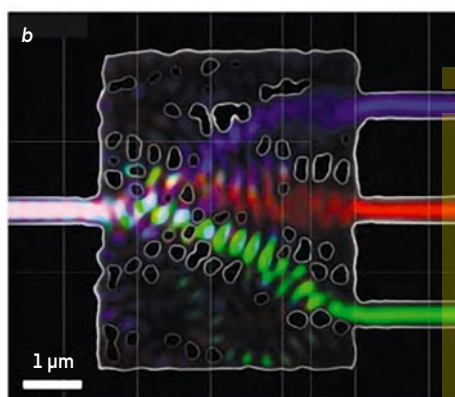
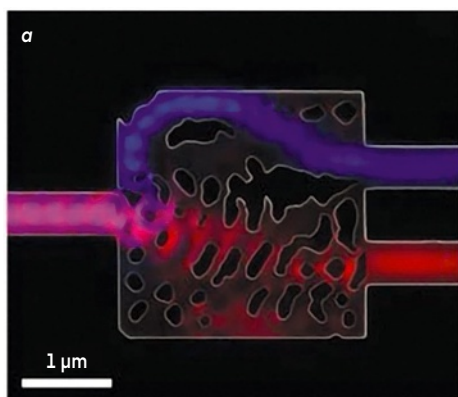




MULTIPLEXAGE

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

une résistance constante. En 2017, Ole Sigmund, de l'université technique du Danemark, et son équipe ont développé une méthode afin de diminuer le poids d'une aile d'avion de 2 à 5% sans réduire sa robustesse (ce qui représenterait une économie comprise entre 40 et 200 tonnes de carburant par avion et par an).

Pour optimiser un système, on commence par définir une façon d'évaluer une solution donnée – une grandeur nommée «fonction de coût». Plus la fonction de coût est élevée, plus la configuration est mauvaise – on cherche donc à trouver un jeu de paramètres qui la minimise. Pour un panneau photovoltaïque, la fonction de coût peut être l'énergie lumineuse réfléchie. En la minimisant, on améliore le rendement du panneau, car davantage de lumière est absorbée et convertie en électricité.

De façon générale, un algorithme d'optimisation part d'une ou plusieurs solutions potentielles et en engendre de nouvelles, qui seront meilleures. Imaginez un problème d'optimisation comme un paysage avec des montagnes et des vallées, dont on chercherait le point le plus bas (l'altitude jouant ici le rôle de la fonction de coût). Les coordonnées sont les paramètres sur lesquels on peut agir pour optimiser le système. À partir d'un état initial quelconque, on peut décider de suivre la pente la plus raide et de descendre, jusqu'à se retrouver dans un creux. Cette approche très naturelle et intuitive est le principe de la «descente de gradient» (voir l'encadré page 60). Avec de tels algorithmes, on est sûr de finir sur un minimum, mais il n'y a pas de garantie que ce minimum soit l'optimum, c'est-à-dire le minimum absolu de la fonction de coût. On trouve ainsi la vallée la plus proche, mais rien ne permet de dire si c'est bien la plus profonde. Pour cette raison, cette méthode d'optimisation est dite «locale».

Une autre possibilité est de s'inspirer plus fortement de la nature et de l'évolution. Dans les années 1960, John Holland, de l'université du Michigan, a proposé le concept d'algorithmes génétiques. Ces méthodes sont globales: elles partent d'un ensemble de points du paysage (comme une espèce partirait d'une population initiale) et les mélangent pour produire une nouvelle génération d'individus. Le programme ne conserve que les meilleurs, à l'image du principe de la sélection naturelle.

La façon de créer de nouveaux individus est au cœur de l'algorithme. Les premiers algorithmes génétiques s'inspiraient très directement de l'évolution naturelle et traitaient les coordonnées d'un point comme son code génétique. Celui-ci était converti en un nombre binaire, plus facile à manipuler. Aujourd'hui, ces algorithmes apparaissent un peu comme «folkloriques». En modifiant des bits de façon arbitraire, on obtient rarement une solution améliorée. Peu efficace, cette approche a été remplacée par des

algorithmes dits «évolutionnaires» qui combinent des caractéristiques de chaque solution pour en produire des nouvelles.

SIMULER L'ÉVOLUTION

Certains algorithmes évolutionnaires ressemblent à l'évolution des bactéries: lorsqu'une mutation apparaît, elle est transmise à la descendance, mais peu d'information est échangée entre les individus d'une même génération. D'autres algorithmes sont plus proches de l'évolution sexuée, car de l'information s'échange entre individus, comme lors d'une fécondation, où du matériel génétique est mis en commun (voir l'encadré page 60). À la fin des années 1990, les ingénieurs Kenneth Price et Rainer Storn ont élaboré une méthode reposant sur cette dernière approche et nommée «évolution différentielle».

Pour concevoir des structures photoniques, les techniques d'optimisation se sont surtout inspirées de celles utilisées en mécanique, qui reposent essentiellement sur des méthodes de gradient. Elles sont très efficaces et produisent des architectures nouvelles et surprenantes. On constate cependant que ces structures sont souvent complexes et irrégulières (voir la figure page 58). Par conséquent, il n'est pas toujours facile de comprendre le rôle de chaque élément du système. Certaines parties donnent parfois l'impression d'être inutiles et pourraient être supprimées sans altérer le fonctionnement global. En outre, la complexité du rendu est dans certains cas un obstacle pour son industrialisation. L'efficacité de ces approches semble se faire au détriment d'une étape de simplification. Or les structures que l'on observe dans la nature ont plutôt tendance à être simples et élégantes. Comment expliquer cette différence? Une hypothèse est qu'un système biologique soumis à diverses contraintes produirait à moindre coût et plus facilement des structures régulières.

Pour tester cette hypothèse, avec nos collègues, nous avons voulu voir s'il était possible de reproduire les structures observées dans la nature en imposant certaines contraintes à l'algorithme d'optimisation. Nous avons commencé par la question la plus simple: quelle structure multicouche réfléchit le mieux la lumière à une longueur d'onde donnée? Dans les années 1990, ce problème avait déjà été abordé avec des algorithmes génétiques de l'époque. Mais les résultats obtenus ne présentaient pas spécialement de régularité. En nous appuyant sur les algorithmes évolutionnaires les plus récents (des variantes de l'évolution différentielle), nous leur avons imposé une seule contrainte – utiliser des indices de réfraction dans un intervalle correspondant à celui des matériaux biologiques. Avec les algorithmes modernes, le constat a été immédiat et sans équivoque: la meilleure structure possible est ➤



LE SUPERNOIR DES OISEAUX DE PARADIS

Les insectes ne sont pas les seuls animaux à présenter des effets photoniques spectaculaires. Chez le mâle du paradisier de Wahnes (*Parotia wahnesi*), certaines parties du plumage ont un coefficient d'absorption de la lumière visible compris entre 99,69% et 99,95%. En 2018, Dakota McCoy, de l'université Harvard, et ses collègues ont montré que les barbeles (les filaments qui bordent les barbes des plumes) sont courbées et portent des picots micrométriques. Ce réseau dense piège la lumière avec une efficacité comparable à certains matériaux artificiels.