



À LA DÉCOUVERTE
DU NANOMONDE



ministère
éducation
nationale
enseignement
supérieur
recherche



ministère délégué
à l'enseignement supérieur
et à la recherche



LIBERTÉ • ÉGALITÉ • FRATERNITÉ
REPUBLIQUE FRANÇAISE

À LA DÉCOUVERTE
DU NANOMONDE





Un monde nouveau est en train de naître. Il nous promet des produits plus petits, plus légers, moins chers. Il nous propose des ordinateurs plus performants, des moyens de communication plus rapides, des traitements médicaux plus efficaces, un environnement plus propre, un cadre de vie plus agréable.

C'est le nanomonde : le monde des nanosciences et des nanotechnologies.

Il vise à élaborer de nouveaux matériaux et des composants toujours plus petits, à construire "atome par atome" de nouvelles molécules et à les assembler pour réaliser de nouvelles fonctions, et à exploiter des phénomènes nouveaux qui n'apparaissent qu'à l'échelle du nanomètre.

*Que sont les nanosciences ?
Comment fabrique-t-on les nanocomposants ?
En quoi les nanotechnologies vont-elles améliorer notre vie quotidienne ?*

Partons à la découverte de ce monde fascinant !

1 INTRODUCTION AU NANOMONDE

- p 2 Qu'est-ce que le nanomètre ?
- p 3 Comment fabriquer des nanocomposants ?

2 AUJOURD'HUI : L'ÈRE DES MICROTECHNOLOGIES

- p 4 Du transistor au circuit intégré
- p 8 L'accéléromètre
- p 10 L'optique adaptative
- p 12 L'imprimante à jet d'encre
- p 13 Le distributeur d'insuline
- p 14 Le laboratoire sur puce
- p 15 La biopuce à ADN
- p 16 Les problèmes de la miniaturisation

3 DEMAIN : LES MICRO- ET NANOTECHNOLOGIES

- p 18 Quels sont les outils actuels des nanotechnologies ?
- p 20 Comment fabriquer des objets nanométriques ?
- p 21 Les nanotubes de carbone
- p 23 Les nanocristaux fluorescents
- p 24 Les revêtements nanomodifiés
- p 24 La poussière électronique communicante
- p 27 Les implants et les prothèses biocompatibles

4 ET APRÈS ?

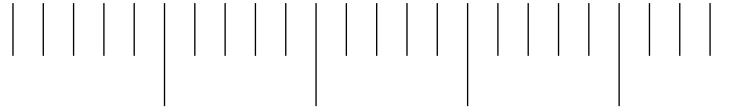
- p 26 Le transistor à un électron
- p 27 L'électronique de spin
- p 28 L'électronique moléculaire
- p 28 Les nanomatériaux
- p 29 Les capteurs chimiques et biologiques
- p 30 Les vecteurs de médicaments

5 CONCLUSION

1

INTRODUCTION

AU NANOMONDE



Monde du vivant



molécule



protéine



ADN



cellule

0,1 nm

1 nm

10 nm

100 nm

1 µm

Nanomonde

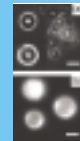
voie descendante



atome



agrégat d'atomes



laser à boîte quantique



nano-transistor

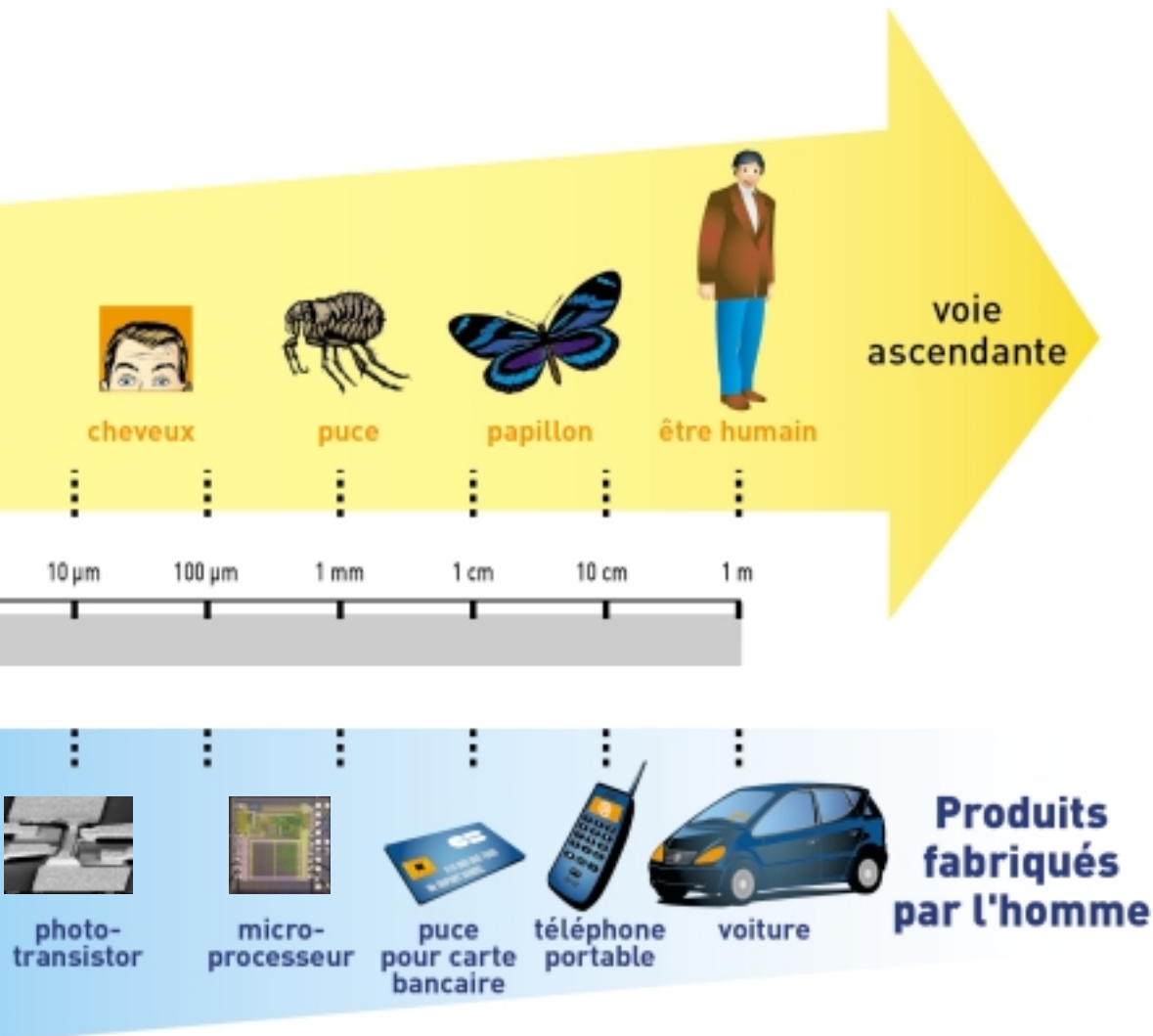
Les dimensions du monde du vivant et celles des produits fabriqués par l'homme nous donnent une bonne idée de l'échelle du nanomonde.

Qu'est-ce que le nanomètre ?

Le préfixe "nano" vient du grec et signifie très petit. Les scientifiques l'utilisent comme préfixe dans les unités de mesure pour exprimer le milliardième de l'unité de base : le nanomètre est le milliardième de mètre, soit 0,000 000 001 mètre. Il est d'usage de l'écrire en abrégé "nm".

Un nanomètre, c'est environ :

- 500 000 fois plus fin que l'épaisseur du trait de stylo à bille ;
- 30 000 fois plus fin que l'épaisseur d'un cheveu ;
- 100 fois plus petit que la molécule d'ADN ;
- 4 atomes de silicium mis l'un à côté de l'autre.



Comment fabriquer des **nanocomposants** ?

- en adoptant une voie descendante (en anglais "top-down") : on part d'un matériau, on le "découpe" et on le "sculpte" pour réduire le plus possible les dimensions de l'objet ou du composant que l'on veut fabriquer. C'est la voie qu'a suivie l'électronique depuis 30 ans, provoquant une révolution technologique dont l'ordinateur est le résultat le plus remarquable. L'effort de miniaturisation a d'abord conduit à des composants de dimensions micrométriques et est maintenant descendu en dessous des 100 nm.

- en adoptant une voie ascendante (en anglais "bottom-up") : on assemble la matière atome par atome pour construire des molécules que l'on intègre ensuite dans des systèmes plus grands. Cette voie est similaire à celle suivie par la nature : à partir des molécules d'ammoniac, de dioxyde de carbone, d'eau et de sels minéraux, elle a formé durant 4 milliards d'années d'évolution le monde du vivant si riche et si complexe d'aujourd'hui.

◀ **Le micromètre (ou micron)** représente le millionième de mètre, soit 0,000 001 mètre. Il s'écrit en abrégé " μm ".

Retraçons d'abord l'histoire récente de la micro-électronique, qui nous amènera au seuil des nanosciences.



2

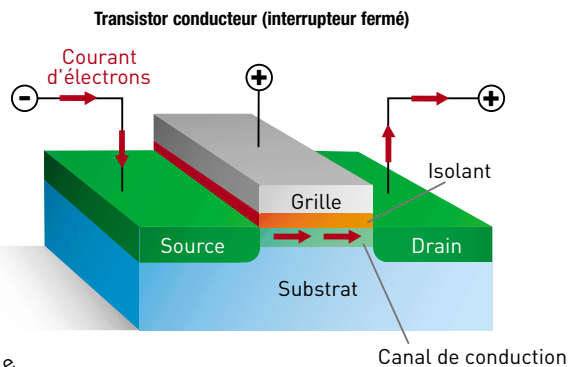
AUJOURD'HUI, L'ÈRE DES MICROTECHNOLOGIES

Le progrès fulgurant de l'électronique est dû à l'invention du transistor en 1948 par John Bardeen, Walter Brattain et William Shockley (laboratoires Bell, États-Unis), invention qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1956. En raison de son faible encombrement et de sa consommation réduite, le transistor a rapidement supplanté les volumineux tubes à vide (les lampes) et a ainsi ouvert la voie à la miniaturisation par l'approche descendante ("top-down").

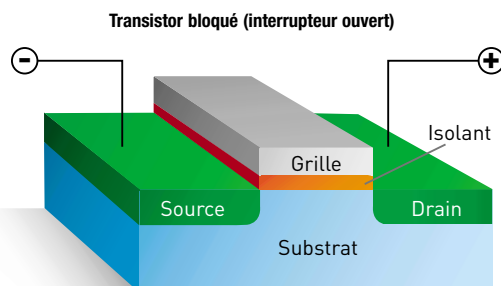
Du transistor au circuit intégré

Qu'est-ce qu'un transistor ?

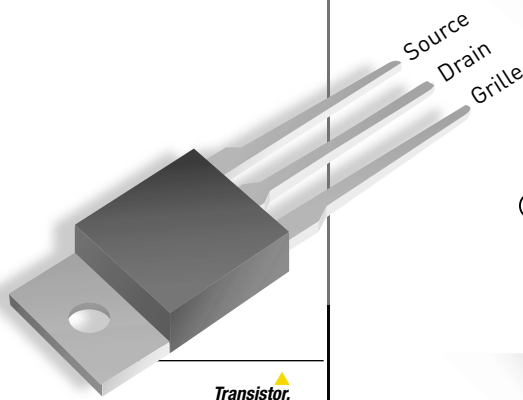
Le transistor est un dispositif électronique qui a trois électrodes appelées : source, drain et grille. Il agit comme un interrupteur : il laisse passer le courant électrique entre la source et le drain si l'on applique une tension électrique sur la grille. Si l'on supprime la tension sur la grille, le courant ne passe plus.



◀ **Fonctionnement du transistor**
Une tension appliquée sur la grille induit un canal de conduction sous l'isolant. Le courant d'électrons peut alors passer entre la source et le drain.



◀ Si l'on supprime la tension appliquée sur la grille, le canal de conduction disparaît et le courant est interrompu.



Qu'est-ce qu'un **circuit intégré** ?

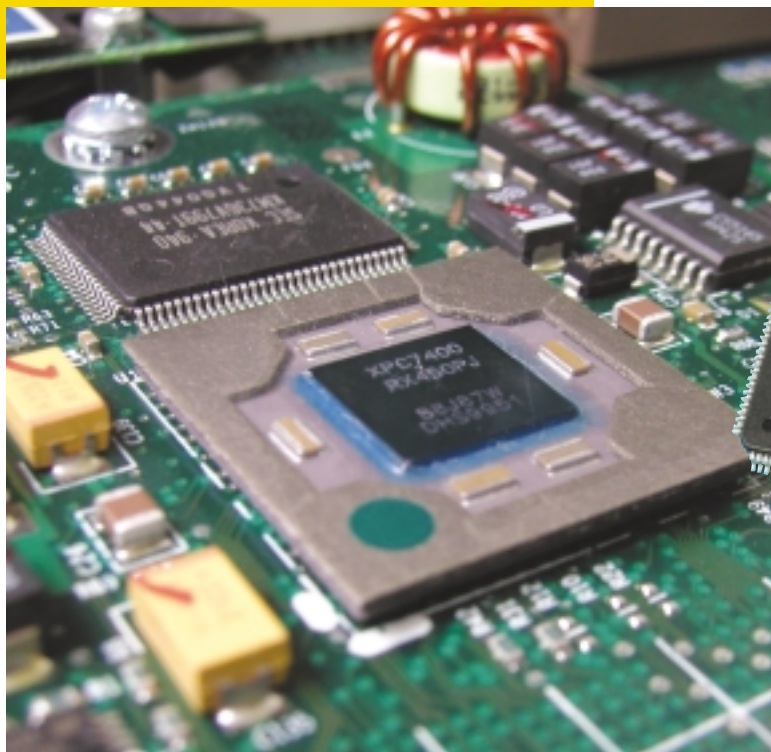
Une autre invention décisive a été le circuit intégré, réalisé en 1959 par Jack Kilby, (société Texas Instruments, prix Nobel de physique en 2000) et Robert Noyce (Fairchild Semiconductor).

Les premiers circuits électroniques consistaient en un assemblage de divers composants (transistors, résistances, condensateurs) reliés par des fils électriques.

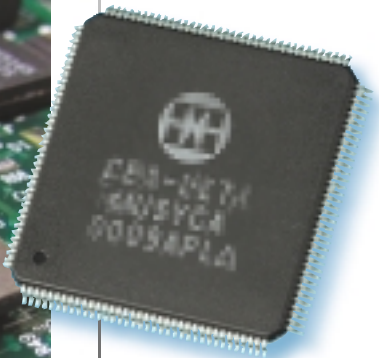
Dans le circuit intégré, les composants sont dès leur fabrication interconnectés sur un support commun en silicium, appelé puce. Il est ainsi plus petit, moins cher, contient plus de composants et peut réaliser plus de fonctions que "ses ancêtres".

Les circuits intégrés ont envahi les appareils de notre vie quotidienne, du lecteur de DVD à la carte bancaire en passant par la télévision, le téléphone, l'appareil photo numérique, l'ordinateur, la machine à laver, le four à micro-ondes et l'automobile.

Un des circuits intégrés les plus récents est le microprocesseur. Il est constitué de millions de transistors et réalise des opérations mathématiques très complexes avec une rapidité fulgurante. Il est devenu le cœur de tout ordinateur.



1 cm



◀ **Circuits intégrés.**

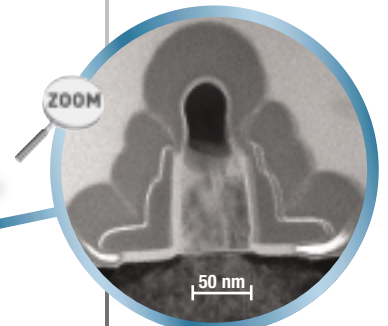
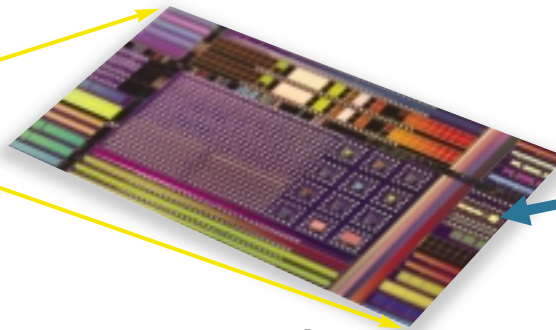
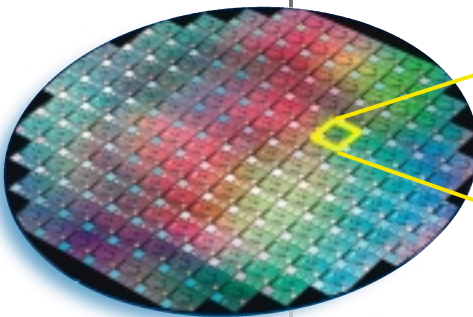
Comment fabrique-t-on un **circuit intégré** ?

Fabriquer un circuit intégré est un processus complexe qui implique des centaines d'opérations, une grande précision et de nombreux tests.

Le matériau de base du circuit intégré est le silicium, élément chimique le plus courant sur la Terre, que l'on trouve en abondance dans le sable. Extrait du sable par purification, le silicium est cristallisé sous la forme de barreaux de 20 à 30 centimètres de diamètre que l'on va ensuite découper en tranches de moins d'un millimètre d'épaisseur. C'est sur cette tranche que l'on fabriquera en même temps des centaines de puces,

grâce à la technique de la photolithographie, qui, à certains égards, est analogue au procédé de développement des clichés photographiques.

Les unités de fabrication de circuits intégrés sont appelées "salles blanches" car elles doivent présenter des conditions extrêmes de propreté. En effet, le moindre grain de poussière pourrait compromettre le bon fonctionnement du circuit.



© Artechhouse-Grenoble

Tranche de silicium de 300 mm de diamètre.

Puce

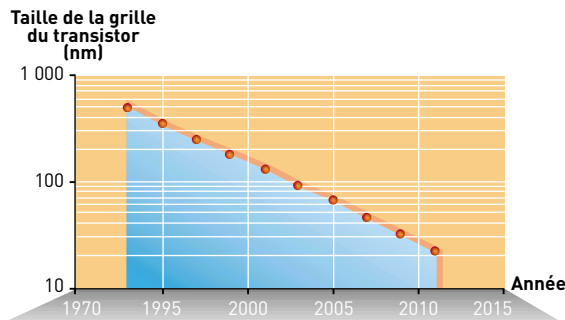
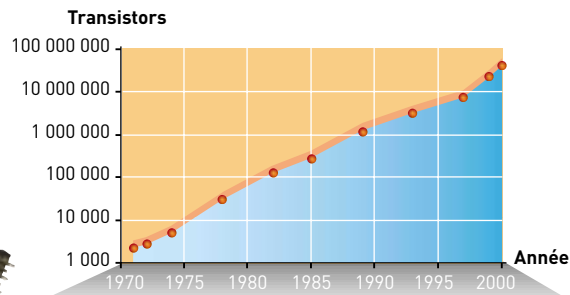
Transistor

Depuis 30 ans, la fabrication des composants micro-électroniques est de plus en plus performante : tous les 18 mois, le nombre des transistors sur la surface d'une puce double et les dimensions des grilles de transistors diminuent par un facteur 1,3. Cette tendance est connue sous le nom de loi de Moore, du nom de son auteur,

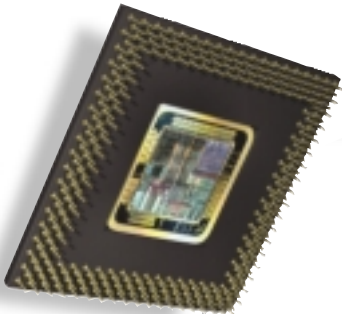
Gordon Moore, co-fondateur de la société Intel (USA). Ainsi, aujourd'hui, on fabrique des microprocesseurs de 1 cm² de surface et contenant 50 millions de transistors ; la surface moyenne d'un transistor est actuellement de 1 micromètre carré et la finesse des motifs réalisés par photolithographie atteint 100 nm.



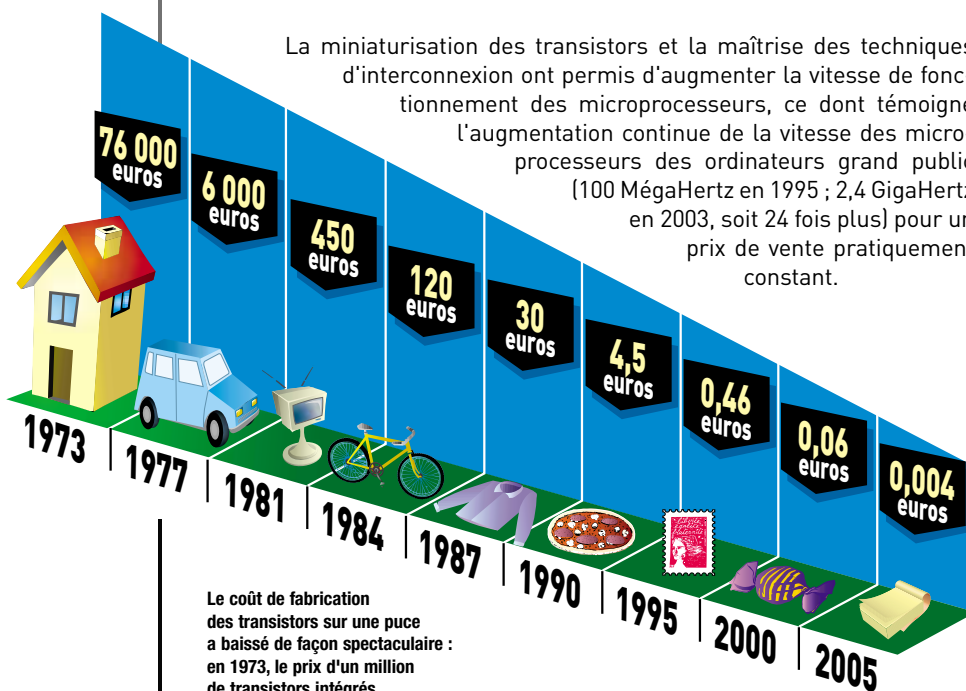
▲ **Salle blanche de la société STMicroelectronics (Crolles, Isère) où sont fabriqués des circuits intégrés.**



◀ **La loi de Moore :**
tous les 18 mois, le nombre des transistors sur la surface des puces électroniques double et la taille de leur grille diminue par un facteur 1,3.



La miniaturisation des transistors et la maîtrise des techniques d'interconnexion ont permis d'augmenter la vitesse de fonctionnement des microprocesseurs, ce dont témoigne l'augmentation continue de la vitesse des microprocesseurs des ordinateurs grand public (100 MégaHertz en 1995 ; 2,4 GigaHertz en 2003, soit 24 fois plus) pour un prix de vente pratiquement constant.



Le coût de fabrication des transistors sur une puce a baissé de façon spectaculaire : en 1973, le prix d'un million de transistors intégrés équivalait à celui d'une maison ; en 2005, il sera celui d'un post-it.

◀ **Evolution du coût de fabrication d'un million de transistors en 30 ans.**

L'accéléromètre

Les technologies développées dans l'industrie micro-électronique ont été transposées avec succès pour fabriquer des microsystèmes électromécaniques, c'est-à-dire des systèmes miniaturisés qui intègrent sur une même puce des parties mécaniques (capteurs d'accélération ou de pression, miroirs, micromoteurs) et des circuits électroniques associés.

Ils trouvent des champs d'application dans des domaines chaque jour plus variés et plus nombreux comme la sécurité routière, la navigation aérienne, l'observation astronomique, l'impression, la prévention médicale et les soins médicaux.

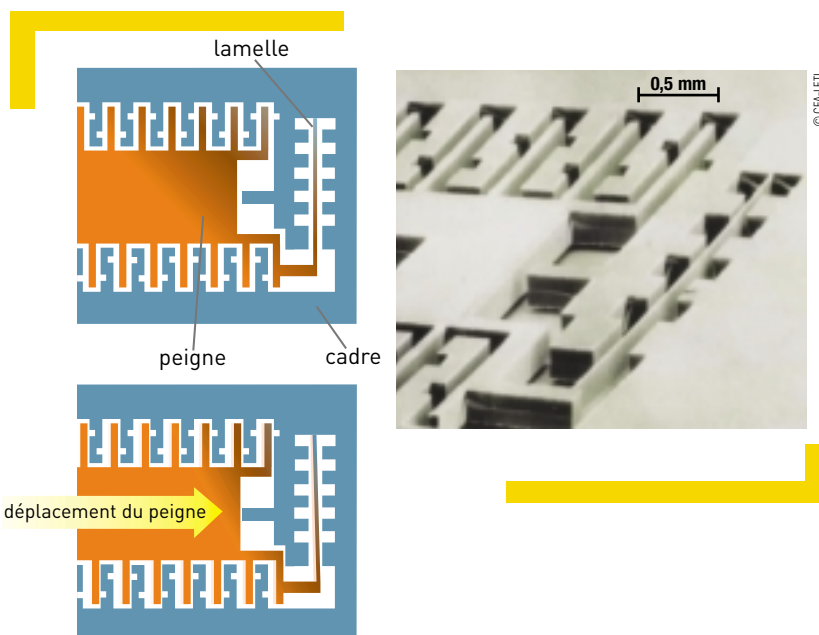
En voici quelques exemples.

Un des premiers microsystèmes à avoir été développé est l'accéléromètre. Il est entre autres utilisé pour déclencher le gonflage des airbags des véhicules en cas de choc brutal.

L'accéléromètre est constitué de deux pièces de silicium en forme de peignes complémentaires : l'une est fixe et constitue le cadre ; l'autre est mobile à l'intérieur de ce cadre, suspendue par une lamelle flexible, sans contact entre les deux parties. En cas de choc brutal du véhicule, la partie mobile

se déplace par inertie dans le sens opposé au mouvement, comme le passager d'un bus qui est debout et se trouve projeté en avant quand le bus freine. Ce changement de distance entre le peigne et le cadre modifie la capacité électrique de l'ensemble.

Dès que le circuit intégré mesure ce changement de capacité électrique, il commande le gonflage de l'airbag, avant même que le conducteur et les passagers du véhicule ne soient projetés en avant.



◀ À gauche, fonctionnement de l'accéléromètre : le peigne se déplace par inertie quand l'ensemble accélère ou décélère.

◀ À droite, image au microscope optique de l'accéléromètre.



◀ Déclenchement d'airbag.

L'accéléromètre a d'autres applications. Il est utilisé dans les systèmes de navigation pour calculer et contrôler les trajectoires des avions, missiles et automobiles, car toute modification de direction se traduit par un changement d'accélération.

Dans le domaine médical, il est désormais intégré dans les pacemakers, qui servent à stimuler le cœur défaillant des patients par des impulsions électriques. L'accéléromètre détecte tout changement de rythme d'activité physique. Ainsi, quand le patient commence à courir, le pacemaker modifie les impulsions électriques

envoyées au cœur pour les adapter à l'intensité de l'effort physique.

Des chercheurs réfléchissent actuellement à l'intégration de l'accéléromètre dans les stylos : afin de sécuriser les signatures : seront enregistrés non seulement le tracé réalisé par l'auteur de la signature mais aussi les vitesses et les accélérations de sa main en train de signer. Si une personne mal intentionnée reproduit le tracé d'une signature qui n'est pas la sienne, elle ne saura pas la tracer aux mêmes vitesses et avec les mêmes accélérations que son véritable auteur.



◀ **Le pacemaker** a aujourd'hui intégré un accéléromètre.

Taille d'un accéléromètre. ▶



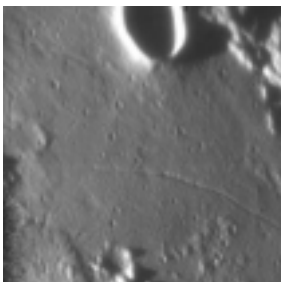
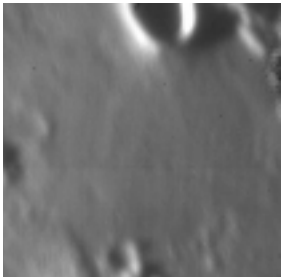
© TRONCS Microsystems

L'optique adaptative

Les microsystèmes ont également de nombreuses applications en optique.

Image des cratères de la lune prises à l'European Southern Observatory (Chili) avec le Very Large Telescope :
En haut,
la photographie sans correction ;

En bas,
la photographie, corrigée par
la technique de l'optique adaptative.

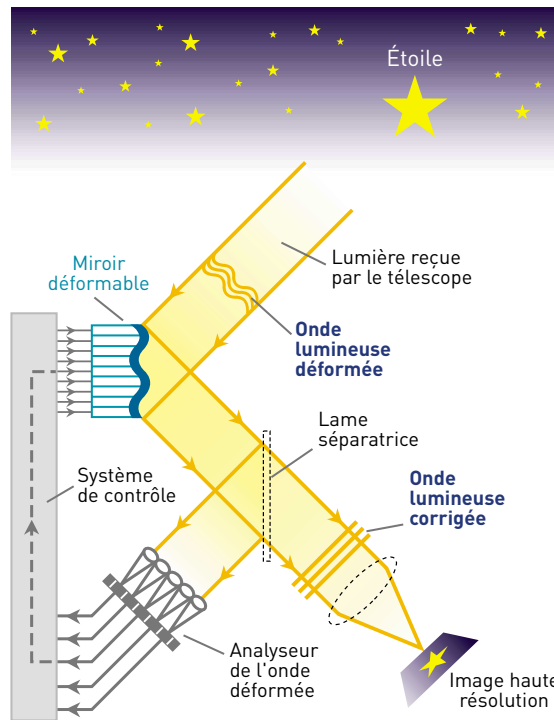


Quand on observe une étoile dans un télescope, la lumière émise par l'étoile traverse la couche de l'atmosphère terrestre et est perturbée par les variations locales de densité et de température de l'air. Il s'ensuit que l'image obtenue est floue.

Pour obtenir une image de bonne résolution, une solution serait de placer le télescope sur orbite autour de la Terre afin d'éviter l'at-

mosphère, comme l'ont fait les programmes américains de télescope spatial Hubble et Chandra, mais cette solution est très coûteuse.

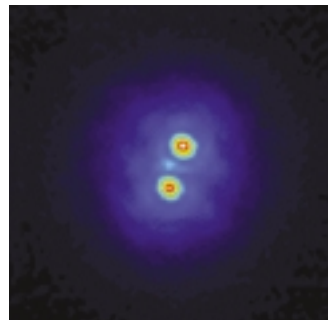
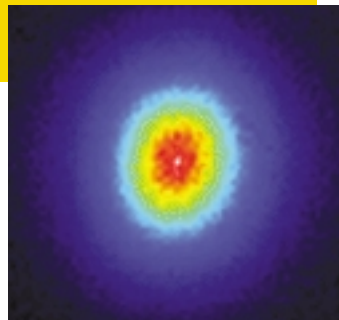
Une autre solution, moins onéreuse, consiste à corriger à terre, par l'optique adaptative, l'image reçue : les perturbations que la lumière a subies dans l'atmosphère peuvent être compensées en réfléchissant la lumière sur un miroir déformable.



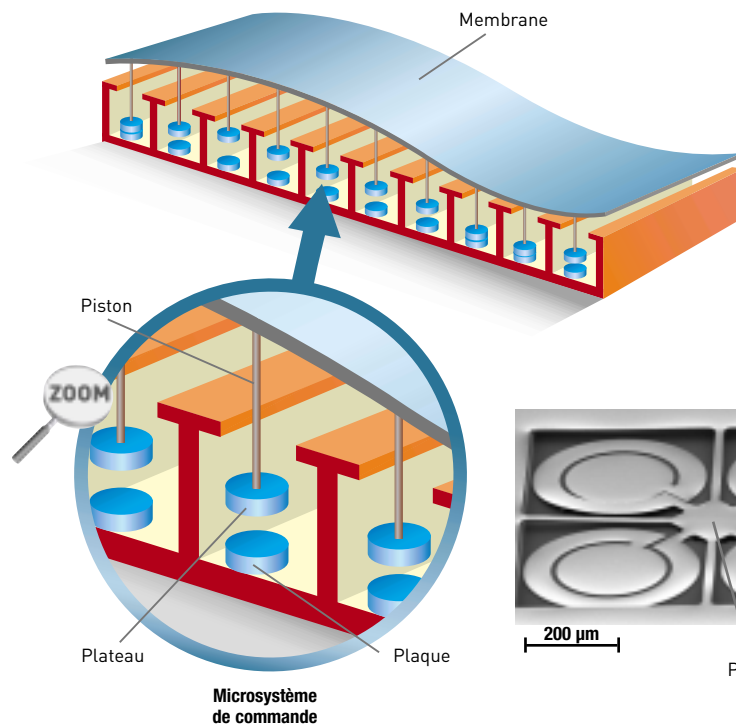
◀ **Le principe de l'optique adaptative :**
l'onde lumineuse arrive sur le miroir déformable et est envoyée vers l'analyseur. Ce dernier analyse les perturbations que l'onde a subies en traversant l'atmosphère. Les données sont traitées par le système de contrôle qui commande ensuite la déformation du miroir afin de minimiser les effets des perturbations atmosphériques.

Image d'une étoile double ▶
À gauche,
prise avec un télescope
sans correction ;

À droite,
avec un télescope
pourvu d'un système
d'optique adaptative.



Ce miroir est réalisé à partir d'une membrane flexible, fixée sur des pistons dont on ajuste la hauteur en y appliquant des tensions électriques.



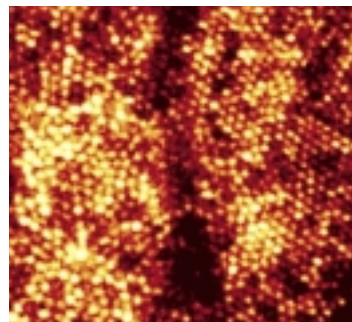
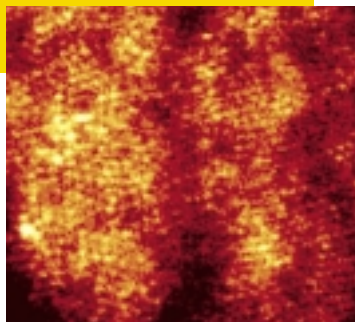
◀ **Le miroir déformable.**
 Quand on applique une tension électrique entre le plateau et la plaque d'une cellule, la répulsion électrostatique les écarte. Le piston, fixé sur le plateau mobile, est entraîné et déforme plus ou moins le miroir selon la tension appliquée.



◀ **La réalisation du microsystème de commande du miroir** utilise les technologies de la micro-électronique.

Image de la rétine de l'œil :
 À gauche, sans correction ;
 À droite, corrigée par l'optique adaptative.

© A. Fiorina and D. Williams (University of Rochester)



On réfléchit aujourd'hui à l'application de l'optique adaptative aux examens ophtalmologiques. En effet, l'image de la rétine obtenue avec les instruments traditionnels est floue car l'humeur aqueuse de l'œil humain n'est pas homogène. Dans le futur, les appareils d'examen ophtalmologique permettront, grâce à l'optique adaptative, d'obtenir une image des cellules de la rétine de meilleure résolution et de détecter plus tôt certaines maladies rétinienne comme la dégénérescence maculaire.

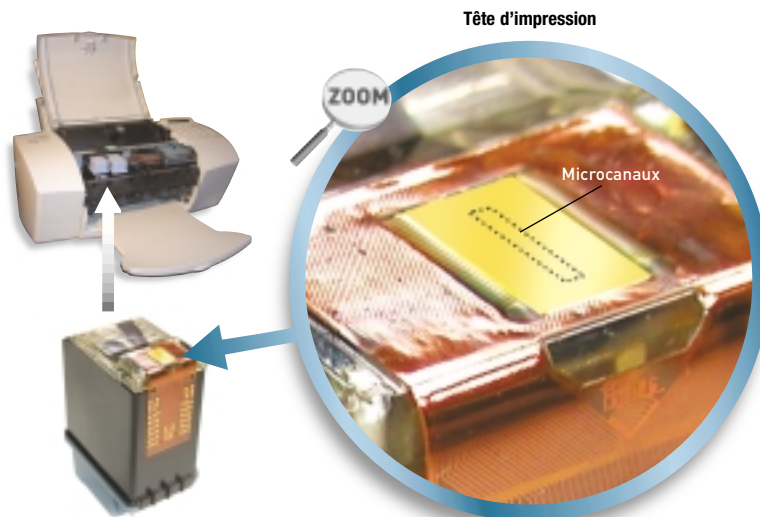
L'imprimante à jet d'encre

Les technologies de la micro-électronique sont aussi utilisées pour la microfluidique, c'est-à-dire pour le transport de petits volumes de liquide.

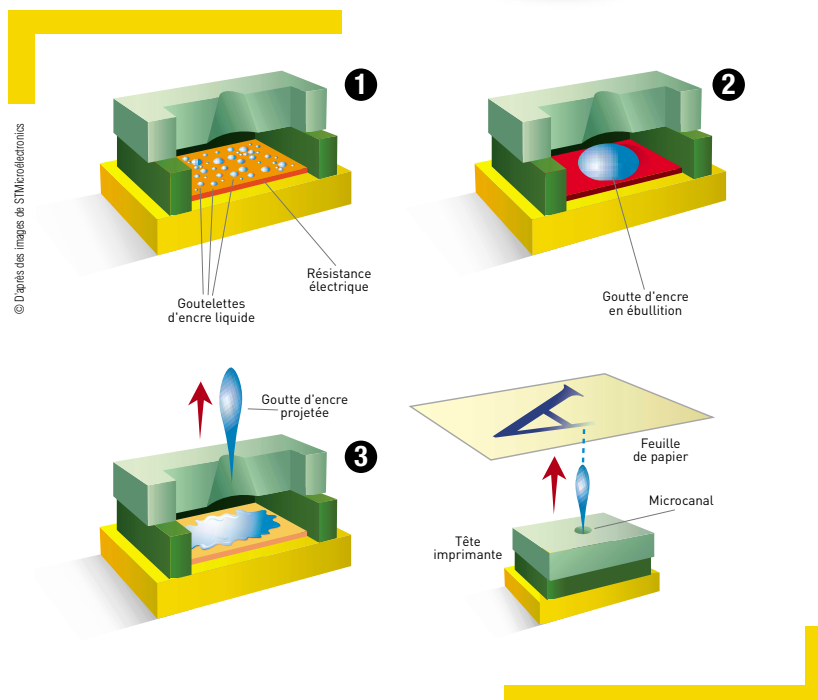
De nombreuses applications ont vu le jour ou sont en cours de développement, notamment dans les domaines de l'impression (imprimante à jet d'encre), des soins médicaux (distributeur d'insuline) et de l'analyse biomédicale (biopuce à ADN, laboratoire sur puce).

La cartouche de l'imprimante à jet d'encre a une tête qui contient plusieurs centaines de microréservoirs qui sont alimentés en encre au fur et à mesure de l'impression. Ils sont tous pourvus d'une petite résistance électrique qui chauffe très rapidement l'encre et en vaporise une partie. Sous la pression

alors créée, l'encre restée liquide est expulsée dans des microcanaux et projetée sur la feuille à imprimer sous forme de gouttelettes. Ce processus est répété des milliers de fois par seconde. La tête poursuit le balayage horizontal ligne par ligne jusqu'au bas de la feuille à imprimer.



◀ L'imprimante à jet d'encre.



- ◀ **Processus d'impression :**
- 1) Le microréservoir contient de l'encre à l'état liquide.
 - 2) La résistance chauffe l'encre liquide jusqu'à ébullition.
 - 3) Sous l'action de la pression, l'encre est projetée vers la feuille à imprimer.

Le distributeur d'insuline

Jusqu'à présent, les patients diabétiques utilisaient une seringue pour s'injecter, en une fois, la quantité d'insuline nécessaire. La seringue commence à être remplacée par un distributeur qui, fixé sur la peau comme un patch, délivre continûment l'insuline tout au long de la journée.

Ce distributeur contient un micro-système électromécanique constitué d'un microréservoir d'insuline à deux soupapes (l'une pour l'admission et l'autre pour l'évacuation) et d'une membrane déformable. Quand on applique une tension électrique sur ce micro-système, la membrane se déforme et comprime l'insuline, ce qui provoque l'ouverture de la soupape d'évacuation, la fermeture de celle d'admission et l'expulsion du liquide hors du microréservoir. Quand ensuite on supprime la tension électrique, la membrane reprend sa forme initiale et la dépression créée dans la

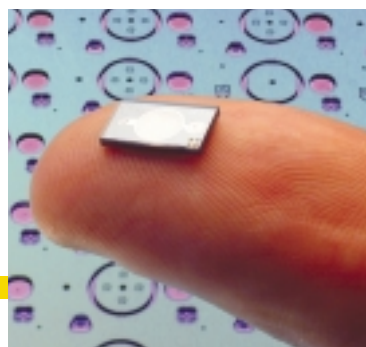
pompe provoque la fermeture de la soupape d'évacuation et l'ouverture de celle d'admission. Le microréservoir se remplit alors de nouveau. À chaque cycle, le micro-système délivre un petit volume de 150 nanolitres et permet ainsi de doser très précisément la quantité d'insuline à injecter au patient.



© Dabibtech SA, Lausanne, Suisse

▲ **La distributeur d'insuline s'applique en permanence sur le corps du patient comme un patch.**

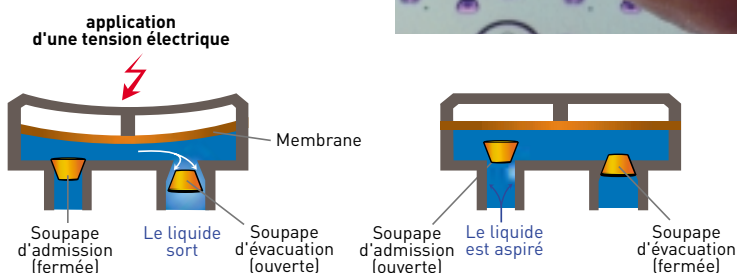
◀ **Microsystème du distributeur d'insuline.**



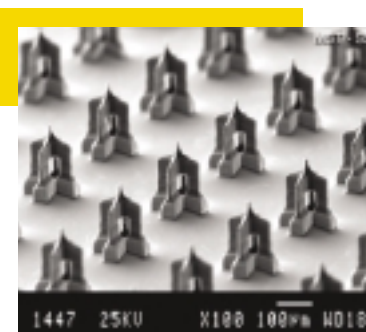
© Dabibtech SA, Lausanne, Suisse

À gauche, ►
phase d'évacuation d'insuline dans le microréservoir du distributeur ;

À droite,
phase d'admission.



Actuellement, le distributeur injecte l'insuline par aiguille ; bientôt il le fera par une matrice de micro-aiguilles très fines, dont la profondeur de pénétration sera très faible, de l'ordre de 100 micromètres, et qui seront presque insensibles pour le patient.



© Dabibtech SA, Lausanne, Suisse

◀ **Matrice de micro-aiguilles.**

100 µm

Le laboratoire sur puce ("lab-on-chip")

La microfluidique est aussi appliquée à l'analyse biomédicale : elle permet de réduire le volume des prélèvements sur le patient, la consommation de réactifs, ainsi que le temps et le coût des analyses.

Pour effectuer l'analyse du sang d'une personne selon les méthodes traditionnelles, il faut procéder à de nombreuses analyses différentes et prélever sur le patient un ou deux flacons de sang. L'idée du laboratoire sur puce est de "rétrécir" le laboratoire d'analyse médicale à une puce de quelques cm² et de n'utiliser qu'une goutte de sang

pour effectuer ces analyses.

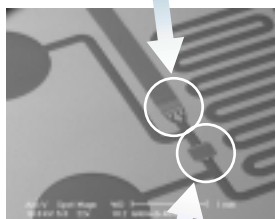
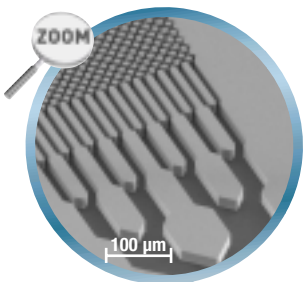
Le laboratoire sur puce sera utilisé aussi bien à domicile qu'à l'hôpital ou dans un laboratoire traditionnel d'analyses médicales.

À l'heure actuelle cette technologie n'a pas remplacé le laboratoire d'analyses médicales, mais sa faisabilité a été démontrée.

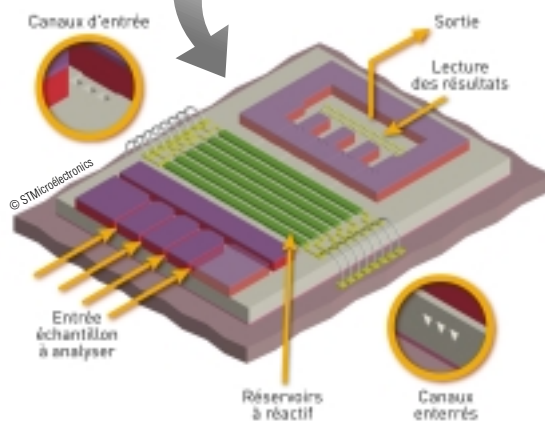


◀ **Laboratoire d'analyses médicales.**

Réseau de microcanaux d'un laboratoire sur puce.



© CEVA-LET



◀ **Laboratoire sur puce.**

Le laboratoire sur puce est une plaque de verre ou de silicium sur laquelle sont gravés des microcanaux et des microréservoirs dans lesquels circulent le sang à analyser et les réactifs. On dépose à l'entrée de la puce une goutte du prélèvement à analyser. Des dispositifs électriques créent une pres-

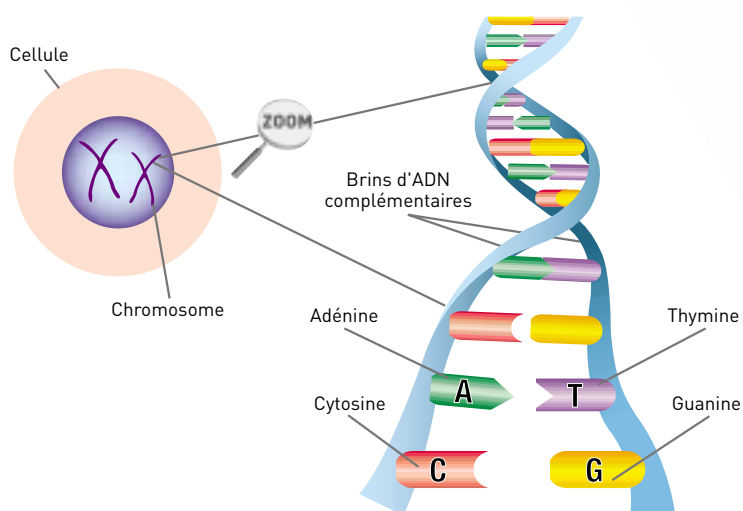
sion qui la pousse à travers les microcanaux jusqu'à un microréservoir où elle se mélange aux réactifs. Toutes les opérations complexes mises en œuvre dans le laboratoire d'analyse médicale (transport, mélange et chauffage des liquides, lecture des résultats) sont ainsi miniaturisées.

La biopuce à ADN

À la base de tout être vivant se trouve la molécule d'ADN : c'est grâce à elle que les cellules se multiplient, que les organismes se développent et que les caractères génétiques des parents se transmettent aux enfants.

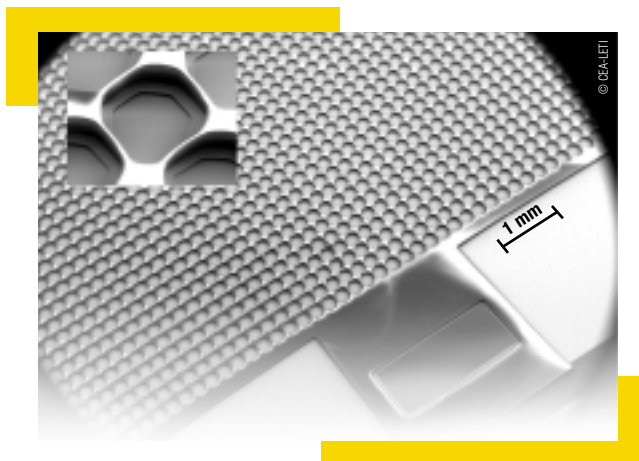
La molécule d'ADN est formée de deux brins enroulés en forme d'hélice. Sur chacun des deux brins se succèdent des bases qui les lient entre eux ; ces bases sont de quatre types, complémentaires deux à deux : l'adénine (A) ne se lie

qu'avec la thymine (T), la cytosine (C) qu'avec la guanine (G). Ainsi, si un fragment de brin contient la séquence CTAAAGG, la séquence complémentaire sur l'autre brin est GATTTCC.



La biopuce à ADN a permis d'accélérer l'identification des quelque 30 000 gènes que contient le code génétique humain. En effet, un des grands enjeux de la génétique est d'analyser la succession des bases sur la molécule d'ADN et de repérer les séquences ayant subi une

mutation génétique qui pourrait prédisposer tel ou tel individu à certaines maladies ; on pourrait alors appliquer un traitement médical préventif adapté à chaque cas, avant même l'apparition des symptômes.



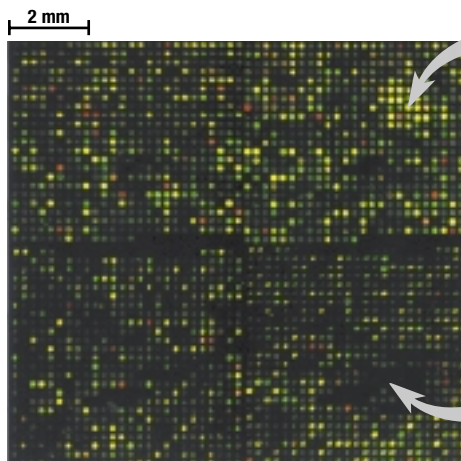
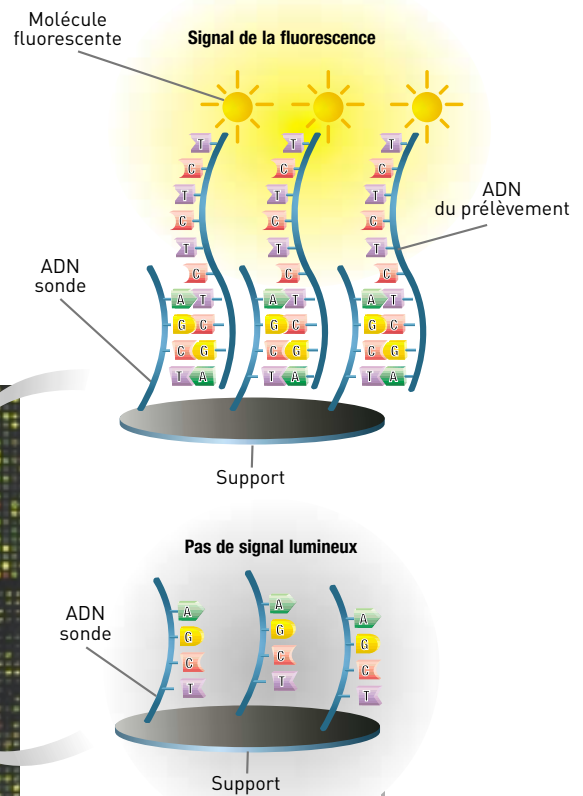
◀ **Structure de la molécule d'ADN.** Chaque brin de la molécule d'ADN de l'être humain contient environ trois milliards de bases. L'identité de chaque individu, ses caractères génétiques, sa prédisposition à certaines maladies, sont déterminés par l'ordre dans lequel ces trois milliards de bases se succèdent : cet enchaînement forme le code génétique, unique à chaque individu.

◀ **Biopuce à ADN.**



La biopuce à ADN est une plaque de verre ou de silicium sur laquelle sont gravées un grand nombre de microcuvettes. Sur chacune d'entre elles, on accroche une séquence de bases d'ADN qui joue le rôle de sonde et qui est caractéristique d'un gène, d'une mutation ou d'une maladie. On prélève alors de l'ADN sur le patient et on le verse dans les microcuvettes. L'ADN-sonde se liera avec l'ADN du prélèvement si et seulement si les séquences sont complémentaires. On lave ensuite la biopuce. Pour permettre la lecture du résultat, on a préalablement accroché à l'extrémité de l'ADN du prélèvement une molécule fluorescente. Ainsi, dans les microcuvettes où il y a eu appariement,

l'ADN du prélèvement est resté accroché à l'ADN-sonde et est visible à la lumière ultraviolette grâce à la molécule fluorescente. Dans les microcuvettes où il n'y a pas eu d'appariement, l'ADN du prélèvement a été enlevé par le lavage et il n'y a pas de signal lumineux.



Analyse d'un prélèvement d'ADN.

Lecture de l'analyse à la lumière ultraviolette : les microcuvettes porteuses des brins appariés sont lumineuses et l'image ressemble à un grand domino.

Comme chaque microcuvette contient un fragment d'ADN-sonde différent, une biopuce contenant $50 \times 50 = 2\,500$ microcuvettes permet en une seule lecture d'obtenir le résultat de 2 500 analyses différentes.

Les problèmes de la **miniaturisation**

Selon la loi de Moore, exposée plus haut (voir page 7), tous les 18 mois les dimensions des transistors sont divisées par un facteur 1,3. Cette tendance a jusqu'à présent été constante, mais les problèmes techniques de la miniaturisation deviennent de plus en plus difficiles à résoudre et pourraient être insurmontables à l'horizon 2010. Les problèmes ne sont d'ailleurs pas seulement techniques mais aussi économiques.

Certes, avec la production de masse, le coût de fabrication du transistor diminue, mais en même temps, les investissements considérables nécessaires à la mise en place de procédés de fabrication de plus en plus sophistiqués risquent de devenir prohibitifs. Un changement de technologie est nécessaire pour surmonter ces problèmes. C'est ce que les nanotechnologies peuvent nous permettre de réaliser.

◀ Le coût de l'investissement de l'usine Crolles 2 (Isère) est de 2,5 milliards d'euros.

Les microsystèmes présentés ci-dessus ont été réalisés avec les techniques de la micro-électronique développées pour miniaturiser le transistor.

3

DEMAIN : LES MICRO- ET NANOTECHNOLOGIES

Les nanosystèmes cohabitent désormais, et probablement pour longtemps, avec les microsystèmes.

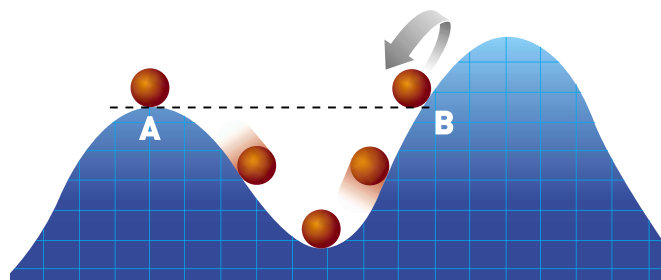
Certains microcomposants et microsystèmes voient progressivement leurs dimensions diminuer et se rapprocher de l'échelle du nanomètre suivant la voie descendante ("top-down"), devenant ainsi des nanocomposants et des nanosystèmes.

En même temps, les scientifiques réfléchissent à la mise au point de nouvelles méthodes d'assemblage atome par atome, molécule par molécule, qui ouvrent la voie à la démarche ascendante ("bottom-up") : ces méthodes, inspirées du monde de la chimie et de la biologie, consistent à construire des nanosystèmes à partir des éléments de base que sont les atomes, de la même façon que l'on construit une maison brique par brique.

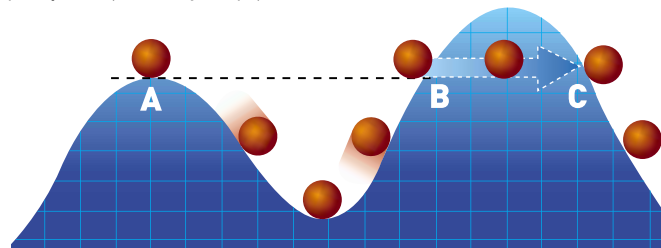
De nombreux défis scientifiques et technologiques nous attendent : il faut inventer les instruments d'observation et de fabrication adap-

tés, mais aussi comprendre comment fonctionnent des systèmes aussi petits. En effet, les lois de la physique classique ne permettent plus d'expliquer leur comportement et l'on devra faire appel aux lois de la mécanique quantique.

La mécanique quantique prédit des comportements inhabituels et difficiles à accepter par notre intuition immédiate comme, par exemple, l'effet tunnel. D'après les lois de la mécanique classique, un ballon de football ne peut pas passer par-dessus une colline si on ne lui donne pas une énergie initiale suffisante : le ballon montera jusqu'à une certaine hauteur puis redescendra en rebroussant chemin. La mécanique quantique, en revanche, permet de montrer qu'un électron peut franchir la colline même si son énergie initiale est insuffisante : il peut passer de l'autre côté de la colline comme s'il avait trouvé un tunnel.



En physique classique,
le ballon lâché depuis le point A ne peut pas monter plus haut que le point B (lois de la dynamique).



En physique quantique,
l'électron, arrivé au point B, peut par effet tunnel atteindre le point C situé de l'autre côté de la colline.

L'effet tunnel. ►

La mécanique quantique est le fruit des travaux de quelques physiciens célèbres du début du XX^e siècle. Pour expliquer l'interaction entre la lumière et les atomes, Max Planck introduit en 1900 une hypothèse audacieuse : la quantité d'énergie échangée ne peut être qu'un multiple d'une quantité élémentaire : le quantum d'énergie. En 1905, pour expliquer l'effet photo-électrique, Albert Einstein établit que la lumière est composée de particules élémentaires appelées photons. En 1913, Niels Bohr applique l'idée des quanta d'énergie pour expliquer la structure de l'atome. En 1923, Louis de Broglie émet l'hypothèse que les électrons et toutes les autres particules se comportent comme des ondes. Enfin, en 1926, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger et Paul-Adrien-Maurice Dirac établissent les bases mathématiques de la mécanique quantique, permettant ainsi la compréhension de tous ces phénomènes.

HISTORIQUE

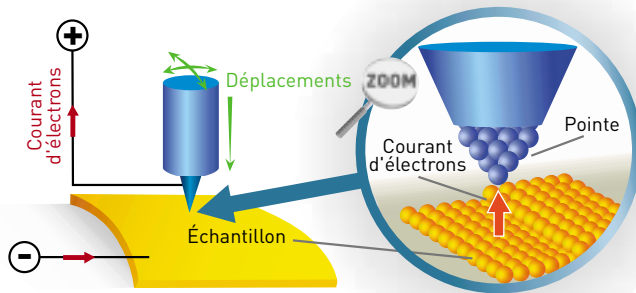
Quels sont les outils actuels des nanotechnologies ?

Le microscope à effet tunnel

Ce fut le premier instrument mis au point pour examiner le nanomonde. Il a été inventé par Gerd Binnig et Heinrich Rohrer (laboratoire IBM Zurich, Suisse), invention qui leur a valu le prix Nobel de physique en 1986. Il comporte une pointe métallique extrêmement fine qui survole la surface du matériau examiné à quelques nanomètres de distance. En même

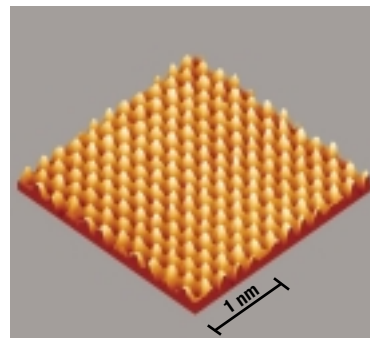
temps, on applique entre la pointe et la surface une tension électrique, ce qui crée un courant d'électrons appelé courant "tunnel". Après avoir balayé toute la surface du matériau et enregistré les variations de ce courant, on reconstitue par ordinateur le relief de la surface survolée avec une précision de l'ordre de l'atome, c'est-à-dire 0,1 nm.

Le microscope à effet tunnel.



Cet instrument révolutionnaire, initialement conçu pour observer la surface des matériaux, est maintenant aussi utilisé pour déplacer des atomes un par un, comme une "pince à atomes".

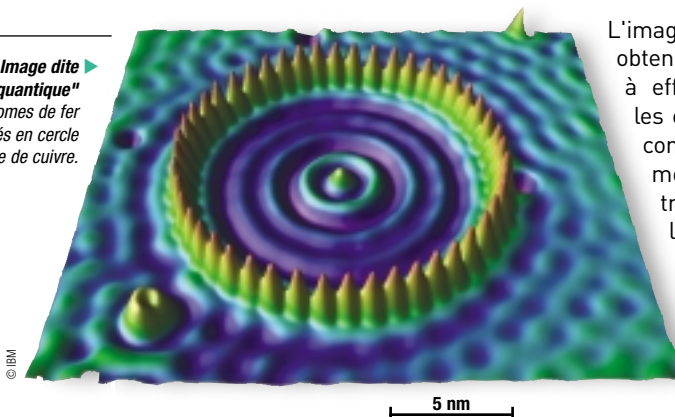
À l'aide de la pointe, on peut "attraper" un atome, le déplacer sur la surface et le déposer à l'endroit voulu. On est ainsi parvenu à disposer des atomes de fer en cercle sur une surface de cuivre, prouesse technologique remarquable.



© Lee, Park STM, Purdue University, USA

Image obtenue d'une surface de graphite.

Image dite du "corral quantique" 48 atomes de fer ont été disposés en cercle sur une surface de cuivre.

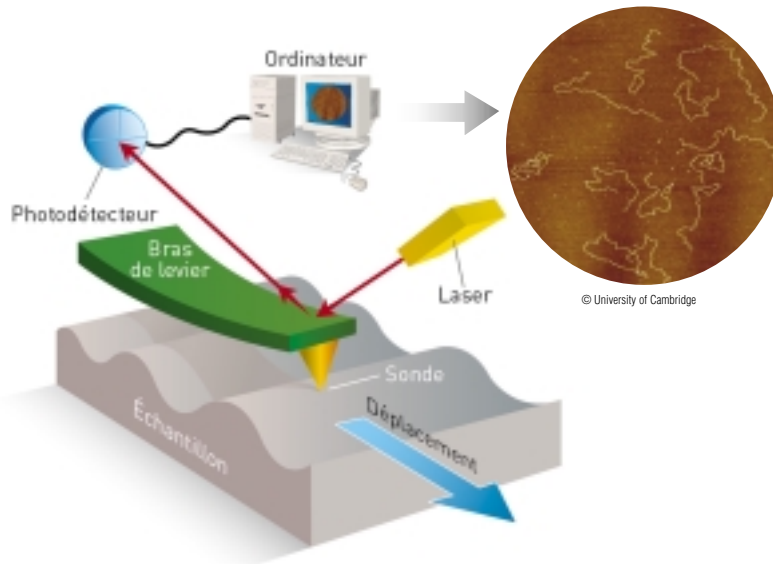


L'image du "corral quantique", obtenue grâce au microscope à effet tunnel, montre que les électrons se comportent comme des ondes : ils forment un nuage concentrique qui ondule comme la surface de l'eau dans laquelle on a jeté un caillou. C'est une des plus remarquables visualisations directes des lois de la mécanique quantique.

Le microscope à **force atomique**

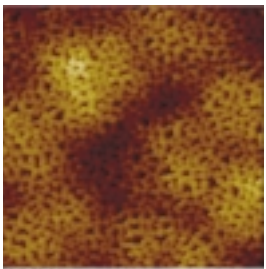
Alors que le microscope à effet tunnel permet d'observer la surface des matériaux conducteurs, le microscope à force atomique permet d'observer la surface des matériaux isolants tels que les polymères, les céramiques et les matériaux biologiques. Sa pointe, fixée sur un bras de levier flexible, balaye et frotte la surface du

matériau à observer en suivant le relief. La déformation du levier, qui est éclairé avec un laser, est mesurée par un photodétecteur et enregistrée à l'ordinateur. Cet instrument est très utilisé dans les industries où le contrôle fin de l'état de surface est primordial, comme par exemple celles de la micro-électronique.



▶ **Microscope à force atomique.**

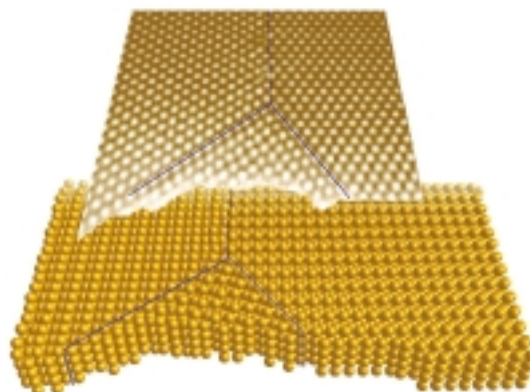
◀ **Image d'ADN** obtenue au microscope à force atomique.



▲ **Image d'une membrane** avec des pores de 20 nm de diamètre.

La modélisation et la simulation **numérique**

Pour déterminer la structure et les propriétés des objets nanométriques, on utilise de plus en plus la simulation numérique. En raison de la complexité des calculs et pour être plus fiable et plus précis, la simulation numérique nécessite des ordinateurs de plus en plus puissants.



◀ **En haut,** image d'un film d'or obtenue au microscope électronique ;

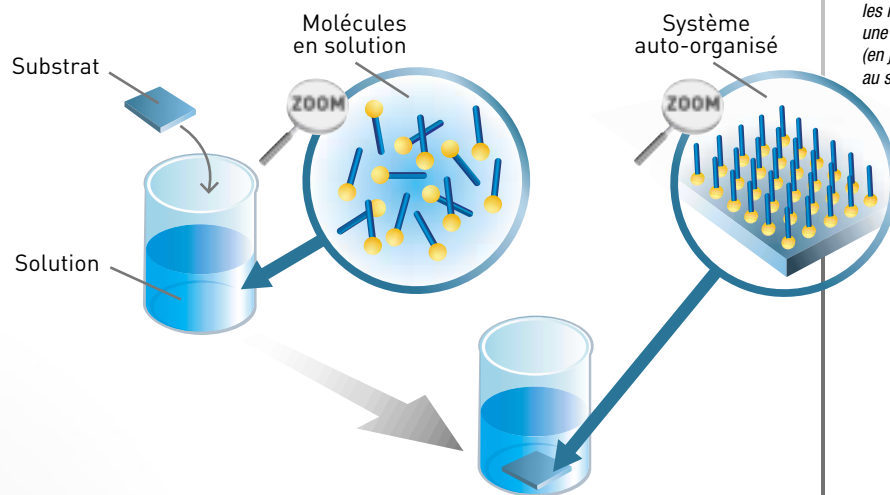
◀ **En bas,** simulation numérique de la structure atomique d'un film d'or.

Comment fabriquer des objets nanométriques ?

Les techniques de fabrication développées avec le microscope à effet tunnel et avec le microscope à force atomique sont des techniques de laboratoire que l'on peut qualifier d'artisanales. Elles ne permettront pas une production industrielle de nanosystèmes complexes : déplacer les atomes un par un avec la "pince à atomes" demanderait beaucoup trop de temps.

Une solution pour fabriquer industriellement des nanocomposants est d'appliquer les techniques "top-down" de la photolithographie déjà bien connues de l'industrie micro-électronique. Ces techniques, qui utilisent la lumière visible, permettent de graver sur les puces des motifs de 100 nm. En remplaçant la lumière visible par des rayonnements de longueur d'onde plus courte comme les ultraviolets ou les rayons X, on parviendrait à graver des motifs encore plus petits de l'ordre de 10 à 20 nm.

Peu à peu émergent d'autres solutions, qui suivent la voie ascendante ("bottom-up") et exploitent à la fois les avancées de la physique, de la chimie et de la biologie pour fabriquer simultanément et en grand nombre des objets nanométriques. En effet, une méthode prometteuse inspirée de la physique des surfaces est l'auto-organisation, qu'illustre le processus de formation de la buée sur les vitres : la vapeur d'eau se condense de façon uniforme sur la surface de la vitre en formant une multitude de microgouttes régulières.



◀ **L'auto-organisation :**
les molécules ayant une terminaison spécifique (en jaune) s'attachent au substrat et s'ordonnent.

La chimie apporte elle aussi de nouvelles solutions, notamment la chimie des catalyseurs qui, depuis déjà plusieurs décennies, utilise dans la fabrication industrielle des engrais et dans le raffinage du pétrole certaines technologies nanométriques.

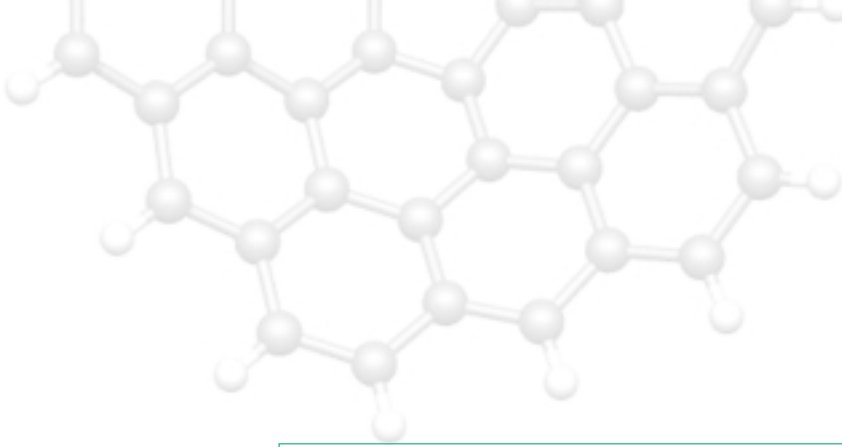
Parallèlement, les avancées technologiques de la biologie, notamment la compréhension des processus de la réplication de l'ADN et de la synthèse des protéines, ont donné lieu au développement d'un arsenal de techniques qu'on pourrait transposer pour fabriquer des nanocomposants.

Les exemples les plus réussis de nanosystèmes bâtis selon la voie ascendante sont ceux réalisés par la nature (bactéries, cellules, organismes vivants).

C'est un grand défi que de l'imiter. Différentes disciplines (physique, chimie, mécanique, science des matériaux, biologie, sciences médicales, informatique) sont ainsi appelées à coopérer pour comprendre les phénomènes complètement nouveaux que l'on découvrira à l'échelle du nanomètre, pour fabriquer les nanocomposants et donner naissance aux nanosciences.

Les scientifiques cherchent donc à développer de nouvelles techniques qui permettent une fabrication industrielle des nanocomposants. Néanmoins certains nano-objets ont déjà vu le jour, ils sont décrits dans les pages suivantes.





Les nanotubes de carbone

Le nanotube de carbone est une structure artificielle qui a été mise en évidence en 1991 par Sumio Iijima (laboratoires NEC, Japon).

C'est un feuillet de graphite formé d'atomes de carbone disposés en réseau hexagonal, comme un nid d'abeilles, et enroulé sur lui-même comme un cigare. Son diamètre est de l'ordre du nanomètre, sa longueur peut atteindre plusieurs micromètres. À chacune de ses deux extrémités se trouve une demi-molécule de fullerène. La molécule de fullerène (symbole chimique C₆₀) a été découverte en 1985, par Harold Kroto (Sussex

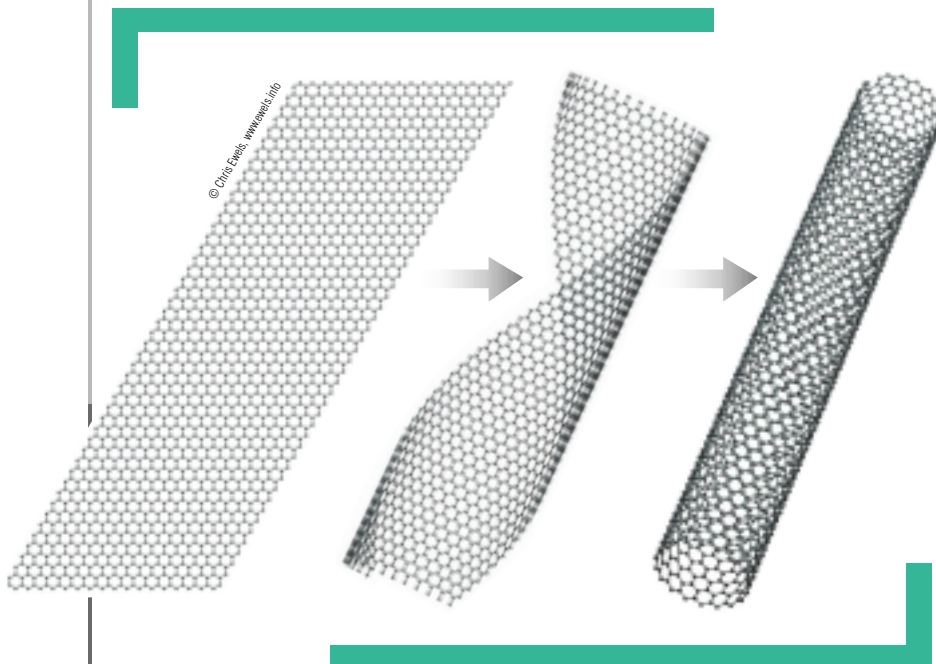
University, Grande Bretagne), Richard Smalley et Robert Curl (Rice University, Etats-Unis), découverte qui leur a valu le prix Nobel de chimie en 1996.

Cette molécule est constituée de 60 atomes de carbone, son diamètre est d'environ un nanomètre et elle est formée d'hexagones et de pentagones qui lui donnent une forme presque sphérique, semblable à un ballon de football.

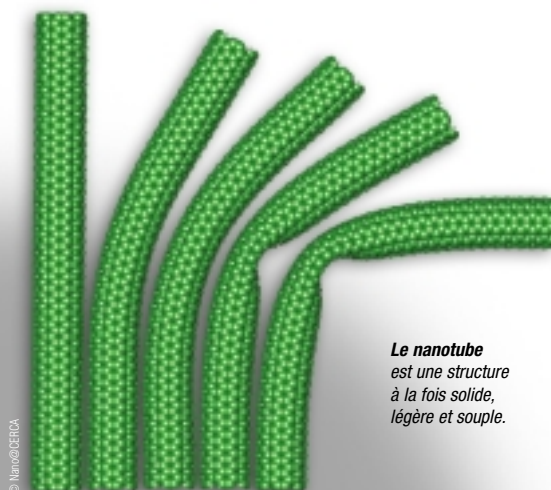


© Chris Ewels, www.ewels.info

▲ **Molécule de fullerène.**



◀ **Structure d'un nanotube.**



Le nanotube est une structure à la fois solide, légère et souple.

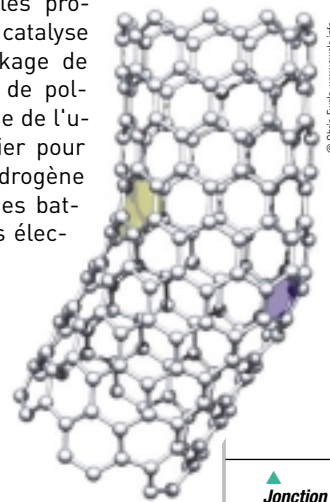
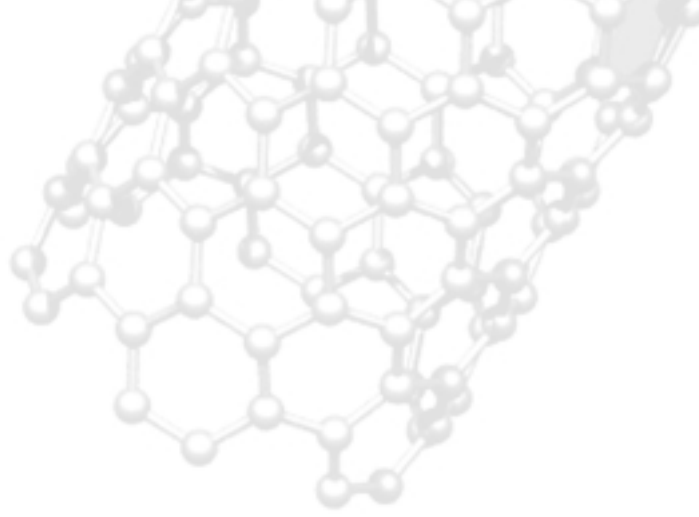
© Nano@CERCA



Par sa structure très simple et très stable, le nanotube a des propriétés mécaniques et électriques surprenantes qui promettent des applications nombreuses et une industrialisation dans un avenir proche :

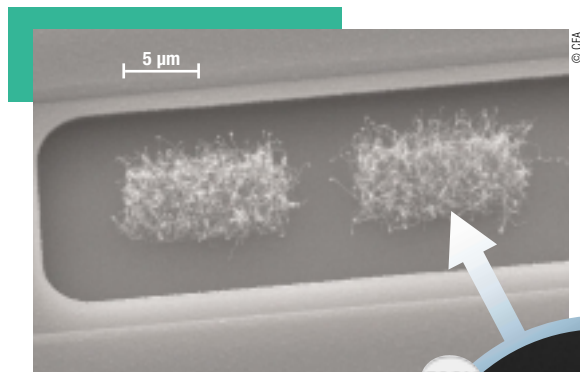
- le nanotube est 100 fois plus résistant et 6 fois plus léger que l'acier. Il peut donc être utilisé pour fabriquer des matériaux composites de haute performance et il est déjà employé pour renforcer certains clubs de golf et raquettes de tennis, remplaçant peu à peu les traditionnelles "fibres de carbone".

- une "poudre" de nanotubes en vrac a une très grande surface de contact avec l'air (plusieurs centaines de mètres carrés par gramme). Cette propriété est importante pour les processus tels que la catalyse chimique, le stockage de gaz et le filtrage de polluants. On envisage de l'utiliser en particulier pour le stockage de l'hydrogène et la fabrication des batteries des voitures électriques.

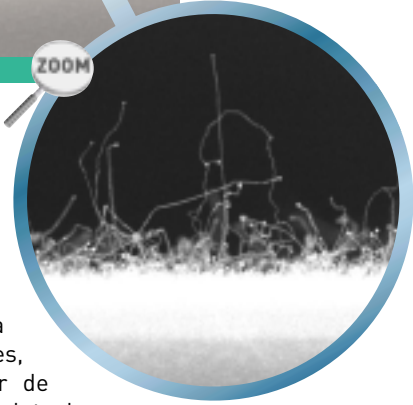


© Chris Ewels, www.ewels.info

Dans chaque pixel d'écran plat, on dépose en vrac des nanotubes conducteurs. Ceux qui sont orientés perpendiculairement à la surface de l'écran servent de nano-électrode.



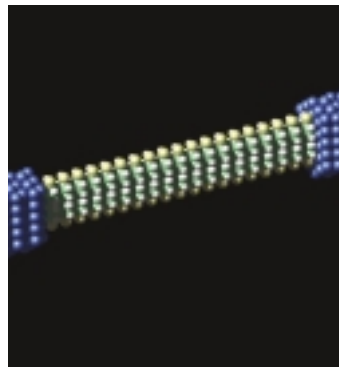
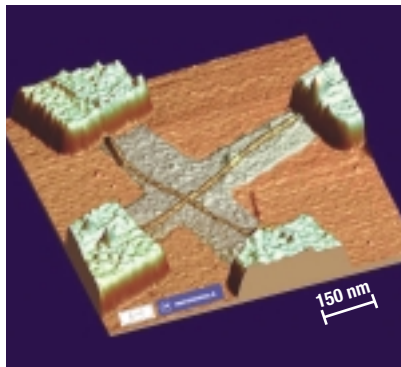
© CEA



© CEA

- en fonction de l'angle d'enroulement du feuillet de graphite, le nanotube est soit un excellent conducteur d'électricité, soit un semiconducteur. Les nanotubes conducteurs pourront être utilisés dans la fabrication des nanofils électriques, qui pourront notamment servir de nano-électrodes dans les écrans plats de télévision et d'ordinateur. Quant au nanotube semiconducteur, il pourra être raccordé à un nanotube conducteur et cet assemblage sera utilisé comme élément de base (jonction métal-semiconducteur) pour fabriquer des composants électroniques nanométriques.

▲ Jonction métal semiconducteur formée par deux nanotubes raccordés.



◀ À gauche, **photographie d'un circuit électronique** réalisé par deux nanotubes connectés sur une surface ;

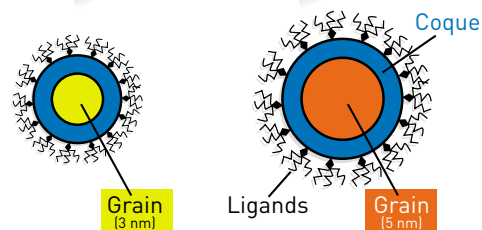
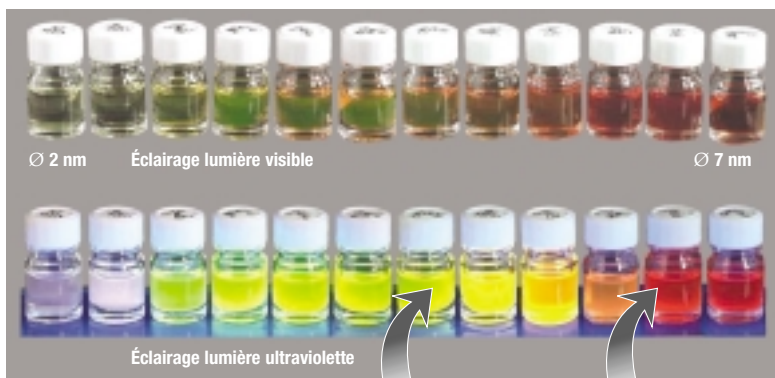
À droite, **simulation de transistor** formé de nanotubes.

Les nanotubes sont fabriqués suivant plusieurs méthodes : par arc électrique, par vaporisation d'une cible de carbone au moyen d'un laser ou en faisant circuler du méthane sur un catalyseur situé dans un four. La difficulté est de contrôler leurs dimensions et leur enroulement.

Les nanocristaux fluorescents

Certains matériaux émettent de la lumière visible quand ils sont éclairés en ultraviolet, phénomène appelé fluorescence. Les matériaux dotés de cette propriété peuvent être utilisés pour le marquage moléculaire, c'est-à-dire pour jouer le rôle de sonde fluorescente et suivre à la trace les réactions chimiques ou les processus biologiques dans les cellules vivantes.

Le séléniure de cadmium (CdSe) est un matériau fluorescent. S'il est préparé sous forme de grains nanométriques (nanocristaux), des effets quantiques apparaissent en raison des faibles dimensions des grains. Éclairés en ultraviolet, les nanocristaux émettent une lumière dont la couleur change en fonction de leurs dimensions. Par exemple, cette couleur est respectivement bleue, verte et rouge pour des tailles de grain de 2 nm, 3 nm et 5 nm. On peut ainsi pratiquement fabriquer toute la palette des couleurs.



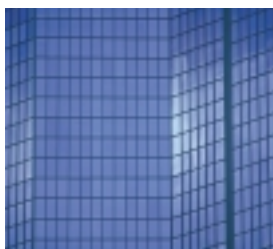
◀ **Solutions contenant des nanocristaux fluorescents classés par ordre de taille croissante, éclairés.** En haut, par de la lumière visible ;

En bas, par un rayonnement ultraviolet.

◀ **Structure d'un nanocristal fluorescent :** les dimensions du grain déterminent la couleur de la lumière émise, la coque amplifie cette couleur et le ligand permet de fixer le marqueur fluorescent sur la cible.



Les scientifiques développent actuellement des revêtements nanomodifiés inspirés du monde végétal, en particulier du comportement des feuilles de lotus qui ne se mouillent pas et qui restent propres même dans un environnement boueux.



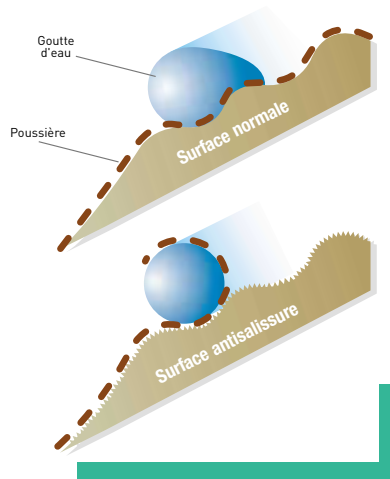
© Goodshot

Les surfaces autonettoyantes.
Vitres antissalissure pour les fenêtres des bâtiments.

Les revêtements nanomodifiés

La surface de la feuille de lotus est recouverte par des nanocristaux de cire qui forment un réseau de minuscules piliers semblable à une planche cloutée. Les gouttes d'eau ne peuvent pas mouiller cette surface et restent sphériques sans s'étaler car elles sont soutenues par les piliers.

De même, les grains de poussière n'adhèrent pas et sont emportés à la première pluie. D'autres feuilles, notamment celles du chou, du roseau et de la tulipe, ont aussi cette propriété remarquable, ainsi que les ailes du papillon et de la libellule.



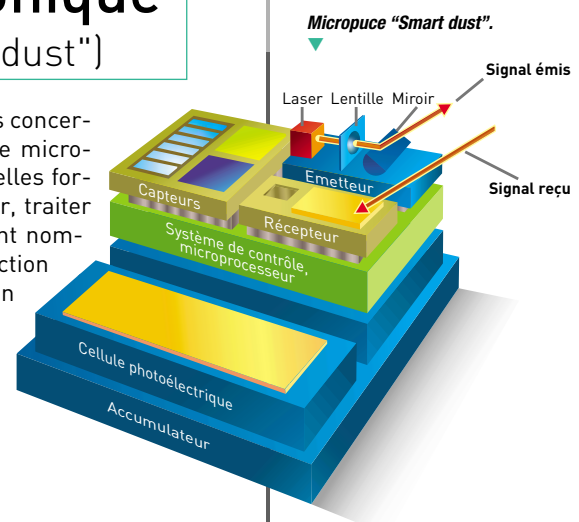
Effet feuille lotus.
En haut, la goutte d'eau mouille la surface et les impuretés adhèrent ;
En bas, la goutte d'eau ne mouille pas la surface autonettoyante et emporte les impuretés.

Fabriquer par biomimétisme, c'est-à-dire en imitant la nature, de telles surfaces artificielles à l'aide de nanomatériaux est un enjeu industriel considérable car les applications seront nombreuses : vitres antissalissure pour fenêtres et automobiles, peintures faciles à lessiver, tuiles autonettoyantes, revêtements antibactériens pour la cuisine et les sanitaires.

La poussière électronique communicante ("smart dust")

La "poussière électronique communicante" est constituée d'un très grand nombre de micropuces de silicium miniaturisées à l'extrême qui seront pulvérisées dans l'air ou incorporées dans les matériaux (peintures, textiles).

Leur rôle sera de mesurer des données très diverses concernant leur environnement. Équipées de capteurs, de microprocesseurs, d'émetteurs et de sources d'énergie, elles formeront un réseau communicant capable de recevoir, traiter et transmettre des données. Les applications seront nombreuses tant dans le domaine de la défense (détection de substances chimiques et bactériologiques sur un champ de bataille, détection des mouvements de l'ennemi) que dans le domaine civil (surveillance de la qualité de l'air, traçabilité des produits alimentaires, surveillance médicale des patients, détection de la fatigue des matériaux.)



Les implants et les prothèses **biocompatibles**

Les nanotechnologies vont permettre d'améliorer la qualité des prothèses et des implants médicaux.

Les prothèses actuelles de hanche et de genou sont en métal et en polyéthylène et ont une durée moyenne de vie de 10 ans. Le remplacement du métal par de la céramique renforcée par des nanoparticules pourra augmenter cette durée à 30 ans.

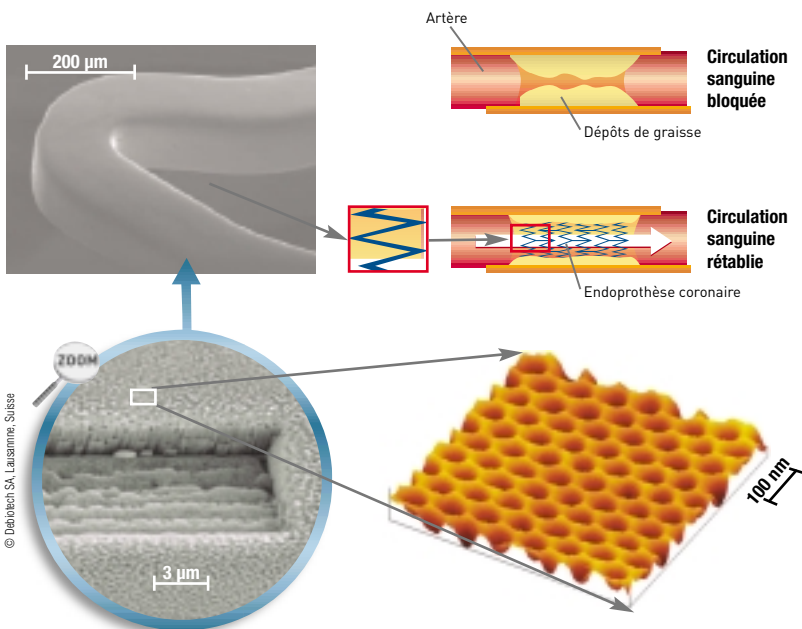
En outre, les prothèses recouvertes de nanoparticules auront une meilleure biocompatibilité : elles se fixeront plus solidement au tissu osseux et le patient les supportera plus aisément.



◀ **Prothèse de fémur.**

L'endoprothèse coronaire ("stent" en anglais) est implantée chez les patients dont les artères sont obstruées par des dépôts de graisse ou des caillots de sang : c'est une gaine métallique qui écarte les parois de l'artère et rétablit ainsi une circulation sanguine normale. Cependant, il arrive que des caillots

se forment sur l'endoprothèse, créant de nouvelles obstructions à la circulation du sang. Une solution, en cours de développement, est de recouvrir l'endoprothèse par une couche nanoporeuse sur laquelle les caillots ne pourront pas adhérer.



◀ **Endoprothèse coronaire avec revêtement nanoporeux.**

4

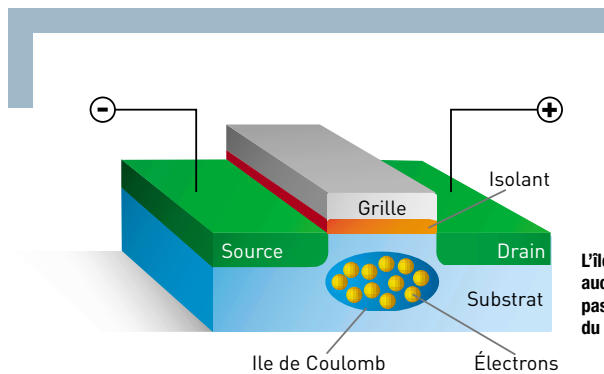
ET

APRÈS ?

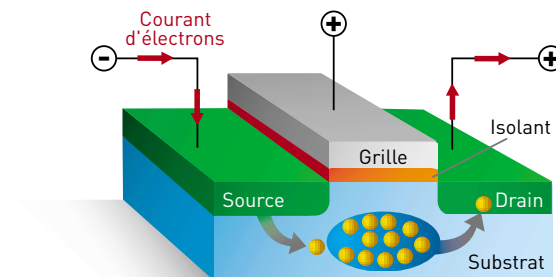
L'émergence des nanotechnologies et des nanosciences nous laisse entrevoir une révolution : la conception de matériaux à l'échelle atomique et moléculaire. Dès lors, il sera possible d'élaborer toutes sortes de nouveaux matériaux. Voici quelques applications futuristes.

Le transistor à un électron

Certains des phénomènes nouveaux qui apparaissent à l'échelle du nanomètre pourraient être exploités dans la conception de nouveaux composants électroniques.



◀ Transistor à un électron.



Le transistor à un seul électron est l'un d'eux. Entre la source et le drain du transistor, on ajoute une "île" en matériau semiconducteur où seul un nombre déterminé d'électrons N peut s'accumuler. Quand on applique une tension électrique entre la source et le drain, l'"île" se remplit d'électrons. Un fois atteint le nombre d'électrons N , le courant électrique ne passe plus : ce phéno-

mène s'appelle blocage de Coulomb. Si l'on applique une certaine tension électrique sur la grille, un nouvel électron pourra entrer dans l'"île" et un autre en sortira vers le drain.

Ainsi, en modifiant la tension de la grille, on peut laisser entrer ou bloquer les électrons un par un : c'est de l'électronique à un seul électron.

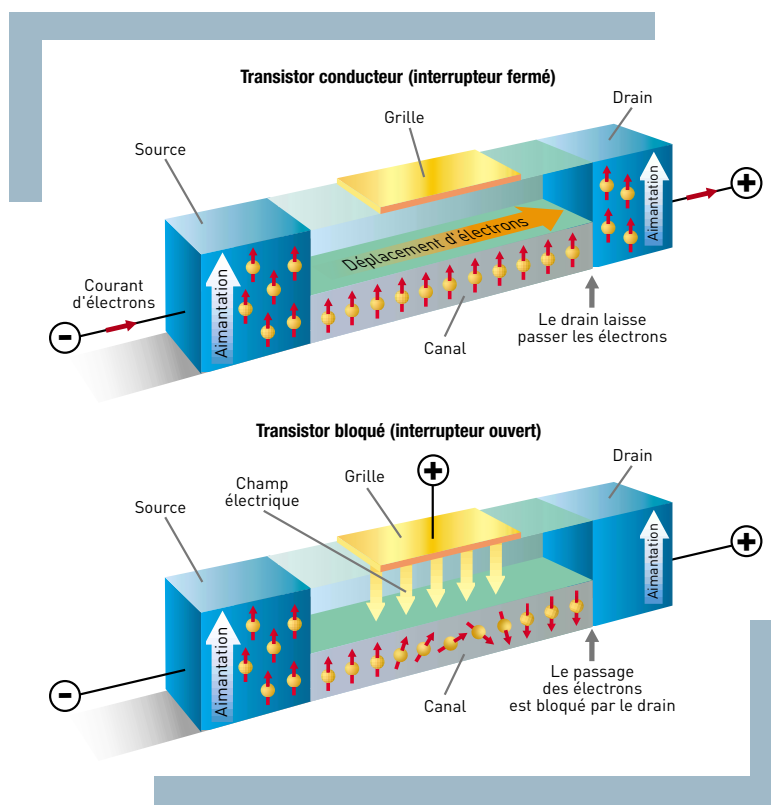
L'électronique de **spin**

L'utilisation du spin de l'électron promet la naissance d'une nouvelle électronique : la spintronique.

L'électronique d'aujourd'hui est fondée sur la propriété de l'électron, chargé électriquement, d'interagir avec les champs électriques. Mais l'électron a aussi une autre propriété intéressante : il peut, comme une minuscule boussole

(aiguille aimantée), interagir avec des champs magnétiques grâce à son spin.

Le spin est une sorte de mouvement de rotation de l'électron autour de son axe, analogue à la rotation d'une toupie.



◀ **Transistor spintronique.**

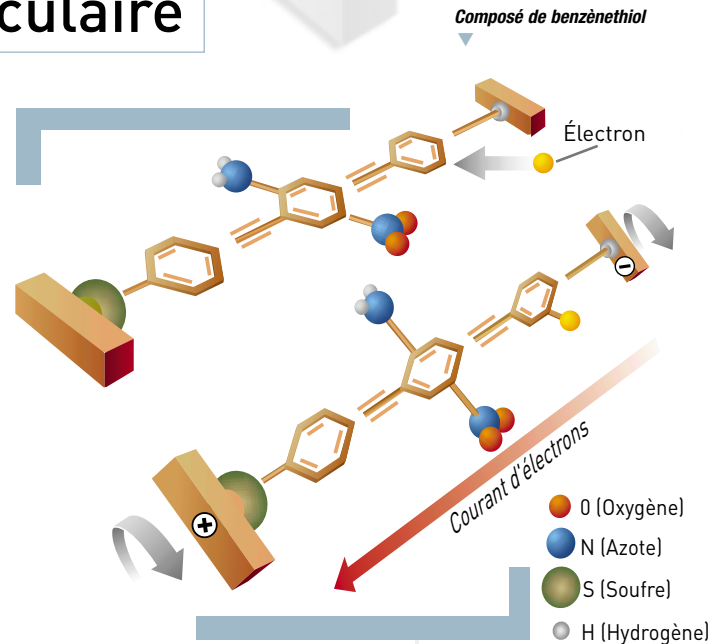
C'est cette propriété que la spintronique vise à exploiter. On pourrait, par exemple, construire un transistor spintronique. Il sera constitué, comme le transistor classique (voir page 4), de trois électrodes : source, drain et grille. La source envoie dans le canal les électrons, qui arrivent sur le drain. Un courant électrique s'établit, le transistor conduit.

Si l'on applique une tension déterminée sur la grille, un champ électrique apparaît dans le canal et entraîne un changement de 180 degrés de l'orientation du spin des électrons. Cela empêche leur passage dans le drain, le transistor est bloqué.

Le transistor spintronique pourrait être plus rapide que le transistor classique et consommerait moins d'énergie.

L'électronique moléculaire

Un des grands défis de l'électronique est de remplacer le transistor classique par une molécule chimique ou biologique fonctionnant comme un interrupteur de courant électrique. La taille du transistor pourrait être divisée par mille, ce qui permettrait de fabriquer des ordinateurs beaucoup plus petits, plus rapides, moins chers et consommant beaucoup moins d'électricité. Un candidat possible est un composé de benzénethiol. Lorsque l'on applique une tension électrique déterminée, la molécule gagne un électron, se tord et laisse passer le courant.



Les nanomatériaux

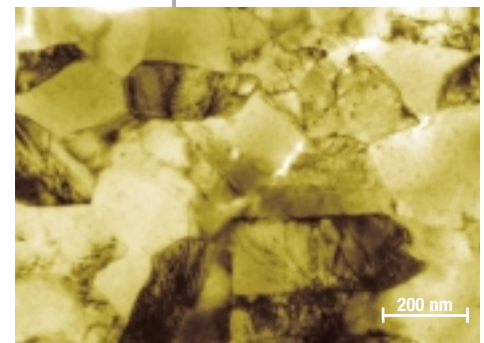
Les nanotechnologies permettent la conception de nouveaux matériaux.

Les alliages métalliques que l'on utilise actuellement dans les matériaux de construction sont en général composés de grains de dimensions micrométriques. En diminuant la taille de ces grains à une centaine de nanomètres, on obtient des matériaux qui sont plus légers et qui ont de meilleures propriétés mécaniques. Les nanograins sont plus résistants car ils n'ont pas les défauts présents dans les grains des matériaux traditionnels ; le cuivre nanocristallin est ainsi trois fois plus résistant que le cuivre classique. Ils sont en outre plus malléables : en effet, quand on déforme le métal, les nanograins glissent plus facilement les uns par rapport aux autres. Les matières plastiques, à base de polymères, deviennent elles aussi plus résistantes et cessent d'être inflammables quand on leur incorpore des nanoparticules.

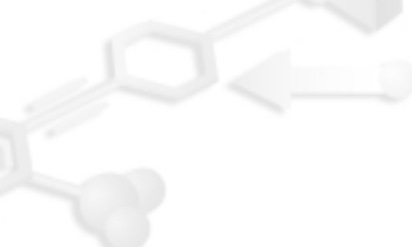
Ces propriétés de résistance mécanique des nanomatériaux pourront être exploitées dans des secteurs aussi divers que les matériaux de

construction pour le bâtiment, les appareils électroménagers et les appareils médicaux. Les moyens de transports terrestres, maritimes, aériens et spatiaux fabriqués avec des nanomatériaux seront plus légers, emporteront plus de charge utile, consommeront moins d'énergie et seront donc moins polluants pour l'environnement.

En outre, les nanoparticules ont une autre propriété intéressante du fait de leurs petites dimensions : un excellent rapport surface / volume. Il permettra d'augmenter l'efficacité des catalyseurs, utilisés notamment dans le raffinage du pétrole et dans l'industrie des engrais, mais aussi de l'absorption des polluants (au moyen des filtres antipollution et des pots catalytiques des véhicules) et du stockage de l'hydrogène (carburant de la pile à combustible des voitures électriques).



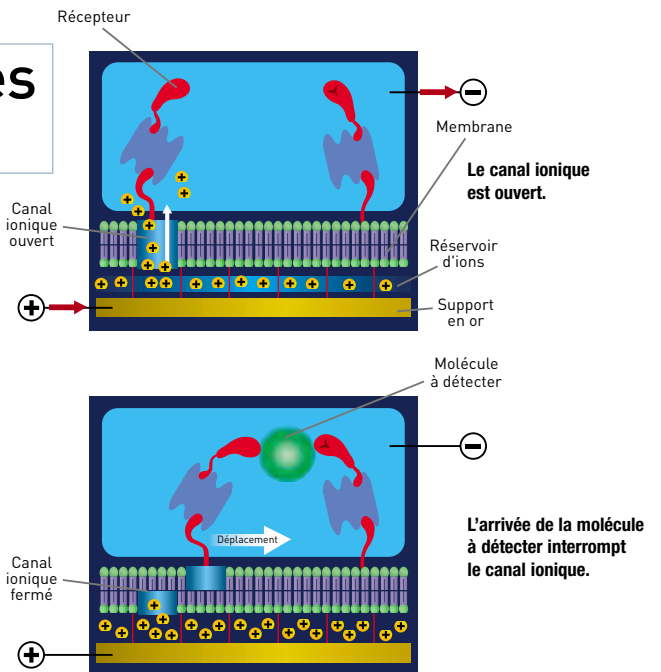
▲ Image des nanograins de cuivre.



Les capteurs chimiques et biologiques

Les méthodes traditionnelles pour déterminer la présence ou la concentration d'une substance chimique ou d'un agent bactériologique sont relativement lourdes, lentes et coûteuses. Les nanotechnologies pourraient remédier à ces inconvénients.

On pourrait développer un capteur basé sur le principe de l'interrupteur à canal ionique. À l'état normal, les ions passent à travers des canaux nanométriques, créant ainsi un courant électrique. Quand la molécule à détecter arrive sur le capteur, elle se fixe sur un récepteur spécifique qui bloque alors le canal ionique, supprimant ainsi le courant électrique. C'est en mesurant cette diminution du courant que l'on détectera la présence de la molécule. Ce capteur serait si sensible qu'il détecterait un morceau de sucre jeté dans un lac.

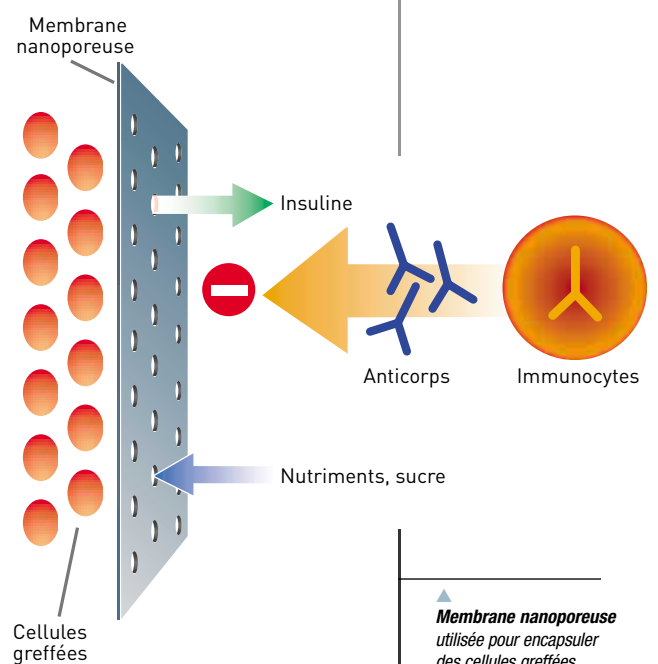


Ce capteur aura, en chimie et en biologie, des applications aussi diverses que la détection de la pollution, la surveillance de la qualité de l'eau et des produits alimentaires, l'analyse médicale, le dépistage des épidémies et la lutte contre les attaques chimiques et bactériologiques.

▲ Principe de l'interrupteur à canal ionique.

Les implants biocompatibles

Un moyen de traiter le diabète consisterait à remplacer chez le patient les cellules du pancréas qui sécrètent l'insuline et qui sont défaillantes, par des cellules d'un donneur qu'on grefferait sous la peau du patient diabétique. Le problème de la greffe est qu'elle est fréquemment rejetée par le système immunitaire du patient. Grâce aux nanotechnologies, on pourrait encapsuler les cellules greffées dans une membrane semi-perméable. Les nanopores de cette membrane laisseraient entrer le sucre et les substances nutritives nécessaires aux cellules greffées et laisseraient sortir l'insuline sécrétée par les cellules greffées. En revanche, les anticorps, plus gros que les nanopores, ne pourraient pas entrer et les cellules greffées seraient ainsi préservées contre l'attaque du système immunitaire.



▲ Membrane nanoporeuse utilisée pour encapsuler des cellules greffées.

Les vecteurs de médicaments

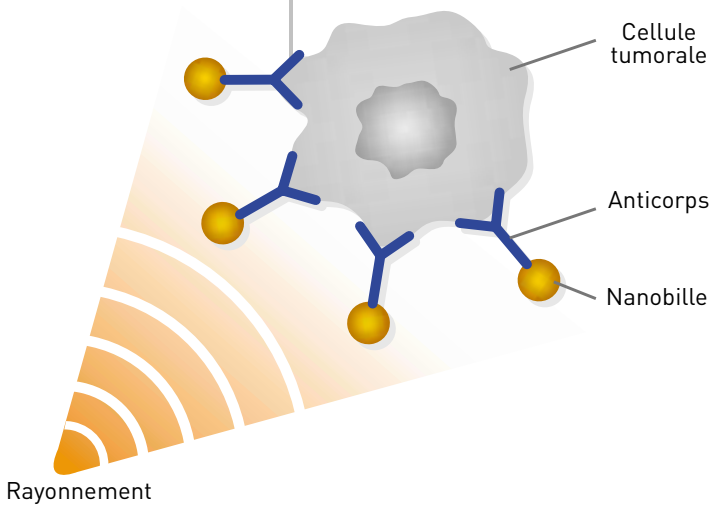
Les nanotechnologies pourraient accroître l'efficacité des médicaments.

Les médicaments classiques sont diffusés par le sang à travers tout le corps humain et n'atteignent pas toujours facilement leur cible. Une solution serait de les encapsuler dans une membrane nanoporeuse qui empêcherait leur dilution dans le sang pendant leur transport jusqu'à ce qu'ils atteignent le site spécifiquement ciblé. Ce n'est qu'au moment où la membrane reconnaîtrait ce site qu'elle libérerait son contenu. On ciblerait ainsi précisément l'endroit où le médicament doit agir.

Une autre application médicale des nanotechnologies, dans le traitement des tumeurs, consisterait à injecter dans le sang du patient des anticorps spécifiques à la tumeur considérée auxquels auraient préalablement été fixées des nanobilles. Les anticorps reconnaîtraient la tumeur et se fixeraient dessus. On les chaufferait alors avec un rayonnement capté par les nanobilles, ce qui provoquerait la destruction de la tumeur.



Traitement de certaines tumeurs.



5

CONCLUSION

É laborer de nouveaux matériaux et des composants toujours plus petits, construire atome par atome de nouvelles molécules et les assembler pour réaliser de nouvelles fonctions, exploiter les nouveaux phénomènes qui apparaissent à l'échelle du nanomonde, tels sont les défis à relever dans les années à venir.

Ces défis demanderont de considérables efforts de recherche fondamentale et appliquée. Différentes disciplines sont appelées à coopérer pour comprendre ces nouveaux phénomènes et développer les nanosciences.

L'impact des nanotechnologies sur l'économie est très prometteur, car les applications industrielles seront nombreuses et concerneront les domaines les plus variés, de l'électronique à la médecine en passant par l'aéronautique, la défense, l'environnement et les matériaux de construction. Mais, comme dans toute nouvelle discipline, un certain temps sera nécessaire pour voir l'arrivée massive de produits industriels sur le marché.

Enfin, les nanotechnologies soulèvent aussi des questions d'éthique. La perspective de manipuler la matière à l'échelle moléculaire et d'interférer avec le monde du vivant suscite non seulement de grands espoirs mais aussi des inquiétudes. Ces questions d'éthique, déjà à l'étude, devront être prises en considération le moment voulu par les pouvoirs publics avec tous les acteurs et utilisateurs concernés.

Nous voilà à la fin de ce voyage au pays des nanosciences et des nanotechnologies. Vous en savez maintenant plus sur les promesses du nanomonde !

Cette plaquette a été réalisée par le Ministère délégué à la Recherche avec le soutien du Réseau de recherche en Micro- et Nanotechnologies (RMNT) et du Programme National Nanosciences à l'occasion de l'Année Mondiale de la Physique - 2005.

Rédaction :

Ilarion Pavel (Direction de la Technologie).

avec la collaboration de :

Alain Brun (Direction de la Technologie),
Alexandre Moatti,
Jean-Louis Pautrat (CEA-LETI),
Jean-Louis Robert (Direction de la Recherche).

Remerciements à :

Claire Bonnèlie,
René Roussille (CEA-LETI).

Remerciements pour les crédits photographiques :

Bernard Baylac (STMicroelectronics),
Christophe Bureau (Alchimier, France),
Raul Arenal de la Concha (Onera),
Joël Bleuse (CEA-DRFMC),
Sylvie Contreras (Université de Montpellier),
Yannick Champion (CNRS),
Frédéric Chandezon (CEA-DRFMC),
Marlène Choukroun (INRETS),
Raymond Campagnolo (CEA-LETI),
Gilles Delapierre (CEA-LETI),
Thierry Deutsch (CEA-DRFMC),
Jean Dijon (CEA-LETI),
Claire Divoux (CEA-LETI),
Chris Ewels (www.ewels.info),
Pascal Gentile (CEA-DRFMC),
Jean-Charles Guibert (CEA-LETI),
Alan How (Debiotech SA, Lausanne, Suisse),
Norbert Hubin (ESO), Anita Krause (Biotronik, Allemagne),
Didier Maillefer (Debiotech),
Emmanuel Masmejean (AP-HP, Hôpital Georges Pompidou),
Rafael Martinez (Primal Cry, Montpellier),
Noël Magnea (CEA-DRFMC),
Gérard Matheron (Medea+),
Hervé Mingam (STMicroelectronics),
Daniel Michon (Artechnique, Grenoble),
Pierre Puget (CEA-LETI),
Peter Reiss (CEA-DRFMC),
Stéphane Renard (Tronic's Microsystems),
Alain Rochefort (Nano@PolyMTL, École Polytechnique de Montréal),
Austin Roorda and David Williams (University of Rochester),
Marc Sanquer (CEA-DRFMC),
Dominique Vuillaume (IEMN);
Biomérieux, Goodshoot, IBM, Motorola,
Purdue University, University of Cambridge.

Création, réalisation :

ILSO Grenoble

Illustrations :

Bruno Fouquet (ILSO Grenoble)

Impression :

Imprimerie des Deux Ponts - 38 Bresson



À LA DÉCOUVERTE
DU NANOMONDE



Pour en savoir plus sur les nanosciences et les nanotechnologies :

www.nanomicro.recherche.gouv.fr
www.rmnt.org

ministère
éducation
nationale
enseignement
supérieur
recherche



ministère délégué
à l'enseignement supérieur
et à la recherche



Ministère délégué à la Recherche
1, rue Descartes
75231 Paris cedex 05
www.recherche.gouv.fr