



sont les leçons de la nature que nous allons tenter d'appréhender et d'appliquer. Avant de les examiner de plus près, un petit tour d'horizon de la photonique s'impose.

Lorsqu'une onde lumineuse rencontre un matériau homogène, elle est soit transmise, soit réfléchie, dans une direction et une proportion parfaitement décrites par les lois de la réflexion et de la réfraction, les « lois de Snell-Descartes ». Passée cette frontière, l'onde poursuit sa route en droite ligne jusqu'à l'interface suivante. Manipuler la lumière dans ces conditions ne peut se faire qu'à une échelle macroscopique, par des jeux de miroirs, de prismes, de réseaux...

Autre échelle, nouvelle optique

Tout devient différent lorsque la matière n'est plus homogène, mais présente à l'onde une structure périodique. Cette cohabitation de deux périodes – celle de l'onde et celle de la matière – conduit, sous certaines conditions, à bouleverser la propagation de l'onde. On peut freiner la lumière, la faire tourner à 90 degrés ou lui faire



1. LE PAPILLON MORPHO GODARTI est bleu à l'air pur (indice de réfraction $n = 1$), vert dans une vapeur d'acétone ($n = 1,36$) et marron clair dans une vapeur de trichloroéthylène ($n = 1,48$). La structure interne de l'aile intercale couches d'air et couches solides ; les vapeurs changent l'indice optique des couches d'air, qui modifie le spectre réfléchi par l'aile.



rebrousser chemin. Tout cela n'est possible que lorsque les deux périodes sont sensiblement du même ordre de grandeur, et c'est tout l'enjeu de la photonique : faire de la photonique, c'est structurer la matière à l'échelle de la longueur d'onde, c'est-à-dire de la distance parcourue par l'onde lumineuse durant une période – typiquement une centaine de nanomètres. Disposer régulièrement des objets à cette échelle est problématique dès qu'il s'agit de passer au stade industriel. Or le monde vivant met à notre disposition un nombre considérable d'exemples et de modèles de cette taille. À défaut de savoir les fabriquer, nous pouvons tout du moins les étudier, les modéliser et envisager d'éventuels « transferts technologiques ».

À chaque animal sa structure. Néanmoins, il est possible de faire émerger quelques grandes catégories structurales en déterminant dans combien de directions de l'espace les périodes de ces structures se développent. On distingue ainsi les structures unidimensionnelles, périodiques dans une seule direction de l'espace : ce sont par exemple les empilements périodiques de couches (voir la figure 2a) ou les réseaux

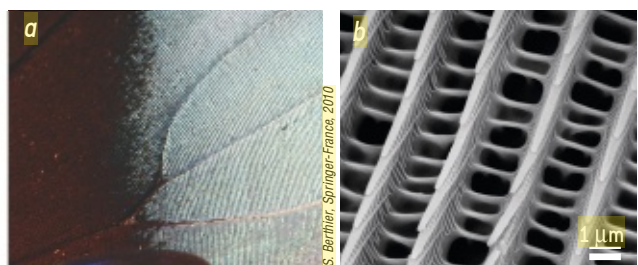
QUELQUES PROPRIÉTÉS DES STRUCTURES PHOTONIQUES NATURELLES

Les structures photoniques naturelles, qu'il s'agisse des ailes ou élytres irisés des insectes ou de l'œil d'un papillon de nuit, ont été sélectionnées au fil de l'évolution pour les atouts qu'elles confèrent à leurs propriétaires. Elles jouent de fait de multiples rôles, une même structure en remplissant parfois plusieurs.

En voici quelques exemples pris chez les insectes, dont certains inspirent déjà les physiciens et les industriels. On pourrait en citer d'autres, dans des domaines différents, tels que l'aérodynamique ou l'hydrodynamique, mais aussi chez d'autres animaux comme les oiseaux, les reptiles ou les poissons.

Propriétés thermiques

Les insectes ne produisant pas de chaleur, ils doivent capter l'énergie solaire pour maintenir une température corporelle optimale. Par leurs propriétés radiatives, les structures photoniques des ailes jouent un rôle fondamental dans ce processus. La forte absorption solaire des zones noires des ailes de nombreux papillons est assurée à la fois par les pigments (des mélanines généralement) et par la structure qui piège les rayons incidents.



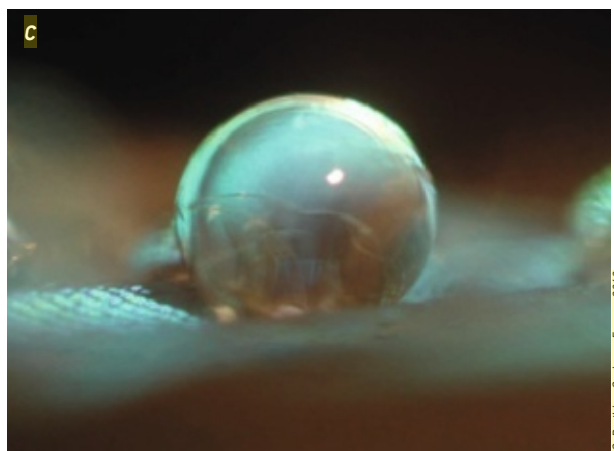
✓ **Absorption lumineuse.** Le lépidoptère *Morpho achilles* absorbe la lumière solaire via les nombreux pigments concentrés dans les zones sombres de ses ailes (a), mais aussi grâce à la structure de ses écailles. Celles-ci sont constituées de stries régulièrement espacées (b). Cette géométrie forme des alvéoles qui laissent pénétrer la lumière solaire jusqu'aux pigments des couches profondes. Malgré sa forte réflectivité dans le bleu, le papillon *Morpho rhetenor* (ci-contre) absorbe lui aussi la chaleur solaire grâce à une structure similaire.

✓ **Rayonnement.** Une surchauffe de l'insecte le conduirait cependant à une mort certaine. La même structure, de par sa composition cette fois, se met à rayonner fortement lorsqu'elle atteint une température trop élevée, ce qui réduit sa température : dès que le papillon est trop chaud, le constituant principal des stries, la chitine, se met à émettre dans l'infrarouge, donc de la chaleur.

Mouillage et adhésion

De nombreux insectes vivent dans des environnements extrêmes, saturés d'humidité (forêts équatoriales) ou au contraire secs et venteux (déserts), qui pourraient vite détériorer les propriétés de leur cuticule, quelles qu'elles soient. D'autant que souvent, les insectes sont incapables d'en assurer eux-mêmes l'entretien. La sélection naturelle a ainsi favorisé les cuticules présentant une couche hydrophobe, autonettoyante ou antiadhésive.

✓ **Hydrophobie.** Les ailes des papillons ne mouillent pas : elles sont superhydrophobes de par leur structure en stries micrométriques. Non seulement les points de contact d'une goutte d'eau avec l'aile sont rares – ce sont les sommets des stries –, mais ils sont constitués de molécules hydrophobes. Ces deux propriétés empêchent l'eau de s'étaler (effet lotus). Non soumise aux forces de contact, l'eau tend à se concentrer en gouttes d'autant plus sphériques que l'hydrophobie est forte (c, sur une aile de papillon *Morpho menelaus*). Elle s'écoule alors le long de la surface, entraînant sur son passage les éventuelles impuretés et saletés rencontrées.



✓ **Élytres autonettoyants et antiadhésifs.** Pour la même raison, les élytres des coléoptères vivant en milieu désertique ne retiennent pas les grains de sable qui recouvrent par ailleurs toute surface exposée. N'adhérant que par quelques points à la surface, les grains sont emportés par le vent et les mouvements de l'insecte.



Papillon de nuit



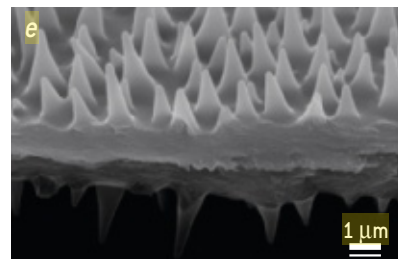
S. Berthier

✓ **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

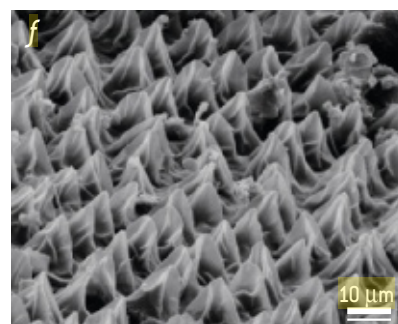
De nombreux insectes ont développé en diverses parties de leur organisme (œil, ailes...) des structures à la fois transparentes et non réfléchissantes (et généralement aussi hydrophobes et, par conséquent, autonettoyantes). Ces structures leur sont utiles pour absorber l'énergie solaire, optimiser la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

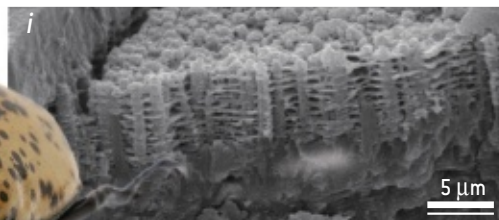
S. Berthier

✓ **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 *Dynastes 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 Rassart



Dynastes hercules

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