

Vers des processeurs quantiques ?

Pourra-t-on construire un jour un processeur tirant parti de la physique quantique dans son principe même de fonctionnement ? Un tel dispositif traiterait l'information de façon intrinsèquement parallèle, et effectuerait certains calculs beaucoup plus efficacement que les ordinateurs actuels. Le Groupe quantronique du CEA développe des circuits supraconducteurs qui pourraient être les briques de base d'un tel processeur quantique : des éléments mémoires (bits) et des portes logiques quantiques.

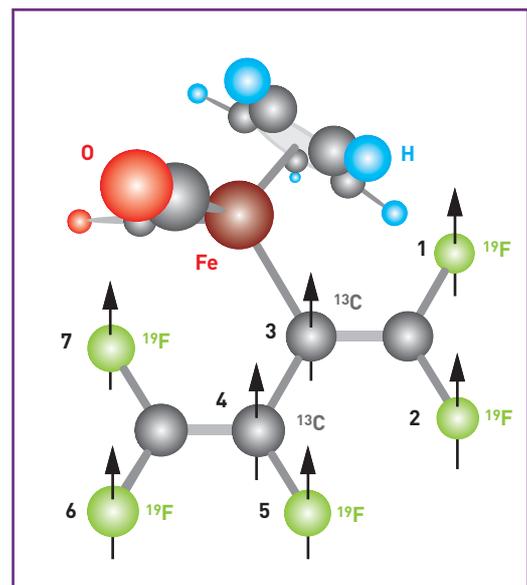
Pour mieux faire percevoir le comportement étrange des objets **quantiques**, le physicien Gamow avait imaginé un monde dans lequel les objets à notre échelle seraient très quantiques. Dans un tel monde, un tigre délocalisé dans l'espace, par exemple, pourrait être touché par une balle tirée dans une autre direction, entre autres bizarreries. Durant la dernière décennie, des théoriciens ont ajouté un chapitre plus réaliste à cette œuvre imaginative en proposant des plans de machines quantiques, plus précisément d'ordinateurs, qui fonctionneraient dans le monde tel qu'il est.

Le rêve de l'ordinateur quantique

En tirant pleinement parti des lois de la **physique quantique** (encadré B, *Quelques repères de physique quantique*, p. 16), de tels ordinateurs pourraient effectuer des calculs inaccessibles aux machines actuelles, qui ne peuvent effectuer que le traitement *séquentiel* d'un ensemble de données (voir *Les bases du calcul quantique*). La puissance du calcul quantique provient du parallélisme intrinsèque à la mécanique éponyme : si on fournit à l'entrée d'un processeur quantique un **état superposé** de données d'entrée, on retrouve à sa sortie la superposition correspondante des données traitées. Malgré l'avantage évident que semble procurer la mécanique quantique, peu d'**algorithmes** ont été découverts car tout le gain est en général perdu à la lecture du résultat d'un calcul ! La disparition rapide des états "enchevêtrés" d'un système, ou **décohérence**, ensemble des phénomènes physiques qui rendent le monde non quantique à notre échelle, fait dès lors de la réalisation d'un ordinateur quantique un véritable défi.

Le calcul quantique était même considéré comme une curiosité jusqu'à la découverte en 1994, par l'Américain Peter Shor, d'un algorithme quantique pour la factorisation des grands nombres. Ce résultat a eu un grand retentissement, car la difficulté de la factorisation est justement à la base des algorithmes actuellement utilisés en cryptographie ! Plus important encore, le même Peter Shor et d'autres théoriciens ont prouvé en 1996 que les algorithmes quantiques pouvaient être rendus robustes vis-à-vis de la décohérence, au prix toutefois d'une forte redondance.

Le foisonnement de travaux théoriques déclenché par cette série de découvertes s'est bien sûr accompagné d'une recherche tous azimuts de systèmes physiques dans lesquels ces fameux algorithmes quantiques pourraient être mis en œuvre. Disons tout de suite que le système idéal n'a pas encore été trouvé, mais que des progrès significatifs ont été effectués dans plusieurs domaines. Partant de systèmes très quantiques comme



La molécule à sept "aimants nucléaires" utilisée par le groupe "quanta" du MIT pour le calcul de la factorisation du nombre 15.

des **spins** nucléaires (à la base de la **résonance magnétique nucléaire**, la **RMN**), ou d'**ions** piégés dans des cavités (optique quantique), plusieurs groupes ont déjà construit des **portes logiques** élémentaires. En utilisant les méthodes de RMN à haute résolution mises au point pour la chimie, le groupe de Isaac Chuang, au MIT, a ainsi réussi à mettre en œuvre l'algorithme de factorisation pour le nombre 15. Pour ce faire, une molécule à sept "aimants nucléaires" couplés a été conçue et synthétisée. La RMN ne permettra toutefois pas d'obtenir un processeur avec un grand nombre de **bits** quantiques (qubit) car le signal utile décroît très vite avec le nombre de qubits considérés. Il serait par ailleurs très difficile de synthétiser une **molécule** avec assez de spins nucléaires couplés pour "jouer" un grand nombre d'algorithmes. Les chaînes d'ions piégés manipulés individuellement par des impulsions laser sont plus proches du concept de processeur quantique car il s'agit ici d'un seul système, dans lequel les qubits sont manipulés et lus individuellement, et couplés entre eux. Toutefois, intégrer des pièges à ions dans des circuits semble aussi très difficile.

Bien qu'encourageantes, ces expériences de démonstration se heurtent donc à terme à une difficulté majeure : la taille des systèmes manipulables sera toujours trop faible pour supporter des algorithmes utiles. En fait, la souplesse de dessin et de construction des circuits électroniques par les méthodes de la microélectronique fait

grandement défaut à ces approches microscopiques. Sans cette souplesse, nécessaire pour construire des circuits complexes, l'avenir de l'ordinateur quantique semble fermé. Mais pourquoi un circuit électronique n'est-il pas en général tout aussi quantique qu'un atome ? Parce qu'un tel circuit, comportant déjà un grand nombre d'atomes, des fils de connexion, etc., est soumis à une "observation" permanente de la part de son environnement : courants et tensions dans les fils du circuit deviennent alors des quantités bien définies à tout instant, qui obéissent aux règles du monde classique. Il est alors impossible de placer le circuit dans une superposition d'états correspondant à des courants différents afin de bénéficier du parallélisme quantique.

Pour rendre un circuit électronique quantique, il faut donc le découpler de son environnement, sans pour autant supprimer les connexions qui permettent de le faire fonctionner et de le mesurer ! C'est cette gageure que résout le circuit **supraconducteur** récemment fabriqué par une équipe du Service de physique de l'état condensé du Département de recherche sur l'état condensé, les atomes et les molécules (Drecam) du CEA. Ce circuit a été appelé *quantronium* pour bien marquer sa ressemblance avec les atomes réels et très quantiques.

Le quantronium, un atome artificiel

Le quantronium, réalisé par le Groupe quantronique au CEA/Saclay⁽¹⁾, est constitué d'une boucle supraconductrice en aluminium, interrompue par trois **jonctions Josephson** (figure 1, p. 20). Une jonction Josephson s'obtient en séparant deux **électrodes** supraconductrices par une couche d'isolant assez mince pour que les paires d'électrons (dans les supraconducteurs, les électrons sont combinés en **paires de Cooper**) puissent passer à travers par **effet tunnel**. Deux des jonctions, de petite taille, délimitent une "île" avec une faible **capacité**. L'île est si petite que l'addition d'une seule paire d'électrons nécessite une quantité substantielle d'énergie, que les fluctuations thermiques ne peuvent pas fournir à basse température. Ces états de charge sont couplés par les petites jonctions Josephson situées à gauche sur le schéma, et les états du bit quantique, notés $|0\rangle$ et $|1\rangle$, en sont des combinaisons. La troisième jonction, de taille bien supérieure, sert à lire l'état quantique du système. La supraconductivité joue ici plusieurs rôles. Elle fournit tout d'abord une structure de niveaux quantiques avec un doublet bien séparé des autres niveaux, les deux niveaux du bit quantique. Ensuite, l'ensemble des électrons étant appariés, il n'y a plus de mouvement aléatoire thermique des électrons à basse température qui produirait une source majeure de décohérence pour le bit quantique.

La structure des niveaux du quantronium, qui est un atome artificiel, est contrôlée par la charge **électrostatique** couplée à l'île et par le flux du champ magnétique passant à travers la boucle. Ces paramètres de contrôle sont les analogues des champs électrique et magnétique pour un atome. L'avantage du quantronium par rapport aux circuits précédemment étudiés est de présenter un point de fonctionnement pour lequel le circuit est presque parfaitement découplé de

son environnement, bien que les fils soient toujours présents. Un tel point de fonctionnement s'obtient lorsque la différence d'énergie entre les deux états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ est insensible aux petites variations des paramètres de contrôle. Réciproquement, en un tel point, les états ne font passer aucun courant dans la boucle ou dans les fils de connexion, ce qui rend la mesure impossible, mais l'état du bit quantique reste manipulable en appliquant sur la **grille** couplée à l'île des impulsions micro-ondes accordées sur la fréquence de transition entre les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$ du qubit, tout comme une impulsion laser appliquée à un atome permet de changer son état quantique. La lecture de l'état du bit quantique s'effectue ensuite en appliquant une impulsion de courant à travers le circuit, de façon à déclencher ou non, selon l'état du bit quantique, l'apparition d'une tension aux bornes de la jonction de mesure. En effet, l'application d'un courant à travers le circuit, équivalente à l'application d'un flux à travers la boucle du circuit, révèle les courants circulant dans la boucle pour chaque état quantique. Comme ces courants sont différents (et même de signes opposés) pour les deux états du bit quantique, le courant supraconducteur à travers la jonction de mesure dépend de l'état du bit quantique. Si ce supercourant dépasse le supercourant maximum possible à travers la jonction de mesure, une tension finie apparaît aux bornes du circuit. La mesure de la tension discrimine donc les deux états du bit quantique. Dans les expériences réalisées, la probabilité P d'observer une tension finie, appelée probabilité de saut, suit la probabilité du bit quantique d'être dans l'état $|1\rangle$. C'est cette probabilité P qui est mesurée dans les expériences réalisées, et qui teste l'état du bit quantique.

Avec ce système de mesure, la plupart des expériences réalisables sur une transition entre deux **niveaux atomiques** ont pu être reproduites sur le quantronium. Ainsi, l'application d'une impulsion micro-onde de fréquence accordée sur la transition du bit quantique permet de préparer des superpositions du type $a|0\rangle + b|1\rangle$ des deux états du bit quantique. Les deux coefficients peuvent être des nombres complexes. En partant de l'état $|0\rangle$, celui-ci évolue périodiquement avec la durée de l'impulsion. Il passe par l'état $|1\rangle$ au bout d'une demi-période des oscillations, puis repasse par $|0\rangle$ au bout d'une période complète. Ces oscillations cohérentes entre deux états quantiques (figure 2) sont appelées *oscillations de Rabi* depuis leur première réalisation en physique atomique par Isaac Rabi. Leur observation apporte la preuve de la manipulation d'un système quantique.

Le temps de cohérence du quantronium

Pour qu'un bit quantique soit utilisable, il faut qu'un état superposé se maintienne bien plus longtemps que la durée d'une opération impliquant un ou deux bits quantiques. Le temps de **cohérence** d'un état superposé est donc une caractéristique essentielle d'un bit quantique. Pour mesurer ce temps de cohérence, on prépare un état superposé ($|0\rangle + |1\rangle$) avec une impulsion micro-onde. L'état obtenu est ensuite laissé à son évolution libre durant un temps Δt , puis une impulsion identique à la première est appliquée, et l'état du bit quantique est finalement lu. Cette expérience, dite des *franges de Ramsey* dans le contexte

(1) Voir l'article de Denis Vion *et al.*, *Science* **296**, 886 (2002) et la thèse d'A. Cottet sur le site : www-drecam.cea.fr/drecam/spec/Pres/Quantro/index.htm

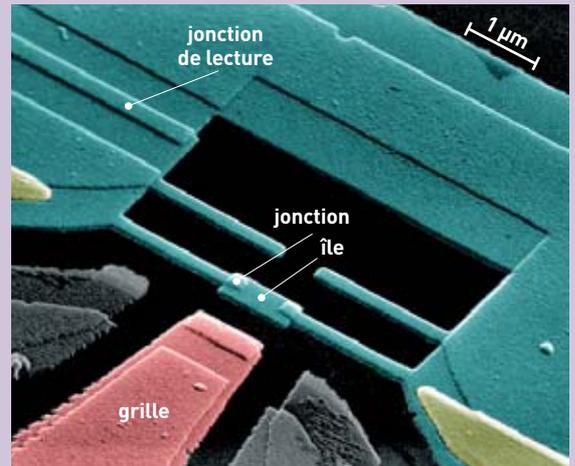
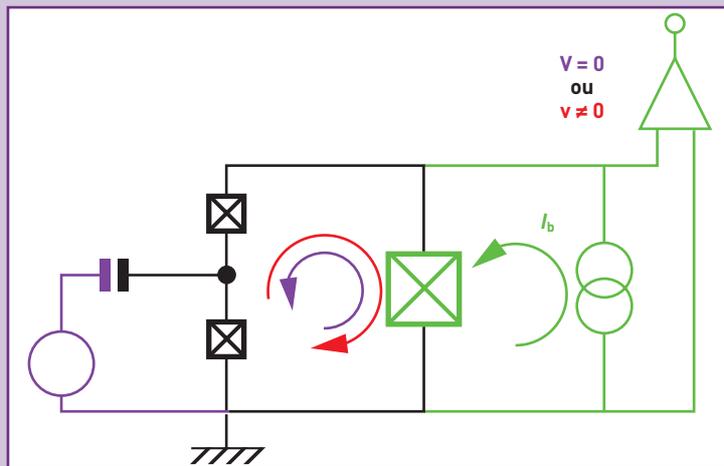


Figure 1.

Schéma et photographie au microscope électronique de la partie centrale du quantronium. Deux petites jonctions Josephson (croix dans un carré), qui déterminent une petite île, et une jonction de lecture (à droite) sont placées dans une boucle. Les parties grises sur la photo sont des couches d'aluminium (supraconducteur) dont le recouvrement crée les jonctions Josephson. Les paramètres de contrôle du quantronium sont la tension appliquée à une électrode de grille couplée capacitivement à l'île, et le flux magnétique à travers la boucle. Le courant de lecture I_b est équivalent pour le qubit à un flux supplémentaire qui développe le courant de boucle des deux états du qubit (flèche violette pour $|0\rangle$, rouge pour $|1\rangle$). Lorsque I_b approche le courant supraconducteur maximum possible pour la jonction de lecture, la probabilité de saut vers un état de tension finie est alors plus grande pour l'état $|1\rangle$ que pour l'état $|0\rangle$. La mesure de la tension aux bornes du circuit discrimine ainsi les deux états du qubit.

de la physique atomique, fournit en fonction du délai t un signal de battement (à la différence entre les fréquences de la transition et de la micro-onde) dont l'amplitude décroît avec la perte de cohérence de la superposition ($|0\rangle + |1\rangle$) (figure 3). Le temps de cohérence ainsi déterminé est bien optimal au point où la différence d'énergie entre les deux états est insensible aux petits changements des paramètres de contrôle, et sa valeur de 500 nanosecondes (ns) correspond à environ 10^4 oscillations cohérentes du bit quantique. Ce temps, plus court que les estimations théoriques, est limité dans l'expérience réalisée par du bruit résiduel : bruit en charge de l'île, et le bruit en flux à travers la boucle du circuit. Il est déjà plus long que la durée d'une opération à un bit (typiquement 2 ns), et que celle estimée pour une opération à deux bits. Et la marge de progression est importante.

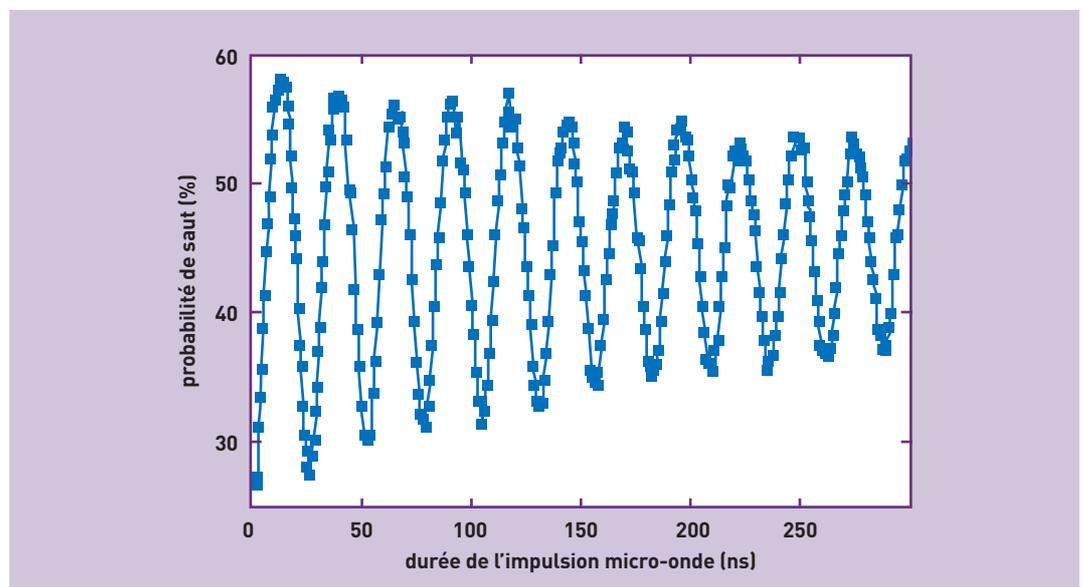
La RMN doublement à la rescousse

Le calcul quantique demandera des opérations arbitraires très précises de l'état de chaque bit quantique d'un processeur. En combinant des impulsions micro-ondes avec des phases décalées de $\pi/2$, le groupe quantique a démontré que des transformations arbitraires d'un bit quantique sont réalisables. En utilisant de plus la méthode RMN dite des impulsions composites, qui remplace une impulsion par un train de plusieurs impulsions, il a en outre montré qu'une transformation peut être robuste vis-à-vis d'imperfections expérimentales, comme un décalage de la fréquence de transition du bit quantique⁽²⁾.

Par ailleurs, il est possible de combattre la décohérence résiduelle pour améliorer le temps de cohérence du

(2) Collin et al., *Physical Review Letters* **93**, 157005 (2004).

Figure 2. Probabilité de saut après une impulsion micro-onde de durée variable. Cette courbe révèle les oscillations cohérentes de l'état quantique du qubit entre les états $|0\rangle$ et $|1\rangle$. Ces oscillations s'appellent oscillations de Rabi, d'après l'expérience analogue en physique atomique. Le qubit est à tout instant dans une superposition de ses deux états quantiques.



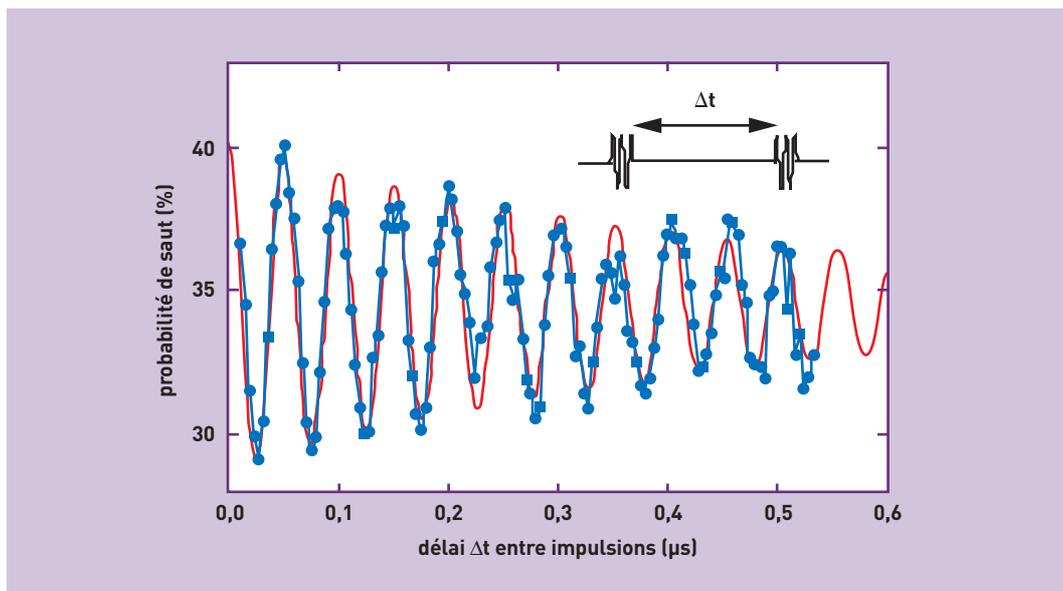


Figure 3. Détermination du temps de cohérence quantique du quntronium à partir de la décroissance des oscillations mesurées après deux impulsions de Rabi séparées par un délai Δt . La probabilité de trouver le bit quantique dans l'état 1 (points) oscille à la fréquence différence entre la micro-onde et la fréquence de transition du bit quantique entre ses deux états. Ces oscillations sont appelées oscillations de Ramsey, par analogie avec l'expérience similaire en physique atomique. Ces oscillations s'amortissent avec un temps caractéristique égal au temps de cohérence quantique des superpositions d'états du bit quantique. L'ajustement par une courbe sinusoïdale amortie donne un temps de cohérence de 500 ns, ce qui correspond à environ 10^6 oscillations cohérentes du bit quantique.

bit quantique avec des méthodes également inspirées de la RMN. La première est basée sur la technique d'échos: une impulsion micro-onde correspondant à une inversion de l'état quantique permet de compenser la décohérence subie durant deux périodes de durées identiques. Un signal est alors obtenu à des temps plus longs que le temps de cohérence. L'application continue d'une excitation micro-onde sur la grille permet aussi d'augmenter le temps de cohérence effectif d'une superposition d'états. Ces méthodes rudimentaires de "correction d'erreurs" seront remplacées à terme par des codes correcteurs d'erreur quantiques, mais ceux-ci sont encore hors de portée pour les circuits réalisables à ce jour.

Si le quntronium est le premier exemple fonctionnel de bit quantique réalisé avec un circuit électronique, bien d'autres circuits sont actuelle-

ment développés, supraconducteurs ou non. Les résultats obtenus avec le quntronium démontrent qu'il est possible de combattre la décohérence et de rendre un circuit électronique véritablement quantique. Dans un avenir proche apparaîtront des processeurs à quelques bits quantiques, très rudimentaires, mais exploitant déjà les ressources du monde quantique dans leur principe même de fonctionnement. Plus important peut-être, cette voie de recherche permettra de tester et de mieux comprendre les lois étonnantes de la physique quantique, et de préciser la frontière entre les mondes quantique et classique.

> Daniel Estève

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

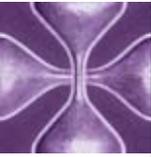
Les bases du calcul quantique

Les bases théoriques du calcul quantique sont établies, les premières expériences concluantes. Mais les chercheurs sont encore loin de pouvoir réellement imaginer l'architecture d'un ordinateur quantique. Sauront-ils faire des "qubits" le silicium d'après-demain ?

Dans son roman *Prisonniers du temps*, publié en 1998, l'auteur de science-fiction américain Michael Crichton utilise des ordinateurs **quantiques** pour calculer la manipulation spatio-temporelle nécessaire pour voyager dans le temps. Effet de mode ? Il y a eu en effet, dans les dix dernières années, un nombre incalculable de publications scientifiques et de vulgarisation sur ce sujet. Les chercheurs ont établi les principes théoriques de fonctionnement de ces

machines futuristes, inventé de nouveaux **algorithmes** qui leur sont dédiés, réfléchi à leur architecture et même essayé des prototypes.

Qu'y a-t-il de si spécial dans les ordinateurs quantiques ? La réponse est qu'ils peuvent, en théorie, apporter une solution à des problèmes qu'aucun ordinateur classique ne peut résoudre. Les informaticiens classifient les problèmes selon leur "complexité", qui traduit la façon dont le nombre de pas de calcul nécessaires à un



ordinateur varie avec la “taille” d’un problème. Par exemple, dans la multiplication de deux nombres entiers, cette taille est le nombre de chiffres dans le nombre le plus grand admissible. Les pionniers de l’informatique Alan Turing et Alonzo Church ont conjecturé en 1936 que n’importe quel ordinateur requiert pour une tâche donnée un nombre de pas qui ne varie pas plus qu’un polynôme de la taille du problème. Les problèmes “durs” sont ceux qui ne peuvent être résolus qu’après un nombre exponentiel de pas, par exemple en 2^N pas pour un problème de taille N . Les problèmes “faciles” peuvent être résolus dans un temps polynomial. Quand la taille d’un problème facile de taille 100 double, le nombre de pas pour le résoudre peut doubler ou augmenter d’un facteur 4, 8, ou même 1024. Mais, le nombre de pas exigés pour un problème dur augmentera d’un facteur de $2^{100} \approx 1,3 \cdot 10^{30}$! Un exemple de problème dur important consiste à trouver les facteurs premiers des grands nombres. La difficulté de cette tâche est à la base de beaucoup d’algorithmes cryptographiques. Si les progrès des ordinateurs classiques ont permis de “casser” les clés de 40 bits, les clés cryptographiques de 512 bits resteront *a priori* sûres pour toujours. À moins que l’ordinateur quantique (QC en anglais abrégé) n’apporte une solution !

Les idées fondamentales

Comme le nom le suggère, la mécanique quantique (encadré B, *Quelques repères de physique quantique*, p. 16) est au cœur des QC. Il est donc nécessaire d’en rappeler les principes. Chaque objet ou système d’objets isolé est décrit par une fonction, appelée **fonction d’onde** $|\psi\rangle$. Les physiciens disent qu’il est dans l’**état quantique** $|\psi\rangle$. Cette fonction varie dans le temps selon l’**équation de Schrödinger** $i\hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle = \hat{H} |\psi\rangle$, qui dépend à son tour du hamiltonien⁽¹⁾ \hat{H} du système (\hbar étant la **constante de Planck**).

(1) Le hamiltonien est un opérateur (opération qui agit sur une fonction en la transformant en une autre fonction) étroitement corrélé à l’énergie classique du système.

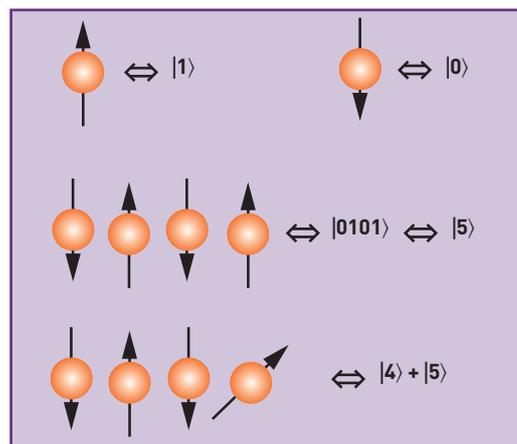


Figure. Représentation de nombres par les qubit, ici par les spins magnétiques. Le spin en haut signifie le “1”, spin en bas, le “0”. Le registre de 4 qubits est utilisé pour représenter le chiffre 5. Si le qubit le moins significatif est dans l’état de superposition, son spin est horizontal et le registre représente la superposition de 4 et de 5. La plupart des autres états de superposition exigent l’intrication de plusieurs qubits, qui ne peuvent pas être visualisés simplement.

À partir de cette équation, il faut appliquer l’hamiltonien pendant un certain temps afin de laisser évoluer l’état du système dans la direction souhaitée. Puisque cet hamiltonien est lié à l’énergie classique du système, cela implique la plupart du temps l’application d’une “force” à celui-ci. Par exemple, un champ électrique peut être appliqué à un **électron** et l’impulsion évoluera avec l’accélération de ce dernier.

Vient ensuite le postulat de mesure, l’un des moins intuitifs. Il dit que si nous mesurons un des “observables” caractérisant une particule, tels que sa position ou son impulsion orbitale, nous “effondrons” la fonction d’onde dans l’un des états spécifiques à cet observable, appelé *état propre*. N’importe quel autre état peut être exprimé comme une combinaison de ces états de base. Il est important de noter pour la suite que l’équation de Schrödinger est linéaire : l’évolution dans le temps d’une superposition des états propres est une **superposition** des mêmes états évolués.

L’idée selon laquelle un ordinateur basé sur les principes de mécanique quantique pourrait dépasser en performances n’importe quel ordinateur classique imaginable a été avancée par Richard P. Feynman en 1982 et développée ensuite par les chercheurs. L’architecture d’un tel ordinateur peut être imaginée semblable à celle des ordinateurs classiques. Prenons un système dont nous choisissons deux états quantiques en les appelant état $|0\rangle$ et état $|1\rangle$, le système dans l’un de ces états représentant le nombre correspondant. Si nous calculons correctement son évolution, nous pouvons faire en sorte que le système n’entre jamais dans aucun autre état, même s’il en existe.

Le parallélisme quantique

Cet élément est appelé *bit quantique* (*qubit* en abrégé). Sa différence fondamentale avec le bit classique ? Il peut exister dans un *continuum* d’états : n’importe quelle superposition de deux états de base est valide. Le qubit devient l’unité élémentaire de structure d’un ordinateur quantique, de la même façon qu’un commutateur à deux positions, qui peut stocker un bit, est celle d’un ordinateur classique. En utilisant davantage de qubits, nous pouvons représenter n’importe quel nombre (figure). Par exemple, si nous prenons 3 qubits et mettons l’un à gauche dans l’état $|1\rangle$, pendant que les deux autres sont dans l’état $|0\rangle$, nous représentons le nombre 4 en notation binaire : $|100\rangle$. Nous pouvons réaliser des **portes logiques** simples, agissant sur un qubit simple ou sur des paires et construire ensuite des opérations arithmétiques plus compliquées, comme un architecte d’ordinateur classique construit une unité centrale à partir de circuits **semi-conducteurs** effectuant des opérations logiques élémentaires comme “non”, “et” et “ou”.

En appliquant des transformations complexes, n’importe quelle opération arithmétique peut alors être faite sur les registres de qubits. Un registre avec N qubits aura 2^N états : $\underbrace{|00 \dots 00\rangle, |00 \dots 01\rangle, \dots, |11 \dots 11\rangle}_{2^N}$ de base.

Ainsi, si nous préparons l’état qui contient la superposition de tous les états possibles et faisons ensuite un calcul quelconque sur cet état, nous accomplirons ce calcul pour toute 2^N valeur possible de son argument dans un pas simple ! Un ordinateur classique mettrait

infiniment plus de temps à faire la même chose. C'est un exemple "de parallélisme quantique", concept crucial de l'informatique quantique, présenté par David Deutsch en 1985.

Malheureusement, ces résultats n'existent que dans la superposition de toutes les valeurs possibles de la fonction à calculer : si nous mesurons sa valeur, nous récupérerons seulement une possibilité *au hasard*, la fonction d'onde s'effondrerait dans une superposition d'états correspondant à la valeur mesurée. Il serait beaucoup plus intéressant de "concentrer" quelques renseignements utiles sur cette fonction dans un nombre unique, mettre ce nombre dans l'un des registres et le mesurer ensuite. En 1994, Peter W. Shor a suggéré une façon de parvenir à trouver une période d'une fonction quelconque. Pour un calcul des valeurs d'une fonction périodique, les états restants dans la superposition après la mesure se répèteront périodiquement. Par exemple pour une fonction périodique avec la période T , si on a mesuré la valeur y tel que $f(3) = y$, les états suivants seraient présentés $|\psi\rangle = |3\rangle + |3 + T\rangle + |3 + 2T\rangle + \dots$. Nous savons ensuite comment extraire des renseignements utiles d'une série périodique, par la **transformation de Fourier**. Après cette transformation, nous arrivons à l'état qui est la superposition harmonique de la fréquence recherchée $|1/T\rangle, |2/T\rangle, \dots$. Le nombre de pas exigés est une fonction polynomiale de la taille du problème. Pour un ordinateur classique, il augmente exponentiellement. Ainsi est mis en évidence un problème où un ordinateur quantique est beaucoup plus performant que son frère aîné classique (dans la théorie au moins), la conjecture de Church-Turing se trouvant réfutée.

L'algorithme utilisé pour trouver la période d'une fonction peut aussi l'être pour résoudre le problème de factorisation évoqué plus haut. Pour l'instant, il n'y a pas beaucoup d'algorithmes où les ordinateurs quantiques l'emportent sur les ordinateurs classiques. Lov K. Grover en a inventé un pour une recherche de base de données non ordonnée, qui montre une accélération modeste, d'ordre \sqrt{N} . Autre domaine, suggéré par Feynman, où les ordinateurs quantiques l'emporteront sur les classiques : la simulation des systèmes quantiques, très exigeante en moyens de calcul. L'état d'un système doté de N états de base est représenté par un point dans l'espace à 2^N dimensions. Pour tracer l'évolution quantique de systèmes relativement simples avec, par exemple, 30 états de base, il faut suivre 2^{30} nombres complexes !

La lutte contre la décohérence

Pour construire un QC, il faut satisfaire certaines exigences, dont celles d'être capable de réinitialiser l'ordinateur et de mesurer l'état de chaque qubit. Mais la plus difficile à satisfaire est le critère de faible **décohérence**. Les états de superposition sont très facilement détruits par l'interaction avec l'environnement, et ce processus doit prendre un certain temps. Heureusement, en 1995, Peter Shor et Andrew Steane ont proposé des schémas quantiques de correction d'erreur, dans leur principe similaires aux méthodes de correction employées classiquement dans les ordinateurs et la transmission de données. Une information redondante est utilisée et les données réelles sont combinées avec elle pour détecter d'éventuelles erreurs et les corriger. La correction quantique d'erreurs est plus compliquée qu'en mode



CEA/DSM/Dre.cam/ Groupe Quantronique/Yvanoe

classique pour plusieurs raisons. Premièrement, les erreurs ne sont pas **discrètes**, mais peuvent être arbitrairement petites. Autrement dit, le QC est un dispositif *analogique* où les erreurs se cumulent facilement. La correction d'erreur rend au QC un caractère *numérique*. Il apparaît alors possible de construire un ordinateur quantique si les unités élémentaires de sa structure peuvent rester intactes pendant environ 10^4 - 10^5 opérations.

Interprétation artistique d'une micrographie du quantrium, premier circuit électronique constituant un bit quantique. Le dessin ajouté au centre symbolise les superpositions d'états 0 et 1 dans lesquelles ce bit peut être préparé.

Trois équipes CEA en première ligne

Les principes de fonctionnement des ordinateurs quantiques posés, se pose la question de leur mise en œuvre. À la multitude de concepts de qubits déjà proposés, s'en ajoutent de nouveaux chaque mois, si ce n'est chaque semaine. Au CEA, trois équipes poursuivent leurs recherches sur ce thème au Service de physique de l'état condensé. Le plus avancé est le Groupe quantronique qui utilise le dispositif quantrium développé à Saclay (voir *Vers des processeurs quantiques*) et étudié, avec des variantes, par beaucoup d'autres chercheurs. Il contourne la difficulté d'obtenir au même temps une décohérence faible et le contrôle précis du qubit en utilisant des états de base qui peuvent être rendus relativement insensibles aux champs magnétiques et électriques aléatoires créés par les imperfections du substrat. Le fonctionnement d'un seul qubit "quantrium" avec le temps de décohérence respectable de 0,5 microseconde, suffisant pour effectuer environ 8000 opérations sans erreur, a été démontré. Celui de portes à deux qubits devrait l'être prochainement. Les chercheurs du CEA/Saclay travaillent sur une autre proposition, en coopération avec le *Royal Holloway College* de l'Université de Londres et quelques autres groupes de par le monde. Ce schéma est, d'une certaine façon, la combinaison de la plupart des autres concepts de qubit. Les qubits sont formés par des électrons, flottant sur une couche fine d'hélium liquide recouvrant des électrodes. Un électron ne peut pas pénétrer dans l'hélium, mais il est faiblement attiré à sa surface. L'attraction cause la formation d'une réplique d'atome hydrogène de relativement grande taille. On peut choisir soit les deux états les plus bas de cet atome artificiel,



soit les états de **spin** de l'électron (approche poursuivie par Stephen Lyon à l'Université de Princeton). L'électron est localisé à un endroit particulier de la surface d'hélium par le champ électrique des électrodes. La fréquence résonnante de la transition entre les deux plus bas niveaux peut être réglée entre ~ 120 et ~ 200 GHz en changeant le champ électrique vertical. Cette fréquence détermine la cadence maximale de l'ordinateur, à environ 10 GHz. Les opérations sur un seul qubit sont faites en accordant des électrons individuels en résonance ou non avec les micro-ondes appliquées. Les opérations à deux qubits sont fondées sur l'**interaction de Coulomb** entre qubits adjacents. Le grand avantage de ce schéma sur d'autres dispositifs d'état solide réside dans le fait que l'hélium liquide ne contient aucune impureté et sert ainsi à isoler les qubits du bruit produit dans le substrat. Le temps de décohérence pour les états de mouvement est estimé à environ 100 microsecondes. Le couplage des états de spin à l'environnement est pratiquement nul : leur temps de décohérence devrait donc être de l'ordre de plusieurs secondes. L'état de l'électron peut être lu par un électromètre très sensible. Le piégeage d'un seul électron a été démontré, mais la détection de l'état quantique d'un qubit et les mesures du temps de décohérence restent à accomplir. L'état de l'art de l'informatique quantique est le processeur de 7 bits mentionné dans *Vers des processeurs quantiques*. Ce n'est pas encore très impressionnant. Pouvons-nous nous attendre à l'apparition d'ordinateurs quantiques opérationnels dans un avenir prévisible? Qui seront les premiers clients? Il est difficile de répondre. L'ordinateur quantique peut, en principe, faire tout ce que peut faire un ordinateur classique et un peu plus. Dans quelques domaines comme la cryptographie, il peut le surpasser, et de beaucoup. La réponse à la question de savoir s'il peut susciter un intérêt commercial suffisant dépend de sa capacité à

atteindre dans quelques domaines connus des performances dépassant sensiblement celles des dispositifs classiques. Elle dépend également de l'apparition de nouveaux algorithmes lui permettant de démontrer un changement d'ordre de grandeur fondamental par rapport aux technologies existantes. Sans une telle percée, il lui sera extrêmement difficile de rivaliser avec la technologie bien établie du silicium.

La réalité rejoindra-t-elle la science-fiction ?

Prisonniers du temps décrit des événements fictifs survenant en 2000 : la réalité est doute en retard sur l'imagination de l'auteur. Aucun multimilliardaire n'a encore donné son argent pour développer un ordinateur quantique aussi vite que possible. Mais est-ce la seule raison de retard? Il pourrait bien y avoir des difficultés fondamentales, rendant impossible le fonctionnement d'ordinateurs quantiques.

Même s'il n'y en a aucune, la tâche reste très difficile. Mais les progrès gigantesques faits dans d'autres technologies donnent quelque espoir. En 1947, le premier transistor en semi-conducteur mesurait plusieurs centimètres ; en 2004, des dizaines de millions de transistors sont entassés dans un volume beaucoup plus petit. L'espoir existe que dans les cinquante ans à venir, les ingénieurs parviendront à concentrer dans la pointe d'un stylo des millions d'unités de tous les équipements aujourd'hui nécessaires pour faire marcher un seul qubit. Et qu'il sera possible de les utiliser pour téléporter vers nos amis et parents des copies, petites mais réelles, de nous-mêmes, capables de leur raconter nos dernières vacances!

> **Yury Mukharsky**

Direction des sciences de la matière
CEA centre de Saclay

Les boîtes quantiques semi-conductrices

La plupart des composants optoélectroniques emploient aujourd'hui des puits quantiques, capables d'exercer le confinement des électrons dans une dimension. Les boîtes quantiques, qui peuvent les confiner dans toutes les directions de l'espace, permettent de réaliser des composants totalement originaux pour le traitement quantique de l'information, en particulier pour la cryptographie.

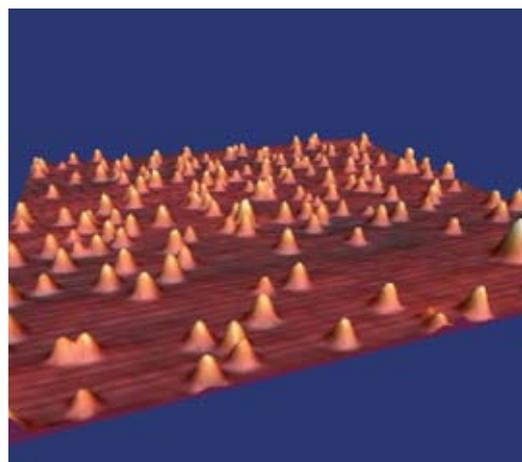
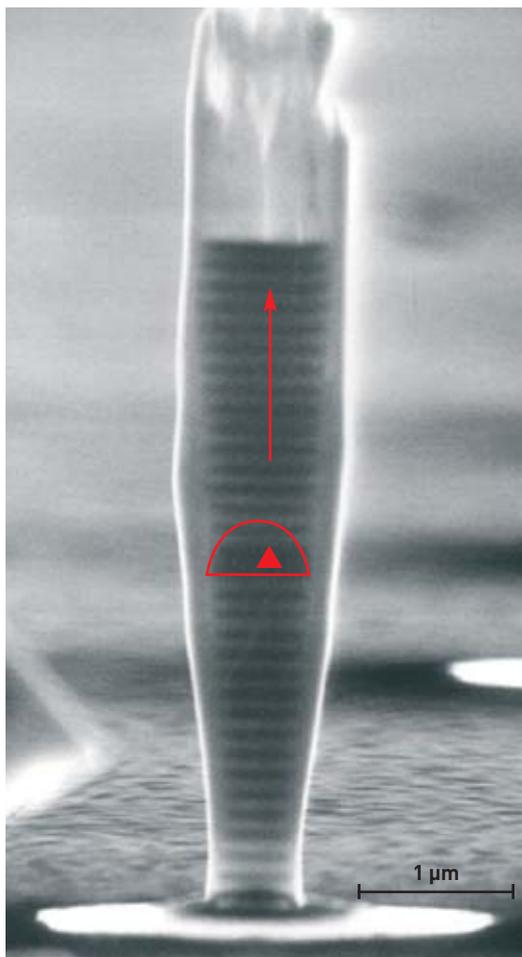


Figure 1.
Vue par microscopie à force atomique d'un ensemble d'îlots quantiques d'InAs sur GaAs. L'image mesure $1 \mu\text{m} \times 1 \mu\text{m}$, les îlots ont une hauteur de 10 nm et un diamètre de 50 nm.

COURTOISIE L. GRENOUILLLET ET N. GOGNEAU

Depuis la fin des années 1970, de nombreuses études ont été consacrées au développement d'hétérostructures **semi-conductrices** capables de confiner les électrons à l'échelle de quelques nanomètres (nm). Les *puits quantiques*, constitués par une couche mince entre deux couches de plus grande **bande interdite**, réalisent ce confinement à une dimension. Ils ont révolutionné les performances des **diodes laser** et sont employés dans la plupart des composants optoélectroniques commerciaux. De nombreuses études sont aujourd'hui consacrées aux *boîtes quantiques* (BQs), qui confinent les électrons dans toutes les directions de l'espace. Contrairement à un puits quantique, une BQ possède – comme un atome – des **états électroniques discrets** et présente de ce fait un ensemble de propriétés électroniques très particulières.



Vue au microscope électronique à balayage d'un micropilier GaAs/AlAs. Ce microrésonateur optique comporte au centre la cavité optique, entourée de deux miroirs de Bragg constitués par une alternance de couches quart d'onde en GaAs (couches sombres) et AlAs (couches claires). Le diamètre de ce micropilier est de 1 µm.

En pratique, une "boîte à électrons" doit être suffisamment petite pour que les effets **quantiques** dominent ses propriétés. Généralement, une boîte est considérée comme "quantique" lorsque ses états sont bien séparés en énergie à l'échelle du **quantum** d'énergie thermique kT (qui vaut 25 **milliélectronvolts** (meV) pour une température de 300 K). Pour ce faire, toutes ses dimensions doivent être inférieures à 10 nm environ. S'agissant d'un objet aussi petit, l'énergie des états électroniques dépend fortement de la taille de la boîte. Si on souhaite réaliser un ensemble de boîtes présentant des propriétés voisines, il faut donc définir leur taille avec une grande précision. À titre d'exemple, une fluctuation de taille inférieure à 15% est nécessaire pour que l'énergie de bande interdite des BQs fluctue de moins de kT à 300 K.

La réalisation d'objets de 10 nm de taille avec une précision nanométrique semble à première vue une gageure. Elle s'effectue aujourd'hui selon une technique d'auto-assemblage, illustrée figure 1 dans le cas du système InAs/GaAs (arseniure d'indium/arseniure de gallium), de loin le plus étudié. Les atomes sont agencés de manière similaire dans InAs et GaAs, mais les distances interatomiques In-As et Ga-As sont très différentes ($\Delta a/a = 7\%$). Lors du dépôt par **épitaxie** d'une couche de InAs sur un substrat de GaAs, cette couche doit se déformer afin d'adopter une distance interatomique

dans le plan identique à celle du substrat. Quand ce dépôt dépasse 0,6 nm de InAs, on observe la formation spontanée d'un ensemble dense (10 à 1 000 îlots/µm²) d'îlots tridimensionnels de InAs. Cette morphologie permet en effet de relaxer efficacement l'énergie élastique emmagasinée dans la couche de InAs déformée. En recouvrant ces îlots de InAs par une couche de GaAs, on obtient des inclusions d'InAs au sein de GaAs, matériau de plus grande bande interdite que InAs. Celles-ci constituent des *puits de potentiel* pour les électrons et forment donc un ensemble de BQs. La forme et la taille des îlots quantiques peuvent être ajustées dans une large mesure en jouant sur les conditions de croissance. Il est ainsi possible d'accorder la longueur d'onde d'émission des BQs InAs/GaAs entre 0,9 et 1,6 µm environ. Pour un procédé de croissance optimisé, leurs tailles fluctuent de moins de 10%. De façon remarquable, ce procédé de nanofabrication "naturel" s'avère bien supérieur aux approches "**top-down**", basées sur la lithographie électronique, qui ont de fait été abandonnées au milieu des années 1990. Cette approche a été récemment étendue à un grand nombre d'autres matériaux semi-conducteurs tels que SiGe et GaN dans AlN (figure 2).

Un "atome artificiel" non isolé

La **spectroscopie** optique est un outil privilégié pour sonder les propriétés électroniques des nanostructures semi-conductrices. Bien que des effets du confinement quantique puissent déjà être observés pour des ensembles de BQs, il est particulièrement intéressant d'étudier une BQ *unique*, afin de s'affranchir de tout élargissement inhomogène dû à la distribution des tailles (figure 3, p. 26). À basse température ($T < 50$ K), une BQ isolée présente une **raie d'émission** et des **raies d'absorption** extrêmement fines (quelques microélectronvolts), qui reflètent la densité d'états discrète de la boîte et justifient l'appellation "d'atome artificiel" souvent employée à propos des BQs. Cependant, cet atome artificiel n'est pas isolé. Lorsqu'on élève la température, un élargissement spectaculaire de la raie

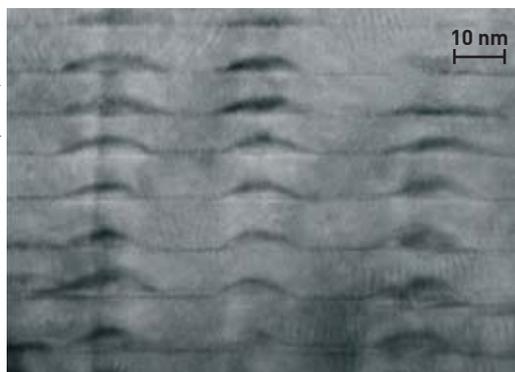


Figure 2. Boîtes quantiques de GaN (zones sombres) dans AlN, réalisées par épitaxie par jets moléculaires et observées en coupe par microscopie électronique en transmission.

d'émission (~ 10 meV à 300 K), qui résulte du couplage de ce système électronique localisé aux modes de vibration du **crystal**, est observé. Une autre propriété spécifique des BQs réside dans leur capacité à stocker plusieurs **paires électron-trou** dans un volume extrêmement faible, de l'ordre de 100 nm³. La longueur d'onde d'émission d'une BQ, X_n , dépend très sensiblement du nombre n de paires électron-trou qu'elle contient, à cause de la forte **interaction de Coulomb** entre électrons et trous piégés (figure 3, p. 26).

C L'épitaxie par jets moléculaires

La fabrication des **puits quantiques** utilise la technique d'**épitaxie** (du grec *taxi* (ordre) et *epi* (dessus) par jets moléculaires (en anglais MBE, pour *Molecular Beam Epitaxy*). Le principe de cette technique de dépôt physique, développée initialement pour la croissance **cristalline** des **semi-conducteurs** de la famille III-V, est fondé sur l'évaporation des différents constituants purs du matériau à élaborer dans une enceinte où est maintenu un vide poussé (pression pouvant être de l'ordre de $5 \cdot 10^{-11}$ mbar) afin d'éviter toute pollution de la surface. Un ou des jets thermiques d'**atomes** ou de **molécules** réagissent sur la surface propre d'un substrat monocristallin, placé sur un support maintenu à haute température (quelques centaines de °C), qui sert de trame pour former un film dit épitaxial. Il est ainsi possible de fabriquer des empilements de couches aussi fines que le milliardième de millimètre, c'est-à-dire composées de seulement quelques plans d'atomes.

Les éléments sont évaporés ou sublimés à partir d'une source de haute pureté, placée dans une **cellule à effusion** (chambre dans laquelle un flux moléculaire passe d'une région où règne une pression donnée à une région de plus basse pression) chauffée par **effet Joule**.

La croissance du film peut être suivie *in situ* et en temps réel en utilisant diverses sondes structurales et analytiques, en particulier des techniques d'étude de la qualité des surfaces et de leurs transitions de phase par diffraction électronique en incidence rasante, LEED (pour *Low energy electron diffraction*) ou RHEED (pour *Reflection high-energy electron diffraction*) et diverses méthodes **spectroscopiques** (spectroscopie d'**électrons** Auger, SIMS (spectrométrie de masse d'**ions** secondaires), spectrométrie de photoélectrons XPS par **rayons X** et UPS (*Ultraviolet photoelectron spectroscopy*)).

La technique d'épitaxie par jets moléculaires s'est étendue à d'autres semi-

conducteurs que les III-V, à des métaux et à des isolants, se développant avec les progrès des techniques d'*ultravide*. Le vide régnant dans la chambre de croissance, dont la conception varie en fonction de la nature du matériau à déposer, doit en effet être meilleure que 10^{-11} mbar pour permettre la croissance d'un film de haute pureté et d'excellente qualité cristalline à des températures de substrat relativement basses. Il s'agit de qualité de vide lorsque le bâti est au repos. Pour la croissance d'arséniures, par exemple, le vide résiduel est de l'ordre de 10^{-8} mbar dès que la cellule d'arsenic est portée à sa température de consigne pour la croissance.

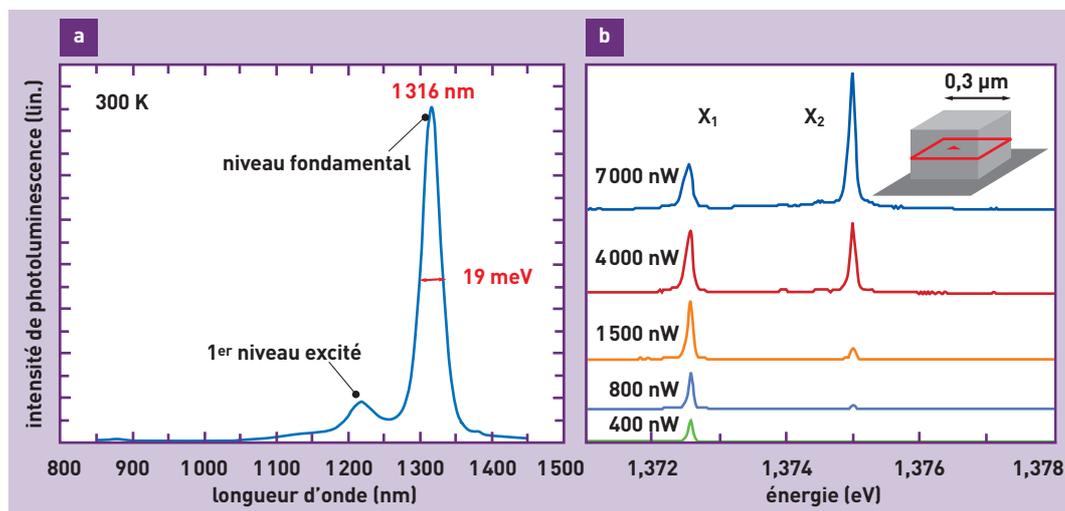
Le pompage pour atteindre ces performances fait appel à plusieurs techniques (pompage ionique, cryopompage, sublimation de titane, pompes à diffusion ou turbomoléculaires). Les principales impuretés (H_2 , H_2O , CO et CO_2) peuvent présenter des pressions partielles inférieures à 10^{-13} mbar.

Quelles perspectives d'application ?

Historiquement, c'est leur intérêt potentiel pour les diodes laser qui a motivé les premières études d'applications des BQs en optoélectronique, au début des années 1980. L'espoir était alors caressé qu'un ensemble de BQs présenterait une courbe de gain très étroite, typique d'un système à niveaux électroniques discrets, contrairement au puits quantique, pour lequel les électrons injectés sont distribués thermiquement au sein d'une bande d'états de largeur kT . Cette meilleure utilisation des électrons injectés devait entraîner une amélioration substantielle du courant de seuil⁽¹⁾, de la fréquence de modulation maximale et de la stabilité en tempéra-

ture des diodes laser. Dix ans après la démonstration du premier laser à BQ, cet espoir a dans l'ensemble été déçu. En effet, la bande de gain d'un ensemble de BQs réelles est fortement élargie tant par les fluctuations de taille des BQs que par des phénomènes plus intrinsèques tels que le couplage aux vibrations cristallines. Il est clair aujourd'hui que le laser à BQs n'est pas appelé à supplanter le laser à puits quantique, mais plutôt à occuper quelques niches technologiques. Plusieurs *start-up* telles que Zia Laser aux États-Unis ou NL nano-semiconductor en Allemagne cherchent aujourd'hui à commercialiser des diodes laser à BQs InAs à $1,3 \mu m$ pour les télécommunications de proximité par fibre optique. Ces composants, réalisés sur substrat de GaAs,

Figure 3. En a), spectre d'émission à 300 K d'un ensemble de boîtes quantiques InAs/GaAs (courtoisie thèse V. Célibert). En b), variation du spectre d'émission à 4 K d'une BQ unique, isolée dans un plot gravé (schématisé en encart) en fonction de la puissance d'excitation. À basse excitation, la BQ contient au plus une paire électron-trou et présente une raie d'émission unique (X1). La raie X2 qui apparaît à plus forte excitation est émise par la BQ lorsqu'elle contient deux paires électron-trou.



ont des propriétés très stables en température et ne nécessitent pas de module de régulation thermique, contrairement aux diodes laser conventionnelles à base de puits quantiques InGaAsP sur substrat de phosphore d'indium (InP).

Les promesses de la source de photon unique

Les propriétés très spécifiques des BQs permettent aussi de développer des composants optoélectroniques totalement originaux. C'est le cas de la source de **photon unique** (SPU), dont le milieu actif est formé d'une BQ unique, placée dans une microcavité optique⁽²⁾. Une SPU est un composant capable d'émettre à la demande des impulsions lumineuses contenant un seul et unique photon. Actuellement, le développement de telles sources est principalement motivé par leur intérêt pour la cryptographie quantique, qui utilise le codage de l'information sur des objets quantiques et s'appuie sur les principes de la physique quantique pour garantir une confidentialité absolue de l'information échangée. À plus long terme, les SPU auront probablement des applications importantes en métrologie.

Le principe de fonctionnement de la SPU à BQ est illustré par la figure 4. Une BQ isolée est excitée *via* un **pompage optique** ou électrique impulsionnel du matériau environnant; plusieurs paires électron-trou sont rapidement capturées par la BQ (figure 4a). La recombinaison radiative séquentielle de ces paires est alors observée; chaque photon émis a une énergie spécifique X_n . En ne sélectionnant, par filtrage spectral, que la seule raie X_1 de la BQ, une impulsion contenant un photon est préparée pour chaque cycle de pompage. L'émission spontanée d'une BQ est en général omnidirectionnelle. Pour que la SPU soit réellement utile, les photons uniques doivent être collectés efficacement et préparés dans un état donné (direction de propagation, mode spatial, **polarisation**). L'approche la plus performante à ce jour repose sur l'insertion de la BQ dans un micropilier, tel celui illustré p. 25. Cette microcavité optique, qui confine les photons à trois dimensions à l'échelle de la longueur d'onde, possède des modes discrets. Ce confinement optique permet de renforcer considérablement l'interaction entre le champ électromagnétique et l'émetteur. En plaçant la BQ en résonance avec l'un des modes confinés, une très forte accélération de l'émission spontanée de la BQ (phénomène connu sous le nom d'*effet Purcell*) et une collection très efficace des photons dans ce mode électromagnétique particulier sont observées. Cette SPU, développée en 2001 au Laboratoire de photonique et de nanostructures (LPN) du CNRS, présente d'ores et déjà des performances très intéressantes pour la cryptographie quantique.

Sur un plan conceptuel, la SPU est le premier composant optoélectronique dont le fonctionnement repose sur un effet d'électrodynamique quantique en cavité, ici l'effet Purcell. Par-delà ces premiers résultats,

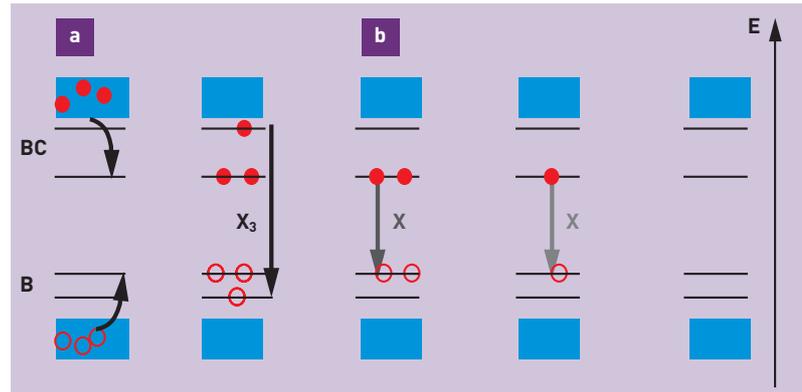


Figure 4. Représentation schématique des états de bande de conduction (BC) et de valence (BV) de la boîte quantique BQ (traits) et de la matrice de GaAs (continuum grisé) et du protocole employé pour générer un photon unique avec une BQ. En a), excitation optique ou électrique de GaAs, capture des électrons et des trous (figurés par des ronds rouges) par la BQ. En b), les paires électron-trou capturées se recombinent une par une, en émettant à chaque étape un photon, dont l'énergie dépend du nombre de paires résiduelles dans la BQ. Un filtrage spectral de la raie d'émission X_1 permet de sélectionner un photon unique.

l'association des BQs et des microcavités semi-conductrices de petit volume ($V \sim \lambda^3$) est appelée à connaître de très riches développements. Sous certaines conditions, l'émission spontanée devient un phénomène réversible, et le système couplé atome/cavité évolue de façon déterministe, même en absence de champ appliqué. Ce système offrira des perspectives très intéressantes pour le traitement quantique de l'information. Le contrôle de l'émission spontanée en microcavité devrait par ailleurs permettre de réduire de plusieurs ordres de grandeur le courant de seuil des microlasers. À 300K, c'est un courant de seuil bien inférieur au microampère qui est prévu lorsque les BQs sont insérées dans une microcavité optique de taille ultime ($V \sim (\lambda/2)^3$), valeur à comparer aux quelques milliampères d'une diode laser standard. Sur le plan des applications, la miniaturisation des sources et la réduction de leur courant de seuil constituent un préalable à la réalisation d'interconnexions optiques denses *intra-chip* dans les circuits électroniques. La réalisation de microcapteurs optiques autonomes pour le domaine biomédical ou environnemental est aussi fréquemment évoquée dans ce contexte.

> **Jean-Michel Gérard**

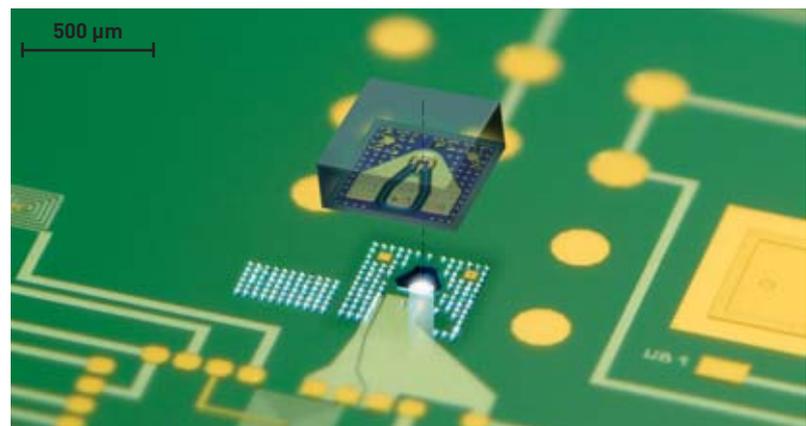
Direction des sciences de la matière

> **Philippe Gilet**

Direction de la recherche technologique

CEA centre de Grenoble

Photomontage représentant l'assemblage par *flip-chip* sur un banc optique silicium d'un laser à grande longueur d'onde à base de boîte quantique de type VCSEL (*Vertical Cavity Surface Emitting Laser*). Ce produit est développé dans le cadre du laboratoire commun CLOVIS entre le CEA-Leti et la société Intexys.



(1) Courant de seuil : intensité de courant minimale qu'il faut injecter dans le laser à semi-conducteur pour déclencher l'effet laser.

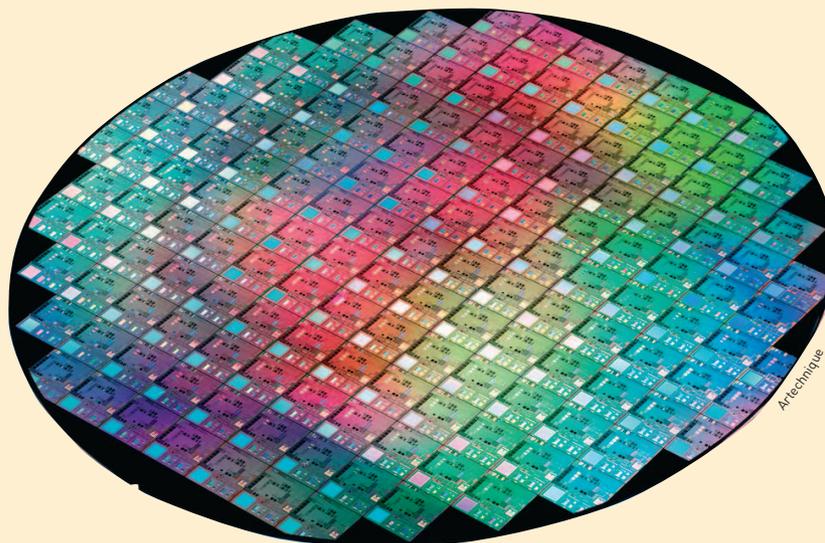
(2) Cavité optique : espace compris entre les deux miroirs d'un laser où se trouvent les modes provenant de l'existence d'ondes stationnaires à l'intérieur de la cavité. Chaque mode a une fréquence différente.

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

*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** ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$, 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.

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'ultraminaturisation, 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.

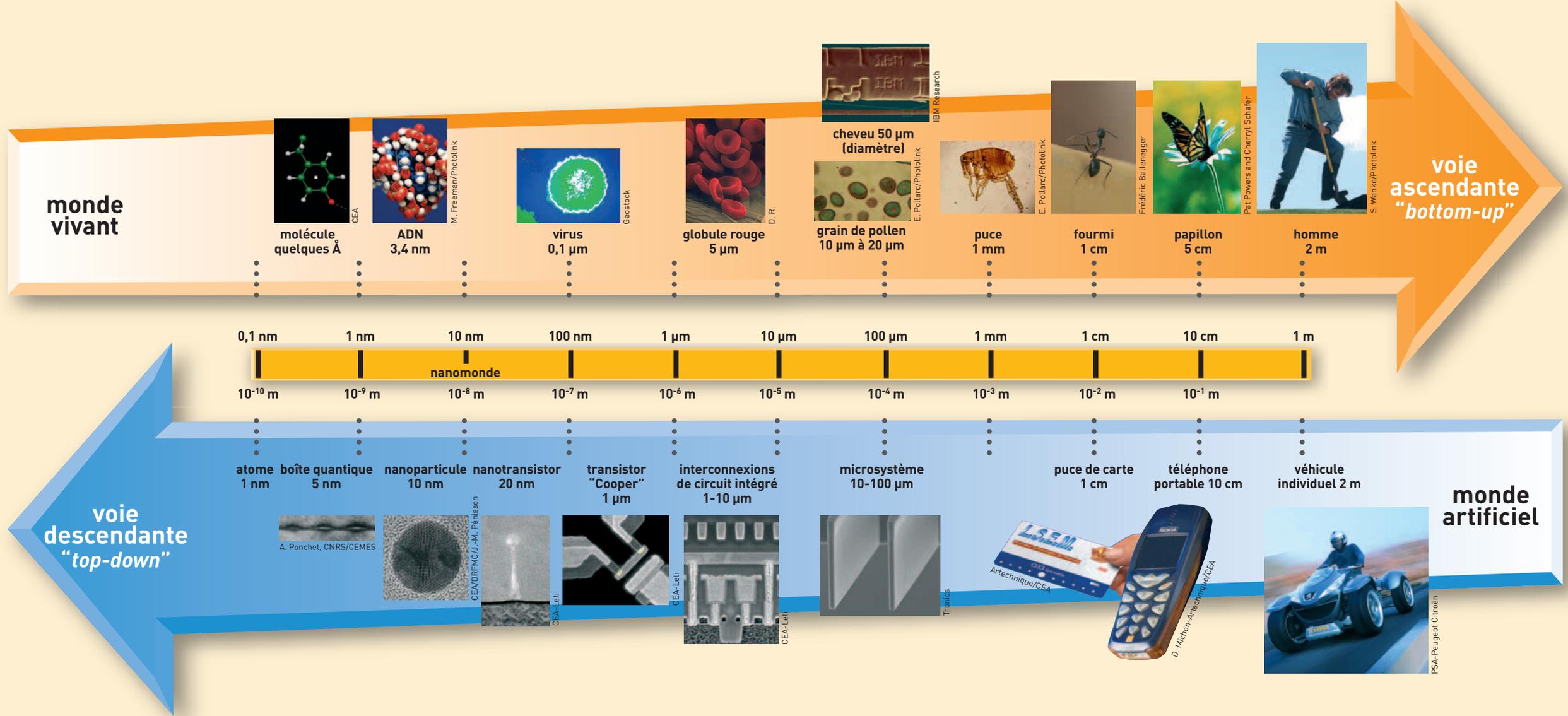
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'**auto-assemblage** des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des **protéines**, enchaînement d'acides aminés 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 orga-

niser 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.

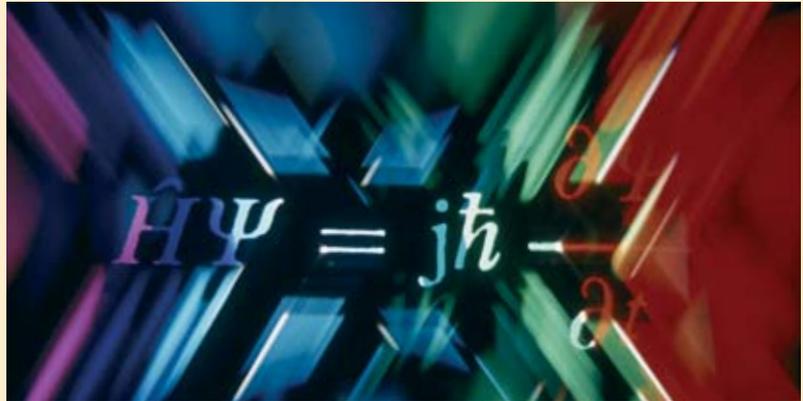
A (Suite)



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.

C L'épitaxie par jets moléculaires

La fabrication des **puits quantiques** utilise la technique d'**épitaxie** (du grec *taxi* (ordre) et *epi* (dessus) par jets moléculaires (en anglais MBE, pour *Molecular Beam Epitaxy*). Le principe de cette technique de dépôt physique, développée initialement pour la croissance **cristalline** des **semi-conducteurs** de la famille III-V, est fondé sur l'évaporation des différents constituants purs du matériau à élaborer dans une enceinte où est maintenu un vide poussé (pression pouvant être de l'ordre de $5 \cdot 10^{-11}$ mbar) afin d'éviter toute pollution de la surface. Un ou des jets thermiques d'**atomes** ou de **molécules** réagissent sur la surface propre d'un substrat monocristallin, placé sur un support maintenu à haute température (quelques centaines de °C), qui sert de trame pour former un film dit épitaxique. Il est ainsi possible de fabriquer des empilements de couches aussi fines que le milliardième de millimètre, c'est-à-dire composées de seulement quelques plans d'atomes.

Les éléments sont évaporés ou sublimés à partir d'une source de haute pureté, placée dans une **cellule à effusion** (chambre dans laquelle un flux moléculaire passe d'une région où règne une pression donnée à une région de plus basse pression) chauffée par **effet Joule**.

La croissance du film peut être suivie *in situ* et en temps réel en utilisant diverses sondes structurales et analytiques, en particulier des techniques d'étude de la qualité des surfaces et de leurs transitions de phase par diffraction électronique en incidence rasante, LEED (pour *Low energy electron diffraction*) ou RHEED (pour *Reflection high-energy electron diffraction*) et diverses méthodes **spectroscopiques** (spectroscopie d'**électrons** Auger, SIMS (spectrométrie de masse d'**ions** secondaires), spectrométrie de photoélectrons XPS par **rayons X** et UPS (*Ultraviolet photoelectron spectroscopy*).

La technique d'épitaxie par jets moléculaires s'est étendue à d'autres semi-

conducteurs que les III-V, à des métaux et à des isolants, se développant avec les progrès des techniques d'*ultravide*. Le vide régnant dans la chambre de croissance, dont la conception varie en fonction de la nature du matériau à déposer, doit en effet être meilleure que 10^{-11} mbar pour permettre la croissance d'un film de haute pureté et d'excellente qualité cristalline à des températures de substrat relativement basses. Il s'agit de qualité de vide lorsque le bâti est au repos. Pour la croissance d'arséniures, par exemple, le vide résiduel est de l'ordre de 10^{-8} mbar dès que la cellule d'arsenic est portée à sa température de consigne pour la croissance. Le pompage pour atteindre ces performances fait appel à plusieurs techniques (pompage ionique, cryopompage, sublimation de titane, pompes à diffusion ou turbomoléculaires). Les principales impuretés (H_2 , H_2O , CO et CO_2) peuvent présenter des pressions partielles inférieures à 10^{-13} mbar.

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** 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

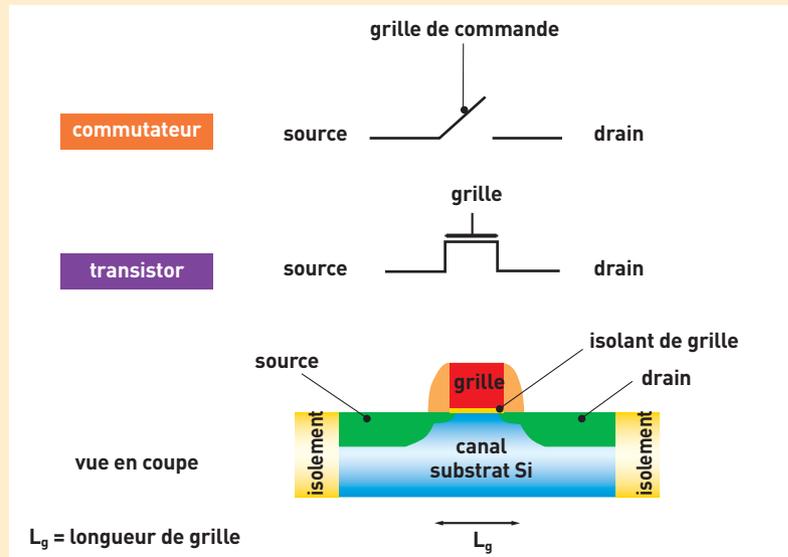


Figure. Un transistor MOS est un commutateur qui permet de commander le passage d'un courant électrique de la source (S) vers le drain (D) à l'aide d'une grille (G) isolée électriquement du canal de conduction. Le substrat en silicium est noté B (pour *Bulk*).

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⁽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

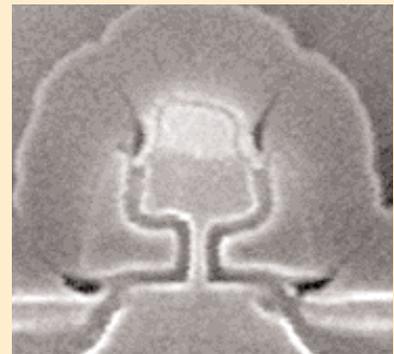
au-dessus du semi-conducteur et qui porte tout naturellement le nom de **grille**, les trous sont repoussés de sa surface où viennent s'accumuler les quelques électrons du semi-conducteur. Un petit canal de conduction peut ainsi se former entre la source et le drain (figure). Lorsqu'une tension négative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

(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.

E La lithographie, clé de la miniaturisation

La **lithographie** optique (ou photolithographie), application majeure de l'interaction particules/matière, est le procédé traditionnel de fabrication des **circuits intégrés**. Étape clé de la définition des motifs de ces circuits, elle reste le verrou de leur développement. La résolution étant en première approximation directement proportionnelle à la longueur d'onde, la finesse des motifs a d'abord progressé avec la diminution, qui s'est effectuée par sauts, de la longueur d'onde λ du rayonnement utilisé.

L'opération consiste en l'*exposition* via une optique réductrice d'une résine photosensible à des particules énergétiques, depuis les **photons ultraviolet (UV)** actuellement utilisés jusqu'aux **électrons** en passant par les photons **X** et les **ions**, au travers d'un masque représentant le dessin d'un circuit. Le but ? Transférer cette image sur l'empilement de couches isolantes ou conductrices qui le constitueront, déposées précédemment (phase de *couchage*) sur une plaquette (*wafers*) de matériau **semi-conducteur**, en général de **silicium**. Ce processus est suivi de la dissolution de la résine exposée à la lumière (*développement*). Les parties exposées de la couche initiale peuvent être alors gravées sélectivement, puis la résine est retirée chimiquement avant le dépôt de la couche suivante. Cette étape de lithographie peut intervenir plus d'une vingtaine de fois au cours de la fabrication d'un circuit intégré (figure).

Dans les années 1980, l'industrie de la microélectronique utilisait des lampes à mercure délivrant dans l'**UV proche** (raies g, h, i), à travers des optiques en quartz, un rayonnement d'une longueur d'onde de 436 nanomètres (nm). Elle gravait ainsi des structures d'une largeur de trait de 3 microns (μm). Employées jusqu'au milieu des années 1990, ces lampes ont été remplacées par des **lasers à excimères** émettant dans l'**UV lointain** (krypton-fluor KrF à 248 nm, puis argon-fluor ArF à 193 nm, les photons créés ayant une énergie de quelques **électronvolts**), permettant d'atteindre des résolutions de 110 nm, et même inférieures à 90 nm avec de nouveaux procédés.

Le Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information (Leti) du CEA a été un des pionniers, dans les années 1980, dans l'utilisation des lasers en



Zone de photolithographie en salle blanche dans l'usine STMicroelectronics de Crolles (Isère).

lithographie et dans la réalisation des circuits intégrés par les lasers à excimères, qui constituent aujourd'hui les sources employées pour la production des circuits intégrés les plus avancés. Pour l'industrie, l'étape suivante devait être le laser F₂ ($\lambda = 157 \text{ nm}$), mais cette lithographie a été quasiment abandonnée face à la difficulté de réaliser des optiques en CaF₂, matériau transparent à cette longueur d'onde.

Si la diminution de la longueur d'onde des outils d'exposition a été le premier facteur à permettre le gain en résolution considérable déjà obtenu, deux autres ont été déterminants. Le premier a été la mise au point de résines photosensibles basées sur des matrices de **polymères** peu absorbantes aux longueurs d'onde utilisées et mettant en œuvre des mécanismes de

propagation de l'énergie reçue toujours plus innovants. Le second a consisté en l'amélioration des optiques avec une diminution des phénomènes parasites liés à la diffraction (meilleure qualité de surface, augmentation de l'**ouverture numérique**).

Au fil des années, la complexité accrue des systèmes optiques a ainsi permis d'obtenir des résolutions *inférieures* à la longueur d'onde de la source. Cette évolution ne pourra se poursuivre sans une rupture technologique majeure, un saut important en longueur d'onde. Pour les gé-

érations des circuits intégrés dont la résolution minimale est comprise entre 80 et 50 nm (le prochain "nœud" se situant à 65 nm), différentes voies basées sur la projection de particules à la longueur d'onde de plus en plus courte ont été mises en concurrence. Elles mettent respectivement en œuvre des rayons X "mous", en extrême ultraviolet (dans la gamme des 10 nm), des rayons X "durs" (à la longueur d'onde inférieure à 1 nm), des ions ou des électrons.

L'étape consistant à atteindre des résolutions inférieures à 50 nm conduira à s'orienter plutôt vers la nanolithographie à l'aide d'électrons de basse énergie (10 eV) et d'outils plus adaptés comme le microscope à **effet tunnel** ou l'**épitaxie par jets moléculaires** (encadré C) pour la réalisation de "super-réseaux".

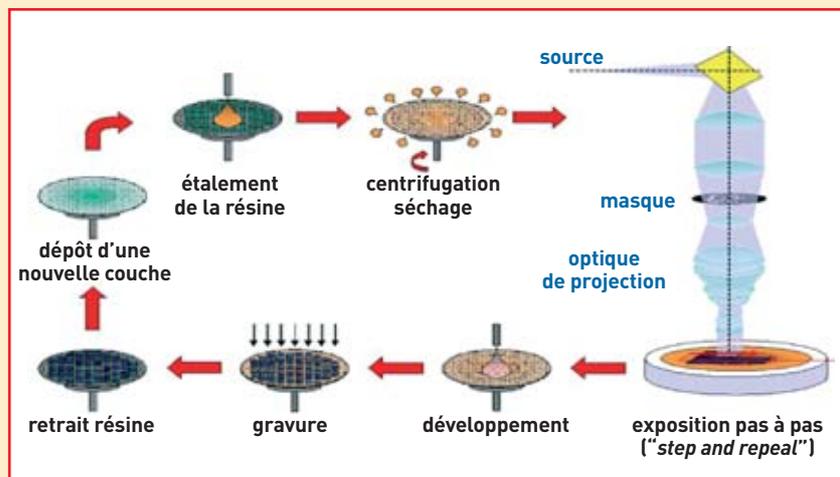


Figure. Les différentes phases du processus de lithographie dont le but est de délimiter les couches de matériaux conducteurs ou isolants qui constituent un circuit intégré. Cette opération est l'enchaînement d'un étalement de résine photosensible, de la projection du dessin d'un masque par une optique réductrice, suivis de la dissolution de la résine exposée à la lumière (développement). Les parties exposées de la couche initiale peuvent être alors gravées sélectivement, puis la résine est retirée avant le dépôt de la couche suivante.

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**.