence, coordination, liaisons hydrogène, etc.) entre les nanoobjets, correspondent aux matériaux nanostructurés. Ce type de matériaux, où une organisation et une orientation des unités composantes sont possibles, représente un stade plus avancé que l'inclusion. Une des méthodes d'assemblage, la polymérisation minérale, est incluse dans le vocable de la « chimie douce » parce qu'elle s'effectue à température ambiante.

Elle est particulièrement importante car elle permet de rassembler chimie du solide, chimie organique, organométallique et de coordination, chimie macromoléculaire et même chimie des biomolécules, et a donc de grandes potentialités.

Les matériaux adaptatifs (aussi qualifiés d'« intelligents ») sont des matériaux susceptibles de coupler plusieurs fonctions de manière interactivement contrôlée (modification par exemple de leurs propriétés physiques, comme la forme, la conductivité, la couleur ou la viscoélasticité, en réponse à des sollicitations telles qu'une variation de température, de champ électrique ou magnétique, de contrainte, etc.). La recherche sur l'obtention de tels matériaux est essentielle pour l'avenir et va constituer l'un des enjeux importants de la chimie. Les chimistes devront trouver les méthodes permettant d'assembler des nanoobjets porteurs de propriétés différentes et mettre en œuvre des méthodes d'organisation prédictive de nanoobjets différents. Ils devront en outre assurer leur intercommunication par l'emploi d'espaceurs chimiques adaptés, autorisant des interactions entre nanoobjets, ainsi que leur contrôle par le jeu des interruptions et reconnections. L'une des voies possibles est celle des matériaux méso/nano-poreux, pour lesquels on a déjà réussi à maîtriser la forme, la taille et la régulation de la surface poreuse et à contrôler des fonctions induites dans la charpente du matériau ainsi qu'à l'intérieur des pores, ouvrant la voie au couplage de propriétés différentes.

À la fin de ce rapide aperçu des progrès que l'on peut escompter dans l'élaboration des nanomatériaux, citons un domaine extrêmement prometteur au niveau des applications et des retombées économiques : la séparation sélective, qui peut permettre de traiter les problèmes de dépollution de matières organiques ou minérales avec des nanomatériaux porteurs d'agents chimiques susceptibles de séparer les adjuvants indésirables en les piégeant par chélation.

1.3.3 Nanomatériaux à base de minéraux naturels ou de substances géomimétiques

L'usage de minéraux naturels ou de substances de synthèse les imitant est déjà répandu, dans les cosmétiques, l'alimentaire (emballages), les durcisseurs de sols, la galénique, etc. Pour l'essentiel, les pratiques cherchent à conférer à des matrices de base des propriétés d'usage qu'elles ne présentent pas employées seules. Il peut s'agir de propriétés optiques, thermiques, de stabilité chimique, de propriétés diélectriques, de tenue au feu, de renforcement mécanique, d'effets barrière, de rugosité. Il peut s'agir aussi de propriétés conditionnant la mise en œuvre (additifs d'extrusion), etc.

Les pratiques actuelles ont cependant des limites, dont la plus difficile à franchir est d'assurer au matériau, inévitablement hétérogène aux échelles nanométriques, une homogénéité à l'échelle micronique, ce qui suppose la maîtrise de l'adhésion renfort-matrice. Une deuxième limite est liée à l'usage de matières d'origines naturelles souvent porteuses d'agents indésirables. Une troisième catégorie de difficultés concerne les aspects préparatifs, en particulier la maîtrise des effets connexes de la fragmentation, et parfois, l'extrême difficulté d'extraire économiquement la matière de son milieu de préparation sans l'altérer.

Les besoins de recherche sont multiples : ils concernent le choix des matières, les formules de modification des propriétés interfaciales et les aspects préparatifs. Les travaux fondamentaux révèlent des propriétés morphologiques, d'hydratabilité ou d'insérabilité qui demeurent totalement inexploitées dans par exemple certaines silices lamellaires ou dans des hydroxydes lamellaires multiples qui sont des échangeurs anioniques. De la même façon, la préparation de nano-renforts à partir des phyllosilicates 1/1 rigides est ignorée alors que certains sont insérables à longue distance.

Il faut pour finir mentionner le manque actuel en France d'instrumentation permettant la synthèse en volume moyen (pour des masses

de l'ordre du kilogramme) d'échantillons pour le génie minéral, pour engager l'expérimentation à l'échelle pilote.

1.4 NANOBIOLOGIE

1.4.1 Contexte historique

La découverte de la structure en double hélice de l'ADN a marqué la vision moléculaire du vivant du xx^e siècle. À la suite du séquençage de génomes entiers, il est désormais envisageable d'identifier toutes les espèces moléculaires (gènes, ARN, protéines, métabolites) d'une cellule ou d'un organisme. Cependant, au terme de ce dénombrement, le défi face à nous est de comprendre l'organisation fonctionnelle de l'ensemble et les problèmes de régulation.

L'observation d'évènements moléculaires individuels dans des cellules uniques a mis en évidence le caractère stochastique de ces évènements. Comprendre comment est assurée la robustesse du comportement des cellules malgré « le bruit » des réactions chimiques individuelles, comment les cellules utilisent ce bruit pour répondre aux variations de leur environnement, comment cette robustesse est affectée au cours des processus pathologiques représente un enjeu majeur.

On peut prédire que ce concept d'organisation et de régulation va être un concept pivot de la biologie du xxi^e siècle. C'est la prise en compte des interactions entre les composants et pas seulement la nature (ou la structure) des composants qui permet de comprendre le fonctionnement.

Pour décrire, modéliser et manipuler ces systèmes biologiques complexes il faut de nouveaux outils et des nouveaux concepts qui seront issus d'une recherche interdisciplinaire, faisant appel à la biologie, la physique, la chimie, les mathématiques et les nanotechnologies.

1.4.2 Apport des nanotechnologies à la biologie

Les apports « classiques » de la physique à la biologie sont multiples : quantification (mesure de vitesse, de force, de déplacement, etc.), conceptualisation de la mécanique cellulaire (motilité, adhésion des cellules, etc.) et des régulations (avec les spécialistes des systèmes dynamiques), modélisation (principes généraux d'organisation, réseaux de régulation, etc.), simulation dynamique (par exemple formation de l'ARN et repliement des bras, plus généralement toutes les études structurales sur les biomolécules), imagerie (RMN, RPE pulsée, etc.).

Les nanotechnologies apportent un nouveau contexte : imager et manipuler grâce à de nouveaux outils (microscopie champ proche et dérivés), de nouveaux objets (nanoparticules (marqueurs), nanopores, nanoélectrodes) et de nouvelles approches (nanofluidique, encapsulation, vectorisation des médicaments par des nanomatériaux, « lab on chip », criblage massivement parallèle).

1.4.3 Apport de la biologie aux nanotechnologies

Inversement de nombreux concepts et outils issus de la biologie peuvent être utiles aux nanotechnologies : nano-systèmes existants (ADN, protéine, peptides, moteurs rotatifs, linéaires, etc.), auto-assemblage programmable, construction de nanostructures au moyen de manipulation génétique, réseaux de régulation, approche 3D multiconnexions, notion de robustesse et bruit (problématique pertinente pour l'étude de la fiabilité des systèmes formés d'un grand nombre de nano composants). On se servira aussi de notre compréhension des systèmes biologiques pour fabriquer des dispositifs qui « imitent » les systèmes biologiques (biomimétique).

1.4.4 Verrous technologiques

La manipulation d'objets biologiques de taille nanométrique doit être réalisée en s'assurant que tous les acteurs biologiques sont dans des conditions les plus proches possibles de celles rencontrées dans un organisme vivant. Ces objectifs nécessitent la mise en place d'outils technologiques nouveaux, de très haute précision spatiale (la taille des biomolécules d'intérêt est inférieure à 10 nm) et qui garantissent l'intégrité des entités biologiques. Ces procédés n'existent pas encore aujourd'hui et constituent autant de verrous technologiques capitaux pour le domaine des nanotechnologies appliquées aux sciences du vivant.

– Le « biopatterning » : il s'agira d'immobiliser sur un support différents types de biomolécules (ADN, protéines, peptides, enzymes, sucres, etc.) en ayant soin de ne pas les dénaturer et de leur fournir un environnement favorable à l'expression de leur spécificité biochimique. On cherchera à mettre au point des procédés permettant le dépôt contrôlé de très petites quantités de solution (< femtolitre) voire de biomolécules à l'unité. Nanostructuration des surfaces, chimie de greffage spécifique des biomolécules sur le support, nano-dépôt en champ proche, lithographie douce sont autant de pistes actuelles qu'il conviendra d'approfondir et d'amener à maturité.

– la détection intégrée : il s'agira d'utiliser nano-outils et nano-systèmes afin de mesurer des signaux électriques, mécaniques ou optiques permettant de comprendre les mécanismes d'interaction entre biomolécules. Il sera nécessaire de mesurer des événements à l'échelle de la molécule unique dans un environnement où peuvent cohabiter de nombreux partenaires ;

– le multiplexage : au niveau technologique, le terme de multiplexage se traduit par la mise en présence de différentes solutions biologiques avec différentes sondes. Si les techniques de biopatterning permettent de déposer différentes sondes biologiques sur une surface, la mise en réaction de ces sondes avec différentes solutions reste un problème technologique important qui peut être approché par la micro/nanofluidique.

– la nanofabrication à bas coût : beaucoup de technologies innovantes pour manipuler des biomolécules individuelles reposent sur la fabrication de nanostructures dont la taille ultime peut être de l'ordre de 10 nanomètres. La perspective d'application dans le secteur de la santé réclame que ces structures soient fabriquées à un coût unitaire très faible, c'est-à-dire en utilisant des techniques de fabrication à fort rendement et faible investissement. L'émergence de techniques de nanofabrication à bas coût adaptées aux exigences des applications biologiques constituera un passage clef où les techniques de nano-impression, d'impression moléculaire, de lithographie douce, de moulages, etc. devraient apporter des solutions intéressantes.

1.4.5 Nanophotonique et biologie

L'essor de la nanobiophotonique apparaît au débouché de progrès antérieurs en photonique (lasers) et en physique moléculaire (spectroscopie d'absorption et de fluorescence). Si l'on s'accorde à reconnaître que la biologie s'est constituée en discipline véritablement scientifique en prenant principalement appui sur l'essor de l'instrumentation microscopique au début du XVII^e siècle, permettant d'accéder à une nouvelle fenêtre d'observation à l'échelle des entités cellulaires de dimensions microniques, on peut prendre la mesure des implications du bond quantitatif et qualitatif de plusieurs ordres de grandeur en résolution ouvert par la nanophotonique et l'accès à l'intimité génétique sub-cellulaire et moléculaire des mécanismes biologiques qui sous-tendent les pathologies.

Les premières mises en œuvres expérimentales de spectroscopie de molécules individuelles, qui exigeaient des dispositifs cryogéniques incompatibles avec l'étude des systèmes biologiques, ont en effet cédé la place au milieu des années 1990 à des dispositifs de microscopie confocale à un ou plusieurs photons permettant d'opérer à température ambiante en phases condensées de type biologique. On assiste dans cette perspective à l'essor de technologies de marquage spéci-

fique de fragments d'ADN, de protéines ou de membranes cellulaires par des émetteurs de lumière nanométriques dont on peut alors suivre la trajectoire au travers de cheminements cellulaires complexes. Par exemple, la microscopie confocale à un ou plusieurs photons autorise l'étude des caractéristiques de la fluorescence d'objets moléculaires uniques issus de l'expression *in vivo* d'un gène associé à une protéine. Ces avancées dans le domaine spatial se conjuguent par ailleurs avec le domaine temporel par l'avènement des lasers ultra-brefs, qui ouvre une fenêtre de résolution temporelle jusqu'à la femtoseconde.

Les retombées actuelles dans les domaines des études fondamentales (aide au séquençage, protéomique, virologie, neurologie, etc.) et leur premier pas dans les domaines associés de la prévention, du diagnostic et de l'intervention justifient pleinement l'implication convergente d'un nombre croissant d'équipes. Celles-ci regroupent physiciens, chimistes, biologistes autour de projets dont l'aspect pluridisciplinaire relève de la réalité quotidienne. On envisage actuellement de franchir une étape supplémentaire en utilisant la lumière, non seulement comme un outil de détection d'objets nanométriques, mais aussi comme un moyen de manipulation de ces entités, que ce soit par la méthode déjà bien maîtrisée des pinces optiques, ou par des techniques plus futuristes, basées sur des phénomènes optiques non linéaires, qui permettent de déplacer et d'orienter à volonté certaines catégories de molécules dans des milieux fluides ou des polymères, et qui peuvent être aisément transposables à la manipulation photoinduite de molécules individuelles en milieu biologique.

1.4.6 Nanotechnologies et neurosciences

L'analyse des mécanismes neuronaux du fonctionnement cérébral exige que soient mises au point de nouvelles méthodes et technologies pour enregistrer l'activité neuronale soit sur des préparations réduites soit, surtout, chez

l'animal en activité. Ceci permettra de réaliser de nouvelles études : de l'activité neuronale chez la souris jusqu'à celle des bases neurales des fonctions cognitives les plus élevées chez le singe. C'est l'enregistrement de centaines, voire de milliers, de neurones dans plusieurs structures cérébrales à la fois qui permettra sans doute de vraiment comprendre le traitement de l'information complexe dans le cerveau. Les nanotechnologies ouvrent une perspective remarquable pour aborder les mécanismes au niveau moléculaire, cellulaire et au niveau des réseaux. Un rapprochement entre neurosciences et nanotechnologies est donc nécessaire.

1.4.7 Les limites de la vie

Quelle est la taille minimale d'une bactérie ? Cette question posée à la fin des années 60 rebondit d'années en années à force d'amélioration des techniques de microscopie et de mise en place de nouveaux protocoles de culture de bactéries. Des 100 nanomètres théoriques aux premières observations de très petites bactéries de 200 nanomètres de diamètre, on devrait assister à un renouveau dans le domaine de la recherche des nanobactéries dans les milieux extrêmes, jusqu'au problème de la vie sur Mars. Certaines familles de nanobactéries utilisent des coques en calcite pour se reproduire ce qui serait à l'origine de certaines maladies. Ce domaine des nanobactéries est donc au carrefour des sciences de la vie et de la physicochimie. Il y a en plus l'idée qu'une si petite unité de vie possède une organisation macromoléculaire particulière qu'il serait intéressant de comprendre pour la conception de nano-machines moléculaires.

1.5 NANOFABRICATION

Tirer profit de la réduction des dimensions à l'échelle nanométrique pour réaliser de nouveaux objets ou systèmes pose le

problème essentiel des procédés de fabrication capables de structurer la matière à cette échelle. Deux voies se sont dégagées pour y parvenir : l'approche « top-down » qui vise à réduire les dimensions d'un matériau massif jusqu'au nanomètre et l'approche « bottom-up » qui consiste à élaborer un système à partir de ses constituants élémentaires, atomes ou molécules. La première fait largement appel aux techniques de lithographie ultime et à celles développées pour la microélectronique et la seconde aux techniques de manipulation ou d'auto-assemblage d'atomes ou de molécules. Rien n'oppose ces deux approches qui sont complémentaires. Au delà des problèmes technologiques de réalisation des nanostructures artificielles, il faut en effet également disposer des outils qui permettent de les étudier et de les utiliser. Il faut donc générer et contrôler un environnement permettant d'échanger de l'information avec ces structures. Si les techniques optiques ou de champ proche se sont avérées extrêmement fécondes, la réalisation de systèmes fonctionnels nécessite la mise au point de technologies permettant de combiner de façon compatible nano et microstructures, objets de dimension moléculaire et architectures de commande. Un enjeu majeur dans cette perspective de réalisation de systèmes fonctionnels est de marier les deux approches « top-down » et « bottom-up ». On conçoit aisément tout l'intérêt qu'il y a à imaginer des nano-objets élaborés par auto-assemblage ou manipulation d'atomes ou de molécules qui soient « adressés » et « architecturés » à l'aide de nanostructures ultimes fabriquées par des méthodes de lithographie ou par les circuits de la microélectronique. Cette convergence concerne au premier chef l'électronique moléculaire où les difficultés pour faire réaliser à des molécules une fonction électronique ou mécanique, à les relier au monde extérieur sans altérer leurs propriétés sont patentées.

La nanofabrication de demain doit aussi permettre de structurer des matériaux très divers. En plus des semi-conducteurs et de leurs hétérostructures diverses, les couches ferro-électriques, piézo-électriques ou magnétiques,

les polymères (passifs ou actifs), les nouvelles formes du carbone (fullerènes et nanotubes), les couches moléculaires auto-assemblées, les biomolécules (ADN, protéines) sont d'ores et déjà de plus en plus utilisés à l'intérieur des nanosystèmes. Le développement de technologies permettant leur utilisation conjointe nécessite un effort de recherche conséquent.

Utiliser des nano-objets pour stocker, communiquer, calculer, analyser, mettra nécessairement en jeu des réseaux complexes de nanostructures. Trouver des architectures nouvelles, tolérantes aux imperfections issues de la fabrication, reconfigurables voire réparatrices pour pallier les déficiences issues du vieillissement est également un véritable enjeu pour lequel très peu d'efforts sont investis à l'heure actuelle. Il n'existe ainsi que bien peu d'exemples de nanosystèmes qui ne soient pas une déclinaison de dispositifs préexistants et qui exploitent complètement les spécificités des nano-objets. La genèse de ces nouvelles architectures, qui pourrait également diminuer les contraintes actuelles en matière de nanofabrication sur la régularité des objets, leur perfection, leur adressage, mériterait d'être stimulée.

Au plan des technologies, un des problèmes majeur est l'absence de techniques capables de structurer la matière avec une résolution nanométrique poussée (<10 nanomètres) qui soit compatible avec une production de masse à bas coût pour des applications de type grand public. Nous disposons ainsi d'un côté d'un très grand savoir-faire industriel à l'échelle de 50 nanomètres et plus (la microélectronique) et de l'autre d'une grande maîtrise en laboratoire de procédés à haute résolution (lithographie ultime, STM, AFM, etc.). Tirer ces techniques de laboratoire lentes et onéreuses vers des procédés rapides et fiables reste un problème à résoudre de même qu'amener les procédés industriels de la microélectronique aux dimensions des nanosystèmes. Les solutions étudiées peuvent prendre des formes assez diverses : nano-implosion, lithographies douces ou approches basées sur l'auto-assemblage.

Il faut éviter le cloisonnement du système de recherche entre technologie lourde d'un côté, et auto-assemblage ou nanofabrication alternative d'un autre côté. Il y a un grand avenir et un énorme enjeu à coupler étroitement ces domaines. C'est dans le mariage des techniques d'auto-assemblage et de lithographie, de « bottom-up » et de « top-down » (au plan disciplinaire de la physique, de la chimie, de la biologie), que se feront les plus beaux enfants des nanotechnologies dans les prochaines années. Notre système de recherche français doit donc favoriser ces fertilisations croisées et mieux encourager cette interdisciplinarité.

2 – ASPECTS STRATÉGIQUES¹

2.1 LE CONTEXTE INTERNATIONAL

Les nanosciences et nanotechnologies sont des enjeux majeurs pour le futur, tant au niveau des concepts que des applications. Devant l'ampleur des retombées attendues, des soutiens financiers considérables sont mis en place. Il est intéressant de comparer les efforts réalisés en Europe à ceux effectués aux USA et au Japon.

Jusqu'en 2000, l'Europe est en bonne position dans ces efforts financiers, avec en tête l'Allemagne, suivie par le Royaume-Uni, et plus loin seulement par la France. En termes de publications et de brevets, la position de l'Europe par rapport aux autres pays est tout à fait correcte aussi.

Depuis cette époque il faut signaler des changements majeurs.

Les États-Unis, sous l'impulsion du gouvernement de B. Clinton, puis de l'actuelle administration, considérant que les nanotechnologies seront à la

1. Texte daté de novembre 2003.

base de la prochaine révolution industrielle, ont lancé une « National Nanotechnology Initiative » (NNI) : l'effort gouvernemental en direction des nanosciences et nanotechnologies est augmenté de 56 % en 2001 par rapport à 2000 et de 23 % en 2002 par rapport à 2001. Y contribuent principalement la National Science Foundation, le département de la défense et le département de l'énergie. En parallèle de la NNI, initiative fédérale, un grand nombre d'états ont lancé des programmes significatifs d'aide aux nanotechnologies. De plus, de nombreuses PME voient le jour, en particulier dans le domaine des matériaux.

L'état japonais a aussi augmenté significativement l'enveloppe budgétaire consacrée aux Nanosciences et Nanotechnologies depuis 2000.

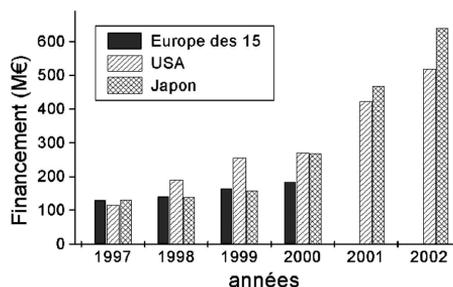
La Commission Européenne a fait des nanosciences et nanotechnologies un de ses programmes prioritaires du 6^e programme cadre 2002-2006. Sur 5 ans, 1 300 M€ seront consacrés au programme « nanotechnologies et nanosciences, matériaux multifonctionnels basés sur la connaissance, nouveaux composants et procédés de production ». De plus, les nanosciences et nanotechnologies concernent aussi d'autres priorités thématiques du 6^e PCRD comme « les technologies de la société de l'information » et « les sciences du vivant, la génomique et les biotechnologies pour la santé ».

En résumé, les pays industrialisés ont conscience de l'enjeu des nanosciences et nanotechnologies, et investissent donc fortement dans ce domaine au niveau financier.

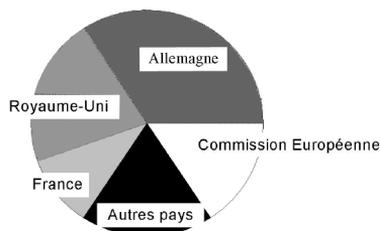
Un autre aspect à considérer est celui de la structuration de l'effort. Ainsi, aux États-Unis, il y a au niveau de la « NNI » une structuration globale de la coordination entre les différents départements. En France, la coordination entre ministères n'est pas aussi poussée. Ce pourrait être un aspect à améliorer.

Soutien gouvernemental aux Nanosciences et Nanotechnologies (en M€)²⁻³

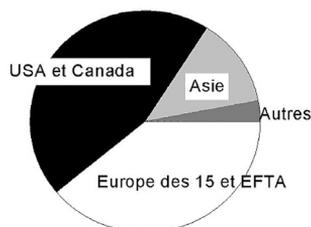
a) pour l'Europe des 15, les USA et le Japon



b) en 2000 en Europe



Brevets en nanotechnologies sur la période 1991-1999



2. D'après le 3^e rapport européen sur les indicateurs S&T, le rapport du Programme National en Nanosciences et Nanotechnologies et le rapport du groupe de travail «Nanotechnologies» de l'Académie des Technologies.

3. Les chiffres diffèrent parfois selon les sources consultées et surtout ne recouvrent pas toujours les mêmes éléments (par exemple, les frais de personnels ou le financement des infrastructures sont comptés ou non selon les pays). Les chiffres présentés ici le sont donc à titre indicatifs : ils permettent de dégager les grandes lignes de la politique de soutien au domaine des nanosciences et nanotechnologies.

Publications en nanosciences-nanotechnologies de 1997 à 1999



2.2 LE CONTEXTE NATIONAL ET LA RECHERCHE AU CNRS

2.2.1 Soutien financier et humain

Il ressort clairement de l'analyse de la situation internationale que la France doit accroître son soutien financier aux nanosciences et nanotechnologies pour garantir le maintien de son potentiel de recherche et développement dans le domaine. La dimension européenne des recherches, qui contribuera à élargir la dynamique française, doit également être encouragée. Enfin, dans ce domaine en pleine expansion, il sera fondamental de garantir les moyens humains. Au niveau du CNRS, une politique ambitieuse de recrutements de chercheurs, d'ingénieurs et de techniciens est nécessaire.

2.2.2 Recherche fondamentale et recherche appliquée

La recherche fondamentale en nanosciences bénéficie de la qualité des équipes, et constitue un point fort au CNRS. Nous pouvons apprécier la bonne place des groupes français dans le contexte mondial au niveau des publications ou des conférences internationales. Les exemples développés dans le paragraphe 1

« Situation scientifique » illustrent la richesse de la problématique pour les années à venir. Les domaines pionniers des nanosciences (relevants des technologies de l'information : nanoélectronique, optoélectronique, spintronique) doivent continuer d'être soutenus. Il conviendrait aussi dans les années à venir d'assurer un fort développement dans le domaine des matériaux et de la nanobiologie, moins développés pour l'instant en France. Enfin, il importe de renforcer les liens entre la « communauté des nanosciences » et d'autres communautés comme celles de l'astrophysique ou des neurosciences (Voir § 1.1.4 et 1.4.6).

Le domaine des technologies de l'information bénéficie en France de la présence d'industries dynamiques, avec une recherche avancée en microélectronique, optoélectronique et spintronique. Le CNRS y a accompagné les efforts avec des créations de laboratoires associés à des entreprises ou à d'autres organismes publics (citons en région parisienne le laboratoire Thalès, ou le L2M, devenu LPN, citons SPINTEC à Grenoble, etc.). Néanmoins, de manière générale, une des faiblesses des programmes Nanosciences-Nanotechnologies en Europe et en particulier en France, par comparaison au Japon et aux USA, est liée au trop faible drainage industriel que nous pouvons constater dans ce domaine, et qui conduit les acteurs de la recherche à prendre assez peu en considération les aspects valorisation de leurs travaux. On entend trop souvent dire de la part de responsables de grands groupes que les applications dans ce domaine sont trop lointaines et qu'ils s'en tiennent pour le moment à un « état de veille ». De même les responsables de PME-PMI considèrent souvent le domaine comme technologiquement trop complexe et probablement trop coûteux en investissements techniques et humains pour s'y lancer. Ceci malgré les efforts faits dans leur direction avec les réseaux nationaux de recherche et d'innovation technologique, soutenus par plusieurs ministères et par l'ANVAR (agence française de l'innovation) et qui ont pour but d'encourager le transfert technologique, en particulier par la création de PME innovantes. Nommons, dans le domaine

des nanotechnologies, le Réseau National de Recherche en Télécommunications (RNRT) ou le Réseau Micro-Nano-Technologies (RMNT). Doit-on se résoudre à voir la production française dans le domaine des nano-composants, nanomatériaux, nano-technologies, dans un avenir pas si lointain, soumise à des achats de licences étrangères pour cause de non investissement en temps opportun ? Une telle situation serait d'autant plus dommageable que les efforts amont en recherche de la part des institutions européennes et françaises pour nous placer au plus haut niveau scientifique et technique international dans le domaine sont importants et les résultats palpables. Le CNRS, en sa qualité d'organisme de recherche national, doit analyser cette situation et participer avec les ministères concernés à la réflexion pour la mise en place de mécanismes nouveaux qui encourageraient fortement, dès maintenant, l'implication/l'investissement industriel pour se positionner sur certains marchés.

Également, dans son organisation interne, le CNRS doit favoriser les relations recherche-industrie. C'est notamment le cas pour la prise en compte des brevets dans la carrière des chercheurs qui, suivant les départements/commissions, reste souvent trop faible par rapport aux indicateurs courants tels que les publications dans de bonnes revues internationales. Il faut faire admettre dans les critères d'évaluation que le dépôt d'un brevet est une opération complexe, laborieuse et scientifiquement gratifiante, qui doit valoir à son auteur une prise en compte réaliste. D'autres aspects du transfert de technologies doivent se faire via l'initiation/la formation de personnels de l'industrie au sein de laboratoires disposant de savoir faire et techniques spécifiques, de même que par l'accès à certaines infrastructures nanotechnologiques. Enfin, il faut également mentionner le domaine de la modélisation/simulation de nano-objets et nano-systèmes qui a fait des progrès considérables ces dernières années pour arriver à des niveaux d'interprétation et de prédiction élevés, très bien maîtrisés dans des laboratoires CNRS et qui pourrait avantageusement profiter aux milieux industriels moins portés sur ce type d'approches.

2.2.3 Interdisciplinarité et coordination des recherches

Une des missions du CNRS, organisme multi-disciplinaire, est d'encourager l'interdisciplinarité, au cœur du développement des nanosciences.

Ainsi, le CNRS joue un rôle fédérateur à travers :

- plusieurs Groupements de Recherche, très appréciés de leurs participants pour les ouvertures qu'ils leur offrent sur d'autres champs disciplinaires ;

- les Réseaux Thématiques Pluridisciplinaires (RTP), structurés autour d'une finalité ou d'un thème de recherche prioritaires pour les Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication ;

- les programmes de recherche interdisciplinaires, dont l'objectif est de soutenir et de coordonner les équipes de recherche françaises impliquées dans le domaine. Citons pour ces dernières années les programmes « Nanosciences-nanotechnologies », « Matériaux » et « microfluidique et microsystèmes fluidiques ». Le soutien se fait par la sélection de projets sur appels d'offres, en encourageant le partenariat entre équipes et l'interdisciplinarité ;

- le Programme National Nanosciences 2002-2005, qui reprend le programme « Nanosciences-nanotechnologies » et l'axe nanostructures des programmes interdisciplinaires pré-cités. Il s'agit d'une action de coordination menée conjointement par le CNRS, le ministère de la recherche et le CEA / DSM, en s'appuyant sur trois modes d'interventions principaux : (i) soutien à des projets innovants via un appel d'offres annuel, (ii) soutien à des projets « intégrés » visant à lever des verrous technologiques prévus à échéance de dix ans, (iii) contribution à la mise en place et au fonctionnement d'un réseau de centrales technologiques (Voir § 1.2.4). La dotation du programme était de 10 M€ en 2002 et est de 11,2 M€ en 2003.

Les actions fédératrices ci-dessus nous apparaissent extrêmement positives compte tenu du fort développement du domaine.

Au niveau individuel, l'inter-disciplinarité est parfois vécue comme étant mal reconnue. La prise en compte de l'interdisciplinarité dans l'évaluation des chercheurs par les sections du Comité national doit être amplifiée. Par ailleurs, la création d'une Commission Interdisciplinaire (CID) « Nanosciences-Nanotechnologie » pourrait-elle apporter un élément de réponse à ce problème ?

2.2.4 Nanofabrication

Le domaine de la nanofabrication (*Voir* § 1.5) est essentiel dans le contexte du développement des Nanosciences et Nanotechnologies. Il demande actuellement de forts investissements en moyens que nous allons expliciter. Mais auparavant, rappelons, et ce n'est pas antinomique, qu'un des objectifs est le développement de méthodes de fabrication bas coût, adaptées par exemple aux exigences des applications en biologie ou en catalyse, et qui permettront aussi un développement plus rapide des nanosciences au niveau de chaque laboratoire.

En terme de moyens pour la nanofabrication, plusieurs niveaux complémentaires d'organisation et d'investissement interviennent, qu'il convient de prendre en compte de façon opérationnelle.

Le CNRS, le CEA et le ministère délégué à la recherche et aux nouvelles technologies unissent leurs efforts pour construire un réseau de grandes centrales technologiques de nanofabrication (« premier cercle ») compétitif au niveau européen et mondial et cohérent au niveau national. Une grande centrale technologique se situe entre les équipements dédiés des laboratoires et les centrales industrielles. Du fait du coût grandissant des équipements de pointe, et des coûts de fonctionnement associés, le nombre de ces centrales technologiques doit être limité. Mais elles doivent en corollaire servir de socles pour des projets de recherche à l'échelon français et européen. Utilisées pour les recherches technologiques de base sur les dispositifs avancés et les filières technologiques du futur, les grandes centrales technologiques doivent aussi servir de

support à des recherches plus fondamentales de physique, de biologie ou de chimie qui font progresser les nanosciences, ou à des recherches interdisciplinaires qui nécessitent l'utilisation des équipements de pointe dont elles disposent. Cinq centrales sont développées, chacune autour d'un laboratoire de recherche important travaillant dans le domaine. Les pôles retenus sont : le LETI (Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Information, Grenoble), le LAAS (Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, Toulouse), l'IEMN (Institut d'Électronique, de Microélectronique et de Nanotechnologies, Lille) et, pour le pôle Ile-de-France Sud implanté sur deux sites, les laboratoires LPN (Laboratoire de Photonique et de Nanotechnologies, Marcoussis) et IEF (Institut d'Électronique Fondamentale, Orsay). On distinguera dans chaque centrale les projets qui font l'objet de collaborations avec le laboratoire support de la centrale et les projets dits « exogènes », qui doivent faire l'objet d'au moins 15 % de l'activité de la centrale afin d'en garantir un fonctionnement ouvert.

Dans le cadre de la structuration des moyens au niveau national, les autres laboratoires et équipes doivent pouvoir disposer localement d'équipements spécifiques en adéquation avec leur activité de recherche avancée. Certains équipements sont donc regroupés au sein de centrales spécifiques (« deuxième cercle ») de dimension, de coût et de supports plus réduits, qui doivent également être partiellement ouvertes et mises en réseau.

Enfin, un « troisième cercle », tout autant nécessaire, qui concerne des équipements milourds (investissements ≤ 1 M€) généralement associés à des savoir faire spécifiques locaux pour la préparation, mais aussi l'étude de nano-objets et nanostructures divers, est trop peu pris en compte actuellement (exemple d'équipement du 3^e cercle : les plates-formes physico-chimiques pour l'élaboration de nano-objets et nanostructures par les voies sol-gel, colloïdale). Ceci conduit à des plans d'investissement complexes, souvent multipartenaires (CNRS, Université, Région), qui ne sont pas toujours aisés à concrétiser et gérer. De plus, leurs budgets de fonctionnements qui dépassent

souvent les capacités des groupes gestionnaires sont difficiles à garantir car ils sont rarement inclus dans les budgets de base récurrents et doivent faire l'objet de demandes spécifiques au caractère peu reproductible. Enfin, pour permettre l'ouverture et la mise à disposition de ces équipements, il faut également prendre en compte la mise à disposition de personnels techniques de bon niveau (Ingénieurs de Recherche et d'Étude). C'est finalement sur ces trois volets de l'investissement mi-lourd, du fonctionnement récurrent et du personnel technique d'encadrement, que la réflexion et l'organisation devrait porter pour aboutir à terme à un potentiel national de ces infrastructures du « troisième cercle », opérationnel et adapté aux besoins réels, en complémentarité de ceux des 1^{er} et 2^e cercles. Il faut remarquer qu'une initiative dans ce sens avait été tentée en 2001 au CNRS par la MRCT (Mission Ressources Compétences Technologique) de la Direction de la Stratégie et des Programmes et qu'il serait intéressant d'analyser les résultats et retombées de cette action pour un développement futur.

Il conviendrait aussi d'apporter un soutien conséquent aux instruments de manipulation/fonctionnalisation. Citons les équipements sous ultravide de plus en plus nécessaires pour élaborer dans des conditions contrôlées de très grande propreté, caractériser, manipuler et fonctionnaliser des objets à nano-échelle. Dans ce cas, en plus d'une complexité liée à l'ultravide, les instruments de manipulation / fonctionnalisation doivent offrir des résolutions spatiales inférieures au centième de nanomètre, les instruments de caractérisation doivent offrir des sensibilités ultimes adaptées aux très faibles quantités de matière en cause, des systèmes de transferts des échantillons garantissant le maintien des conditions de propreté doivent être disponibles. Un effort instrumental est à lancer qui prendrait appui sur un soutien accru à la science des surfaces (surfaces isolantes, métallurgie de surface,

techniques de sublimation), aux nouveaux instruments de manipulation d'atomes et de molécules ainsi qu'à la mise au point de méso et micro-outils compatibles ultra-vide. On doit aussi mentionner le nécessaire développement de microscopes environnementaux à résolution atomique, permettant de combler le « pressure gap » pour la nanocatalyse, de travailler sous atmosphère compatibles avec les conditions de la vie en biologie, etc.

2.2.5 Formation et communication

Les nanosciences pourraient conduire à une véritable révolution économique et sociétale. La communication en direction du grand public est donc un point à développer et renforcer. Le CNRS devrait mener une réflexion détaillée sur le rôle qu'il sera amené à avoir dans ce cadre.

D'autre part, dans le contexte du fort développement des nanosciences et nanotechnologies, des besoins en personnels compétents apparaissent, tant dans le milieu industriel que dans le milieu universitaire et au CNRS. Les laboratoires du CNRS jouent un rôle de formation pour les doctorants, en partenariat avec les universités. Mais ils doivent aussi assurer une mission de formation auprès des étudiants d'IUT ou de DESS, en offrant, grâce à leurs laboratoires, des plates-formes d'expérimentation. Ils doivent contribuer à la formation de personnels de l'industrie à certaines techniques de pointe (Voir § 1.2.2). Enfin, en interne, des ateliers à destination des techniciens, ingénieurs et chercheurs pourront être organisés par le biais de la formation continue. La tenue d'écoles à caractère fortement inter-disciplinaire doit aussi être soutenue. Le CNRS doit pleinement bénéficier de la présence dans l'organisme de toutes les compétences nécessaires.

ANNEXES

ANNEXE 1 : LISTE DES ACRONYMES

ADN	Acide désoxyribonucléique
AFM	Microscopie à force atomique
ARN	Acide ribonucléique
CEA	Commissariat à l'énergie atomique
CNRS	Centre national de la recherche scientifique
DESS	Diplôme d'études supérieures spécialisées
DSM	Direction des Sciences de la matière (CEA)
FET	Transistor à effet de champ
GISAXS	Diffusion des rayons X aux petits angles en incidence rasante
GIXS	Diffusion des rayons X en incidence rasante
GMR	Magnétorésistance géante
IUT	Institut Universitaire de Technologie
MRAM	Mémoires magnétiques à accès aléatoires
MOS	Semiconducteurs métal-oxyde
NNI	National Nanotechnology Initiative (USA)
PME	Petite et moyenne entreprise
PMI	Petite et moyenne industrie
RMN	Résonance magnétique nucléaire
RPE	Résonance paramagnétique électronique
SERS	Diffusion Raman exaltée de surface
STM	Microscopie à effet tunnel
TMR	Magnétorésistance tunnel

ANNEXE 2 : LISTE DES AUTEURS

Pascale Launois

Coordinatrice de la rédaction du rapport « Nanosciences et nanotechnologies »
– Laboratoire de Physique des Solides (UMR CNRS 8502), Bât. 510, Université Paris Sud 91405 Orsay cedex
Domaine de compétence : nanotubes

Henri Benisty

Institut d'Optique, centre scientifique, Bât 503 91403 Orsay cedex
Domaine de compétence : nanophotonique

Alain Berthoz

UMR CNRS 7150/Collège de France, 11 place Marcelin Berthelot, 75005 Paris
Domaine de compétence : neurosciences

Robert Corriu

Laboratoire de Chimie Moléculaire et Organisation du Solide (UMR CNRS 5637), place Eugène Bataillon, 34095 Montpellier cedex
Domaine de compétence : chimie

Claire Dupas

École Normale Supérieure de Cachan, 61 av. du Président Wilson, 94235 Cachan cedex
Domaine de compétence : nanomagnétisme

Albert Fert

Unité Mixte de Physique CNRS/THALES (UMR CNRS 137), Domaine de Corbeville, 91404 Orsay
Domaine de compétence : nanomagnétisme, spintronique

Philippe Grangier

LCFIO (UMR CNRS 8501), Institut d'Optique, Centre scientifique, Bât 503 91403 Orsay cedex
Domaine de compétence : information quantique

Claude Henry

Centre de Recherche en Matière Condensée et Nanosciences (UPR CNRS 7251), Campus de Luminy 13288 Marseille cedex 09
Domaine de compétence : nanocatalyse

Christian Joachim

Centre d'Élaboration de Matériaux et d'Études Structurales, 29 rue J Marvig 31055, Toulouse
Domaine de compétence : nanosciences atomiques et moléculaires

Christine Joblin

CESR, UMR CNRS 5187, 9 avenue du Colonel Roche 31028 Toulouse cedex 04
Domaine de compétence : astrophysique

Philippe Kapsa

École Centrale de Lyon, Laboratoire de Tribologie et Dynamique des Systèmes (UMR CNRS 551), 69134 Écully cedex
Domaine de compétence : tribologie

Isabelle Ledoux-Rak

LPQM (UMR 8537), Institut d'Alembert (IFR 121), École Normale Supérieure de Cachan, 61 av. du Président Wilson 94235 Cachan cedex
Domaine de compétence : nanobiophotonique

Jean-Yves Marzin

LPN/CNRS, route de Nozay 91460 Marcoussis
Domaine de compétence : nanofabrication

Jean-Pierre Nozières

SPINTEC (CEA-CNRS), 17 avenue des martyrs 38054 Grenoble cedex 09
Domaine de compétence : spintronique

Bernard Pannetier

Centre de Recherches sur les Très Basses Températures, CNRS, 25 av. des Martyrs,

38042 Grenoble cedex 9

Domaine de compétence : nanoélectronique

Alain Pérez

Laboratoire de Physique de la Matière Condensée et Nanostructures (UMR CNRS 5586), Université Claude Bernard Lyon 1, Domaine Scientifique de la Doua, 69622 Villeurbanne cedex
Domaine de compétence : agrégats

Didier Stievenard

IEMN (UMR CNRS 8520), Cité Scientifique, Avenue Poincaré BP 60069 59652 Villeneuve d'Ascq cedex
Domaine de compétence : nanobiologie

Christophe Vieu

LAAS-CNRS, 7 avenue du colonel Roche 31077 Toulouse
Domaine de compétence : nanobiologie, nanofabrication

Jacques Yvon

LEM (UMR CNRS 7569), 15 av. du Charmois BP 40 54501 Vandoeuvre les Nancy cedex
Domaine de compétence : géophysique, nanomatériaux

Joseph Zyss

LPQM (UMR 8537), Institut d'Alembert (IFR 121), École Normale Supérieure de Cachan, 61 av. du Président Wilson 94235 Cachan cedex
Domaine de compétence : nanobiophotonique

