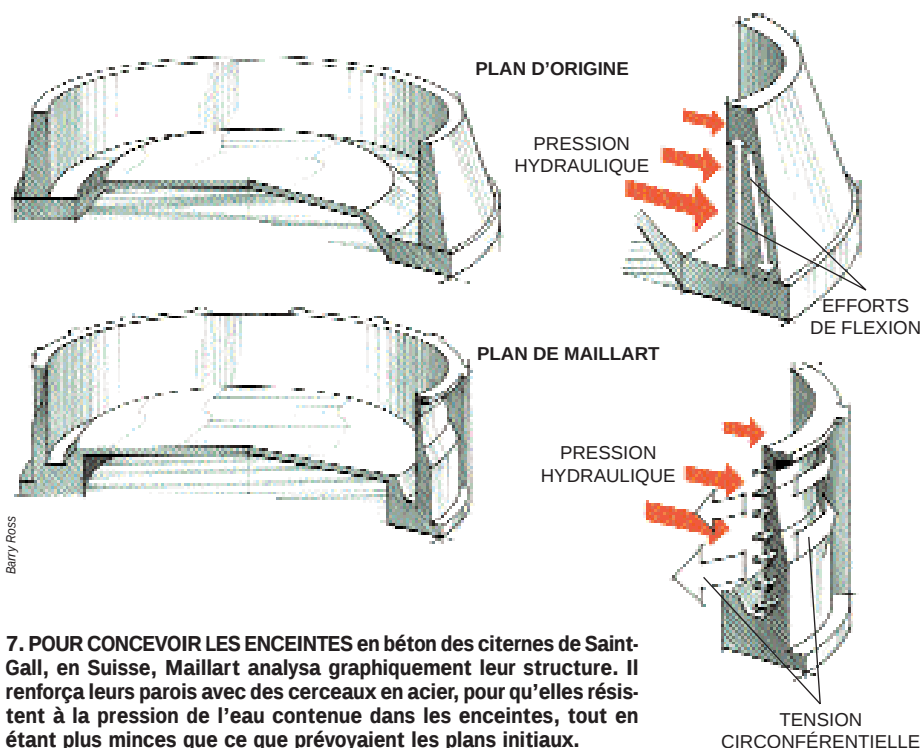


tablier. En effet, les moments de flexion sont importants en haut et en bas des parois transversales, mais presque nuls à mi-hauteur. Les traits horizontaux que présentent ces parois sont produits par les coffrages en bois qui ont servi à les fabriquer. L'ensemble du pont, avec ses traits et sa forme en X, rappelle le tableau de Paul Klee (un compatriote et contemporain de Maillart), intitulé *Doppelzelt* (double tente).

Les ingénieurs utilisent souvent les coffrages pour créer des motifs ou des textures sur les surfaces visibles des ouvrages. En 1939, Maillart reprend ce système pour le pont de Lachen, au bord du lac de Zurich : la surface de l'arc et les parois verticales des caissons qui le surmontent sont striées de traits horizontaux (voir la figure 6). Ces traits soulignent à la fois la finesse de l'arc et son épaissement près des articulations des culées.

Maillart meurt en 1940, après une vie indépendante. Pendant toute sa vie, il s'est préoccupé d'esthétique, sans jamais faire appel à un architecte, sauf au début de sa carrière, lorsqu'on l'y contraignait, afin de satisfaire les autorités communales. D'après lui, celles-ci avaient une «antipathie atavique» pour ses innovations. Il conçut seul tous ses grands ouvrages, méprisant les architectes qui voulaient donner aux ponts une allure «monumentale». En revanche, il partageait avec eux et avec quelques journalistes spécialisés un goût pour l'analyse esthétique des ouvrages d'art. D'ailleurs, les architectes furent les premiers à reconnaître l'intérêt des structures de Maillart, bien avant les ingénieurs en génie civil. En 1947, la galerie architecturale du Musée d'art moderne de New York consacra une grande exposition à ses travaux, alors que la plupart des ingénieurs américains n'avaient jamais entendu parler de lui.

Quelques années plus tard, les experts en génie civil comprirent enfin que les ponts de Maillart étaient des merveilles techniques. Aux États-Unis, après la Seconde Guerre mondiale, l'arc à caisson s'imposa pour les ponts en béton à moyenne ou longue portée. En Suisse, les professeurs de l'École polytechnique finirent par enseigner les concepts de Maillart. L'un des plus éminents adeptes de Maillart est l'ingénieur suisse Christian Men, qui a conçu plusieurs ponts arc raidi par le tablier, dès la fin des années 1950. Les ingé-



7. POUR CONCEVOIR LES ENCEINTES en béton des citernes de Saint-Gall, en Suisse, Maillart analysa graphiquement leur structure. Il renforça leurs parois avec des cerceaux en acier, pour qu'elles résistent à la pression de l'eau contenue dans les enceintes, tout en étant plus minces que ce que prévoyaient les plans initiaux.



8. LES COLONNES ÉVASÉES de l'immeuble Filter (construit par Maillart en 1912, à Rorschach, en Suisse), se fondent dans le plafond, c'est-à-dire dans les dalles de l'étage supérieur, qu'elles soutiennent à elles seules, sans poutres horizontales.

nieurs américains ne construisirent ce type de ponts qu'après 1970.

Avec du recul, on comprend que Maillart appartient à l'école de John Roebling, qui conçut le pont de Brooklyn, et de Gustave Eiffel, qui construisit également de nombreux ponts et

viaducs. La préoccupation première de ces trois hommes était l'esthétique : ils commençaient par dessiner la silhouette de leur ouvrage et, ensuite seulement, ils utilisaient des techniques d'analyse simples pour les rendre viables.

David BILLINGTON est professeur en ingénierie à l'Université de Princeton.

Sigfried GIEDION, *Space, Time and Architecture : The Growth of a New Tradition*, Harvard University Press, 1963.

Max BILL, *Robert Maillart : Bridges and*

Constructions, Artemis, 1969.

Elizabeth B. MOCK, *The Architecture of Bridges*, Ayer, 1972.

David P. BILLINGTON, *Robert Maillart : Builder, Designer and Artist*, Cambridge University Press, 1997.

La lumière en cage



JEAN-MICHEL LOURTIOZ • DANIEL MAYSTRE

Par une analogie entre la physique du solide et l'optique, les physiciens contrôlent la lumière en construisant des cristaux photoniques qui piègent, filtrent et véhiculent les photons. Ces cristaux serviront dans les communications optiques de demain.

Le miroir est le moyen le plus connu de contrôler la lumière : il réfléchit et donc réoriente les rayons lumineux issus d'une source ou d'un objet situé devant lui. Tous les rayons ? Non, car les objets rayonnent dans toutes les directions de l'espace, et seule une petite partie des rayons arrive sur le miroir. De surcroît, une fraction de la lumière incidente est absorbée et transformée en chaleur dans le miroir. Cette faible absorption n'affecte pas notre perception visuelle, mais elle diminue le rendement des dispositifs optiques. Les cristaux photoniques qui sont, comme nous le verrons, des miroirs particuliers, sont nés du besoin de mieux contrôler la lumière dans toutes les directions de l'espace : comment pouvons-nous optimiser les perfor-

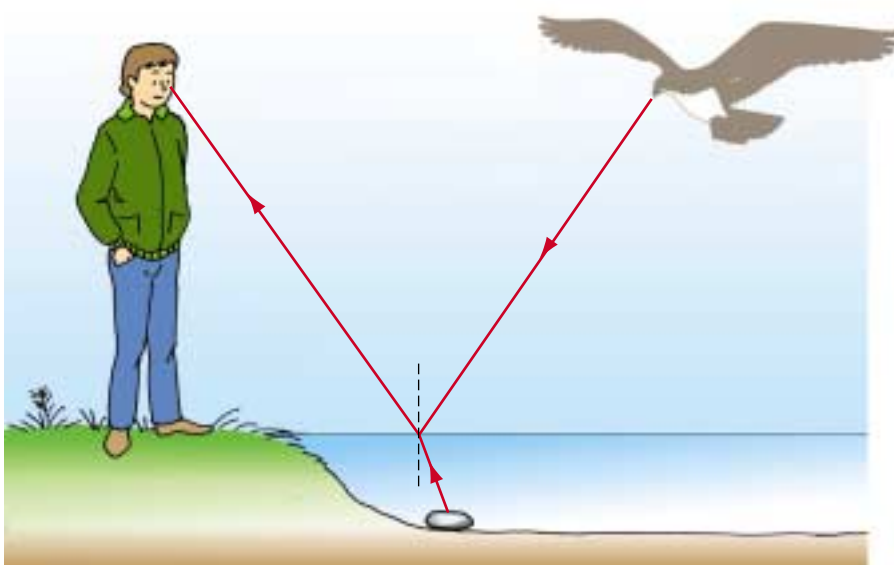
mances des sources optiques à l'état solide, telles les diodes lumineuses ? Comment pouvons-nous récupérer tous les photons issus d'un émetteur ?

Après la fabrication du premier cristal photonique, en 1991, cette motivation a perduré, mais ce n'est plus la seule. L'avènement des cristaux photoniques s'inscrit dans le processus plus général de la miniaturisation des composants optoélectroniques. Cette nouvelle manière de domestiquer la lumière permettrait de la guider sans perte le long de guides d'ondes orientables dans l'espace. Le physicien se prend alors à rêver de « processeurs » photoniques, où les électrons seraient remplacés par des photons, beaucoup plus rapides que les processeurs actuels.

Avant d'arriver à cette commande ultime de la lumière, notons l'analogie entre la propagation de la lumière et la propagation des électrons dans un cristal solide. Un cristal est un assemblage périodique d'atomes dans les trois dimensions. Dans un cristal de silicium pur, les quatre électrons de valence (ou de liaison) sont utilisés pour former les quatre liaisons covalentes du cristal périodique. Ainsi, il ne reste plus d'électrons pour la conduction. Pour obtenir un électron conducteur, il faut casser des liaisons, ce qui requiert de l'énergie. La bande de valence (les électrons sont liés aux atomes) et la bande de conduction sont séparées par cette énergie, qui définit une bande interdite. Un électron ne pourra pas se propager dans le cristal si son énergie est dans cette bande.

Existe-t-il pour les photons des bandes interdites du même type qui permettraient d'en contrôler la progression ? Considérons un assemblage tridimensionnel de matériaux transparents dont les caractéristiques optiques diffèrent. Les caractéristiques optiques, notamment l'indice optique qui détermine la vitesse de la lumière dans le milieu, jouent un rôle analogue pour les photons à celui du potentiel atomique pour les électrons, et l'on voit apparaître ces bandes interdites pour les photons, c'est-à-dire des gammes d'énergie où les photons ne peuvent pas se propager. N'étant pas non plus absorbée, puisque ces matériaux sont transparents, la lumière émise dans ces assemblages est réfléchie, quelle que soit sa direction d'incidence.

Cet assemblage est un cristal photonique, aussi nommé matériau à bande interdite photonique. Le lien entre cristal solide et cristal photonique résulte de l'analogie formelle



1. UNE SURFACE D'EAU, comme la surface d'un lac, altère le trajet des rayonnements lumineux. Un observateur peut voir en même temps un caillou dans l'eau et un oiseau dans le ciel. L'interface entre l'eau et l'air réfléchit l'image de l'oiseau et transmet celle du caillou. Les propriétés simultanées de réflexion et de transmission des interfaces permettent des interférences.

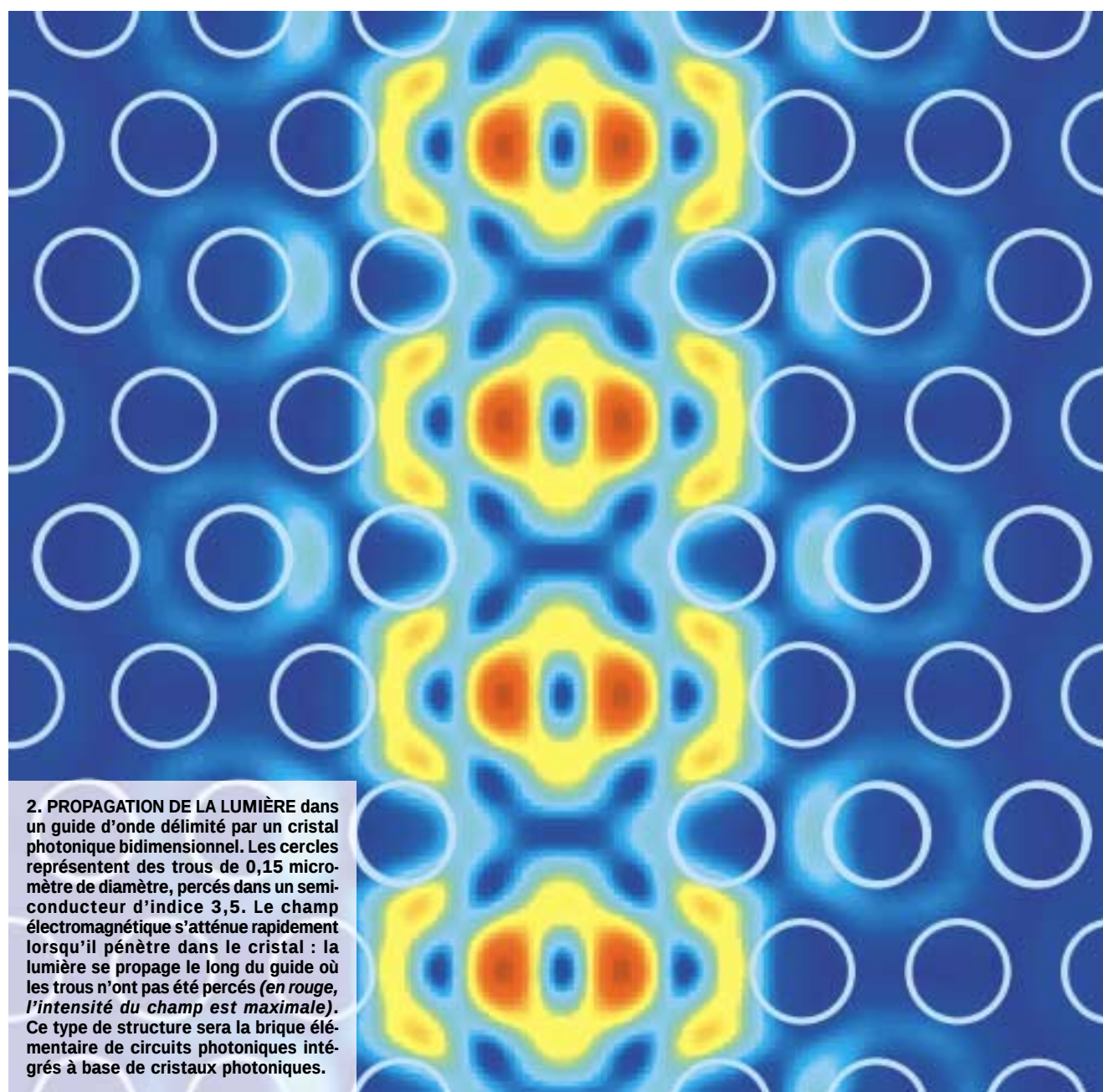
qui existe entre l'équation qui régit le comportement des électrons (l'équation de Schrödinger) et les équations de propagation de la lumière (les équations de Maxwell) : si l'on compare ces équations terme à terme, elles ont la même forme. À l'aube du XX^e siècle, les pionniers de la mécanique quantique cultivaient l'analogie inverse, montrant pour chaque particule la dualité de sa représentation corpusculaire et de son caractère ondulatoire. C'est sans doute un juste retour des choses si, à l'aube du XXI^e siècle, le savoir accumulé en physique du solide sert à contrôler le flux des ondes lumineuses.

De la transparence à l'opacité

Poursuivant l'analogie entre électrons et photons, nous examinerons comment un empilement de lames transparentes permet d'obtenir, à une dimension, un système à bande photonique interdite. Nous verrons ensuite que le cas unidimensionnel peut être étendu en deux et en trois dimensions. L'exemple de quelques cristaux photoniques nous permettra de mesurer la distance qui reste à franchir avant l'intégration de ces structures novatrices dans les outils de télécommunication.

Qu'est-ce qu'un matériau transparent ? La question peut paraître saugrenue, tant ces objets sont familiers : les lunettes sont d'usage courant. Les fibres de silice, qui transportent la lumière sur plusieurs kilomètres sans atténuation sont au cœur des télécommunications optiques.

Les matériaux transparents, l'eau, l'air, le verre ou les films en plastique, sont des diélectriques. En apparence, la lumière traverse ces matériaux sans rencontrer d'obstacles. Pourtant, il suffit de se placer sur la berge d'un lac calme pour constater que la présence d'un matériau diélectrique agit sur la propagation de la lumière.



Henri Benisty/École polytechnique

En observant la surface du lac, on peut voir en superposition un caillou posé sur le fond du lac et un oiseau dans le ciel. L'eau transmet la lumière issue du caillou jusqu'à la surface, et l'air achève la propagation jusqu'à l'œil. En revanche, pour l'image de l'oiseau, la surface du lac agit comme un miroir (voir la figure 1). Ainsi, au passage entre deux milieux transparents, la lumière se scinde en deux composantes, l'une transmise, l'autre réfléchie. La transparence d'un matériau n'est qu'une illusion, car, quelles que soient ses qualités de transparence, le matériau est observé au travers d'une interface qui altère toujours la transmission.

Ce phénomène résulte d'une réalité physique : la lumière ne se propage pas à la même vitesse dans tous les diélectriques transparents. Dans l'air comme dans le vide, la lumière se déplace à environ 300 000 kilomètres par seconde. Dans l'eau, dans le verre et dans un semi-conducteur, elle se propage respectivement 1,33 fois, 1,5 fois

et 3 à 4 fois moins vite. C'est d'ailleurs une manière de caractériser un milieu diélectrique : son indice optique, ou indice de réfraction, est le quotient de la vitesse de la lumière dans le vide et de la vitesse de la lumière dans le milieu (l'indice de l'eau est de 1,33, celui du verre est égal à 1,5, etc.). Nous verrons que nous pouvons mettre à profit ces différences d'indice pour construire un système où la réflexion est considérablement augmentée, notamment à l'aide de couches minces.

De la couche mince au cristal unidimensionnel

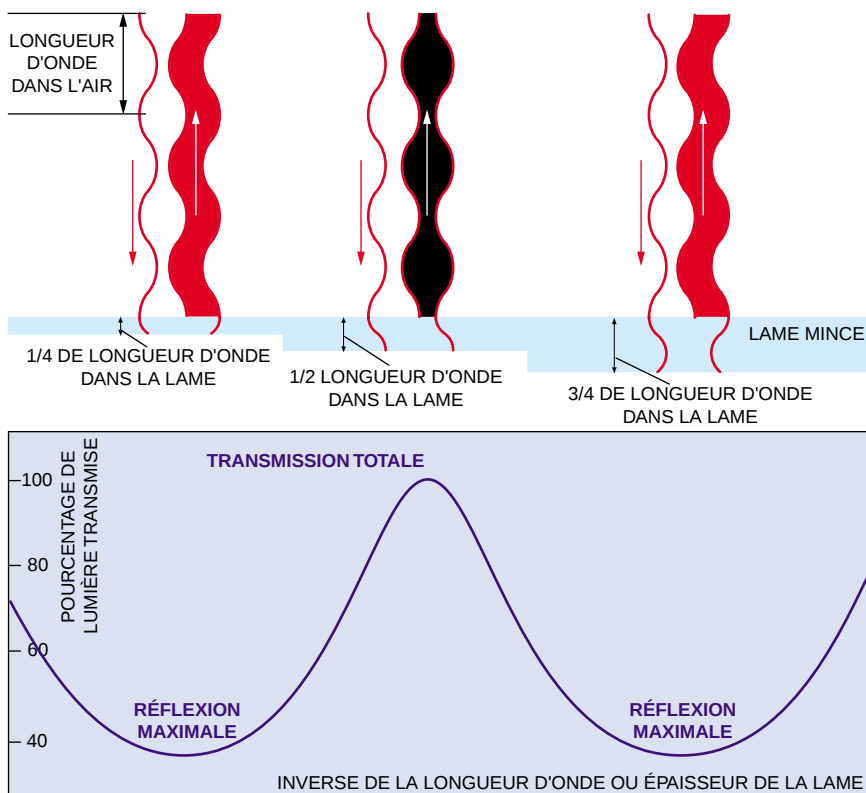
Une couche mince est une tranche de matériau diélectrique délimitée par deux plans parallèles qui la séparent de l'air. Éclairons une couche mince par une lumière d'incidence perpendiculaire à la surface de la couche. À l'interface supérieure, la lumière se scinde en deux composantes : une partie réfléchie et une autre transmise, qui

pénètre dans la couche. La composante transmise se sépare à nouveau à la frontière inférieure, et la nouvelle fraction réfléchie subit elle-même une réflexion et une transmission à son retour sur le plan supérieur. Le phénomène se poursuit indéfiniment, de sorte que la lumière initiale est séparée en une infinité de composantes.

Comme les vaguelettes à la surface de l'eau, la lumière est de nature ondulatoire. Poursuivons cette analogie par quelques observations. D'abord, quand on regarde un point à la surface de l'eau, on constate que le niveau en ce point oscille à une fréquence donnée. Ensuite, on note que les sommets (ou les creux) des vaguelettes sont séparés par une distance constante, la longueur d'onde. Enfin, on remarque que les vaguelettes se déplacent : l'onde se propage à une vitesse donnée. Dans le cas de la lumière, ces caractéristiques s'appliquent, même si l'onde ne se manifeste pas par une oscillation mécanique, mais par une vibration simultanée et coordonnée du champ électrique et du champ magnétique. La longueur d'onde λ est le quotient de la vitesse de propagation v et de la fréquence f .

Au changement de milieu diélectrique, la lumière conserve sa fréquence, mais, puisque sa vitesse est modifiée, sa longueur d'onde l'est également (la longueur d'onde dans le milieu est le quotient de la longueur d'onde dans le vide et de l'indice du milieu). Dans la lame diélectrique, quand les maximums des ondes coïncident, leur amplitude s'ajoute et l'interférence est constructive ; s'ils sont décalés, l'interférence est destructive. En choisissant l'épaisseur de la lame par rapport à la longueur d'onde utilisée, on obtient une interférence constructive ou destructive.

L'accord ou l'opposition de phase tient compte du changement de phase de la lumière lors du passage du milieu d'indice le plus faible vers le milieu d'indice le plus élevé : ceci correspond à un trajet virtuel de la lumière d'une demi-longueur d'onde. À l'inverse, quand la propagation se fait du milieu d'indice élevé vers celui d'indice faible, il n'y a pas de changement de phase. Remarquons maintenant qu'une onde qui pénètre perpendiculairement à la lame revient à l'interface supérieure après avoir parcouru une distance de deux fois l'épaisseur de la lame. Si cette distance est un multiple impair de la demi-longueur d'onde (autrement dit,



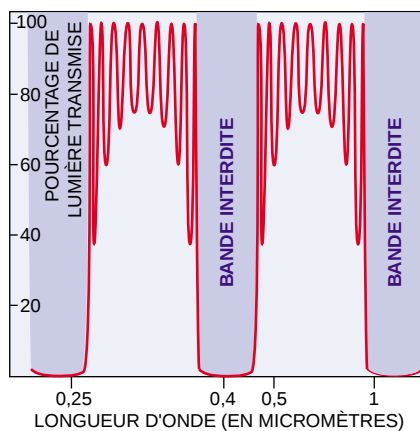
3. LA LUMIÈRE QUI ENTRE DANS UNE LAME MINCE subit des réflexions multiples. Les composantes ainsi créées interfèrent. La composante qui est réfléchie par la face inférieure parcourt une distance supplémentaire par rapport à la composante réfléchie par la face supérieure, égale à deux fois l'épaisseur de la lame. Lorsque cette dernière est un multiple impair du quart de la longueur d'onde, ces deux ondes réfléchies, qui sont en phase, interfèrent constructivement à l'extérieur et la réflexion est maximale (la transmission est minimale). À l'inverse, lorsque l'épaisseur de la lame est un multiple pair du quart de la longueur d'onde, les deux composantes sont déphasées et la réflexion est minimale (la transmission est maximale), comme l'atteste la courbe de transmission en fonction de l'épaisseur de la lame ou, ce qui revient au même, en fonction de l'inverse de la longueur d'onde à épaisseur fixée (en bas).

si l'épaisseur de lame est un multiple impair du quart de la longueur d'onde, il y aura accord de phase entre l'onde retour et la première onde réfléchie. L'interférence sera donc constructive et la réflexion de la lame sera maximale (voir la figure 3).

Ainsi, avec une seule lame diélectrique d'indice optique égal à trois, et aux longueurs d'onde où l'interférence est constructive, on obtient une réflexion de 60 pour cent de la lumière incidente, soit une transmission de 40 pour cent. Cette valeur est supérieure à celle de la réflexion par une seule interface air-diélectrique (environ 25 pour cent), mais elle ne permet pas de classer la lame comme un bon réflecteur. Comment augmenter encore la réflexion et réduire la transmission ? En empilant des couches minces à des distances régulières.

En première analyse, la transmission de deux couches sera égale au carré de la transmission d'une couche unique, puisque l'onde qui arrive sur la première couche subit deux transmissions successives avant de sortir de la seconde couche. La transmission avec deux couches devrait être égale à 16 pour cent ($0,4 \times 0,4$), à 6,4 pour cent avec trois couches et, finalement, à un pour cent avec cinq couches superposées.

En fait, cette analyse néglige les réflexions dans l'air qui sépare les couches. Ces réflexions sont profitables : il se crée dans les couches d'air un système de réflexions multiples, semblable à celui qui existe dans les couches de diélectrique. Lorsque l'épaisseur des couches d'air est aussi un multiple impair du quart de la longueur d'onde, les maximums de réflexion de ces couches coïncident avec ceux des couches diélectriques. Or, pour une lumière incidente donnée, la longueur d'onde dans l'air sera trois fois supérieure à celle dans le diélectrique (si l'indice optique est égal à trois). L'épaisseur des couches d'air devra, pour un effet optimal, être trois fois celle des couches diélectriques. Avec un empilement de cinq couches diélectriques séparées par quatre couches d'air d'épaisseur adéquate, on obtient un véritable dispositif réflecteur, puisque le coefficient de réflexion maximal atteint 99,99 pour cent dans une gamme de longueur d'onde où les interférences sont constructives en réflexion, ce qui correspond à des bandes interdites.



4. UN EMPILEMENT de cinq couches minces, d'indice $n = 3$ et d'épaisseur égale à un micromètre, séparées par de l'air, est un excellent réflecteur, puisque la transmission minimale est inférieure à 1 pour 10 000. La totalité de ce qui est perdu en transmission est réfléchi, de sorte que l'on obtient 99,99 pour cent de réflexion dans les bandes interdites.

Un tel empilement de couches diélectriques est nommé miroir de Bragg, en référence aux premières expériences sur la diffraction de rayons X menées au début du XX^e siècle. Les miroirs de Bragg sont vraiment efficaces lorsque l'éclairage est perpendiculaire aux couches, mais, pour une incidence oblique, les bandes interdites (en transmission) deviennent plus étroites et se décalent en longueur d'onde.

Les dimensions supérieures

En deux dimensions, on obtient une structure périodique aux propriétés équivalentes à celles des superpositions de couches en répartissant des tiges sur un plan selon un motif triangulaire. Comme dans le miroir de Bragg, cette structure est un assemblage périodique de deux diélectriques d'indices optiques différents : le matériau d'indice le plus faible est l'air et celui d'indice le plus élevé est un diélectrique agencé en cylindres parallèles de longueur supposée infinie. Cette structure a une symétrie hexagonale (voir la figure 5).

On peut aussi concevoir cette structure comme un empilement de grilles ou de rangées de tiges diélectriques, séparées par des couches d'air. On a ainsi «troué» les lames diélectriques de l'empilement de Bragg. L'analogie va plus loin : lorsque l'empilement de grilles est éclairé perpendiculairement par une onde lumineuse, les conditions de réflexion maximales sont obtenues lorsque les épaisseurs des grilles

et des couches d'air sont voisines du quart de la longueur d'onde.

En raison de la symétrie hexagonale de cette structure, la lumière se propage de manière identique dans les six directions hexagonales. Ainsi, lorsque la transmission est empêchée dans l'une des six directions, elle l'est suivant les autres. Le cristal bidimensionnel n'est pas encore une structure qui réfléchit la lumière dans toutes les directions, mais il s'en rapproche. Quelques remarques tempèrent pourtant cet optimisme. D'abord, les six directions équivalentes sont dans le plan orthogonal aux tiges : suivant les directions de propagation extérieures à ce plan, le cristal bidimensionnel ne présentera pas le même intérêt. Ensuite, la transmission dépend aussi ici d'une caractéristique de la lumière que nous n'avons pas encore mentionnée, la polarisation.

Comme l'onde à la surface de l'eau qui s'accompagne de déplacements verticaux du niveau de l'eau, l'onde de lumière est une onde transversale : les oscillations du champ électrique et celles du champ magnétique sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Dans ce plan perpendiculaire, toutes les directions d'oscillation sont autorisées, mais, comme les oscillations des deux champs sont liées, l'oscillation d'un champ définit l'oscillation de l'autre. La direction d'oscillation du champ électrique est nommée direction de polarisation. Si cette direction est fixée, l'onde est polarisée de manière rectiligne. Deux ondes qui se propagent dans la même direction et à la même fréquence peuvent différer par la polarisation, et une bande de transmission interdite d'un cristal photonique pour une polarisation donnée ne sera pas forcément une bande interdite pour une autre polarisation. Dès que l'incidence est oblique, ou dès que le cristal est bidimensionnel, la polarisation joue un rôle, apportant une contrainte supplémentaire.

Au final, le cristal photonique bidimensionnel n'est pas encore le réflecteur parfait, efficace dans toutes les directions de propagation et quelle que soit la polarisation, mais c'est une étape importante pour toutes les applications à l'optique guidée (voir la figure 2). Dans ce domaine, qui est celui des diodes lasers et des autres composants utilisés aux extrémités des fibres optiques, la lumière est déjà guidée suivant un plan

horizontal et le cristal bidimensionnel va permettre de contrôler la lumière dans les autres directions du plan.

La preuve expérimentale

Dans les années 1990, Eli Yablonovitch eut l'idée d'imiter la structure des cristaux solides existants, plus particulièrement celle des cristaux semi-conducteurs, tels le silicium ou le germanium. Comme ces semi-conducteurs ont de larges bandes d'énergie interdites pour les électrons, on peut imaginer qu'il en serait de même pour les photons. La structure cristalline correspondante, qui est aussi celle du diamant, résulte de l'emboîtement de deux structures cubiques à faces centrées (la maille cristalline est un cube, et les atomes sont au sommet et au centre des faces du cube), l'une étant décalée de l'autre par un quart de la grande diagonale du cube. Comment fabriquer une telle structure ?

Les symétries de ces structures, d'une importance capitale pour la physique des semi-conducteurs, ont été étudiées et recensées en détail depuis des dizaines d'années. En particulier, les physiciens du solide savent que, dans certaines directions, il y a des galeries vides d'atomes, de véritables canaux au sein de l'édifice atomique. Autrement dit, dans ces directions, on peut traverser le cristal sans ren-

contrer d'atomes : si le cristal était plus gros, on pourrait voir à travers ! On peut concevoir un cristal de silicium comme un bloc percé de galeries judicieusement orientées.

Partant d'un bloc de plexiglas d'indice optique élevé, E. Yablonovitch et son équipe ont percé selon trois directions à 120 degrés, simulant les galeries du cristal de silicium (voir la figure 6). Par des mesures de transmission, ils ont observé que cette structure était parfaitement opaque, quelle que soit la direction d'incidence de la lumière. C'était un cristal photonique parfait. Cette expérience fut capitale pour son aspect démonstratif, mais elle concernait des longueurs d'onde de quelques centimètres, plusieurs ordres de grandeurs supérieures aux longueurs d'onde micrométriques utilisées pour les télécommunications optiques. Durant les dix années suivantes, les physiciens se sont évertués à réduire la taille de ces motifs tridimensionnels, imaginant des moyens de structurer la matière à petite échelle.

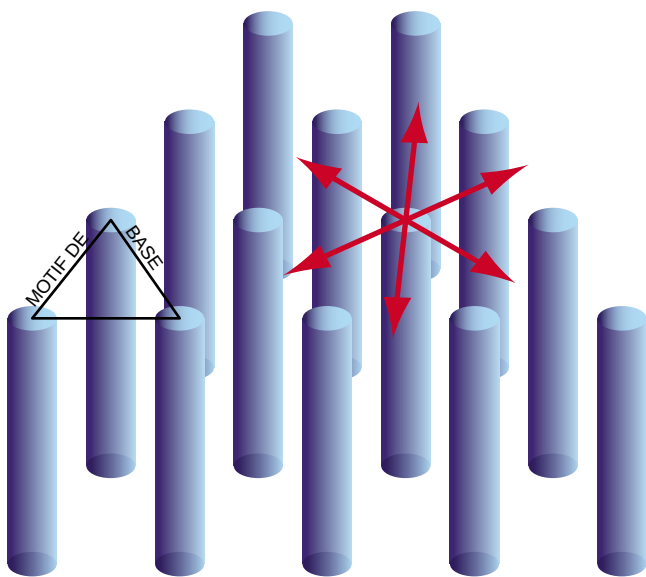
Vers les nanostructures

Au début des années 1990, la fabrication de miroirs de Bragg constitués de multicouches de semi-conducteurs avec des épaisseurs de l'ordre du dixième de micromètre venait juste d'être maîtrisée grâce aux techniques de dépôt de

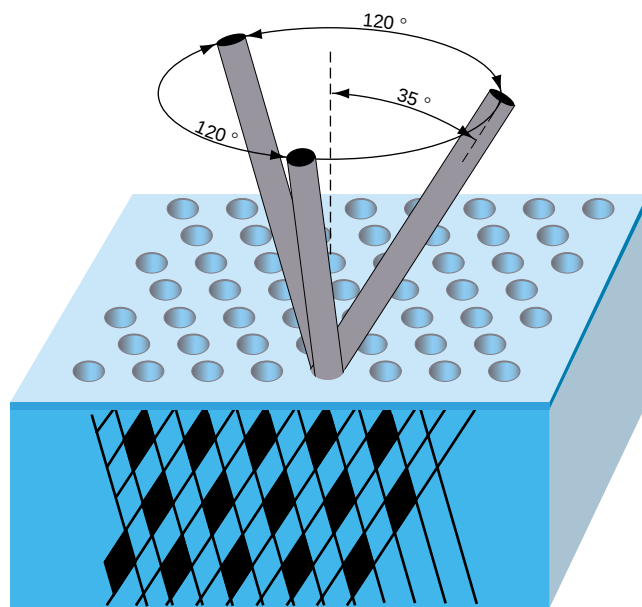
diélectrique sous vide, tandis que les premiers composants optoélectroniques utilisant des microcavités étaient expérimentés. Rares étaient ceux qui imaginaient alors qu'en moins de dix ans les physiciens fabriqueraient les premiers cristaux photoniques en deux et en trois dimensions dans le domaine infrarouge et visible : ils ne prévoyaient pas les progrès en miniaturisation qui ont accompagné les progrès de la microélectronique durant cette fin de siècle.

Les circuits de nos ordinateurs comportent des millions de transistors dont les tailles sont de l'ordre de quelques micromètres. Les multiples techniques de fabrication de ces circuits ont aiguillonné la fabrication de cristaux photoniques. Nous présenterons deux exemples de structures récemment obtenues, qui ont l'avantage de posséder des bandes interdites photoniques aux longueurs d'onde des télécommunications optiques (vers 1,5 micromètre).

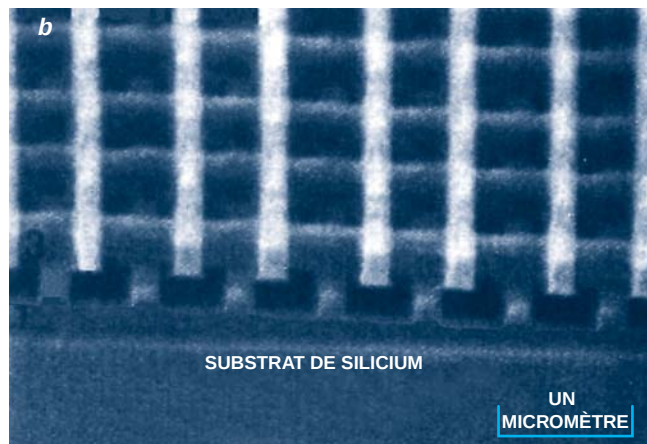
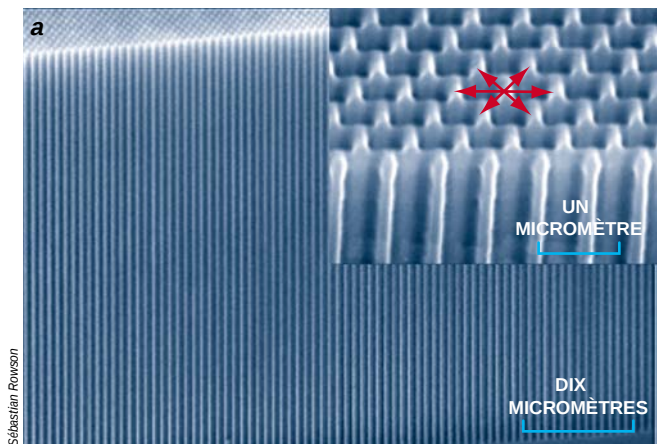
En 1999, Sebastian Rowson, Alexis Chelnokov et l'un de nous (J.-M. Lourtioz) ont fabriqué un cristal bidimensionnel obtenu par gravure photoélectrochimique d'un substrat de silicium (voir la figure 7a). On utilise d'abord un masque de silice percé de trous qui reproduit le motif hexagonal quel'on veut obtenir. Le masque est déposé sur le substrat de silicium, qui est alors soumis à une



5. UN CRISTAL PHOTONIQUE BIDIMENSIONNEL est constitué d'un assemblage de tiges diélectriques cylindriques séparées par de l'air. Le motif périodique est un triangle équilatéral, et la structure possède une symétrie hexagonale : la lumière se propage de manière identique dans les six directions (flèches rouges). Grâce à cette symétrie, si la transmission de la lumière est interdite suivant une direction, elle le sera pour les cinq autres.



6. LE PREMIER CRISTAL PHOTONIQUE TRIDIMENSIONNEL a été construit en 1991 par percement d'un bloc de plexiglas selon trois directions à 120 degrés. En creusant ces trous, on laisse dans le bloc des zones qui reproduisent à grande échelle la structure cristalline du silicium. C'est un cristal photonique idéal, parfaitement opaque quelles que soient la direction d'incidence de la lumière et sa polarisation.



7. DEUX CRISTAUX PHOTONIQUES fabriqués en 1999. Un cristal bidimensionnel (a) est façonné selon une symétrie hexagonale (flèches rouges). Une autre structure, tridimensionnelle, est un

empilement de tiges horizontales de section carrées, placées sur un substrat de silicium (b). En raison de leurs symétries, ces cristaux réfléchissent parfaitement la lumière.

attaque chimique, ce qui crée une ébauche du motif cristallin.

Ensuite, le substrat est utilisé comme anode dans un bain électrochimique : les trous amorcés se creusent selon une direction privilégiée du cristal de silicium. En moins de deux heures de ce régime, on obtient des trous de 100 micromètres de profondeur. La structure obtenue ressemble à celle d'une brique poreuse, les trous verticaux jouant le rôle des tiges cylindriques du cristal bidimensionnel décrit précédemment. En réduisant la distance entre les trous (la période du cristal) à 0,680 micromètre, la propagation était interdite à la longueur d'onde des télécommunications optiques (1,5 micromètre), quelles que soient la direction (indiquée par les flèches, sur la figure 7a) et la polarisation.

La même année, une autre structure a été fabriquée aux Laboratoires Sandia, à Albuquerque, par Shawn-Yu Lin et ses collègues. C'est un cristal tridimensionnel fabriqué couche par couche, par combinaison des techniques de dépôt sur silicium et des techniques de gravure. Chaque couche gravée est un réseau de tiges horizontales de section carrée (voir la figure 7b). Les tiges des couches adjacentes sont perpendiculaires et les tiges à une couche d'intervalle sont parallèles entre elles, mais décalées latéralement, de sorte que le motif se répète à l'identique toutes les quatre couches. L'empilement obtenu reproduit la structure d'un cristal atomique : les intersections des

tiges de l'empilement sont disposées selon deux réseaux cubiques à faces centrées, comme le sont les atomes d'un cristal de silicium. Une bande interdite a été obtenue pour une longueur d'onde voisine de dix micromètres, puis, après une diminution de la période du cristal, pour une longueur d'onde de 1,5 micromètre.

Ces exemples ne doivent pas nous laisser croire que les problèmes de fabrication de tels cristaux sont résolus. L'obtention d'un cristal tridimensionnel requiert un nombre considérable d'étapes, et la superposition ne serait-ce que d'une période (quatre couches) relève encore de l'exploit technique. L'observation de la nature nous invite à un peu de modestie, car l'homme ne fait que réinventer ce qui existe déjà : la similitude entre du silicium poreux et une aile d'oiseau est à ce titre frappante (voir la figure 8). Les ailes de certains papillons ou les opales sont également des cristaux photoniques naturels.



8. L'OBSERVATION MICROSCOPIQUE d'une aile d'oiseau (un ministre mâle) révèle des microstructures qui se comportent comme un cristal photonique dont la bande interdite est située dans le bleu : la lumière bleue est totalement réfléchie, de sorte que l'aile apparaît bleue, bien qu'elle soit totalement dépourvue de pigments colorés.

La cage aux photons

Le contrôle de l'émission spontanée de lumière par les atomes du milieu solide est l'une des principales motivations des travaux sur les cristaux photoniques. Or, jusqu'ici, nous avons uniquement décrit les cristaux photoniques comme des réflecteurs omnidirectionnels. Autrement dit, nous avons décrit les barreaux de la cage de lumière. Si l'on désire placer un émetteur dans le cristal et piéger des photons, il faudra creuser une microcavité au sein du cristal photonique. Cette cavité s'obtient simplement en rompant la périodicité du cristal, en y créant un défaut, pour reprendre la terminologie de la physique du solide. La lumière qui se trouverait dans ce défaut ne pourrait donc pas en sortir, entourée de toutes parts de parois parfaitement réfléchissantes. Toute émission de lumière serait inhibée.

Toute? En réalité, et fort heureusement, le piège ne sera pas total, car il permettra d'extraire de la lumière dont la longueur d'onde correspond à la taille de la cavité. Même avec une paroi très réfléchissante (99,9999 pour cent de réflexion, par exemple), la transmission résiduelle suffira à extraire tous les photons qui ont la longueur d'onde adéquate, à condition que les pertes d'absorption des matériaux soient réellement négligeables : le moindre photon ne pouvant être absorbé finira par sortir.

Grâce à la faible taille de la cavité et à la forte

réflectivité de ses miroirs, l'émission spontanée du matériau émetteur placé en son sein sera même considérablement renforcée par rapport à ce qu'elle serait dans l'espace libre : on dit que la luminescence est exaltée. On parle aussi de laser sans seuil, car les photons s'accumulent dans la cavité, et on aboutit rapidement à un effet d'avalanche, c'est-à-dire à une amplification de l'émission stimulée. Le matériau émetteur, quant à lui, peut être le même que celui qui constitue le cristal photonique (un semi-conducteur, par exemple). Ce peut être aussi un matériau différent, que l'on introduit dans la cavité pour ses propriétés émissives.

Pour illustrer l'effet de sélectivité en longueur d'onde de la microcavité, considérons un cristal photonique bidimensionnel de tiges diélectriques au sein duquel on a créé un défaut en ôtant l'une des tiges diélectriques (voir la figure 9). Comparons la transmission de ce cristal à celui du cristal périodique. La transmission est analogue dans les deux cas, avec une bande interdite de transmission comprise entre 0,9 et 1,3 micromètre, dans l'infrarouge proche. Toutefois, dans le cas du cristal avec lacune, un pic de transmission très étroit apparaît pour une longueur d'onde voisine de 1,1 micromètre. Ce pic, où la transmission est voisine de l'unité, résulte de la présence

de la cavité au sein du cristal. À ce phénomène de résonance de cavité, bien connu en électromagnétisme, sont le plus souvent associées de nombreuses fréquences (ou de longueurs d'onde). Ici, la fréquence de résonance est unique et reste inchangée lorsque l'incidence de la lumière sur le cristal varie. De surcroît, le pic est très étroit, ce qui résulte de la bonne réflectivité de la cavité.

Dans cet exemple, la lumière provient de l'extérieur de la cavité, et non de l'intérieur. Suivons son trajet à travers la structure. À la longueur d'onde de résonance, la lumière pénètre dans le cristal, s'accumule quelques instants dans la cavité et finit par ressortir du cristal avec un flux égal au flux entrant. Ainsi, à cette longueur d'onde, la lumière est « aspirée » par la cavité, au sein de laquelle une forte énergie lumineuse reste stockée. La cavité agit donc comme un « relais » pour la lumière incidente, qui traverse alors facilement le cristal. C'est aussi un filtre, puisque le cristal qui l'entoure reste opaque à toutes les autres longueurs d'onde.

Une autre propriété serait utile pour les communications : la directivité de l'émission. Or, une cavité dont la symétrie est hexagonale ne peut émettre de manière directionnelle, car les photons ont une probabilité équivalente d'être émis suivant les six directions. De la même façon, dans une cavité sphérique, il n'y aurait pas de direc-

tion privilégiée. Pour pallier cet inconvénient, on crée un défaut asymétrique dans le cristal photonique.

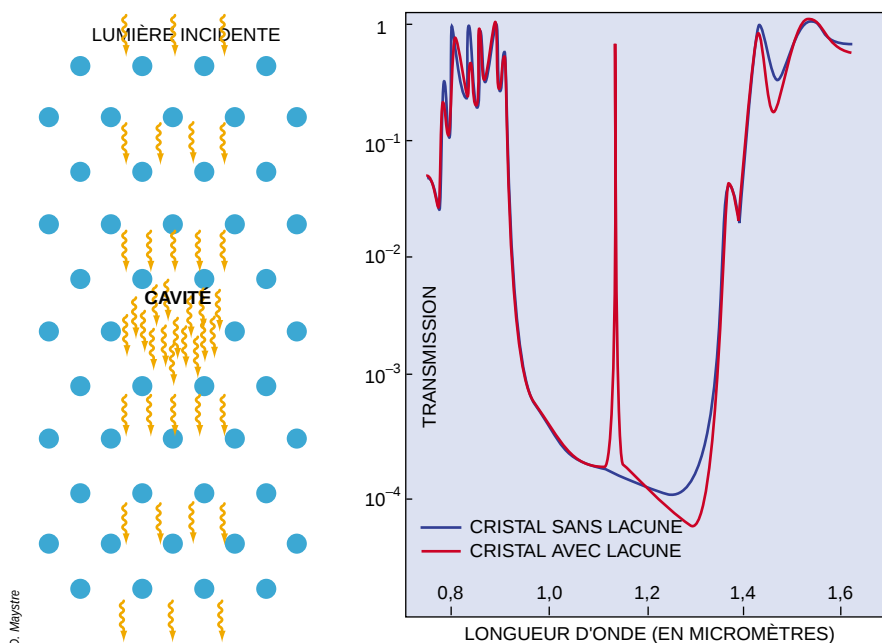
Alex Scherer et ses collègues, à l'Institut de technologie de Californie, ont fabriqué un cristal photonique bidimensionnel formé d'un réseau hexagonal de trous percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre. Tous les trous sont identiques, sauf deux, de rayons supérieurs, qui délimitent la microcavité (voir la figure 10). Ayant rompu la symétrie, l'émission peut se faire de manière privilégiée dans la direction où la cavité est la plus allongée. Lors de cette expérience, les physiciens ont obtenu la première émission laser à partir d'une microcavité insérée dans un cristal photonique. C'est l'un des plus petits lasers jamais construits avec un volume de moins d'un dixième de micromètre cube. Des expériences similaires sont menées par l'équipe de Pierre Viktorovitch, à l'École centrale de Lyon.

Prévoir pour construire

Avant de fabriquer cristaux et cavités, les physiciens évaluent le comportement des structures et optimisent leurs performances. Ces études ont beaucoup profité des travaux de la physique du solide, qui permettent de prévoir les propriétés des électrons dans un matériau solide, notamment pour prédire l'ensemble des bandes permises ou interdites. Cependant, à la différence des cristaux atomiques qui possèdent un très grand nombre de périodes, les cristaux photoniques réels sont le plus souvent limités à une dizaine de périodes.

De ce fait, des effets de bords empêchent l'application rigoureuse des traitements issus de la physique du solide pour l'analyse du comportement des cristaux photoniques. La description détaillée de la propagation d'une onde lumineuse dans un cristal limité dans l'espace est alors nécessaire. Ces modélisations consistent donc à résoudre les équations de Maxwell, qui décrivent le comportement des ondes électromagnétiques, dans des géométries complexes. Seules les modélisations informatiques permettent ce travail.

Dans des cas très complexes, notamment lorsque l'on associe des cristaux photoniques avec d'autres éléments optiques, tels des émetteurs, les moyens de calcul mis en œuvre



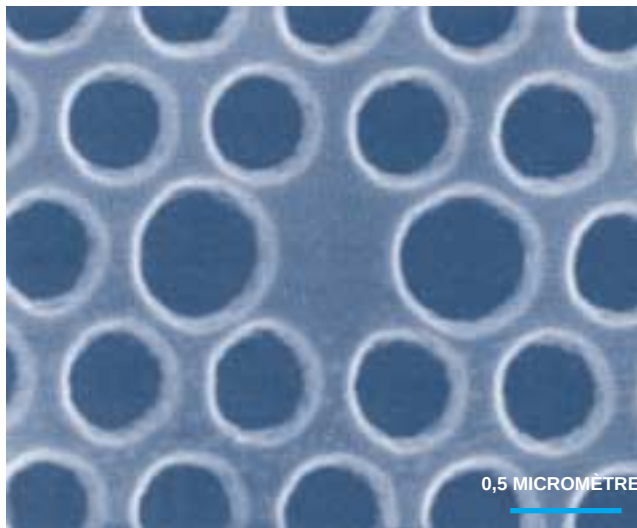
9. LA RUPTURE DE LA PÉRIODICITÉ dans un cristal crée une cavité constituée par la suppression d'une barre diélectrique dans un cristal bidimensionnel à symétrie hexagonale. Cette cavité sélectionne la lumière d'une longueur d'onde précise qui est transmise presque sans pertes après quelques instants d'accumulation dans la cavité, comme l'atteste le pic de transmission (à droite).

ne permettent encore qu'une modélisation partielle.

Le domaine des cristaux photoniques est en plein essor, et les physiciens rivalisent d'imagination dans la conception de nouvelles structures et de nouvelles applications. Toutefois, il convient d'être prudent : les recherches dans un domaine en pleine exploration débouchent parfois dans des directions inattendues. Nous avons souligné qu'une motivation importante de ces recherches concernait les sources optiques à l'état solide. À ce titre, la mise au point d'un microlaser à cristal photonique est encourageante, mais le chemin est encore long avant que ce type de source puisse être utilisé dans un système optoélectronique plus élaboré.

Les physiciens rêvent également de pouvoir faire émettre ces sources, photon par photon, en plaçant au centre de la cavité un minuscule émetteur de lumière en matériau semi-conducteur, nommé boîte quantique. Le contrôle du flux de lumière, photon par photon, ouvrirait des perspectives sans précédent dans le domaine de la cryptographie quantique et des communications optiques. Dans cette veine, l'application la plus concrète, avant même l'émission de lumière, est le filtrage en longueur d'onde à l'entrée et à la sortie des fibres optiques. Nous avons vu que les cristaux photoniques creusés de cavités permettraient, grâce à leur sélectivité, de filtrer la lumière en transmission ou en réflexion. On pourrait alors réduire d'un facteur 100 l'encombrement des composants utilisés pour le filtrage des longueurs d'onde.

À plus court terme, les études des cristaux photoniques débouchent peut-être sur des applications dans le domaine des micro-ondes, domaine où le premier cristal photonique a été mis au point. Comme les échelles de longueur en jeu sont plus grandes (du millimètre à quelques centimètres), la fabrication de structures à ces échelles est facilitée. Or, ces longueurs d'onde sont aussi celles des télécommunications, civiles ou militaires, les signaux se propageant le plus souvent dans l'air et non plus dans des fibres. Pour les téléphones portables notamment, les réflecteurs



10. UN RÉSEAU HEXAGONAL DE TROUS percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre, est le premier laser obtenu à partir d'une microcavité insérée dans un cristal photonique. La microcavité est bordée des deux trous d'un diamètre supérieur à ceux du reste du réseau.

à cristaux photoniques ont certainement leur rôle à jouer. Des ingénieurs pensent les utiliser pour éliminer, par réflexion, le rayonnement de l'antenne des téléphones portables qui n'est pas directement utilisé pour la communication, ce qui réduirait des risques potentiels pour l'utilisateur.

Le champ d'application qui s'ouvre aujourd'hui aux cristaux photoniques est vaste. À cet égard, il est étonnant de pouvoir réunir autour d'un thème unique les études sur les antennes et les recherches sur les sources optiques ultimes. D'une certaine façon, cette vision tridimensionnelle de l'optique ressemble aux architectures à trois dimensions qui apparaissent dans les mémoires de nos ordinateurs sous la forme d'empilements de circuits micro-électroniques séparés par des plans métalliques. Au-delà du matériau à bande interdite photonique et des dispositifs élémentaires qu'il permet de réaliser, les physiciens envisagent de véritables circuits optiques ou optoélectroniques à deux ou à trois dimensions. Des microcanaux de lumière, plus communément nommés guides d'onde électromagnétique, y remplaceraient les conducteurs métalliques : les parois du guide seraient formées de cristaux photoniques réflecteurs à tous les angles d'incidence. Cette conception pose bien évidemment de redoutables problèmes de modélisation et de fabrication, et beaucoup d'efforts seront nécessaires avant d'aboutir à une application pratique.

L'engouement pour les cristaux photoniques tient aussi à l'analogie fascinante entre la propagation de la lumière et celle des ondes électroniques dans un cristal solide. En science, l'analogie est courante, car elle stimule l'imagination et entraîne souvent une vision nouvelle des objets étudiés. Des travaux récents explorent plus avant cette analogie, en évoquant notamment les concepts de cristal photonique non linéaire en optique et de cristal sonique en acoustique.

Dans le premier cas, on imagine des alternances périodiques de matériaux dont les propriétés optiques sont altérées par un flux lumineux intense. La struc-

ture apparente du matériau se modifiera en conséquence avec l'intensité de l'éclairement, et ce qui était une bande de transmission pourra, par exemple, devenir une bande interdite photonique. Autrement dit, on disposera d'un système susceptible de nous protéger contre les flux lumineux intenses, tels ceux des lasers de puissance, à des longueurs d'onde données. Dans le cas du cristal sonique, on sait que le son est une onde de vibration des milieux matériels dont les équations de propagation sont très proches des équations de propagation de la lumière. Il n'y a qu'un pas à franchir pour élaborer des matériaux ou des objets qui empêchent la propagation des sons dans des plages de fréquence et des directions de l'espace choisies à l'avance (bandes interdites soniques). De la lumière au son, le pas est presque franchi.

Jean-Michel LOUTIOZ est chercheur à l'Institut d'électronique fondamentale de l'Université d'Orsay. Daniel MAYSTRE est chercheur au Laboratoire d'optique électromagnétique de la Faculté des sciences et techniques de Saint-Jérôme, à Marseille.

J.D. JOANNOPOULOS, R.D. MEADE et J.N. WINN, *Photonic crystals*, Princeton University Press, 1995.

J. RARITY et C. WEISBUCH, *Microcavities and Photonic Bandgaps : Physics and Applications*, NATO ASI Series, Kluwer Academic Publishers, 1996.
