



Papillon de nuit



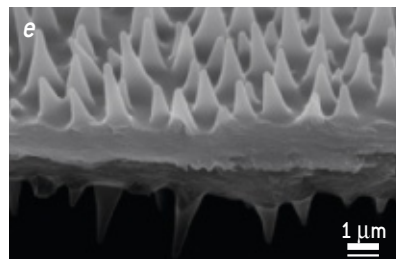
S. Berthier

✓ **Vision optimisée.** Un exemple typique de ces structures est la surface externe des yeux à facettes de la plupart des papillons de nuit et de certains papillons diurnes tel *Parnassius apollo* (d). La cornée de chaque facette est constituée d'un assemblage quasi périodique de microrugosités coniques d'une centaine de nanomètres qui crée, à l'échelle de l'onde lumineuse, un gradient d'indice avec l'extérieur : passant progressivement de l'indice de l'air à l'indice de la facette, l'onde est très peu réfléchi. Une telle structure est aussi hydrophobe.

Structures antireflets

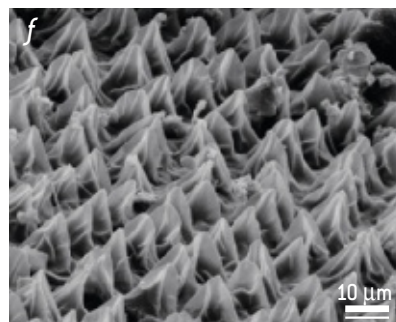
De nombreux insectes ont développé en diverses parties de leur organisme (œil, ailes...) des structures à la fois transparentes et non réfléchissantes (et généralement aussi hydrophobes et, par conséquent, autonettoyantes). Ces structures leur sont utiles pour absorber l'énergie solaire, optimiser la vision en milieu peu lumineux ou augmenter la transparence pour le camouflage.

✓ **Absorption solaire.** Les ailes des papillons du genre *Graphium* tel *Graphium weiskei* (e) présentent des structures similaires qui facilitent l'absorption de l'énergie solaire par les pigments des couches profondes en limitant la réflexion des rayons lumineux.



S. Berthier

✓ **Camouflage.** La structure en picots pseudoconiques des ailes des libellules (f) les rend très transparentes. Des ailes transparentes sur un corps longiligne, tel est le secret de leur camouflage dans le paysage.



S. Berthier

Propriétés mécaniques

Chez de nombreux coléoptères, les ailes antérieures ne participent pas, ou peu et assez indirectement, au vol. Elles ont acquis un rôle de protection du corps par optimisation de la rigidité.



Chrysina aurigans

S. Berthier

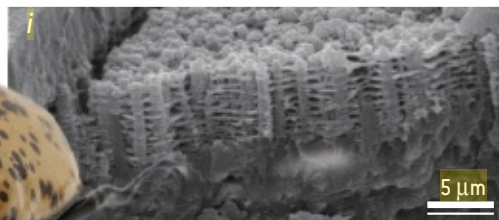
✓ **Rigidité.** L'élément constitutif des élytres

des coléoptères (et des ailes des autres insectes) est la chitine, un polymère qui cristallise en de longues chaînes, lesquelles se regroupent pour former des aiguilles rigides, parallèles les unes aux autres. Un tel système est anisotrope : il n'est rigide que selon une direction et plie dans la direction perpendiculaire aux aiguilles. Mais chez de nombreux insectes, les aiguilles, organisées en couches, sont légèrement déviées d'une couche à l'autre selon un angle à peu près constant (g), ce qui assure à la structure une grande rigidité isotrope. Cette organisation est aussi responsable de l'aspect métallique des insectes (h, voir aussi l'encadré page 36) et de la forte polarisation circulaire de la lumière qu'ils réfléchissent.

Couleurs changeantes

De nombreux animaux modifient leur couleur selon des processus variés faisant intervenir soit des pigments (caméléon, sole), soit des structures (coléoptères). Nombre d'insectes changent ainsi de couleur de façon active ou passive. Cette propriété est nommée X-chromie, X représentant la contrainte provoquant le changement de couleur. Les plus répandues sont l'hygrochromie (hygrochromie) et la température (thermochromie).

✓ **Hygrochromie.** Le coléoptère géant tropical *Dynaste hercules* (ci-dessous) offre un exemple classique d'hygrochromie passive. Sous atmosphère sèche, ses élytres sont bruns, tirant parfois sur le vert. Sous atmosphère humide, l'insecte devient noir. Pourquoi ? Parce que ses élytres sont composés de couches assez désordonnées de chitine et d'air. Lorsque l'eau s'infiltre par les failles parfois nombreuses de la surface, l'ensemble devient quasi transparent, laissant la lumière atteindre les couches pigmentaires profondes où elle est absorbée.



Jean Pol Vigneron - Marie Passart



Dynaste hercules

© Shutterstock/Jens Stolt (Morpho heisteria), A. Bucklin (papillon de nuit), J. Thirmer (Dynaste hercules)

DU CRISTAL PHOTONIQUE À LA COULEUR

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.

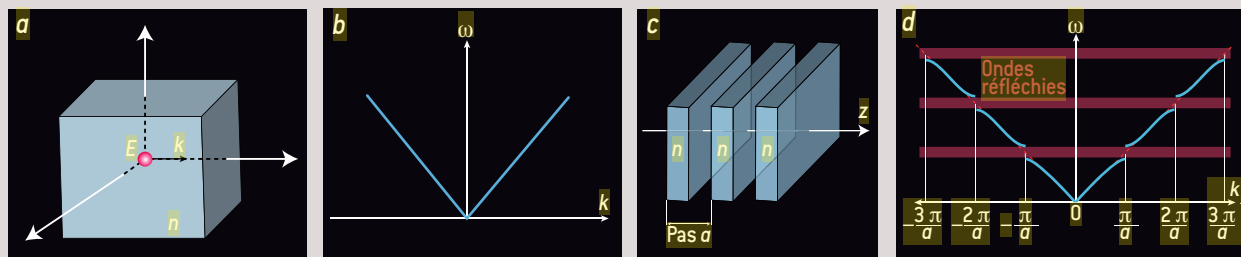
Une bonne manière d'apprécier comment une onde électromagnétique se propage dans un matériau est de calculer ce que l'on appelle la « relation de dispersion ». Cette fonction établit une relation entre l'énergie E du photon

— ou la pulsation ω 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).

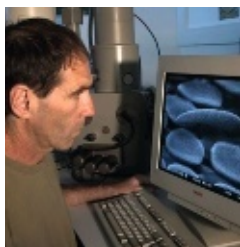
La situation est complètement différente dans un milieu stratifié — un cristal photonique —, où la cohabitation de deux périodes, celle de l'onde électromagnétique et celle de la structure, perturbe la propagation (c). On montre alors que lorsque ces périodes sont éga-

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-