

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.

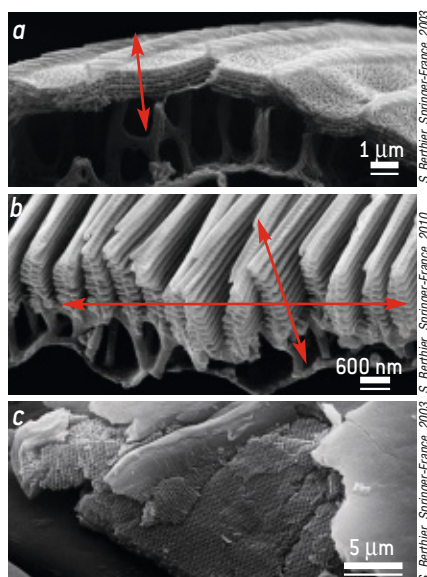
La structure de l'aile du papillon *Morpha menelaus*, par exemple, comporte cinq niveaux d'organisation (voir la figure 3) : les pigments – de grosses molécules que l'on peut mesurer en nanomètres ( $10^{-9}$  mètre) –, des lamelles de 100 nanomètres d'épaisseur, des stries distantes d'un micromètre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

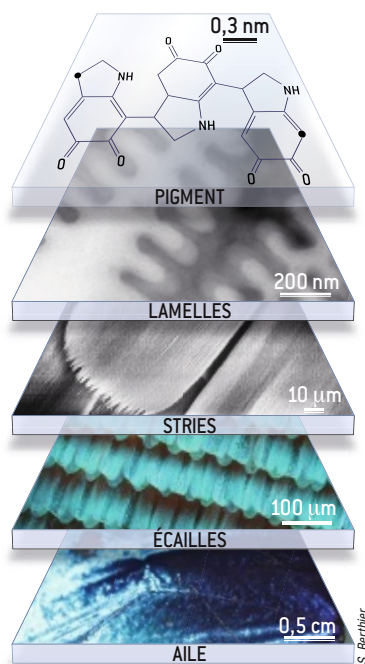
Seconde caractéristique – et seconde leçon – des structures photoniques naturelles : elles sont mal ordonnées, ce qui optimise les diverses fonctions associées aux différentes échelles de structure. Optimiser un système monofonctionnel est simple dans le principe, car toute amélioration du dispositif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

## 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, *Iridesence, 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

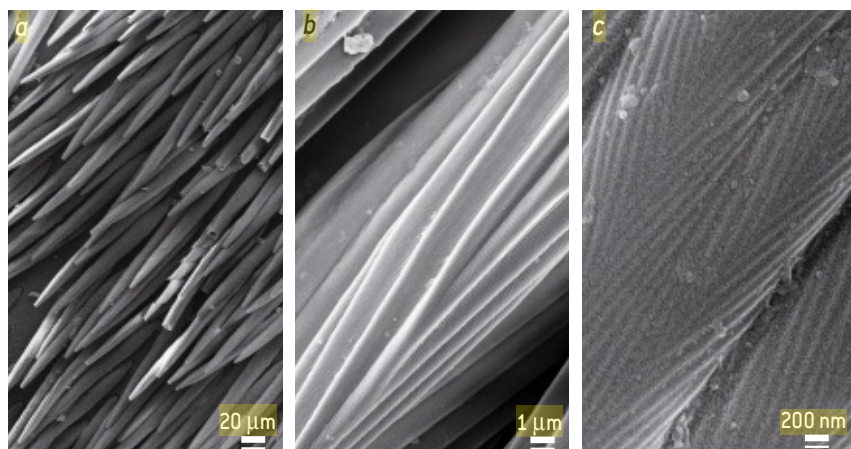
l'air ( $n = 1$ ) à celui du verre ( $n = 1,5$ ), ce qui minimise les réflexions à chaque interface. Efficace, cette technique présente cependant de nombreux inconvénients. Ces couches de matériaux différents, et donc de coefficients de dilatation thermique différents, ont tendance à se décoller en cas 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.

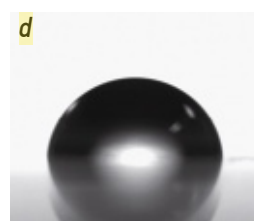
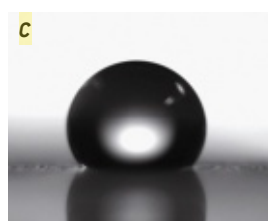
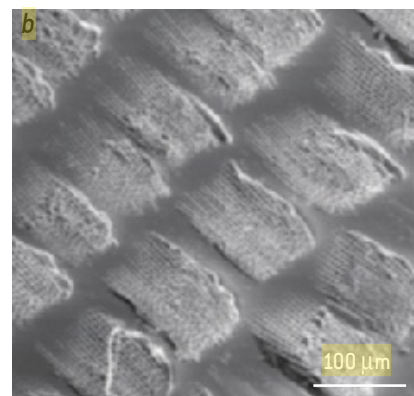
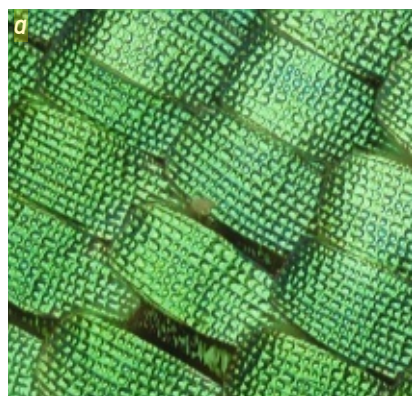
(à l'instar des mammifères, nombre d'oiseaux ne les voient pas). Les chercheurs se sont inspirés de ce phénomène pour développer des motifs antifalsification pour documents ou billets de banque.

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 butée 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. ■