



Les nanotechnologies

TOUJOURS PLUS PETIT

Que ce soit pour des raisons scientifiques, culturelles ou économiques, l'homme a toujours été fasciné et attiré par l'infiniment petit (comme par l'infiniment grand). Voir l'invisible est devenu un défi qui, progressivement, a été relevé.

Les loupes puis les microscopes ont permis d'observer des structures, des matières, des cellules...

qui jusqu'alors préservaient leurs secrets.

Les instruments d'optique se sont développés et ont participé à de nombreuses découvertes ou confirmations théoriques (Démocrite, quatre siècles avant notre ère, avait déjà « l'intuition » de l'existence des atomes).

Mais la véritable révolution dans ce domaine aura lieu lorsque le physicien Richard Feynman, en 1959, posera les fondations des nanotechnologies en suggérant à la communauté scientifique de repousser davantage les limites de l'infiniment petit.

LA CONNAISSANCE SUR UNE TÊTE D'ÉPINGLE

Depuis toujours, l'homme a conçu et utilisé des outils. De façon globale, il est possible de dire que les techniques de fabrication n'ont que peu changé depuis les temps préhistoriques.

La conception d'un objet, quel qu'il soit, nécessite, dans la plupart des cas, l'extraction de matières premières en assez grande quantité et un processus de travail sur ces matières premières.

Ce processus met en jeu une importante somme d'énergie et produit généralement de nombreux déchets.

L'approche quantitative, qualitative et économique de ces processus de fabrication incite ingénieurs et scientifiques à réfléchir au problème de la miniaturisation de certains produits, et en particulier ceux dont le rôle est de servir de support à l'information.

C'est dans cette optique qu'en 1959, le futur prix Nobel américain de physique **Richard Feynman**

établir les bases de ce qui deviendra, plus de vingt ans plus tard, la nanotechnologie (le préfixe nano dérive du grec *nanos* qui signifie

nain et divise par 10^9 l'unité qu'il précède. Ainsi, un nanomètre

représente un milliardième de mètre soit 10^9 mètre, c'est-à-dire

100 000 fois plus petit que l'épaisseur d'un cheveu.)

Son idée est de réduire la taille de l'écriture afin de parvenir à faire tenir l'intégralité des 24 volumes de l'*Encyclopaedia Britannica* sur une tête d'épingle.

À première vue singulier, son raisonnement se fonde malgré tout sur une arithmétique simple : la surface occupée par les quelque 30 000 pages de l'*Encyclopaedia Britannica* est normalement de 1 500 m². Il suffit alors de réduire la taille du texte 25 000 fois pour que l'ensemble des informations ne recouvre plus que 2,5 mm².

Dès lors, les chercheurs vont fournir de nombreux efforts visant à réduire la largeur des traits. Il est ainsi aujourd'hui possible de graver des lignes de 80 nanomètres (1 000 fois plus fines qu'une feuille de papier). Mais l'idée de Feynman allait plus loin : il suggérerait que les lois de la physique autorisaient la manipulation et le positionnement des atomes et des molécules individuellement, et qu'il était tout à fait envisageable d'utiliser les atomes comme des briques de construction.

L'atome est l'élément constitutif de toute matière, qu'elle soit solide, liquide ou gazeuse. Il n'existe qu'une dizaine de sortes d'atomes et c'est leur organisation spatiale qui crée les différences de matière.

Un morceau de charbon, par exemple, est exclusivement constitué d'atomes de carbone, tout comme un diamant. Seul l'agencement de ces atomes de carbone est à l'origine de la différence qui existe entre ces deux matières. À notre échelle, les atomes sont extraordinairement petits.

Ainsi, dans l'épaisseur d'une feuille de papier (environ un dixième de millimètre), il est possible d'empiler près de 400 000 atomes de métal.

À une si petite échelle, il existe donc énormément de place pour une construction atomique.

Là s'ancrait l'idée de Feynman : il démontra que si l'homme parvenait à manipuler les atomes individuellement, il pourrait enregistrer tous les écrits de l'humanité dans un cube d'un dixième de millimètre de côté. Le but premier de la nanotechnologie est de parvenir à ce contrôle précis et individuel des atomes.

PREMIERS PAS

Le premier problème pratique qu'ont rencontré les chercheurs résultait de la taille même de l'atome. En effet, avant de pouvoir manipuler un atome, il convenait de l'identifier, c'est-à-dire, avant tout, de le voir. Or, avant 1981, les microscopes ne permettaient pas d'observer les atomes à l'unité.

Ce sont des chercheurs d'IBM à Zurich, Gerd Binnig et Heinrich Rohrer, qui, à cette date, ont mis au point le microscope à effet tunnel (STM). Ce microscope à pointe permet, pour la première fois, d'observer les atomes et les molécules à l'unité.

Un peu plus tard, et après quelques améliorations et changements, le microscope à effet tunnel permettra de manipuler et de déplacer les atomes individuellement. Le stade de l'observation est dépassé : les nanotechnologies sont nées.

En 1988, Donald Eigler parvient à écrire le **sigle IBM** avec des atomes



de xénon sur une surface de nickel. Véritable tour de force pour l'époque, cette expérience est réalisée à - 270° C afin d'éviter toute vibration. Peu à peu, les outils et les théories s'affinent.

En 1990, le **kanji** (caractère japonais) qui signifie atome est



écrit avec des atomes de fer sur du cuivre. Il est désormais possible d'écrire avec des atomes, ce qui

représente la plus petite écriture imaginable.

Pourtant, cette méthode d'écriture, même si elle est importante et trouvable sans doute d'intéressantes applications à l'avenir, n'est pas tout à fait satisfaisante pour le moment. Elle ne peut convenir dans l'immédiat à ce qui devient vite l'un des enjeux majeurs des nanotechnologies : le dessin des motifs utilisables dans la microélectronique. En effet, la lenteur de cette méthode inhibe, à l'heure actuelle, la possibilité de dessiner en nombre des transistors (les transistors sont les composants électroniques élémentaires).

Leur assemblage forme un circuit électronique - microprocesseur, mémoire, etc. - fixé sur la surface d'une puce.)

L'un des objectifs des recherches nanotechnologiques est aujourd'hui de résoudre ce problème et de parvenir à dessiner plus rapidement

les milliards de transistors des futurs microprocesseurs.

Mais dans le même temps, un autre but essentiel apparaît : accroître la puissance des microprocesseurs en réduisant au maximum la taille des transistors afin d'en stocker un plus grand nombre sur une puce. D'énormes progrès ont d'ailleurs déjà été faits dans ce sens puisque le premier microprocesseur (sorti des laboratoires d'Intel en 1971) était formé d'une plaque de silicium de trois millimètres sur quatre qui ne contenait « que » 2 250 transistors alors qu'aujourd'hui, le microprocesseur Pentium 4 en compte 42 millions. La taille des transistors continue d'ailleurs à se réduire considérablement. Actuellement, les transistors mesurent 180 nanomètres et ne devraient plus mesurer que 100 nanomètres en 2007.

En septembre 1999, les chercheurs du LETI (Laboratoire d'Électronique et de Technologies de l'Information) à Grenoble ont même annoncé la fabrication du plus petit transistor du monde : 20 nanomètres.

Un autre transistor long de 6 nanomètres devrait être mis sur le marché vers 2016.

DE LA MICROÉLECTRONIQUE À LA BIOLOGIE

La molécule d'ADN (acide désoxyribonucléique) est la carte d'identité de tout organisme vivant. Située à l'intérieur du noyau de chaque cellule, elle est le patrimoine génétique de l'individu, c'est-à-dire l'ensemble de ses gènes. Le gène contient l'information pour la synthèse d'une protéine qui, elle-même, exprime un caractère héréditaire déterminé.

La molécule d'ADN ressemble à une échelle torsadée se présentant sous la forme d'une double hélice. Chaque barreau de cette échelle est un assemblage de deux bases complémentaires : l'adénine (A), la guanine (G), la thymine (T) et la cytosine (C), toujours associées par paires (A avec T et C avec G).

L'enchaînement de ces millions de bases le long de l'échelle constitue l'information génétique.

Décrypter le génome revient à déterminer la séquence de lettres.

Chercher un moyen peu coûteux et rapide de lire le génome et de repérer, sur la molécule d'ADN, les gènes qui caractérisent les particularités de chaque individu appartenant à une même espèce (ces différences se situent, pour l'homme, dans moins de 1 % de l'ensemble du génome), le Britannique Edwin Southern breveta la **biopuce** en 1988.



Partant de la constatation que les bases d'ADN s'assemblent deux à deux de façon invariable et que, par exemple, une séquence AACTCTG ne peut s'associer qu'avec une séquence TTGAGAC, Southern eut l'idée de déposer sur une plaque de verre ou de silicium de 1 cm² un grand nombre de spots de séquences d'ADN rangées dans un ordre prédéterminé. Les simples brins d'ADN de chaque spot sont alors capables de reconnaître et de fixer, lorsqu'ils sont mis en leur présence, les simple brins d'ADN placés dans une solution et qui leur sont complémentaires. La biopuce, dont la fabrication nécessite des procédés issus de la microélectronique et de la nanotechnologie, permet donc d'identifier en un temps record un grand nombre de gènes et d'en étudier le fonctionnement. De ce fait, les possibilités offertes par la biopuce sont nombreuses et prometteuses. Grâce à elle, les caractères génétiques mis en cause lors d'une maladie pourront être identifiés, ciblés, ce qui permettra de choisir

Des chiffres vertigineux

Il y a environ 1 000 milliards de milliards de molécules H₂O dans une seule goutte d'eau.

Une feuille de métal au format A4 contient environ quatre cent mille milliards de milliards d'atomes (4 x 10¹⁴, c'est-à-dire un 4 suivi de 23 zéros).

En admettant qu'il soit possible de compter un milliard d'atomes par seconde, il faudrait près de 50 siècles pour dénombrer l'ensemble de ceux constituant un unique gram de sel.

L'hydrogène



Diamètre : 1,1 x 10⁻¹⁰ m

Nanoguitare



10 µm x 50 nm

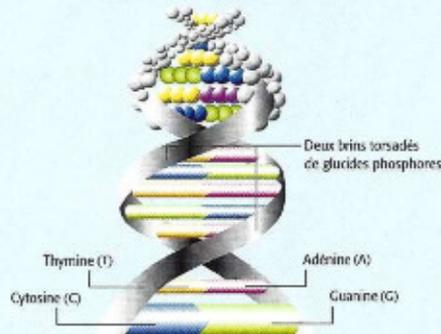
Le son est totalement inaudible.

L'ADN



Elle est longue, une fois dépliée, de plus de 2 mètres pour un poids de 7 x 10⁻¹⁴ g.

COUPE DE LA MOLECULE D'ADN



L'atome le plus petit

La guitare la plus petite

La molécule la plus grosse

la thérapie la mieux adoptée, en particulier dans le traitement de certains cancers. De même, elle pourra détecter une mutation génétique à un stade encore précoce et conduire à la mise en place d'un traitement préventif.

• La biopuce pourrait également participer à la pharmacogénomique, c'est-à-dire à l'identification des gènes impliqués dans l'efficacité (ou l'inefficacité) et/ou dans les effets secondaires d'un produit et permettre ainsi une meilleure compréhension des mécanismes d'action des médicaments.

Enfin, sa puissance d'analyse rendra possible la détection des pollutions organiques ou microbiennes, notamment dans le domaine de la surveillance de l'eau, des produits alimentaires ou des cosmétiques.

À court ou moyen terme, la biopuce deviendra ainsi un agent majeur et incontournable de la protection environnementale.

• La microélectronique intervient encore dans la biologie moderne puisque cette dernière, utilisant des moyens sophistiqués et coûteux pour ses analyses, cherche à limiter ses dépenses et à améliorer ses performances en réduisant la dimension des appareils d'analyse. Ainsi se développe peu à peu la fabrication et l'utilisation des microlaboratoires qui ne sont rien d'autre que des puces électroniques effectuant manipulations et analyses. Des « nez électroniques » sont déjà à l'œuvre dans les domaines de l'agroalimentaire, des cosmétiques ou de la pharmacie afin de prévoir la sensation olfactive du client. Ces labo-puces ont d'ailleurs déjà trouvé l'une de leurs premières applications dans le domaine de la sécurité et de la défense puisque la puce capable de détecter des traces chimiques d'explosifs est en train de voir le jour aux États-Unis.

• Des recherches sont également en cours dans le domaine de la défense. On parle de « nanosoldats » ou de robots espions MAVs (*Micro Air Vehicles*) capables de rapporter des images prises du ciel ou de l'intérieur des bâtiments. Ces robots espions mesureraient environ 15 cm de long et seraient capables de voler à 70 km/h pendant près d'une heure. Il s'agirait donc de drones d'un type nouveau qui, à terme, seraient en mesure d'attaquer et de saboter des armes et du matériel ou même de propager des virus ou des bactéries. L'objectif de l'Agence américaine de recherche militaire, qui se penche particulièrement sur ces recherches,

est, dans un premier temps, de réduire autant que possible la taille de ces drones afin qu'ils se déplacent en groupe et, dans un second temps, que ces robots espions soient capables de s'auto-répliquer, c'est-à-dire qu'ils aient la possibilité de construire d'eux-mêmes d'autres MAVs.

LA NANOMÉDECINE

En 1986, le théoricien scientifique **Eric Drexler** écrit dans son essai



Engines of Creation. The Coming Era of Nanotechnology : « Nous utiliserons la technologie moléculaire pour apporter la santé car le corps humain est fait de molécules. Les malades, les personnes âgées et les blessés souffrent tous d'une perturbation dans l'agencement des atomes (...). Des dispositifs capables de réarranger les atomes remettront tout en ordre. La nanotechnologie conduira à une percée fondamentale en médecine. »

Dix-sept ans après ces propos visionnaires, la possibilité de remplacer des molécules défaillantes afin de soigner un malade n'est toujours pas d'actualité. Cependant, les nanotechnologies ouvrent des perspectives prometteuses dans le domaine de la médecine et certaines recherches actuellement en cours s'emploient pleinement à les faire aboutir.

De fait, les nanotechnologies peuvent apporter à la médecine une contribution efficace et précieuse, et ce, selon trois axes : la possibilité de mieux voir à l'intérieur du corps, celle de mieux soigner et celle de mieux réparer.

L'OBSERVATION INTRACORPORELLE

• Une société israélienne a inventé la pilule-caméra. L'idée est simple : l'objectif est de miniaturiser une caméra, de la loger sur une puce de quelques millimètres carrés et de l'insérer à l'intérieur d'une gélule semblable aux capsules de vitamines. Il devient alors possible d'observer, huit heures durant (durée approximative du transit), l'intérieur des voies digestives. Cette application devrait bientôt être utilisée par les praticiens spécialistes.

• Une autre voie actuellement en cours de recherches est celle de l'implantation d'un baromètre au sein même du corps humain. Un capteur de pression en silicium extrêmement

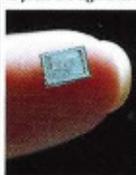
réduit pourrait être implanté dans le corps d'un patient afin de mesurer et d'enregistrer la pression pulmonaire et ainsi d'adapter le rythme de l'aide respiratoire. De même, un de ces capteurs pourrait être inséré dans l'œil afin d'effectuer des mesures continues de la pression intraoculaire et de prévenir les risques de glaucomes.

MIEUX SOIGNER

Comprimés, solutions buvables, suppositoires, injections ou inhalations sont autant de modes d'administration de médicaments auxquels fait confiance le patient. Pourtant, les spécialistes affirment qu'ils présentent des défauts d'importance et que bien souvent, parce que le produit administré subit des dégradations, c'est une dose insuffisante qui atteint l'endroit visé (lors d'une administration orale par exemple, le produit doit pouvoir résister à l'action des sucs gastriques, franchir le tube digestif et être véhiculé par le sang).

• Une équipe de chercheurs américains est peut-être sur le point de trouver une solution à ce problème en élaborant une méthode capable d'administrer la dose exactement nécessaire sur la cible visée : la puce distributrice de médicament à la demande. Il s'agit d'incorporer le produit à administrer dans les réservoirs hermétiquement clos d'une puce capable d'être véhiculée dans le corps sans subir d'altération d'aucune sorte. Parvenue à destination, la puce reçoit de l'extérieur un signal électrique lui ordonnant d'ouvrir ses réservoirs et de distribuer le produit exactement à l'endroit prévu.

Dans cet esprit, un appareil actuellement développé par un consortium franco-suisse devrait prochainement voir le jour. Il s'agit d'une **pompe à insuline**



miniature qui sera implantée sous la peau et qui permettra au malade diabétique de se libérer de lourdes contraintes occasionnées par les pompes à insuline actuelles.

MIEUX RÉPARER

En plus de l'efficacité qu'elles peuvent apporter aux soins, les nanotechnologies sont ou seront capables de réduire ou de réparer certains handicaps. Ainsi, les problèmes de surdité peuvent être partiellement résolus par une prothèse issue des nanotechnologies et qui supplée en partie au sens



défaillant. Il s'agit en fait d'une **oreille artificielle** composée de deux éléments :

• un implant situé à l'intérieur de l'oreille relié à un récepteur implanté sous le cuir chevelu et une partie située à l'extérieur du corps composée d'un microphone, d'un processeur qui transforme les sons en impulsions électriques et d'un transmetteur qui envoie ces impulsions au récepteur implanté. Ces impulsions électriques sont véhiculées à travers l'oreille et viennent exciter les cellules sensorielles intactes de la cochlée (organe formé de milliers de cellules nerveuses tapissées de cils vibratiles dont le rôle est de transmettre l'information auditive au cerveau). On estime qu'il suffit de 15 à 30 % de cellules intactes pour parvenir à rétablir l'audition.

Quant aux problèmes de cécité, s'ils ne sont pas encore résolus, les nanotechnologies s'y intéressent de très près et de nombreuses recherches sont actuellement en cours. Parmi les possibilités étudiées, les plus approfondies sont l'implantation d'un écran vidéo dans l'œil, la stimulation artificielle du cortex visuel, la **rétine artificielle** en silicium



ou encore une caméra connectée au nerf optique ou directement au cerveau. Il s'agit d'autant de solutions qui semblent sortir d'un roman de science-fiction mais qui n'en sont pas moins sérieuses.

S'INSPIRER DU VIVANT

• Les nanotechnologies avancent, évoluent et se perfectionnent de jour en jour. Pourtant, les manipulations atomiques ou moléculaires se heurtent à un problème de taille : le temps. En effet, dans l'état actuel des recherches, il serait théoriquement envisageable, par exemple, de manipuler un à un des atomes afin de fabriquer une feuille de papier. Mais en admettant qu'il soit possible de manipuler et de placer un million d'atomes par seconde, la conception d'une feuille de papier demanderait quelque 13 milliards d'années. Pourtant, la nature a surmonté cet obstacle.

• En effet, le monde du vivant nous apprend qu'il maîtrise parfaitement la miniaturisation et la fabrication en grande série. Les êtres vivants sont constitués de véritables machines moléculaires (ADN, ARN, ribosomes, etc.) qui fonctionnent à l'échelle atomique et agencent de façon extrêmement précise les particules fondamentales. De plus, la nature a résolu le problème des délais atome par atome : une cellule peut se reproduire et copier sans faute l'ensemble du programme génétique en quelques minutes seulement. Mieux encore, elle a mis en place le mode de traitement le plus efficace et le plus rapide en utilisant le système de la croissance géométrique : une cellule se dédouble, les deux cellules ainsi créées se dédoublent à leur tour et ainsi de suite. Il s'agit

du phénomène de la **mitose**. Pour reprendre l'exemple précédent, si la feuille de papier était conçue de cette façon, c'est-à-dire si la nanomachine manipulant les atomes se dédoublait de la sorte, le temps de fabrication passerait de 13 milliards d'années à moins de deux minutes.

• S'inspirer de ces processus naturels afin de créer une machine de taille moléculaire capable de se dupliquer elle-même est l'un des points fondamentaux de la maîtrise de la nanotechnologie.

Mais afin de fabriquer autre chose que des copies d'elle-même, il est indispensable que cette machine soit également capable de fabriquer d'autres structures. L'un des enjeux principaux de la nanotechnologie est, aujourd'hui, de fabriquer la première version de cette nanomachine appelée assembleur.

Bien que les recherches en ce sens ne soient encore qu'à un stade embryonnaire, l'on peut d'ores et déjà imaginer les applications possibles une fois les premiers assembleurs nés :

- les coûts de fabrication d'objets seraient extrêmement réduits puisque cette fabrication ne nécessiterait que très peu d'énergie et de matière première ;
- les techniques de construction seraient bouleversées dès lors que des immeubles, des routes, des tunnels, etc., seront capables, pour ainsi dire, de se générer eux-mêmes ;
- il serait également possible de recréer de la nourriture à partir d'air et de déchets...

Une multitude d'autres applications, dès que l'on saura recréer technologiquement les mécanismes du vivant, seront possibles.

LE MONDE DE DEMAIN

• Les nanotechnologies en sont encore à leurs balbutiements. Cependant, les recherches s'affinent chaque jour, se diversifient, et il n'est pas une semaine sans que de nouvelles découvertes ne soient officialisées.

Les nanotechnologies forment un monde en mouvement dont l'évolution et la croissance sont perpétuelles. Si elles apparaissent encore aujourd'hui comme relevant de la science-fiction, les recherches sont des plus sérieuses et les spécialistes sont unanimes :

le monde de demain sera nanotechnologique.

• Elles inspirent pourtant une préoccupation sérieuse car les nanotechnologies peuvent également être à la source de nombreuses dérives. Ainsi, l'on peut redouter la généralisation de la « cyberfiliature » après implantation de puces électroniques sous la peau (une firme américaine a déjà déposé une demande d'autorisation allant dans ce sens) ainsi que le risque de soumission du vivant à l'électronique. Il n'en reste pas moins que cette révolution technologique est en marche, qu'elle fascine, provoque l'enthousiasme et suscite de nombreux espoirs, tant d'un point de vue médical qu'environnemental ou économique.

LA MITOSE LA DUPLICATION DES CELLULES

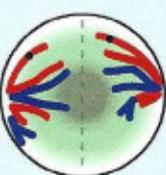
Prophase
En fin de prophase, l'enveloppe nucléaire disparaît.



Métaphase
Les chromosomes dupliqués s'alignent sur la « plaque équatoriale ».



Anaphase
Migration vers les pôles cellulaires.



Télophase
Constitution des deux cellules filles, un nouveau cycle commence.

