Glossaire

acide nucléique : polymère constitué par l'enchaînement de **nucléotides**. Il en existe deux types : les **ARN** (acide ribonucléique), en particulier l'**ARN messager** qui spécifie la **séquence** d'**acides aminés** d'une **protéine** et l'**ADN** (acide désoxyribonucléique) qui sert de support à l'information **génétique** au sein de chaque cellule vivante.

adsorption : fixation de **molécules** sur une surface solide par un processus généralement passif et non spécifique (par exemple, par effet **électrostatique** en milieux gazeux ou liquide).

agrégats : petits grains de matière composés d'un très petit nombre d'**atomes** ou de **molécules**, voire de cellules, liés les uns aux autres par des forces plus ou moins faibles, en général de façon irréversible.

algorithme : enchaînement des opérations logico-mathématiques nécessaires à l'accomplissement d'une tâche de calcul.

allotropique : se dit d'un corps qui garde ses propriétés chimiques malgré une modification de sa structure **cristalline**.

amine : groupement NH_2.

amphiphile : qui présente à la fois des régions **hydrophobes** et des régions **hydrophiles**.

anisotrope : dont les propriétés varient suivant la direction (*ant.* **isotrope**).

anode : nom de l'**électrode** positive d'un dispositif électrique.

aromatique : composé ou **molécule** qui contient des **atomes** de carbone dans un cycle formé d'une alternance de liaisons simples et de liaisons doubles, comme le benzène (six atomes).

atome : brique de base de la matière ordinaire, composé d'un **noyau** (**protons** et **neutrons**) autour duquel gravitent des **électrons**.

attraction coulombienne : force d'attraction entre deux charges électriques de signes opposés.

bactérie : micro-organisme unicellulaire ne comportant pas de noyau distinct et se multipliant rapidement.

balistique : dont le mouvement relève uniquement de l'impulsion initiale et de la gravitation (sens commun) *ou* propagation sans interaction avec les vibrations du réseau **cristallin** ou de la **molécule**, donc sans atténuation.

bandes d'énergie : plages d'énergie disponibles pour les **électrons** dans la matière.

bande (électronique interdite) directe ou **indirecte :** un **semi-conducteur** a une structure de **bandes électroniques**, plages d'énergie disponibles pour les **électrons** dans la matière, liées à la nature périodique de l'arrangement atomique dans le **cristal** et à la nature ondulatoire des électrons. La **bande interdite** (***gap***) se situe entre une bande permise et pleine (ou quasi pleine à température non nulle), la **bande de valence**, et une bande vide ou quasi vide, la **bande de conduction**. Les **photons** d'énergie supérieure à la bande interdite génèrent des **porteurs de charge** par transition des **électrons** entre les bandes permises. Le franchissement de la bande interdite peut se faire avec émission de **phonons** : il est alors question de bande interdite **indirecte** (cas du **silicium**) – ou sans émission (bande interdite **directe**).

bande (photonique interdite) : concept lancé dans les années quatre-vingt en même temps que celui des **cristaux** photoniques avec la suggestion d'inhiber, par la création d'une périodicité artificielle dans des matériaux **diélectriques**, la propagation des **photons** de façon similaire à celle des électrons dont l'énergie est située dans une **bande interdite** (***gap***) dans les **semi-conducteurs**.

bases (paires de -) **:** terme désignant les purines et les pyrimidines des **molécules** d'**ADN** et d'**ARN**.

biomimétique : qualifie un composé ou un procédé créé par analogie avec une substance ou un processus biologique.

biopuce : microdispositif capable de réaliser des analyses à caractère biologique. La **puce à ADN**, par exemple, permet de détecter la présence de brins d'**ADN** par appariement avec leurs complémentaires, appelés **sondes**, fixés sur la puce.

bit : unité élémentaire d'information. En informatique classique, elle peut prendre deux valeurs généralement notées 0 et 1.

blocage de Coulomb : effet **électrostatique** dû à la **répulsion coulombienne** que ressent un **électron** quand il s'approche d'un objet chargé. Un point **quantique** ayant une capacitance très petite, son énergie totale est pour l'essentiel dominée par l'énergie de charge, qui empêche tout courant de traverser la structure, sauf pour des valeurs **discrètes** d'un paramètre de contrôle extérieur.

boîte quantique : composant de dimension **nanométrique** dans lequel chaque **électron** n'a plus aucun degré de liberté, contraint par un **semi-conducteur** de plus grande **bande interdite**.

bruit de grenaille ou **de Schottky** : bruit **quantique** dû à la nature **discrète** de la lumière, les **photons** étant émis de façon aléatoire, ou attribuable à la nature corpusculaire d'un débit de charges électriques. (Le calcul de la valeur de la variation du bruit de grenaille se fait par la formule de Schottky).

capacité : est définie comme le rapport de la charge accumulée sur la tension appliquée aux bornes.

capacitif (effet -) **:** accumulation de charges par influence **électrostatique** lorsqu'une différence de potentiel est appliquée à deux conducteurs isolés l'un de l'autre. Effet recherché dans les condensateurs (exemple de **dispositif capacitif**), mais subi par exemple lors d'accumulation de charges entre deux lignes conductrices (**couplage capacitif**).

capillaires (forces) **:** forces se développant à l'interface liquide/solide et intervenant dans la forme de sa frontière avec le milieu ambiant, à l'influence d'autant plus sensible que les dimensions sont faibles.

catalyse : processus impliquant une substance (**catalyseur**) capable d'accélérer une réaction chimique sans subir elle-même de modifications, sinon temporaires.

cathode : nom de l'**électrode** négative d'un dispositif électrique.

cellule souche : cellule pouvant se diviser indéfiniment et donner naissance à des cellules filles capables de subir une *différenciation*, à l'origine des différents tissus.

chimie douce : chimie dont les réactions se déroulent généralement en solution et à basse température.

chiral : propriété d'une **molécule** de ne pas être superposable à son image dans un miroir plan.

coalescence : réunion de particules en particules plus grosses.

code (de calcul) **:** voir **modélisation numérique**.

colloïdal : mélange de particules ultramicroscopiques dispersées uniformément dans une substance pour formuler une **suspension** ou un **gel**.

compartiment (dans un organisme vivant ou un écosystème) **:** espace biologique, le plus souvent de nature virtuelle mais de volume mesurable, occupé de manière homogène (concentration) par une substance ou une population **moléculaire** ayant un comportement donné et une forme physico-chimique unique.

conductance : intensité de courant qu'une résistance donnée peut laisser passer à une différence de potentiel donnée. Inverse de la *résistance*, elle est égale à l'intensité divisée par le potentiel électrique. Unité : le siemens (S). La **transconductance** est cette intensité par unité de longueur (S/m).

conduction électronique ou **ionique :** phénomène par lequel un **électron** ou un **ion** se déplace dans un matériau.

conductivité électrique : caractérise la capacité de **conduction** (électrique, thermique) d'un matériau. S'exprime en siemens par unité de longueur.

constante diélectrique : rapport (K) entre la **permittivité** absolue d'un **diélectrique** et la **permittivité du vide**.

coordination : liaisons qu'un **ion** établit avec des **atomes** donneurs d'**électrons**. Le *nombre de coordination* est le nombre de liaisons qu'un ion est capable d'établir avec de tels atomes.

courant de fuite : courant parasite conduit par **effet tunnel** à travers l'isolant de **grille**.

covalent : qui participe à la liaison chimique de deux **atomes** par la mise en commun d'**électrons**.

cristal : assemblage d'**atomes**, d'**ions** ou de **molécules** régulièrement répartis de façon périodique dans les trois directions de l'espace.

croissance de germe : mode de croissance **cristalline** dans lequel on commence par fabriquer un petit monocristal aussi parfait que possible ensuite placé dans une solution sursaturée du produit à cristalliser afin de le faire croître.

CVD (*Chemical Vapor Deposition*, dépôt chimique en phase vapeur) **:** méthode de préparation de couches minces par dépôt en phase vapeur formé par réaction chimique à partir d'un milieu gazeux de composition différente.

diamant : une des trois formes **allotropiques** du carbone, à structure **cristalline** cubique et à **indice de réfraction** très élevé.

diélectrique : substance isolante, capable d'emmagasiner de l'énergie **électrostatique**. Un diélectrique est caractérisé par sa **permittivité** ou *constante diélectrique*. Dans un **condensateur**, le diélectrique est placé entre deux plaques ou feuilles conductrices.

diffraction : déviation que subit la direction de propagation des ondes (acoustiques, lumineuses, **rayons X**...) lorsqu'elles rencontrent un obstacle ou une ouverture de dimensions du même ordre de grandeur que leur longueur d'onde.

diffraction de rayons X : méthode qui permet d'obtenir des informations sur les structures de la matière, en particulier **cristallines**, la longueur d'onde des faisceaux étant de l'ordre de grandeur des distances internucléaires.

diode : élément unidirectionnel d'un circuit électronique (**porte**). Composant formé par la jonction de deux **semi-conducteurs** inventé en 1904 par Flemming sous le nom de "valve" pour la détection de la modulation d'amplitude et le redressement du courant alternatif. L'**anode** ou *plaque* entourait la **cathode**, chauffée par le filament, chargée d'émettre des **électrons**. En l'absence de tension d'alimentation, le nuage d'électrons qui se forme autour de la cathode constitue une charge négative qui repousse les électrons qui voudraient s'en échapper. Le courant maximum qui peut traverser la diode dépend de la nature et de la température de la cathode.

diode laser : source de lumière cohérente dont l'intensité du faisceau peut varier par application d'une tension variable.

discret : discontinu (discrétiser consiste à séparer).

dislocation : perturbation prenant la forme d'un glissement localisé affectant une rangée **atomique** dans un réseau **cristallin**.

dopant : atome étranger introduit dans un réseau **cristallin** afin d'en modifier les propriétés. Par exemple, un **semi-conducteur** sera dopé pour voir ses propriétés électriques modifiées, par la présence d'un niveau énergétique **discret** *permis* dans la **bande interdite** près de la **bande de valence** ou de la **bande de conduction**. L'atome introduit cède ainsi un **électron** ou un **trou** mobile à l'une ou l'autre bande permise, ce qui augmente la **conductivité électrique** du matériau.

dopage *n* : dopage se traduisant par un excès d'**électrons**.

dopage *p* : dopage se traduisant par un déficit en **électrons**.

dynamique moléculaire : consiste à étudier les mouvements des **atomes** au sein d'une **molécule**, d'un solide, d'un liquide ou d'un gaz en appliquant les lois de la mécanique newtonienne classique pour simuler les mouvements atomiques au cours du temps. Ces mouvements correspondent à des vibrations autour d'un minimum ou au passage d'un minimum d'énergie à un autre.

effet de champ (ou **émission froide**) **:** force due à la pression **électrostatique**, toujours dirigée vers l'extérieur, qui peut éjecter les charges de la surface d'un conducteur chargé positivement. Cette force est utilisée dans les microscopes à émission par effet de champ.

effet Joule : dégagement de chaleur lié à la résistance d'un conducteur au passage du courant électrique.

électrode : élément conducteur remplissant des fonctions d'émission, de captation ou de commande, par un champ électrique, des **électrons** ou des **ions** (on distingue **anode** et **cathode**).

électrolyse : décomposition, sous la forme d'un déplacement d'**ions**, sous l'influence d'une différence de potentiel électrique, vers des **électrodes** respectivement positive et négative.

électron : particule élémentaire chargée négativement.

électronvolt (**eV**) **:** unité d'énergie égale à $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ joule. C'est l'énergie acquise par un **électron** accéléré par un potentiel de 1 volt (multiple : le **keV** qui vaut 10^3 eV).

électrophorèse : méthode de séparation de constituants selon leur vitesse de migration dans un champ électrique. Les **molécules** sont fractionnées selon leur charge et leur poids moléculaire.

électrostatique : basé sur des charges électriques ne se déplaçant pas (champ électrique constant).

enzyme : macro**molécule** de nature **protéique** qui active en la **catalysant** une réaction biochimique.

exciton : paire **électron-trou**.

Fabry-Pérot (cavité de - ; interféromètre de -) **:** instrument d'analyse optique composé de deux miroirs partiellement réfléchissants se faisant face, l'un monté sur un mouvement de translation, l'autre possédant un réglage en rotation. L'ensemble est placé devant la source de lumière à étudier, qui produit des franges d'interférence. Le faisceau incident est divisé en une multitude de faisceaux secondaires de faibles amplitudes. Lorsqu'ils sont parallèles, leurs amplitudes s'ajoutent et interfèrent. Le FP ne laisse passer que certaines longueurs d'onde provenant de la source, en fonction de la distance séparant les miroirs, inversement proportionnelle à la largeur des pics de transmission observés.

fluorescence : émission de lumière provoquée par l'absorption d'un flux incident (de lumière, d'un rayonnement électromagnétique **X** ou d'**électrons**) puis la désexcitation rapide des électrons des couches **atomiques** externes du corps luminescent, cette perte d'énergie se traduisant par l'émission d'une nouvelle radiation électromagnétique. Si sa longueur d'onde se situe dans la partie visible du spectre, il y a **luminescence**.

flux magnétique : mesure de l'induction magnétique (nombre de lignes magnétiques), exprimée en webers (Wb).

fonctionnalisation : dans une acception large, adaptation d'un objet chimique, physique ou biologique pour lui faire exécuter les fonctions recherchées. Dans une acception plus étroite, on parlera par exemple de fonctionnalisation des surfaces pour fixer à un matériau certains groupements fonctionnels chimiques.

fullerène : troisième forme **allotropique** du carbone après le **graphite** et le **diamant**. Elle a la propriété de former des cages fermées (C_{60}) dont la structure rappelle celle d'un ballon de football.

Glossaire

gène : séquence d'**ADN** sur un chromosome constituant une unité d'information héréditaire qui permet la réalisation d'un caractère **phénotypique** *via* la production d'une ou de plusieurs **protéines**.

génome : ensemble du matériel **génétique** d'un organisme vivant.

granulométrie : mesure des dimensions et détermination de la forme des particules ou des grains des produits pulvérulents ou en suspension.

graphite : une des trois formes **allotropiques** du carbone à structure **cristalline** en feuillets de **graphène** dans laquelle chaque **atome** est lié à trois de ses voisins.

guide d'onde : dispositif destiné à guider une ou des ondes électromagnétiques entre deux points (peu éloignés) avec un minimum de pertes d'énergie par rayonnement.

hybridation : capacité des **bases** d'un brin d'**acide nucléique** de reconnaître spontanément les bases complémentaires pour s'y apparier.

hydrocarbure : molécule composée uniquement de carbone et d'hydrogène.

hydrolyse : décomposition d'une espèce chimique (**molécule** ou **ion**) par l'eau.

hydrophile/hydrophobe : qui attire/repousse l'eau.

indice optique (indice de réfraction) **:** quantité sans dimension définissant la résistance d'un milieu à la pénétration de la lumière. Cet indice, qui dépend du rapport de la vitesse de la lumière dans le vide à sa vitesse dans le milieu considéré, est égal au rapport entre le sinus de l'angle incident et le sinus de l'angle réfracté lors du passage d'un milieu à un autre.

inductance : quotient du flux d'induction à travers un circuit créé par le courant traversant ce circuit, par l'intensité de ce courant. S'exprime en henry.

interaction de Coulomb ou **coulombienne :** interaction électrique *attractive* pour deux particules de charges opposées et *répulsive* dans le cas inverse. Elle se manifeste avec deux intensités différentes : à l'intérieur des noyaux, la force répulsive entre deux **protons**, de l'ordre du **MeV**, s'efface devant l'interaction forte qui assure la cohésion du noyau ; à large distance, la force de répulsion gouverne l'interaction avec une énergie de l'ordre de l'**eV**.

interstitiel : atome excédentaire se trouvant entre les plans du réseau **cristallin**.

in vitro (en latin "dans le verre") **:** par référence aux analyses pratiquées dans des récipients en verre, tout ce qui concerne les examens en laboratoire sur des produits biologiques hors de l'organisme vivant, par opposition à ***in vivo*** ("dans le vivant").

ion : atome (ou **molécule**) qui a perdu ou gagné un ou plusieurs **électrons** et se trouve ainsi électriquement chargé.

jonction Josephson : jonction entre deux **électrodes supraconductrices** établie en les séparant par une couche d'isolant assez mince pour que les paires d'**électrons** puissent la traverser par **effet tunnel**.

jonction *p/n* : zone de création d'un champ électrique entre un **semi-conducteur** de type *n* (**électrons** excédentaires) et un de type *p* (électrons manquants), qui deviennent respectivement chargés positivement et négativement.

lab-on-chip (laboratoire sur puce) **: biopuce** intégrant un grand nombre de fonctions d'analyse élémentaires habituellement réalisées en laboratoire.

lacune : emplacement dans un réseau **cristallin** laissé vacant par un **atome** déplacé.

laser à excimère : laser dont la cavité de résonance contient un gaz halogéné (mélange argon-fluor, par exemple) et qui délivre des impulsions de lumière dans l'**UV** sur des durées de l'ordre de la nanoseconde et d'une énergie de l'ordre de quelques centaines de millijoules.

liaison covalente : liaison entre deux **atomes** qui saturent leur dernière orbite en partageant une ou plusieurs paires d'**électrons**.

liaison hydrogène : liaison (vingt fois plus faible qu'une **liaison covalente**) pouvant s'établir entre deux **molécules** d'eau du fait de leur nature **polaire**.

liaison ionocovalente : liaison à la fois **ionique** (se caractérisant par le *transfert* d'**électrons** entre un **ion** et un **cation**) et **covalente** (partage d'électrons entre deux **atomes**).

ligand : toute **molécule** pouvant se lier à une autre, en particulier molécule organique capable de se lier avec sélectivité et avec une haute affinité à un *récepteur* biologique. Molécule ou **ion** unis à l'**atome** central d'un **complexe** par une liaison de **coordination**.

lipide/lipidique : corps renfermant un acide gras ou un dérivé d'acide gras.

luminescence : émission de lumière liée à un facteur d'excitation : rayonnement (**photoluminescence**), courant électrique, réaction chimique...

maille (cristalline) **:** motif élémentaire d'un **cristal**.

mémoire DRAM *(Dynamic Random Access Memory)* **:** mémoire à accès aléatoire dynamique.

mémoire MRAM *(Magnetic (Dynamic) Random Access Memory)* **:** mémoire magnétique à accès aléatoire.

MEMS *(Micro Electro Mechanical System)* **:** système électromécanique microscopique.

mésoscopique : qui se situe à une échelle intermédiaire entre les échelles microscopique et macroscopique : une **mésostructure** est une structure à cette échelle.

métabolome : ensemble des composés organiques (les métabolites) présents dans une cellule, soit produits par ses **enzymes** (codés par son **génome**), soit captés dans son environnement.

micelle : organisation sphérique de **molécules** comprenant une partie **hydrophile** et une partie **hydrophobe**. En milieu aqueux, les parties hydrophiles s'organisent à son contact et les parties hydrophobes au centre.

micromètre (ou **micron**) **:** 1 **µm** = 10^{-6} mètre.

modèle *ab initio* : type de **modélisation** effectué à partir des "premiers principes", c'est-à-dire de la connaissance de phénomènes de base, sans paramètre ajustable, par opposition à la **modélisation empirique**. Un calcul ***ab initio***, effectué à partir de données théoriques, est censé être plus prédictif.

modélisation : représentation simplifiée d'un système ou d'un processus afin de le simuler. Une **modélisation numérique** est une modélisation traduite dans un logiciel informatique (souvent appelé **code**).

mole : unité (symbole : **mol**) de quantité de matière d'un système contenant autant d'**atomes** ou de **molécules** qu'il y a d'atomes dans 0,012 kg de carbone 12, soit $6{,}03 \cdot 10^{23}$ (nombre d'Avogadro).

molécule : groupe d'**atomes** liés par des liaisons chimiques.

Monte-Carlo (méthode de -) **:** méthode statistique d'approximation de la valeur d'une intégrale en utilisant un ensemble de points aléatoirement distribués selon une certaine probabilité. Elle consiste à répéter l'attribution d'une valeur numérique dépendant du déroulement d'un processus où le hasard intervient puis à calculer une moyenne et sa dispersion statistique (traduisant sa précision) sur l'ensemble des valeurs obtenues.

nanofil : structure unidimensionnelle de matériau **semi-conducteur** dont le diamètre est de l'ordre de 1 à 10 **nm** et la longueur de quelques nm à quelques **µm**.

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

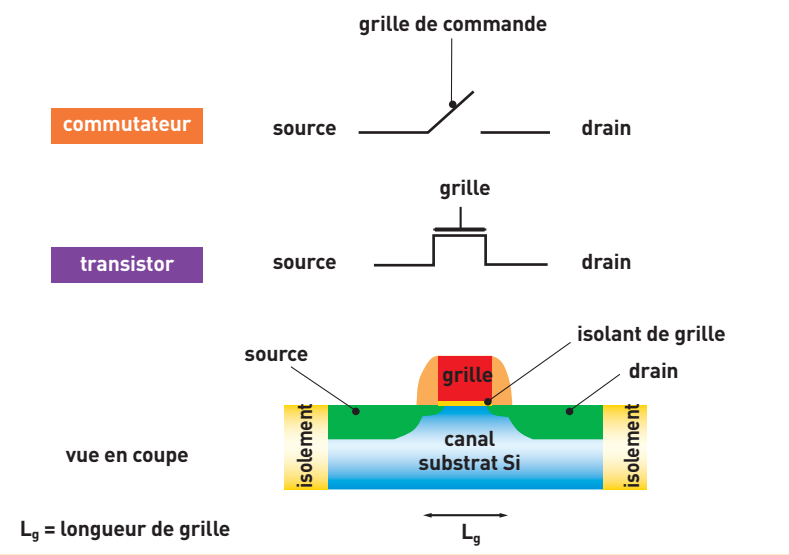


Figure.
Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

D (Suite)

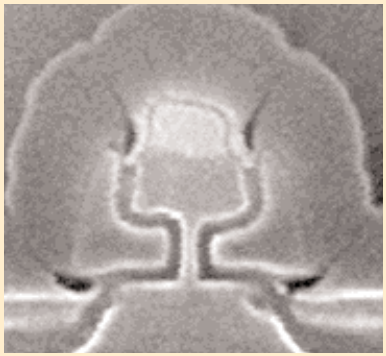
dopées (p ou n), séparées par une mince couche de semi-conducteur inversement dopée. L'assemblage de deux semi-conducteurs de types opposés (jonction p-n) permet de ne faire passer le courant que dans un sens. Qu'ils soient de type n-p-n ou p-n-p, les transistors bipolaires sont fondamentalement des 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)*.

G L'effet tunnel, un phénomène quantique

La physique quantique prédit des comportements inhabituels et difficiles à accepter par notre intuition immédiate, comme l'effet tunnel. Prenons le cas d'une bille devant franchir une bosse. En physique classique, si l'énergie communiquée à la bille est insuffisante, elle ne peut pas franchir la bosse et retombe vers son point de départ. En physique quantique, une particule (proton, électron) peut franchir la bosse, même si son énergie initiale est insuffisante : elle peut passer de l'autre côté comme par un petit tunnel. L'effet tunnel peut ainsi permettre à deux protons de surmonter leur répulsion électrique à des vitesses relatives plus basses que celles qu'indique le calcul classique. La microscopie à effet tunnel est basée sur le fait qu'il y a une probabilité non nulle qu'une particule d'énergie inférieure à la hauteur d'une barrière de potentiel (la bosse) puisse la franchir. Les particules sont des électrons traversant l'espace séparant deux électrodes, une fine pointe métallique terminée par un atome unique et la surface métallique ou semi-conductrice de l'échantillon. La physique classique donne d'une surface l'image d'une frontière étanche, les électrons étant strictement confinés à l'intérieur du solide. Par contre, la physique quantique enseigne que chaque électron a un comportement ondulatoire : sa position est "floue". En particulier, au voisinage de la surface existe un nuage d'électrons dont la densité décroît très rapidement, de façon exponentielle, lorsque l'on s'éloigne du solide. L'électron a une certaine probabilité de se trouver "en dehors" du solide. Quand la fine pointe métallique est approchée de la surface, à une distance inférieure au nanomètre, la fonction d'onde associée à l'électron n'est pas nulle de l'autre côté de la barrière de potentiel, et les électrons passent de la surface à la pointe, et réciproquement, par effet tunnel. La barrière de potentiel franchie par les électrons est appelée barrière tunnel. Lorsqu'une faible tension est appliquée entre la pointe et la surface, un courant tunnel peut être détecté. La pointe et la surface étudiée forment localement une jonction tunnel. L'effet tunnel se manifeste également dans les jonctions Josephson où un courant continu peut passer à travers une étroite discontinuité entre deux éléments supraconducteurs. Dans un transistor, l'effet tunnel peut se révéler de manière parasite quand l'isolant de grille devient très mince (de l'ordre du nanomètre). Il est par contre mis à profit dans de nouvelles architectures, tels les transistors à barrière tunnel Schottky ou à base de nanotubes de carbone.