



Cristaux photoniques dans le vivant

L'art d'organiser la matière à l'échelle nanométrique

Introduction

Les cristaux photoniques sont des **structures périodiques** capables de modifier la propagation des ondes électromagnétiques, en particulier la lumière. Concrètement, il s'agit de matériaux présentant une variation périodique de leur indice de réfraction¹ à l'échelle de la longueur d'onde de la lumière, typiquement 100 à 1000 nm.

Les particularités de ces structures sont :

- De créer des **bandes interdites photoniques**, empêchant la propagation de certaines longueurs d'onde dans certaines directions – c'est l'analogue optique des électrons dans un semi-conducteur ;
- De permettre un **contrôle précis de la lumière**, incluant sa réflexion, sa transmission et son confinement.

Connectés aux sciences et au vivant, le biomimétisme et les cristaux photoniques sont deux champs d'application fortement interdisciplinaires à l'interface entre la physique, la biologie et l'ingénierie. La synergie entre ces disciplines est fertile pour l'innovation inspirée du vivant.

¹ L'indice de réfraction n est une grandeur optique caractérisant la vitesse de propagation de la lumière dans un milieu v par rapport à sa propagation dans le vide (célérité) c : $n = c/v$.

Classification des cristaux photoniques

Les cristaux photoniques peuvent être classés suivant leur dimensionnalité, soit le nombre de dimension(s) de l'espace selon la/lesquelles varie leur indice de réfraction :

- ❖ **Cristal photonique monodimensionnel (1D)** : Ce sont des structures périodiques dans une seule dimension. Un exemple classique est un **miroir de Bragg**, c'est-à-dire un empilement de couches aux matériaux d'indices de réfraction différents : les interfaces réfléchissent successivement les ondes lumineuses, créant ainsi une bande interdite photonique pour certaines fréquences.
 - **Exemple naturel : Les couches de chitine** dans les élytres (les ailes rigides) des scarabées, comme ceux du genre *Chrysina*. Leur structure périodique crée des effets iridescents par réflexion constructive de certaines longueurs d'onde dans un cristal photonique 1D.

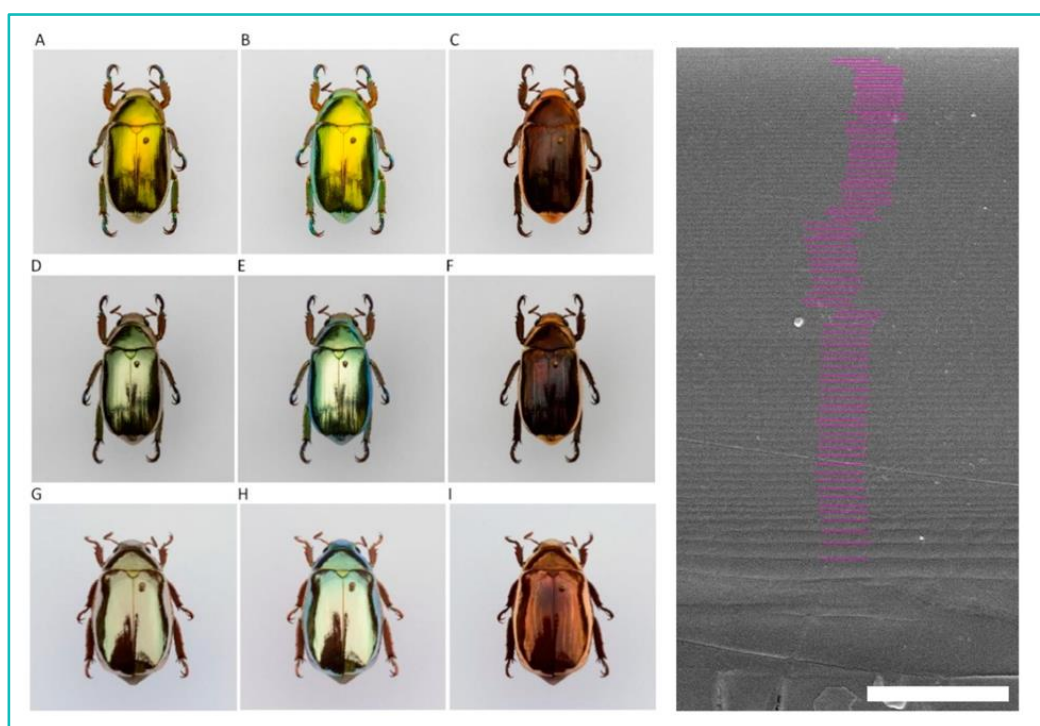


Fig. 1 / Apparence et réflexion de lumière polarisée de coléoptères *Chrysina genus* (A-I).
Observation d'une coupe d'élytre par microscopie électronique à balayage (droite).

- ❖ **Cristal photonique bidimensionnel (2D)** : Ce sont des structures périodiques dans deux dimensions. La lumière est confinée dans le plan périodique, mais peut se propager librement dans la troisième dimension.
 - **Exemple naturel : Les nanostructures en chitine** des écailles de certaines ailes de papillons, comme celles du *Morpho rhetenor*, présentent une structure périodique 2D qui contribue à leurs couleurs vives. Les réseaux bidimensionnels de chitine dans les écailles interagissent avec la lumière pour créer des couleurs structurelles.

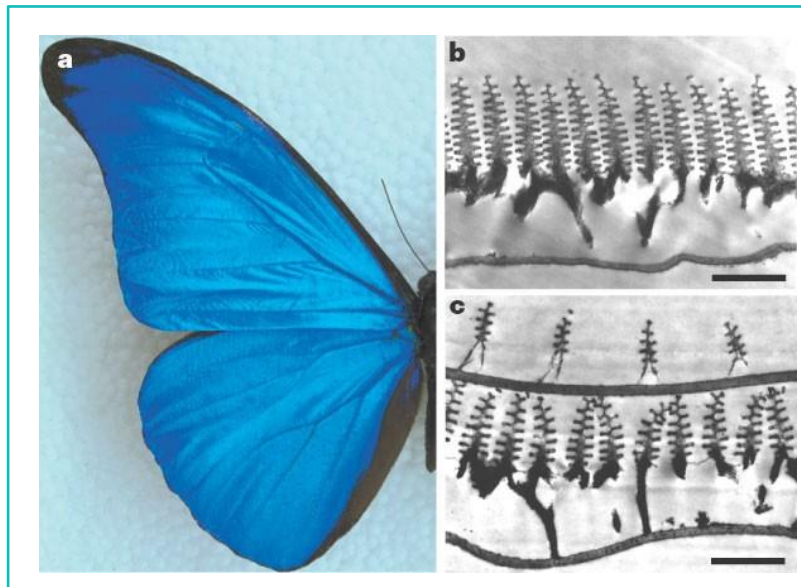


Fig. 2 / Aile bleue iridescente du papillon *Morpho rhetenor* (a).
Observation de coupes d'ailes par microscopie électronique à transmission :
Haute densité de structures pour les spécimens *M. rhetenor* avec une couleur intense (b),
Superposition des couches pour les spécimens *M. didius* avec une couleur plus diffuse (c).

- ❖ **Cristal photoniques tridimensionnel (3D) :** Ce sont des structures périodiques dans les trois dimensions. Ces structures peuvent complètement interdire la propagation de la lumière dans une certaine gamme de fréquences.
- **Exemple naturel : Les réseaux périodiques de collagène** dans certaines espèces de poissons, comme le poisson-chat fantôme, agissent comme des cristaux photoniques 3D. Ces réseaux de fibres de collagène peuvent diffracter la lumière, produisant des couleurs vives.

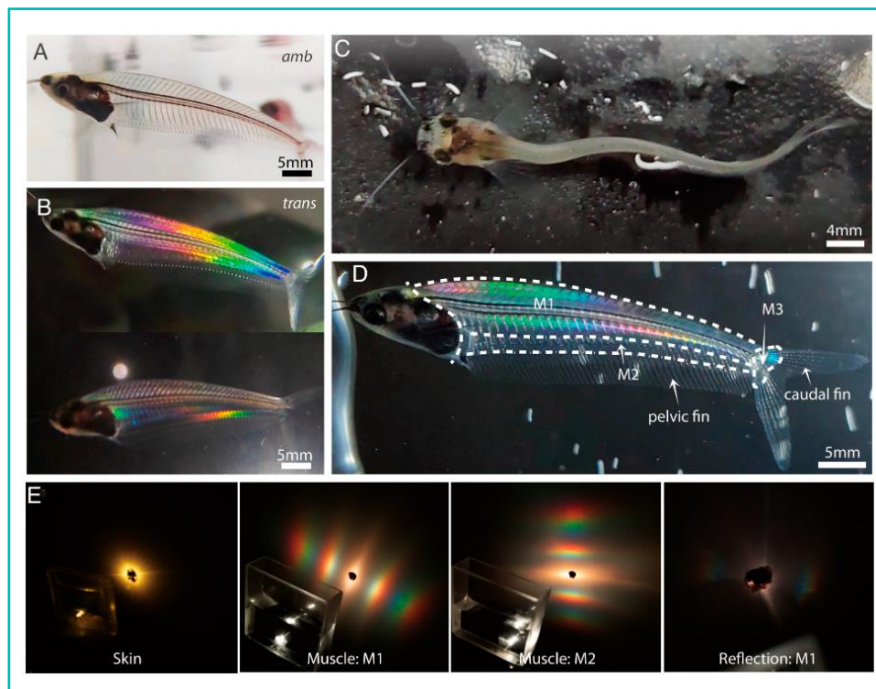


Fig. 3 / Apparences colorées du poisson-chat fantôme, ou silure de verre (*Kryptopterus vitreolus*).

Fabriquer des structures nanométriques

Les cristaux photoniques sont fabriqués par des techniques similaires à celles utilisées en microfluidique et en micro-électronique.

La **lithographie optique ou électronique** permet de créer des motifs périodiques à l'échelle submicrométrique dans des matériaux diélectriques comme le silicium. Ces motifs peuvent être des trous, des piliers ou des structures plus complexes. Une approche courante consiste à utiliser la lithographie par faisceau d'électrons pour définir le motif dans une résine photosensible déposée sur un substrat. Ce motif est ensuite transféré dans le matériau diélectrique par gravure plasma.

Pour des structures tridimensionnelles plus complexes, des techniques d'**auto-assemblage de colloïdes** ou de **lithographie multicouche** peuvent être employées. Ces méthodes permettent de créer des structures périodiques dans les trois dimensions de l'espace.

La fabrication de cristaux photoniques s'inscrit dans une logique de matériaux hiérarchisés avec une organisation multi-échelle. En **contrôlant précisément la géométrie** (taille, espacement des motifs) à l'échelle submicrométrique, on peut obtenir des propriétés optiques remarquables comme des bandes interdites photoniques.

Cette capacité à manipuler la lumière à l'échelle de la longueur d'onde ouvre de nombreuses applications en photonique, notamment pour **le guidage et le confinement de la lumière**. Les cristaux photoniques représentent ainsi un domaine emblématique où le contrôle de la structure aux échelles micro- et nanométriques permet d'obtenir des fonctionnalités nouvelles, à l'instar des surfaces biomimétiques aux propriétés remarquables.

Reproduire des fonctions optiques biologiques

Un cristal photonique artificiel est une version simplifiée et optimisée d'une structure biologique. Les cristaux photoniques sont utilisés dans de nombreux domaines de recherche en optique et photonique, d'une part pour mieux **caractériser et comprendre les phénomènes naturels** (réflexion sélective, absorption efficace, guidage d'onde...), mais aussi comme solution pour **développer des applications technologiques**.

Basés sur ce principe, des dispositifs plus complexes cherchent à reproduire des fonctionnalités optiques biologiques avancées. En combinant différents types de cristaux photoniques, on peut par exemple créer des **surfaces aux propriétés optiques variables selon l'environnement**, inspirées du camouflage adaptatif des céphalopodes. Cette démarche se généralise à l'ensemble des fonctions optiques naturelles : photoréception, bioluminescence, photosynthèse. On y retrouve l'approche biomimétique consistant à transposer une fonction donnée, à partir de l'extraction des principes essentiels et l'optimisation des structures identifiées.

Diversifier les champs d'applications

Au-delà de la reproduction de phénomènes optiques bien identifiés, les cristaux photoniques sont utilisés pour l'optimisation de nombreuses applications. Par exemple :

- **Les cellules solaires bio-inspirées** : en s'inspirant de la structure des ailes de papillon, on peut améliorer l'absorption de la lumière et l'efficacité des panneaux photovoltaïques.
- **Les capteurs colorimétriques** : inspirés des changements de couleur des caméléons, des cristaux photoniques réactifs permettent de détecter des variations de température, d'humidité ou la présence de certaines molécules.
- **Les revêtements anti-reflets** : en reproduisant la nanostructure des yeux de papillon de nuit, on peut créer des surfaces ultra-absorbantes pour l'optique ou le solaire.
- **Les écrans à faible consommation** : en s'inspirant des écailles réfléchissantes des poissons abyssaux, on développe des écrans réfléchissants économes en énergie.

De manière transversale, la maîtrise des cristaux photoniques ouvre la voie à des technologies de communication quantique, d'imagerie médicale ou de calcul optique, toutes potentiellement inspirées de processus biologiques.

Conclusions

La synergie entre cristaux photoniques et biomimétisme est fructueuse à l'heure actuelle, notamment autour des technologies de fabrication et de structuration de la matière aux échelles micro- et nanométriques. Elle mériterait d'être encore renforcée, en particulier en explorant d'autres domaines que l'optique pure et en contribuant plus activement aux enjeux de développement durable.

Les cristaux photoniques bio-inspirés démontrent souvent leur potentiel jusqu'à la preuve de concept en laboratoire. Le défi reste le passage à l'échelle industrielle. Des acteurs de l'écosystème du biomimétisme travaillent activement sur cet enjeu :

- P-LAYER

La start-up P-LAYER développe un vitrage intelligent intégrant des couches photovoltaïques et des cristaux photoniques. Cette technologie permet de créer un verre dynamique capable de s'opacifier rapidement et de produire de l'énergie simultanément.

- Institut d'Optique *Graduate School*

Équipe de recherche (Laboratoire Charles Fabry) dédiée aux cristaux photoniques.

Rédactrice

Maëlle VILBERT, chargée de mission études industrielle Ceebios

Formation initiale en optique appliquée aux matériaux biologiques

Références

- Vargas, William E., et al. "Photonic crystal characterization of the cuticles of *Chrysina chrysargyrea* and *Chrysina optima* jewel scarab beetles." *Biomimetics* 3.4 (2018): 30.
- Vukusic, Pete, and J. Roy Sambles. "Photonic structures in biology." *Nature* 424.6950 (2003): 852-855.
- Fan, Xiujun, et al. "Light diffraction by sarcomeres produces iridescence in transmission in the transparent ghost catfish." *Proceedings of the National Academy of Sciences* 120.12 (2023): e2219300120.
- Cristaux photoniques naturels : <https://www.nature.com/articles/nature01941>
- Cristaux photoniques biologiques : <https://www.nature.com/articles/s41578-019-0150-z>
- Cellules solaires bio-inspirées : <https://www.nature.com/articles/s41560-017-0016-9>
- Capteurs colorimétriques : <https://www.nature.com/articles/s41563-019-0506-1>
- Revêtements anti-reflets : <https://www.nature.com/articles/ncomms3630>
- Écrans réfléchissants : <https://www.nature.com/articles/s41586-019-1031-8>