

> un miroir de Bragg dont les indices de réfraction sont situés dans les limites de ce que nous avions prescrit et avec la couche la plus externe présentant l'indice optique le plus élevé.

Lors de cette étude, nous avons augmenté progressivement le nombre de couches de la structure à optimiser. Jusqu'à 20 couches, le résultat était parfait. Au-delà, on a vu émerger un certain désordre, signe que le problème devenait difficile à traiter pour les algorithmes, puisqu'il s'agissait alors de trouver un optimum dans un espace à 40 dimensions (2 paramètres pour chaque couche, l'épaisseur et l'indice).

Quand nous avons imposé aux algorithmes de réaliser un miroir qui réfléchit une longueur d'onde donnée mais qui commence par l'indice optique le plus bas, nous avons observé un résultat étonnant. Nous obtenions des miroirs de Bragg, mais avec une première couche deux fois plus épaisse. Cette solution se comprend bien, car, en général, une couche ayant un indice intermédiaire entre l'air et le milieu d'indice haut constitue un antireflet, exactement comme celui que l'on trouve sur des verres de lunettes. Un tel antireflet sur un miroir de Bragg agirait de façon contraire à l'objectif... Cependant, la double épaisseur de la première couche (correspondant à la longueur d'onde divisée par deux) fait presque oublier sa présence d'un point de vue optique. Et l'on retrouve effectivement cette structure chez certains scarabées bijoux

exactement comme sur la casside dorée. Cette structure est intéressante parce qu'elle est typiquement modulaire: les différentes longueurs d'onde qui composent la lumière blanche sont réfléchies à des endroits distincts de la structure (voir l'encadré page 56). Chaque partie du système a un rôle spécifique, même si elle n'est pas strictement indépendante du dispositif global.

Nous nous sommes ensuite penchés sur le cas du morpho. Des outils numériques assez simples sont capables de calculer numériquement comment la lumière se réfléchit sur des structures périodiques – les réseaux de diffraction – telles celles en forme de sapins présentes sur les ailes des morphos. Ces structures sont comparables à des empilements de blocs de chitine d'épaisseur et de largeur différentes entourés d'air. À partir de ces algorithmes, nous avons cherché comment disposer des blocs suivant un motif périodique de façon à réfléchir le bleu et à le diffracter au maximum, tout en conservant une réflexion spéculaire le plus réduite possible, et sans ajouter d'autres contraintes.

Les calculs ont produit une structure qui juxtapose des empilements réguliers de blocs de chitine. On parle de «disposition interdigitée» (comme l'entrelacement des doigts quand on joint les deux mains). La ressemblance avec les sapins caractéristiques des morphos est assez lointaine. Cette configuration est responsable de l'annulation importante de la réflexion spéculaire. À la longueur d'onde de 450 nanomètres, la structure est capable de réfléchir 98% de la lumière, mais exclusivement suivant des modes de diffraction, et une quantité négligeable en réflexion spéculaire, d'habitude dominante. D'un point de vue optique, cette architecture est bien meilleure que celle du papillon. Peut-on néanmoins retrouver celle du papillon?

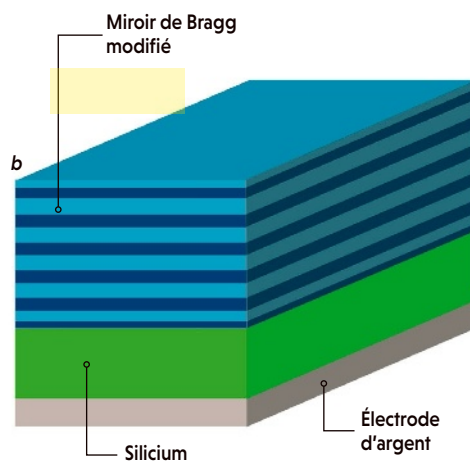
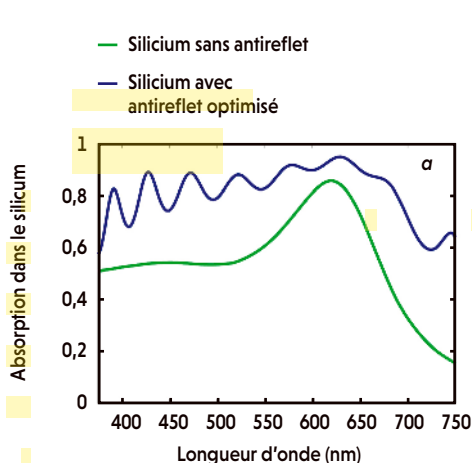
Pour ce faire, nous avons diminué l'importance des contraintes optiques pour inclure d'autres critères, comme la légèreté de la structure et des contraintes de fabrication (il faut bien que les blocs soient situés l'un au-dessus de l'autre pour tenir ensemble). En imposant un compromis entre propriétés optiques et mécaniques, nous avons retrouvé des structures qui ressemblent à celles du morpho (voir l'encadré page 57). Par ailleurs, ce résultat montre que l'optimisation numérique est aussi un outil pour mieux comprendre les structures naturelles: si nous obtenons une structure existante, c'est que nous avons probablement compris les contraintes qui l'ont fait naître, alors que sans cette approche, nous en serions en général réduits à émettre des hypothèses sans vraiment pouvoir les vérifier.

Ayant ainsi constaté que les algorithmes évolutionnaires modernes retrouvent effectivement les structures naturelles, nous avons voulu les tester sur un problème tel qu'on pourrait en >

L'optimisation numérique est aussi un outil pour mieux comprendre les structures naturelles

(*Chrysochroa fulgidissima*, aux reflets rouges et verts). Sans doute pour des raisons biologiques, l'insecte a comme contrainte de commencer par le milieu d'indice faible, et cette contrainte conduit à l'émergence d'une première couche caractéristique d'épaisseur double.

Nous avons alors compliqué le problème en cherchant un système multicouche qui réfléchit un spectre plus large que celui d'un miroir de Bragg, toujours avec le même intervalle d'indices de réfraction. Là encore, les algorithmes ont retrouvé la solution du miroir à gradient,



PANNEAU SOLAIRE

Pour améliorer l'efficacité d'un panneau solaire photovoltaïque, les auteurs et leurs collègues ont utilisé un algorithme évolutionnaire afin de trouver une structure antireflet à appliquer sur la surface. Ils ont obtenu un miroir de Bragg légèrement modifié (b) qui réfléchit bien les grandes longueurs d'onde (l'infrarouge) et laisse passer la lumière visible (a). Cette dernière est alors absorbée de façon maximale dans la couche de silicium pour être convertie en électricité.

> rencontrer quand on cherche à concevoir un système photonique. Par exemple, nous avons voulu identifier une structure multicouche qui améliorerait la conversion de la lumière en électricité dans un panneau photovoltaïque, en lui imposant les mêmes contraintes, en termes d'indices optiques, que celles trouvées dans les structures naturelles. Bref, nous avons cherché à deviner ce que la nature aurait fait si elle avait eu à fabriquer un antireflet pour une cellule photovoltaïque.

Le résultat semble paradoxal en apparence : nous avons obtenu un miroir de Bragg légèrement modifié. C'est paradoxal parce qu'un miroir de Bragg réfléchit très bien la lumière ; il ne vient donc pas spontanément à l'idée de l'utiliser comme antireflet. Ici, cependant, les caractéristiques de la structure sont telles qu'elle réfléchit efficacement la lumière infrarouge et laisse passer le rayonnement visible, affichant une absorption par le silicium plus élevée qu'avec un antireflet standard. Nous avons fabriqué cette structure et vérifié qu'elle était bien efficace (le rendement théorique passe de 56% sans antireflet à 74% avec un antireflet simple et 80% avec notre antireflet). Néanmoins, cette structure est complexe et plus coûteuse à produire qu'un antireflet usuel, et son utilité réelle est donc soumise à débat. La conclusion de cette expérience est que l'optimisation est un outil d'exploration riche, qui produit des structures analysables *a posteriori* et utilisables comme source d'inspiration.

Actuellement, une limite de l'optimisation globale est qu'elle demande beaucoup plus de temps de calcul qu'une descente de gradient et n'est donc pas encore en mesure de s'attaquer aux dispositifs photoniques complexes recherchés pour améliorer les processeurs. Mais les progrès vont vite dans ce domaine et nous avons bon espoir d'y parvenir un jour.

La nature nous a fourni des exemples de systèmes photoniques qui nous ont servi de guides et de modèles pour nos programmes d'optimisation. Une constatation intéressante

est que l'algorithme le plus efficace pour produire des structures régulières et élégantes est celui de l'évolution différentielle. Cet algorithme s'inspire de l'évolution sexuée, en procédant à de l'échange d'information entre les individus pour créer les générations suivantes. Il est bien adapté pour des problèmes modulaires, comme on en retrouve souvent en photonique, parce qu'il est conçu pour combiner des éléments de différentes structures et les optimiser de façon presque indépendante.

L'EFFICACITÉ DE LA REPRODUCTION SEXUÉE

Bien sûr, une optimisation par un algorithme évolutionnaire n'est pas strictement la reproduction fidèle de l'évolution naturelle. Mais nos résultats montrent que l'évolution a parfois eu le même rôle qu'une procédure d'optimisation. Elle a en effet mené à de véritables solutions optimales au sens mathématique, comme le miroir de Bragg. Ces observations permettent donc de mieux comprendre comment des structures si extraordinaires ont émergé. Pour finir, ces résultats dans le domaine de la photonique offrent peut-être un éclairage original sur un problème en biologie qui n'est toujours pas tranché : on ne saisit pas à l'heure actuelle la raison d'être de la reproduction sexuée, un processus en apparence très coûteux comparé aux autres modes de reproduction.

Une hypothèse, avancée notamment dans les années 1930 par Ronald Fisher et Hermann Muller, semble aller dans le sens de ce que l'on constate dans l'optimisation en photonique : les populations ayant une reproduction sexuée évoluent plus vite. En permettant un échange de gènes entre individus, ce mode de reproduction accélère l'évolution des problèmes modulaires que sont tous les animaux, jusqu'à mener, entre autres, aux solutions photoniques si extraordinaires observées sur le dos des mouches vertes, de la casside dorée ou encore sur les ailes du papillon morpho. ■

BIBLIOGRAPHIE

P. Bennet et al., **Analysis and fabrication of antireflective coating for photovoltaics based on a photonic-crystal concept and generated by evolutionary optimization**, *Physical Review B*, vol. 103, article 125135, 2021.

M. A. Barry et al., **Evolutionary algorithms converge towards evolved biological photonic structures**, *Scientific Reports*, vol. 10, article 12024, 2020.

S. Molesky et al., **Inverse design in nanophotonics**, *Nature Photonics*, vol. 12, pp. 659-670, 2018.

S. Berthier, **Des insectes à la photonique**, *Pour la Science*, n° 401, pp. 32-39, mars 2011.

A. Gondarenko, **Spontaneous emergence of periodic patterns in a biologically inspired simulation of photonic structures**, *Physical Review Letters*, vol. 96, article 143904, 2006.