Le collage moléculaire, une technique attractive

L'élaboration de structures SOI (silicium sur isolant) pour réalisation de circuits intégrés, le transfert de circuits sur différents supports, la fabrication de capteurs et de microsystèmes, la réalisation de composants hybrides s'appuient largement sur le collage par adhérence moléculaire. L'intérêt de cette technique repose sur la possibilité de coller deux surfaces en les mettant en contact direct et sur la maîtrise de technologies des surfaces à l'échelle nanométrique.

P. Stroppa/CEA

Dans une salle blanche au CEA/Grenoble, plaque SOI de 200 mm de diamètre, après diverses étapes technologiques, initialement fabriquée par la technologie Smart Cut™. Cette technologie est basée sur une implantation ionique, dont la machine est visible en arrière-plan, et sur le collage moléculaire.

Les premières applications du collage par adhérence moléculaire à de grandes surfaces sont apparues dans les années 1980 dans les domaines de la microélectronique et des microtechnologies. L'une des plus spectaculaires est la réalisation de structures silicium sur isolant (**SOI**). De nombreuses technologies ont été développées depuis une vingtaine d'années. Parmi elles, la technologie originale Smart Cut™ a été mise au point au CEA par Michel Bruel[1] et développée conjointement avec **Soitec**[2], société essaimée du CEA. Basée sur une implantation **ionique** de gaz et sur le collage moléculaire (figure 1), cette technologie permet l'élaboration d'une couche fine **monocristalline** de **silicium** sur une plaque support de silicium *via* un film d'oxyde. Lorsque les films de silicium des structures SOI ont une épaisseur supérieure au **micromètre**, une autre technologie, fondée sur le collage moléculaire et sur l'amincissement mécanique d'une des plaques collées, est également utilisable. Elle a été développée par **Tracit Technologies**[3], nouvelle société essaimée du CEA.

L'adhérence moléculaire, une question de forces

Le principe du collage par adhérence moléculaire est basé sur la mise en contact direct de deux surfaces, c'est-à-dire sans l'utilisation d'un matériau spécifique (colle, cire, métal à basse température de fusion…). Une telle opération nécessite que les surfaces à coller soient suffisamment lisses, exemptes de particules ou de contamination (en particulier par des hydrocarbures), et qu'elles soient suffisamment rapprochées pour permettre d'initier un contact, typiquement à une distance inférieure à quelques **nanomètres**. Dans ce cas, les forces attractives entre les deux surfaces sont

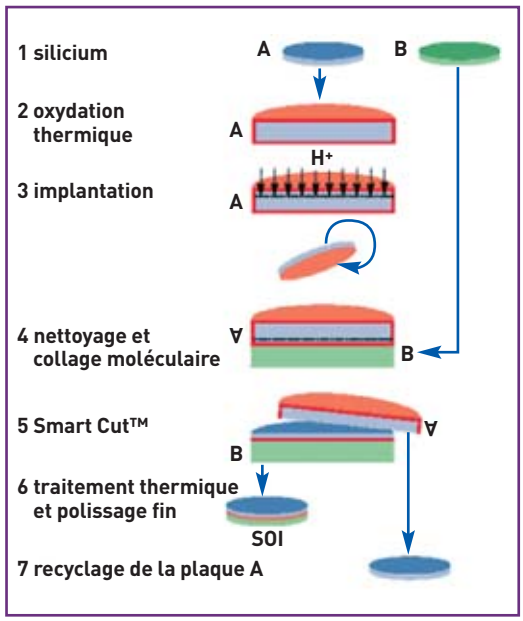


Figure 1.
Technologie Smart Cut™ appliquée à la réalisation de structures SOI. Elle est actuellement utilisée pour la production en volume de structures SOI jusqu'à 300 mm de diamètre. Cette technologie est particulièrement intéressante lorsque la plaque initiale est onéreuse et peut être recyclée. (Licence à la société Soitec).

Soitec/Christian Morel – Studio Pons

Plaques de SOI produites par Soitec.

assez élevées pour provoquer l'adhérence moléculaire. Le collage moléculaire est induit initialement par l'ensemble des forces attractives (**forces de Van der Waals**) d'interaction **électronique** entre **atomes** ou **molécules** des deux surfaces à coller. Ces forces attractives sont d'autant plus importantes que la distance entre les deux surfaces est faible. En outre, elles dépendent de la nature des surfaces et du milieu qui les sépare. Pour la plupart des collages moléculaires, on est ainsi amené à considérer deux familles de surfaces : les **hydrophiles** et les **hydrophobes**. La différence principale existant entre ces surfaces est la présence de films d'eau, correspondant à quelques monocouches moléculaires, **adsorbée** sur les surfaces hydrophiles.

Dans bon nombre d'applications, les collages sont réalisés à température et à pression ordinaires, après un nettoyage chimique des surfaces. De façon générale, le renforcement des énergies de collage est obtenu par la mise en œuvre d'un traitement thermique. Plus la température sera haute, plus les énergies de collage seront fortes (figure 2). Au-delà d'une certaine température dépendant en particulier du nettoyage avant collage des surfaces (hydrophiles ou hydrophobes), la majorité des liaisons entre les deux surfaces sera des **liaisons covalentes**.

Le collage "hydrophobe" : application au collage silicium-silicium

Le collage de deux plaques de silicium (Si) monocristallin est un bon exemple de collage de surfaces hydrophobes. L'objectif est de réaliser un "raccord" **cristallin** tout en s'affranchissant de l'oxyde natif présent sur les plaques de silicium. Il faut remarquer que les énergies de collage de surfaces hydrophobes sont faibles à température ambiante (figure 2). Pour obtenir un collage fort, il est nécessaire de former des liaisons covalentes Si–Si. Ceci est possible lors d'un traitement thermique au-delà de 600 °C.

Des structures collées Si-Si sont actuellement réalisées suivant un procédé original, développé par le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information de la Direction de la recherche technologique (CEA-Leti), avec une très bonne maîtrise de la désorientation cristalline, induite lors du collage[4]. Ces structures dites "collées-tournées" présentent des réseaux de **dislocations** (vis, mixtes) enfouies à proximité de leur surface (figure 3a). Elles sont alors aptes à induire une organisation latérale, à échelle nanométrique, lors de dépôts d'îlots (*nanodots*) de tailles nanométriques. Parmi diverses autres applications, ces structures collées-tournées ont également permis des nano-

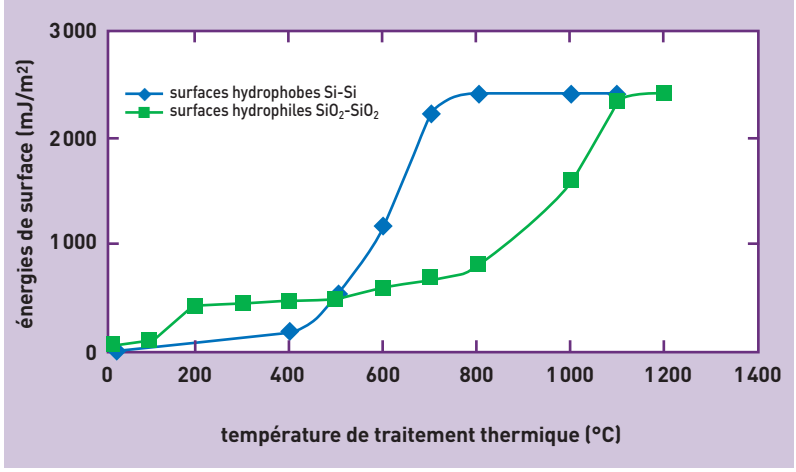


Figure 2.
Énergies de surface typiques pour des collages "hydrophobes" (cas du collage de deux plaques de silicium Si-Si) et des collages "hydrophiles" (cas du collage de deux plaques de silicium oxydées SiO_2-SiO_2). Les préparations des surfaces avant le collage influent sur l'évolution en température des énergies de surface.

structurations des surfaces de plaques de silicium, par gravure chimique (figure 3b), avec des périodicités nanométriques, et des réalisations de fils de germanium alignés (figure 3c) de tailles et avec des espacements nanométriques.

Le collage "hydrophile" : cas du collage silicium oxydé-silicium oxydé

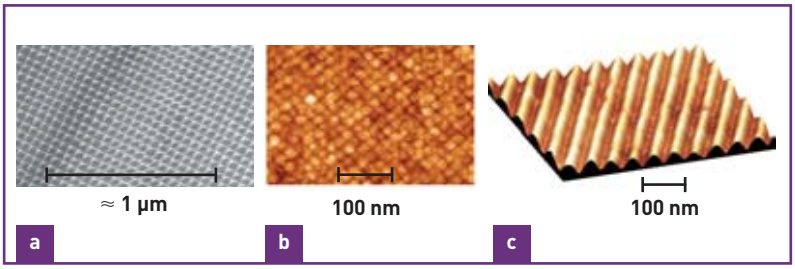
Pour les collages de surfaces hydrophiles, des interactions par **liaisons hydrogène**, plus fortes que l'attraction de Van der Waals, peuvent être mises en jeu, dès lors que les surfaces sont constituées d'atomes présentant une grande affinité pour les électrons (électronégatifs) liés à des atomes d'hydrogène (comme O–H). Le collage de deux plaques de silicium oxydées (film de SiO_2 en surface) en est un bon exemple. Des traitements thermiques effectués à des températures supérieures à 150 °C favorisent les liaisons hydrogène entre les

(1) M. Bruel, *Electron. Lett.*, 31 (14), p. 1201, 1995.

(2) Voir le site Internet de la société Soitec à l'adresse : www.soitec.com.
Smart Cut™ est une marque déposée par la société Soitec.

(3) Voir le site Internet de la société Tracit Technologies à l'adresse : www.tracit-tech.com.

(4) F. Fournel *et al.*, *Materials Science & Engineering B, Solid State Materials for Advanced Technology,* B73 (1-3), pp. 42-46, 3 April, 2000.



CEA/Collaboration DSM/DRFMC et DRT/Leti

Figure 3.
Observations (a) en microscopie électronique à transmission (MET) d'un réseau unique de dislocations vis, enfouies quelques nanomètres sous la surface de la structure, de période 49,4 nm, (b) par microscopie à effet tunnel (STM) d'une surface de Si, structurée par gravure et présentant une périodicité de 20 nm, (c) en microscopie à force atomique (AFM) de fils de germanium alignés à l'aplomb des dislocations mixtes enfouies sous la surface. La hauteur et la largeur des fils sont respectivement de 1 nm et 25 nm. (Voir l'article *Les microscopes : des yeux devenus aussi outils.*)

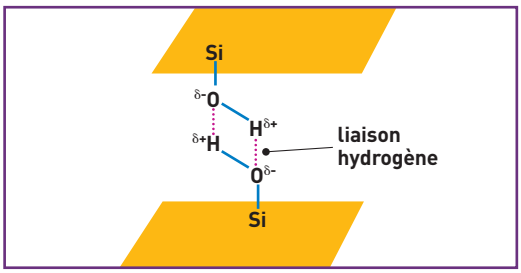


Figure 4. Principe de collage moléculaire de deux surfaces d'oxyde par liaisons hydrogène entre des liaisons silanols (SiOH–SiOH) de surface. À plus haute température, ces liaisons sont remplacées par des liaisons covalentes siloxanes (Si–O–Si).

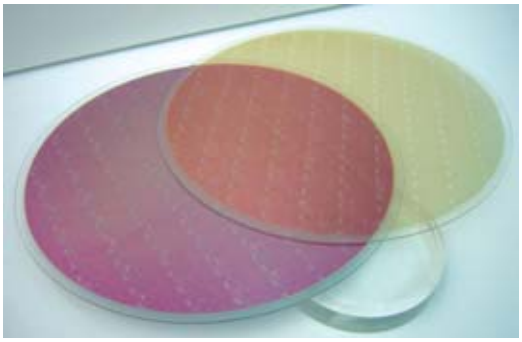
deux surfaces (figure 4). De plus, il faut atteindre des températures plus élevées, par exemple 700 °C dans la figure 2, pour créer des liaisons fortes covalentes Si–O–Si et obtenir un collage intime.

De nombreux composants bientôt sur le marché

Le collage moléculaire est utilisé également dans diverses techniques de transfert de films. Ceux-ci peuvent être de nature et de dimensions variées, allant de la plaquette de 300 mm de diamètre à quelques centaines de micromètres de côté. En outre, ces films sont aptes à supporter éventuellement tout ou partie d'un composant. Les transferts sont réalisés par empilement sur de nombreux supports, en particulier différents du support initial, et complétés par un détachement ou un amincissement du support initial du film.
Par ailleurs, la température maximale des traitements thermiques nécessaires au renforcement du collage dépend notamment de la nature des matériaux mis en jeu dans le collage. Dans certains cas, les structures collées ne peuvent pas être soumises à des températures élevées. Une des conséquences est qu'il ne s'établit pas de liaisons covalentes entre les deux surfaces. Typiquement, ce sera le cas d'hétérostructures dans lesquelles les deux matériaux à assembler ont des coefficients de dilatation thermique trop différents. Pour renforcer le collage tout en évitant l'usage de tels traitements thermiques, des techniques d'activation de surfaces avant collage (**plasma**, polissage mécano-chimique…) ou des collages dans des conditions spécifiques (sous vide…) ont été mis au point ou sont à l'étude.
De nombreuses applications attractives sont en cours de développement au niveau international. Parmi elles, il convient de citer de façon non exhaustive :

- la réalisation de **circuits intégrés** sur SOI pour la microélectronique (composants à faible consommation, électronique rapide, électronique de puissance…) ;
- l'élaboration de composants hybrides, tels que des composants **semi-conducteurs** III-V sur des circuits à base de silicium ;
- le transfert de circuits sur des supports divers (figure 5), voire souples ;
- la fabrication de capteurs et de systèmes micro-électro-mécaniques et micro-opto-électro-mécaniques (**MEMS**, MOEMS…), de capteurs biologiques de type ***lab-on-chip***…
- l'empilement de circuits intégrés en trois dimensions.

Aujourd'hui, l'intérêt suscité par le collage moléculaire apparaît clairement dans les domaines de la microélectronique, des microtechnologies, des microsystèmes, de l'optique ou de la biotechnologie. Les recherches et développements induits en France et sur le plan international devraient permettre une mise sur le marché très prochaine de nombreux composants.



Tracit Technologies

Circuits transférés sur divers supports de diamètre 200 mm (silice fondue…).

P. Stroppa/CEA

Machine de polissage mécano-chimique dans une salle blanche au CEA/Grenoble. Pour renforcer le collage moléculaire, les surfaces peuvent être soumises à un polissage mécano-chimique avant collage.

> Hubert Moriceau
Direction de la recherche technologique
CEA-Leti centre de Grenoble

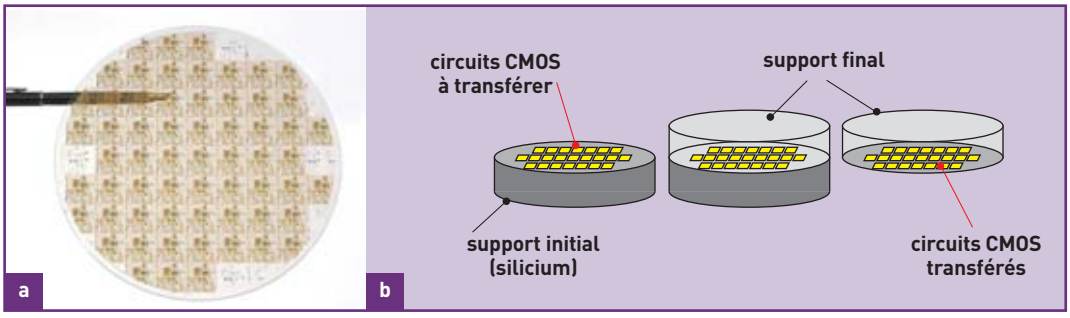
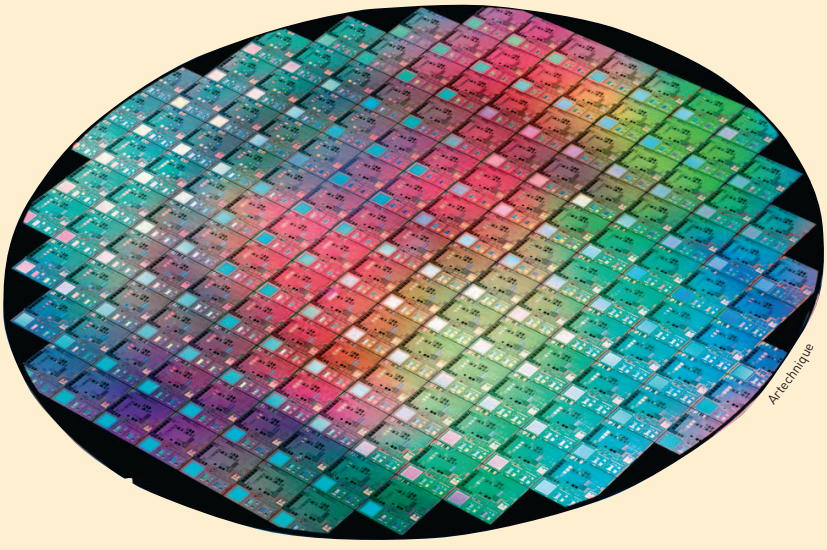


Figure 5. Circuits **CMOS** (200 mm) transférés sur un support de verre (a), par un procédé de collage moléculaire sur un support final et d'amincissement mécanique du support initial (b). (Licence à la société Tracit Technologies).

A Du monde macroscopique au nanomonde, ou l'inverse...

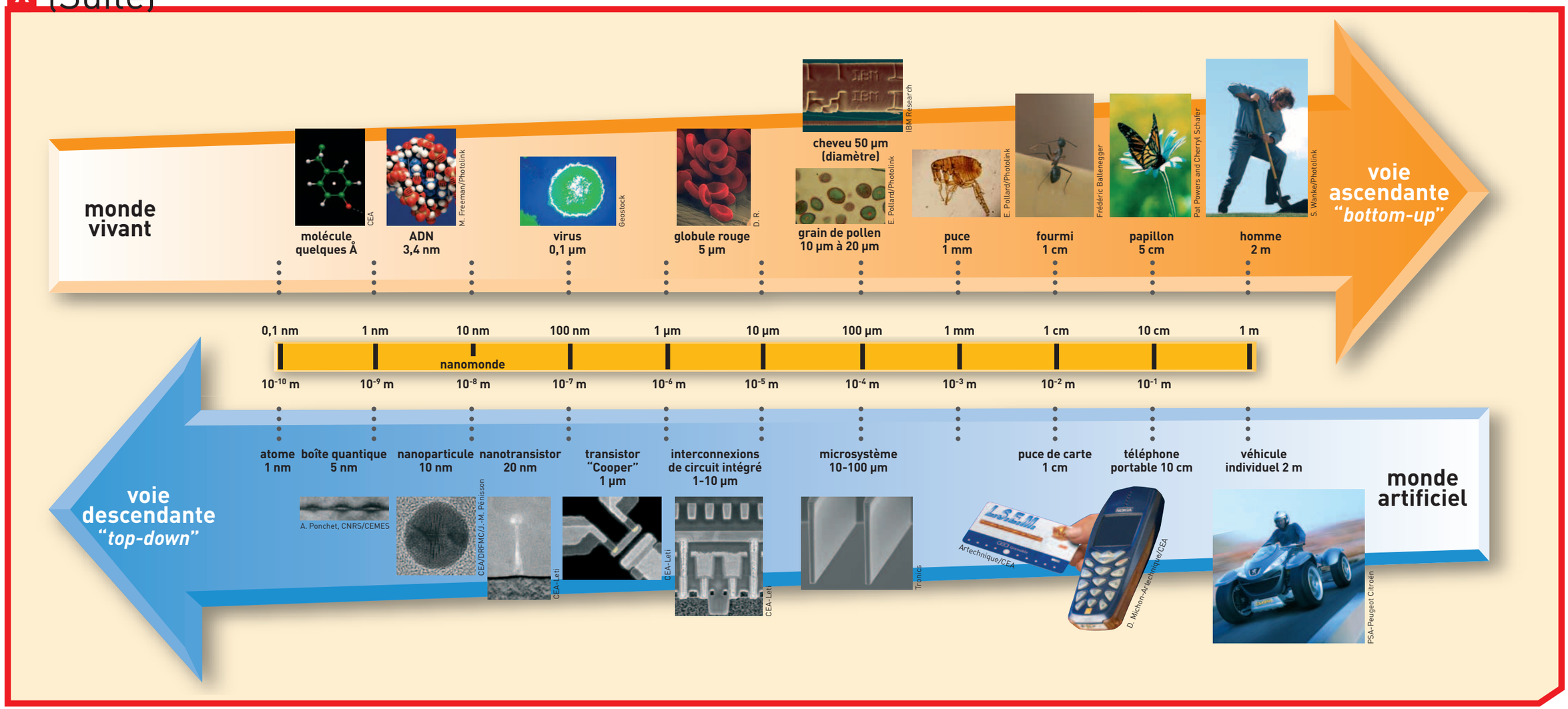
Afin de se représenter plus aisément les dimensions des objets micro et nanoscopiques*, il est pratique de procéder à des comparaisons et courant de faire correspondre différentes échelles, par exemple celle du monde du vivant, de la molécule à l'homme, et celle des objets manipulés ou fabriqués par lui (figure). Cette correspondance entre "artificiel" et "naturel" permet, par exemple, de voir que des nanoparticules fabriquées artificiellement sont plus petites que des globules rouges.
Un autre mérite de cette juxtaposition est d'illustrer les deux grandes façons d'élaborer des objets ou des systèmes nanométriques : la voie descendante (*top-down*) et la voie ascendante (*bottom-up*). Deux chemins mènent en effet au nanomonde : la fabrication moléculaire, qui passe par la manipulation d'atomes individuels et la construction à partir de la base, et l'ultraminiaturisation, qui produit des systèmes de plus en plus petits.
La voie descendante est celle du monde artificiel, qui part de matériaux macroscopiques, ciselés par la main de l'homme puis par ses instruments : c'est elle qu'a empruntée l'électronique depuis plusieurs dizaines d'années, principalement avec le silicium comme substrat, et ses "tranches" (*wafers*) comme entités manipulables. C'est d'ailleurs la microélectronique qui a largement contribué à donner à cette voie le nom anglais sous laquelle elle est connue. Mais il ne s'agit plus seulement d'adapter la miniaturisation de la filière silicium actuelle, mais aussi de prendre en compte, pour s'en prémunir ou les utiliser, les phénomènes physiques, quantiques en particulier, qui apparaissent aux faibles dimensions.
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'auto-assemblage des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des protéines, enchaînement d'acides aminés que des super-molécules, les acides nucléiques (ADN, ARN), savent faire produire au sein de cellules pour former des organismes, les faire fonctionner et se reproduire tout en se complexifiant. Cette voie, dite *"bottom-up"*, vise à organiser la matière à partir de "briques de base", dont les atomes eux-mêmes sont les plus petits constituants, à l'instar du monde vivant. La nanoélectronique du futur cherche à emprunter cette voie d'assemblage pour aboutir à moindre coût à la fabrication d'éléments fonctionnels.
Les nanosciences peuvent ainsi être définies comme l'ensemble des recherches visant à la compréhension des propriétés (physiques, chimiques et biologiques) des nano-objets ainsi qu'à leur fabrication et à leur assemblage par auto-organisation.
Les nanotechnologies regroupent l'ensemble des savoir-faire qui permettent de travailler à l'échelle moléculaire pour organiser la matière afin de réaliser ces objets et matériaux, éventuellement jusqu'à l'échelle macroscopique.

*Du grec *nano* qui signifie "tout petit" et est utilisé comme préfixe pour désigner le milliardième (10^{-9}) d'une unité. En l'occurrence, le **nanomètre** (1 nm = 10^{-9} m, soit un milliardième de mètre) est l'unité reine du monde des nanosciences et des nanotechnologies.



Tranche de silicium de 300 mm réalisée par l'Alliance Crolles2, illustration de la démarche *top-down* actuelle de la microélectronique.

A (Suite)


monde vivant
molécule quelques Å
CEA
ADN 3,4 nm
M. Freeman/Photolink
virus 0,1 µm
Geostock
globule rouge 5 µm
D. R.
cheveu 50 µm (diamètre)
IBM Research
grain de pollen 10 µm à 20 µm
E. Pollard/Photolink
puce 1 mm
E. Pollard/Photolink
fourmi 1 cm
Frédéric Ballenegger
papillon 5 cm
Pat Powers and Cherryl Schafer
homme 2 m
S. Wanke/Photolink
voie ascendante "bottom-up"
0,1 nm
1 nm
10 nm
100 nm
1 µm
10 µm
100 µm
1 mm
1 cm
10 cm
1 m
nanomonde
10^{-10} m
10^{-9} m
10^{-8} m
10^{-7} m
10^{-6} m
10^{-5} m
10^{-4} m
10^{-3} m
10^{-2} m
10^{-1} m
voie descendante "top-down"
atome 1 nm
boîte quantique 5 nm
nanoparticule 10 nm
nanotransistor 20 nm
transistor "Cooper" 1 µm
interconnexions de circuit intégré 1-10 µm
microsystème 10-100 µm
puce de carte 1 cm
téléphone portable 10 cm
véhicule individuel 2 m
monde artificiel
A. Ponchet, CNRS/CEMES
CEA/DRFMC/J.-M. Pénisson
CEA-Leti
CEA-Leti
CEA-Leti
Tronics
Artechnique/CEA
D. Michon-Artechnique/CEA
PSA-Peugeot Citroën

D Le transistor, composant de base des circuits intégrés

En décembre 1947, John Bardeen et Walter H. Brattain réalisaient le premier **transistor** en germanium. Avec William B. Shockley, aux Bell Laboratories, ils développaient l'année suivante le transistor à jonction et la théorie associée. Au milieu des années 1950, les transistors seront réalisés en **silicium** (Si), qui reste aujourd'hui le **semi-conducteur** généralement utilisé, vu la qualité inégalée de l'interface créée par le silicium et l'oxyde de silicium (SiO_2), qui sert d'isolant.

En 1958, Jack Kilby invente le **circuit intégré** en fabriquant cinq composants sur le même substrat. Les années 1970 verront le premier microprocesseur d'Intel (2250 transistors) et les premières mémoires. La complexité des circuits intégrés ne cessera de croître exponentiellement depuis (doublement tous les deux-trois ans, selon la "loi de Moore") grâce à la miniaturisation des transistors.

Le transistor (de l'anglais *transfer resistor*, résistance de transfert), composant de base des **circuits intégrés** microélectroniques, le restera *mutatis mutandis* à l'échelle de la nanoélectronique : adapté également à l'amplification, entre autres fonctions, il assume en effet une fonction basique essentielle : laisser passer un courant ou l'interrompre à la demande, à la manière d'un commutateur (figure). Son principe de base s'applique donc directement au traitement du langage binaire (0, le courant ne passe pas ; 1, il passe) dans des circuits logiques (inverseurs, portes, additionneurs, cellules mémoire).

Le transistor, fondé sur le transport des électrons dans un solide et non plus dans le vide comme dans les tubes électroniques des anciennes **triodes**, est composé de trois **électrodes** *(anode, cathode et grille)* dont deux servent de réservoirs à **électrons** : la **source**, équivalent du filament *émetteur* du tube électronique, le **drain**, équivalent de la plaque *collectrice*, et la **grille**, le "contrôleur". Ces éléments ne fonctionnent pas de la même manière dans les deux principaux types de transistors utilisés aujourd'hui, les *transistors bipolaires à jonction*, qui ont été les premiers à être utilisés, et les *transistors à effet de champ* (en anglais FET, *Field Effect Transistor*). Les transistors bipolaires mettent en œuvre les deux types de porteurs de charge, les électrons (charges négatives) et les **trous** (charges positives), et se composent de deux parties de substrat semi-conducteur identiquement

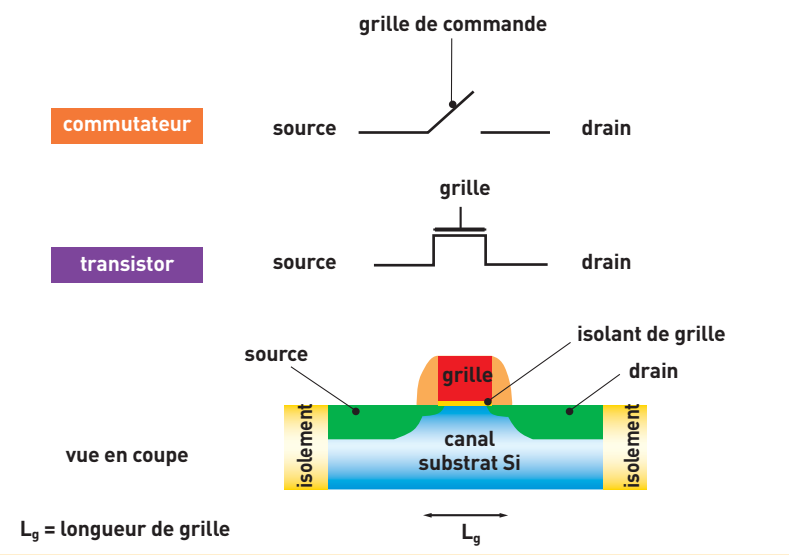


Figure.
Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

D (Suite)

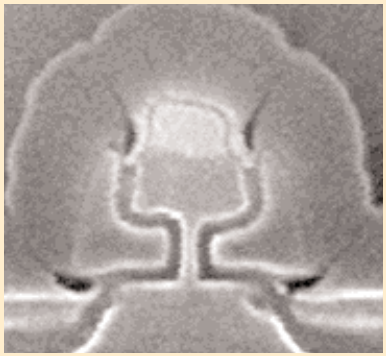
dopées (p ou n), séparées par une mince couche de semi-conducteur inversement dopée. L'assemblage de deux semi-conducteurs de types opposés (jonction p-n) permet de ne faire passer le courant que dans un sens. Qu'ils soient de type n-p-n ou p-n-p, les transistors bipolaires sont fondamentalement des amplificateurs de courant, commandés par un courant de grille[1] : ainsi dans un transistor n-p-n, la tension appliquée à la partie p contrôle le passage du courant entre les deux régions n. Les circuits logiques utilisant des transistors bipolaires, appelés TTL *(Transistor Transistor Logic)*, sont plus consommateurs de courant que les transistors à effet de champ, qui présentent un courant de grille nul en régime statique et sont commandés par l'application d'une tension.

Ce sont ces derniers, sous la forme **MOS** (Métal oxyde semi-conducteur), qui composent aujourd'hui la plupart des circuits logiques du type CMOS (C pour complémentaire)[2]. Sur un cristal de silicium de type p, deux régions de type n sont créées par dopage de la surface. Appelées là aussi **source** et **drain**, ces deux régions ne sont donc séparées que par un petit espace de type p, le **canal**. Sous l'effet d'une tension positive sur une électrode de commande placée au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain (figure). Lorsqu'une tension négative est appliquée sur la grille, isolée électriquement par une couche d'oxyde, les électrons sont repoussés hors du canal. Plus la tension positive est élevée, plus la résistance du canal diminue et plus ce dernier laisse passer de courant.

Dans un circuit intégré, les transistors et les autres composants (diodes, condensateurs, résistances) sont d'origine incorporés au sein d'une "puce" aux fonctions plus ou moins complexes. Le circuit est constitué d'un empilement de couches de matériaux conducteurs ou isolants délimitées par **lithographie** (encadré E, *La lithographie clé de la miniaturisation*, p. 37). L'exemple le plus emblématique est le microprocesseur placé au cœur des ordinateurs et qui regroupe plusieurs centaines de millions de transistors (dont la taille a été réduite par 10 000 depuis les années 1960) et bientôt un milliard, ce qui amène les industriels à fractionner le cœur des processeurs en plusieurs sous-unités travaillant en parallèle !

Lucent Technologies Inc./Bell Labs

Le tout premier transistor.



STMicroelectronics

Transistor 8 nanomètres développé par l'Alliance Crolles2 réunissant STMicroelectrronics, Philips et Freescale Semiconductor.

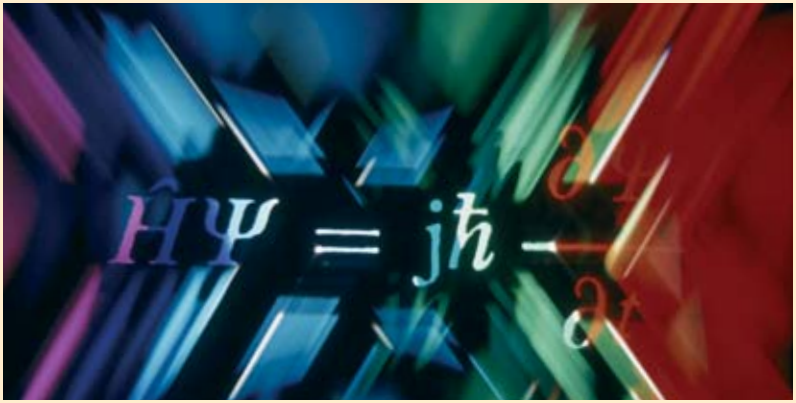
(1) Figurent dans cette catégorie les **transistors de type Schottky** ou **à barrière Schottky** qui sont des transistors à effet de champ comportant une grille de commande de type métal/semi-conducteur qui améliore la mobilité des porteurs de charge et le temps de réponse au prix d'une plus grande complexité.

(2) On parle alors de transistor **MOSFET** *(Metal-Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)*.

B Quelques repères de physique quantique

La physique quantique (historiquement dénommée mécanique quantique) est l'ensemble des lois physiques qui s'appliquent à l'échelle microscopique. Fondamentalement différentes de la plupart de celles qui semblent s'appliquer à notre propre échelle, elles n'en constituent pas moins le socle global de la physique à toutes ses échelles. Mais à l'échelle macroscopique, ses manifestations ne nous apparaissent pas étranges, à l'exception d'un certain nombre de phénomènes *a priori* curieux, comme la supraconductivité ou la superfluidité, qui justement ne s'expliquent que par les lois de la physique quantique. Au demeurant, le passage du domaine de validité des lois paradoxales de cette physique à celui des lois, plus simples à imaginer, de la physique classique peut s'expliquer d'une façon très générale, comme cela sera évoqué plus loin.

La physique quantique tire son nom d'une caractéristique essentielle des objets quantiques : des caractéristiques comme le moment angulaire (spin) des particules sont des quantités discrètes ou discontinues appelées quanta, qui ne peuvent prendre que des valeurs multiples d'un *quantum* élémentaire. Il existe de même un quantum d'action (produit d'une énergie par une durée) appelé constante de Planck (h), dont la valeur est de $6{,}626 \cdot 10^{-34}$ joule·seconde. Alors que la physique classique distingue *ondes* et *corpuscules*, la physique quantique englobe en quelque sorte ces deux concepts dans un troisième, qui dépasse la simple dualité onde-corpuscule entrevue par Louis de Broglie, et qui, quand nous tentons de l'appréhender, semble tantôt proche du premier et tantôt du deuxième. L'objet quantique constitue une entité inséparable de ses conditions d'observation, sans attribut propre. Et cela, qu'il s'agisse d'une particule – en aucun cas assimilable à une bille minuscule qui suivrait une quelconque trajectoire – de lumière (photon) ou de matière (électron, proton, neutron, atome...).



D. Sarraute/CEA

"Vue d'artiste" de l'équation de Schrödinger.

Cette caractéristique donne toute sa force au principe d'incertitude d'Heisenberg, autre base de la physique quantique. Selon ce principe (d'*indétermination* plutôt que d'*incertitude*), il est impossible de définir avec précision à un instant donné *à la fois* la position d'une particule et sa vitesse. La mesure, qui reste possible, n'aura jamais une précision meilleure que *h*, la constante de Planck. Ces grandeurs n'ayant pas de réalité intrinsèque en dehors du processus d'observation, cette détermination simultanée de la position et de la vitesse est simplement impossible.

B (Suite)

C'est qu'à tout instant l'objet quantique présente la caractéristique de *superposer* plusieurs états, comme une onde peut être le résultat de l'*addition* de plusieurs autres. Dans le domaine quantique, la hauteur d'une onde (assimilable à celle d'une vague par exemple) a pour équivalent une **amplitude de probabilité** (ou onde de probabilité), nombre complexe associé à chacun des états possibles d'un système qualifié ainsi de quantique. Mathématiquement, un état physique d'un tel système est représenté par un **vecteur d'état**, fonction qui, en vertu du principe de superposition, peut s'ajouter à d'autres. Autrement dit, la somme de deux vecteurs d'état possibles d'un système est *aussi* un vecteur d'état possible du système. De plus, le produit de deux espaces vectoriels est aussi la somme de produits de vecteurs, ce qui traduit l'**intrication** : un vecteur d'état étant généralement étalé dans l'espace, l'idée de localité des objets ne va plus de soi. Dans une paire de particules intriquées, c'est-à-dire créées ensemble ou ayant déjà interagi l'une sur l'autre, décrite par le *produit* et non par la *somme* de deux vecteurs d'état individuels, le destin de chacune est lié à celui de l'autre, quelle que soit la distance qui pourra les séparer. Cette caractéristique, également appelée *l'enchevêtrement quantique d'états*, a des implications vertigineuses, sans parler des applications imaginables, de la cryptographie quantique à – pourquoi ne pas rêver ? – la téléportation.

Dès lors, la possibilité de prévoir le comportement d'un système quantique n'est qu'une prédictibilité probabiliste et statistique. L'objet quantique est en quelque sorte une "juxtaposition de possibles". Tant que la mesure sur lui n'est pas faite, la grandeur censée quantifier la propriété physique recherchée n'est pas strictement définie. Mais dès que cette mesure est engagée, elle détruit la **superposition quantique**, par *réduction du paquet d'ondes*, comme Werner Heisenberg l'énonçait en 1927.

Toutes les propriétés d'un système quantique peuvent être déduites à partir de l'équation proposée l'année précédente par Erwin Schrödinger. La résolution de cette **équation de Schrödinger** permet de déterminer l'énergie du système ainsi que la **fonction d'onde**, notion qui a donc tendance à être remplacée par celle d'amplitude de probabilité.

Selon un autre grand principe de la physique quantique, le **principe (d'exclusion) de Pauli**, deux particules identiques de spin ½ (c'est-à-dire des **fermions**, en particulier les électrons) ne peuvent avoir à la fois la même position, le même spin et la même vitesse (dans les limites posées par le principe d'incertitude), c'est-à-dire se trouver dans le même *état quantique*. Les **bosons** (en particulier les photons), ne suivent pas ce principe et peuvent se trouver dans le même état quantique.

La coexistence des **états superposés** donne sa **cohérence** au système quantique. Dès lors, la théorie de la **décohérence quantique** peut expliquer pourquoi les objets macroscopiques ont un comportement "classique" tandis que les objets microscopiques, atomes et autres particules, ont un comportement quantique. Plus sûrement encore qu'un dispositif de mesure pointu, "l'environnement" (l'air, le rayonnement ambiant, etc.) exerce son influence, éliminant radicalement toutes les *superpositions d'état* à cette échelle. Plus le système considéré est gros, plus il est en effet couplé à un grand nombre de degrés de liberté de cet environnement. Et donc moins il a de "chances" – pour rester dans la logique probabiliste – de sauvegarder une quelconque cohérence quantique.

POUR EN SAVOIR PLUS

Étienne Klein, *Petit voyage dans le monde des quanta*, Champs, Flammarion, 2004.