

un dispositif implanté, semblable à un pacemaker, applique des stimulus électriques oscillants, soigneusement minutés, dans certaines régions cérébrales profondes, tel le noyau sous-thalamique.

Cependant, les promesses de cette technique pour la maladie de Parkinson (et pour d'autres maladies) sont limitées, car les électrodes stimulent les cellules voisines, de façon non sélective, et la connaissance des stimulus à appliquer est incomplète. Nous avons récemment utilisé l'optogénétique pour étudier des modèles animaux de la maladie de Parkinson. Nous avons découvert, par exemple, que la stimulation cérébrale profonde serait plus efficace quand elle cible non pas les cellules, mais les connexions entre neurones – modifiant ainsi les interactions des différentes régions du cerveau. Et nous avons cartographié deux voies dans les circuits moteurs du cerveau ; l'une de ces voies ralentit les mouvements, l'autre les accélère et pourrait contrecarrer certains symptômes parkinsoniens (notamment le ralentissement moteur).

L'activité neuronale des schizophrènes

Qui plus est, nous avons appris comment forcer un type de cellules, les neurones néocorticaux à parvalbumine, à moduler les ondes gamma de l'activité cérébrale (un type d'ondes que l'on enregistre sur les électroencéphalogrammes). Les scientifiques savent que les patients souffrant de schizophrénie ont des neurones à parvalbumine altérés et que les oscillations gamma sont anormales dans la schizophrénie et l'autisme – mais on ignore pourquoi. En utilisant l'optogénétique, nous avons montré que les cellules à parvalbumine augmentent les ondes gamma et que celles-ci, à leur tour, renforcent le flux d'information dans les circuits corticaux.

Or les patients souffrant de schizophrénie traitent mal l'information ; par exemple, un événement banal peut être surinterprété (ce qui donne peut-être lieu à la paranoïa et aux hallucinations). Ces patients souffrent aussi d'une défaillance d'un mécanisme qui permet à chacun de distinguer les voix entendues prononcées par autrui et sa « petite voix intérieure » (les sujets entendent des voix).

Les personnes souffrant des différentes formes d'autisme, quant à elles,

L'optogénétique est-elle éthique ?

Aujourd'hui, l'optogénétique rejoint les techniques de modulation du cerveau, tels les médicaments psychoactifs et les interventions chirurgicales, qui soulèvent des questions éthiques et philosophiques. Cependant, l'optogénétique est plus sûre et moins chargée de considérations éthiques que ces stratégies plus anciennes. La puissance et la spécificité croissantes de l'optogénétique sont associées à sa complexité technique : il serait presque impossible d'utiliser l'optogénétique sur un patient non volontaire ou réticent.

Toutefois, de nouveaux problèmes, plus subtils, naissent de la précision de l'optogénétique. Tous les aspects de la personnalité, les émotions et les sou-

venirs proviennent d'événements électriques et biochimiques ayant lieu dans des groupes particuliers de neurones, selon des schémas temporels précis. Le contrôle de ces composants clés de l'esprit soulèverait quelques questions philosophiques épineuses, allant du fait de savoir quand il est approprié ou justifiable de faire de telles modifications jusqu'à des questions plus abstraites sur la nature même de la personnalité et de la volonté et sur le fait que l'on puisse les modifier.

Les interventions neurologiques fondées sur la chirurgie, des médicaments ou des électrodes sont si grossières que ces questions philosophiques sont plus théoriques que pratiques et n'ont été abordées que

partiellement. Le psychiatre est directement concerné par ce type de questions, car il sait que les traitements à sa disposition sont capables d'influer sur la construction psychique.

Mais les temps changent, comme l'illustre l'incroyable rapidité des progrès en optogénétique. La précision temporelle et cellulaire des interventions humaines dans le cerveau doit faire l'objet d'une réflexion continue et attentive qui implique les citoyens. Reste à expliquer soigneusement aux profanes ce que représentent les expériences d'optogénétique chez l'animal et comment elles peuvent nous aider à mieux comprendre le fonctionnement du cerveau et à traiter les maladies mentales.

traitent également mal l'information : elles ne saisissent pas le sens général des propos qu'on leur tient, car elles se focalisent sur des détails d'objets, de personnalités, de conversations, etc. Ces anomalies du traitement de l'information peuvent perturber la communication et le comportement. Ainsi, une meilleure compréhension de la signification des ondes gamma nous permettrait de mieux aborder ces maladies complexes.

En conséquence, l'ingénierie cellulaire et cette nouvelle technique, l'optogénétique, nous donnent des informations sur les maladies psychiatriques. On peut désormais relier certaines fonctions complexes du cerveau et des comportements aux propriétés électriques de neurones et de circuits neuronaux. Tout cela change notre compréhension de la façon dont fonctionnent les tissus électriquement excitable, qu'ils soient sains ou malades. Et ce, grâce à d'étranges protéines bactériennes qui réagissent à la lumière. L'histoire de l'optogénétique souligne qu'il est important de protéger les niches environnementales rares – où l'on découvre souvent de nouvelles espèces et de nouveaux outils. Qui aurait cru que l'étude d'une molécule extraite d'un micro-organisme donnerait naissance à une nouvelle méthode d'exploration du cerveau ? ■

✓ BIBLIOGRAPHIE

F. Zhang *et al.*, **Structures**, *Nature Protocols*, vol. 5, pp. 439-456, février 2010.

R. D. Airan *et al.*, **Temporally precise *in vivo* control of intracellular signaling**, *Nature*, vol. 458, pp. 1025-1029, avril 2009.

V. Gradinaru *et al.*, **Optical deconstruction of parkinsonian neural circuitry**, *Science*, vol. 324, pp. 354-359, avril 2009.

G. Miesenböck, **De la lumière dans le cerveau**, *Pour la Science*, n° 376, février 2009.

E. S. Boyden *et al.*, **Millisecond-timescale, genetically targeted optical control of neural activity**, *Nature Neuroscience*, vol. 8, pp. 1263-1268, septembre 2005.

Des insectes à la photonique

Serge Berthier

Les ailes des insectes présentent des structures qui contrôlent la propagation de la lumière.

Les physiciens s'en inspirent pour élaborer de nouveaux matériaux.

Contrôler la propagation de la lumière à l'échelle nanométrique : tel est l'objectif de la photonique, une branche récente (le terme n'a que 20 ans) et prometteuse de l'optique qui a par exemple conduit aux diodes électroluminescentes (LED) et aux fibres optiques structurées. L'élément de base de la photonique est le cristal photonique, une architecture périodique semblable à celle des cristaux minéraux, mais de période beaucoup plus grande, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres. De telles structures permettent de manipuler les photons, comme un circuit électrique le ferait avec des électrons. Leur réalisation à grande échelle reste cependant problématique, aussi notre équipe s'est-elle lancée, depuis plusieurs années, dans l'étude des cristaux photoniques naturels, très communs dans le monde animal et à l'origine des plus belles couleurs du vivant : ailes et élytres des insectes, écailles des poissons et reptiles, plumes des oiseaux, nacre...

Ces matériaux naturels peuvent inspirer le physicien de diverses façons. Dans un premier temps, il peut tenter de repro-

L'ESSENTIEL

- ✓ Ailes de papillons, élytres de coléoptères, plumes d'oiseaux, écailles de poissons : nombre de matériaux naturels dévient ou polarisent la lumière.
- ✓ Cette faculté est souvent accompagnée d'autres propriétés telles l'hydrophobie, l'absorption lumineuse ou la rigidité.
- ✓ Ces matériaux ont deux caractéristiques communes : ils sont structurés à plusieurs échelles et présentent un certain désordre.
- ✓ Les chercheurs s'en inspirent pour créer de nouveaux matériaux antireflets ou autonettoyants.

© Shutterstock/Oleg_Z

duire telle quelle une structure existante, ou même l'utiliser directement. Nous verrons que certains verres hydrophobes sont ainsi directement inspirés des propriétés des ailes d'un papillon, et que les ailes d'un autre papillon servent de détecteur de vapeur (voir la figure 1). Le physicien peut aussi, après modélisation, modifier la structure initiale pour amplifier un phénomène. Enfin, de l'étude des matériaux naturels, il peut déduire des règles quasi universelles qui régissent le développement des structures naturelles.

La règle première est la multifonctionnalité. Économe en moyens – elle utilise peu d'éléments chimiques –, la nature ne développe pas de dispositif strictement monofonctionnel : elle fait beaucoup avec peu. Comment ? En construisant des matériaux multi-échelle, c'est-à-dire présentant différentes structures selon l'échelle considérée. De cette organisation multi-échelle résulte un désordre structural qui non seulement assure le lien entre les différentes fonctions du matériau étudié (aile de papillon ou autre), mais optimise ces fonctions.

Multifonctionnalité, multi-échelle, désordre et optimisation en moyenne, telles



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.

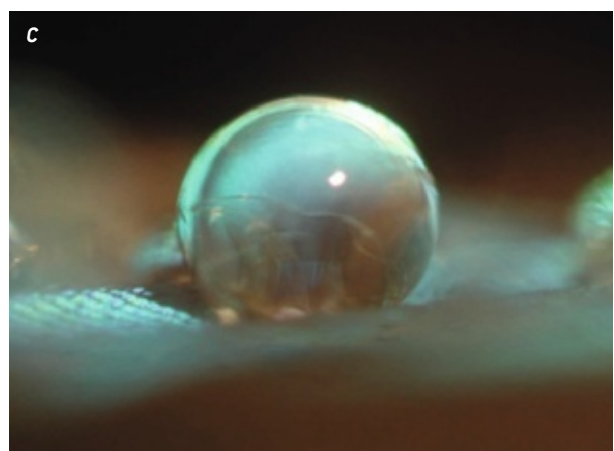
✓ Rayonnement.

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

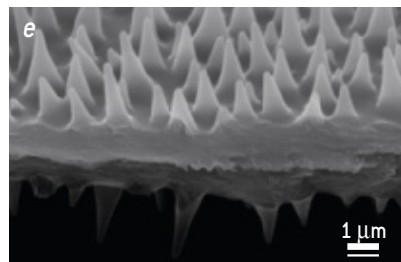


✓ **Vision optimisée.** Un exemple typique de ces structures est la surface externe des yeux à facettes de la plupart des papillons de nuit et de certains papillons diurnes tel *Parnassius apollo* (d). La cornée de chaque facette est constituée d'un assemblage quasi périodique de microrugosités coniques 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.

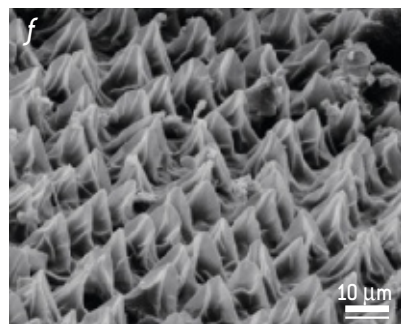
Structures antireflets

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.



✓ **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.



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.

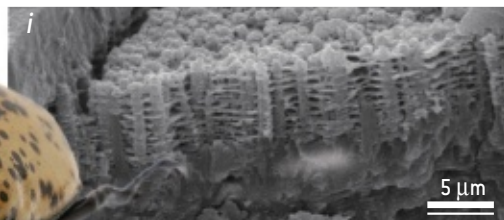
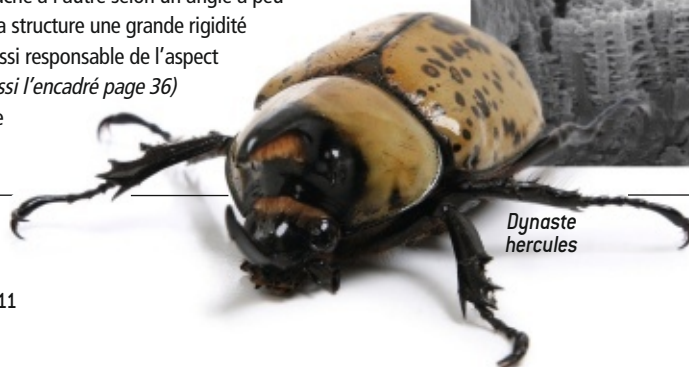


✓ **Rigidité.** L'élément constitutif des élytres des coléoptères (et des ailes des autres insectes) est la chitine, un polymère qui cristallise en de longues chaînes, lesquelles se regroupent pour former des aiguilles rigides, parallèles les unes aux autres. Un tel système est anisotrope : il n'est 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.



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.

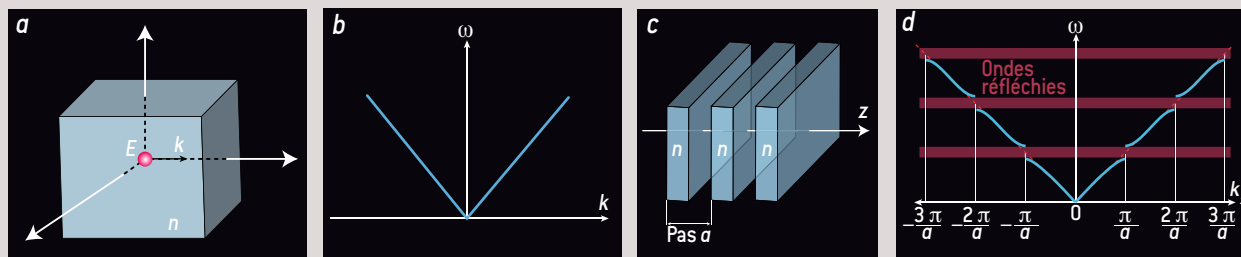
Une bonne manière d'apprécier comment une onde électromagnétique se propage dans un matériau est de calculer ce que l'on appelle la « relation de dispersion ». Cette fonction établit une relation entre l'énergie E du photon

— 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).

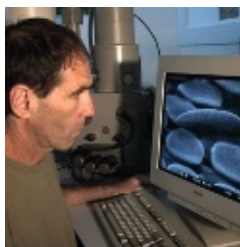
La situation est complètement différente dans un milieu stratifié — un cristal photonique —, où la cohabitation de deux périodes, celle de l'onde électromagnétique et celle de la structure, perturbe la propagation (c). On montre alors que lorsque ces périodes sont éga-

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-

duit. En optique, par exemple, cette taille est celle de la longueur d'onde λ de l'onde lumineuse considérée. Tout objet de taille sensiblement égale à λ , 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.

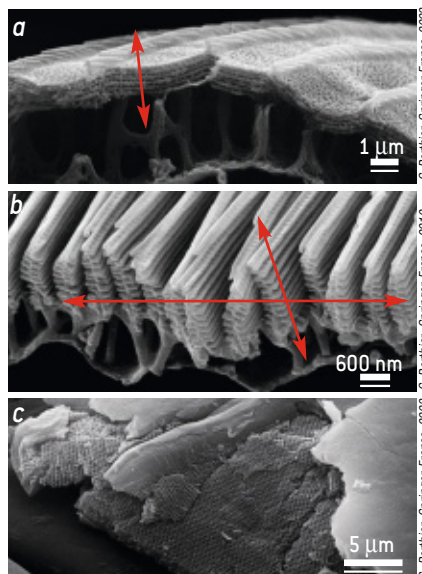
La structure de l'aile du papillon *Morpha menelaus*, par exemple, comporte cinq niveaux d'organisation (voir la figure 3) : les pigments – de grosses molécules que l'on peut mesurer en nanomètres (10^{-9} mètre) –, des lamelles de 100 nanomètres d'épaisseur, des stries distantes d'un micromètre (constituées 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 barbulles de ses plumes sont hémicylindriques, ce qui donne une très grande directivité à la couleur).

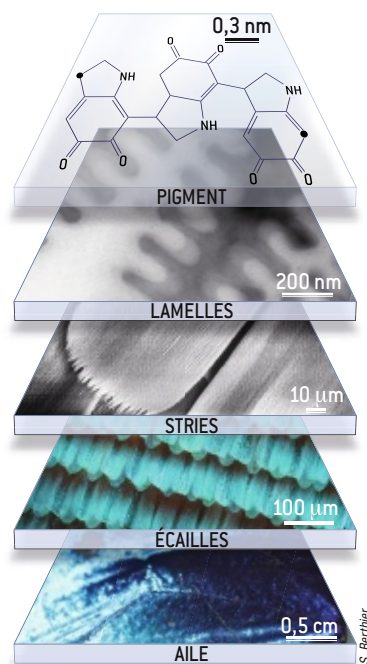
Seconde caractéristique – et seconde leçon – des structures photoniques naturelles : elles sont mal ordonnées, ce qui optimise les diverses fonctions associées aux différentes échelles de structure. Optimiser un système monofonctionnel est simple dans le principe, car toute amélioration du dispositif va dans le bon sens. Il n'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

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.



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 *Morpho 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.

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

✓ BIBLIOGRAPHIE

S. Berthier, *Photonique des Morphos*, Springer-France, 2010.

M. Elias et J. Lafait (sous la dir.), *La couleur. Lumière, vision et matériaux*, Belin, 2006.

S. Berthier, *Iridescence, les couleurs physiques des insectes*, Springer-France, 2003.

permet, après étalonnage, de distinguer la nature du produit, mais également sa concentration dans l'air (voir la figure 1). Des prototypes artificiels imitant la structure de l'aile fonctionnent, réalisés notamment par l'Institut de recherche pour le génie physique et la science des matériaux, à Budapest, en Hongrie. Il s'agit à présent de concevoir des dispositifs réalisables à l'échelle industrielle.

Une autre propriété convoitée est l'hydrophobie extrême des ailes de la plupart des papillons, souvent plus forte que celle de la feuille de lotus qui a donné son nom à cet effet (voir l'encadré pages 34 et 35). Dans les deux cas, elle est directement liée à la nature multi-échelle de la structure. Avec le laboratoire de *Saint-Gobain Recherche*, nous avons mis au point une technique pour imprimer cette structure sur verre : on applique l'aile sur le verre avant sa solidification, ce qui transfère à ce dernier la superhydrophobie de l'aile. La structure de l'aile du papillon *Papilio ulysses* imprimée sur un verre à carreau ordinaire confère à ce dernier une hydrophobie supérieure à celle obtenue par traitement chimique (voir la figure 5).

Dans un tout autre domaine, la structure bidimensionnelle très particulière qui recouvre les yeux à facettes de nombreux papillons de nuit est à l'origine d'un traitement antireflet très efficace auquel elle a donné son nom : la *moth eye structure* (la structure de l'œil du papillon de nuit). Le traitement antireflet classique de nos optiques (lunettes, objectifs...) se fait par dépôts successifs, sur la surface à traiter, de couches d'indice évoluant de celui de

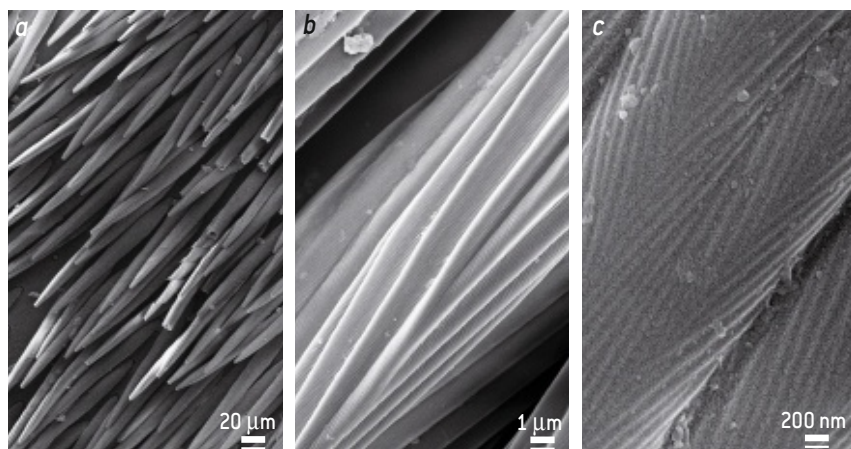
l'air ($n = 1$) à celui du verre ($n = 1,5$), ce qui minimise les réflexions à chaque interface. Efficace, cette technique présente cependant de nombreux inconvénients. Ces couches de matériaux différents, et donc de coefficients de dilatation thermique différents, ont tendance à se décoller en cas de forte variation de température. Il est également difficile d'appliquer un traitement de surface (antirayure, hydrophobie...) du fait de l'incompatibilité des indices. Elle impose par ailleurs l'utilisation de nombreux matériaux.

Un champ de bosses antireflets

Les insectes ont contourné ces difficultés avec une grande économie en développant à la surface de chaque facette (ommatidie) de l'œil une structure quasi périodique de microrugosités sensiblement coniques de 200 nanomètres environ de hauteur et de pas. Cette structure crée un gradient continu d'indice entre l'air et la cornée de la facette (la cornéule) qui annule presque tous les reflets. Assemblés, les picots coniques créent un champ de petites bosses : à l'échelle de l'onde lumineuse qui arrive sur l'œil, tout se passe comme si le matériau constituant la facette se diluait progressivement dans l'air. Arrivant sur un matériau d'indice très proche de l'air, l'onde est principalement réfractée et très peu réfléchie. Une telle structure est aussi hydrophobe, donc autonettoyante.

Des structures similaires ont été reproduites à la surface d'optiques soumises à de fortes variations de température, en particulier dans le domaine spatial : contrairement aux systèmes antireflets classiques, constitués de plusieurs couches qui se dilatent différemment, ces structures sont faites d'un seul matériau, qui est de surcroît celui du support. On sait aussi transposer de telles structures sur des surfaces servant de support à des capteurs lumineux, afin de limiter les réflexions. La technique utilisée est le procédé sol-gel : on fait un moulage de la structure à l'aide d'un gel qui est ensuite porté à l'état solide.

Contrairement aux mammifères, et en particulier aux primates, les insectes sont sensibles à la polarisation linéaire de la lumière, c'est-à-dire à l'orientation du champ électrique de l'onde lumineuse. Cela leur permet d'ajouter dans leur communication visuelle une composante qui échappe à la plupart de leurs prédateurs



4. À L'ÉCHELLE MACROSCOPIQUE, les poils du coléoptère *Celosterna pollinosa sulfurea* sont désordonnés [a], puis la structure devient fractale à plus petite échelle. Chaque poil est structuré par un faisceau de chevrons [b], et chaque chevron de même [c]. Ce désordre structurel à plusieurs échelles optimise à la fois son hydrophobie et sa rigidité.

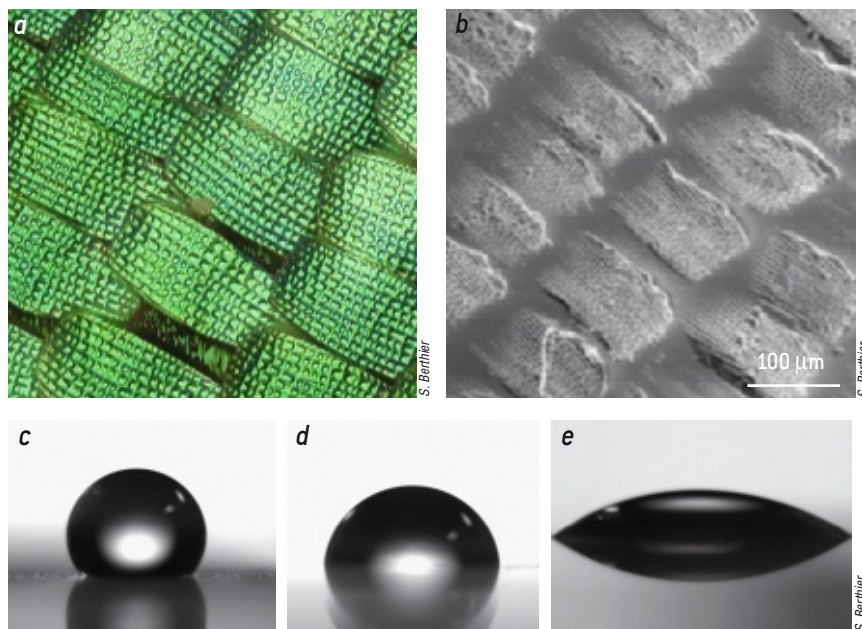
(à l'instar des mammifères, nombre d'oiseaux ne les voient pas). Les chercheurs se sont inspirés de ce phénomène pour développer des motifs antifalsification pour documents ou billets de banque.

Le champ électrique d'une onde électromagnétique est perpendiculaire à sa direction de propagation. Lorsqu'une onde électromagnétique atteint une surface plane, elle se réfléchit différemment selon que son champ électrique est parallèle à cette surface ou, au contraire, dans le plan d'incidence de l'onde (qui est perpendiculaire à la surface). En particulier, il existe un angle d'incidence – l'angle de Brewster, dont la valeur dépend uniquement de l'indice du matériau – pour lequel une onde polarisée selon cette seconde direction n'est pas du tout réfléchi (dans le cas des matériaux biologiques, l'angle est de l'ordre d'une cinquantaine de degrés). Une onde lumineuse quelconque réfléchi sous cette incidence est donc totalement polarisée dans la direction parallèle à la surface et on peut l'éteindre complètement avec un simple polariseur.

Des papillons aux billets de banque

Le phénomène est bien connu des photographes, qui utilisent ce principe pour éliminer les reflets à la surface de l'eau ou du verre. Si la surface n'est plus un simple dioptre, mais une structure multicouche engendrant une couleur par interférences, c'est cette couleur qui sera fortement polarisée et qu'il sera possible de faire apparaître ou disparaître à l'aide d'un polariseur. Sur les écailles du papillon *Papilio ulysses* (voir la figure 5a), par exemple, les côtés des alvéoles qui structurent leur surface réfléchissent une lumière bleue fortement polarisée, que l'on fait disparaître à l'aide d'un polariseur. La teinte vire alors au vert. Des structures de ce type, très délicates à reproduire et optimisées pour renforcer cet effet, sont utilisées pour faire apparaître des motifs cachés sur les billets de banque.

Dans le domaine thermique, enfin, les papillons ont développé un système d'autostabilisation de la température particulièrement ingénieux que l'on essaye de transposer sur des capteurs photothermiques, voire photovoltaïques. Les insectes, comme les capteurs, ne peuvent supporter une surchauffe prolongée et doivent maintenir leur température interne



5. IL EST AUJOURD'HUI POSSIBLE DE TRANSPOSER la structure des écailles du papillon *Papilio ulysses* (a, observées en microscopie optique) sur du verre par impression (b, microscopie électronique). Une goutte de liquide posée sur ce verre (c) est bien plus sphérique que sur un verre traité par voie chimique (d) ou non traité (e), ce qui traduit une plus forte hydrophobie.

en dessous d'une quarantaine de degrés Celsius. Cela est assuré par convection (transport de matière) et conduction vers le milieu extérieur, mais aussi par rayonnement. Par des mesures dans le moyen infrarouge, nous avons montré que la chitine, constituant majoritaire des ailes, présente un fort pic d'absorption des ondes de longueur d'onde comprise entre cinq et dix micromètres, c'est-à-dire en bordure du domaine d'émission thermique optimal de l'insecte. Ce pic agit comme un frein, une buttée pour les variations thermiques. Lorsque la température de l'insecte est optimale (vers 40 °C), le pic d'absorption de la chitine ne se superpose pas au spectre d'émission de l'aile; en d'autres termes, la chitine contribue très peu à l'émission thermique de papillon. En revanche, si l'insecte chauffe trop, le domaine d'émission thermique se décale (tout comme une barre de fer chauffée émet des ondes de plus en plus énergétiques, passant du domaine micro-onde à une lumière rouge) et se superpose au pic d'absorption de la chitine: la chitine participe alors à l'émission thermique du papillon, qui augmente, faisant baisser sa température. Lorsque le papillon est suffisamment refroidi, le spectre d'émission est à nouveau décalé par rapport au pic d'absorption de la chitine, et l'émission diminue, ce qui entraîne un réchauffe-

ment. Déplacé vers de plus hautes températures, un tel dispositif permettrait de stabiliser de façon passive la température des capteurs industriels et de prolonger ainsi leur durée de vie.

La photonique des organismes vivants n'intéresse pas seulement le biologiste. Elle fournit un chapitre de science en amont de l'ingénierie et c'est en partie cette science qui inspirera les ingénieurs. Emprunter des idées et des recettes à la nature n'est pas une nouveauté: en fait, il est rare qu'une invention ne soit pas la transposition d'une observation. L'industrie pourrait être intéressée de savoir qu'il n'est pas nécessaire de disposer de colorants pour colorer, et que la clé de cette performance est librement accessible sur les ailes de papillons, les élytres de coléoptères ou les plumes d'oiseaux. Les organismes vivants n'ont pas besoin d'une grande variété de matériaux pour nous fournir une grande variété d'effets visuels, du plus spectaculaire au plus discret. Les secrets de conception résident dans l'hétérogénéité et la complexité géométrique des matériaux.

Les processus qui sous-tendent l'évolution et la sélection naturelle sont des mécanismes puissants, qui favorisent la production d'organes d'une complexité et d'une efficacité étonnantes. De ce fait, les organismes vivants sont une source inépuisable d'inspiration pour l'ingénieur. ■

Les baleines engouffreuses

Jeremy Goldbogen

Comment certaines baleines à fanons parviennent-elles à consommer plus d'une tonne de krill par jour ? De nouveaux moyens d'observation ont révélé une biomécanique alimentaire originale.

En pleine mer, un rorqual commun affamé plonge pour effectuer une série d'accélération rapides, la gueule grande ouverte, au milieu d'un banc de petits crustacés pélagiques, le krill. À chacun de ces bonds vers l'avant, la baleine engouffre en quelques secondes une dizaine de kilogrammes de proies, contenus dans environ 70 000 litres d'eau, ce qui représente plus que son propre poids. Pour accélérer, elle fait osciller sa queue et ses nageoires. Lorsqu'elle ouvre sa gueule d'environ 90 degrés, l'eau s'y engouffre. La cavité buccale se distend grâce à des plis cutanés situés sous la tête, qui peuvent s'étirer considérablement. Quand les mâchoires sont refermées, le corps de la baleine prend la forme d'un « têtard boursoufflé ». Mais en moins d'une minute, toute l'eau engloutie est rejetée bouche fermée hors de la poche buccale, qui se dégonfle alors, les proies étant retenues par les fanons, lesquels jouent le rôle d'un tamis.

Ce comportement alimentaire, qualifié de nutrition par engouffrement (*lunge-*