

Un cristal photonique est un matériau périodique dans une, deux ou trois dimensions de l'espace dont la période est un multiple de celle de l'onde lumineuse qui le traverse. Cette relation des périodes confère au cristal photonique des propriétés particulières de réfraction et de réflexion qui font apparaître des couleurs. Voyons comment.

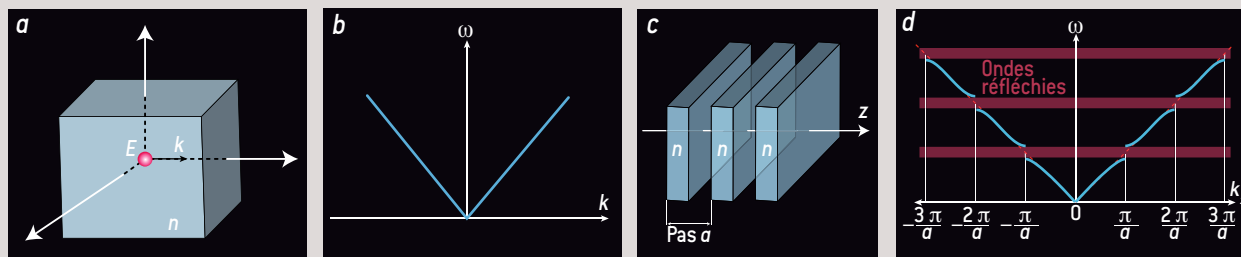
Une bonne manière d'apprécier comment une onde électromagnétique se propage dans un matériau est de calculer ce que l'on appelle la « relation de dispersion ». Cette fonction établit une relation entre l'énergie  $E$  du photon

— ou la pulsation  $\omega$  de l'onde associée —, et la quantité de mouvement du photon — ou le vecteur d'onde  $\vec{k}$  de l'onde associée (a). Dans un milieu homogène d'indice  $n$ , cette relation prend la forme d'une ligne continue, indiquant ainsi que toute onde peut se propager dans le matériau, quelle que soit sa fréquence (b).

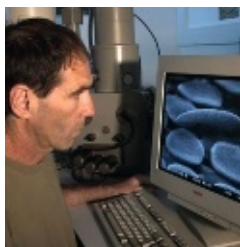
La situation est complètement différente dans un milieu stratifié — un cristal photonique —, où la cohabitation de deux périodes, celle de l'onde électromagnétique et celle de la structure, perturbe la propagation (c). On montre alors que lorsque ces périodes sont éga-

les ou multiples l'une de l'autre, la ligne se brise (d, en bleu), faisant apparaître des bandes de fréquences interdites (en rouge). Les ondes correspondantes ne peuvent se propager dans la structure : elles sont réfléchies à sa surface, lui conférant une couleur.

En outre, le pas apparent du réseau (la distance entre deux éléments de base) dépend de l'angle sous lequel on le regarde. À chaque pas correspond une longueur d'onde réfléchie, et donc une couleur, d'où l'aspect irisé de certains cristaux photoniques : selon l'angle sous lequel on les regarde, on ne voit pas la même couleur.



## L'AUTEUR



Serge BERTHIER, professeur à l'Université Paris Diderot, effectue ses recherches à l'Institut des nanosciences de Paris, au sein de l'équipe « Milieux désordonnés multi-échelle : biophotonique, couleur ».

linéaires simples. Viennent ensuite les structures bidimensionnelles, plutôt rares dans la nature, périodiques dans deux directions de l'espace, comme les réseaux croisés (voir la figure 2b). Et enfin les structures tridimensionnelles, semblables — à l'échelle près — à la structure cristalline minérale (voir la figure 2c). Toutes ces structures sont des cristaux photoniques et constituent la brique élémentaire de la photonique.

## Plusieurs niveaux d'organisation

Avant d'envisager une transposition de ces structures au monde industriel, il importe de s'interroger sur leur intérêt et leur rôle dans la vie de l'animal. Le plus évident et le plus directement « photonique » est la production de couleurs. Contrairement aux couleurs dues à des pigments, celles engendrées par les structures sont relativement saturées, brillantes et souvent très directionnelles (voir l'encadré ci-dessus). Elles participent notamment à la communication intraspécifique (entre mâle et femelle) ou interspécifique (couleurs avertissantes).

Outre la production de couleurs, les structures photoniques des animaux assurent de nombreuses autres fonctions vitales pour leur organisme, telles l'adaptation à la température extérieure, la protection

du corps ou l'hydrophobie (voir l'encadré pages 34 et 35).

Si l'on procède à un rapide bilan des moyens mis en œuvre par la nature pour réaliser l'ensemble de ces fonctions, on est frappé par l'extraordinaire économie de matériaux utilisés : une phase solide, de la chitine chez les insectes ou de la kératine chez les oiseaux, les poissons et reptiles, deux polymères très proches, et une phase fluide, liquide (eau ou fluide biologique) ou gazeuse (air). D'un point de vue optique, ces matériaux se comportent dans le visible comme des composants diélectriques présentant un faible contraste d'indice de réfraction par rapport à l'air (de 1 pour l'air à 1,6 environ pour la chitine). En d'autres termes, ce sont des matériaux transparents qui modifient d'autant plus le trajet des rayons lumineux qui les traversent que leur indice est élevé. Pourtant, chez l'animal, les couches de chitine ou de kératine suffisent à assurer de manière optimale — la survie de l'organisme en apporte la preuve — l'ensemble des fonctions. Comment un tel exploit est-il possible ? Grâce à la structure bien particulière du matériau sur plusieurs échelles. C'est ce que nous allons explorer maintenant.

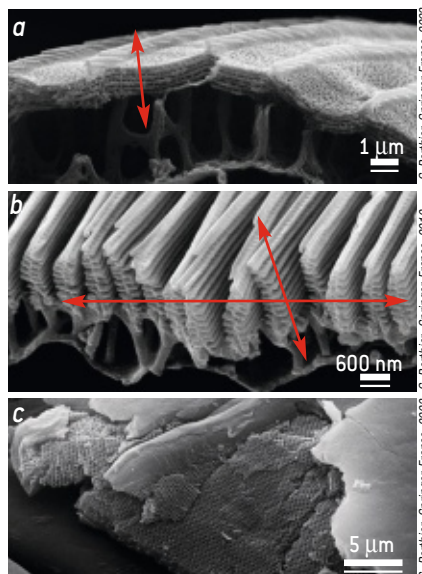
À chaque phénomène physique, il est possible de déterminer une taille caractéristique, que l'on peut voir comme l'échelle minimale à laquelle il se pro-

duit. En optique, par exemple, cette taille est celle de la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde lumineuse considérée. Tout objet de taille sensiblement égale à  $\lambda$ , ou  $\lambda/2$ ,  $\lambda/4$ ... interagira fortement avec l'onde et modifiera sa propagation. Dans le domaine du visible humain, l'échelle est la centaine de nanomètres. Pour l'hydrophobie, c'est la dizaine de micromètres : une goutte d'eau de plusieurs centaines de microns de diamètre ne « voit » pas une rugosité micrométrique, mais est fortement affectée par une rugosité plus grande. Une surface hydrophobe et colorée par effet physique présente donc les deux échelles dans sa structure : elle est multi-échelle.

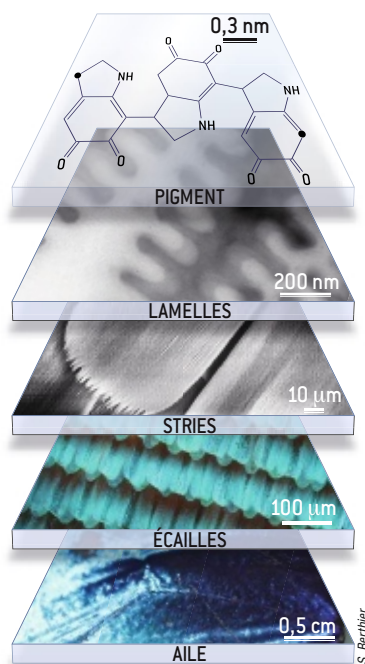
La structure de l'aile du papillon *Morpha menelaus*, par exemple, comporte cinq niveaux d'organisation (voir la figure 3) : les pigments – de grosses molécules que l'on peut mesurer en nanomètres ( $10^{-9}$  mètre) –, des lamelles de 100 nanomètres d'épaisseur, des stries distantes d'un micromètre (constituées des lamelles empilées), des écailles d'une centaine de micromètres (formées par l'assemblage des stries), et l'aile elle-même, qui peut atteindre cinq centimètres de la base à l'apex. D'un point de vue optique, chacun de ces niveaux d'organisation influe sur la couleur de l'animal ou plutôt sur certaines composantes du signal coloré, mais quelques-uns sont aussi affectés à une fonction particulière, comme l'hydrophobie ou l'isolation thermique.

Des structures photoniques multi-échelle et multifonctionnelles semblables sont observées chez de nombreux organismes vivants. Les couleurs du colibri, par exemple, sont créées par des interférences à l'échelle de quelques centaines de nanomètres, puis modulées aux échelles supérieures (les barbules de ses plumes sont hémicylindriques, ce qui donne une très grande directivité à la couleur).

Seconde caractéristique – et seconde leçon – des structures photoniques naturelles : elles sont mal ordonnées, ce qui optimise les diverses fonctions associées aux différentes échelles de structure. Optimiser un système monofonctionnel est simple dans le principe, car toute amélioration du dispositif va dans le bon sens. Il n'en est plus de même lorsqu'il s'agit d'améliorer de front plusieurs fonctions, parfois antagonistes. Quel est le bon équilibre ? Et comment y parvenir ? Le concept n'est pas simple et nous nous appuyerons sur un postulat : la redoutable efficacité de la sélection



**2. TROIS EXEMPLES** de structures photoniques chez les insectes : la structure unidimensionnelle de l'écaille du lépidoptère *Urania leilus* (a), la structure bidimensionnelle de l'écaille du lépidoptère *Morpha rhetenor* (b) et la structure tridimensionnelle de l'écaille du coléoptère *Cyphus hancoki* (c).



**3. LES CINQ NIVEAUX D'ORGANISATION** de l'aile de *Morpha menelaus* influent tous sur sa couleur (de haut en bas) : les pigments absorbent la lumière à certaines longueurs d'onde et, de par leur géométrie et leur dimension, les lamelles créent des interférences, les stries diffractent la lumière, et les écailles et l'aile dispersent les rayons lumineux. De par leur échelle, certaines structures confèrent aussi d'autres propriétés à l'insecte : les stries l'isolent thermiquement, les écailles le rendent hydrophobe et aérodynamique, et les multiples couches qui constituent l'aile augmentent sa résistance.

naturelle. Pendant des millions d'années, les organismes ont évolué et testé de nouvelles structures, de nouveaux dispositifs, et seules les structures optimales ont perduré jusqu'à aujourd'hui. Cette évolution s'est faite vers une plus grande complexité, vers des structures multi-échelle – parfois même fractales – et mal ordonnées (voir la figure 4), le désordre topologique étant lui-même multi-échelle...

Loin d'être un inconvénient, ce désordre est un atout majeur dans la multifonctionnalité et participe à la robustesse des effets engendrés, c'est-à-dire à leur relative insensibilité aux conditions extérieures. Ce désordre peut être précisément quantifié par une grandeur nommée entropie de configuration, et mis en rapport avec l'optimisation globale de la structure. On observe ainsi que dans les structures naturelles, désordre et optimisation globale sont corrélés : le désordre assure l'optimisation moyenne des fonctions, qui se fait au détriment de l'optimisation de chacune d'elles.

## Imiter les matériaux biologiques

Les structures biologiques tendent vers la complexité pour pallier le petit nombre de matériaux dont elles disposent et leur faible contraste d'indice. À l'inverse, nous disposons d'une large gamme de matériaux (et donc d'indices), y compris complexes. Pour l'heure, cependant, les structures artificielles produites par l'homme restent assez simples, car on sait encore peu de choses sur les propriétés optiques de systèmes multi-échelle construits à partir de tels matériaux complexes. Voici quelques exemples de réalisations bio-inspirées.

De par sa structure bidimensionnelle en « sapin de Noël » très ouverte, l'aile de *Morpha* se prête étonnamment bien à la détection de vapeurs, car l'air s'insinue facilement dans toute la structure. Le spectre réfléchi par l'aile, ou tout simplement sa couleur, dépend à la fois de la structure géométrique – l'épaisseur des couches, que l'on peut considérer comme constante –, et de l'indice de réfraction de ses composants, notamment de l'air intercalé entre les couches d'écailles et entre les stries. En présence de vapeur d'un produit quelconque, l'indice de ces couches d'air est modifié, et la couleur varie. Une analyse des spectres de réflexion