

Introduction générale

Au cours du xx^e siècle, qui a été appelé le siècle de la science et de la technologie, et tout particulièrement lors de sa dernière décennie, des avancées considérables en sciences et technologie ont apporté des changements sans précédent à travers le monde. La conférence prophétique de Richard P. Feynman « *There's plenty of room at the bottom* », de 1959, date la prise de conscience par la communauté scientifique de ce que la possibilité de manœuvrer la matière atome par atome ouvrira des champs insoupçonnés.

Comme pour la physique et la nanotechnologie, le chimiste a toujours manipulé des objets de taille nanométrique, mais son ambition est devenue actuellement de contrôler l'organisation de la matière en termes de propriétés chimiques, de propriétés physiques et de morphologie. La chimie est arrivée à une bonne connaissance des concepts qui la gouvernent et à une excellente maîtrise des voies de synthèse. Elle a obtenu de la physique des méthodes de caractérisation fiables et l'informatique lui a donné des méthodes de calcul permettant des modélisations précises qui, dans l'avenir, ouvriront l'accès à des études plus prévisionnelles. Cet ensemble d'outils autorise l'approche de cet objectif ambitieux prédictif ; il ne pourra être atteint qu'en collaboration étroite avec des physiciens.

En ce qui concerne la physique, depuis des décennies les progrès de la microélectronique ont reposé sur une miniaturisation de plus en plus poussée, afin d'améliorer la rapidité et réduire la dissipation. Mais, au-delà des prouesses technologiques, le comportement physique restait toujours classique, fondé sur la bonne vieille loi d'Ohm (on traite le courant électrique comme un écoulement fluide). La situation a aujourd'hui radicalement changé. On sait observer et manipuler des objets d'échelle atomique, qu'il s'agisse d'agrégats, de structure moléculaires complexes ou même d'atomes individuels. On rentre ainsi dans un monde nouveau où les concepts de la physique macroscopique sont

caducs. Les comportements deviennent intrinsèquement quantiques, bouleversés par la cohérence de phase. Des notions aussi simples qu'un montage en série ou en parallèle ne sont plus valides ! La nature discrète de la charge électrique permet d'imaginer des systèmes logiques originaux et pourtant très simples, où l'on « compte » les électrons un à un. Plus généralement, des notions aussi familières qu'un équilibre thermodynamique ou une transition de phase doivent être entièrement repensées. C'est là une véritable révolution *conceptuelle*, qui naturellement ouvre à la physique une *terra incognita* fascinante. Mais c'est aussi l'amorce d'une révolution *technologique*, ouvrant la voie à des applications futuristes. Indépendamment de la miniaturisation toujours plus poussée de l'électronique, l'accès à l'échelle du nanomètre permet d'imaginer des nanostructures, des « nanomachines » capables de transporter des molécules, de marquer ou de modifier une structure locale. On peut par exemple encapsuler des médicaments et contrôler leur transport et leur déploiement *in vivo*. On peut élaborer de objets moléculaires aux fonctionnalités voulues. Les implications dans tous les domaines sont considérables. Quelques réalisations existent déjà, d'autres restent encore aujourd'hui un rêve — mais qui se matérialisera très vite.

Les enjeux sont multiples et se manifestent à tous les niveaux, scientifiques et technologiques bien sûr, mais aussi économiques, voire sociétaux dans la mesure où des percées majeures peuvent affecter notre mode de vie. La microélectronique a conduit au développement fulgurant de l'informatique et des moyens de communications (il suffit de regarder les téléphones portables autour de soi). Les nanotechnologies portent en germe des applications différentes, mais tout aussi importantes. En agissant au niveau des atomes et des molécules, on peut modifier 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 pas encore imaginés. 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.

Encore faut-il garder la tête froide. La reproduction ou la création d'un être vivant artificiel, même des plus élémentaires, relève de la fiction la plus totale. Nous sommes encore très loin d'avoir compris suffisamment le monde du vivant pour être en mesure d'en recréer fut-ce une parcelle, et ce quels que soient les moyens que biologistes, physiciens et chimistes seraient susceptibles de mettre en commun. La nature est plus douée que nous ! Et pourtant, la nature elle-même ne sait pas « faire » des êtres intelligents microscopiques. C'est qu'elle obéit aux lois de la physique, dans le contexte de la théorie de l'informa-

tion, qui introduisent des quantités incontournables telles que énergie, entropie, bruit, etc. Les rêves, voire délires, auxquels on assiste aujourd'hui sur les dangers des nanotechnologies, liés à l'apparition de matière intelligente constituée d'objets microscopiques qui échapperaient au contrôle humain, sont du ressort de la science-fiction. L'argument qui consiste à suggérer la possibilité de l'émergence d'une intelligence collective de ces multiples objets ignore les limites de cette intelligence collective (ainsi que l'on peut l'observer dans les sociétés animales telles que les fourmilières), quand elle n'est pas accompagnée d'échanges massifs d'informations (eux aussi soumis aux lois physiques, c'est-à-dire en particulier nécessitant énormément d'énergie), comme dans un cerveau unique.

Il n'en est pas moins vrai qu'en nanotechnologies, comme dans tous les secteurs où l'on ouvre de nouvelles possibilités à l'activité humaine, il faut être vigilant sur les effets imprévus et nuisibles : il y aura des domaines où il faudra faire des études d'impact, d'autres encore où il restera des zones d'incertitude et où il faudra aller avec précaution. Mais cela n'est pas, à nos yeux, très différent des précautions qu'il faut prendre dans tous les secteurs, en particulier en biologie avec ses progrès extraordinaires, progrès déjà sources de soulagement pour beaucoup de souffrances humaines, progrès porteur de beaucoup d'espérances (que l'on songe aux espoirs de vaincre les grands fléaux tels que maladies d'Alzheimer et de Parkinson, Sida) mais aussi sources de nouveaux dangers, par détournement des progrès ou par effets secondaires non prévus. En particulier, dès lors qu'il deviendra possible de créer des « prothèses moléculaires », relevant plus ou moins de la biochimie, il est clair que la dimension éthique deviendra primordiale, avec des obligations de contrôle qui s'imposent, comme il est d'usage en biologie et en médecine. Rappelons qu'en leur temps, ce sont les biologistes qui ont imposé un moratoire sur les manipulations génétiques.

Toutes les promesses des nanosciences et des nanotechnologies ne seront pas tenues en un jour. Si les premiers développements sont déjà à notre porte, d'autres nécessitent encore des recherches et des développements identifiés, d'autres encore, plus futuristes et ambitieux, n'aboutiront pas avant longtemps. Les différentes échelles de temps sont importantes et doivent être traitées de concert. Les programmes de demain doivent être réalistes – ils ouvrent déjà des champs considérables. Mais le rêve d'après-demain ne se construira que s'il est engagé dès maintenant. Tout en gardant les pieds sur terre, il faut préserver la part de rêve qui, aujourd'hui futuriste, sera plus tard l'ultime justification de l'effort actuel.

Convaincues que dans ce défi scientifique et économique majeur, la France et l'Europe peuvent se prévaloir de forces reconnues internationalement, l'Académie des sciences et l'Académie des technologies veulent témoigner dans ce rapport « Nanosciences, nanotechnologies » des

XXII Nanosciences – Nanotechnologies

savoirs nationaux et de la nécessité de travailler ensemble autour d'objectifs communs. Aussi le rapport adoptera un plan en quatre parties :

- conclusions et recommandations communes ;
- nanochimie (l'art de synthèse et son contrôle) ;
- nanophysique (concepts et propriétés des matériaux) ;
- nanotechnologies (composants et intégration dans les architectures en vue d'applications).

Présentés successivement, les trois exposés s'interpellent et montrent que les communautés « chercheurs chimistes, physiciens et ingénieurs » vivent et doivent vivre de plus en plus en étroite collaboration.

L'absence de la nanobiologie peut sembler choquante : elle est délibérée, en premier lieu parce qu'aucun des participants à ce rapport n'est compétent, mais surtout parce que la nanobiologie est un monde aux multiples facettes, auquel seuls des biologistes peuvent rendre justice. Certaines applications sont strictement biologiques, par exemple les puces à ADN où l'on dépose sur une puce un réseau de segments types, créant un puissant outil d'analyse parallélisé. Parfois les nanotechniques apparaissent comme un nouvel outil de la biologie. On peut ainsi étudier des objets biologiques individuels (par opposition aux méthodes statistiques), suivre le transport électrique à travers des canaux ioniques (membranes, protéines), insérer des marqueurs fluorescents, comprendre les mécanismes des moteurs moléculaires. Si l'on sait un jour débobiner l'ADN sans le casser, on peut rêver d'un séquençage rapide et bon marché ! À l'inverse, le biomimétisme rêve d'utiliser le modèle vivant comme outil des nanotechniques : peut-on rêver d'un microprocesseur à ADN ?

Quelle que soit son échelle, la biologie est toujours un art difficile. La démarche naturelle du physicien ou du chimiste est de simplifier pour comprendre. Mais simplifier un système vivant revient en général à le tuer. Face à ce monde de la complexité, les biologistes ont leur propre façon de penser et d'aborder les problèmes. Les physiciens, eux, ne savent pas gérer la redondance et la faculté de régénération qui sont des atouts fondamentaux du vivant. Les maîtres d'œuvre d'un rapport sur la nanobiologie doivent donc être les biologistes : les physiciens, chimistes et ingénieurs apportent leur moisson de prouesses techniques, mais ils ne doivent surtout pas projeter leur manière d'appréhender l'inconnu. Un tel rapport doit impérativement compléter celui-ci.

Pour conclure cette présentation une mise en garde s'impose. Les nanosciences et les nanotechnologies sont au premier plan de l'actualité (ce rapport n'est pas le premier sur le sujet). Elles ouvrent un champ considérable : il faut de toute évidence leur consacrer un effort particulier et soutenu.

Un grand programme de nanosciences et nanotechnologies a de nombreux effets bénéfiques : il permet de motiver et de réorienter une

partie des recherches, et des chercheurs, vers des domaines nouveaux, à la fois porteurs d'excellente recherches et de nouveaux secteurs applicatifs.

À côté des éléments bénéfiques apportés par un tel programme, il faut se prévenir de quelques risques importants : un premier écueil est le risque de voir rebaptiser nanosciences et nanotechnologies des recherches qui n'en sont pas vraiment. Un autre est de voir proposer des sujets de piètre qualité sous couvert d'applications très futuristes, pour ne pas dire parfois fumistes! Ceci est particulièrement vrai en nanotechnologies, où il faudra veiller à bien identifier les sujets à leur vrai stade de développement (recherche fondamentale, recherche exploratoire, démonstration de concept, validation de concepts, prototypes, etc.) et les financer au niveau correspondant. Là, comme ailleurs, le financement doit être appliqué sur appels d'offres compétitifs et sur critères rigoureux de qualité.

Mais les nanosciences et nanotechnologies ne doivent pas non plus étouffer les domaines plus traditionnels, eux aussi porteurs d'innovation. Le nanomonde est un chapitre nouveau et essentiel de la science, mais ce n'est qu'un chapitre. Il en est bien d'autres qui peuvent aussi être le terreau d'où émergeront des percées futures des nanosciences elles-mêmes. Pour prendre un exemple, ce sont des progrès de la physique des surfaces et de la croissance cristalline qui permettent aujourd'hui de rêver d'auto-organisation. Négliger le patient travail de compréhension des physiciens et des chimistes serait une grave erreur, à terme stérilisante pour toutes les disciplines. Il y a donc un équilibre délicat à trouver, qui d'ailleurs dépend des disciplines : si les physiciens ont parfois trop tendance sauter sur les nouveautés, les chimistes regardent souvent le monde « nano » avec une certaine méfiance.

La recherche moderne ne peut s'affranchir d'un effort de programmation, et c'est dans cet esprit que s'inscrit ce rapport. Mais elle doit impérativement préserver des espaces de liberté où la créativité des chercheurs puisse se donner libre cours : c'est à ce niveau qu'émergent les véritables percées conceptuelles. Articuler cette liberté avec une gestion efficace demande une grande souplesse et un jugement scientifique sûr. Un écueil à éviter est « l'effet de mode », qui dans le cas présent consiste à badigeonner d'un vernis « nano » tout et n'importe quoi afin d'obtenir des moyens : « plus nano que moi tu meurs » ! On crée un domaine nouveau avec des idées, pas avec des mots.

