

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.

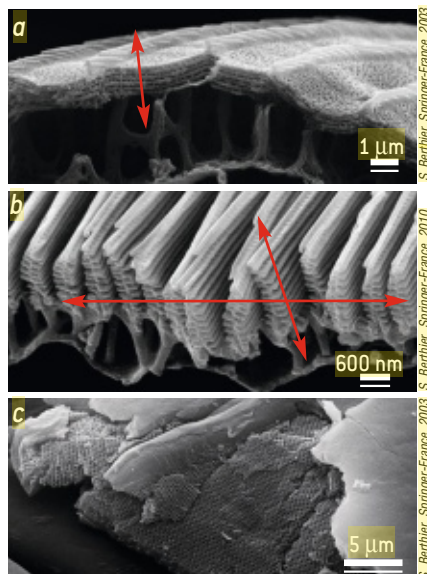
La structure de l'aile du papillon *Morpha menelaus*, par exemple, comporte cinq niveaux d'organisation (voir la figure 3) : les pigments – de grosses molécules que l'on peut mesurer en nanomètres (10^{-9} mètre) –, des lamelles de 100 nanomètres d'épaisseur, des stries distantes d'un micromètre (constituées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

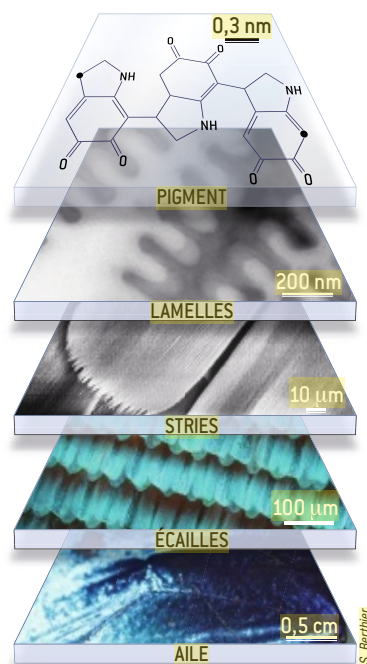
Seconde caractéristique – et seconde leçon – des structures photoniques naturelles : elles sont mal ordonnées, ce qui optimise les diverses fonctions associées aux différentes échelles de structure. Optimiser un système monofonctionnel est simple dans le principe, car toute amélioration du dispositif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