



Multifonctionnalité des papillons Morpho

Structuration multi-échelle et travail d'orfèvre

Introduction

Les papillons du genre Morpho (famille : Nymphalidae, ordre : Lépidoptères), originaires des forêts tropicales d'Amérique centrale et du Sud, sont réputés pour leur **saissante couleur bleue iridescente**. Cette couleur n'est pas due à des pigments, mais à un complexe phénomène physique impliquant **des structures microscopiques et nanoscopiques** présentes sur leurs ailes.

Caractéristiques des micro- et nanostructures

Les ailes des Morpho présentent une organisation hiérarchique remarquable :

- ❖ **Écailles** : les ailes sont couvertes de millions d'écailles microscopiques striées, chacune mesurant environ 200 μm de long.
- ❖ **Stries** : la surface de chaque écaille est constituée d'une succession de stries longitudinales parallèles, verticales, espacées d'environ 1 μm et constituées elles-mêmes de lamelles superposées.
- ❖ **Nanostructures en « arbre de Noël »** : les stries sont organisées en un empilement de lamelles qui, vues en coupe, forment des nanostructures ressemblant à des arbres de Noël avec des « branches » empilées à intervalles réguliers d'environ 60-70 nm.

Ces nanostructures créent un **effet optique appelé « interférences constructives »** qui sélectionne et réfléchit spécifiquement la lumière bleue dans certaines directions de l'espace, produisant ainsi l'aspect visuel caractéristique des papillons Morpho.

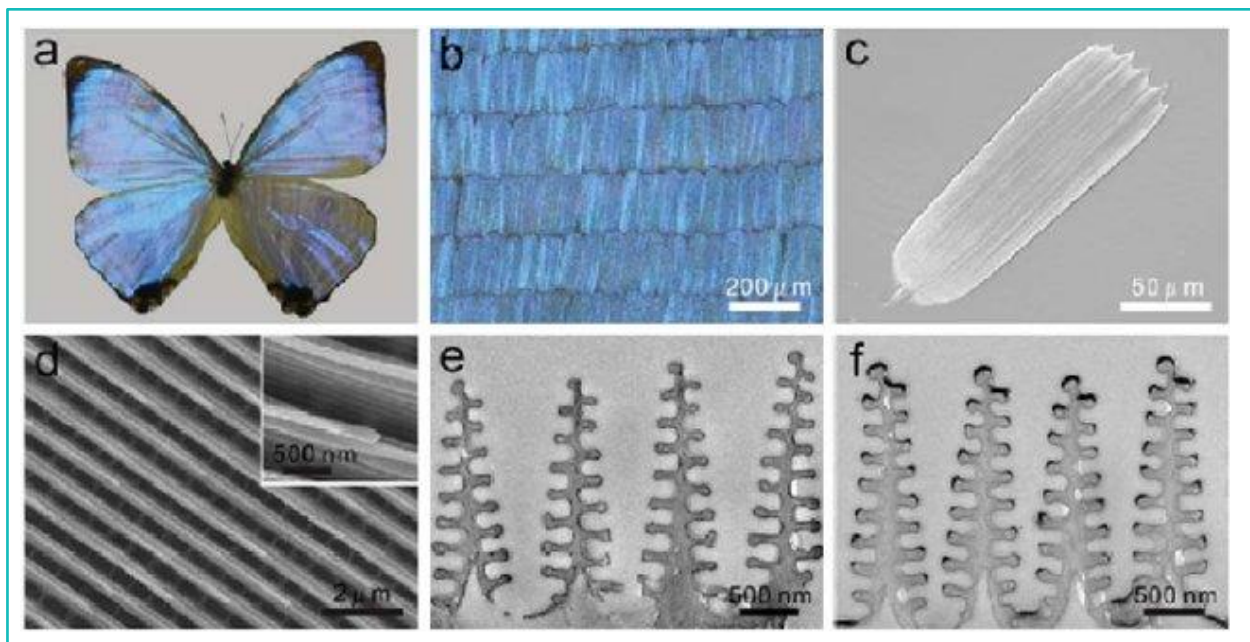


Fig. 1 / Morphologie et structures d'un papillon du genre Morpho.
 Photographie d'un papillon Morpho sulkowskyi (a).
 Image en microscopie optique du tuilage des écailles (b).
 Détail d'une écaille seule par microscopie électronique à balayage (c).
 Zoom sur les stries/lamelles d'une écaille par microscopie électronique à balayage (d).
 Vue en coupe des lamelles nanostructurées par microscopie électronique en transmission (e-f).

Propriétés remarquables

La structuration multi-échelle des ailes des papillons Morpho leur confère plusieurs propriétés exceptionnelles :

- À l'échelle macroscopique, les veines garantissent la **robustesse mécanique** de la grande surface que représentent les ailes à l'échelle du papillon.
- À l'échelle microscopique (ordre de la centaine de micromètres), les ailes sont imperméables à l'eau : dans leur environnement de forêt tropicale humide, les gouttes d'eau déperlent sur les écailles. Cette propriété d'**hydrophobie** préserve la légèreté de l'aile, indispensable au vol, tout en lui conférant un **effet auto-nettoyant** par l'entraînement des impuretés de surface lors du ruissellement des gouttes.
- À l'échelle microscopique (ordre du micromètre), les stries des écailles empêchent l'adhésion des bactéries par réduction de leur surface de contact avec l'aile : c'est l'**effet anti-fouling**.
- À l'échelle nanométrique, les structures en « sapin de Noël » confère aux ailes leur **couleur bleue vive** et leur propriété d'**iridescence** : la couleur perçue change légèrement selon l'angle d'observation de l'aile, créant un effet visuel scintillant lorsque le papillon est en vol.

On peut noter que l'effet visuel très particulier des ailes de Morpho joue un rôle dans la communication entre individus, notamment dans la **reconnaissance intraspécifique**. Par ailleurs, la structuration et la composition chimiques des ailes contribuent à la **thermorégulation** du papillon.

Mécanisme de thermorégulation

La thermorégulation chez les papillons repose sur **les propriétés physico-chimiques** du matériau qui compose majoritairement leurs ailes : **la chitine**. Celle-ci présente une large bande **d'absorption des rayonnements solaires** visibles et ultraviolets, ainsi que dans le moyen-infrarouge, qui permettent une augmentation en température du papillon lorsque ses ailes sont exposées au soleil. Par ailleurs, la chitine se démarque par deux pics d'émissivité dans le proche infrarouge, notamment un pic centré autour d'une longueur d'onde de $6\text{ }\mu\text{m}$ (caractéristiques des liaisons C=O dans les composés organiques) : **lorsque l'aile du papillon est chauffée à une température supérieure à environ 40°C** (température de bon fonctionnement physiologique, qui varie selon les espèces), la courbe d'émission du corps noir se superpose avec le pic d'émissivité à $6\text{ }\mu\text{m}$ de la chitine. Ce recouvrement des deux courbes traduit une **forte augmentation de l'émission radiative de l'aile**, donc un fort refroidissement, jusqu'à ce que la température idéale de fonctionnement soit rétablie. Ce tandem réchauffement-refroidissement permet le maintien du corps du papillon dans une gamme de températures adaptée à sa survie.

On peut noter que l'effet de refroidissement des ailes est décuplé par la circulation de l'hémolymph dans les veines (refroidissement par convection) ainsi que par la réflexion/rétrodiffusion d'une partie du rayonnement solaire incident par la micro- et nanostructuration des ailes.

Fabrication de structures biomimétiques

La reproduction des structures des papillons Morpho représente un défi technologique important. Plusieurs approches sont explorées : les techniques de **micro- et nanolithographie** permettent de graver des motifs précis, **l'auto-assemblage** exploite des processus chimiques pour générer des structures hiérarchiques et **l'impression 3D à haute résolution** permet la fabrication directe de structures multicouches complexes.

Ces méthodes, bien que prometteuses, peinent encore à reproduire la complexité et l'efficacité des structures naturelles du Morpho.

Conclusions

La recherche sur les structures multi-échelle des papillons Morpho illustre parfaitement le potentiel du biomimétisme et ouvre de nombreuses perspectives.

Côté sciences fondamentales et biodiversité, elle élargit le champ des connaissances actuelles en permettant une meilleure compréhension du vivant, depuis la description exhaustive des matériaux biologiques jusqu'aux mécanismes d'évolution et d'adaptation des espèces.

Côté technologie, elle permet le développement de produits qui tirent parti de la multifonctionnalité des ailes de Morpho :

❖ **Capteurs optiques** : des capteurs ultra-sensibles pour la détection de vapeurs chimiques.

Des chercheurs de l'Université de Californie, Berkeley et d'autres institutions ont développé des capteurs de gaz inspirés par les ailes des papillons Morpho. Ces capteurs exploitent les propriétés de diffusion de la lumière des nanostructures des ailes pour détecter des gaz, comme l'hydrogène, avec une grande sensibilité. Ces travaux sont encore en phase de recherche, mais ils ouvrent des perspectives pour la détection de fuites de gaz dans l'industrie de l'énergie.

❖ **Revêtements anti-contrefaçon** : des surfaces iridescentes difficiles à reproduire pour sécuriser les billets de banque.

Opalux est une entreprise basée au Canada qui développe des matériaux à base de cristaux photoniques inspirés des structures de papillons comme les Morpho. Leur technologie P-Ink® permet de créer des surfaces qui changent de couleur en fonction de la lumière ou de l'angle de vue, avec des applications pour l'anti-contrefaçon (billets de banque, produits de luxe), ainsi que dans l'électronique et l'affichage intelligent.

❖ **Textiles aux couleurs structurales** : des tissus colorés sans pigments.

BASF, un leader mondial de la chimie, a mené des recherches avec un projet nommé Project Morpho®, axé sur la création de revêtements hautement réfléchissants et de pigments iridescents inspirés par les papillons. Leur objectif est de reproduire l'effet de changement de couleur sans utiliser de colorants synthétiques, en particulier pour les peintures automobiles et autres surfaces industrielles.

❖ **Textiles intelligents** : des tissus changeant de couleur en fonction de l'environnement.

L'entreprise japonaise Teijin Limited a développé des fibres "Morphotex" qui changent de couleur sans utiliser de pigments, en s'inspirant de la structure des ailes du Morpho.

❖ **Cellules photovoltaïques** : amélioration de l'efficacité des panneaux solaires.

L'agence gouvernementale australienne CSIRO a soutenu un projet de création de cellules solaires organiques plus efficaces imitant la structure des ailes du Morpho pour améliorer l'absorption de la lumière.

❖ **Surfaces autonettoyantes** : développement de matériaux hydrophobes et antibactériens.

Le centre de recherche et développement de General Electric (GE Global Research) a développé des revêtements super-hydrophobes inspirés du Morpho pour des applications dans l'aviation et l'énergie.

Bien que ces nombreux exemples témoignent du potentiel de l'approche, plusieurs défis persistent :

- **Passage à l'échelle** : la production de ces structures sur de grandes surfaces est techniquement limitée à l'heure actuelle.
- **Durabilité** : il est nécessaire d'améliorer la résistance à long terme des matériaux bio-inspirés.
- **Accessibilité** : une réduction des coûts de production est nécessaire pour une application industrielle viable.

Rappelons enfin qu'au-delà du potentiel d'innovation technologique qu'offre aujourd'hui l'observation de ces structures naturelles complexes, il est essentiel de préserver la biodiversité comme source d'inspiration pour la science et l'ingénierie de demain.

Rédactrice

Maëlle VILBERT, chargée de mission études industrielle Ceebios

Formation initiale en optique appliquée aux matériaux biologiques

Références

- [figure] He, J., *et al.* (2018). Integrating plasmonic nanostructures with natural photonic architectures in Pd-modified Morpho butterfly wings for sensitive hydrogen gas sensing. *RSC advances*, 8(57), 32395-32400.
- Vukusic, P., & Sambles, J. R. (2003). Photonic structures in biology. *Nature*, 424(6950), 852-855.
- Kinoshita, S., Yoshioka, S., & Miyazaki, J. (2008). Physics of structural colors. *Reports on Progress in Physics*, 71(7), 076401.
- Kolle, M., *et al.* (2010). Mimicking the colourful wing scale structure of the Papilio blumei butterfly. *Nature Nanotechnology*, 5(7), 511-515.
- Zhang, S., & Chen, Y. (2015). Nanofabrication and coloration study of artificial Morpho butterfly wings with aligned lamellae layers. *Scientific Reports*, 5, 16637.
- Chung, K., *et al.* (2012). Flexible, angle-independent, structural color reflectors inspired by Morpho butterfly wings. *Advanced Materials*, 24(18), 2375-2379.
- Li, Q., *et al.* (2016). Bio-inspired sensors based on photonic structures of Morpho butterfly wings: a review. *Journal of Materials Chemistry C*, 4(9), 1752-1763.
- Butt, H., *et al.* (2016). Morpho butterfly - inspired nanostructures. *Advanced Optical Materials*, 4(4), 497-504.
- Berthier, S. (2005). Thermoregulation and spectral selectivity of the tropical butterfly Prepona meander: a remarkable example of temperature auto-regulation. *Applied Physics A*, 80, 1397-1400.
- Didari, A., & Mengüç, M. P. (2018). A biomimicry design for nanoscale radiative cooling applications inspired by Morpho didius butterfly. *Scientific reports*, 8(1), 16891.