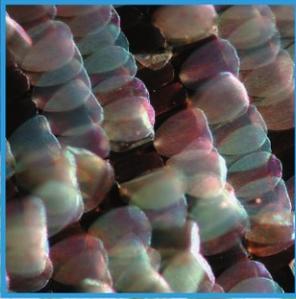


 Serge Berthier

Photonique des Morphos



 Springer



Photonique des Morphos

Serge Berthier

Institut des NanoSciences de Paris

UMR CNRS - Université Pierre et Marie Curie n° 7588

Université Diderot et IUT Paris-Jussieu

5, rue Thomas Mann

75013 Paris

ISBN-13 : 978-2-287-09407-1 Springer Paris Berlin Heidelberg New York

© Springer-Verlag France, Paris, 2010

Imprimé en France

Springer-Verlag France est membre du groupe Springer Science + Business Media

Cet ouvrage est soumis au copyright. Tous droits réservés, notamment la reproduction et la représentation, la traduction, la réimpression, l'exposé, la reproduction des illustrations et des tableaux, la transmission par voie d'enregistrement sonore ou visuel, la reproduction par microfilm ou tout autre moyen ainsi que la conservation des banques de données. La loi française sur le copyright du 9 septembre 1965 dans la version en vigueur n'autorise une reproduction intégrale ou partielle que dans certains cas, et en principe moyennant les paiements des droits. Toute représentation, reproduction, contrefaçon ou conservation dans une banque de données par quelque procédé que ce soit est sanctionnée par la loi pénale sur le copyright.

L'utilisation dans cet ouvrage de désignations, dénominations commerciales, marques de fabrique, etc., même sans spécification ne signifie pas que ces termes soient libres de la législation sur les marques de fabrique et la protection des marques et qu'ils puissent être utilisés par chacun. La maison d'édition décline toute responsabilité quant à l'exactitude des indications de dosage et des modes d'emplois. Dans chaque cas il incombe à l'utilisateur de vérifier les informations données par comparaison à la littérature existante.

Maquette de couverture : Jean-François Montmarché

Mise en page : S-PAO Service, Caroline Trabouyer – Saint-Galmier (42)

À mes parents,
À Valérian et Juliette,
À Annie

*Ô, Grand Esprit
Dont j'entends la voix dans le vent
Et dont le souffle donne vie à l'univers entier...*

*Permets-moi d'apprendre les
Leçons cachées sous les feuilles et les pierres.*

(Prière amérindienne – Guyane française)



Ciel de case – Guyane française (Collection J.-P. Vigneron)

Sommaire

Remerciements	9
Préface.....	13
Avant-propos.....	15
Taxonomie.....	23
PARTIE I : STRUCTURES ET PROPRIÉTÉS	
Introduction	37
1. Structure des ailes des Morphidae : présentation générale.....	41
2. Propriétés optiques.....	65
3. Couleur : mesure et caractérisation	85
4. Thermorégulation, propriétés radiatives.....	103
5. Vers une approche dynamique des propriétés optiques.....	117
PARTIE II : CARACTÉRISATION	
Introduction	123
6. Imagerie	125
7. Topographie et nervation des ailes. Méthodes de moiré et radiographie.....	135
8. Désordre structural.....	143
9. Spectrophotométrie.....	151
PARTIE III : VISUALISATION ET MODÉLISATION	
Introduction	167
10. Visualisation.....	169
11. Modélisation multi-échelle	175
PARTIE IV : BASE DE DONNÉES	
Introduction	191
Sous-genre <i>Iphixibia</i>	193
Sous-genre <i>Laurschwartzia</i>	197
Sous-genre <i>Iphimedeia</i>	201
Sous-genre <i>Megamede</i>	205
Sous-genre <i>Balachowskyna</i>	211
Sous-genre <i>Grasseia</i>	215
Sous-genre <i>Morpho</i>	221
Sous-genre <i>Pessonia</i>	225
Sous-genre <i>Cytheritis</i>	229
CONCLUSION	235
ANNEXE	
Détermination de l'indice de la chitine	239
Index des espèces citées	247

Remerciements

Comme on a pu le constater dans cet ouvrage, une étude exhaustive d'une structure photonique aussi complexe que celle d'un papillon est une tâche ardue, qui nécessite un grand nombre de techniques expérimentales ou théoriques. Pas moins de dix-huit techniques expérimentales différentes et cinq approches théoriques ou numériques. Personne, je pense, ne doit être en mesure de les dominer toutes, et certes pas moi ! C'est le prix d'une étude multi-physique et c'est aussi son avantage de vous obliger à la coopération et de vous amener à rencontrer et fréquenter des femmes et des hommes remarquables.

Je voudrais tout d'abord commencer par remercier les jeunes, étudiants et doctorants qui, depuis plusieurs années ont eu le courage, ou l'inconscience, de se lancer dans l'étude des structures photoniques naturelles, ou au contraire la très grande perspicacité d'en voir l'intérêt et les développements futurs. Les tous premiers furent, je crois, **Jean-Philippe Schweitzer**, centralien et **Stéphane Mansaut**, étudiant de l'IUT Paris-Jussieu. Stéphane a commencé l'étude systématique d'une quinzaine de Morphos, il y a déjà 6 ans et initialisé la base de donnée présentée aujourd'hui. Il rêvait d'aller travailler au Japon. J'espère qu'il a réalisé ce rêve et que ces remerciements tardifs lui parviendront par quelques chemins détournés. Jean-Philippe est lui parti travailler en Chine où il fait une brillante carrière. Mais je sais que je le reverrai. Plus tard, **Emmanuel Maguet**, de l'IUT Paris-Jussieu également, s'est attelé au fastidieux travail de détermination de l'entropie de configuration sur les écailles des Morphos. Je lui dois un des chapitres, le plus original de ce livre. Enfin, pour en finir avec la jeune classe, je remercie et voudrais assurer de ma plus grande affection « mes » deux derniers et brillants doctorants, **Julie Boulenguez**, et **Vincent Reillon**. Julie a travaillé très directement sur les Morphos, Vincent sur des structures artificielles mais soulevant des problèmes très identiques : les céramiques lustrées. J'espère qu'ils auront apprécié autant que moi ces quatre années, riches et intenses. Chacun le sait, ce sont les doctorants les vrais travailleurs de la science. Je n'aurais rien pu faire sans eux. Leurs chemins vont diverger mais je sais qu'ils les mèneront loin. On ne vous oubliera pas ! Ces deux là sont des physiciens, j'ai eu la chance de travailler avec une biologiste du la-

boratoire d'entomologie du Muséum national d'histoire naturelle de Paris, **Catherine Cassildé**. Catherine travaille sur la phylogénie des *Morphos* et a pallié avec patience et gentillesse à mes incommensurables lacunes dans ce domaine et plus généralement en biologie. Les pistes qu'elle a ouvertes en introduisant les structures photoniques dans les critères phylogénétiques sont innovantes et riches d'enseignement. Je lui souhaite de tout cœur la réussite qu'elle mérite.

La rédaction de ce livre a coïncidé avec le déroulement du projet européen Biophot. Tous ses acteurs ont pu suivre, au cours de nos rencontres à Paris, Namur, Budapest ou Londres, son évolution. Ils m'ont prodigué conseils et encouragements, et je les remercie du fond du cœur, à commencer par son coordinateur, **Jean-Pol Vigneron** qui m'a fait l'honneur de préfacer ce livre. La moindre de ses qualités n'est pas d'avoir mené ce projet de la plus remarquable manière qui soit, mais aussi d'avoir tissé et fait tisser entre nous de véritables liens d'amitié qui perdureront bien après son expiration. Nos biologistes, **Andrew Parker**, du Natural History Museum de Londres, et **Zsolt Balint**, du Hungarian Natural History Museum de Budapest nous ont ouvert leurs prestigieuses collections. Zsolt, mon ami, mes pensées t'accompagnent. Merci également à **Laszlo Biro** de l'Académie des sciences de Hongrie, qui malgré les grandes difficultés économiques de son pays, arrive à mener à bien des travaux exemplaires.

La plupart des photographies de microscopie électronique à balayage ont été réalisées au laboratoire de physique des liquides et électrochimie de l'université Pierre et Marie Curie par **Stephan Borensztein**. On m'a souvent félicité pour la qualité de ces images. Je n'y suis pour rien, tout le mérite lui revient. La réalisation des coupes d'écaïlles ou de membranes alaires pour la microscopie photonique ou électronique en transmission est l'œuvre du laboratoire de biologie marine de cette même université. Merci à **Jean-Pierre Lechair** et **Ghislaine Frébourg** pour leur accueil et ce très beau travail.

De nombreuses personnes de divers laboratoires ont mis leurs savoirs, leurs compétences et leur matériel à notre disposition. Habitué à traiter de sujets combien plus complexes et fondamentaux, j'ai apprécié qu'ils les abandonnent un temps pour se pencher sur mes papillons. Merci à **Jean-Christophe Dupré** et **Fabrice Bremand**, du laboratoire de mécanique des solides, de l'université de Poitiers. Après celles de la Joconda, ils nous ont dévoilés, grâce à leur technique de moiré, les formes de ces autres chef-d'œuvres que sont *Eugénia* et *Rhetenor*. Un grand merci également à **Laurent Sauque** et son équipe, de la DGA – Arcueil qui ont effectué les délicates mesures de réflectivité infrarouge. Merci enfin aux membres du laboratoire de recherche et de restauration des musées de France (C2RMF) eux aussi plus habitués à l'étude d'autres chefs-d'œuvre que ceux de la nature et qui ont réalisé quelques « premières », comme la radiographie X des ailes sous flux d'hélium. Merci à **Thierry Borel** pour sa gentillesse et sa disponibilité. Et merci à mon ami **Michel Menu**, directeur scientifique du C2RMF et grand entremetteur pour son soutien et son affection.

J'ai eu la chance, avant d'entamer ce travail, de rencontrer un extraordinaire photo-reporter à qui je dois quelques photos de cet ouvrage : **Pascal**

Goetgheluck. Sans doute grâce à lui arriverons-nous enfin, dans un avenir proche je l'espère, à voir le vol du Morpho. Merci à toi Pascal.

Ces recherches ont été effectuées au sein de l'équipe Propagation en milieu inhomogène : application (PROPAG), de l'Institut des nanosciences de Paris (INSP). Je remercie chaleureusement mes collègues et amis, **Christine Andraud**, avec qui je vais avoir enfin le plaisir de travailler plus directement et **Jacques Lafait**, qui fut il y a longtemps mon directeur de thèse, puis mon directeur tout court, mais est toujours resté mon meilleur et plus constant soutien durant toute ma carrière.

En septembre 2008, Jean-Pol Vigneron organisait, avec cinq de ses étudiants de l'université Notre-Dame-de-la-Paix, à Namur, une expédition en Guyane française à laquelle il a bien voulu m'associer. Tout le monde sait que de tous les gaulois, les Belges sont les plus braves. Ce sont aussi les plus chaleureux et les plus ouverts. **Eloise Van Hoojdonk** va venir travailler avec moi pour sa thèse, et rien ne pouvait me faire plus plaisir. **Annick Bay** persévère dans la bio-inspiration et je sais que fort heureusement, nos routes se croiseront souvent. **Benjamin Bera**, **Anne-Catherine Heuskin**, **Ivan Ducarme** partent explorer d'autres voies. Ce sont tous de très bons physiciens. Ils iront loin et j'envie leurs futurs collègues et promoteurs. **Marie Rassart** enfin poursuit sa jeune carrière au laboratoire de physique des solides de Namur. C'est une amie chère, et maintenant une collègue douée. Ce livre leur est dédié, mais je voudrais le clore en adressant une fois de plus mes plus profonds remerciements à mes enfants, **Juliette** et **Valérian**, et à ma tendre compagne **Annie Fontaine**, tendre mais intraitable sur l'orthographe... Leur indéfectible soutien, la tendresse et l'amour dont ils m'ont entouré sont pour beaucoup dans la réalisation de ce livre.

Préface

« Morpho ! » Cette exclamation, poussée dans la forêt guyanaise, nous mettait en alerte lorsque surgissait de nulle part l'éclair bleu intermittent de ce papillon extraordinaire. Serge Berthier connaît comme personne ces grands insectes et les découvrir en sa compagnie est un privilège que quelques-uns de mes étudiants et moi n'oublierons pas. Il y a quelque chose dans l'apparence de ces papillons qui force à penser, en les rencontrant, que nous sommes survolés par des esprits et nos vieilles références au surnaturel remontent à notre insu. Pourtant, ce que nous voyons, le bleu profond, l'éclat métallique intermittent, notre incapacité à prévoir son mouvement dans l'espace alors que nous le percevons si bien, ne sont – j'allais dire « simplement » – que des perfectionnements qui, depuis des dizaines de millions d'années, ont permis la survie et le développement de l'espèce. Le nouveau livre de Serge Berthier nous fait découvrir les mécanismes physiques à la base de ces effets visuels, en nous exposant les principes et les détails de ces mécanismes pour plus de trente espèces de ces papillons d'Amérique tropicale. S'embarquer sur une pirogue pour pénétrer l'habitat de ce seigneur des clairières est certainement une expérience inoubliable. Se mettre aux commandes d'un microscope électronique à balayage et prendre un départ vers l'ultra-structure de l'aile du Morpho, c'est commencer une odysée vers des mondes plus étonnants encore que la forêt amazonienne. Explorateur infatigable de ces cathédrales miniatures que sont les ailes de papillons, Serge Berthier est notre guide dans ces contrées souvent difficiles d'accès.

En suivant la trajectoire plus ou moins bleue des morphos, nous voyons prendre forme de nombreuses questions fondamentales que le physicien ne se lasse pas de rendre plus larges et plus précises, parce que le progrès vers la maîtrise de la complexité nous sera toujours plus nécessaire. Qu'est-ce que la lumière ? Qu'est-ce que la couleur ? Par quels mécanismes peut-on contrôler l'apparence des objets ? Les leçons portées par ces connaissances sont d'une très grande actualité. Étudier la propagation de la lumière à travers le labyrinthe des écailles de Morpho, c'est aussi se donner une chance de maîtriser l'optique des milieux inhomogènes. Dans le siècle où nous sommes engagés, on tentera d'utiliser la lumière pour bien d'autres fonctions que l'éclairage. L'information est déjà largement véhiculée, sur de grandes distances, par des grains de lumière, qui circulent dans les fibres optiques pour

l'internet ou le téléphone portable. Mais ce n'est pas fini : on attend maintenant que la manipulation de ce que nous appelons les « photons » permette aussi le traitement logique de ces informations. Il est de plus en plus clair que les matériaux homogènes ne suffiront pas et il est temps pour nous de savoir comment les structures denses en interfaces pourront remplir les fonctions de propagation commutées que nous allons bientôt exiger.

La « photonique » trouvée sur les organismes vivants n'intéresse pas seulement le biologiste. Elle fournit un chapitre de science en amont de l'ingénierie et c'est en partie cette science qui fournira la nouvelle inspiration de nos ingénieurs. Emprunter des idées et des recettes à la nature n'est pas une nouveauté : en fait, il est rare qu'une invention ne soit pas la transposition d'une observation. L'industrie pourrait être intéressée de savoir qu'il n'est pas nécessaire de disposer de colorants pour colorer et que la clé pour cette performance est librement accessible, sur les ailes de papillons, les élytres de coléoptères ou sur les plumes d'oiseaux. Les organismes vivants n'ont pas besoin d'une grande variété de matériaux pour nous fournir une grande variété d'effets visuels, du plus spectaculaire au plus discret. Les secrets de conception résident dans l'inhomogénéité et la complexité géométrique des matériaux. Les morphos étudiés par Serge Berthier dans ce livre font partie d'une même famille biologique : ce sont tous des parents proches dans la généalogie de l'évolution et on pourrait de ce fait s'attendre à une répétition ennuyeuse des mêmes structures et des mêmes effets visuels. Il n'en est rien. Cette famille de papillon présente des variations d'effets visuels remarquables, qui expliquent en grande partie qu'ils aient été choisis pour cette étude systématique.

Les processus qui sous-tendent l'évolution et la sélection naturelle sont des mécanismes extrêmement puissants, capables de pousser à la production d'organes d'une complexité et d'une efficacité étonnantes. De ce fait, la nature vivante peut nous apparaître comme une réserve de « solutions » fossiles de problèmes de physique, de chimie et d'ingénierie des systèmes quasi inépuisable. Il nous faudra des décennies pour arriver à mettre en évidence les mécanismes qui pourraient inspirer nos inventeurs. Entre-temps, encore faut-il éviter l'extinction de ces solutions, en même temps que celle des espèces qui les détiennent.

Professeur J.-P. Vigneron



Pr. Jean-Pol Vigneron
Chutes de Fourgassier, Guyane française,
septembre 2008

Avant-propos

Les Morphos : d'extraordinaires cristaux photoniques naturels ?

Cette phrase illustre tout à la fois le contenu et la philosophie de cet ouvrage réalisé par un physicien : présenter les Morphos, magnifiques animaux s'il en est, sous leur aspect cristallin ! Quels sont les enjeux de cette approche pour le moins curieuse ? La manipulation de la lumière est un des défis de ce début de siècle. Appeler à remplacer l'électron dans de nombreux domaines, le photon doit pouvoir être distingué, manipulé et dirigé sur de très petites distances, de l'ordre de quelques dizaines de nanomètres : c'est le domaine des nanotechnologies. Des matériaux capables d'une telle gestion de la lumière existent : ce sont les cristaux photoniques. De quoi s'agit-il ? Un cristal minéral, comme le cristal de roche, le diamant... est caractérisé par une organisation périodique des atomes à la fois à courte et à grande distance. En quelque endroit que nous observions le cristal, nous retrouvons toujours la même disposition des atomes les uns par rapport aux autres. Cette stricte périodicité a des conséquences surprenantes pour des particules qui chercheraient à se déplacer dans le cristal. Pour résoudre un tel problème, la mécanique quantique commence par schématiser drastiquement la forme du potentiel auquel est soumise la particule – généralement un électron – lorsqu'elle passe au voisinage des atomes. Cette démarche simplifie considérablement les calculs, sans ôter de sens physique au problème, et nous rapproche encore plus du phénomène optique qui nous intéresse ici.

Il faut ensuite résoudre la célèbre équation de Schrödinger (fig. 1a), où ψ est la fonction d'onde de la particule et E son énergie. Nous ne nous lançons pas dans la résolution de cette équation qui, dans ce cas précis, n'est d'ailleurs pas évidente. Nous retiendrons simplement que ses solutions sont discontinues : la propagation ne peut se faire avec n'importe quelle énergie. Les énergies permises sont groupées en bandes, entre lesquelles s'intercalent des zones d'énergie – les bandes interdites – qui ne correspondent pas

à un déplacement de la particule : la périodicité du potentiel entraîne une quantification partielle des énergies.

Mais revenons à l'optique, et plus précisément aux structures des papillons. La particule est maintenant un photon, son onde associée : l'onde électromagnétique. Que se passe-t-il lorsque cette particule cherche à se propager dans un milieu présentant une alternance périodique d'indice, l'équivalent du potentiel électrique de l'électron ? Et bien, strictement la même chose ! L'équation à résoudre est maintenant l'équation d'Helmholtz (fig. 1b) qui se présente exactement sous la même forme que l'équation de Schrödinger (la fréquence ω remplaçant l'énergie E) et conduit au même type de solutions : une succession de bandes de fréquences permises alternant avec des bandes de fréquences interdites. La périodicité de l'indice entraîne une quantification partielle du domaine fréquentiel. Cette analogie entre phénomènes électriques dans un cristal et les phénomènes optiques – on dit aussi photoniques – dans un milieu structuré est à l'origine du terme « cristal photonique ».

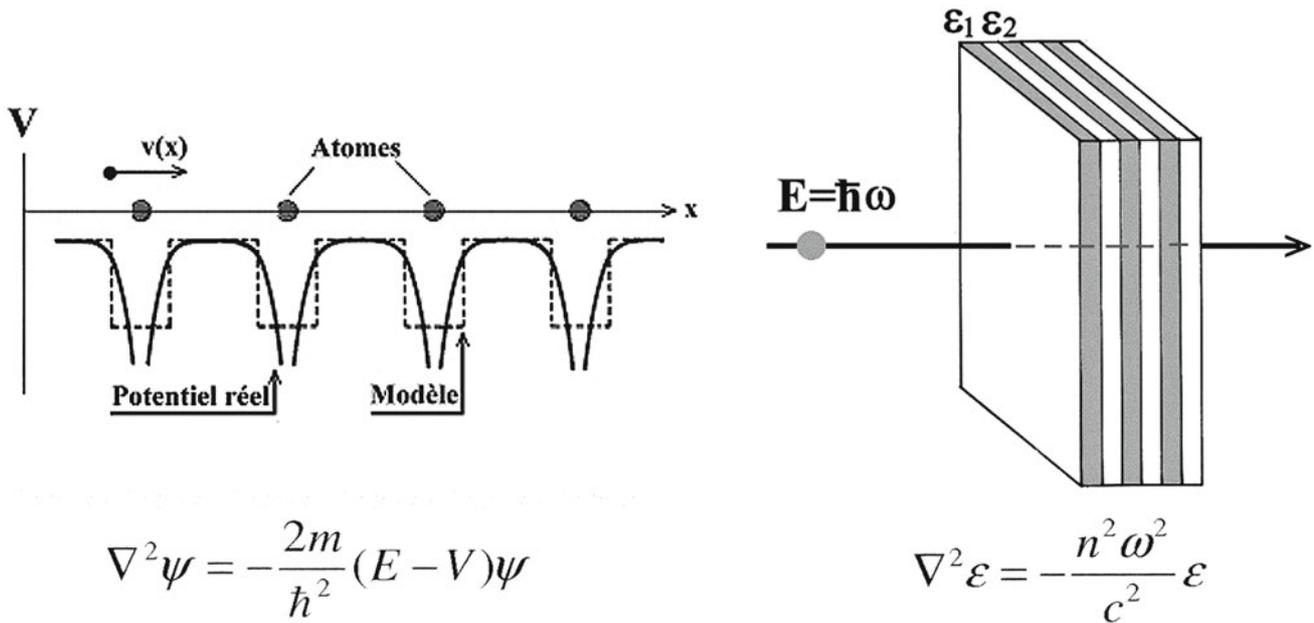


Fig. 1 - Cristal et cristal photonique unidimensionnel, et les équations de Schrodinger et de Helmholtz qui permettent de déterminer l'énergie (ou la fréquence) des particules qui les traversent.

C'est dans ce contexte que nous décrivons les structures des ailes et les phénomènes qui y sont rattachés. Du point de vue géométrique, en effet, on peut classer les cristaux photoniques selon le nombre de dimensions dans lesquelles se développe la périodicité.

Les cristaux à une dimension (1D) présentent un indice périodique selon une direction, uniforme selon les deux autres. C'est le cas, par exemple, d'un empilement de couches minces alternativement de haut et bas indice. On sait que de telles structures produisent des interférences, et sont très largement – et depuis longtemps – utilisées comme miroirs diélectriques, filtres, etc.

De la même manière, les cristaux bi- (2D) et tridimensionnels (3D) présentent des périodicités dans deux et trois dimensions respectivement, rejoignant dans ce dernier cas la géométrie traditionnelle des cristaux minéraux. Ces réseaux sont le siège de phénomènes qualifiés historiquement de diffractifs mais qui ne sont en réalité qu'une généralisation des phénomènes interférentiels rencontrés dans la couche mince.

L'élaboration de tels objets tridimensionnels est délicate et aujourd'hui extrêmement coûteuse. Or, de tels cristaux existent en abondance dans la nature, et particulièrement chez les insectes. Aussi est-il tentant, à défaut de savoir les réaliser, d'utiliser directement ceux mis à notre disposition par la nature. Des techniques de chimie douce permettent en effet d'en réaliser des moules en divers matériaux et d'en exacerber les propriétés, limitées chez l'insecte par la relative pauvreté du choix proposé : chitine, air ou eau, tous matériaux de faible contraste d'indice optique ! Avant toute exploitation, il est nécessaire d'explorer ce monde pratiquement inconnu, de découvrir les nouvelles structures, de les classer, les caractériser et les modéliser. En un mot, refaire à l'échelle nanoscopique le travail effectué par nos grands naturalistes à l'échelle macroscopique de l'organisme animal ou végétal. C'est le but que se sont proposé quelques grands projets, comme le projet « Biophot » en Europe, et c'est celui de ce livre que de présenter une telle étude, en s'appuyant pour cela sur l'une des plus belles familles de papillons : celle des Morphos. Les Morphos sont donc ici le prétexte à une présentation aussi exhaustive que possible de l'immense diversité des structures photoniques que l'on peut découvrir dans une famille pourtant relativement restreinte, et des techniques de caractérisation et de modélisation de ces structures naturelles. C'est donc, je le redis, ouvrage de physicien que ce livre et non d'entomologiste. On trouvera par ailleurs le point de vue de ce dernier, en particulier dans les très beaux recueils de P. Blandin : « *The genus Morpho* » qui présentent une étude exhaustive de la famille. On ne saurait cependant débiter un ouvrage dont les Morphos sont les héros sans les présenter et les situer succinctement.

La famille des Morphidae

Les membres de la famille des Morphidae, communément appelés « Morphos », du nom du principal genre *Morpho fabricius*, 1807, vivent strictement dans la région néotropicale du nouveau monde, du Mexique au nord jusqu'au sud du bassin amazonien, avec un très grand nombre d'espèces dans ce dernier.

Ils présentent un certain nombre de caractéristiques communes qui les rendent facilement identifiables. Ce sont de grands, voire de très grands papillons (une vingtaine de centimètres pour *M. hecuba* par exemple), avec quelques espèces seulement relativement petites, comme *M. portis*, d'une envergure moyenne de 7 cm (fig. 6). Thorax et abdomen sont relativement petits pour de tels voiliers, ce qui conduit souvent à des vols planés et une utilisation importante des courants.

Les femelles sont généralement plus grandes que les mâles, et ce dimorphisme sexuel affecte très souvent la couleur, mais pas systématiquement. Beaucoup d'espèces présentent en effet cette couleur bleue métallique, dont l'étude est le sujet de ce livre, et ce sont en général les mâles qui l'exhibent, sur la face dorsale, les femelles présentant alors des couleurs cryptiques pigmentaires (brun, jaune, noir) (fig. 2). La face ventrale est généralement totalement pigmentée et présente, particulièrement sur les ailes postérieures, une rangée d'ocelles caractéristiques. Il n'est pas rare de rencontrer à ce niveau, dans les anneaux des ocelles, quelques écailles structurales.



Fig. 2 - *Morpho cypris* femelle (a) et mâle (b). La femelle (12 à 13 cm) est plus grande que le mâle (10 à 11 cm). (Photo : P. Blandin et C. Cassildé - MNHN.)

Tout en conservant un dimorphisme sexuel relativement marqué, un *Cytheritis*, *M. aega*, présente plusieurs morphes femelles, une classique, cryptique jaune et noir, l'autre bleu iridescente, une troisième enfin iridescente sur les antérieurs, cryptique sur les postérieurs, avec donc une grande disparité de structures des écailles, comme on peut le voir dans la base de donnée (fig. 3).

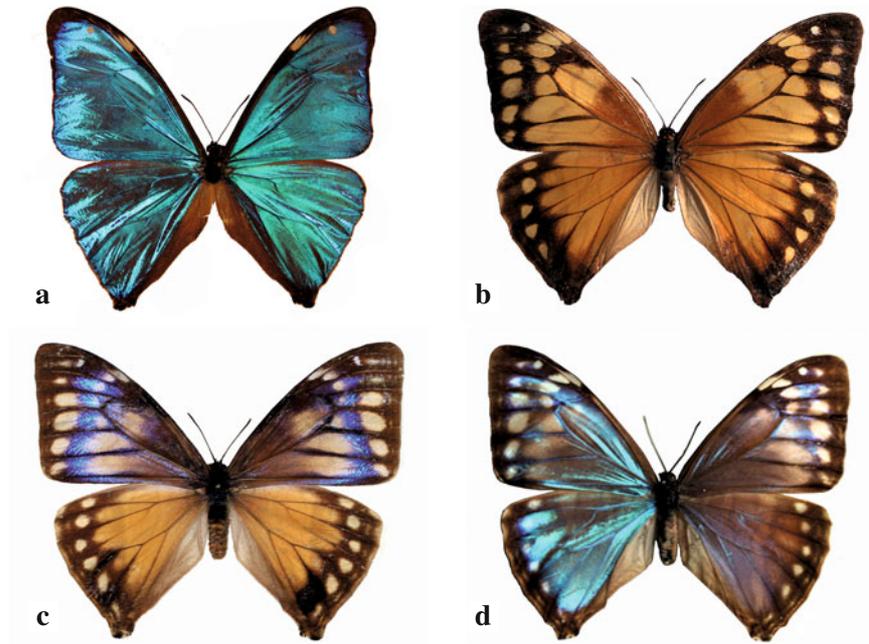
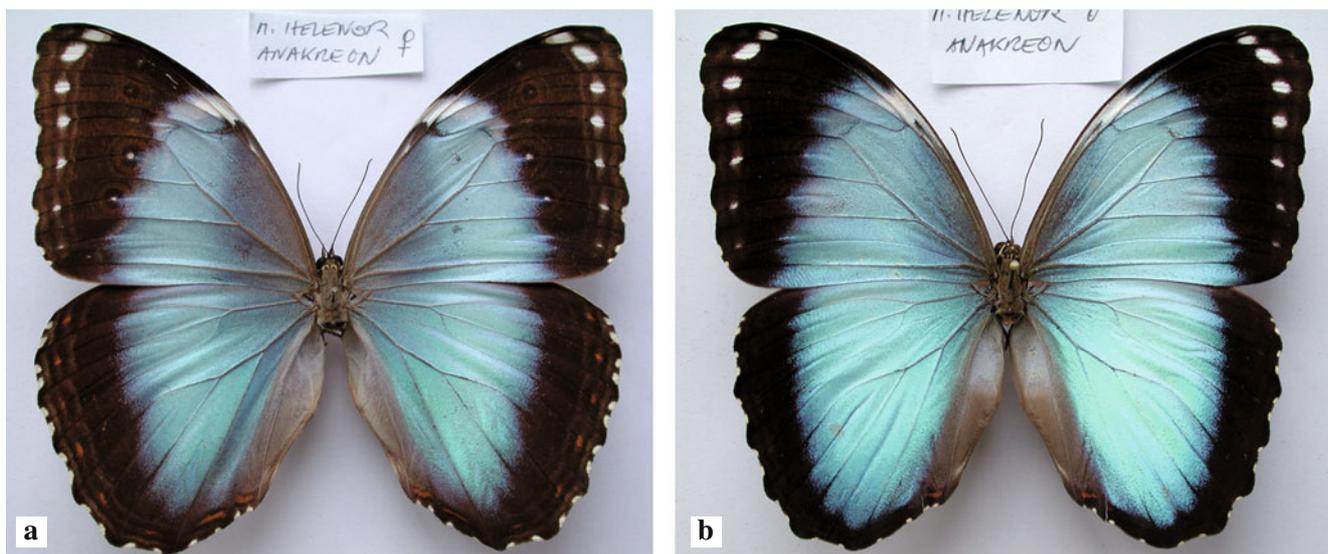


Fig. 3 - *Morpho aega* mâle (a) et les trois morphes femelles (b, c, d)

Chez d'autres cependant, les différences sont beaucoup moins marquées, comme chez la plupart des espèces du sous-genre *Morpho* (fig. 4). Les cas de gynandromorphisme, c'est-à-dire d'insectes présentant à la fois des caractéristiques mâles et femelles, sont relativement fréquents, et particulièrement évidents dans le premier cas. Pratiquement toutes les configurations possibles ont été rencontrées. Cette aberration peut en effet affecter indifféremment les ailes situées d'un même côté (gauche/droite ou anté-



rier/postérieur) mais parfois, comme chez ce *M. rhetenor*, les ailes situées en diagonale ! À notre connaissance, tous ces individus semblent stériles (fig. 5).

Fig. 4 - Femelles (a) et mâles (b) pratiquement identiques par la taille comme par la couleur chez *M. helenor anakreon*. (Photo : P. Blandin et C. Cassildé - MNHN.)



Fig. 5 - Un cas particulièrement curieux de gynandromorphisme chez *M. rhetenor* : l'aile antérieure gauche est totalement mâle, la postérieure droite partiellement. Les deux autres sont entièrement femelles. (Photo : P. Blandin et C. Cassildé - MNHN.)

Nous en resterons là de cet aperçu de la famille. On trouvera en fin de cette introduction des planches présentant les mâles des différentes espèces de Morpho. Ces planches apparaissent en début d'ouvrage pour qu'il soit plus aisé de s'y reporter à chaque instant, lorsqu'au cours de la lecture, on désire se remémorer l'aspect du papillon étudié. Les détails de sa structure et de ses propriétés optiques sont en revanche rassemblés dans la systématique en fin d'ouvrage. Ces planches ont été réalisées par Catherine Cassildé et Patrick Blandin à partir de la collection du Muséum national d'histoire naturelle de Paris. Elles ne représentent évidemment pas l'ensemble des espèces et sous-espèces décrites des Morphidae mais, à quelque rares exceptions près, toutes les espèces citées et étudiées dans cet ouvrage.

Fig. 6 - Du plus grand au plus petit. En haut, *M. portis* ♂ (6,5 cm), en bas *M. hecuba* ♂ (16,5 cm). La femelle de ce dernier est encore légèrement plus grande (18 cm).



À propos de cet ouvrage

Le livre est divisé en quatre grandes parties. La première présente les propriétés structurales, optiques et colorimétriques des ailes des Morphos. Le cours de la présentation est fragmenté par des encarts qui développent un point particulier, permettent quelques rappels théoriques ou mathématiques, créent un lien avec des sujets connexes, mais ne relevant pas directement de l'exposé... Leur lecture, en ce point précis du déroulement de l'ouvrage, n'est absolument pas nécessaire. On peut les oublier, ou y revenir à tout instant, sans nuire à la compréhension de l'ensemble. La seconde partie concerne les techniques de caractérisation d'une structure photonique. Certaines sont très classiques et ne sont qu'évoquées. D'autres, au contraire, le sont beaucoup moins et ont été développées spécifiquement pour cette étude, ou appliquées pour la première fois à des échantillons naturels. Les protocoles expérimentaux ont parfois été présentés de manière assez détaillée. Cela n'a pas semblé inutile, au moment où ces études se développent un peu partout dans le monde. La troisième partie s'adresse plus spécifiquement aux physiciens : Elle est dédiée à la modélisation et la visualisation de ces structures photoniques, sans lesquelles il ne saurait y avoir une réelle compréhension des phénomènes ni de transferts technologiques pos-

sibles. Enfin, l'ouvrage se termine par la présentation d'une base de données iconographique. On y trouvera l'ensemble des données structurales et optiques obtenues sur les Morphos durant cette étude. Données non exhaustives bien sûr, mais qui couvrent avec plusieurs exemples, l'ensemble des neuf sous-genres composant la famille.

Chaque chapitre se clôt par un *résumé* extrêmement succinct, sous forme de quelques phrases très courtes, qui reprennent les idées-force développées dans le cours du texte, et selon la même chronologie. Ce résumé peut donc également être vu comme une table des matières détaillée du chapitre. Il est suivi d'une *bibliographie* également non exhaustive qui permet à tout lecteur désireux d'en savoir plus de retrouver les textes fondamentaux et incontournables à partir desquels il pourra accéder à l'ensemble des publications concernant le sujet traité (fig. 7).



Fig. 7 - L'auteur, au microscope photonique – Institut des NanoSciences de Paris, CNRS – Université Pierre et Marie Curie, 2008. (Photo : Pascal Goetgheluck.)

Pour en savoir plus

Les articles historiques :

Berthier S (2006) *Structure and optical properties of the wings of Morphidae*. *Insect Sciences* 145-157

L'ouvrage de référence (on y trouvera une bibliographie quasi-exhaustive sur le genre Morpho) est sans conteste :

Blandin P Part 1 (1988), part 2 (1993), part 3 (2007) *The genus Morpho*. Canterbury, Hillside Books

Plus accessibles, les très beaux livres de :

D'Abbrera B Part 2 (1984), part 3 (1995) *Butterflies of the Neotropical region*. Victoria, Australia, Hill House

Forcément moins exhaustif, donne quelques précieuses indications sur l'habitat, la chasse, etc. :

DeVries PJJ (1987) The Butterflies of the Costa Rica and their natural history. Princetown University Press

Pour apprécier l'évolution de la phylogénie du genre Morpho :

Le Moult E, Real P (1962) Les Morphos d'Amérique du sud et centrale. Paris, Édition du cabinet d'entomologie E. Le Moult

Spécifiquement centrés sur la phylogénie du genre :

Cassildé C, Blandin P, Pierre J, Bourgoïn T (in press) Morphological phylogeny of Morpho Fabricius (Lepidoptera, Nymphalidae).

Penz C, DeVries PJ (2002) Phylogenetic analysis of Morpho Butterflies (Nymphalidae, Morphinae): Implication for Classification and Natural History. AMNH Novitates