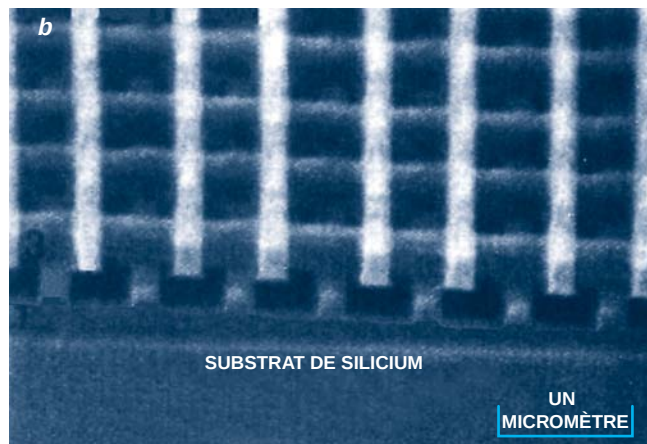
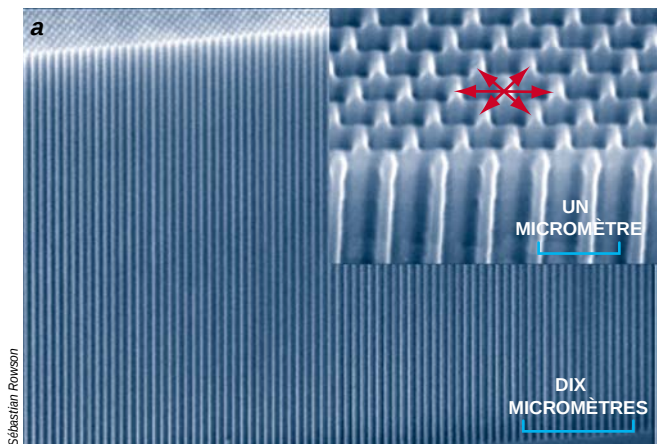




7. DEUX CRISTAUX PHOTONIQUES fabriqués en 1999. Un cristal bidimensionnel (a) est façonné selon une symétrie hexagonale (flèches rouges). Une autre structure, tridimensionnelle, est un

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 (99,999 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.

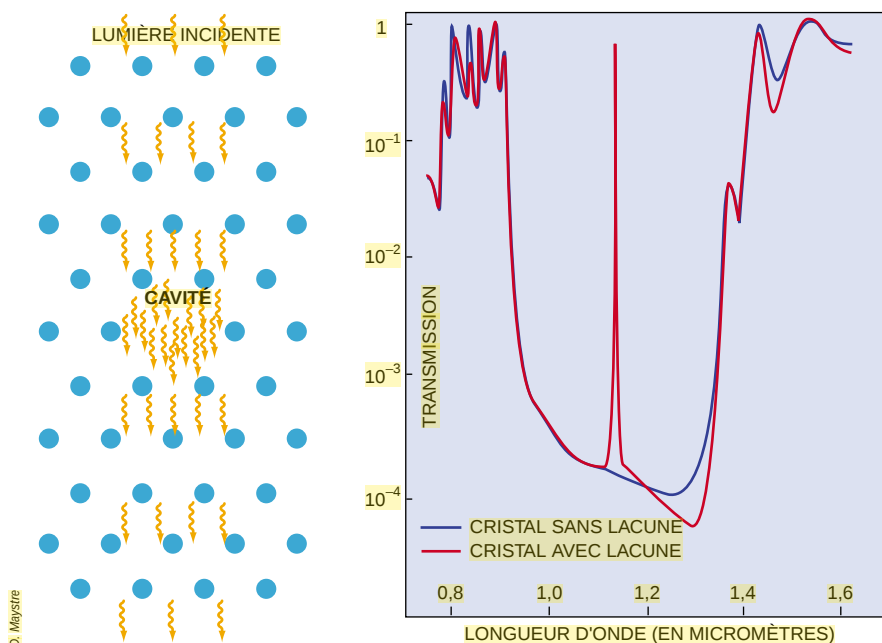
Alex Scherer et ses collègues, à l'Institut de technologie de Californie, ont fabriqué un cristal photonique bidimensionnel formé d'un réseau hexagonal de trous percés dans une membrane d'un semi-conducteur composite, qui a la propriété d'émettre vers 1,5 micromètre. Tous les trous sont identiques, sauf 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).