

# Glossaire

**nanomètre** : 1 nm =  $10^{-9}$  mètre.

**nanoparticule/nanostructure** : particule/structure de taille nanométrique.

**nanosstructuration** : formation de motifs structuraux à l'échelle nanométrique.

**nanotube de carbone** : structure cristalline constituée d'un ou plusieurs feuillets de graphène enroulés sur eux-mêmes, d'un diamètre nanométrique mais dont la longueur peut atteindre plusieurs, voire plusieurs centaines de micromètres. Il peut être soit métallique, soit semi-conducteur, selon l'orientation de l'enroulement.

**NEMS (Nano Electro Mechanical System)** : système électromécanique nanoscopique.

**neutron** : particule fondamentale électriquement neutre, de masse  $1,675 \cdot 10^{-27}$  kg. Les neutrons constituent, avec les protons, les noyaux des atomes.

**niveau atomique** : niveau d'énergie qu'un atome peut présenter suivant son état, *fondamental* ou *excité*.

**niveau de Fermi** : niveau d'énergie représentant un lieu d'équilibre particulier (donné par la fonction de Fermi) entre le nombre d'électrons dans la bande de conduction et le nombre de trous dans la bande de valence. Dans un semi-conducteur intrinsèque, il se situe au milieu de la bande interdite. Dans un matériau dopé *n*, le niveau de Fermi se situe légèrement en dessous du minimum de la bande de conduction et dans un matériau dopé *p*, légèrement au-dessus du maximum de la bande de valence.

**nucléation** : étape d'agrégation dans l'arrangement correct d'objets en train de croître. Dans le cas d'un polymère, ce processus retarde l'assemblage des monomères.

**nucléotide** : un nucléotide consiste en une base azotée, un glucide à cinq carbone et un ou plusieurs groupements phosphate.

**osmose** : transfert du solvant d'une solution diluée vers une solution concentrée à travers une membrane. **Électro-osmose** : processus de ce transfert sous l'influence d'un champ électrique, du pôle positif vers le pôle négatif.

**ouverture numérique (NA, numerical aperture)** : valeur utilisée pour caractériser la luminosité, définir la profondeur de champ et la résolution du système optique d'une lentille de focalisation (en particulier de microscope) calculée à partir de la formule  $n \sin \theta$ , où  $2\theta$  correspond à l'angle (ouverture angulaire) d'entrée d'un point objet sur l'axe optique au niveau de la pupille d'entrée et  $n$  correspond à l'indice de réflexion du support de l'objet. La résolution est le rapport de la longueur d'onde de la lumière sur l'ouverture numérique.

**oxydation** : réaction au cours de laquelle un atome ou un ion perd des électrons. La plus courante est celle dans laquelle un composé se combine avec un ou plusieurs atomes d'oxygène.

**oxydo-réduction** : réaction dans laquelle un réducteur cède un ou plusieurs électrons à un oxydant. Dans l'état d'équilibre final coexistent donc l'oxydant, le réducteur et leurs conjugués respectifs.

**PCR (Polymerase Chain Reaction)** : réaction de polymérisation en chaîne, technique qui permet d'amplifier *in vitro* un fragment d'ADN grâce à l'enzyme ADN polymérase.

**paire de Cooper : électrons** regroupés par deux pour former un système se comportant comme un boson, particule de spin entier, alors que les électrons isolés sont des fermions (particules de spin demi-entier). Cet appariement est en particulier à la base des phénomènes de supraconductivité et de superfluidité. Les deux électrons ont la même quantité de mouvement, mais de signe opposé.

**paire électron-trou (ou exciton)** : paire de porteurs non liés à un atome et donc aptes à se déplacer dans l'ensemble du cristal où ils sont apparus et dont l'un est négatif (électron dans la bande de conduction) et l'autre positif (absence d'électron dans la bande de valence).

**peptide** : polymère formé d'un petit nombre d'acides aminés.

**permittivité diélectrique (ou constante diélectrique)** : exprime le pouvoir électriquement isolant d'un matériau. Exprimée par rapport à celle de l'air (égale à celle du vide) en picofarad/mètre (pF/m).

**pH** : mesure de la concentration en ions hydrogène. En dessous d'un pH 7 il est dit *acide*, au-dessus *alcalin*.

**phonon** : mode propre de vibration du réseau cristallin d'un solide.

**phosphorescence** : émission lumineuse liée à la désexcitation lente d'atomes excités par un rayonnement lumineux (visible ou non) dont l'énergie est "récupérée" par les électrons dans certains corps. Ce phénomène de (photo)luminescence se différencie de la fluorescence par la durée élevée séparant l'absorption de la réémission.

**photoblanchiment (photobleaching)** : trop forte exposition à la lumière excitatrice pouvant "éteindre" le phénomène de fluorescence.

**photon : quantum** d'énergie d'un rayonnement électromagnétique. Particule élémentaire de masse nulle et sans charge électrique associée à ce rayonnement (lumière visible, infrarouge, ultraviolet, gamma ou X suivant son énergie).

**photo-oxydation : oxydation** d'une molécule à partir de l'énergie d'un photon.

**photovoltaïque** : effet qui permet de convertir directement la lumière en électricité par le biais de la production et du transport de charges électriques dans un matériau semi-conducteur comportant une partie présentant un excès d'électrons et une autre un déficit.

**piézoélectrique** : propriété que manifestent certains matériaux de changer de polarisation électrique lorsqu'une pression leur est appliquée. L'effet inverse existe, un champ électrique appliqué à un matériau piézoélectrique entraînant sa déformation.

**pixel** : plus petit élément d'une image.

**plasma** : milieu constitué d'atomes plus ou moins ionisés, d'électrons libres et de photons.

**polaire (molécule) : molécule** à l'intérieur de laquelle les charges ne sont pas réparties de manière homogène. Dans une liaison covalente simple entre deux atomes hétéronucléaires, si les atomes sont d'électronégativités différentes, les barycentres des charges négatives et positives ne coïncident pas. La liaison est dite polarisée.

**polarisé** : dont le vecteur de champ électrique décrivant une vibration électromagnétique se situe dans un plan défini. **Polariseur** : dispositif qui contraint cette vibration dans ce plan. **L'analyseur** permet de mesurer la rotation du plan de la lumière polarisée causée par la traversée d'un échantillon.

**polymère conjugué** : chaîne polymère caractérisée par une alternance de liaisons carbone-carbone saturées et insaturées, conduisant à la présence d'électrons délocalisés (électrons pi).

**polymérisation** : ajout progressif de molécules de monomères les unes aux autres par des liaisons covalentes, formant un polymère, macromolécule de poids moléculaire élevé répétant un même motif. Une copolymérisation met en jeu au moins deux monomères différents.

**pompage optique** : procédé utilisé dans les lasers pour obtenir l'*inversion de population*, qui consiste à fournir l'énergie nécessaire pour obtenir plus d'**atomes** excités (à un niveau énergétique supérieur) que d'atomes non excités (à un niveau énergétique inférieur), en les éclairant avec un flash puissant.

**porphyrine** : macrocycle hétérocyclique **aromatique** constitué de quatre sous-unités de **pyrrole** jointes sur les carbone *alpha* par 4 ponts méthine [-CH= chaque fois vers deux autres **atomes**, une liaison simple du type carbone-hydrogène, et une double liaison). Les porphyrines entrent dans la composition de l'hémoglobine et de la chlorophylle.

**porte logique** : **circuit intégré** capable d'effectuer le traitement d'états logiques (existence d'une tension positive constante [état noté 1] ou existence d'une tension nulle [état noté 0]).

**porteurs (de charge)** : **électrons** de **conduction** : le courant électrique est un déplacement de porteurs de charge.

**précipitation** : formation d'une substance solide insoluble (**précipité**) par réaction chimique entre deux (ou plusieurs) composés en solution.

**protéine** : constituant macromoléculaire principal des cellules, constitué par l'enchaînement, codé par l'**ADN**, d'**acides aminés**. Un acide aminé (il en existe vingt naturels) est une **molécule** organique contenant un groupement **amine** (NH<sub>2</sub>) et un groupement **carboxylique** (COOH) qui permet la formation de la liaison **peptidique** CO-NH entre les différents acides aminés.

**protéome** : ensemble des **protéines** exprimées par une cellule et fabriquées par "traduction" des **ARN messagers**, eux-mêmes transcrits à partir des **gènes** dont l'ensemble constitue le **génom**e d'une espèce donnée. La **protéomique** est la discipline liée à l'étude du protéome.

**proton** : particule élémentaire portant une charge électrique positive égale et opposée à celle de l'**électron**.

**puce à ADN** : dispositif permettant de détecter la présence d'un brin d'**ADN** par appariement de ce brin avec son complémentaire fixé sur la puce, appelé **sonde**, sur des sites d'**hybridation** selon le principe de la double hélice d'ADN. Cette technique permet, par exemple, d'analyser globalement l'expression **généti**que d'une cellule.

**puits quantique** : composant de dimension **nanométrique** dans lequel chaque **électron** ne peut se déplacer que dans deux dimensions de l'espace, contraint par un **semi-conducteur** de plus grande **bande interdite**.

**pyrrole** : anneau **aromatique** à cinq membres, dont quatre sont des **atomes** de carbone et l'autre un atome d'azote. La formule **moléculaire** est C<sub>4</sub>NH<sub>5</sub>.

**quantique** : qui relève de la théorie développée à partir du principe des quanta de Planck (toute manifestation de l'énergie ne peut s'exprimer que par une valeur **discrète** appelée **quantum**) et du **principe d'incertitude d'Heisenberg** (plutôt d'indétermination) selon lequel il n'est pas possible de mesurer en même temps avec précision la position et la vitesse d'une particule.

**quantum** : unité indivisible.

**quantum dots (QDs)** : nanocristaux **semi-conducteurs fluorescents** ; fluorophores inorganiques très brillants et beaucoup moins sensibles au **photoblanchiment**, contrairement aux fluorophores organiques qui, exposés à une source d'excitation, sont dégradés en quelques minutes et émettent de moins en moins de fluorescence.

**radiofréquence (composant rf)** : composant assurant le traitement d'un signal dans la gamme des fréquences radio.

**raies d'émission** : raies spectrales (brillantes) qui apparaissent lors de la décomposition des rayonnements émis directement par un corps porté à très haute température (**spectre d'émission**). **Raies d'absorption** : raies spectrales (obscurcies) qui apparaissent lors de la décomposition des rayonnements après traversée d'un milieu (**spectre d'absorption**).

**rayonnement infrarouge (IR)** : partie du spectre électromagnétique couvrant les rayonnements dont les longueurs d'onde sont comprises entre 760-780 **nm** et 1 mm. Elle se subdivise en **IR proche** (760 nm - 4 µm), **IR moyen** (4 - 14 µm), **IR lointain** (14 µm - 100 µm) et **IR submillimétrique** (100 µm - 1 mm).

**rayonnement synchrotron** : rayonnement caractéristique de toute particule chargée soumise à une accélération. Dans le cas de particules relativistes, le rayonnement revêt des qualités exceptionnelles (domaine spectral continu de l'**infrarouge** aux **rayons X**, faible divergence, polarisation, cohérence, structure temporelle), utilisables pour sonder la structure et les propriétés électroniques de la matière.

**rayonnement ultraviolet (UV)** : région du spectre électromagnétique caractérisée par une longueur d'onde de 100 à 400 nm qui se subdivise en plusieurs sous-régions : le **proche ultraviolet** (250 à 400 nm), l'**ultraviolet lointain** (180 à 250 nm) et l'ultraviolet dit "du vide" (100 à 180 nm). L'**ultraviolet extrême (UVE)** correspond à des longueurs d'onde entre 100 et 10 nm.

**rayonnement visible** : partie du spectre électromagnétique constituée par les rayonnements dont la longueur d'onde se situe entre 400 et 760-780 nm.

**rayons X** : rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde, comparable aux distances interatomiques, est comprise entre quelques fractions de **nanomètre** (0,005 nm) et entre 1 et 100 nm et l'énergie entre quelques **keV** et centaines de keV.

**redox (pour réduction/oxydation)** : potentiel définissant l'affinité d'une **molécule** pour les **électrons** ; **centre redox** : groupement moléculaire participant aux transferts d'électrons entre molécules.

**réduction** : réaction au cours de laquelle un **atome** ou un **ion** gagne des **électrons** cédés par un **réducteur**. L'inverse d'une réaction d'**oxydation**.

**réflexion spéculaire** : composante de la réflexion optique qui est angulairement définie (par opposition à la réflexion diffuse).

**réfraction** : changement de direction d'un rayonnement passant d'un milieu à un autre.

**relaxation** : retour d'un système d'un état d'énergie élevée (dit *excité*) vers un état d'énergie plus basse.

**répulsion coulombienne ; barrière coulombienne** : répulsion électrique qui s'oppose au rapprochement de deux particules chargées (**protons** de deux **noyaux**, notamment) de même signe.

**résistivité** : résistance spécifique d'un matériau au mouvement des **électrons**.

**résolution** : plus petite valeur discernable lors de l'acquisition ou de la restitution d'une information. Elle mesure en particulier l'aptitude d'un système optique à distinguer ou à reproduire les détails d'une scène ou de son image.

**réticulation** : pontage de chaînes **polymériques**.

**RMN (résonance magnétique nucléaire)** : son principe est basé sur les propriétés que certains noyaux d'**atomes** acquièrent lorsqu'ils sont placés dans un champ magnétique intense. Ils

peuvent alors interagir avec des ondes radio pour émettre des signaux (spectres ou images) qui permettent d'identifier la structure des composés présents.

**ségrégation** : séparation d'espèces homogènes.

**semi-conducteur** : matériau possédant une **bande interdite**, ni purement isolant ni purement conducteur à température non nulle, et dont il est possible de faire varier les propriétés électroniques. Certains de ses **électrons** très faiblement liés à leurs **atomes** peuvent devenir des électrons de **conduction**. De **type n** (électrons **porteurs de charge** majoritaires) ou de **type p** (**trous** porteurs de charge majoritaires) selon les **dopants** utilisés. Les semi-conducteurs appartiennent à trois familles en fonction des groupes de la table périodique auxquels les éléments appartiennent : **II-VI**, **III-V** et **IV**.

**séquence** : ordre d'enchaînement des éléments constitutifs dans les **polymères** biologiques (**ADN**, **ARN**, **protéines**).

**signal de battement** : signal dont l'amplitude de pulsation est la résultante des pulsations différentes de deux signaux différents.

**silicium : semi-conducteur** le plus répandu utilisé dans la fabrication des **circuits intégrés**.

**SOC (System-on-chip)** : regroupement sur une seule et même puce de l'ensemble des composants matériels et logiciels d'un système dédié à une fonction spécifique.

**SOI (Silicon-on-Insulator)** : technologie (**silicium** sur isolant) dans laquelle un film de silicium ultra-mince est transféré sur un support mécanique isolant (selon le procédé *Smart Cut*<sup>TM</sup> breveté par le CEA-Leti) permettant notamment d'augmenter les performances et de diminuer la consommation des microprocesseurs.

**sol-gel** : procédé de synthèse chimique utilisant une solution contenant des précurseurs réactifs tels que les alcoxydes ou les sels métalliques et se décomposant en deux étapes : **hydrolyse** et condensation (formulation d'un réseau **covalent**). La suspension **colloïdale (sol)** est constituée d'une phase solide de **granulométrie** comprise entre un **nm** et un **µm** dispersée dans un liquide. Après condensation, la solution évolue vers la formation d'un système de plus grande complexité moléculaire emprisonnant le solvant, le *gel*.

**sonde** : dans une **puce à ADN**, chaque brin d'**ADN** auquel peut venir s'apparier, sur un site d'**hybridation**, son complémentaire.

**spectrométrie de masse** : méthode qui permet de déterminer la composition d'un échantillon par l'étude, après bombardement électronique et séparation magnétique ou électrique, des **ions** fragments. L'ensemble de ces derniers constitue le *spectre de masse* dont la lecture permet d'identifier la structure **moléculaire**.

**spectroscopie** : étude des corps à partir des rayonnements qu'ils émettent ou des transformations que leur font subir d'autres corps placés sur leur trajet.

**spin** : moment angulaire (ou moment de rotation interne intrinsèque) d'une particule, de valeur entière ou demi-entière.

**spintronique (ou électronique de spin)** : discipline qui se fonde sur le **spin** des **électrons**.

**stérique** : relatif à l'encombrement spatial des **atomes** et des **molécules**.

**stœchiométrie** : étude des proportions suivant lesquelles, au cours d'une réaction chimique, les réactifs se combinent et les produits se forment. Une réaction est **stœchiométrique** lorsque les quantités de réactifs sont dans des proportions **molaires** identiques à celles de l'équation de la réaction.

**supraconducteur** : métal ou alliage dont la **résistivité** tombe brusquement à une valeur quasi nulle à une température *critique* (**supraconductivité**).

**supramoléculaire** : qui se rapporte à l'utilisation des interactions faibles entre les **molécules**.

**surface vicinale** : surface obtenue lorsque l'on coupe un **crystal** par un plan faiblement désorienté par rapport à un plan **cristallin** de grande densité **atomique**. Elle se présente comme une succession périodique de *terrasses* séparées par des *marches* de hauteur monoatomique.

**suspension** : système où une ou plusieurs phases sont dispersées dans un milieu dispersif liquide ou gazeux.

**template - templating** : gabarit pour la création "d'empreintes" avec éventuellement un effet porogène.

**tensio-actif (en anglais surfactant)** : substance dont chaque **molécule**, constituée d'une partie **hydrophile** et d'une partie **hydrophobe**, a la propriété de diminuer la tension superficielle du liquide dans lequel elle est dissoute, solubilisant dans l'eau des produits non miscibles par formation de **micelles** et détruisant les membranes biologiques par solubilisation des constituants.

**tension de polarisation** : tension qu'il faut appliquer à un **transistor** pour obtenir le courant de **drain** désiré.

**tension de seuil** : valeur qui caractérise un **transistor** et qui correspond à la tension de **grille** qui le fait passer de l'état bloqué à l'état conducteur.

**théorie de la fonctionnelle de densité** : fonctionnelle universelle permettant de calculer l'énergie d'un système **quantique** à *n* particules à partir de la densité.

**thermolyses** : décomposition d'un corps par la chaleur.

**transcriptome** : partie transcrite du **génom**e d'une cellule dans des conditions données et exprimée sous forme d'**ARN messagers**.

**transfection** : processus par lequel du matériel génétique (par exemple **ADN** ou **ARNsi**) est inséré dans une cellule.

**transformée de Fourier** : formule mathématique complexe qui consiste à "peser" le poids relatif de chaque fréquence dans un signal temporel afin d'en donner une représentation spectrale.

**triode : diode** à laquelle est ajoutée une **grille** de commande du flux électronique. Elle sert d'élément amplificateur.

**turbulence** : mode d'écoulement d'un fluide dans lequel se superpose au mouvement moyen un mouvement d'agitation aléatoire.

**valence** : nombre de liaisons qu'un **atome** peut former.

**Van der Waals (forces de -)** : forces de diverses natures, de faible intensité et dont l'influence diminue rapidement avec la distance, entre **atomes** et **molécules** neutres (énergie de cohésion de l'ordre de 0,2 eV/atome). La **liaison de Van der Waals** met en jeu des forces attractives entre dipôles instantanés (dues au déplacement des **électrons**), l'énergie de cette liaison étant cent fois plus faible qu'une **liaison covalente**.

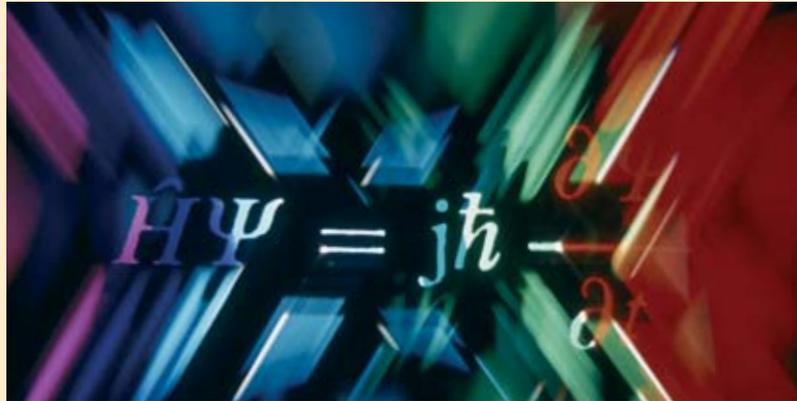
**virus** : organisme ne pouvant se reproduire qu'à l'intérieur des cellules et ne contenant qu'un **acide nucléique**.

**waffer** : tranche très fine de **silicium** (en général) sur laquelle sont gravés collectivement des circuits électroniques, puis qui est découpée, afin d'obtenir des **circuits intégrés**.

## 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)



D. Sarrault/CEA

“Vue d’artiste” de l’équation de Schrödinger.

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...**).

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  $\frac{1}{2}$  (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.

## 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 ( $\text{SiO}_2$ ), 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** micro-

électroniques, 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

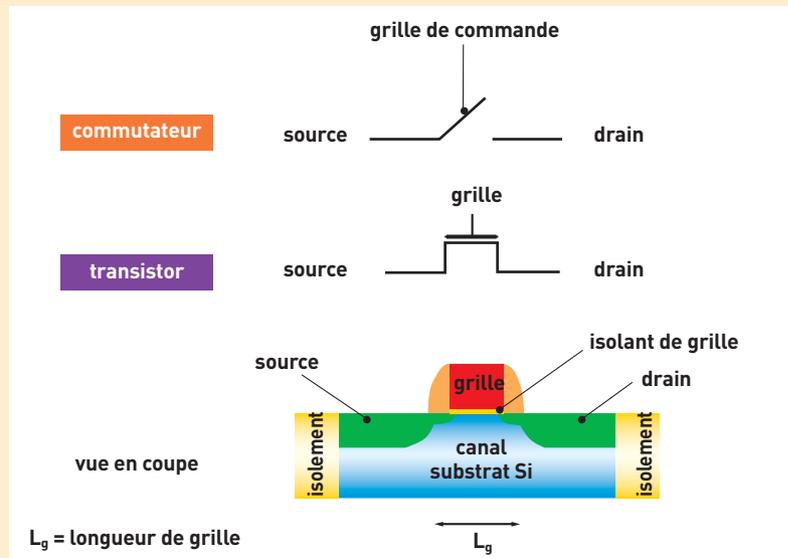


Figure. Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

## 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<sup>(1)</sup> : 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)<sup>(2)</sup>. 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

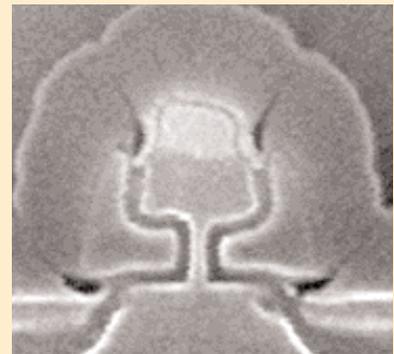
au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain (figure). Lorsqu'une tension négative 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 !

(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*).



Le tout premier transistor.



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