

Miniaturisation, jusqu'où ?

Rencontre du Café des techniques du jeudi 16 janvier 2003 au Musée des arts et métiers, à l'initiative de l'AFAS, en collaboration avec l'Association des Amis du Musée des arts et métiers et avec le soutien de la Délégation à la recherche et à la technologie d'Ile-de-France

avec la participation de

Xavier Gidrol, chef du service de génomique fonctionnelle, CEA, Génopole d'Évry

Laurent Gouzenes, directeur du plan et des programmes d'étude, STMicroelectronics

Christian Joachim, directeur de recherche au CNRS, responsable du groupe Nanosciences et picotechnologies, Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales, CEMES/CNRS Toulouse

Jean-Louis Robert, en charge du programme Nanosciences, ministère délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies

Rencontre animée par **Nathalie Milion**, journaliste scientifique

Pourquoi cette rencontre ?

Au carrefour de la physique, de la chimie et de la biologie commence le domaine des nanotechnologies et la possibilité de repousser encore les limites de la miniaturisation.

L'invention du microscope à effet tunnel a rendu possibles l'observation mais aussi la manipulation du plus petit constituant de la matière, l'atome. Cette capacité à assembler un objet atome par atome ouvre la voie à la fabrication de nanomachines ou nanorobots constitués d'une seule molécule.

Quelles performances peut-on en attendre ? Quels sont les problèmes technologiques à résoudre pour continuer la course à la miniaturisation ?

Quels développements industriels peut-on envisager pour les découvertes fondamentales issues des nanosciences ? Les mécanismes mis en place par le vivant peuvent-ils servir de modèles à la construction à l'échelle nanométrique de nouvelles machines ?

Venez éprouver le vertige d'un voyage vers l'infiniment petit en compagnie de nos invités qui vous présentent leur façon de voir le nanomonde.

R. Klapisch :

Bonsoir mesdames et messieurs, merci d'être venus si nombreux pour cette première séance de l'année du Café des techniques, organisée conjointement par l'AFAS et le Musée des arts et métiers.

Aujourd'hui, nous allons vous parler de la miniaturisation, sujet dont on parle beaucoup, et la première question qui se pose est : pourquoi ? et jusqu'où peut-on aller ? Nathalie Milion présentera cette séance et, sans plus attendre, je lui passe la parole.

N. Milion :

Merci beaucoup monsieur. Permettez-moi à mon tour de vous souhaiter une bonne soirée. J'espère que vous vous êtes munis pour venir ici de votre âme d'aventurier parce que, ce soir, on va partir pour un grand voyage, on va plonger au cœur de la matière, partir dans l'infiniment petit et essayer de ne pas se perdre en route. Pour cela, quatre spécialistes des nanotechnologies ont accepté de nous tenir la main. Je vais vous les présenter.

Christian Joachim, vous êtes directeur de recherche au CNRS ; vous êtes responsable du groupe Nanosciences et picotechnologies au Centre d'élaboration des matériaux et d'études structurales, le CEMES, situé à Toulouse. En lisant un peu votre curriculum vitae, je me suis dit que, petit, vous deviez aimer jouer au Lego, mais que, grand, vous avez continué avec des briques qui n'ont pas de forme simple, qui sont souples et dans un état d'agitation permanent, et qu'avec cela vous réussissez malgré tout à faire de jolis objets. Vous avez fait, entre autres, la première roue moléculaire qui faisait 1,2 nanomètre de diamètre et vous êtes en train de réaliser la première brouette moléculaire, ce qui vous a valu d'être classé, dans *L'Express* du 2 janvier, dans la nouvelle avant-garde des cent Français qui vont compter cette année. J'ai remarqué qu'en page 50, vous avez eu droit à une nanophotographie.

À côté de vous, Xavier Gidrol aura la lourde charge de représenter les bio-nanotechnologies. À l'échelle du nanomètre, vous savez qu'il y a plusieurs branches qui se rencontrent : la chimie, la physique et la biologie. C'est donc vous, aujourd'hui, qui représentez la biologie. Vous êtes le chef du service de génomique fonctionnelle au CEA, à la Génopole d'Évry. Vous m'avez expliqué en quelques mots ce que vous faisiez dans votre service : le génome a été séquencé, on connaît les positions des gènes, mais

on ne connaît pas la fonction de 90 % de ces gènes et vous essayez donc de savoir ce que font ces gènes. Vous nous parlerez des puces ADN et d'autres choses qui ont rapport avec la biologie. Le vivant peut servir de modèle aux nanobjets, et les nanotechnologies peuvent également rendre de grands services au vivant.

Je continue les présentations avec Jean-Louis Robert. Le professeur Robert est physicien des semi-conducteurs à l'université de Montpellier. Vous avez deux casquettes, celle du physicien, et il faudra jongler parce que vous avez également la casquette du Ministère : vous êtes en charge du programme Nanosciences au ministère délégué à la Recherche et aux Nouvelles Technologies. Le point de vue du Ministère, aujourd'hui, est d'initier des projets autour des nanosciences en interaction avec le CNRS et le CEA. Nous verrons cela plus tard et nous pourrions vous demander où en sont la France et l'Europe. En tant que physicien, vous êtes confronté, dans votre quotidien, à la réduction des dimensions des objets, une prouesse électronique.

Laurent Gouzenes est directeur du plan et des programmes d'étude chez STMicroelectronics. En deux mots, STMicroelectronics est le troisième fabricant mondial de semi-conducteurs. Avec vous, nous allons voir l'évolution quasi naturelle de la microélectronique à la nanoélectronique ; on n'en est peut-être pas encore là aujourd'hui, vous pourrez nous le dire. Nous aborderons aussi un point intéressant, le coût, c'est-à-dire ce qu'il est possible de faire et ce qu'il est économique de faire.

Avant de commencer cette rencontre, je voudrais vous dire que le maître mot d'un café des techniques est l'interaction, c'est vous qui devez poser les questions. Il n'y a pas de question naïve, ici toutes les questions sont les bienvenues, alors n'ayez pas peur de les poser. C'est un des rares endroits où l'on peut encore poser toutes les questions.

Pour commencer, je vais demander au professeur Robert de nous faire descendre à l'échelle du nanomètre et de nous montrer comment ont évolué les composants de la microélectronique en 15 ans.

J.-L. Robert :

Si l'on représente, sur une figure, un ensemble d'éléments du monde vivant sur une ligne, et sur l'autre des objets issus des technologies, classés selon leur taille, suivant une échelle allant du mètre au nanomètre, on a, sur la première ligne : l'homme (dont la taille est de l'ordre du mètre), puis, successivement, le papillon (entre 5 et 10 cm), la puce vivante (1 mm), les cheveux (diamètre : 10 microns), une cellule (1 micron), l'ADN (100 nanomètres), une protéine (10 nanomètres), une molécule (environ un nanomètre), et enfin, l'atome. Sur l'autre ligne, représentant des objets issus des technologies, on trouve, après le laser à boîte quantique, des composants fabriqués en utilisant les outils de la filière électronique : les nanotransistors (100 nanomètres), les phototransistors (10 microns), les microprocesseurs (100 microns), la

puce pour carte (1 cm), le téléphone portable (10 cm). À l'échelle du mètre se situe l'automobile.

On voit, donc, que, grâce aux techniques de la microélectronique, on peut réaliser des objets dont la taille est comparable à celle de la molécule. Ces objets sont réalisés suivant une approche dite du «haut vers le bas» ou «*top-down*».

Essayons de voir, maintenant, comment ont évolué les technologies de la microélectronique.

Le premier microprocesseur, fabriqué par INTEL en 1971, contenait 2 300 transistors. En 2001, les microprocesseurs contiennent, sur une surface de 200 mm², 42 millions de transistors. En 30 ans, le nombre de transistors intégrés sur une même puce a donc augmenté de façon considérable : à l'heure actuelle, la longueur du canal d'un transistor est de l'ordre de la centaine de nanomètres.

L'approche *top-down* permet donc de concevoir des objets en extrapolant les techniques de la microélectronique.

À l'inverse, l'approche dite du «bas vers le haut» ou «*bottom-up*» permet de passer de l'échelle atomique à celle de molécules plus ou moins complexes. Celles-ci sont assemblées dans des structures plus grandes dont les propriétés nouvelles peuvent être contrôlées.

Nanosciences et nanotechnologies sont intimement liées : ce domaine de recherche est, bien entendu, fascinant, et les recherches, qui se développent très vite, sont fortement marquées par leur caractère interdisciplinaire.

Après avoir montré ce qu'est un nanobjet et défini ce qu'on entend par nanosciences et nanotechnologies, le débat peut, certainement, commencer.

N. Milion :

Avez-vous une première question ? J'ai une question toute simple et très naïve : les nanotechnologies sont-elles simplement une miniaturisation des microtechnologies ou est-ce plus compliqué que cela ?

C. Joachim :

On peut séparer la question en deux. Au sens de nanotechnologie pour faire de la fabrication ultime de composants électroniques, c'est effectivement la suite logique, avec d'autres outils ou les mêmes améliorés pour atteindre le transistor tout petit. Cela peut aussi dévier sur autre chose de plus récent que la microélectronique qui est la micromécanique silicium, où les gens s'ingénient à descendre en taille en faisant des petits rotors en silicium. D'un point de vue différent, certains outils de caractérisation sont plus récents que d'autres, comme la microscopie à effet tunnel. Le fait d'accéder à un seul atome ou molécule en jouant avec, ou en essayant de le contrôler dans ses actions, fait que cela ouvre un autre espace. Le but n'est pas forcément de remonter en taille, cela peut être aussi de rester en bas.

Il y a deux manières de trouver une complexité dans la fonction désirée : soit monter en taille pour faire une chose assez grande, soit bénéficier de quelque chose

qu'on ne sait pas faire à l'échelle macroscopique ou microscopique, c'est ce qu'on appelle l'espace des états, c'est-à-dire que, pour un système comme une molécule, l'espace où il agit est très compliqué et donc, très vite, avec quelques atomes, il peut y avoir un nombre de degrés de liberté important et on peut jouer avec cela alors qu'on ne sait pas le faire au niveau macroscopique. Cela ouvre donc deux champs d'action différents.

R. Klapisch :

Vous êtes partis des circuits, au fond tout le monde connaît la fameuse loi de Moore disant que, tous les deux ans, le nombre de composants est doublé. On peut donc en déduire que cela va durer un certain temps. Au bout de combien de temps allons-nous devoir changer de loi physique ? On a des longueurs d'onde de plus en plus petites pour graver quelque chose qui sera qualitativement différent du genre de ce que vous avez mentionné, c'est-à-dire qu'on est à l'échelle de la molécule. Où en sommes-nous ?

J.-L. Robert :

Prenons le cas du silicium : la loi de Moore montre, en effet, que le comportement «classique» des composants finira par ne plus être observé. Il existe déjà, en laboratoire, de tels composants, comme le transistor à un électron.

Prenons le cas de l'optoélectronique : les lasers sont des composants dont le fonctionnement s'explique par la physique quantique.

Pour ce qui est de la filière silicium, on estime que d'ici à 10 ans environ, il ne sera plus possible d'expliquer le fonctionnement des composants sans faire appel à la physique quantique. On se trouvera alors face à un mur technologique : on sera amené à envisager d'autres architectures que celles utilisées jusqu'ici pour associer ces composants.

Quelqu'un dans le public :

Je voudrais juste faire une remarque supplémentaire : là, on parle de composants ou d'objets ; quand on diminue la taille, les propriétés de la matière elle-même peuvent changer suivant les cas par rapport aux lois que l'on connaît. L'un des meilleurs exemples est le fer : tout le monde connaît les propriétés magnétiques du fer massif ; quand on diminue les dimensions d'un échantillon pour arriver à en faire une couche très mince, c'est-à-dire que l'une des dimensions devient très petite par rapport aux autres, le moment magnétique de cet objet, qui est le simple morceau de matériau avec encore beaucoup d'atomes, n'est plus celui du fer massif. On a donc des propriétés exotiques qui sont uniquement liées à la réduction des dimensions et surtout d'une des dimensions par rapport aux autres.

J.-L. Robert :

Il y a, effectivement, dans la notion de «nanos», plusieurs types de définitions. L'une d'entre elles consiste à dire qu'on est dans le domaine des «nanos» lorsque, au

moins une des dimensions de l'objet est nanométrique. C'est le cas des lasers dont on a parlé précédemment.

À l'heure actuelle, on parle de structures nanométriques dans les trois directions : transistors à un électron, sources à un photon (boîte quantique).

Quelqu'un dans le public :

Qu'est-ce qui préside au fait de chercher, de trouver, de faire quelque chose qui est de plus en plus petit et qui va de plus en plus vite ?

L. Gouzenes :

Dans le principe, tous ces progrès ont pour but de réduire les coûts. On fabrique ces transistors électroniques sur des plaquettes qui ressemblent un peu à la table ronde que vous avez devant vous et sur laquelle, initialement, on mettait quelques milliers de transistors. Puis on est passé à dix mille, puis à des millions de transistors, et aujourd'hui, sur une seule plaquette, on fabrique cent milliards de transistors d'un coup.

L'intérêt est le suivant : le coût pour produire cent milliards de transistors est le même que pour en produire mille. Le prix global ne change pas. Ce qui signifie que le prix d'un seul transistor a été divisé par des milliards. Il n'existe aucun objet, autre qu'un transistor, dont on a pu réduire le coût de la même façon. Aujourd'hui, grâce à ces technologies, vous pouvez vous acheter un téléphone portable parce qu'il n'est pas cher, vous pouvez acheter une télévision. Un ordinateur, autrefois, prenait beaucoup de place et ne faisait que quelques milliers d'opérations par seconde. Aujourd'hui, vous avez un ordinateur de poche qui fait des millions d'opérations par seconde.

L'intérêt de faire plus petit est aussi que plus c'est petit, plus cela fonctionne vite, moins cela consomme d'énergie et moins c'est cher. Tous les paramètres vont dans le bon sens. Vous avez ainsi un cycle vertueux qui se crée : puisque je fais moins cher, je trouve des nouveaux marchés, je sais faire des nouvelles fonctionnalités (comme les téléphones portables) qui sont permises uniquement parce qu'on sait faire des transistors plus petits et beaucoup moins chers.

Quelqu'un dans le public :

Dans cette maison, il y a un enseignement d'innovation. Où se trouve l'innovation ? Est-elle de votre côté, vous qui cherchez ce qu'il peut y avoir derrière, ou est-ce le produit qu'il y a derrière ? Vous avez pris le bon exemple avec le téléphone, c'est l'innovation parce qu'il y a un produit derrière, et donc un marché.

L. Gouzenes :

La question est : où se situe l'innovation dans la chaîne électronique ? Nous sommes fabricants de silicium et nous avons donc tendance à dire que c'est le progrès de la technologie qui fait l'innovation ! Mais en fait, on y croit vraiment parce qu'on peut le démontrer : pour le cas du téléphone portable, par exemple, les gens ont

toujours communiqué les uns avec les autres et il y a longtemps qu'ils avaient envie de se parler à distance. On a inventé le télégraphe, le morse, ensuite on a pu se parler directement avec des téléphones fixes, et enfin un jour, on a pu emmener son téléphone dans la poche ! Que permet l'innovation par les progrès de l'électronique ou plutôt l'innovation de la microélectronique et donc la réalisation des puces ? Elle rend ces besoins possibles et accessibles.

De la même façon, les personnes ont toujours eu envie de voler : or pour en être capable, il faut un moteur puissant, des ailes et une hélice. Tout le monde avait envie de voler, mais il a fallu plusieurs inventions fondamentales pour y arriver vraiment. Pour l'électronique, c'est la même situation, il a fallu inventer le transistor dans un premier temps, puis le circuit intégré qui permet de mettre plusieurs transistors les uns à côté des autres et de les faire fonctionner. Aujourd'hui, un circuit intégré standard est composé d'environ 40 millions de transistors qui servent à faire du calcul ou de la mémoire. Vous trouvez normal de pouvoir mettre des numéros de téléphone en mémoire dans votre portable ; or, à chaque fois que vous mettez un simple chiffre dans votre téléphone, vous utilisez une trentaine de transistors, donc si vous mettez votre agenda ou des photos, vous consommez des milliers ou des millions de transistors.

Les progrès de l'électronique qui sont faits grâce aux chercheurs et aux industriels en dépensant énormément d'argent permettent de faire des nouveaux produits qui révolutionnent notre quotidien. Il y a seulement quarante ans, il n'y avait pas de télévision couleur, pas de téléphone portable, pas de PC, pas d'Internet, pas d'électronique dans les voitures, pas d'ABS, pas d'Air Bag, pas de carte à puce. Pourquoi le monde a-t-il autant changé en quarante ans ? Parce qu'on a inventé le circuit intégré et réalisé des progrès fabuleux dans la miniaturisation.

X. Gidrol :

Pour compléter cette vue sur l'utilité de la miniaturisation, il y a tout l'aspect connaissance de notre monde et notamment du monde vivant, et pour comprendre comment fonctionne une cellule vivante aujourd'hui, on a aussi besoin d'une instrumentation qui nous permette d'explorer l'intérieur de la cellule. La dimension de la cellule se situe autour du micron. Nous devons donc être capables d'analyser, à l'intérieur de la cellule, des objets biologiques de taille inférieure au micron, comme les protéines, l'ADN, etc., pour comprendre leur fonction. À cette fin, on met en place de nouveaux outils, les outils de miniaturisation, notamment en optique avec les nanocristaux qui ont des propriétés de fluorescence assez intéressantes et suffisamment diverses pour qu'on puisse marquer une molécule unique dans une cellule et analyser son comportement. En effet nous ne connaissons pas, aujourd'hui, la fonction de 90 % des protéines présentes dans une cellule. Pour nous aider à comprendre cela, la miniaturisation est aussi utile.

D'autre part, dans une cellule vivante, on dénombre près de deux millions de pièces détachées (protéines, mARN, etc.), aussi est-il utile de pouvoir miniaturiser pour étudier simultanément le plus de constituants cellulaires, essayer d'appréhender la cellule dans sa globalité. Or pour mesurer dix mille ou cent mille protéines à la fois, il est nécessaire de faire appel à la miniaturisation. Grâce aux technologies de l'électronique, aux microsystèmes et aux nanosystèmes, les chercheurs peuvent aller plus loin dans la connaissance du monde vivant.

J.-L. Robert :

Pour compléter, je dirais que la réduction des dimensions permet, non seulement d'augmenter le nombre de transistors (et d'accroître la puissance des ordinateurs), mais également de réaliser des objets dont les propriétés ne sont plus expliquées de façon «classique», et dont les fonctionnalités sont nouvelles.

Une application des sources à un photon qu'on peut envisager concerne le cryptage de l'information. Une information peut, en effet, être transmise par des photons uniques. S'il y a disparition d'un photon, celle-ci traduit la présence d'un observateur cherchant à «capter» l'information.

Pour obtenir de telles sources, on réalise, par lithographie, des boîtes dont les dimensions sont de l'ordre de quelques nanomètres.

N. Milion :

Il y a donc deux filières : une filière *top-down* où l'on parle d'un matériau - ce sont plutôt les physiciens qui vont graver et faire quelque chose de plus petit -, et une filière *bottom-up* où ce seraient les chimistes qui partent d'un atome ou d'une molécule et essayent de faire un petit système. Comment fait-on pour isoler la première brique, l'atome ou la molécule ?

C. Joachim :

Deux étapes. Il faut d'abord réussir à fabriquer cette molécule et, en général, ce sont les chimistes qui s'en chargent, c'est donc la synthèse chimique. La seconde étape pour amener cette molécule sur un support, du moins dans les techniques développées actuellement, consiste à arriver à lancer la molécule. Pour cela, on dispose d'un peu de poudre et on chauffe dans l'ultravide. Ensuite, cela s'évapore, on casse beaucoup de molécules, et si la molécule est bien équipée avec toute une série de fonctions, elle va arriver sur la surface et le jeu est de vérifier qu'en arrivant sur la surface, elle ait suffisamment peu d'énergie pour ne pas se casser et qu'on puisse la retrouver après sur la surface.

C'est vraiment une mission de fonction qu'on donne à la molécule dans le cas du *bottom-up* même si l'on ne remonte pas très haut. Cette surface établit la table de travail de l'expérimentateur à l'échelle atomique où l'on est capable de repérer un atome à côté d'un autre atome et d'avoir une résolution qui, actuellement, est de mieux que

0,1 angström en XY et que le record du monde en altitude est de 10^{-3} angströms, ce qui ferait 10^{-4} nanomètres soit un dix millième de nanomètres sachant que 0,5 angström est le diamètre moyen.

N. Milion :

C'est petit, on est vraiment au fin fond de la matière. On sait faire des objets primitifs et vous savez bien les faire...

C. Joachim :

Ils ne sont pas primitifs ! Au départ, les premières molécules qui ont été observées avec ces nouveaux microscopes étaient des molécules «du catalogue» et maintenant, les chimistes savent faire des molécules qui sont équipées pour certaines fonctions. Il existe donc une panoplie diversifiée de molécules.

N. Milion :

Je voulais dire qu'on n'en est pas encore à un système entier qui pourrait remplacer les circuits intégrés qu'on connaît aujourd'hui, par exemple. En sommes-nous loin ?

L. Gouzenes :

On oublie un point : quand on dit nanotechnologie, cela signifie qu'on fait des objets qui sont extrêmement petits, alors que pour faire des choses utiles, il faut, de plus, assembler des dizaines, voire des centaines de millions d'objets. Par exemple, en microélectronique, il faut aujourd'hui 500 millions de transistors les uns à côté des autres sur les circuits intégrés pour faire une mémoire de PC. Savoir organiser des millions d'objets entre eux pour les rendre fonctionnels est quelque chose de très complexe.

C'est le grand problème avec l'approche *bottom-up* (du bas vers le haut) qui consiste à jouer un peu avec le Lego pour faire des objets. Ils sont très petits, on sait les construire un par un par des procédés assez complexes, et cela prend aussi beaucoup de temps pour construire un objet, même simple. Le problème est que si vous voulez en construire cent millions d'un coup, c'est non seulement très long mais aussi très cher. De toute façon, pour le moment et par ces techniques, on ne sait pas les assembler par millions d'objets pour en faire quelque chose d'utile, ce qui ne signifie pas que l'on ne va pas y arriver ! L'approche en microélectronique *top-down* (du haut vers le bas) part de grandes dimensions qu'on réduit ensuite. Ainsi on a toujours su en faire beaucoup et on en fait de plus en plus en les rendant plus petits. Et ainsi on sait les faire très vite et avec un prix intéressant.

Quelqu'un dans le public :

Je rebondis un peu là-dessus parce que la nature a quand même produit le cerveau, dans lequel on génère des cellules par millions ou par milliards. Pour donner un ordre d'idée, on parle de nanotechnologie et l'on voit les densités de transistors qu'on a par centimètre cube ou par centimètre carré. Pour se donner une idée, qu'a pu faire la nature ? Combien de synapses par centimètre cube de

cerveau ou de neurones ? Aujourd'hui, en gros, on sait faire des circuits intégrés qui font à peu près un milliard de transistors. Dans dix ans, on en fera mille fois plus, et dans vingt ans, on atteindra la complexité du cerveau. Le cerveau représente un million de milliards de composants.

L. Gouzenes :

Pour donner un ordre de grandeur, une voiture représente à peu près dix mille éléments, un avion dix millions, un circuit intégré cent millions - c'est-à-dire déjà dix fois plus compliqué qu'un avion, même si vous l'avez dans votre poche -, et dans le cerveau vous avez un million de fois plus de neurones que de transistors dans un circuit intégré. Maintenant, chaque neurone est en lui-même un calculateur complet...

C. Joachim :

L'évolution a sélectionné certains types de fonction à partir de certaines molécules, qui sont en général assez grosses puisque lorsqu'on essaye de reproduire ces fonctions avec des molécules à l'échelle plus petite, on a tendance à les faire croître pour assurer certaines fonctions. Il n'est pas évident que la nature vivante ait sélectionné la seule manière possible de faire des machines ou de la complexité. C'est pour cette raison qu'un certain domaine de la physique et de la chimie s'intéresse beaucoup à faire du tout petit, non pas simplement pour remonter en taille énorme, mais pour essayer de savoir s'il n'y a pas d'autres voies que la nature offrirait pour faire, par exemple, du calcul. Il y a donc vraiment deux voies et la biologie n'est pas forcément le meilleur exemple de miniaturisation par rapport aux capacités des propriétés physiques et chimiques de la nature.

Quelqu'un dans le public :

Toujours sur le problème du cerveau, si l'on prévoit que dans 20 ans, on parvienne à reconstituer un million de milliards de composants, soit autant que le cerveau, pouvons-nous imaginer qu'on soit capable de reconstituer le cerveau humain ?

Serions-nous capables de réparer certains problèmes du cerveau humain consécutifs à des accidents ou à des maladies ? Pouvons-nous dès aujourd'hui prévoir ce genre de choses ?

J.-L. Robert :

Je ne voudrais pas me tromper en vous répondant. Mais il est évident que l'intégration d'un nombre de plus en plus important de transistors ne va pas sans poser un certain nombre de problèmes, comme celui de leur interconnexion, par exemple. Pour que le système fonctionne parfaitement, il faudra résoudre des problèmes d'architecture des circuits : le système devra, par lui-même, réagir à une défaillance de tel ou tel composant.

Il faudra encore beaucoup de temps pour réaliser un système susceptible d'avoir, à l'image du cerveau, un tel fonctionnement.

N. Milion :

Est-ce toujours de la science ou est-ce de la science-fiction ?

J.-L. Robert :

On avance quand même !

Quelqu'un dans le public :

J'avais un directeur qui disait : «les poètes inventent et les ingénieurs réalisent». Y a-t-il une dialectique entre les chercheurs et les écrivains de science-fiction ?

C. Joachim :

Le regard des écrivains de science-fiction est toujours intéressant par rapport à l'imaginaire que chaque personne a en soi et de ce qu'il voudrait qu'on réalise. Je suis admirateur des sciences-fictions en allant y puiser de temps en temps des envies. Si demain, un chercheur m'annonce qu'il a réussi à me téléporter, ce sera génial ! C'est une envie comme l'envie de communiquer à distance. Beaucoup de chercheurs sont guidés par des envies. Pascal avait envie de simplifier, pour son père, le calcul, et c'est le premier qui a projeté le calcul dans une machine.

N. Milion :

Dans la revue *Pour la science* de décembre 2001, vous trouverez un article sur «nanosciences et science-fiction».

X. Gidrol :

Il arrive aussi que les chercheurs rêvent. Le rêve des chercheurs peut donc aider à imaginer un monde futur.

Concernant la question du cerveau, plus directement, vous évoquiez la possibilité d'applications cliniques, de réparation. Il y a quelques travaux à l'interface du vivant et de l'électronique qui semblent intéressants, même si l'on est encore loin de la réparation des fonctions nerveuses endommagées. Il s'agit d'interfaces entre transistors et cellules nerveuses, et de la construction des premiers circuits neuroélectroniques avec émission d'un signal du transistor vers la cellule nerveuse, transmission de l'information à une autre cellule nerveuse et récupération du signal sur un deuxième transistor, ce qui laisse envisager deux voies d'applications. On est encore loin des applications cliniques, mais on peut envisager, à terme, la réparation de fonctions nerveuses endommagées d'une part, et l'apport de la biologie, du vivant, pour la fabrication de circuits électroniques plus efficaces. Toutefois c'est un point de vue de biologiste.

Concernant la construction de molécules, je partage assez cette vision de Christian Joachim que la biologie n'est pas le meilleur exemple de miniaturisation. Cependant nous observons aujourd'hui, dans le monde vivant, des structures biologiques organisées, notamment des macromolécules. L'évolution a fait un travail de chimie, pour nous, de sélection des macromolécules les mieux organisées, qu'on peut envisager de domestiquer pour des applications en microfabrication. En médecine, on pour-

rait envisager d'avoir des puces implantées à l'intérieur du corps, qui feraient à la fois un dosage de la glycémie par exemple, une analyse des résultats en temps réel, et qui déclencheraient la libération de sucre dans l'organisme, en tant que de besoin chez des diabétiques. Cela signifie miniaturisation de la capture d'information, de son analyse et de l'action, c'est-à-dire la libération du médicament. Des objets biologiques domestiqués à l'intérieur de ce type de puces miniaturisées pourraient être utiles.

Quelqu'un dans le public :

C'est une question pour chacun d'entre vous : dans vos rêves les plus fous, qu'espéreriez-vous voir de votre vivant réalisé dans le domaine des nanosciences ?

X. Gidrol :

J'aimerais voir le cancer éradiqué, c'est un simple rêve de biologiste.

C. Joachim :

J'aimerais bien qu'on parvienne à contrôler nos petits robots se baladant sur l'ADN pour réparer les séquences qui ne fonctionnent pas.

X. Gidrol :

Certes, c'est un rêve, mais des chercheurs ont déjà commencé à s'engager dans ce domaine en essayant de contrôler, à la surface des membranes des cellules, certaines protéines qui s'y déplacent. Donc, le contrôle élémentaire, molécule par molécule, du mouvement cellulaire est déjà une réalité dans quelques laboratoires.

L. Gouzenes :

Pour ma part, aimant beaucoup voyager, j'aimerais avoir une machine qui tiendrait dans ma main, qui aurait la taille du téléphone et qui me permettrait de communiquer avec n'importe qui dans n'importe quelle langue.

J.-L. Robert :

J'ai parlé précédemment de l'interdisciplinarité. Le champ des nanosciences et des nanotechnologies est un domaine de recherche où chacun des acteurs pourra apporter son savoir, mais également s'enrichir au contact des autres.

Il y a eu, sans doute, des périodes où les chercheurs restaient enfermés dans leur tour d'ivoire. Cela n'est pas possible dans le domaine des nanosciences et des nanotechnologies. L'objectif est, en effet, de faire aboutir des projets innovants dont les résultats n'auraient pu être acquis hors du contexte de l'«interdisciplinarité».

Quelqu'un dans le public :

J'aimerais revenir sur l'électronique moléculaire. L'idée de faire du traitement du signal à l'échelle de la molécule est finalement très ancienne - que l'on rectifie si je me trompe - et remonte au moins à 20 ans ou 30 ans avec les premières diodes moléculaires. On a su assez

rapidement faire des molécules accomplissant un certain nombre de fonctions et, au bout de 20 ou 30 ans, j'aimerais savoir où l'on en est et s'il y a eu réellement des progrès. Ne se heurte-t-on pas toujours à la question de l'adressage des molécules ? Cette électronique moléculaire dont on a énormément parlé verra-t-elle effectivement le jour malgré ce type de verrou technologique qu'il sera très difficile de lever ?

C. Joachim :

Le premier événement en électronique moléculaire, c'est-à-dire la volonté de faire une fonction électronique avec une seule molécule, date de 1973-1974, mais en fait, cela date de 1972, avec un premier brevet passé par IBM pour réaliser une mémoire avec une seule molécule. Ce n'était qu'un brevet. Le premier papier théorique pour démontrer qu'une molécule entre deux électrodes peut réaliser la fonction de rectification (le courant passait dans un sens et pas dans l'autre) date de 1974. Ensuite, il y a eu un blanc scientifique et un feu d'artifice médiatique coloré de dessins de molécules qui rempliraient le rôle de circuit électronique, c'est la période américaine du chimiste des polymères F.L. Carter. Mais cela n'avait aucune réalité en termes de chimie, ni même en termes de fonctionnalité parce qu'on ne sait pas du tout si cela aurait fonctionné un jour.

Après, suit une période où l'on a commencé, grâce à l'invention du microscope à effet tunnel et, en parallèle, grâce à l'invention des techniques de la nanolithographie, à descendre en taille. On fabriquait des petites électrodes, on a commencé à réaliser les premières expériences pour mesurer les caractéristiques courant tension en branchant typiquement une source de tension sur une seule molécule. Cette période a débuté en 1988 et la première mesure de la conductance d'une seule molécule date de 1994-1995.

Ensuite a suivi une avalanche de résultats avec toute une série d'autres techniques pour mesurer les caractéristiques courant tension d'une seule molécule. Puis on a réussi à faire des petits commutateurs et l'on commence à s'apercevoir maintenant que cette version, qui consiste à dire qu'une molécule peut faire un transistor, une résistance ou n'importe quelle fonction électronique traditionnelle, n'est peut-être pas forcément très intéressante parce que pour faire de l'électronique, il faut en assembler beaucoup. Et pour en assembler beaucoup, il faut que l'ensemble du circuit ait des règles normales de circuiterie.

Et là, on a un problème si l'on fait un circuit où l'on a une molécule qui fait une fonction et un circuit électrique. Il faut passer son temps dans le circuit à convertir des phénomènes quantiques en des phénomènes classiques et ce, composant par composant. C'est comme si vous aviez un convertisseur de comportement multiplié par dix puissance douze ou quinze composants, ce qui est irréalisable. On commence donc maintenant à essayer de marier la fonctionnalité qu'on souhaite pour le système complet avec des molécules plus grosses et récupérer le comportement quantique pur de la molécule. Une nouvelle ver-

sion est en train de paraître. Il y a quelques efforts dans le monde de l'architecture et tous les essais de simulation sur ordinateur utilisant les grands simulateurs en microélectronique ont prouvé que l'approche hybride traditionnelle avec une molécule par composant n'est pas viable.

Dans les années soixante-dix, il y avait un souhait de se connecter électriquement sur une seule petite molécule, ce qui a été fait ; or maintenant, on s'aperçoit que ce n'était pas vraiment la meilleure solution. Et en disant cela, peut-être que quelqu'un dira un jour que c'est la meilleure solution. C'est un bilan pour le début de cette année 2003, un point d'appui, et l'on repart.

J.-L. Robert :

Je suis d'accord avec toi ; je te rejoins sur bien des points. Mais je me rappelle ce qui m'avait été dit par de grands spécialistes au début des années quatre-vingt. Ces personnes estimaient que tout avait été fait dans le domaine des semiconducteurs. Et pourtant, c'est à cette époque qu'a été mis en évidence l'effet Hall quantique, dont l'inventeur a reçu, quelques années plus tard, le prix Nobel. Il faut donc être prudent. On a, parfois, le sentiment de s'être engagé sur des pistes sans issue, et pourtant, celles-ci s'avèrent, à terme, fructueuses. De toute façon, l'accumulation de connaissances n'est jamais inutile.

C. Joachim :

À propos de l'histoire des sciences et de méthodologie, il y a quelques domaines de la physique de base qui vont beaucoup bénéficier du fait qu'on sait faire un petit composant avec une seule molécule. Un exemple en thermodynamique du calcul, c'est-à-dire combien dépense une machine pour calculer. On est limité par la loi de la thermo. Avec un petit commutateur, on peut essayer de s'approcher de ces lois pour essayer de comprendre. Le but est de faire des bilans pour pouvoir regarder autour.

Quelqu'un dans le public :

Vos propos répondent tout à fait à mon attente. Ma deuxième question est de se placer un peu au-dessus du niveau de la molécule, en examinant quelle est la meilleure façon de faire du traitement du signal : est-ce d'utiliser l'électron ou est-ce d'utiliser le photon ? La photonique moléculaire ne va-t-elle pas finalement l'emporter pour des raisons de vitesse et de richesse d'information en couleur ? L'ordinateur tout optique dont on parle depuis un certain temps verra-t-il enfin le jour ou est-ce une fiction ?

J.-L. Robert :

Je réponds, en partie, à votre question. Il est exact que la photonique conduit à des résultats très intéressants. On parle beaucoup d'interconnexion optique pour le futur. Les premières structures, ressemblant à un système et comprenant un composant nanométrique, ont été réalisées en optique.

Mais on peut penser que cela sera également possible avec un composant électronique nanométrique.

L. Gouzenes :

Concernant l'ordinateur optique, la réponse est plutôt négative. Il y a des problèmes de longueur d'onde. Quand vous devez fabriquer des composants qui font du traitement de l'information, c'est purement optique. Si vous réduisez, à un moment donné, vous êtes plus petit que la longueur d'onde. Or, la longueur d'onde de la lumière est de quinze à vingt fois plus grosse que ce qu'on utilise pour faire de l'électronique. En densité, vous êtes déjà quatre cents fois plus mauvais quand vous passez en optique. Vous avez donc des problèmes de miniaturisation.

Aujourd'hui, quand on parle de télécommunication optique, c'est simplement des petits dispositifs qui transforment de l'énergie électrique, donc des signaux électriques, en signaux optiques qui l'envoient dans une fibre optique et, de l'autre côté, on reconvertit dans l'autre sens. C'est donc un dispositif simple qui ne fait pas de calcul.

Aujourd'hui, on fait des puces à plat, c'est-à-dire que vous avez des transistors qui sont à côté les uns des autres sur des très grandes surfaces, et pour aller d'un endroit à l'autre, vous devez monter au-dessus des transistors pour passer le signal en hauteur et revenir après à un autre endroit. Plus on les fait petits et plus la distance entre les éléments apparaît grande et plus cela devient difficile de synchroniser tous les éléments entre eux. Une des idées de l'optique est d'avoir des sortes de «phares» qui utilisent la lumière, qui éclairent un peu tout et qui donnent un tempo correct aux différents sous-ensembles du circuit intégré ; cela pourrait être la seule application future de l'optique dans le calcul et le traitement de l'information.

Quelqu'un dans le public :

Quand vous dites qu'on est limité par la longueur d'onde de la lumière, en fait, on peut descendre plus bas par des effets de champ proche, de la même façon que la microscopie à champ proche peut permettre de détecter des molécules uniques. Ne peut-on imaginer, dans un système miniaturisé, de mettre à profit ces effets de champ proche pour descendre en dessous de la longueur d'onde ?

C. Joachim :

Quand vous avez de l'optique avec des longueurs d'onde de lumière, on peut, par analogie, parler de micro-ondes, et vers 1957, Von Neuman a proposé de faire un ordinateur chez IBM avec des micro-ondes. Tout était bien comme en optique en ce moment, il y avait tout ce qu'il fallait. La seule chose qui n'allait pas, c'est que, quand on monte en architecture et en complexité, on n'arrive pas à tenir la tolérance par rapport à la longueur d'onde entre un composant et un autre composant. Les lois d'architecture pour faire une machine compliquée, on ne sait pas faire. Il ne s'agit pas de faire un modulateur électro-optique où il y a de l'électricité et de la lumière, dans ce cas, cela fonctionne. Mais on ne sait pas faire les

mêmes composants partout au même endroit contrairement au transistor qui permet de reformer le signal parce qu'il y a toujours une référence de tension. En optique, il n'y a pas partout cette référence.

Quelqu'un dans le public :

On a évoqué des problèmes de science-fiction ou de désirs inachevés, or, parmi ces désirs, il en est un qui est lié au vieillissement de la population dans le monde. Nous vivons de plus en plus vieux, et naturellement et de façon inéluctable, un certain nombre de fonctions se dégradent. Parmi ces dégradations, il y a les problèmes de vieillissement du cristallin, et pour aller plus loin, un problème qui devient de plus en plus grave, celui de la dégénérescence de la macula liée au vieillissement.

Aujourd'hui, il semblerait que les études permettent de pouvoir importer l'image au niveau de la rétine, c'est le problème de la vision centrale et non périphérique, mais le problème s'arrête là parce qu'on n'est pas capable de transmettre au cerveau, au travers du nerf optique, les signaux qui ont été fabriqués par ce composant.

Ma question est donc la suivante : dans vos rêves les plus fous et à courte échéance, serons-nous capables de résoudre ce problème, à savoir de transformer ce qu'on est capable de recevoir et de faire recevoir à un homme, et de le faire interpréter par le cerveau ?

L. Gouzenes :

La question est complexe. Deux problèmes : que peut-on faire techniquement et que connaît-on du fonctionnement de l'œil humain ? Que fait l'œil humain, comment transmet-il de l'information, quelle information transmet-il au cerveau et sous quelle forme ?

Avant de remplacer ou d'inventer ce qui permettrait de remplacer le fond de l'œil, cela suppose d'en connaître le fonctionnement, or aujourd'hui, on ne sait pas comment cela fonctionne exactement : le fond de l'œil n'est pas simplement composé de capteurs de couleurs qui transmettent l'information brute au travers du nerf optique jusqu'au cerveau. En fait, c'est beaucoup plus compliqué que cela.

Tout d'abord, il faut rappeler qu'il y a plusieurs sortes de capteurs qui sont sensibles au bleu ou au rouge ou à la lumière. Derrière les capteurs de lumière de la rétine, il y a ensuite plusieurs sortes de cellules, chacune faisant un calcul spécifique à partir des données des capteurs, par exemple en additionnant ou soustrayant leurs mesures localement, ce qui transmet une information au cerveau, par exemple l'existence d'un contraste local. Enfin, les informations doivent arriver au cerveau dans la même disposition spatiale où elles ont été recueillies dans la rétine : le problème pour relier une rétine artificielle à un cerveau vient du fait qu'il faut être capable d'avoir aussi la carte de correspondance rétine/cerveau. Il faut donc bien connaître ce que font les traitements locaux de la rétine et sous quelle forme sont envoyés les signaux, alors qu'on en est encore à savoir comment fonctionnent les

cellules des traitements de base de la rétine. On ne connaît pas bien encore la cartographie qui existe entre le nerf optique (le tuyau) et l'œil lui-même, comment les fibres sont organisées. Si l'on regarde la taille qu'on sait faire pour les capteurs optiques et la taille du capteur de l'œil, on sait faire des choses bien plus performantes que ce que sait faire l'œil. Cela laisse donc des espoirs, mais des problèmes de fond subsistent, à savoir le besoin énorme de progrès de la biologie.

X. Gidrol :

Pour répondre vraiment à la question, dans nos rêves les plus fous, cela se fera, mais quand ? Cela risque d'être plus long que ce que vous espérez. On a évoqué la capacité à pouvoir détecter, mais saura-t-on traiter le signal dans le cerveau ? Donc, toute la partie détection puis transfert au nerf optique qui vient d'être évoquée sera difficile à réaliser mais est envisageable. En revanche, on ne saura pas forcément identifier la zone du cerveau impliquée dans l'analyse du signal reçu par le nerf optique. Grâce à l'imagerie neurofonctionnelle, c'est-à-dire à tout un nombre d'outils qui permettent de visualiser les zones du cerveau en activité au cours de l'accomplissement d'une tâche, on pourra peut-être repérer les zones clés impliquées dans la réponse à la vision. Avec le genre d'outils évoqués auparavant, à l'interface de l'électronique et du vivant, on peut concevoir qu'une fois les signaux optiques transformés en signaux électriques transmis au nerf optique, on pourra stimuler la zone cérébrale concernée. Mais cela reste une gageure moins en termes de miniaturisation que de cartographie cérébrale.

Quelqu'un dans le public :

J'aurais voulu connaître le résultat d'une expérience très théorique : imaginons que vous preniez une cellule vivante, la plus élémentaire et la plus simple à reproduire, et qu'en manipulant atome par atome, vous soyez capables de reconstruire à l'identique cette cellule vivante. Quel serait le résultat ? Obtiendrait-on une cellule qui se mettrait à vivre ?

X. Gidrol :

Cela se fait déjà en quelque sorte, ce n'est donc pas si théorique que cela. Un pionnier de la génomique, Craig Venter, a lancé un projet aux États-Unis sur ce sujet pour savoir quel est l'ensemble minimum de gènes qui permettrait la vie ? En prenant l'exemple des virus qui ne contiennent que quelques gènes et qui arrivent à vivre et à se répliquer, l'objectif est d'assembler artificiellement dans une cellule le minimum de gènes nécessaire et suffisant pour assurer la vie. Toutefois, cela ne concerne que la biologie et non pas la miniaturisation.

C. Joachim :

Il y a dans les Pyrénées une petite bactérie qui embête beaucoup les brebis, qui est intéressante par sa petite taille (0,1 micron), par le fait qu'elle est une unité de vie

très miniature ; ce serait un bon objectif d'essayer de la faire pour une autre raison, à savoir que c'est un être cellulaire sans appareil de digestion, etc., ce n'est qu'à la surface. Elle est vraiment entre le virus et l'être vivant qui se reproduit. Néanmoins, on devrait pouvoir, un jour, s'essayer à assembler cela atome par atome. Je ne vois pas là-dedans le souffle de vie recherché. Avec le même atome je peux faire de cette matière inerte un cristal complètement désordonné. La chose difficile à reproduire est le milieu gélatineux, à savoir toute la partie aléatoire et thermodynamique de la cellule. La cellule n'est pas un être cristallin, inerte, mais, au contraire, liquide et gélatineux. C'est peut-être cela qui donnera d'ailleurs le souffle de vie.

X. Gidrol :

Le vrai problème des biologistes et des biochimistes est de savoir quelle était la première molécule de la vie. Il y a deux écoles, la première qui pense que c'était une molécule d'ADN, et la deuxième qui pense que c'était une molécule d'ARN. Toutefois on est de plus en plus nombreux à penser que c'était une molécule d'ARN. Au départ, il y avait du carbone, de l'hydrogène, tous les constituants étaient présents. Puis la première macromolécule ayant une activité biologique a été synthétisée. Il a été démontré récemment que les molécules d'ARN ont une activité biologique. En bref, une première macromolécule simple dotée d'une fonction biologique a été à l'origine de la vie. C'est un acide nucléique : un ARN ou un ADN, la discussion reste ouverte.

L. Gouzenes :

Cela étant, même si le virus n'est pas vraiment la vie, aux États-Unis, le virus de la polio a été complètement reconstruit artificiellement en éprouvette par des biochimistes à partir de sa simple séquence d'ADN. Le virus a ensuite besoin d'un environnement cellulaire pour se reproduire, mais c'est une première approche de recherche sur le sujet.

Quelqu'un dans le public :

Pouvez-vous nous dire, depuis 12 ans que le nanotube de carbone a été découvert et qu'il a conduit à beaucoup d'études, quel est le bilan des applications pratiques qu'on pourrait en tirer à très court terme ?

X. Gidrol :

On a évoqué les puces à ADN et, sans rentrer dans le détail, ce n'est pas l'utilisation de l'ADN pour faire des puces électroniques, mais simplement des outils pour faire de l'analyse massivement parallèle des gènes. Ainsi viennent de sortir une puce à ADN et une puce à protéine fabriquées à partir de nanotubes de carbone fixés sur un substrat de silicium. Au bout du nanotube de carbone, on fixe une protéine ou un ADN qui permet de mesurer ces objets biologiques de manière massivement parallèle. C'est une application plutôt en recherche.

C. Joachim :

Je vais essayer de faire une liste : l'application qui sortira le plus vite possible, c'est par Samsung avec des écrans plats de télévision. Pour faire des écrans de télévision, il faut des faisceaux d'électrons, et en fait, c'est plus simple avec des tubes de carbone d'en peindre sur une surface et de temps en temps par petites unités de pixels, on a un bon tube qui fonctionne bien. Sans vraiment faire très attention à la façon dont chaque tube de carbone va être aligné pour émettre ses électrons, le *process* semble au point. Des écrans plats gigantesques devraient sortir dans un ou deux ans.

Il y a des choses en mécanique avec la tenue mécanique des fibres, mais dans ce cas c'est un ensemble de tubes pour faire des fibres.

Concernant les applications électroniques, des gens ont essayé de faire des transistors avec des tubes, cela fonctionne, mais cela se rapproche beaucoup plus dans la conception d'un tube ou d'un transistor à effet de champ. C'est donc plus de la microélectronique standard.

Ensuite, une autre application est le stockage d'énergie dont je ne connais pas les travaux d'avancement. C'est plus des cavités ou des cônes en carbone pour essayer de stocker des molécules d'hydrogène à l'intérieur de cavité. Les Japonais travaillent là-dessus.

Une autre application consisterait à essayer, à l'aide d'un tube tout petit, de perforer la membrane d'une cellule, de rentrer dedans, et la cellule n'aura pas perturbé son métabolisme.

Quelqu'un dans le public :

En m'intéressant à la photographie, et depuis qu'on entend parler des nanotechnologies, je rêve d'une pellicule sur laquelle on pourrait étendre une surface sensible dont le pouvoir séparateur serait par exemple, en linéaire, mille fois celui des meilleures émulsions actuelles. Je ne vous demande pas si vous en rêvez aussi, je suis convaincu que tout le monde rêve d'une surface sensible qui serait un million de fois plus fine que les surfaces actuelles et que l'on pourrait amplifier : une petite photo 24 x 36 négative jusqu'à la surface de Paris tout en restant nette.

Y a-t-il des recherches en ce sens ? Pensez-vous qu'elles pourront aboutir et quand ? Ne serions-nous pas limités par la finesse des images optiques ?

L. Gouzenes :

Aujourd'hui, en gros, en microélectronique, vous avez les appareils photos numériques sur le marché, dont la finesse de grain ou la finesse du pixel est celle du pixel ou du grain de l'optique (2 ou 3 microns). Plus on fait petit et moins c'est cher, selon les électroniciens. Alors je leur ai aussi posé la question parce que cela m'amuserait d'avoir des caméras partout, on peut imaginer des yeux artificiels dans tous les objets et les voitures, etc. En fait, quand on réduit la taille du capteur, on capte de moins en moins de

photons et il faut donc faire des dispositifs de plus en plus sensibles. Mais on se heurte alors à un autre phénomène qui est le bruit quantique, c'est-à-dire que le bruit lié aux mouvements naturels des électrons devient supérieur à ce qui est capté.

Il y a donc un compromis à faire et aujourd'hui, dans cette recherche de réduction, on bloque sur ce phénomène-là. On en arrive au problème de savoir ce qu'on peut faire quand on touche les limites de la matière. On bute justement sur le comportement très fin de la matière comme le bruit des électrons.

Quelqu'un dans le public :

J'ai entendu parler de la technologie des laboratoires sur puce et je voulais savoir en quoi consistait cette technologie, ce qu'on pouvait en tirer, et où en est la recherche ?

X. Gidrol :

Pour toute l'analyse biochimique, biologique, voire chimique, il est nécessaire de réduire les volumes pour réduire les coûts. L'objectif est de faire sur des puces les analyses de sang, d'urine ou de salive, à toute petite échelle afin de diminuer les quantités prélevées de fluides biologiques et afin d'aller plus vite parce que plus les volumes sont petits, plus la vitesse de réaction est importante.

Beaucoup d'efforts sont donc faits dans le monde, à partir des technologies de l'électronique, pour fabriquer des micro-canaux et déplacer des nanovolumes de liquide dans ces micro-canaux de manière parallèle. Les applications sont excessivement nombreuses, notamment pour mesurer des activités biologiques et plus précisément en analyse biomédicale. On pourrait concevoir de mettre un peu de salive sur une puce qu'on mettrait dans son téléphone portable pour envoyer, 10 000 km plus loin à son médecin, l'analyse résultant de ce prélèvement. C'est tout à fait envisageable, et on arrive, comme on l'a fait en électronique, à des laboratoires sur puce qui sont en fait des systèmes d'intégration micro-fluidique complexes.

Quelqu'un dans le public :

À quelle échelle ce type de recherche est-il organisé ? européenne ? de l'entreprise ? à l'échelle des organismes de recherche ? à l'échelle nationale ? Comment se joue la compétition ?

J.-L. Robert :

La compétition est internationale, c'est très clair. Il y a effectivement des investissements très importants dans les grands pays développés, en particulier aux États-Unis et au Japon. L'Europe s'est investie, avec retard, dans ce domaine ; un effort particulier est en train, malgré tout, d'être fait dans le cadre du 6^e PCRD.

À l'échelon national, pour être plus efficace, on fait en sorte que l'action des organismes et celle des directions du Ministère soit coordonnées dans ce domaine.