

> optiques. Pour y parvenir, les chercheurs imitent les mécanismes de la sélection naturelle pour tendre vers des systèmes le plus performants possible. Cette approche s'est développée ces dernières années, conjointement à l'accroissement de la puissance de calcul des ordinateurs. Et les résultats défient parfois l'intuition des spécialistes!

EMPILEMENTS DE COUCHES MINCES

Pour se lancer dans l'optimisation d'un système photonique, il faut d'abord étudier ceux que l'on trouve dans la nature afin d'en comprendre les principes généraux. Chez la mouche, le vert métallique éclatant est lié à la structure de la cuticule. Celle-ci est constituée d'un empilement de couches de quelques dizaines de nanomètres, capables ensemble de réfléchir la lumière alors qu'elles sont toutes, prises individuellement, transparentes. En effet, lorsqu'une onde lumineuse traverse un arrangement de matériaux transparents, une fraction est réfléchi

chaque interface de deux couches (voir l'encadré ci-dessous). Que se passe-t-il alors?

Représentons la lumière comme des vagues, c'est-à-dire des successions de creux et de bosses (plus précisément, c'est l'amplitude des composantes électrique et magnétique de la lumière qui oscille de façon périodique). Chaque réflexion produit son propre système de vagues. Si les bosses (et respectivement les creux) de toutes ces ondes ressortent synchronisées, elles s'additionnent et forment un système de vagues renforcées. On dit que les réflexions sont en phase en émergeant de la structure et qu'elles s'ajoutent (ou qu'elles interfèrent) de façon constructive.

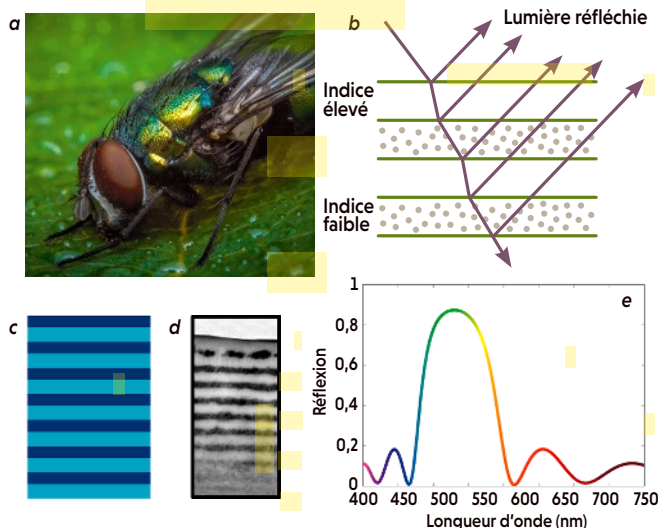
Cependant, l'alignement des bosses (et des creux) dépend des caractéristiques de la structure et varie selon la longueur d'onde. Aussi la réflexion n'est-elle forte que pour une certaine longueur d'onde – dans le cas de la mouche, autour de 530 nanomètres, ce qui correspond au vert. Ainsi, en général, pour la grande majorité des longueurs d'onde, la lumière ne ressort

DES INSECTES ROIS DES COULEURS

De nombreux effets optiques confèrent des couleurs intenses à l'exosquelette ou aux ailes des insectes et d'autres organismes. Des structures nanométriques sont à l'origine de ces phénomènes. Parmi les plus fréquents, on observe : le miroir de Bragg, un empilement

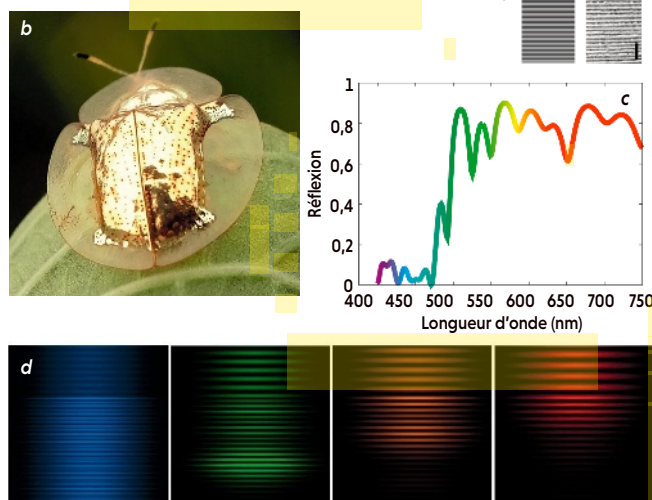
de couches de même épaisseur optique, alternant un indice de réfraction faible et fort ; un miroir à gradient, où l'épaisseur des couches varie en fonction de la profondeur ; et des réseaux de diffraction, comme chez le papillon morpho, où un motif en « sapin de Noël » se répète régulièrement.

MIROIR DE BRAGG



Comme chez la mouche verte (a), un empilement de couches d'indices différents conduit à une réflexion à chaque interface (b). Cette structure peut être simulée numériquement (c) et comparée à celle observée au microscope chez un insecte (d). Dans le cas de la mouche, ce miroir réfléchit surtout le vert (e).

MIROIR À GRADIENT



Si l'épaisseur des couches varie avec la profondeur (a, simulé et réel), on obtient une couleur or comme chez la casside dorée (b). Le spectre simulé montre que toutes les couleurs sont réfléchies, sauf le bleu (c). Dans une simulation, on peut voir que le bleu s'enfonce dans la structure sans s'arrêter tandis que le vert, l'orange et le rouge sont réfléchis à différentes profondeurs (d).

pas en phase et l'amplitude de l'onde réfléchie associée est très réduite. C'est le cas du rouge et du bleu dans la cuticule de la mouche.

L'exemple de la mouche verte illustre parfaitement le fait qu'en structurant des matériaux transparents à très petite échelle, on est en mesure de manipuler la lumière à volonté. Historiquement, on a d'abord manipulé la lumière pour améliorer la vision. Mais la lumière est aussi devenue un support pour transmettre de l'information ou transporter de l'énergie. Sa destination finale n'était plus uniquement l'œil humain. Pouvoir manipuler la lumière à l'aide de structures nanométriques s'est alors révélé crucial.

Aujourd'hui, des structures multicouches – des empilements de matériaux transparents – sont utilisées pour mélanger différentes couleurs dans une seule fibre optique. De telles fibres traversent l'océan Atlantique avant d'être séparées par des structures équivalentes une fois à destination. Cette stratégie de multiplexage augmente le débit des câbles

sous-marins sans que l'on ait besoin d'en poser de nouveaux. Autre exemple, les panneaux photovoltaïques sont tous couverts de couches antireflets qui, en produisant des interférences constructives dans la direction du matériau absorbant, leur permettent de convertir plus de lumière en électricité.

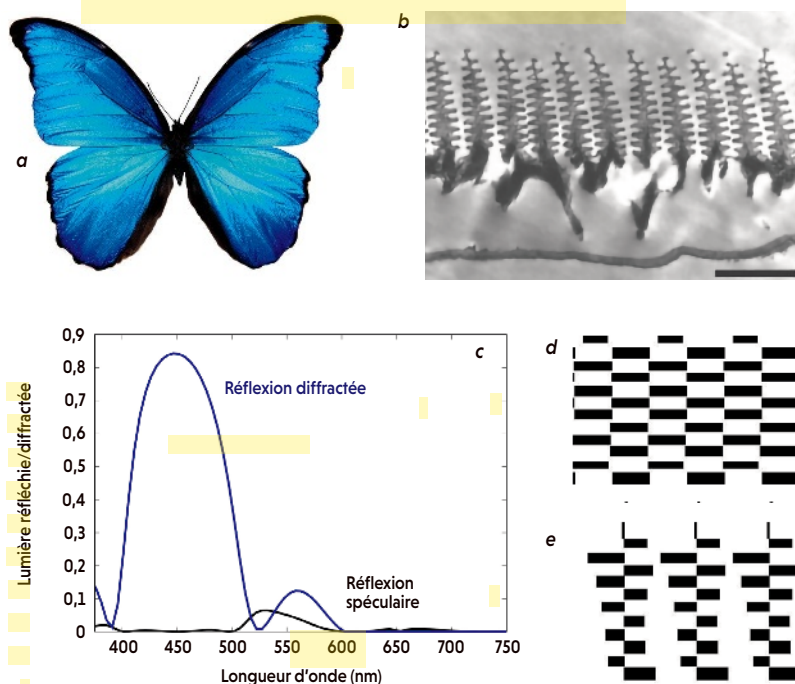
L'un des défis actuels est d'intégrer des composants manipulant la lumière (que l'on peut aussi considérer comme une assemblée de photons) à côté de composants utilisant des électrons: de la photonique interfacée avec de l'électronique. L'objectif est d'améliorer la communication entre les processeurs et les unités de mémoire pour augmenter les débits de données et gagner en vitesse de traitement. La conception de tels dispositifs est loin d'être aisée. Des programmes sont capables de simuler la façon dont la lumière se comporte dans un certain système. Mais, à l'inverse, il n'y a pas de recette universelle pour imaginer le composant photonique qui exécutera la fonction dont on a besoin.

UN MIROIR SÉLECTIF

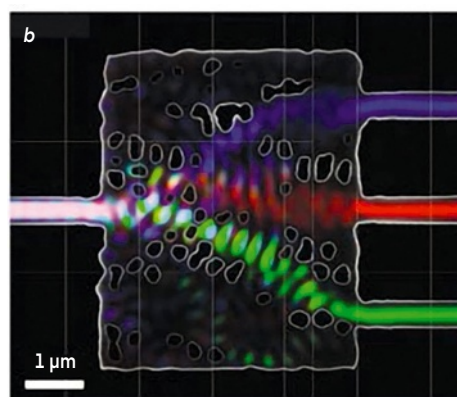
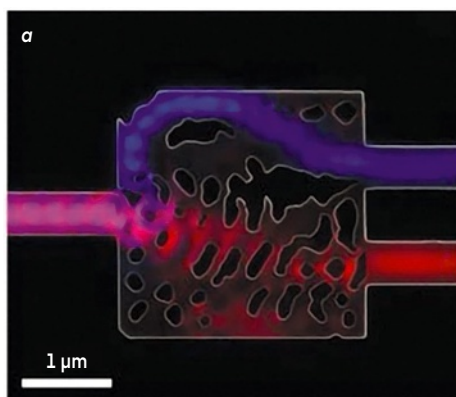
La solution la plus simple est de s'inspirer de la nature. Les structures photoniques que l'on y observe permettent aux insectes de réfléchir beaucoup de lumière (ou très peu) pour des couleurs très précises ou au contraire pour presque tout le spectre visible. Certaines de ces architectures élégantes sont déjà très bien connues et étudiées. La structure que les mouches vertes portent sur leur dos est ainsi un «miroir de Bragg». Elle alterne des couches d'indice optique élevé, dans lesquelles la lumière se propage plus lentement, et des couches d'indice optique faible, dans lesquelles la lumière se propage plus rapidement. Quand ces couches ont une épaisseur égale à un quart d'une certaine longueur d'onde, alors la lumière est réfléchie fortement pour cette longueur d'onde. Résultat: la structure réfléchit la lumière à une longueur d'onde particulière et l'efficacité est d'autant plus grande que l'on ajoute des couches. Le miroir de Bragg est utilisé, par exemple, pour réfléchir un faisceau laser, parce que, à la différence d'un miroir métallique, cette structure ne chauffe pas.

On trouve aussi dans la nature des insectes dont la carapace réfléchit presque toute la gamme du spectre optique, du vert au rouge, mais pas le bleu. Ces insectes nous apparaissent comme couverts d'or, comme la casside dorée. La structure qui produit cet effet ressemble à un miroir de Bragg dont l'épaisseur des couches varie graduellement: les différentes parties de la structure réfléchissent alors différentes composantes du spectre lumineux. Avec les mêmes matériaux que le miroir de Bragg et une architecture régulière, mais apériodique, on obtient donc un comportement optique très différent.

RÉSEAU DE DIFFRACTION DU MORPHO



Plusieurs espèces de papillons morpho exhibent une magnifique couleur bleu métallisé (a). Elle est liée à une structure en «sapins de Noël» (b). Ceux-ci forment un réseau de diffraction qui renvoie les différentes longueurs d'onde de la lumière selon un angle spécifique et avec une efficacité variable. C'est ce que l'on constate sur le spectre (c), où la lumière bleue est fortement diffractée. La deuxième courbe représente la réflexion spéculaire isotrope (l'effet miroir). Cette composante est très atténuée. Lorsque les chercheurs tentent d'optimiser un système optique pour reproduire les caractéristiques des ailes du papillon, ils obtiennent un réseau interdigité régulier (d). S'ils ajoutent des contraintes, comme une masse des ailes réduite, ils retrouvent alors des sapins de Noël (e).



MULTIPLEXAGE

En utilisant la méthode d'optimisation par descente de gradient, il est possible de concevoir des dispositifs photoniques comme ces multiplexeurs à deux (a) ou trois voies (b). Dans le premier, la lumière incidente violette est séparée en rouge et bleu, chacune de ces lumières partant dans un canal différent. Dans le second, la lumière blanche est séparée en bleu, rouge et vert. La microscopie électronique à balayage permet de distinguer la structure obtenue par optimisation. On constate que celle-ci n'est pas très régulière et probablement difficile à industrialiser. En outre, certaines parties semblent *a priori* inutiles, comme les structures dans les coins à gauche du multiplexeur à trois canaux.

> Enfin, une autre structure emblématique des systèmes photoniques naturels est celle que l'on trouve sur les ailes des morphos. Le bleu de leurs ailes est d'origine interférentielle. L'architecture en question est beaucoup plus complexe qu'une structure multicouche, périodique ou non. Il s'agit d'un réseau, un ensemble de motifs périodiques qui ont la particularité, chez *Morpho rhetenor*, d'évoquer la forme de sapins de Noël. Cette structure est en chitine, le matériau transparent qui constitue la cuticule des insectes. Elle produit une réflexion assez différente de celle d'une structure multicouche.

Les structures multicouches réfléchissent la lumière comme un miroir ; on parle de « réflexion spéculaire ». On en retrouve sur de nombreux matériaux, à la surface de l'eau, ou même sur du bois ou du plastique. Cette réflexion n'est pas directionnelle : on voit la même couleur, peu importe l'angle sous lequel on regarde la surface. Avec un réseau, en revanche, la réflexion est directionnelle ; on parle de « lumière diffractée ».

Par exemple, un CD constitue un réseau, car les données y sont gravées périodiquement en formant des cercles concentriques. Quand on le regarde, on voit d'abord un miroir, la réflexion spéculaire étant importante à cause du revêtement. Puis, sous certains angles spécifiques, on voit des couleurs vives : la lumière diffractée est colorée parce qu'un réseau envoie naturellement chaque couleur dans une direction particulière. On peut facilement fabriquer des réseaux semblables à ceux des CD en les « imprimant » sur du plastique. Ils sont beaucoup plus simples que ceux des morphos. On les trouve ainsi sur des emballages, des chaussures, des billets de banque ou des cartes bancaires (ils sont souvent qualifiés d'hologrammes). L'aile du morpho se comporte comme un réseau, mais celui-ci est aussi combiné à un miroir de Bragg : il ne diffracte que le bleu. En outre, la structure n'est pas parfaite et présente un certain degré de désordre, qui fait que l'on voit le bleu sous tous les angles.

D'un point de vue évolutif, les architectures photoniques naturelles (miroir de Bragg, réseaux de diffraction, etc.) procurent un avantage important pour leur hôte. Elles permettent à ces derniers d'être mieux vus et repérés par leurs congénères (et offrent souvent de meilleures chances de reproduction). Des couleurs changeantes peuvent aussi perturber un éventuel prédateur. On comprend alors qu'au cours de millions d'années, la sélection naturelle ait favorisé l'émergence de ces structures, qui se sont progressivement optimisées.

Cependant, les problèmes que soulève la conception de composants photoniques pour les ordinateurs sont très éloignés des besoins du vivant. Pour la majorité d'entre eux, on n'a trouvé aucune solution dans la nature. Il s'agit donc de dépasser les « inventions » de l'évolution. Bien sûr, il est possible qu'elles existent et nous aient juste échappé. Les miroirs de Bragg (ou miroirs diélectriques), découverts dans les années 1950, ont été utilisés en photonique bien avant qu'on ne constate qu'ils étaient aussi abondants dans la nature. Néanmoins, le design optimal de nombreux systèmes reste une question ouverte.

DES AILES PLUS LÉGÈRES

Aujourd'hui, les chercheurs sont équipés d'ordinateurs capables de calculer la réponse optique d'une structure donnée et de déterminer comment la lumière interagit avec le système. Il est donc possible d'imaginer des stratégies qui modifient légèrement un paramètre et de voir si le dispositif est plus performant. Une idée serait d'imiter l'évolution à l'œuvre dans la nature et d'améliorer graduellement ces architectures. On parle d'« optimisation numérique ».

Ces dernières années, cette activité a pris une importance pratique non négligeable dans la recherche en informatique. Par exemple, dans les réseaux de neurones artificiels, la phase d'apprentissage est une forme d'optimisation. Cette approche s'applique dans de nombreux autres domaines. En mécanique, elle est utilisée pour faire des structures plus légères, mais avec