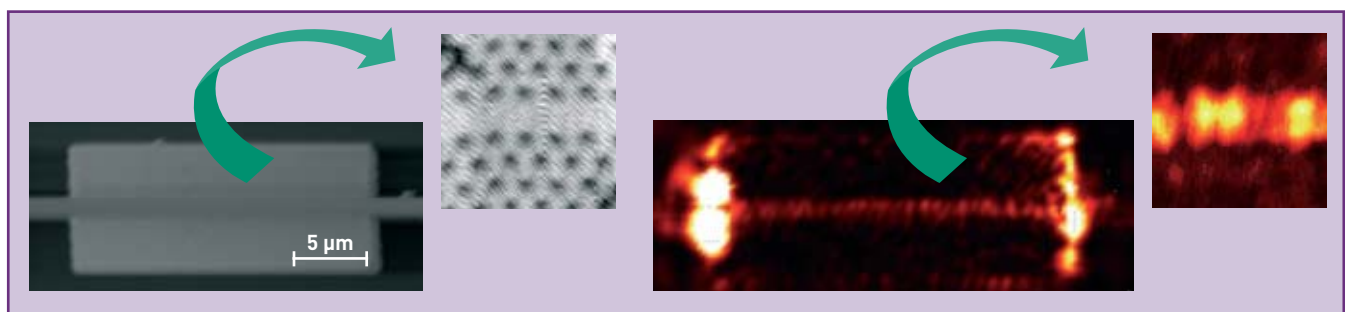


Nanophotonique : génération et transport de lumière dans les nanosystèmes du futur

L'intégration de fonctions optiques sur un circuit de microélectronique représente l'un des principaux défis pour les micro- et nanosystèmes du futur. En particulier, le traitement optique de l'information sur une puce en silicium pourrait voir le jour, à condition d'intégrer des fonctions optiques comme l'émission de lumière, son guidage, sa modulation et sa détection. Les cristaux photoniques constituent les briques de base qui permettront de contrôler à l'échelle de la longueur d'onde l'émission et la propagation de lumière dans les nanosystèmes du futur.



CEA/DRFMC/INAPS

Si la fonction de guidage (**réfractif** ou **diffractif**) semble aujourd'hui intégrable à court terme sur une puce en **silicium** pour le traitement optique de l'information, la réalisation des *fonctions actives* (émission, détection) au niveau du silicium nécessite l'introduction d'effets physiques nouveaux, comme l'augmentation de l'émission de lumière par des **nanosstructures**, le contrôle du diagramme d'émission des **photons**, le renforcement de leur taux d'émission par effet Purcell (encadré) et la diminution de la vitesse de propagation des photons dans le matériau ou leur "stockage" dans un résonateur⁽¹⁾ à très fort facteur de qualité. La mise en œuvre de tels effets pourrait conduire à la fabrication du premier laser silicium, dont l'absence constitue actuellement le principal obstacle à l'utilisation des photons pour les opérations de calcul et de logique dans les circuits nanoélectroniques du futur.

Canaliser et stocker les photons

Pour véhiculer de l'information sur une puce en silicium, il faut être capable de canaliser ou confiner la lumière d'un point à un autre d'un circuit microélectronique. En pratique, cela signifie qu'il est nécessaire de fabriquer des murs pour les photons à l'échelle de la longueur d'onde que l'on souhaite propager. Typiquement, à la longueur d'onde de 1,5 **micron**, compte tenu de l'**indice optique de réfraction** du silicium, il convient de créer des structures de quelques dizaines à quelques centaines de **nanomètres**. Il est par exemple possible pour canaliser les photons de réaliser un **guide d'onde** sous la forme d'une bande de silicium, dont l'épaisseur est de 0,3 µm et la largeur comprise entre 0,3 µm et quelques microns. La lumière y est alors emprisonnée, se réfléchissant sur les parois du guide du fait de la différence d'indice optique entre le silicium et le milieu environnant (l'air dans le cas présent).

Suivant le même principe, en utilisant un substrat silicium sur isolant (**SOI**), les photons peuvent être confinés ou canalisés dans l'épaisseur de la puce par

la différence d'indice obtenue entre l'indice de réfraction du silicium et celui de l'oxyde (isolant) sous-jacent. À ce stade, il est donc possible de propager la lumière, mais l'idéal serait de la concentrer, voire la ralentir ou la stocker, dans certaines parties du circuit. Le stockage permettrait de conserver l'information sous forme optique dans le circuit. Cependant, sa réalisation concrète semble encore délicate. Un photon se propageant à une vitesse de l'ordre de 10^{14} µm/s dans le silicium, il faudrait, à défaut d'être capable de l'arrêter, lui faire parcourir 50 milliards d'allers et retours dans un résonateur de 1 µm de longueur pour ne le stocker qu'un millième de seconde. En revanche, la possibilité de ralentir d'un à deux ordres de grandeur la vitesse de propagation des photons ou de leur faire parcourir 10, 100 ou 1000 allers et retours dans un très faible volume du silicium permettrait déjà de changer l'interaction de la lumière avec le silicium et, dès lors, de moduler ou d'absorber (de détecter) ces photons, voire de stimuler l'émission d'autres photons. C'est là qu'entrent en jeu les cristaux photoniques ou plus généralement les structures à **bande photonique interdite**.

Intégrer des fonctions optiques

Le cristal photonique est un matériau, par exemple un **semi-conducteur** comme le silicium, dans lequel l'indice optique varie de manière périodique. Cette modulation d'indice est généralement obtenue en creusant des trous dans le silicium. Si la variation de

Visualisation via une sonde locale (technique dite *de champ proche*) de l'onde optique se propageant dans un guide à cristal photonique. Cette expérience constitue une première mondiale. L'image de gauche est une vue topographique du guide et celle de droite correspond à l'image en champ proche.

(1) Résonateur : milieu où s'effectue l'amplification d'un phénomène de nature vibratoire par une vibration excitatrice de même fréquence ou par le passage dans une cavité dont une des dimensions est égale à la longueur d'onde de la vibration. Ainsi, pour produire classiquement un faisceau laser, le milieu actif est placé dans une cavité résonnante constituée de deux miroirs parallèles dont l'un, le **réflecteur**, est totalement réfléchissant et le second, le **coupleur**, est semi-transparent, permettant ainsi à la lumière de sortir de la cavité. Les photons, réfléchis par les miroirs, peuvent traverser plusieurs fois le milieu actif et provoquer l'émission stimulée d'un plus grand nombre de photons.



l'indice optique est suffisante, et si cette structuration est du même ordre de grandeur que la longueur d'onde de la lumière utilisée, il existe alors des directions dans lesquelles des photons d'une certaine énergie n'ont pas la possibilité de se propager. Il faut voir ici une analogie avec la structure de **bandes électroniques** des semi-conducteurs due aux variations périodiques du potentiel électronique.

La première fonction réalisable est donc la *réflexion des photons*. Pour cela, le physicien choisit de graver un réseau triangulaire de trous. Si maintenant ce réseau est gravé au milieu du guide d'onde, il est possible d'interdire la propagation de la lumière au travers de ce miroir. Fort de cette première fonctionnalité, le physicien peut réaliser un microrésonateur (ou microcavité) intégré au guide d'onde en fabriquant deux miroirs à cristal photonique séparés d'un intervalle formant une **cavité de Fabry-Pérot**. Une fonction de filtrage sera alors obtenue, puisque seules les longueurs d'onde résonnantes du Fabry-Pérot seront transmises par la structure (figure 1). Sur le spectre se retrouve la bande interdite des miroirs pour laquelle les photons ne sont plus transmis, avec la présence d'un pic transmis à la longueur d'onde de résonance. L'intensité de la résonance au sein de la cavité se traduit par la finesse du pic qui exprime le coefficient de surtension ou facteur de qualité, ici voisin de 200.

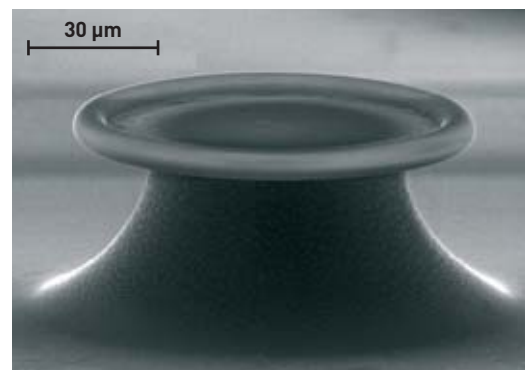
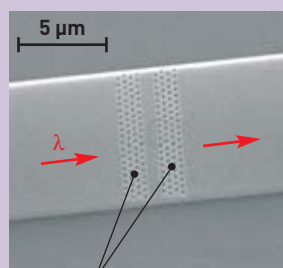


Figure 2. Microrésonateur à facteur de qualité géant "microtore". Les photons peuvent y être confinés de manière très efficace, permettant ainsi une très forte interaction avec le matériau. C'est sur ce principe de résonateur qu'un prototype de nanolaser en silicium pourrait voir le jour.

En d'autres termes, cela signifie que l'intensité du champ électromagnétique dans la cavité a été renforcée d'un facteur 200 par rapport à sa valeur initiale. Dès lors, outre la fonction de filtrage précédemment décrite, il est concevable d'utiliser cet effet de résonance pour exalter l'émission de photons dans des directions particulières par effet Purcell (encadré).



miroirs à cristal photonique

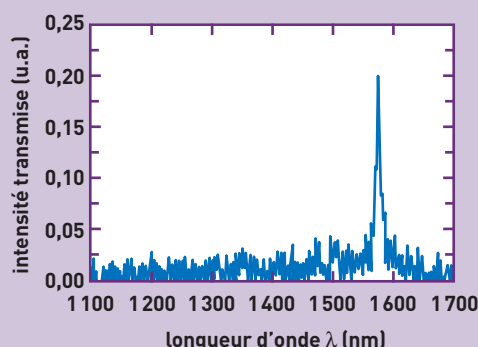


Figure 1. À gauche, vue de dessus d'un guide en silicium gravé sur un substrat silicium sur isolant (SOI) de 8 μm de largeur et d'une longueur totale de 10 mm. Une microcavité à cristal photonique a été fabriquée au sein du guide par gravure de deux cristaux photoniques (miroirs). À droite, spectre de transmission mesuré pour la microcavité à cristal photonique montrant la bande interdite photonique présente de 1200 à 1700 nm ainsi que le mode résonnant de la microcavité qui apparaît dans cette bande. Le coefficient de surtension obtenu ici est voisin de 200.

L'effet Purcell

Le physicien américain Edward M. Purcell a prédit, en 1947, que le taux d'émission spontanée d'un émetteur placé dans une cavité optique de coefficient de surtension Q et de volume V pouvait être inhibé ou exalté d'un facteur $F_p = 3Q\lambda^3/4\pi^2V$ par rapport à son taux d'émission en espace libre, λ correspondant à la longueur d'onde des photons émis. C'est ensuite, dans les années 1980, que des expériences conduites sur des **atomes** montrent, pour la première fois, la possibilité de modifier leurs propriétés en régime optique. Puis, au début des années 1990, le phénomène est observé en phase solide dans des **semi-conducteurs** intégrant des **boîtes quantiques**. Aujourd'hui, en prenant en compte un coefficient de surtension de 200 (exemple de la figure 1), le facteur de Purcell théorique est évalué à 30 pour cette microcavité en **silicium**. Cela signifie qu'il serait possible d'augmenter le taux d'émission du matériau, c'est-à-dire le nombre de **photons** émis par seconde, d'un facteur 30. Différentes expériences sont actuellement menées pour démontrer cet effet.

Fabriquer le premier laser silicium

Parallèlement, une autre approche vers la réalisation d'une nanosource de lumière vise à atteindre le régime d'émission stimulée ou *effet laser*. Pour cela, une idée originale consiste à élaborer des microrésonateurs à facteur de qualité géant (figure 2). En effet, le gain par unité de longueur disponible dans les matériaux de la filière silicium est généralement très faible, du fait du **gap indirect** du silicium. Ceci nécessite de confiner les photons de manière extrêmement efficace pour atteindre le seuil d'émission laser. Cette dernière classe de microrésonateurs à coefficient de surtension géant pourrait bien constituer la solution pour fabriquer le premier nanolaser en silicium et envisager ainsi le codage et le traitement optique de l'information sur puce.

Vers les premiers démonstrateurs

Avec le développement des nanotechnologies, les matériaux à bande photonique interdite apparaissent comme des briques de base essentielles pour les composants nanoélectroniques du futur, qui devront utiliser les photons et les **électrons** pour véhiculer et traiter l'information. Les premiers résultats obtenus dans la filière silicium sur isolant sont très encourageants. Ils devraient permettre d'élargir le champ d'applications du silicium, matériau roi de la microélectronique. En perspective de cet important effort de recherche, mené aujourd'hui dans différents laboratoires américains (**Intel, Caltech, MIT...**) et japonais ainsi qu'au CEA, se profile la réalisation des premiers démonstrateurs de lien optique pour le transport et le traitement de l'information sur des circuits microélectroniques.

➤ Emmanuel Hadji

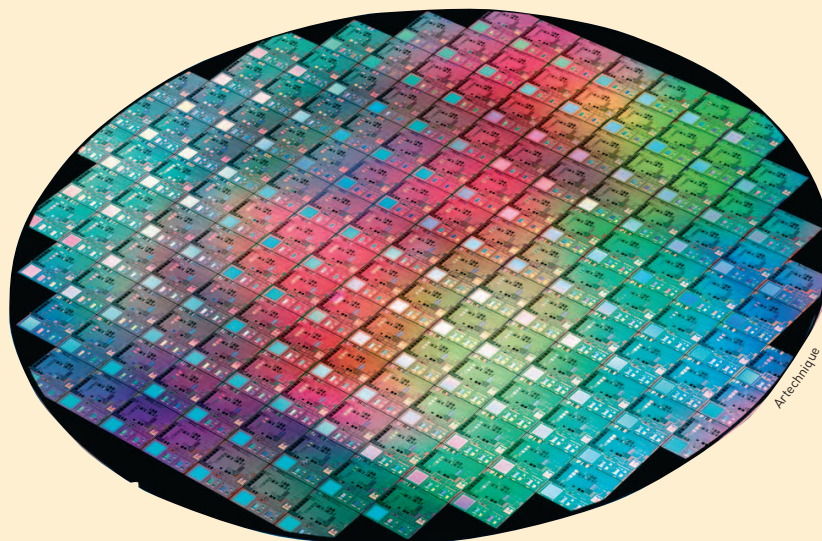
Direction des sciences de la matière
CEA centre de Grenoble

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.

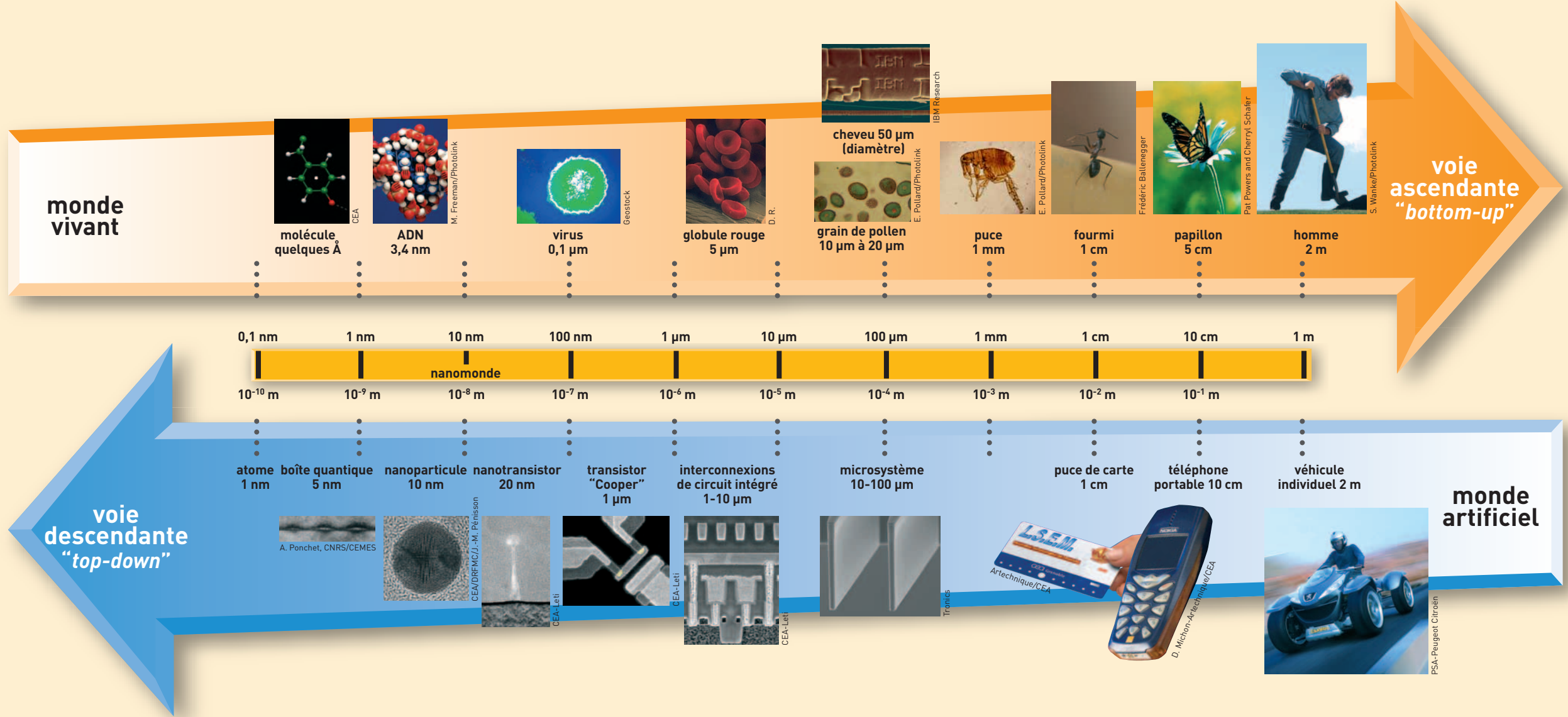
La voie ascendante peut permettre de passer outre ces limites physiques et aussi de réduire les coûts de fabrication, en utilisant notamment l'**auto-assemblage** des composants. C'est elle que suit la vie en pratiquant l'assemblage de molécules pour créer des **protéines**, enchaînement d'acides aminés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



monde vivant

voie ascendante
"bottom-up"

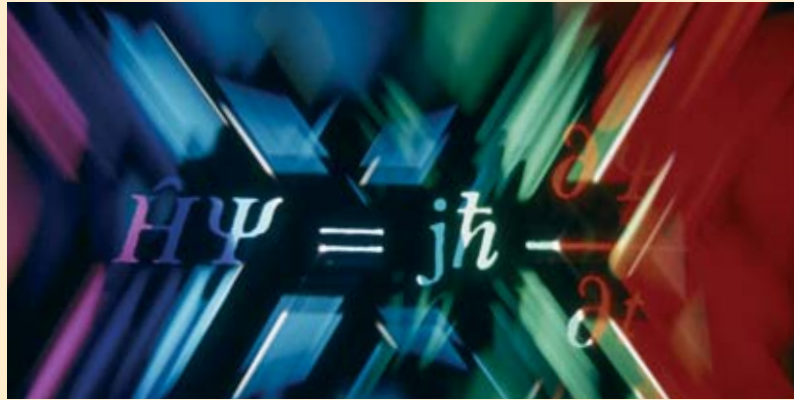
voie descendante
"top-down"

monde artificiel

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.