

24 et 27 février 2025

Formation
Sécurité laser
Inter-entreprises
**TECHNIFUTUR -
LASEA**

28 mars 2025

Réunion de
l'Organe
d'Administration
UCLouvain

**Juin
2025**

6 juin 2025

Assemblée
Générale de
l'ASBL
CSL Liège

Juin 2025

Formation
Sécurité laser

13-14 novembre
2025

NEWSLETTER 10 - Le désordre en photonique naturelle : tolérance, efficacité et inspiration technologique

Dans le monde vivant, les structures photoniques naturelles ne se résument pas à de parfaits cristaux réguliers. Au contraire, de nombreuses espèces d'animaux et de plantes présentent des architectures optiques marquées par un certain degré de désordre structural, qu'il s'agisse de variations dans la position des motifs, dans leur taille, ou dans leur orientation spatiale. Or, ce désordre, loin d'être un simple défaut, peut jouer un rôle fonctionnel déterminant. Dans cette newsletter, nous explorons les coûts et bénéfices optiques du désordre dans les cristaux photoniques naturels, à partir d'exemples tirés de la nature et des réflexions issues de notre article *Optical costs and benefits of disorder in biological photonic crystals*, Faraday Discussions, 2020 co-écrit avec nos collègues de l'Université d'Exeter, Stephen Luke, Luke T. McDonald et Pete Vukusic [1]. C'est en tirant de telles leçons de la nature que nous pouvons développer des applications technologiques via une approche dite « bioinspirée » [2].

Le désordre, un outil optique naturel

Chez certains coléoptères blancs comme *Cyphochilus* sp. ou *Lepidiota stigma* (Figure 1) [3,4], des réseaux de fibrilles nanométriques désordonnés au sein d'écailles recouvrant leur corps permettent une rétrodiffusion lumineuse exceptionnelle sur une large gamme spectrale, tout en conservant une quantité de matériau minimale. Cela a conduit à des innovations permettant de réduire la quantité de matériaux utilisés tout en maintenant les propriétés optiques, notamment dans l'industrie du papier [5]. De même, chez certains insectes ou oiseaux, des structures quasi ordonnées génèrent une diffusion cohérente donnant lieu à des couleurs, parfois iridescentes, malgré l'absence d'ordre cristallin parfait [1,6].

Ce que ces systèmes montrent, c'est que la nature exploite parfois l'imperfection structurelle pour produire des effets optiques robustes fonctionnels tels que le camouflage et la communication visuelle.

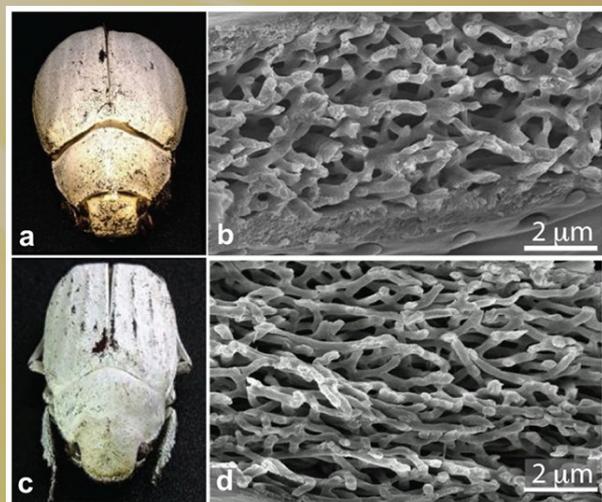


Figure 1 : Les fibrilles de chitine désordonnées présentes dans les écailles des scarabées *Cyphochilus* sp. and *Lepidiota stigma* (a et c, respectivement) donnent lieu à une diffusion de lumière remarquable, générant une blancheur intense avec une très faible quantité de matériau. Cette capacité à maximiser l'efficacité optique, tout en réduisant la consommation de matière, inspire des applications dans des revêtements ultra-blancs et des matériaux optiques économes en ressources. Figure reproduite de [4], sous licence CC-BY.

Tolérance aux défauts et résilience biologique

Par ailleurs, les systèmes photoniques naturels offrent des perspectives précieuses sur les coûts et bénéfiques liés à une déviation par rapport à la périodicité parfaite [1]. Un point particulier et fascinant réside dans leur capacité à tolérer les imperfections morphologiques. Malgré la présence de défauts importants dans les réseaux photoniques biologiques, les apparences visuelles et fonctions biologiques sont conservées de manière fiable chez la grande majorité des individus d'une espèce donnée. À travers l'évolution naturelle, la signature visuelle et les performances optiques ne sont pas dépendantes d'une perfection structurale, mais d'une efficacité adaptée à l'environnement.

Enseignements pour la photonique bioinspirée

Du point de vue technologique, les systèmes photoniques artificiels souffrent souvent d'une forte sensibilité aux défauts de fabrication. La nature, elle, conçoit des matériaux optiques efficaces et tolérants à l'imprécision, conférant une robustesse qui s'avère extrêmement précieuse pour envisager des applications bioinspirées. En nous inspirant de ces stratégies, il devient envisageable de développer des dispositifs photoniques plus résilients face aux aléas de fabrication [1,2].

Un exemple très concret de cette inspiration est l'utilisation du « bruit cellulaire » dans les écailles du petit nacré (*Issoria lathonia*), un papillon que l'on retrouve en Belgique, pour la sécurisation documentaire (Figure 2). Par « bruit cellulaire », on désigne la variabilité microscopique naturelle présente entre les unités constitutives d'un même tissu biologique – ici, les écailles recouvrant les ailes du papillon – qui résulte de processus biologiques intrinsèquement non déterministes au sein de cellules biologiques. Il donne lieu aux variations que nous observons d'une écaille à l'autre lors du développement de celles-ci. Chaque écaille est de la sorte structurellement unique, et cette variabilité naturelle a été exploitée pour créer des étiquettes optiques de mémoire infalsifiables [7]. Ces dispositifs, qui conservent leur efficacité même après plusieurs siècles, offrent une alternative simple, peu coûteuse et sûre aux systèmes anti-contrefaçon actuels.

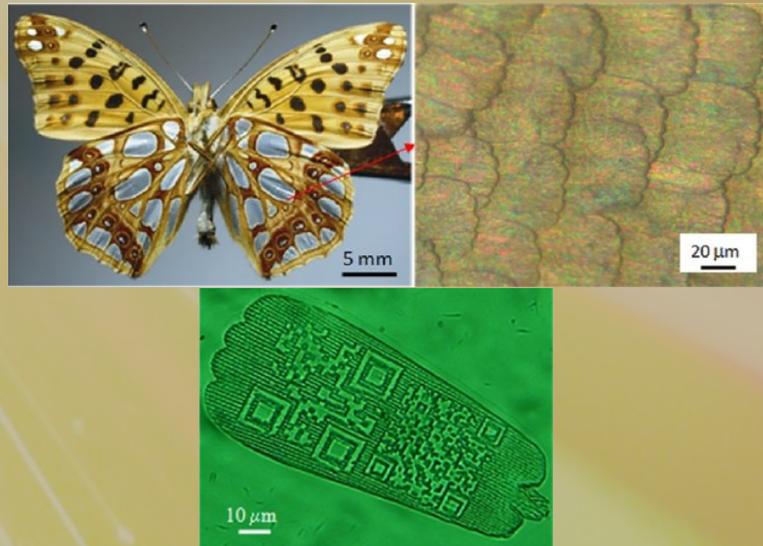


Figure 2 : Le petit nacré (*I. lathonia*) est coloré structurellement sur sa face ventrale (à gauche). Les écailles donnant lieu à cette couleur métallique et observées ici au microscope optique (à droite) présentent une microstructure naturellement unique. Cette variabilité structurelle, issue du « bruit cellulaire », a été exploitée pour créer des étiquettes optiques infalsifiables : ici, un QR-code gravé au laser femtoseconde sur une écaille (en-dessous) permet de sécuriser l'authenticité d'un document ou d'un objet. Figure reproduite de [7], avec la permission de John Wiley and Sons.

Membre de l'EOS (European Optical Society)

**Juin
2025**

Le désordre, dans les systèmes photoniques naturels, est bien plus qu'un bruit structurel à tolérer : c'est un principe de structuration optique à part entière. Il ouvre des perspectives fascinantes pour une photonique bioinspirée, tolérante aux défauts, adaptative et plus durable. Dans un contexte où la durabilité et la résilience deviennent des critères essentiels, s'inspirer de la façon dont la nature gère l'imperfection ouvre une voie prometteuse pour la photonique du futur.

Sébastien R. Mouchet

Chercheur qualifié FRS-FNRS, Université de Mons
Maître de conférences, Université de Namur
Chercheur associé, Université d'Exeter

Références :

- [1] Mouchet, SR, Luke, S, McDonald, LT, Vukusic, P (2020). Optical costs and benefits of disorder in biological photonic crystals. *Faraday Discussions*, 223, 9-48.
- [2] Mouchet, SR, DeParis, O (2021). *Natural Photonics and Bioinspiration*, Artech House, Boston & London, 2021.
- [3] Vukusic, P, Hallam, B, Noyes, J (2007). Brilliant whiteness in ultrathin beetle scales, *Science*, 315, 348.
- [4] Burrese, M, *et al.* (2014). Bright-White Beetle Scales Optimise Multiple Scattering of Light, *Scientific Reports*, 4, 6075.
- [5] Hallam, BT, Hiorns, AG, Vukusic, P (2009), Developing optical efficiency through optimized coating structure: biomimetic inspiration from white beetles, *Applied Optics*, 48, 3243-3249.
- [6] Mouchet, SR, Vukusic, P (2018). Structural Colours in Lepidopteran Scales, *Advances in Insect Physiology*, 58, 1-53.
- [7] Pavlović, D, *et al.* (2019), Naturally safe: Cellular noise for document security, *Journal of Biophotonics*, 12(12), e201900218.

Futures manifestations scientifiques :

- 30 juin au 4 juillet 2025: 27ème Congrès général de la Société Française de Physique 2025 **Université de Technologie de TROYES**
- 24 au 28 août 2025 : Conférence annuelle de l'EOS à **DELFT**

Membre de l'EOS (European Optical Society)

**Juin
2025**