

## **Introduction au dossier**

### **A quoi sert la science ? La réponse américaine**

Le début de l'été 2003 a vu éclater en France deux crises posant la question du désengagement de l'Etat face aux besoins d'une politique publique à long terme qui soit dotée de moyens budgétaires suffisants. Ces crises sont sans doute d'inégale importance, mais elles concernent toutes deux l'avenir de notre pays. D'une certaine façon, elles se présentent dans les mêmes termes. Elles font apparaître les conséquences du retrait de l'Etat dans des domaines où lui seul peut représenter l'intérêt général. Il s'agissait de la culture et de la recherche scientifique. Limitons-nous ici à cette dernière.

Deux instances ont vigoureusement tiré la sonnette d'alarme concernant les besoins non satisfaits en chercheurs, et plus généralement la diminution régulière des financements publics consacrés à la recherche scientifique. Le niveau des budgets, qu'on le veuille ou non, exprime l'importance attribuée à la science par les Pouvoirs Publics et, à leur suite, par l'opinion.

Un collectif de scientifiques de toutes disciplines a ouvert le feu en publiant un appel sur le thème "La France a besoin de plus de scientifiques, de chercheurs et d'universitaires". L'appel avait été précédé de plusieurs mises en garde émanant du Syndicat National des Chercheurs Scientifiques. Ce fut ensuite la réunion le 30 juin du Comité national de la recherche scientifique, instance d'évaluation des chercheurs et des laboratoires du CNRS. Réuni en séance plénière et comptant 600 participants, le Comité a repris le thème de l'avenir de la recherche, en ne se limitant pas aux seules questions de l'emploi et des moyens de fonctionnement. Il a voulu montrer à tous qu'il fallait donner "*des perspectives et un avenir à la recherche française*", selon les termes du président de la Conférence des présidents de section, ajoutant qu"*un pays qui n'affiche pas d'ambition scientifique est un pays qui se condamne.*"

Depuis, l'actualité ayant mis sur le devant de la scène d'autres événements, on peut craindre que l'intérêt pour l'avenir de la recherche scientifique française ne retombe très vite. Nous pensons que chacun, notamment dans la perspective de la compétition scientifique et technique internationale, doit relayer et poursuivre le débat.

#### **1. Le monde de demain sera américain**

En France, beaucoup de gens considèrent que les demandes des chercheurs en matière de personnel et de moyens techniques relèvent d'intérêts corporatistes. Propos révélateur bien que peut-être apocryphe, le ministre du Budget, Alain Lambert, aurait répondu à un député venu plaider la cause de la recherche : "*Prouvez-moi d'abord qu'elle sert à quelque chose.*" Le propos a fait le tour des laboratoires.

Malheureusement, il est devenu pratiquement impossible d'aborder dans notre pays le problème de la recherche scientifique sans s'engager dans des discussions bien françaises concernant les carrières, les modalités de gestion des organismes, l'évaluation de la recherche, la relation avec la recherche privée, etc. Ces discussions menées depuis plus de 20 ans débouchent moins sur des solutions que sur des affrontements entre points de vue radicalisés. Ceci parce que, selon nous, ni la France ni l'Europe n'ont défini des stratégies à long terme donnant à la science la place qu'elle devrait avoir dans l'évolution du monde contemporain. Si la science se voyait reconnaître un statut prioritaire, les Etats trouveraient

les ressources nécessaires au financement de la recherche et les lourdeurs de gestion découlant de la nécessité de répartir la pauvreté disparaîtraient d'elles-mêmes.

Mais, plutôt que discuter de principes, il faut se donner des références internationales concrètes. Or la seule qui compte, dans le monde d'aujourd'hui, est celle des Etats-Unis. Pourquoi ?

Le monde entier constate actuellement que les Etats-Unis ont assumé au fil des années le rôle d'une hyper-puissance hégémonique. Leurs difficultés en Irak font penser à certains que cette réputation était grossie. Mais la guerre, au plan technologique, a montré les années d'avance qu'ils possèdent. Cette avance ne concerne pas seulement les armements classiques. Elle s'exprime dans tous les domaines, sans exception, des sciences émergentes comme des sciences traditionnelles. En ce qui concerne les premières, la National Science Foundation, dans un rapport fameux de Juillet 2002 (*Converging Technologies for Improving Human Performances*), a fixé les objectifs : un leadership ne tolérant pas de rivaux en matière d'informatique et d'intelligence artificielle, de biotechnologies, de nanotechnologies et de sciences cognitives. Mais ces nouvelles sciences n'éclipsent pas l'intérêt porté aux sciences et technologies plus traditionnelles dans les domaines de l'énergie, l'aérospatial, l'environnement, les sciences sociales, l'économie... L'objectif est clairement défini. Il ne doit pas y avoir de domaines scientifiques où les Etats-Unis laisseraient à d'autres pays le leadership.

Les financements publics suivent. Le budget fédéral consacré aux sciences atteint 3% du PNB, objectif que l'Europe s'était fixée à horizon de cinq ans mais qu'aucun des pays européens n'est près d'atteindre. Plus récemment, l'accroissement du budget fédéral de défense, qui atteint 600 milliards de dollars par an, s'est traduit par un budget de 300 milliards consacré aux sciences et technologies. Celles-ci sont à priorité militaires, mais en fait elles sont considérées comme duales, c'est-à-dire comme ayant la vocation de développer des produits et applications destinés à conquérir les marchés internationaux. C'est le cas des lanceurs, satellites et drones (avions sans pilote), parmi de nombreuses autres filières.

Contrairement à ce que l'on dit parfois, les crédits fédéraux ne vont pas seulement à la recherche appliquée. Ils concernent aussi la recherche fondamentale. Les stratèges de la Maison Blanche et du Pentagone ont bien compris que sans celle-ci aucune maîtrise en amont n'était durable. La recherche fondamentale fait partie intégrante des grands contrats. Elle est menée dans les universités et dans les entreprises, d'une façon souvent imbriquée. Au-delà de celles-ci, les fondations et autres laboratoires financés pour faire de la prospective scientifique et mener des travaux sans débouchés pratiques immédiatement prévisibles sont nombreux (Blue Sky Research). Mais ils le font de façon pragmatique, en favorisant la mobilité des chercheurs et des crédits, la circulation des hypothèses et des résultats.

Il en résulte que la science américaine se proclame la meilleure du monde. Elle fait tout pour le prouver et attirer puis conserver l'élite des chercheurs du monde entier.

Il faut bien comprendre la vision messianique qui est derrière la volonté de se doter de la meilleure science possible. Selon les prophètes de cette vision, les sciences et technologies vont marquer dans les prochaines décennies un développement à proprement parler exponentiel, sur le modèle de la Loi de Moore bien connue en informatique (doublement tous les dix-huit mois de la puissance de calcul à coût constant). Ce développement sera convergent, c'est-à-dire que les progrès dans un domaine irrigueront instantanément tous les autres. Une nouvelle forme d'humanité associant le biologique et l'artificiel en émergera. Les outils dont elle disposera lui permettront de résoudre tous les problèmes du monde actuel, à commencer par les difficultés contemporaines auxquelles l'Amérique est confrontée et que nul ne nie. Au-delà de notre Terre, la voie s'ouvre pour une future civilisation spatiale,

capable de maîtriser les ressources du système solaire, avant de porter ses pas plus loin. On ne parlera plus alors d'une accélération des rythmes de croissance, mais d'une Méta-transition au terme de laquelle le monde ne sera plus jamais ce qu'il est.

Or, selon les politiques eux-mêmes, ce ne sont pas les incantations mais les recherches scientifiques et techniques qui permettront d'y parvenir. Vu son avance actuelle, l'Amérique est déjà seule en état de piloter le changement. Elle doit le rester indéfiniment car elle « incarne ce qu'il y a de mieux dans l'univers ». La Méta-transition prochaine prendra naissance et se précisera en Amérique.

Pour qu'une telle vision se réalise, pour devenir la meilleure au monde, la science américaine doit attirer à elle toutes les capacités de recherche dont disposent encore les autres nations. Elle doit donc disposer d'un milieu d'accueil suffisamment attrayant sur le plan matériel. Mais elle doit surtout donner aux jeunes chercheurs qui travaillent dans ses laboratoires la certitude d'acquérir des connaissances et un savoir-faire les plaçant de 5 à 10 ans en avance sur ce qu'ils auraient pu espérer dans leurs pays d'origine.

Ce dispositif simple fonctionne à merveille. Les chercheurs et enseignants américains sont pour plus de 60% d'origine étrangère. Les pays tels que le nôtre forment pendant 10 ans des thésards qu'ils sont incapables de retenir, faute de postes et de projets. Ils doivent les laisser partir dans les laboratoires et les entreprises américaines. La plupart ne reviennent jamais, même si le mode de vie américain ne les séduit pas particulièrement. Travailler au sein des meilleures équipes du monde satisfait les plus nobles de leurs ambitions professionnelles.

L'Amérique ne cherche pas seulement à attirer les chercheurs, mais aussi les entreprises de pointe. Des contrats bien dotés sont offerts par appel d'offres aux firmes jugées intéressantes. On a vu cela avec l'ancienne Initiative de Défense Stratégique. La démarche prend une toute autre ampleur avec l'accélération des recherches civiles et militaires pilotées par l'Agence de recherche du Pentagone, la Darpa, et dans une moindre mesure par la Nasa. Il suffit de parcourir les sites de ces agences pour prendre connaissance des dizaines de projets plus futuristes les uns que les autres proposés à l'élite des laboratoires privés ou universitaires du monde entier. Mais les entreprises étrangères ne doivent pas s'imaginer que répondre à ces contrats leur confèrera une compétence d'ensemble. Elles seront plus pillées qu'enrichies. La compétence d'ensemble restera dans les mains des donneurs d'ordre.

Voici la situation telle qu'on peut la décrire, sans exagération pensons-nous, quand on regarde l'état de la science dans le monde. Au ministre français du budget qui demandait à quoi sert la science, il aurait fallu répondre : *"La science sert à ne pas être les nouveaux esclaves de la puissance américaine. La science sert à construire un monde que nous pourrons, nous aussi, marquer de nos valeurs."*

## **2. Comment réagir ?**

Nous l'avons indiqué en introduction : les problèmes pratiques qu'affronte la recherche scientifique française sont nombreux et ne peuvent être évacués d'un trait de plume. Mais si la science, en France comme en Europe, se voyait reconnaître la place stratégique qui devrait être la sienne, une dynamique positive se créerait et ferait disparaître en quelques années les blocages actuels. C'est un tel discours, pensons-nous, que devraient tenir non seulement les sages du Comité National de la Recherche Scientifique, mais l'ensemble des partis de gauche se disant soucieux de l'avenir du monde et de la place de l'Europe au service de cet avenir.

Il faudrait alors convenir de quelques principes, simples à formuler sinon à mettre en œuvre. Nous les présentons sur le mode du « il n'y a qu'à », faute de place. Mais il est clair que chaque objectif présente de grandes difficultés, auxquelles les hommes politiques doivent être les premiers à réfléchir :

- La science ne doit pas devenir le monopole des Etats-Unis. Son développement doit être réparti entre plusieurs centres, parmi lesquels il faudrait dès maintenant compter l'Europe (étendue à la Russie) et l'Asie.
- L'Europe pour sa part doit se donner l'objectif de faire jeu égal avec les Etats-Unis dans tous les domaines importants. Elle le peut. Les retards sont rattrapables, à condition de laisser jouer les imaginations créatrices. Les Etats-Unis s'y opposeront, de diverses façons (on l'a vu lors des affrontements dans le domaine du positionnement satellitaire, GPS contre Galiléo). Mais il ne faut pas refuser la concurrence et le conflit. L'Europe peut gagner. Les Etats-Unis bénéficieront d'ailleurs à terme des progrès que fera l'Europe. Des alliances industrielles sont possibles, à condition qu'elles se fassent à jeu égal.
- L'Europe doit indiscutablement développer les sciences et technologies que l'on dira de puissance. Elles le sont d'ailleurs presque toutes. Mais elle doit aussi développer les sciences capables de répondre aux besoins les plus urgents de la planète, dans le domaine de la santé et de l'éducation, des énergies douces, de l'environnement...
- L'Europe doit mieux apprendre à associer, sur le modèle américain, la recherche fondamentale généralement publique et la recherche privée, tant dans les grandes entreprises que dans les start-up.
- Ce faisant l'Europe doit, via les organisations internationales, assurer la diffusion gratuite, sur le mode de l'Open Source (logiciels dits libres en informatique, par opposition aux logiciels dits propriétaires, protégés par des brevets), de certaines des connaissances acquises, notamment dans les domaines de la médecine et de l'environnement. Elle doit viser aussi à des produits susceptibles de satisfaire au moindre coût les besoins des pays du tiers-monde. La science européenne doit d'emblée s'afficher comme "généreuse". Il s'agira d'ailleurs, comme tout altruisme, d'une démarche intéressée.
- Les Etats européens et l'Union Européenne ont tous un rôle à jouer dans ces politiques scientifiques, le cas échéant en compétition interne. Les grandes collectivités locales y participeront aussi. Pour trouver les financements et les ressources humaines et intellectuelles nécessaires, il faudra détacher les investissements de recherche des dépenses budgétaires annuelles. Les investissements de recherche, comme d'ailleurs d'autres grands équipements publics, ne peuvent s'amortir en 1 an, ni même parfois en 10 ans. Il faut limiter l'application des critères du Pacte de Stabilité à la gestion des dépenses courantes et trouver pour la science des modalités de financement et retour sur investissement à long terme.
- Pour éviter la trop grande dispersion des efforts, il faudra multiplier les grands programmes européens, générateurs de ce que l'on appelait il y a quelques années des filières de retombées et de croissance. Ces programmes, par exemple aller sur Mars, développer l'énergie de fusion nucléaire (ITER), réaliser l'"ordinateur quantique", sont obligatoirement tenus à des résultats. Les organismes et les hommes y participant s'adaptent alors d'eux-mêmes aux exigences de la performance et de la qualité. Point ne sera besoin, en ce qui nous concerne, de "réformer le CNRS" pour cela.
- De tels projets comporteront nécessairement des recherches en amont de caractère fondamental. Mais pour éviter de s'enfermer dans la spécialisation il faudra aussi créer des organismes de prospective scientifique et de recherche pure, sur le mode des Fondations, sans contrainte particulière autre que le dialogue entre les disciplines et l'abandon des rigidités académiques.
- Rappelons enfin ce qui devrait être une évidence mais ne l'est guère encore aujourd'hui, y compris dans l'esprit de beaucoup de scientifiques : la science ne peut reposer sur des bases socialement et politiquement solides que si ses objectifs, ses résultats et ses moyens font

l'objet d'un dialogue citoyen permanent. La France aura beaucoup à faire sur ce plan, compte tenu du manque d'intérêt spontané des chercheurs pour la communication, que chacun peut constater tous les jours dans son domaine.

Jean-Paul Baquiast  
co-fondateur d'Automates Intelligents,  
<http://www.automatesintelligents.com>

13 septembre 2003

## Les biotechnologies

On confond parfois les biotechnologies avec les recherches médicales. Les unes et les autres se situent au niveau du vivant. Mais les biotechnologies se distinguent, selon nous, par deux caractéristiques. La première est qu'elles couvrent un panorama de recherche beaucoup plus large que celui intéressant la thérapeutique humaine. La seconde est que les biotechnologies, au sens large, engagent des intérêts économiques bien supérieurs à ceux nécessaires aux recherches médicales, tant en matière d'investissements que de retombées. On peut faire de la bonne recherche médicale dans un Centre hospitalier Universitaire. Un pays ne peut devenir leader en biotechnologies (ou simplement abriter un pôle de rayonnement international) sans des stratégies très volontaristes, unissant le public et le privé autour de la mise en place de technopoles regroupant plusieurs dizaines voire plusieurs centaines de laboratoires et entreprises high-tech.

On pourrait ajouter que pour les biotechnologies la recherche fondamentale est intimement liée aux applications, ce qui n'est pas tout à fait le cas des recherches médicales, préoccupées en priorité de résultats immédiats intéressant les pathologies. Au plan de la recherche fondamentale, les biotechnologies posent les difficiles questions de la vie, de la reproduction, de l'évolution... où elles retrouvent d'ailleurs aujourd'hui les sciences objets des deux autres fiches de notre dossier : les nanosciences et les sciences de la vie artificielle.

Ces diverses sciences, à partir de points de départ différents, doivent désormais coopérer. Ceci pose une nouvelle fois la question de l'adéquation des cursus universitaires et de carrière des chercheurs, face aux besoins de la mobilité des connaissances. La France n'est pas la plus favorisée à cet égard, vu le maintien des rigidités académiques.

Une autre caractéristique, qu'il faut signaler dès maintenant afin que le discours public ne soit pas confisqué par les fondamentalismes de toutes sortes, est que les biotechnologies posent directement la question du rôle de l'homme dans la nature. La science peut-elle, et jusqu'où, modifier les équilibres hérités de l'évolution, tant à l'égard de la vie en général que de la « nature humaine » en particulier ? Le mythe du savant fou est constamment évoqué et, dans diverses parties du monde, des laboratoires et chercheurs se trouvent attaqués au prétexte que leurs recherches bousculent les orthodoxies.

### 1. Perspectives stratégiques

Les Etats-Unis sont des leaders mondiaux en matière de biotechnologies. Leur avance scientifique, découlant de la coopération sans complexes des laboratoires universitaires avec les firmes privées, permet à ces dernières de proposer au monde entier des produits pharmaceutiques et chimiques, des organismes génétiquement modifiés, des solutions d'ingénierie du vivant qui sont sans concurrence. Ce sont moins ces produits qui posent problèmes que le fait d'être commercialisés par des firmes qui brevètent leurs découvertes, conservent le monopole de leurs fabrications et, bien évidemment, du fait qu'elles sont sans concurrents, abusent de leur position dominante. On l'a vu dans le domaine des médicaments destinés aux grandes pathologies frappant le tiers-monde. Il n'est pas certain que la décision prise récemment par l'OMC d'autoriser la fabrication des génériques soit suivie d'effets pratiques, compte tenu des obstacles bureaucratiques mis par les industries pharmaceutiques américaines à la communication de leurs sources.

Du fait des énormes profits et perspectives de profits attachés aux biotechnologies, celles-ci sont devenues une des priorités de la recherche civile et militaire américaine. Sur un tissu

dense de laboratoires universitaires ou relevant de fondations, les firmes dites bio-techs se sont multipliées, sur le mode de la Silicon Valley en électronique.

Nous ne pouvons ici en dire plus concernant les techniques et les instruments qui sous-tendent le développement des biotechnologies. Précisons seulement qu'il s'agit dorénavant de mettre en place de vastes plates-formes technologiques où les différentes sciences se conjuguent, avec des moyens puissants de recherche fondamentale et d'exploration. L'investissement est de taille nationale, sinon (pour ce qui concerne nos pays) de taille européenne. Il impose en tout cas des réseaux d'excellence indispensables à la productivité des recherches.

### *Les principaux domaines*

Une des spécificités des biotechnologies est que la science n'a pas encore été capable de percer le mystère de la vie. Aucune voie prometteuse n'apparaît aujourd'hui pour réaliser la synthèse d'un système biologique répliatif même simple. Plus les recherches progressent, plus elles découvrent l'extraordinaire complexité du vivant. Ceci explique que les biotechnologies, même lorsqu'elles engagent des capitaux très importants, semblent procéder bien plus que d'autres domaines par essais et erreurs, selon une course chaotique. Néanmoins, on commence à en savoir assez pour pouvoir commencer à modifier les cycles de l'évolution naturelle. Les conséquences pourront en être heureuses ou désastreuses selon l'usage qui sera fait de ces recherches.

Les enjeux des biotechnologies concernent de très nombreux domaines. Voici aujourd'hui les plus actuels. Nous nous limiterons à ceux déjà bien maîtrisés ou en cours de développement dans un avenir à 10 ans :

- **Le décryptage des génomes.** La biologie moléculaire appliquée à la génétique s'est brutalement développée à partir de la découverte, par Crick et Watson, dans les années 1950, de l'ADN, de l'ARN et des phénomènes de la reproduction cellulaire. Très tôt, les chercheurs se sont efforcés d'identifier, dans l'ADN du plus grand nombre d'espèces animales et végétales possible, les principaux gènes ou groupes de gènes composant les paires de chromosomes susceptibles de commander la fabrication de l'individu adulte à partir d'une cellule germinale initiale. Ce travail a pris une grande ampleur avec la mise au point de machines informatiques puissantes pour l'aide au séquençage. Après avoir localisé les gènes dans le génome, il faut faire apparaître le rôle qu'ils jouent dans le développement, principalement par l'intermédiaire de la synthèse de protéines (notamment enzymes) intervenant à diverses phases de la croissance pour spécifier le développement des cellules spécialisées dans la mise en place et le fonctionnement de chacun des organes du corps.

A la suite de la mise en place du Programme Génome Humain, les efforts conjugués de nombreux chercheurs du secteur public et du secteur privé ont à peu près réussi à cartographier les quelque 30 000 gènes de l'homme. Ce travail, qui devait durer une dizaine d'années, a été réalisé dans des délais bien plus courts. Il a donné lieu à de vifs débats, les entreprises privées prétendant breveter leurs découvertes alors que la déontologie scientifique voulait au contraire que les connaissances relatives aux génomes soient publiées pour l'usage commun de l'humanité. C'est finalement ce dernier point de vue qui a pu prévaloir, au terme d'arbitrages fragiles toujours susceptibles de remise en cause.

Parallèlement au génome humain, les génomes d'un nombre important de virus, bactéries, végétaux et animaux divers ont également fait l'objet de décryptage. Ce nombre ne cessera de croître, vu l'intérêt qui s'attache à découvrir les secrets du vivant, aussi bien dans le règne végétal qu'animal. Un généticien averti comme Richard Dawkins estime que, dans moins de trente ans, avec le développement exponentiel de l'efficacité des outils de décryptage, les génomes de plusieurs millions d'espèces seront disponibles. De simples étudiants en biologie

pourront séquencer ou modifier les génomes d'espèces considérées comme mineures. Ceci montre l'intérêt essentiel qui s'attache à ce que tous ces génomes, le véritable patrimoine de la vie, ne soient pas protégés par des brevets propriétaires, mais soient mis en libre disposition (Open Source) sur les réseaux. Cependant, il importe que le législateur prévoit les dispositions de protection liées à un usage mercantile ou même criminel des découvertes.

La connaissance du rôle des gènes ainsi identifiés est encore très loin d'être complète, d'autant plus qu'un gène individuel n'exerce pas une action déterminée et une seule. Les gènes se conjuguent de façon souvent imbriquée dans le temps et dans l'espace. La mise en évidence de cette coopération nécessite de nombreuses expériences. L'intérêt de la connaissance du rôle des gènes tient dans la possibilité de modifier artificiellement telle ou telle partie de tel ou tel chromosome, pour invalider un gène dont l'effet a été reconnu comme nuisible (notamment ceux responsables des maladies dites génétiques, qui sont au nombre de plusieurs centaines) mais aussi pour implanter tel gène susceptible de jouer un rôle bénéfique, par exemple commander la production d'une protéine utile à la meilleure adaptation de l'organisme ou de l'espèce « manipulée ». C'est ce que l'on désigne couramment « génie génétique ».

- **La protéomique.** On désigne par ce nom les sciences et technologies qui ont pour objet d'identifier puis de produire les milliers (ou centaines de milliers) de protéines dont la fabrication est commandée au sein de l'organisme par la mise en activité de tel ou tel gène ou groupe de gènes du génome (gènes de développement). Ces protéines constituent le moyen d'expression des gènes, lesquels ne peuvent rien piloter directement. C'est grâce à l'entrée en activité de ces protéines, tout au long de la vie, qu'un nombre relativement réduit de gènes, souvent très voisins d'une espèce à l'autre (qu'il s'agisse de la mouche ou de l'homme), peuvent finalement produire des organismes adultes extrêmement différents, et commander à tous moments aux cellules de ces organes des réponses adaptées aux besoins de la survie.

Les protéines du vivant sont de très grosses molécules, très complexes, dont la simple description en 3 dimensions nécessite de gros moyens informatiques. Il est donc difficile d'en réaliser la synthèse artificiellement. La méthode qui sera longtemps la plus pratique consistera à créer des tissus composés des cellules capables de piloter la synthèse de ces protéines et de recueillir les produits de leur activité (par exemple l'insuline produite par des cellules pancréatiques). La capacité de modifier le génome de ces cellules afin de leur faire produire des protéines différentes de celles qu'elles produiraient naturellement fait le lien entre la génétique et la protéomique.

On voit que ces technologies ouvrent dès maintenant des perspectives considérables à l'industrie pharmaceutique et à l'industrie chimique ou biochimique. Ces perspectives ne feront que s'accroître avec le décryptage de nouveaux génomes et de nouvelles protéines. D'où l'intérêt essentiel qu'il y a à protéger la biodiversité, notamment dans le monde des espèces tropicales et équatoriales actuellement très menacées. Avec elles disparaîtraient des sources de savoir et d'action irremplaçables.

Malheureusement, les recherches dans ces domaines sont principalement développées par des firmes privées qui en brevètent les résultats afin de les exploiter au mieux. On retrouve là le problème politique évoqué à propos du génome humain. As-t-on le droit de breveter le vivant ou même les applications susceptibles d'être tirées de la connaissance de celui-ci ? Pour échapper au dilemme, il faudrait que les recherches prennent le relais des recherches privées, ce qui supposerait des moyens considérables dont les laboratoires publics sont de plus en plus démunis. Ces moyens ne sont pas seulement en chercheurs mais aussi en équipements lourds. On sait que les biologistes et pharmaciens s'étaient à juste titre indignés de voir le projet de synchrotron français (Soleil) refusé par le ministre de la recherche Claude Allègre. Un tel instrument est indispensable pour étudier la structure atomique des molécules vivantes.

- **La glycomique ou glucomique.** Plus la biologie progresse, plus de nouvelles complexités se révèlent dans la connaissance fine de la reproduction et du fonctionnement des cellules. Nous pouvons citer aujourd'hui un secteur en pleine expansion, s'intéressant au rôle des sucres dans les mécanismes vitaux, nommé par certains la glycomique. On pouvait penser, avec le génome, c'est-à-dire l'ADN et les protéines codées par elle, avoir découvert l'essentiel de ce qui détermine les mécanismes biochimiques de la cellule. Il n'en est rien. Un code bien plus compliqué est en train d'apparaître, qui met en œuvre les sucres ou hydrates de carbone. Ceci doit nous intéresser, d'une part parce qu'il s'agit d'une nouvelle approche systémique sur l'immunologie, le développement cellulaire, la neurologie et les pathologies mais, d'autre part et surtout, parce que face à ce monde foisonnant, l'Intelligence Artificielle, associée aux mathématiques et à l'informatique, sera indispensable. Il faudra commencer à déchiffrer beaucoup de ces combinaisons complexes, comme on l'a fait pour le code génétique et les combinaisons d'acides aminés qui constituent les protéines.

Il s'agit semble-t-il d'une des plus grandes frontières de la biochimie. On se trouve devant elle aujourd'hui comme on se trouvait devant le génome en 1950, expliquent les scientifiques. Les gènes ne codent pas directement pour les sucres, mais pour les enzymes utilisées dans la construction du corps. C'est à partir de l'étude de ces enzymes que, vers les années 1990, les chercheurs ont commencé à remonter vers les sucres, jusqu'ici considérés presque comme des ornements de la cellule. On a découvert depuis de nombreuses affections découlant de défauts dans la présence de sucres au sein des protéines. Aujourd'hui, plusieurs centaines de gènes responsables de la glycosylation ont été isolés. Mais il en reste encore vraisemblablement des milliers.

De nombreux "secrets de la vie" seront donc découverts dans les prochaines années, compte tenu de la rapidité des progrès faits en glycobiologie : par exemple la façon dont la cellule peut modifier sa couverture de glycome pour faire face à des invasions microbiennes ou des changements du milieu.

Nous avons là un exemple montrant que la science actuelle est encore loin de comprendre les mécanismes basiques de la vie, qui sont eux-mêmes tout sauf élémentaires. Il ne faut donc pas s'étonner si la synthèse de la vie ou de proto-vie paraisse encore si lointaine. A quand pourtant un Human Glycome Project ? Les scientifiques restent sceptiques sur ses chances d'aboutir avant une bonne cinquantaine d'années. Ce ne serait pas une raison pour ne pas l'entreprendre. Ajoutons qu'on étudie actuellement des glyco-puces (glyco-chips), analogues aux puces à ADN, mais plus complexes, permettant d'identifier les sucres en relation avec les composants cellulaires. Ces puces serviront à reconnaître des pathogènes naturels ou créés par le bioterrorisme...

- **Les cellules-souches.** Il est vraisemblable que, dans quelques années, le début de ce XXI<sup>e</sup> siècle sera considéré comme ayant marqué une véritable révolution dans la compréhension de la mécanique cellulaire comme plus généralement dans la médecine curative, grâce aux découvertes qui s'accumulent actuellement sur le rôle des cellules-souches.

Il s'agit, rappelons-le, de cellules issues d'embryons précoces ou de fœtus, dites indifférenciées. Elles peuvent être cultivées *in vitro* pour constituer des tissus régénératifs, ou greffées dans différents organes malades, au sein desquels elles se multiplient en prenant les caractéristiques du milieu cellulaire dans lequel elles sont introduites. Ces cellules, selon la date du prélèvement après fécondation, sont totipotentes (capables de reconstituer l'organisme entier), pluripotentes (capable de donner des cellules de n'importe quel tissu) ou multipotentes (adaptées à des tissus spécialisés).

Les applications thérapeutiques futures concernent en priorité la régénération d'organes, y compris du tissu nerveux, que l'on croyait jusqu'ici incapable de créer de nouveaux neurones

ou cellules gliales. Mais les cellules souches, convenablement manipulées génétiquement, pourront aussi produire *in vitro* ou *in vivo* différentes molécules dont l'absence provoque des pathogénies. Ces applications ne doivent pas être confondues avec le clonage, expérimental ou thérapeutique. Par cette dernière technique, on introduit une cellule d'un organisme adulte dans un oeuf fécondé énucléé de son matériel génétique d'origine que la cellule de l'adulte remplace progressivement. Les nouvelles cellules résultant de la multiplication de l'oeuf (le blastocyte) sont compatibles génétiquement avec le donneur, ce qui permet chez celui-ci diverses greffes et utilisations thérapeutiques. Nous n'abordons pas ici l'hypothèse du clonage reproductif qui fait déjà débat dans la société.

Ajoutons qu'il est apparu que l'organisme adulte dispose dans certains tissus de cellules pluripotentes capables de régénérer des tissus autres que le tissu d'origine, avec cependant moins de plasticité que les cellules-souches embryonnaires. Avec cette méthode, les difficultés liées au rejet immunitaire disparaissent, ce qui permettra des auto-greffes à large échelle.

Nous ne pouvons entrer ici dans le détail des recherches portant actuellement sur les cellules. Mentionnons seulement les travaux visant à interconnecter des cellules vivantes, par exemple des neurones, avec des transistors, de façon à réaliser des interfaces bioniques qui sont la clé des futurs systèmes hommes-machines, notamment dans le domaine des prothèses intelligentes, c'est-à-dire sous le contrôle direct de cerveau des patients.

Ces différents domaines de recherche donnent lieu à de très nombreuses applications. Citons parmi les plus importantes la **production de médicaments, vaccins et autres produits thérapeutiques**<sup>1</sup>, **la mise au point d'organismes génétiquement modifiés intéressant l'agriculture, l'élevage mais aussi la protection de l'environnement par élimination des déchets**. On n'oubliera pas les recherches militaires visant à la mise au point **d'armes offensives et défensives faisant appel au vivant**.

### *Questions politiques et sociales*

On sait que les recherches sur les OGM et sur les cellules-souches soulèvent des controverses de nature éthique, qui les ralentissent - sans les arrêter. Il s'agit moins d'ailleurs d'éthique au sens général (rien ne permettant d'affirmer que les chercheurs en soient dépourvus) que, en ce qui concerne les cellules-souches notamment, d'objections découlant de la conception de la nature et de la vie que se font certaines religions. Pour celles-ci, l'embryon humain, même réduit à un oeuf fécondé, est déjà une personne ayant droit, non pas au respect et à la dignité (sentiment subjectif) mais à l'intangibilité exclusive de toute manipulation génétique. Cependant, objectent les scientifiques, ces mêmes embryons sont produits et détruits en série, soit à l'occasion des procréations assistées, soit suite aux interruptions de grossesse, ce à quoi n'objectent que les adversaires déterminés de l'avortement.

Mais de nombreuses autres objections sont présentées à la recherche génétique, lorsque celle-ci conduit à la réalisation de véritables individus nouveaux ou espèces nouvelles, qui constituent ou constitueront très exactement des « chimères ». L'homme peut-il se substituer à l'évolution naturelle ? On peut poser la question en termes moraux, mais alors elle n'a guère de sens, car toutes les entreprises humaines ont visé depuis les origines à remplacer ou compléter l'évolution naturelle par une évolution artificielle. Par contre, la question doit être posée en termes de précaution ou d'opportunité. Des interventions faites de façon irresponsable sur les espèces vivantes peuvent avoir des conséquences catastrophiques, aussi bien sur l'avenir de la biodiversité que sur l'homme lui-même. On souligne aussi à juste titre le danger de telles possibilités aux mains d'irresponsables et de criminels.

---

<sup>1</sup> 60% des nouveaux médicaments sont aujourd'hui issus des biotechnologies

Les équilibres vitaux sont très fragiles et surtout mal connus. Des modifications infimes peuvent avoir des conséquences considérables. On cite souvent aujourd'hui l'exemple de la molécule prion, qui se révèle mortelle quand son repliement dans l'espace affecte une forme différente de celle du prion anodin.

Faut-il, comme certains le préconisent, déclarer un moratoire général aux recherches ? Outre que cette solution paraît inapplicable, elle constituerait une démission face au besoin d'approfondissement des connaissances qui est le propre de la science. On peut seulement souhaiter que les protocoles de recherche soient suffisamment soigneux et longs pour présenter le maximum de précautions. Il faudra aussi éviter que, pour des buts commerciaux, des entreprises privées prennent la responsabilité de ne pas respecter ces protocoles.

Pour le moment, les politiques, dans de nombreux pays, hésitent à affronter l'opinion des milieux conservateurs, retardant ainsi les bons effets thérapeutiques de telles recherches. Il s'agit d'une des nombreuses incohérences sociétales auxquelles se heurtent les sciences du vivant. **Les hommes politiques, dans ces domaines comme dans beaucoup d'autres, devraient s'efforcer de précéder l'opinion publique en l'éclairant, plutôt que la suivre passivement. Pour cela, il faudrait qu'ils fassent inscrire les recherches publiques relatives à la vie dans la perspective de la protection globale et à long terme des écosystèmes, dans le cadre de larges dialogues avec les experts et les opinions publiques. Il s'agit sans doute d'opportunités essentielles pour la survie des espèces vivantes à long terme, face aux menaces qui pèsent sur elles.** L'évolution naturelle n'agit, suite aux processus de mutation-sélection, qu'au terme de centaines ou milliers d'années. Aujourd'hui au contraire, quelques mois peuvent suffire à faire apparaître un mutant susceptible de s'adapter à des conditions de vie qui auraient été destructrices pour une espèce non modifiée. Les mutations artificielles devront être conduites avec la volonté de relancer le processus inventif de l'évolution, en gagnant du temps face aux menaces qui pèsent actuellement sur l'environnement et auxquelles les cycles darwiniens naturels n'ont pas le temps de s'adapter.

## 2. L'état des lieux en France

Les Etats-Unis sont le leader mondial en matière de biotechnologies. Il y a déjà quinze ans que les décideurs ont vu là une source presque inépuisable de profits potentiels, susceptible de remplacer non seulement les vieilles industries mais même celles plus récentes, comme l'informatique et les télécommunications, où la concurrence notamment asiatique devenait forte. C'est dans ce domaine que la conjugaison réussie de la recherche publique et privée donne les résultats les plus spectaculaires. Il est pratiquement impossible de dénombrer les laboratoires universitaires ou financés par des fondations qui pratiquent la recherche fondamentale, en liaison étroite avec de grandes multinationales venant de la pharmacie ou de l'agro-alimentaire. Elles-mêmes sont entourées d'une nébuleuse de PMI bio-techs, que soutiennent des réseaux de banques toujours prêts à prendre des risques dans la perspective de retour sur investissement importants (incubateurs). Le secteur s'est aujourd'hui regroupé autour d'équivalent de la Silicon Valley, particulièrement nombreux sur la côte Ouest : baie de San Francisco et de San Diego notamment. La croissance est soutenue par la politique d'exportation très agressive des grandes multinationales, dont la logique a été démontrée depuis longtemps. Une recherche très active permet d'obtenir des produits avancés protégés par des brevets exclusifs, dont l'industriel s'efforce de se donner le monopole de vente.

Bien d'autres pays se sont lancés, avec des succès moindres, dans le domaine des biotechnologies. On peut citer la Chine et le Brésil, sans parler des pays européens. La France, dispose d'atouts certains : tradition ancienne en matière de sciences de la vie et recherche médicale, nombre de laboratoires importants. Malheureusement, ceux-ci sont très dispersés et, surtout, la liaison avec l'industrie ne se fait pas, ou encore très mal. On évoque couramment dans les milieux scientifiques l'exemple d'innovations dont les brevets ont été

rachetés par des firmes pharmaceutiques ou chimiques américaines, sans guère de retombées finales pour les économies européennes.

### ***Panorama des biotechnologies en France.***

Il n'est pas aisé de se faire une idée d'un secteur très varié et dispersé géographiquement. D'une façon générale, comme il est dit plus haut, il se dégage une impression de bonne compétence, sinon d'excellente compétence dans certains secteurs. Malheureusement, le manque de directions stratégiques et de moyens, pour ce qui concerne les laboratoires publics, comme la difficulté à s'insérer dans la compétition économique, produit une impression de gâchis partagée par de nombreux chercheurs, dont beaucoup s'expatrient. Pour les entreprises, c'est principalement le manque de moyens de financement qui les gêne, sans mentionner le peu de soutien qu'elles reçoivent des institutions dans leurs efforts pour pénétrer les marchés étrangers.

Une connaissance du secteur suppose d'abord celle des laboratoires universitaires, complétée de celle des entreprises.

En ce qui concerne les laboratoires, le CNRS, dans le département des sciences de la vie, a établi un annuaire des unités de recherche (voir <http://www.cnrs.fr/SDV/>). Mais il ne paraît pas possible de disposer de chiffres globaux répartis de manière significative.

On ajoutera à ce panorama différents établissements publics de recherche renommés, tant en France qu'à l'étranger, notamment l'Institut National pour la Recherche Médicale (INSERM), le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA), l'Institut Pasteur, l'Institut National pour la Recherche Agronomique (INRA), l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, ex-Orstom)...

Citons aussi le réseau GenHomme dédié à la génomique humaine. Créé en 2000, à l'initiative des ministères chargés de la Recherche et de l'Industrie, il vise à promouvoir l'application de la génomique à l'innovation diagnostique et thérapeutique. Ses financements incitatifs facilitent l'émergence de projets compétitifs permettant à la France de s'inscrire fortement dans des actions menées au niveau européen.

Pour le secteur des entreprises, on peut penser que la meilleure source d'information à ce jour est l'étude de la Direction de l'évaluation et de la prospective du ministère de la recherche et des nouvelles technologies, en date de Mai 2003 : Panorama des entreprises françaises de biotechnologie, Base de données nationale des biotechnologies <http://biotech.education.fr/>

Les collectivités locales ont un rôle important à jouer, en liaison avec d'autres bailleurs de fonds. On mentionnera la création récente du Génopole d'Evry et la contribution de Paris Biotech.

Au niveau européen, la France occupe le 3ème rang en 2003, pour son industrie des biotechnologies. Notre pays possède dans le domaine 8 sociétés cotées en bourse. Le Royaume-Uni reste le leader européen par la maturité de ses entreprises et leur capitalisation : 44 entreprises sont cotées sur les marchés financiers. Il est suivi par l'Allemagne, dont le programme national et régional d'aide à la création d'entreprises l'amène au 1er rang en nombre d'entreprises. L'Allemagne compte 16 entreprises cotées en bourse.

La Commission européenne estime le marché européen des biotechnologies à 100 milliards d'euros en 2005.

## Conclusion

Bien qu'honorable, la position de la France n'est pas, selon nous, à la hauteur de la compétition internationale. Différentes raisons peuvent l'expliquer. Nous n'en mentionnerons qu'une, hors le manque de prise de conscience des enjeux par les décideurs et les hommes politiques en général : **la relative dispersion des laboratoires et des chercheurs, ainsi que celle de la difficulté de mener des carrières interdisciplinaires dans le cadre académique, carrières qui s'imposent dans des recherches qui conjuguent la physique, la biologie et l'informatique.**

Faut-il conclure de ce bilan mitigé à l'existence d'un retard global français en matière de biotechnologies. Sans doute pas au niveau de la recherche fondamentale, certainement au plan des applications industrielles et commerciales. Rappelons en effet que, selon le ministère de la Recherche, les levées de fonds réalisées en 2000 en France pour la création d'entreprises de biotechnologies atteignaient près de 200 M€. Cependant, depuis 2001, le contexte économique difficile a renforcé la frilosité des investisseurs, notamment dans les phases d'amorçage. Le retard français dans le domaine des biotechnologies explique en partie le recul de l'industrie pharmaceutique française, qui en termes de parts de marché est passée de 7,5% à 5,5% sur les 5 dernières années : les nouveaux médicaments issus des biotechnologies sont souvent mis au point par des sociétés américaines, britanniques ou suisses. On compte cependant en France plusieurs produits en phases cliniques.

Au plan de la recherche fondamentale, ce qui manque est un travail plus poussé avec les laboratoires des autres pays européens. Mais le dispositif des programmes-cadres, dans ce domaine comme dans beaucoup d'autres, n'est plus adapté. Les laboratoires hésitent à partager leur savoir-faire avec des concurrents qui ne sont pas nécessairement au même niveau qu'eux. Ils n'ont pas envie de négocier avec des bureaucraties sous la pression permanente des lobbies, notamment extra-européens. Ils ne voient pas par ailleurs de retombées pratiques à ce type de recherche coopérative, très dispersée et sans suites assurées, dont les coûts excèdent souvent les bénéfices.

Il faudrait en fait, là comme ailleurs, que des Agences ou Instituts européens, sur le modèle de l'ASE (Agence Spatiale Européenne) soient mandatés par les Etats pour mener de grands programmes en bio-technologies humaines, animales et végétales – programmes qu'il faudrait conduire chaque fois que possible en coopération avec les pays du tiers-monde. De tels Instituts sous-traiteraient des parts de réalisations aux laboratoires nationaux, avec à chaque fois sélection des meilleurs.

En ce qui concerne la liaison entre les entreprises et les laboratoires publics, on retrouve dans ce domaine comme dans les autres les multiples raisons, dont nous ne traiterons pas ici, qui condamnent en France ces deux types d'activité à ne pouvoir entrer en synergie.

Ajoutons que ce dont la communauté scientifique et technologique a besoin aujourd'hui, c'est moins de crédits que d'un discours mobilisateur des chefs de gouvernement. Les hésitations incompréhensibles en matière de cellules-souches embryonnaires ou d'OGM ont jeté le doute dans tous les esprits. La volonté trop affichée d'un principe de précaution qui sert d'excuse à ne rien entreprendre est très mal ressentie. Or qui sait bien de quoi il s'agit quand on parle de biotechnologies ?

Les partis politiques ne devraient pas hésiter, dans la mesure où ce discours gouvernemental mobilisateur fait défaut, à le reprendre à leur compte. Il faut agir à la fois par le haut et par le bas.

**Par le haut, il conviendrait d'inciter les politiques européens à s'entendre pour proposer des projets « locomotives » aux financements communautaires, insistant**

beaucoup plus que c'est le cas actuellement sur le rassemblement des données scientifiques et leur mise à disposition en libre-accès, selon le modèle du projet Génome Humain. De grands Atlas de la vie, des protéines, du cerveau s'imposent, à partir de sources européennes et non comme c'est le cas actuellement de sources américaines. De même il faut investir dans l'instrumentation bio-médicale, dans les accélérateurs de particules et synchrotrons, dans les grands calculateurs seuls à même de répondre aux besoins de l'analyse génétique et protéomique.

Par le bas, les collectivités locales, établissements d'enseignement, associations devraient participer à l'organisation de journées et démonstrations visant à présenter les différents domaines et produits, d'une façon attrayante et mobilisatrice. Le sujet est suffisamment excitant intellectuellement pour attirer une large audience.

---

*Note*

- On pourra consulter sur le thème des biotechnologies un dossier de Québec Sciences [http://www.cybersciences.com/cyber/1.0/1\\_685\\_MenuFrancais.asp](http://www.cybersciences.com/cyber/1.0/1_685_MenuFrancais.asp)
- On lira aussi le Bulletin des Bio-technologies de l'INRA <http://www.inra.fr/bbt/>

## Les nanotechnologies

On confond parfois les nanotechnologies avec les biotechnologies. Les unes et les autres se situent au niveau de la molécule et souvent de l'atome. Mais les biotechnologies concernent le vivant, tandis que les nanotechnologies s'intéressent plutôt aux matériaux et aux machines – différences qui n'empêche pas d'ailleurs leur coopération dans un nombre de plus en plus grand d'applications<sup>2</sup>.

Avec les nanotechnologies, on travaille à l'échelle du nanomètre, c'est-à-dire du milliardième de mètre. Une molécule d'ADN mesure quelques nanomètres, un atome (par exemple de silicium) quelques dixièmes de nanomètre. A ces échelles, les lois de la physique ne sont plus celles de notre monde matériel (macroscopique) mais celles du monde quantique. Retenons seulement que les concepts d'atomes, d'électron, de proton ou même de molécules, couramment utilisées dans le vocabulaire des nanotechnologies, ne correspondent pas à ce que l'on entend dans le vocabulaire courant. Ainsi, une particule quantique ne peut pas être localisée simultanément en position et en vitesse (principe d'indétermination d'Heisenberg). Il s'agit en fait d'un système quantique que l'on désignera du terme de particule par commodité.

Depuis les années 1980, de nombreux laboratoires ont commencé à travailler à ces niveaux atomiques et subatomiques. Le microscope à effet tunnel, inventé en 1982, a permis de déplacer les « atomes », afin de les recombinaison en formes nouvelles de matériaux et de machines. Aujourd'hui, de nombreux dispositifs utilisant les lasers, les champs magnétiques, les synthèses chimiques, permettent d'intervenir au niveau des molécules et des atomes et de modifier leurs relations. Ceci se fait aussi bien dans la cellule vivante, dont on comprend ainsi mieux les mécanismes intimes, que sur des composés inertes.

Très tôt, le livre fondateur du physicien Eric Drexler, *Engines of Creation*, a révélé en 1986 au grand public et aux décideurs les nombreuses possibilités futures de ces techniques<sup>3</sup>. Les articles et ouvrages sont aujourd'hui nombreux. Citons par exemple *"Le Nanomonde, voyage au coeur du minuscule"*, livre du physicien français Jean-Louis Pautrat, publié l'année dernière chez Fayard. Le sénateur Saunier (PS) a pour sa part présenté un rapport sur le thème « *L'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies* »<sup>4</sup>.

Avec les nanosciences et les nanotechnologies, la difficulté est de distinguer ce qui relève encore de l'expérimentation, voire de la science-fiction, et ce qui donne lieu d'ores et déjà à des applications prometteuses. Par ailleurs, les références constantes au monde quantique, dont la connaissance est encore très peu vulgarisée, ne facilitent pas l'approche. Cependant l'effort d'une mise à niveau minimum doit être fait par tous les décideurs et les responsables politiques. Les nanosciences sont une des clés majeures pour comprendre le monde en train de s'édifier, et le rôle qu'y jouent les grandes puissances scientifiques.

---

<sup>2</sup> On commence ainsi à parler de « nanobiotechnologies », concept très en vogue aux Etats-Unis

<sup>3</sup> On en trouve une traduction française sur le web à <http://www.foresight.org/EOC/FrenchEOC.txt>  
Voir aussi : <http://www.automatesintelligents.com/echanges/2002/aow/drexler.html>

<sup>4</sup> Rapport disponible sur le site du Sénat : <http://www.senat.fr/rap/r02-138/r02-138.html>

## 1. Perspectives stratégiques

Nous ne pouvons ici en dire plus concernant les techniques et les instruments qui sous-tendent le développement des nanosciences. Précisons seulement qu'il s'agit de mettre en place de vastes plates-formes technologiques où les différentes sciences se conjuguent, avec des moyens puissants de recherche fondamentale et d'exploration. L'investissement est de taille nationale, sinon (pour ce qui concerne nos pays) de taille européenne. Il impose en tous cas des réseaux d'excellence indispensable à la productivité des recherches.

### *Applications*

Déjà en œuvre ou en cours de développement à un horizon de dix ans, les grandes applications des nanotechnologies concernent :

- La réalisation de **composants électroniques** de plus en plus miniaturisés et de haute densité. Pour les informaticiens, les microsystèmes et circuits intégrés travaillant à l'échelle du micron, puis bientôt de quelques centaines de nanomètres<sup>5</sup>, offrent des performances remarquables en matière de consommation d'énergie, vitesse, dégagement de chaleur et coûts. Ils sont indispensables dans les calculateurs modernes comme dans les mobiles de toutes sortes qui se répandent dans la société. La marche vers le nanométrique pourra se poursuivre quelques années encore, jusqu'à ce que le niveau quantique soit atteint et rende inopérant les processus dits du « silicium », actuellement utilisés pour la réalisation des composants. Mais, à ce stade, les nanotechnologies offrent l'espoir de solutions, avec l'ordinateur quantique<sup>6</sup> et à ADN<sup>7</sup>. Ce domaine est absolument fondamental. Si l'Europe y dépendait de l'étranger comme elle dépend actuellement des américains dans le domaine des calculateurs et les logiciels, s'en serait fait définitivement de ses ambitions économiques et politiques.

- **La recherche bio-médicale.** Le secteur est en pleine expansion. En attendant les nanoparticules et nano-machines (voir ci-dessous) qui circuleront dans le corps humain pour y apporter des vaccins et médicaments, les nanotechnologies ont déjà de nombreuses applications intéressant la biologie et la santé. Citons la fabrication de marqueurs moléculaires pour déterminer les gènes actifs dans telle ou telle situation et y adapter des médicaments ; l'analyse rapide de l'ADN à partir de bio-puces afin de réaliser les tests génétiques notamment en vue de la prévention des maladies génétiques ou du diagnostic relatif au caractère malin ou bénin des cancers. Certains articles présentent cette perspective comme une véritable révolution dans le traitement des tumeurs (*Les bio-puces sont des supports inertes où l'on peut placer des brins d'ADN afin d'étudier leur appariement avec d'autres brins apportés à leur contact. Le tout opère au niveau nanométrique*). On mentionnera aussi les nanomatériaux utilisés dans les prothèses pour faciliter leur insertion dans le corps ou la réalisation d'agents dits « de contraste » permettant d'affiner l'imagerie médicale fonctionnelle, dont on sait les innombrables perspectives, y compris en ce qui concerne la compréhension du fonctionnement de cerveau.

- Les **nanomatériaux et nanomachines.** Il s'agit de produire des atomes et des molécules de

---

<sup>5</sup> Première mondiale : le département de Microélectronique du Laboratoire d'électronique de technologie de l'information (Leti) au Commissariat à l'énergie atomique/Grenoble a réalisé en 1999 un transistor de technologie Metal Oxyde Semiconducteur (MOS) d'une dimension de 20 nanomètres

<sup>6</sup> Voir notre article « Factorisation du nombre 15, par ordinateur quantique » :

[http://www.automatesintelligents.com/actu/011227\\_actu.html#actu5](http://www.automatesintelligents.com/actu/011227_actu.html#actu5)

<sup>7</sup> Le principe est d'utiliser ici la reconnaissance sélective entre molécules d'ADN pour réaliser des calculs informatiques massivement parallèles. Celui-ci implique des recherches à long terme. Citons par exemple les travaux de l'Israélien Ehud Shapiro [http://www.automatesintelligents.com/actu/011206\\_actu.html#actu4](http://www.automatesintelligents.com/actu/011206_actu.html#actu4).

produits n'existant pas à l'état naturel dans la nature ou non encore clairement identifiés dans l'environnement naturel. Ces produits serviront à la plupart des chantiers d'ingénierie envisageables, que ce soit au niveau macroscopique ou microscopique. Nous avons évoqué les revêtements pour prothèses faits de nanoparticules leur permettant de mieux se fixer dans les tissus. Dans l'industrie, on étudie maintenant les possibilités des nanotubes, qui permettront de réaliser des fibres de très grande taille, d'une légèreté et d'une résistance inégalée. Elles trouveront usage partout, y compris dans les grands ouvrages d'art. Mais, à une toute autre échelle, les nanoconstructions permettront d'élaborer des structures et des machines efficaces à l'échelle du nanomètre. On parle beaucoup, par exemple, du moteur moléculaire. Ces recherches ont par ailleurs l'intérêt de faire mieux comprendre ce qui se passe au sein des cellules vivantes, particulièrement au niveau de leurs actions motrices.

- **Les supramolécules.** On sait que, dans les corps vivants, les molécules vitales telles les hormones s'organisent par liaison chimique. Les molécules ayant plusieurs possibilités de liaison supramoléculaires sont dotées de la propriété dite de l'auto-organisation, propre à la vie. Avec les nanotechnologies est apparue la possibilité de susciter des auto-organisations artificielles, selon des architectures choisies en fonction des résultats attendus. Le processus une fois engagé se poursuit spontanément (réplication) pouvant aboutir à la production d'un très grand nombre d'éléments. Les voies classiques de la synthèse moléculaire, toujours lentes, sont ainsi remplacées par des possibilités de production en masse, s'inspirant du vivant. On obtient ainsi à des prix raisonnables une variété infinie de composants de base, de type biologique ou inorganique, pouvant servir à de multiples usages : calcul informatique, interventions thérapeutiques, réalisation de nouveaux matériaux et produits chimiques. Il est évident en contrepartie que les facultés d'auto-reproduction de telles entités, qui les assimilent à des virus, exigeront un minimum de précautions afin qu'ils ne s'échappent pas dans leur environnement.

### *Questions politiques et sociales*

Dans les pays qui, comme les Etats-Unis et le Japon, considèrent les divers aspects des nanotechnologies comme un enjeu de pouvoir militaire ou économique à déployer dans leurs zones géographiques d'influence, les recherches et la production de nano-objets bénéficient d'une vision et d'une stratégie globale ainsi que de moyens très importants en chercheurs et en crédits.

Mais, même dans ces pays, on note de plus en plus de débats sur les conséquences économiques et sociales de l'explosion attendue des nanotechnologies. Les questions en discussion concernent :

- **L'emploi.** Il est indéniable que les sites de production industrielle traditionnels, que ce soit en matériaux inertes ou en produits organique et pharmaceutique, devront laisser place à des plates-formes de production dotées d'équipements infiniment plus complexes et coûteux. Il faudra donc sans attendre préparer la transition. Cela ne se fera pas sans conflits, les vieilles industries métallurgiques, chimiques et pharmaceutiques employant beaucoup de monde qu'il faudra reconverter. Il est certain qu'en contrepartie, comme d'autres technologies avancées, des emplois, notamment qualifiés et très qualifiés, pourront être créés. Par ailleurs, elles auront un effet démultiplicateur d'activités dans tous les secteurs où elles apporteront de nouveaux outils et produits. Encore faudra-t-il adapter à cette fin l'appareil universitaire et de formation.

- **La croissance.** Au plan de la croissance, les retombées seront indéniablement importantes, pour les pays qui auront su se placer dans le peloton de tête. Mais il faut investir, sans retour sur investissement immédiatement prévisible. Les investissements peuvent être extrêmement

coûteux. Nous pensons par exemple aux plates-formes de production des puces de toutes sortes. Il faut compter 5 milliards d'euros l'unité pour traiter des tranches de silicium de 300 mm, qui sont dorénavant la règle. Ceci explique bien des concentrations prévisibles, dont souffriront les salariés des petites unités mais qui paraissent indispensables. D'où la nécessité, en Europe, de regroupements d'entreprises. Il ne faut pas oublier non plus que les investissements des pays ayant déjà perdu certaines guerres technologiques (comme celle des composants pour ce qui nous concerne) devront d'une façon ou d'une autre être protégés, sauf à laisser s'accroître indéfiniment notre dépendance.

Ajoutons que, dans les différents domaines présentés ici, la recherche publique fondamentale doit jouer un rôle considérable, vu la nature des recherches à mener (haute scientificité, peu de rentabilité immédiate, caractère stratégique). Mais il faudra aussi intéresser les petites et moyennes entreprises aux nombreuses retombées immédiatement valorisables.

Les applications militaires, en matière de nanotechnologies, sont extrêmement nombreuses. Comme dans les autres secteurs stratégiques, elles joueront un rôle de locomotive. L'Europe ne devra pas s'en priver.

- **La gestion des risques.** En France, l'opinion, mal informée, ne s'est pas encore mobilisée sur la question des risques inhérents à ces nouvelles technologies. Mais il y en a, d'ailleurs parfaitement prévisibles et gérables : par exemple les risques de maladies pulmonaires liées à l'absorption des nanofibres, la possibilité de répllication non-contrôlée de molécules auto-organisatrices... Il faut dès maintenant prendre l'habitude d'évoquer ces risques afin d'éviter les campagnes mal intentionnées.

## **2. L'état des lieux en France**

On voit le caractère stratégique des nanosciences, qui seront à la source d'applications nouvelles civiles et militaires dans les secteurs de l'informatique, de la santé, du spatial, des matériaux, de l'énergie, des transports ou de l'environnement.

Les Etats-Unis et le Japon ont déjà pris pleinement conscience de cet enjeu. Les Etats-Unis financent depuis 2000 la *National Nanotechnology Initiative* avec 700 millions de dollars en 2003. La Grande Bretagne pour sa part vient également de lancer un grand programme dédié aux nanosciences.

De son côté, L'Union européenne affiche les nanotechnologies comme une priorité dans le cadre du 6ème PCRD. Elle consacre ainsi à partir de 2003 un budget de 1,3 milliards d'euros au thème "Nanotechnologies et moyens de production nouveaux concernant les matériaux perfectionnés", tout en finançant le domaine de la micro et de la nanoélectronique au sein du thème "Technologies pour la Société de l'Information", doté pour sa part (dans sa totalité) d'un budget de 3,6 milliards d'euros.

Cependant, une mission de scientifiques américains a analysé début 2002 le potentiel des laboratoires européens dans les nanotechnologies et en a conclu que l'écart entre l'Europe et les USA se creusait au profit de ces derniers.

En France, le panorama est encore moins satisfaisant, ce qui tient d'une façon générale à l'ignorance, par les décideurs comme par les électeurs, de l'existence même des nanosciences et de leurs enjeux. Il s'ensuit un nouveau et indéniable retard français, constaté par le Sénat lui-même lors d'une séance consacrée à la présentation des nanotechnologies le 23 janvier 2003. Des efforts ont été faits mais restent faibles et dispersés. L'effet de seuil semble encore loin

d'être atteint. Cependant, le paradoxe est que la France est déjà très présente dans le domaine de la micro-électronique, aussi bien dans la recherche à travers le CEA-LETI et de nombreux laboratoires universitaires, que dans l'industrie via l'entreprise italo-française ST Microelectronics, sans oublier des PMI, par exemple Soitec à Grenoble.

Le précédent gouvernement, relayé par l'actuel, avait néanmoins compris que la France devait renforcer ces points d'excellence, afin de ne pas rester à la traîne en Europe. En 2003, a été lancé un nouveau programme national "Nanosciences", avec un financement de l'ordre de 12 millions d'euros, associant les partenaires cités ci-dessus, auxquels doivent s'ajouter l'INSERM et la Délégation Générale à l'Armement. Les thèmes retenus dans l'appel à projets de recherche concernent les objets individuels et composants élémentaires, l'information quantique, l'organisation et l'assemblage de nano-objets ainsi que les architectures de circuits, les nanomatériaux et les nano-bio-sciences. Une part du financement servira à la constitution de réseaux d'excellence ou à la préparation de projets intégrés européens.

On peut rappeler par ailleurs que, dans le cadre du partenariat entre la recherche publique et l'industrie, les Ministères en charge de la recherche et de l'industrie ont créé dès 1999 le "Réseau Micro et Nano Technologies" (RMNT) qui soutient des projets coopératifs entre industriels et laboratoires de recherche publics. L'ensemble des activités du réseau, associe chercheurs et industriels, qui participent au Comité de Coordination avec les représentants des ministères, de l'ANVAR et de la DGA. Depuis son lancement, 51 projets ont été labellisés, sur 120 déposés par 300 partenaires différents, dont de nombreuses PME. Cela représente un soutien total de 42 millions d'euros financés sur 4 ans par les Ministères de la Recherche, de l'Industrie et l'ANVAR. La moitié de ces projets environ concerne les nanostructures, les nanomatériaux et la nanoélectronique. L'année 2002 a été consacrée à l'élaboration d'un livre blanc destiné à préciser la délimitation du domaine industriel, scientifique et technique, afin de définir le positionnement du RMNT, ses objectifs et sa stratégie.

Aujourd'hui, à la demande du ministère de la Recherche, l'effort se porte sur la constitution de plates-formes technologiques destinées à concevoir les procédés technologiques élémentaires du futur et mettre au point les filières d'assemblage, autour d'un réseau de quatre grandes centrales technologiques compétitives au niveau mondial.

Le sites de Grenoble (CEA-LETI) qui héberge le pôle Minatec et la fédération d'unités mixtes de recherche, associant le CNRS, l'Institut National Polytechnique de Grenoble et l'Université Joseph Fourier), de Lille (IEMN), de Toulouse (LAAS) et de Paris-Sud (IEF et LPN)<sup>8</sup> ont été choisis. L'ensemble de ces sites représente un effectif proche d'un millier de personnes, chercheurs, ingénieurs, techniciens et administratifs, qui possèdent la compétence et l'expertise nécessaire<sup>9</sup>.

A côté du réseau de grandes Centrales Technologiques, huit centrales dites spécifiques, dotées d'équipements plus classiques ou d'outils particuliers, viennent compléter le dispositif. Localisées pour certaines sur deux sites, elles sont situées à Grenoble, Lyon, Marseille, Montpellier, Limoges-Bordeaux, Rennes, Nancy-Strasbourg et Besançon.

---

<sup>8</sup> Sigles : LETI : Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'information  
IEMN : Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie  
IEF : Institut d'Electronique Fondamentale  
LPN : Institut de Photonique et de Nanotechnologie  
LAAS : Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes

<sup>9</sup> Le pôle Minatec annonce à terme quelque 3500 ingénieurs, chercheurs et universitaires appelés à travailler sur le site.

En récapitulant ces diverses actions et les budgets qui leur sont consacrés en 2003, on arrive à 50 millions d'euros pour le ministère de la Recherche, auxquels on ajoutera le programme national "Nanosciences" fédéré par la Direction de la Recherche (12 millions d'euros), le réseau des quatre centrales technologiques piloté par la Direction de la Technologie (30 millions d'euros), le pôle Minatec (20 millions d'euros) l'irrigation vers les PMI du programme "Réseau Micro- Nano-Technologies" (8 millions d'euros) soit un total d'environ 120 millions d'euros, à rapprocher des 700 millions de dollars en 2003 de la National Nanotechnology Initiative américaine (qui est loin de couvrir toutes les dépenses consenties dans le domaine par les diverses agences concernées).

## Conclusion

Bien qu'honorable, la position de la France n'est pas, selon nous, à la hauteur de la compétition internationale. Différentes raisons peuvent l'expliquer. Nous n'en mentionnerons qu'une, hors le manque de prise de conscience des enjeux par les décideurs et les hommes politiques en général : la relative dispersion des laboratoires et des chercheurs, ainsi que celle de la difficulté de mener des carrières interdisciplinaires dans le cadre académique, carrières qui s'imposent dans des recherches qui conjuguent la physique, la biologie et l'informatique.

Faut-il conclure de ce bilan mitigé à l'existence d'un retard global français en matière de nanosciences et nanotechnologies ? C'est en tout cas l'une des conclusions qui s'est dégagée du Colloque précité consacré à la présentation des nanotechnologies le 23 janvier 2003. Pour nous, qui n'estimons pas devoir être tenus à de telles précautions oratoires, nous parlerons d'un retard qui, malgré les investissements énumérés ci-dessus, risque de s'accroître jusqu'à devenir catastrophique. Depuis deux ans en effet, les américains, sans mentionner les Japonais, les Chinois, les Brésiliens et bien d'autres pays plus petits ont mis, pour diverses raisons de puissance, les bouchées doubles. D'autres pays européens les suivent avec certains succès. La France risque, si personne n'accroît la pression, de manquer un des grands rendez-vous du siècle qui commence.

Ajoutons que ce dont la communauté scientifique et technologique a besoin aujourd'hui, c'est moins de crédits que d'un discours mobilisateur des chefs de gouvernement. Qui sait encore bien de quoi il s'agit quand on parle de nanotechnologies. Dans un article édité par le Monde à la fin d'août 2003, Laurent Fabius lui-même, qui citait la nécessité de relancer l'effort de recherche, évoquait les biotechnologies mais ne disait rien des nanotechnologies, pourtant au moins aussi importantes – et qui sous-tendent de plus en plus, nous l'avons dit, les investissements à faire en biologie.

Les partis politiques ne devraient pas hésiter, dans la mesure où ce discours gouvernemental mobilisateur fait défaut, à le reprendre à leur compte. On peut aborder, pratiquement, la question par le haut et par la base.

**- Par le haut, les européens devraient s'entendre pour proposer des projets « locomotives » aux financements communautaires, insistant beaucoup plus que c'est le cas actuellement sur les produits finaux et leurs applications : informatique, médecine, matériaux. Les financements communautaires du Programme-Cadre de Recherche et de développement technologique (PCRDT) s'éparpillent en effet entre de nombreux petits projets et manquent de visibilité, aussi bien dans les conditions d'attribution des contrats que dans l'évaluation des résultats. Nous voudrions voir au contraire l'Europe se positionner dans ce qui sera la course capitale dans l'informatique de ce premier quart de siècle, l'ordinateur quantique et l'ordinateur à ADN. Qui disposera le premier d'un de ces ordinateurs, potentiellement capables de réaliser en parallèle des milliards**

**d'opérations, dominera le monde, avec la possibilité de détruire si besoin était la totalité des réseaux informatiques et de télécommunications des pays concurrents.**

**- Par le bas, les collectivités locales, établissements d'enseignement, associations devraient participer à l'organisation de journées et démonstrations visant à présenter les différents domaines et produits, d'une façon attrayante et mobilisatrice. Le sujet est suffisamment excitant intellectuellement pour attirer une large audience.**

---

*On pourra consulter sur le web :*

- ▶ Forum de coopération européenne en nanotechnologies <http://www.nanoforum.de>
- ▶ Programme nanosciences du CNRS <http://www.cnrs.fr/cw/fr/prog/progsci/nanosciences.html>
- ▶ Réseau National des Micro et Nanotechnologies <http://www.rmnt.org>
- ▶ Pôle d'Innovation en Micro et Nanotechnologies <http://www.minatec.com> et [http://www.minatec.com/actualite/CEA-techno\\_04-01.pdf](http://www.minatec.com/actualite/CEA-techno_04-01.pdf)
- ▶ Laboratoire d'Electronique de Technologie de l'Information <http://www-leti.cea.fr>
- ▶ Nanosites <http://www.nanosites.com/11presentation.html>
- ▶ Dossier Nanotechnologies du CEA [http://www.cea.fr/fr/presse/dossiers/dossier\\_nanosciences.pdf](http://www.cea.fr/fr/presse/dossiers/dossier_nanosciences.pdf)
- ▶ Dossier du magazine d'Aventis sur les nanotechnologies [http://www.corp.aventis.com/future/fr/fut0103/exploring\\_nanoworld/...](http://www.corp.aventis.com/future/fr/fut0103/exploring_nanoworld/...)
- ▶ Les nanomondes <http://perso.wanadoo.fr/nanotechnologie>
- ▶ Dossier sur les nanotechnologies <http://waglux.free.fr/goon/ref/nanotechnologie>
- ▶ Nanodata <http://www.nanodata.com>

## La robotique autonome

On comptera près d'un million de robots sur la planète en 2004. Pour le plus grand nombre, la robotique évoque en premier lieu les robots industriels, à la programmation déterminée à l'avance. Viennent ensuite les robots commandés à distance (ceux qui explorent les fonds sous-marins ou les planètes, par exemple), qui restent sous contrôle d'un opérateur humain, via des liaisons câblées ou radio.

Mais il existe une autre sorte de robot : le robot autonome, qui vise à s'affranchir progressivement des ordres donnés par l'opérateur humain. Dans celui-ci – toujours au stade de la recherche en laboratoires - le « cerveau » qui commande le corps de l'engin est constitué de modules de coordination et d'élaboration de comportements complexes, reposant sur des logiciels d'intelligence artificielle dits « évolutionnaires ». Elle se distingue de l'intelligence artificielle pré-câblée en ce sens qu'elle génère des programmes capables de se reprogrammer, de se réparer et de s'adapter aux changements de l'environnement. En l'utilisant, on vise ainsi à doter le robot de capacités suffisantes pour lui permettre de survivre et d'agir dans un environnement inconnu de lui et changeant. Les marges d'adaptation demeurent aujourd'hui évidemment limitées mais elle s'élargissent de plus en plus avec les progrès des sciences cognitives appliquées à la robotique. Le ministère de la défense américain et la Nasa, pilotes en la matière, ne parlent d'ailleurs plus de robot autonome, mais de « cognitive system ». Un des objectifs envisagés par la Nasa concerne l'exploration en profondeur de la planète Mars.

### 1. Perspectives stratégiques

On considère généralement que les composants du robot autonome, électro-mécaniques et surtout informatiques, bénéficient d'un rythme de développement exponentiel, analogue à celui qui depuis 30 ans bénéficie aux ordinateurs. On estime par exemple que dans 10 ans, le cerveau du robot pourra être composé de 100 milliards de mémoires, nombre équivalent à celui des neurones dans le cerveau humain. Il tiendra dans le volume d'un actuel micro-ordinateur et ne coûtera pas plus que 1000 euros d'aujourd'hui. Sauf accident de croissance frappant les sociétés techno-scientifiques, on trouvera donc dans un avenir relativement proche des robots à l'œuvre dans toutes les activités humaines.

#### *Applications*

Les grandes applications sont déjà et seront de plus en plus :

- l'intervention dans des **milieux interdits** à l'homme. On pense par exemple, en dehors des environnements industriels dangereux, à l'exploration de la planète Mars ;
- la réalisation d'**opérations chirurgicales** aujourd'hui impossibles. On évoque par exemple des micro-robots chirurgicaux naviguant seuls dans le cerveau pour extraire des tumeurs profondes ;
- la réalisation de **prothèses bioniques** (c'est-à-dire associant le vivant et l'artificiel), capables de s'interconnecter avec les organes et les systèmes nerveux du vivant, de remplacer les fonctions défaillantes et, dans un second temps, d'offrir à des organismes sains de nouvelles possibilités physiques ou intellectuelles ;
- La réalisation d'**unités de production** complètes, allant des industries classiques aux industries en plein développement des nanotechnologies, des biotechnologies et des logiciels ;

- la fabrication de robots **domestiques et/ou ludiques** dont le marché semble devoir s'accroître rapidement ;

- la **robotique militaire**, où toutes les applications se combineront pour donner des systèmes capables d'intervenir dans tous milieux et dans des conditions de plus en plus extrêmes. On ne doit pas fermer pudiquement les yeux sur ces perspectives. Il s'agit d'enjeux de puissance incontournables.

Ajoutons que le développement des robots autonomes donnera, en termes de recherche fondamentale, des modèles très précieux pour comprendre comment procède la vie, l'intelligence et la conscience. On voit déjà s'organiser des échanges croisés fructueux entre la biologie et les neurosciences avec, d'un côté la vie artificielle et, de l'autre, les machines dites « pensantes ». La robotique autonome se situe au cœur d'un vaste domaine interdisciplinaire, allant des sciences de l'automate aux neurosciences intégratives et aux sciences cognitives, en passant par la biologie et le bio-mimétisme. Les sciences sociales et humaines sont également de plus en plus concernées.

### *Questions politiques et sociales*

Dans les pays qui, comme les Etats-Unis et le Japon, considèrent les divers aspects de la robotique et de la vie artificielle comme un enjeu de pouvoir militaire ou économique à déployer dans leurs zones géographiques d'influence, ainsi que dans l'espace, la robotique autonome bénéficie d'une vision et d'une stratégie globales ainsi que de moyens importants en chercheurs et en crédits.

Mais, même dans ces pays, on note de plus en plus de débats sur les conséquences économiques et sociales de l'explosion attendue de la robotique autonome. Les questions en discussion concernent :

**L'emploi.** Il est indéniable que les robots se substitueront de plus en plus à des emplois d'exécution jusqu'ici préservés. Ne pas prévoir les résistances (qualifiées dans les pays anglo-saxons de « luddisme ») serait condamner la robotique. Il est indéniable qu'en contrepartie, et comme l'informatique et les télécommunications, la robotique créera des emplois, notamment qualifiés et très qualifiés. Par ailleurs, elle aura un effet démultiplicateur d'activités considérables, dans tous les secteurs où elle apportera de nouveaux outils (formation professionnelle, enseignement, activités culturelles...). En France, la sagesse voudrait que l'on n'attende pas les créations de nouveaux emplois pour préparer la reconversion des personnels qui seront touchés par la robotisation généralisée. Il faudrait aussi adapter dès maintenant l'appareil d'enseignement et de formation professionnelle, ce qui est loin d'être le cas.

**L'économie.** Les retombées en termes de croissance risquent, à terme, d'être importantes. Dans l'immédiat, il est dès lors vital d'investir dans le domaine, sans retour sur investissement immédiatement prévisible. Les investissements en robotique sont globalement peu coûteux, par rapport aux sommes consacrées à de grands équipements traditionnels. Encore faut-il accepter de les consentir. Le grand stimulant aux Etats-Unis est actuellement la politique de défense qui a pris le relais des perspectives de commercialisation dans le privé (par exemple dans le domaine des robots domestiques et de compagnie). Il faut trouver en Europe de bonnes raisons, outre le militaire, de financer les recherches et les développements. La recherche publique fondamentale a encore à y jouer un rôle considérable, notamment dans le domaine des machines pensantes. Mais il est également impératif d'intéresser les industries à des applications rentables. Les secteurs des robots d'exploration et médicaux, où nous avons déjà de bons atouts, pourraient servir d'effet d'entraînement. Au plan européen, de grands projets comme l'envoi de robots autonomes sur Mars pourraient permettre de focaliser l'attention du public.

## 2. L'état des lieux en France

La position de la France est difficile à apprécier de manière objective, faute d'études comparatives. Elle dispose de quelques laboratoires au niveau des meilleurs mais, si les financements se sont accrus récemment, la conscience des enjeux ne s'est pas encore assez répandue dans la communauté scientifique ou le corps social, si bien que l'interdisciplinarité ou la formation sont encore insuffisantes.

### *Les acteurs*

Parmi les acteurs français de la robotique nous mentionnerons particulièrement:

- le Lip6<sup>10</sup> avec, au sein du thème Oasis, L'animatlab<sup>11</sup> qui développe en coopération avec d'autres laboratoires et l'industrie divers programmes concernant des robots adaptatifs inspirés des animaux. Le projet *Psikarpax* vise par exemple à synthétiser dans un robot des données biologiques concernant la navigation et la sélection de l'action chez le rat ; *ALPhA* vise le contrôle automatique d'un animal volant (dirigeable) par développement et évolution d'algorithmes évolutionnistes au sein de réseaux de neurones formels; *IRON* souhaite intégrer les processus précédents (apprentissage, développement et évolution) dans un robot dynamiquement reconfigurable. Le projet *MICRobES*, quant à lui, est une expérience de robotique collective étudiant l'adaptation à long terme d'une microsociété de robots autonomes dans un environnement occupé par une collectivité humaine. La conférence internationale SAB<sup>12</sup> organisée par l'Association pour les comportements adaptatifs s'est tenue en France en septembre 2000. Organisée et présidée par Jean-Arcady Meyer et Alain Berthoz, elle a rassemblé 350 chercheurs et enregistré 10 contributions de scientifiques français (parmi les cinquante présents qui étaient souvent de jeunes chercheurs).

- L'Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (INRIA), qui entretient notamment 4 thèmes de recherche couvrant un vaste champ de l'automatisme, avec par exemple, au sein du thème «Interaction homme-machine, images, données, connaissances»<sup>13</sup> des projets tels que «Machine Intelligente Autonome, «*BIP*» (conception et contrôle de robots marcheurs et applications) ou «*ICARE*» (Instrumentation, Commande et Architecture des Robots Evolués). Doctorants compris, ces trois projets regroupent plus d'une quarantaine de chercheurs.

- Le Service de Robotique et Systèmes Interactifs (SRSI) du CEA-LIST (Laboratoire d'intégration des systèmes et des technologies), qui travaille notamment sur les robots d'intervention en milieu hostile (nucléaire, milieu sous-marins...). Composé d'une quarantaine de chercheurs-ingénieurs, il est notamment associé au Laboratoire de robotique de Paris (spécialiste en robotique mobile autonome) et l'université d'Evry dans le cadre d'un laboratoire commun «Téléopération et réalité virtuelle». Il fait également partie du réseau

---

<sup>10</sup> <http://www-poleia.lip6.fr/OASIS/>

<sup>11</sup> Contraction « d'animal artificiel ». L'approche animat postule que les mécanismes sous-tendant les comportements adaptatifs doivent impérativement être étudiés et conçus en situation, c'est à dire en tenant compte des buts que l'animat essaie d'atteindre et des opportunités que l'environnement lui offre pour réaliser ces buts <http://www-poleia.lip6.fr/ANIMATLAB/>.

Voir aussi notre interview de Jean-Arcady Meyer et Agnès Guillot [http://www.automatesintelligents.com/interviews/2001/oct/guillot\\_meyer.html](http://www.automatesintelligents.com/interviews/2001/oct/guillot_meyer.html)

<sup>12</sup> SAAB 2002 s'est tenue en août à Edimbourg. La prochaine manifestation se tiendra en juillet 2004 à Los Angeles.

<sup>13</sup> [http://www.inria.fr/recherche/equipes/projets\\_theme3.fr.html](http://www.inria.fr/recherche/equipes/projets_theme3.fr.html)

européen *Clawar* (Climbing et Walking Robots) qui a pour objectif de mieux appréhender l'état de l'art de la robotique mobile<sup>14</sup>.

- Le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (LAAS) du CNRS, au sein duquel figure le groupe «Robotique et Intelligence Artificielle»<sup>15</sup> qui s'attache à l'étude et la conception de machines autonomes. Regroupant quelque 50 chercheurs, on y distingue des projets comme « Robotique de service » mettant en jeu la variabilité de l'environnement, et « Robotique d'intervention » mettant en avant des problèmes de déplacement, de navigation, de perception, et de modélisation dans des environnements d'extérieur, non structurés, inconnus ou très partiellement modélisés.

Un certain nombre d'autres universités ou organismes, que nous ne pouvons citer ici faute de place, participent à l'effort, de plus en plus buissonnant. Mais tous souffrent encore d'un manque de moyens et d'appuis industriels, qui ne leur permet pas de valoriser convenablement leurs recherches. Cette situation n'est pas propre à la robotique, mais n'en est pas moins grave. Signalons toutefois la création en 2000 de la start-up Wany SA (aujourd'hui Wany Robotics)<sup>16</sup> consacrée à la robotique ludique. Cette entreprise, qui vise le marché mondial, a été créée par un ancien chercheur du Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier (LIRMM), lauréat du 2<sup>ème</sup> concours d'aide à la création d'entreprises de technologies innovantes lancé par le ministère de la Recherche. Implantée aujourd'hui en France et en Asie, elle montre la voie aux initiatives nécessaires pour créer de nouveaux marchés rentables.

Il existe aussi en France des équipes de jeunes scientifiques et associations d'étudiants qui participent avec succès à diverses réalisations ou à des coupes de robotique entre établissements d'enseignement. A titre privé, l'Association des jeunes chercheurs en robotique<sup>17</sup> propose un inventaire intéressant des chercheurs, projets et sponsors qu'elle a pu identifier. Le véritable engouement des jeunes - cela commence dès le lycée<sup>18</sup> - pour les coupes de robotique se confirme d'année en année. En matière internationale, même si la France est présente au sein de compétitions telles que la Robocup, ou Coupe du monde des robots footballeurs, les moyens manquent sévèrement. «*Faute de moyens, les chercheurs français négligent trop les manifestations médiatiques internationales* », explique Dominique Duhaut, chercheur français faisant partie du Comité d'organisation de cette manifestation sur l'Europe. «*Cela coûte très cher ; il faut compter près d'un million de francs pour 5 robots, et il n'y a presque aucun mécénat en la matière*».

Dans un tout autre domaine, l'International Aerial Robotics Competition qui se tient régulièrement aux Etats-Unis (et vise notamment à perfectionner les drones robotisés) confronte plusieurs dizaines d'équipes universitaires, dont une allemande. Mais la France, jusqu'à maintenant, n'y figurait pas. Le thème devrait pourtant mobiliser notre industrie aérospatiale, car il s'agissait ici de présenter des drones comportant des robots embarqués, domaine dans lequel les retombées militaires et économiques seront nombreuses.

---

<sup>14</sup> <http://www.clawar.com/home.htm>

<sup>15</sup> <http://www.laas.fr/RIA/RIA.html>

<sup>16</sup> <http://www.wanyrobotics.com> ; voir aussi notre interview d'Erwan Lavarec, le créateur de la société Wany <http://www.automatesintelligents.com/interviews/2000/nov/lavarec.html>

<sup>17</sup> <http://www.ajcr.free.fr/>

<sup>18</sup> Voir notre article : Nanobapt, un lycéen passionné de robotique <http://www.automatesintelligents.com/interviews/2001/jan/nanobapt.html>

## ***Les financements***

La robotique autonome évolutive relève des thèmes désormais encadrés et financés en partie par le nouveau département Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication (STIC) du CNRS, mis en place en octobre 2000. Ce département regroupe, au sens large, 110 unités de recherche. Pour 2002, 72 Actions Spécifiques ont été lancées (97 en 2003), proposant des financements de 50 à 80 K€ par projet. Certaines intéressent la robotique autonome.

Les nouvelles actions du CNRS «Jeune équipe, mobilité et jeune chercheur» ou "Projet-Equipe Multilaboratoire" -qui visent au décloisonnement entre laboratoires, départements et organismes- intéressent aussi le sujet. On notera enfin, l'appel à propositions lancé dans le cadre du programme interdisciplinaire du CNRS «Robotique et entités artificielles» (ROBEA). Ce 3ème appel à propositions s'appuie sur un budget d'environ 1 300 K€, soit du même ordre que celui consenti pour les des deux précédents appels.

En élargissant l'approche et outre le programme thématique interdisciplinaire «Cognition et Traitement de l'Information» du CNRS, signalons les deux Actions Concertées Incitatives (ACI), lancées par le ministère de la Recherche et financées par le Fonds National de la Science: l'ACI Neurosciences intégratives et computationnelles, placée sous la direction d'Alain Berthoz (lancée en 2001 et toujours en cours) et l'ACI Cognitive, sous la direction de Catherine Fuchs. Cette dernière ACI, aujourd'hui terminée, à été dotée de 3,81 M€ en 1999, 5 M€ en 2000, 5,34 M€ en 2001 et 2002. Elle a permis par exemple de financer des projets comme «Systèmes de navigation biologiques et artificiels» faisant intervenir un robot autonome, ou encore «Apprentissage de structures phonologique pour un androïde bébé ».... Notons que ces actions ont été lancées à la suite de nombreuses interventions de scientifiques faisant valoir le grave retard (le terme était, pour l'ACI Neurosciences «*retard et carence absolument dramatiques*») que la France prenait dans ces domaines.

On mentionnera finalement le soutien du ministère de la Recherche au transfert et à la valorisation des résultats de recherche, notamment au travers des Réseaux de recherche et d'innovation technologiques. Bien des domaines de recherche qui interviennent dans la robotique autonome pourraient y trouver un appui, par exemple grâce aux recherches en micro-électronique et micro-composants présentes au sein du Réseau National micro et nanotechnologies (pour ne citer que celui-ci).

Dans le 5<sup>ème</sup> Programme Cadre de Recherche-Développement Technologique (PCRD) de l'Union européenne (1998-2002), qui proposait quelques financements aux recherches coopératives sur les robots autonomes, les projets ont concerné principalement le domaine de l'exploration des milieux dangereux ou hors d'atteinte. Aujourd'hui, avec le 6<sup>ème</sup> PCRD (2002-2006), on ne voit toujours pas d'orientation forte pour la robotique autonome, ce thème n'étant pas affiché dans les thématiques prioritaires de ce Programme communautaire. Les chercheurs constatent également que, face à la concurrence extra-européenne, les forces des pays européens ont plus tendance à s'affronter qu'à s'unir, faite sans doute d'affichage politique suffisamment fort.

## **Conclusion**

Bien qu'honorable, la position de la France n'est pas, selon nous, à la hauteur de la compétition internationale. Différentes raisons peuvent l'expliquer. Nous n'en mentionnerons qu'une, hors le manque de prise de conscience des enjeux par les décideurs et les hommes politiques en général : celle de la difficulté de mener des carrières interdisciplinaires dans le cadre académique. Lors de l'interview accordée à notre magazine Automates-Intelligents [voir la note 2 de bas de page], Jean-Arcady Meyer, directeur de l'Animatlab, regrettait

notamment qu'il n'y ait «*aucun rapport entre le soutien et l'encouragement officiellement affichés et la réalité des faits*», constatant aussi que le domaine de la robotique d'inspiration biologique «*n'aura aucun avenir au plan institutionnel tant qu'on se contentera de dire au CNRS et à l'Université qu'il faut favoriser les recherches pluridisciplinaires, tout en défavorisant les carrières de ceux qui les pratiquent*».

Outre la demande de moyens souvent évoquée par les chercheurs, la réalisation d'une véritable interdisciplinarité – laquelle est bien présente dans des pays comme les USA ou le Japon – semble aujourd'hui constituer la principale condition d'un véritable essor de la discipline «robotique autonome» dans notre pays, appelée à jouer un rôle économique considérable dans les années qui viennent. Mais comment développer cette interdisciplinarité et cette excellence lorsque l'on sait, par exemple, que le domaine robotique/intelligence artificielle ne commence le plus souvent à être enseigné à l'université qu'à partir du DEA. Face à la pénurie d'étudiants s'inscrivant aujourd'hui dans des cursus scientifiques, pourquoi ne pas profiter du vif intérêt des jeunes pour la robotique afin de changer cet état de fait ?

Faut-il conclure de ce bilan mitigé à l'existence d'un retard global français en matière de robotique ? C'est en tout cas l'une des conclusions qui semble s'être dégagée du Colloque «Robots, avenir de l'homme ou homme de l'avenir» tenu au Sénat le 27 juin 2001. Nous parlerons là aussi de retard catastrophique. Depuis deux ans, pour diverses raisons de puissance, les américains et les japonais ont mis les bouchées doubles dans le domaine. D'autres pays européens les suivent avec certains succès. Si personne ne réagit, la France risque de manquer aussi dans ce domaine un des grands rendez-vous du siècle qui commence.

Ajoutons que ce dont la communauté scientifique et technologique a besoin aujourd'hui, c'est moins de crédits que d'un discours mobilisateur des chefs de gouvernement, un peu analogue au discours fondateur d'Hourtin prononcé par le Premier ministre en 1997 pour lancer l'Internet en France.

Dans la mesure où ce discours gouvernemental mobilisateur fait défaut, il faut s'efforcer de le provoquer.

**Les européens devraient s'entendre pour proposer des projets mobilisateurs avec financements communautaires : par exemple le lancement d'un programme de robot autonome, déjà cité ci-dessus, destiné à être envoyé sur la planète Mars lors d'une prochaine expédition de l'ASE (Agence Spatiale Européenne). On mentionnera aussi cette enjeu capital que sera pour la première moitié du 21<sup>e</sup> siècle la réalisation d'une « machine pensante », déjà engagée dans quelques pays. Autour du Pr. Alain Cardon, la France dispose en ce domaine d'une avance théorique certaine, mais le thème n'a jamais intéressé les décideurs<sup>19</sup>.**

---

<sup>19</sup> Lire. [Modéliser et concevoir une machine pensante - Approche constructible de la conscience artificielle](http://www.automatesintelligents.com/collection/cardon1.html), Alain Cardon, Edition Automates Intelligents 03/2003  
<http://www.automatesintelligents.com/collection/cardon1.html>

---

## Les sciences cognitives

Les sciences de la connaissance (dites aussi cognitives) étudient le fonctionnement du cerveau, les langages et autres formes de représentations symboliques, les apprentissages et aussi les méthodes permettant aux collectivités de se comporter de façon plus rationnelle et d'améliorer leur ouverture aux innovations. Elles retrouvent ce faisant de nombreuses sciences humaines traditionnelles : psychologie, sociologie, linguistique, mais dans beaucoup de cas, elles en renouvellent l'approche. Elles touchent aussi de très près aux philosophies, aux croyances, aux superstitions, ce qui n'est pas sans alimenter des controverses. D'ailleurs, la plus grande partie du monde considère encore que leurs objets ne doivent pas relever de la science, mais de la tradition et des usages. En même temps cependant, de nombreuses entreprises, dans le monde occidental, investissent dans leurs domaines, proposent et vendent des produits. Ceci n'est pas répréhensible en soi, mais, si des politiques publiques clairement discutées ne sont pas établies concernant des enjeux aussi fondamentaux, on risque que l'avenir des cultures soit déterminé en fonction des seuls objectifs commerciaux ou militaires : on se trouve là au cœur du débat politique essentiel.

### Les neurosciences

Les neurosciences étendent le champ de la neurologie traditionnelle à tout ce qui concerne le fonctionnement du cerveau comme siège de la conscience et des représentations du monde. Elles ont pris depuis quelques années un développement considérable. D'abord parce que la science du cerveau ne peut être que la science des sciences, puisqu'elle s'attaque aux fondements de la pensée. Ensuite parce que la connaissance du cerveau et de la pensée présente un intérêt stratégique considérable dans un monde où les compétitions, voire les guerres, mettent en œuvre de vastes systèmes d'information et de connaissances (*the information war*).

Les neurosciences comprennent :

- la biologie moléculaire qui décrit la cellule nerveuse et son fonctionnement, ainsi que les messages électriques et chimiques émis à destination du corps tout entier ;
- l'imagerie fonctionnelle qui identifie les neurones ou groupes de neurones entrant en activité lors de telle ou telle sollicitation ;
- l'étude des modèles animaux puisque presque toutes les grandes fonctions nerveuses et cérébrales de l'homme apparaissent chez les espèces vivantes parfois les plus simples ;
- l'informatique et l'intelligence artificielle qui proposent des modèles du fonctionnement global ou partiel des centres et réseaux nerveux, ainsi que des connexions directes entre centres nerveux et prothèses artificielles.

### Les représentations et les langages

Cette vaste catégorie est actuellement renouvelée par l'étude de la façon dont la coopération entre cellules nerveuses (les neurones) permet de se représenter le monde au sein duquel on agit. Dès le stade embryonnaire, les neurones, déjà pré-câblés génétiquement pour l'exercice des principales fonctions vitales, s'assemblent de façon

---

plus spécifique en tenant compte des expériences sensorielles de l'embryon ou du nouveau-né. Ils constituent des « cartes » de l'environnement, que l'expérience vécue du sujet complètera ou au contraire abandonnera. Ces cartes forment les « représentations » à partir desquelles s'ordonnent toutes les activités des êtres vivants, qu'il s'agisse d'hommes ou d'animaux.

## **Les apprentissages**

L'une des retombées les plus importantes des sciences cognitives concerne la façon dont les individus et les groupes acquièrent des informations, les transforment en connaissances et les mémorisent de façon à pouvoir les retrouver par la suite. Le domaine inclut bien entendu toutes les sciences et les techniques de l'éducation et de la formation, entendus au sens large. Ces techniques font actuellement des progrès considérables avec des réseaux utilisés soit à la formation (à distance notamment) soit au stockage des données.

Mais il ne suffit pas d'apprendre, il faut aussi savoir retrouver de la façon la plus efficace possible l'information la plus utile. On évoque alors d'autres techniques en plein essor, très appréciées par les entreprises, moins connues en milieu académique : recherche (la "fouille", disent les Américains de manière plus imagée) de données et de textes, gestion des compétences, etc.

## **Les collectivités intelligentes et conscientes**

Au delà de cela, viennent les réflexions sur ce que sont ou pourraient être les collectivités dites intelligentes et conscientes (smart, selon le terme anglo-saxon). Contrairement aux processus d'acquisition des connaissances des sociétés traditionnelles, les collectivités (entreprises, administrations) fonctionnant sur le modèle occidental se veulent capables de remettre en cause leur comportement, de l'organiser rationnellement et, aussi, de s'ouvrir aux innovations de toutes sortes sans lesquelles elles ne pourraient pas s'adapter à un environnement compétitif. C'est à ce genre de problèmes que se consacrent aujourd'hui la CIA et la NASA, confrontées aux erreurs résultant d'une gestion trop peu réactive.

Concrètement, que signifie cette ambition ? Il s'agit d'utiliser systématiquement les ressources des réseaux et de l'intelligence artificielle à la fois pour mieux exploiter les ressources humaines et « culturelles » des organisations et pour les ouvrir à la coopération avec d'autres acteurs. Le premier objectif suppose notamment la généralisation des intranets servant de cadre au travail coopératif en réseau, l'accès systématique aux sources d'informations externes et internes, une remise en cause des barrières hiérarchiques et entre services, l'encouragement systématique aux initiatives décentralisées... Le second objectif vise, sans supprimer pour autant la complémentarité entre organismes, indispensable en tant que moteur de leur évolution, à faciliter symétriquement les mises en réseau et symbioses permettant d'atteindre un niveau supérieur d'organisation bénéfique pour les divers partenaires, même et surtout si ceux-ci sont de nature très différente.