

ÉPREUVE D'ANALYSE DE DOCUMENTS SCIENTIFIQUES

FILIÈRE PSI – 2019

Dossier n°1

Ce dossier est constitué de deux textes sur la physique des ondes. Le premier est un court article extrait du magazine « Pour la science » sur la réflexion des ondes. Le second est également tiré de cette revue, il aborde certains liens entre la propagation des ondes électromagnétiques et certaines propriétés de certains insectes.

Votre exposé d'environ 15 minutes présentera ces deux textes de façon unifiée. Vous vous attacherez à discuter et/ou justifier les différentes affirmations théoriques et expérimentales présentées, en particulier les hypothèses qui les sous-tendent et leurs limitations.

Remarques sur le fond scientifique

Ce dossier comporte un article qui a été rédigé en vue d'une lecture par un public large ; sa compréhension requiert cependant une culture scientifique certaine. Les concepts qui n'entrent pas dans le champ du programme sont donc introduits de façon pédagogique mais concise et les examinateurs apprécient la prestation des candidats en conséquence.

Les candidats s'attacheront à expliciter les phénomènes physiques élémentaires mis en jeu en s'appuyant sur leur connaissance du programme ou les éléments supplémentaires (« encadrés » de l'article et compléments divers). S'ils rencontrent des difficultés de compréhension portant sur les concepts nouveaux, ou des difficultés à s'approprier ces derniers, ils construiront leur analyse en conséquence et l'indiqueront simplement à l'examinateur à l'issue de leur exposé introductif ; ils n'hésiteront pas, dans ce cas, à laisser de côté la fraction concernée du dossier.

Remarques pratiques

Les candidates et les candidats sont invités à éviter d'écrire leur présentation en petits caractères, peu lisibles lors de leur présentation devant l'examinateur. Certains textes ont subi des coupes partielles lors de la constitution du sujet. Avant l'établissement stable de l'image sur la tablette, le texte coupé peut apparaître brièvement : ce phénomène parasite est à ignorer. De même, l'élimination complète de certaines pages des documents originaux peut introduire une discontinuité dans la numérotation des pages du document final.

Le choix de la réflexion

En empilant des couches transparentes et incolores, on crée des couleurs chatoyantes... ou l'on supprime des reflets gênants.

Les miroirs argentés de nos salles de bains réfléchissent toute la lumière visible. En revanche, la nature, plus sélective, a conçu des dispositifs qui ne reflètent que certaines couleurs, comme la carapace de divers insectes ou crustacés aux teintes chatoyantes. L'examen de cette carapace ne révèle pourtant qu'une succession de minces couches transparentes... et incolores ! Comment y naît la couleur ? Pour le découvrir, allons d'abord dans la salle de bains jouer avec des bulles de savon.

Les couleurs des bulles de savon sont changeantes, alors que l'eau, même savonneuse, est incolore. Ces teintes sont dues à la nature ondulatoire de la lumière. La lumière blanche est une superposition d'ondes électromagnétiques sinusoïdales, de longueurs d'onde qui s'étalent de 0,4 micromètre, pour le bleu, à 0,8 micromètre, pour le rouge. Chacune de ces ondes se réfléchit sur les deux faces de la fine lame d'eau formant la paroi de la bulle, et les deux ondes réfléchies se recombinent et interfèrent. Comme elles n'ont pas suivi

même chemin, ces deux ondes n'ont pas effectué le même nombre d'oscillations avant de se recombiner. Pour certaines longueurs d'onde, donc certaines couleurs, elles sont en phase après réflexion ; l'interférence est alors constructive et la réflexion de ces couleurs est renforcée. Pour d'autres longueurs d'onde, les deux ondes arrivent en opposition de phase et la réflexion est totalement supprimée (voir la figure 1).

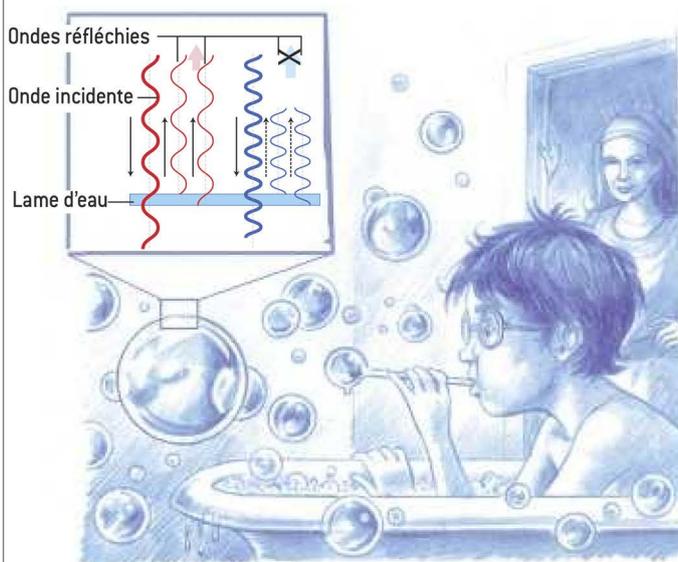
Bulles de savon : double réflexion

Pour déterminer si une couleur sera réfléchie ou pas, il convient de suivre le trajet des deux ondes. La première provient de la réflexion de l'onde incidente sur la face externe de la lame d'eau. L'eau étant plus dense que l'air, l'onde s'y réfléchit comme l'ébranlement d'une corde parvenant à une extrémité fixe : elle se renverse (l'amplitude change de signe quand la direction de propagation s'inverse). La deuxième onde provient de la réflexion sur la face interne. À cette interface eau/air, l'amplitude de l'onde ne change pas de signe lors de la réflexion.

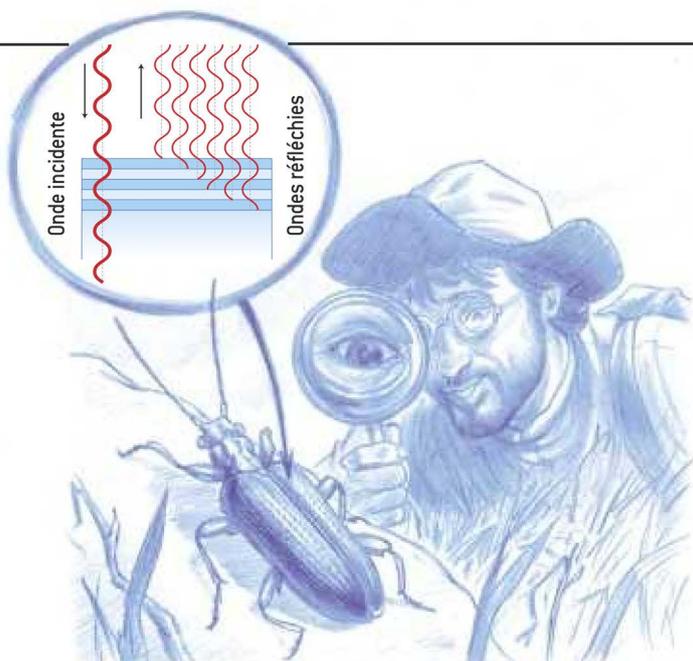
Plus la lame est épaisse, plus l'onde faisant un aller-retour dans l'eau a effectué d'oscillations supplémentaires par rapport à la première onde réfléchie. Si la lame est très mince, elle retrouve sans avoir oscillé la première onde, renversée par réflexion. Les deux ondes sont en pure opposition : elles se compensent et aucune lumière n'est renvoyée. C'est pourquoi, juste avant que la bulle n'éclate, on voit à sa surface des petits disques totalement noirs dont le diamètre augmente progressivement. Ce sont les zones où la paroi devient très mince et où elle va percer.

Quand la lame est plus épaisse, l'onde réfléchie sur la face interne n'est plus en opposition avec la première ; il y a donc réflexion par la lame. Lorsque l'épaisseur est égale au quart de la longueur d'onde dans l'eau (égale à la longueur d'onde dans le vide divisée par l'indice de réfraction de l'eau, 1,33), les deux ondes oscillent de concert et la réflexion est accentuée : l'épaisseur correspondante est 0,075 micromètre pour le bleu et 0,125 micromètre pour le rouge. Ainsi, en fonction de l'épaisseur de la bulle, chaque longueur d'onde est réfléchie différemment, et diverses couleurs apparaissent.

Comment améliorer la sélection des couleurs par réflexion ? Les couleurs vives et métalliques de divers insectes indiquent la piste. Par exemple, la carapace de certains coléoptères comporte cinq couches superposées dont l'épaisseur assure la



1. Une onde lumineuse qui arrive sur la paroi d'une bulle de savon est réfléchie sur sa face externe et sur sa face interne. Sur le schéma, ces ondes réfléchies sont décalées parallèlement à l'onde incidente pour plus de lisibilité. Pour une épaisseur donnée de la lame d'eau, il peut y avoir, selon la longueur d'onde, interférence constructive (en rouge) ou destructive (en bleu) des deux ondes réfléchies.



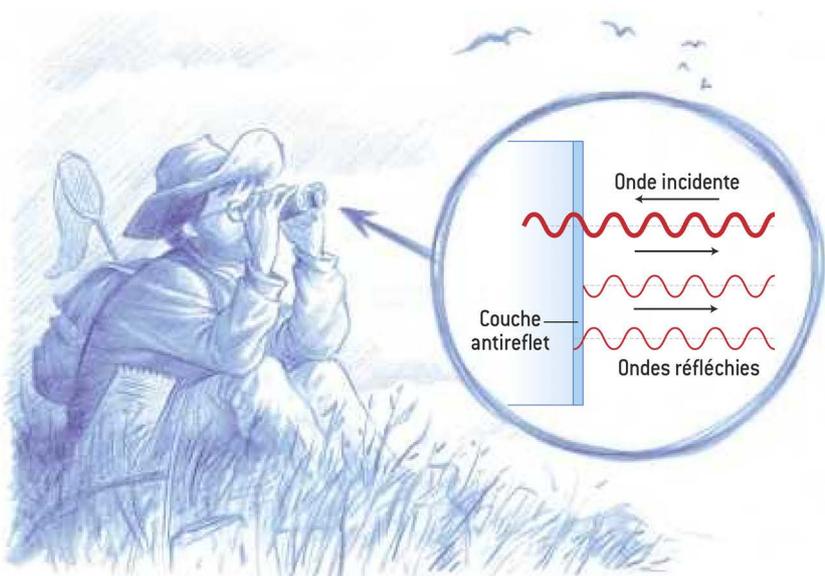
2. En alternant des couches de même épaisseur mais d'indices de réfraction différents, l'interférence des ondes réfléchies n'est constructive que pour des longueurs d'onde spécifiques. Celles-ci déterminent la coloration de la surface, qui varie selon l'angle de vue.

réflexion de la couleur dominante (voir la figure 2). La multiplicité de couches fait que le moindre écart en longueur d'onde donne lieu à des interférences destructives : seule la longueur d'onde appropriée est réfléchi.

Des couches pour ou contre les reflets

Ces « miroirs », sélectifs vis-à-vis des couleurs, le sont aussi vis-à-vis des orientations, car le parcours effectué par la lumière dans chaque couche dépend de la direction d'incidence. Certaines crevettes tirent avantage de ces deux sélectivités. Elles ont sous leur ventre un réflecteur efficace dans les bleus, auquel s'ajoutent des cellules lumineuses, qui émettent de la lumière bleutée. Cette combinaison leur permet d'émettre vers le bas une lumière ressemblant à la lumière solaire vue des profondeurs, c'est-à-dire ayant la même couleur et la même répartition en direction. Pour leurs prédateurs situés en dessous, ces crevettes se confondent avec le ciel et sont peu visibles.

Au lieu d'augmenter la réflectivité de certaines couleurs, on peut vouloir la réduire. Un simple verre de lunettes réfléchit environ 8 pour cent de la lumière incidente ; s'il est taillé dans un verre organique, la réflexion atteint 13 pour cent et devient gênante. Aussi réduit-on la réflexion en déposant sur le verre une mince couche d'un milieu optique différent, intermédiaire entre l'air et le verre (voir la figure 3). De la sorte, les réflexions qui se produisent sur les deux faces de la lame (air/couche et couche/verre) sont de même nature (l'amplitude ne change pas de signe). En revanche, il subit le retard consécutif au trajet de la lumière au sein de



3. Pour éliminer les reflets sur un verre d'un instrument optique, on le revêt d'une couche d'épaisseur égale au quart de la longueur d'onde lumineuse à éliminer et d'indice de réfraction intermédiaire entre celui de l'air et celui du verre : on a ainsi une interférence destructive.

la couche. Quand l'épaisseur de celle-ci vaut un quart de la longueur d'onde, les deux ondes réfléchies sont en opposition de phase et s'annihilent. Un tel traitement, déjà utile pour les lunettes de vue, se révèle indispensable pour les objectifs photographiques ou les jumelles qui peuvent contenir jusqu'à 10 lentilles, soit 20 faces susceptibles de réfléchir la lumière. On détecte sa présence en regardant de côté l'objectif photographique : la couche antireflet perd son efficacité lorsque la lumière arrive de biais, et l'on voit des couleurs pastels apparaître à la surface de la lentille.

En contrôlant réflexion et transmission grâce aux multicouches, les opticiens font des prodiges – des surfaces qui réfléchissent totalement certaines longueurs d'onde tout en en transmettant totalement d'autres. C'est le cas des « miroirs froids » inventés il y a un demi-siècle par Harold Schroeder et ses collègues de la Société *Bausch & Lomb*. Utilisés dans des projecteurs, ces miroirs renvoient un faisceau lumineux composé uniquement de lumière visible. Ils laissent en revanche s'échapper vers l'arrière toute la lumière infrarouge, dont le seul effet serait d'échauffer la zone éclairée sans la rendre plus visible. Faute d'un prix Nobel, leurs inventeurs ont été récompensés par un Oscar technique en 1959, car ces miroirs ont fortement réduit la fâcheuse tendance des projecteurs de cinéma à enflammer les pellicules.

S. BERTHIER, *Iridescences : les couleurs physiques des insectes*, Springer-Verlag, 2003.

A. R. PARKER, *515 million years of structural colour*, in *Journal of Optics A*, vol. 2, pp. R15-R28, 2000.

Blog des auteurs : <http://fausstroll.free.fr/blog/>

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'échelle de la longueur d'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 ou les réseaux

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.

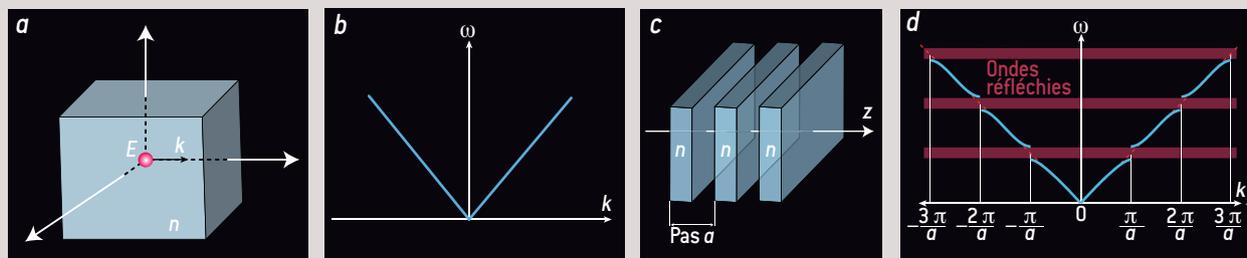
Une bonne manière d'apprécier comment une onde électromagnétique se propage dans un matériau est de calculer ce que l'on appelle la « relation de dispersion ». Cette fonction établit une relation entre l'énergie E du photon

– 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

Et enfin les structures tridimensionnelles, semblables – à l'échelle près – à la structure cristalline minérale

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

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.

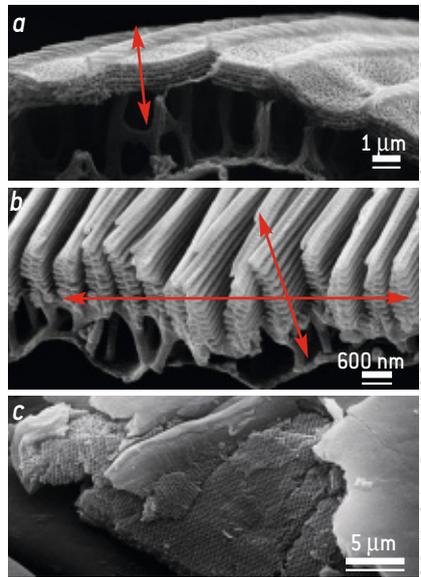
À chaque phénomène physique, il est possible de déterminer une taille caractéristique, que l'on peut voir comme l'échelle minimale à laquelle il se pro-

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.

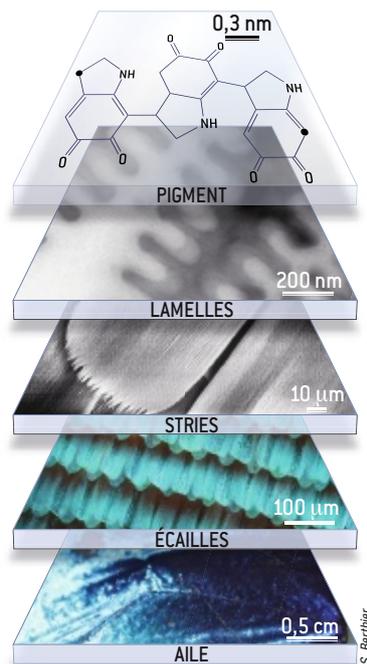
La structure de l'aile du papillon *Morpho menelaus*, par exemple, comporte cinq niveaux d'organisation (voir la figure 3) : les pigments – de grosses molécules que l'on peut mesurer en nanomètres (10^{-9} mètre) –, des lamelles de 100 nanomètres d'épaisseur, des stries distantes d'un micromètre (constituées 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'en 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.



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 *Morpho 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.

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.

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 *Morpho* 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

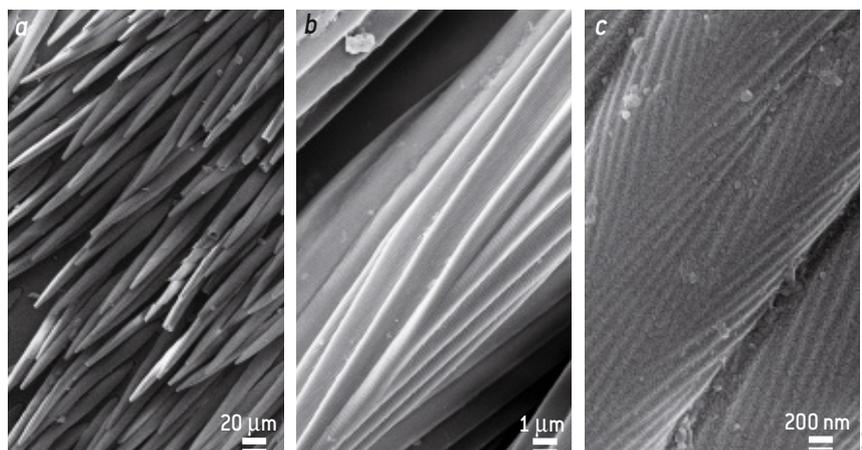
Dans les deux cas, elle est directement liée à la nature multi-échelle de la structure. Avec le laboratoire de *Saint-Gobain Recherche*, nous avons mis au point une technique pour imprimer cette structure sur verre : on applique l'aile sur le verre avant sa solidification, ce qui transfère à ce dernier 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

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 réfléchi. Une telle structure est aussi hydrophobe, donc autonettoyante.



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.