

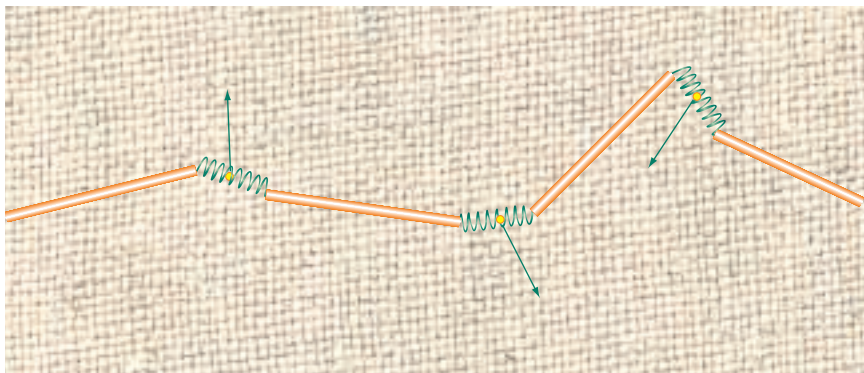
des pièces de tissu. Pour déterminer les comportements des tissus aux plus grandes perturbations, plusieurs approches ont été testées. La méthode des éléments finis, tout d'abord, divise les fils en nombreuses petites zones et calcule la déformation de chacune, à partir des lois de déformation des fils. Toutefois le nombre de calcul augmente considérablement avec la taille du tissu modélisé ; en pratique, les modélisations sont limitées à quelques centimètres carrés.

Une autre approche consiste à conserver la loi de comportement donnée par l'analyse précédente et à compléter la description : on considère une cellule du tissu sous la forme d'une boîte fictive qui entoure une ondulation du fil. La microrotation du modèle continu peut alors être identifiée avec la rotation de la cellule de base par rapport à l'axe fixe horizontal, et représente en quelque sorte l'ondulation du fil au deuxième ordre de grandeur. De même, il est raisonnable de penser que les bosselures présentes dans le premier stade de déformation en traction sont associées à des ondulations d'ordre supérieur.

Gauchissement et éléments finis

Considérons alors une contrainte appliquée aux extrémités du fil, et supposons que le fil soit inextensible : la longueur de la cellule de base ne varie pas. La déformation dans la direction de traction provient alors de la diminution de la microrotation, diminution qui résulte du moment induit par la contrainte appliquée sur la cellule de base. La contrainte externe se transmet en effet le long du fil, et la cellule de base est soumise à un couple de contraintes, ayant pour bras de levier la demi hauteur d'ondulation. Cet exemple révèle bien l'origine microscopique des variables cinématique (microrotation) et statiques (couples de contraintes) de la loi de comportement micropolaire. La courbe unidimensionnelle de traction obtenue par la théorie reproduit bien la courbe mesurée, et cette analyse rend compte de façon quantitative de la courbe de traction d'un tissu.

Une des difficultés de la réalisation de vêtements est liée au caractère non développable des surfaces textiles : la



5. LE FIL des tissus est considéré par l'analyse non standard comme un ensemble de tiges indéformables (*en rouge*) reliées par des ressorts (ainsi, on tient compte de l'élasticité des fils). Les contraintes exercées par les fils transverses sont représentées par des forces agissant entre les tiges, sur les ressorts (*en vert*). On obtient ainsi des équations qui décrivent la mécanique des fils (par exemple, la somme des sinus des angles que font les tiges avec l'horizontale est nulle). L'analyse classique obtient le comportement réel du fil en faisant tendre la longueur des tiges vers zéro, mais elle perd ainsi la possibilité de considérer des échelles intermédiaires. Quand l'analyse non standard fait tendre la longueur des tiges vers zéro, elle conserve la possibilité de décrire simultanément des phénomènes à des échelles différentes : par exemple, une raideur du fil variable (constantes de raideur des ressorts différentes selon les tiges).

surface ne peut être déployée sur un plan sans coupure. Il faut alors savoir où et comment découper les pièces à plat qui constitueront le patron afin de minimiser la quantité de tissu utilisée, tout en obtenant une résistance aux déformations satisfaisantes. De surcroît, les utilisateurs de tissus se fondent sur les gauchissements que peuvent prendre les tissus au cours de leur assemblage : la souplesse du tissu est souvent mise à profit pour raccorder les différentes pièces.

Pour prévoir le comportement des tissus, aucune des approches précédentes ne suffit, car le gauchissement, par exemple, correspond à une déformation hors du plan du tissu. Aussi doit-on utiliser alors des techniques de

calcul numérique par éléments finis, qui divisent le tissu gauchi en un grand nombre de cellules, calculent les déformations pour chaque cellule et remontent ensuite au comportement global. L'analyse micromécanique, aux petites ou aux grandes perturbations, sert alors à décrire les petits éléments.

Aujourd'hui la méthode des éléments finis donne une bonne description de petites pièces de tissu et l'on cherche à étendre la taille des pièces décrites.

L'intégration d'une modélisation mécanique dans les programmes de conception assistée par ordinateur constituerait un progrès de taille dans l'industrie de la confection. C'est un travail en cours.

Jean-François GANGHOFFER est chercheur en mécanique et en science des matériaux à l'Institut de chimie des surfaces et interfaces (CNRS), à Mulhouse. Massimo MAGNO est chercheur à l'École nationale supérieure des industries textiles de Mulhouse et au Laboratoire de mathématiques et applications de l'Université de Haute-Alsace.

B. OLOFSSON, *A General Model of a Fabric as a Geometric-mechanical Structure*, in *Journal of the Textile Institute*, p. 541, 1964.

A. ASKAR et A.S. Cakmak, *A Structural Model of a Micropolar Continuum*, in *Int. J. Engng. Sci.*, vol. 6, p. 583, 1968.

I.P. VAN DER BERG, *On the Relation between Elementary Partial Difference Equations and Partial Differential Equations*, in *Annals of Pure and Applied Logic*, vol. 92, pp. 235-265, 1999.

Massimo MAGNO, *Modèle mécanique du comportement de structure souple aux échelles mésoscopique et macroscopique : application aux matériaux fibreux*, Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur de l'Université de Haute-Alsace, 1999.

Corinne JUNG, *Analyse micromécanique du comportement d'un tissu, cas de l'armure toile*, Thèse de doctorat en sciences de l'ingénieur de l'Université de Haute-Alsace, 1999.



Des tissus aux couleurs changeantes

SERGE BERTHIER • JACQUES LAFAIT

L'étude des structures microscopiques des ailes de papillon a fourni les clés des couleurs iridescentes. On tente de créer des tissus qui ont des structures et, par conséquent, des couleurs comparables.

L'iris est la partie colorée de l'œil ; c'est aussi l'ensemble des couleurs de l'arc-en-ciel (pour les Grecs, la déesse Iris était la personnification de l'arc-en-ciel). L'iridescence est la propriété des objets qui imitent l'iris : le physicien qualifie d'iridescent tout objet dont la couleur varie avec l'angle d'incidence des rayons lumineux qui l'éclairent ou avec l'angle d'observation. Le phénomène est assez fréquent dans la nature, mais il est surtout intense chez certains insectes (des coléoptères et des lépidoptères diurnes) ou chez quelques oiseaux. De nombreux physiciens se sont intéressés au phénomène et en ont cherché l'explication. Parce qu'elles ont révélé les structures responsables du phénomène physique, les techniques d'imagerie électronique ont dévoilé les secrets de l'iridescence.

Les papillons, qui utilisent presque tous les phénomènes physiques de variation des couleurs

et y associent parfois des pigments, représentent un excellent modèle de l'iridescence. Ils ont fait naître dans l'imagination des physiciens l'idée d'appliquer le phénomène à des tissus fabriqués avec des fibres dont la structure serait proche de celle des ailes de papillon. Pour comprendre quel serait l'aspect de tels tissus, examinons ce qu'est l'iridescence des ailes de papillon, et comment on peut appliquer les enseignements tirés d'une telle étude à l'élaboration de tissus d'un type nouveau.

L'origine des couleurs

Quand elle n'est pas due à un pigment, la couleur naît d'un des quatre phénomènes physiques suivants : la réfraction, les interférences, la diffraction et la diffusion. Cette séparation est plus historique que physique, car, si les formalismes sont souvent différents, les phénomènes sous-jacents se ressemblent. Tous reposent sur l'interaction d'une onde électromagnétique avec les atomes qui constituent les matériaux colorés. La distinction dépend de la taille et de la forme des structures où a lieu l'interaction.

Le phénomène de réfraction sépare la lumière blanche en ses divers constituants. Lorsqu'un faisceau lumineux traverse un prisme, l'angle de déviation des rayonnements qui le composent est proportionnel à la différence d'indice de réfraction du premier milieu traversé et de celui du prisme. Dans le verre, l'indice de réfraction de la lumière visible diminue continûment lorsque

la longueur d'onde augmente, c'est-à-dire du violet au rouge : les rayons situés du côté rouge du spectre sont moins déviés que ceux du côté violet. De tous les phénomènes évoqués, c'est le seul qui ne soit pas utilisé chez les papillons.

Les réseaux, systèmes constitués d'un grand nombre d'objets diffractants régulièrement espacés, décomposent également la lumière, et les papillons utilisent le phénomène. Dans les réseaux par transmission, ces objets, nommés traits, sont des fentes séparées par des zones opaques ; dans les réseaux par réflexion, tels ceux des papillons, ce sont des miroirs. Lorsqu'une onde électromagnétique atteint un tel réseau, elle est diffractée dans toutes les directions de l'espace par chaque trait, qui agit comme une source de lumière secondaire : les ondes sortantes interfèrent. Pour une longueur d'onde donnée, ces interférences sont alternativement constructives (c'est-à-dire que l'on observe effectivement une lumière) et destructives, c'est-à-dire que l'on n'observe plus rien, selon la direction d'observation (voir l'encadré page ??).

En lumière blanche, les rayonnements qui ont la même longueur d'onde interfèrent de façon constructive dans des directions qui dépendent de cette longueur d'onde. Ainsi, selon la direction d'incidence de la lumière par rapport au réseau, la couleur qui émerge du réseau varie : il y a bien iridescence. Les directions correspondant à des interférences constructives ne dépendent que du pas du réseau (l'intervalle entre deux traits) et de l'angle d'incidence de la lumière sur le réseau.

Le déphasage entre deux ondes issues de deux traits adjacents varie comme le sinus de l'angle d'incidence (c'est-à-dire dans le même sens que l'angle lui-même), et les interférences sont constructives lorsque ce déphasage est égal à un nombre entier de longueurs d'onde ; contrairement au prisme, le rouge est plus dévié que le bleu. Les réseaux que l'on observe chez les papillons comptent environ 1 000 traits par millimètre, ce qui les rend facilement observables au microscope

optique. Or, les ailes de papillon sont pourvues de telles structures en réseaux : la diffraction intervient dans l'iridescence.

Les interférences de films minces sont une autre source de variations des couleurs. Ce sont elles qui créent les irisations sur les bulles de savon ou sur les films d'huile, par exemple.

La couleur naît à nouveau de l'interaction de deux ondes en déphasage constructif. Quand on observe un film en réflexion, les couleurs naissent des interférences entre l'onde directement réfléchiée par la face supérieure du film et celle qui pénètre dans le film et est réfléchiée par sa face inférieure. Le déphasage, qui dépend de l'épaisseur optique du film, varie, ici, comme le cosinus de l'angle de réfraction : la longueur d'onde donnant des interférences constructives diminue quand l'angle d'incidence augmente.

De surcroît, l'épaisseur d'un film d'interférences observé en réflexion, dans une direction particulière, et qui éteint une longueur d'onde donnée, est de l'ordre du quart de cette dernière. Dans le spectre visible, cette dimension est donc de l'ordre de 100 à 150 nanomètres (un nanomètre est un milliardième de mètre), c'est-à-dire bien inférieure à la résolution des microscopes optiques. L'ordre de grandeur de ces dimensions explique que certains physiciens du début du XX^e siècle soient restés sceptiques quant à l'origine interférentielle de l'iridescence des insectes.

La dernière source physique de coloration (dernière par l'ordre choisi ici, mais pas quant à son importance) est la diffusion. Les couleurs observées résultent de la diffusion de la lumière par les petites particules, par exemple les poussières ou les gouttelettes d'eau, en suspension dans les gaz. Une onde électromagnétique interagit d'autant mieux avec une particule que la



1. SELON L'INCIDENCE DE L'ÉCLAIRAGE, la couleur des ailes du papillon *Morpho menelaus* change : c'est le phénomène d'iridescence. Ici la même aile a été photographiée sous huit incidences différentes. Après avoir découvert ce qui, chez les papillons, engendre le phénomène, des physiciens tentent de le recréer sur des tissus.

taille de l'objet est proche de la longueur d'onde : l'efficacité de la diffusion (le rapport de l'énergie diffusée sur l'intensité incidente) est maximale lorsque le rayon est voisin de la longueur d'onde. Elle tend vers zéro lorsque la longueur d'onde croît ou que la taille des particules diminue.

Quelles en sont les conséquences pour l'effet coloré? Quand une particule de taille donnée diffuse avec une efficacité maximale une longueur d'onde de même taille, elle diffuse aussi

(même si l'efficacité est inférieure) les longueurs d'onde plus petites : les grosses particules diffusent principalement la lumière rouge (dont la longueur d'onde est de l'ordre de 0,75 micromètre, ou millième de millimètre) ; elles diffusent aussi, mais avec une efficacité moindre, tous les rayonnements de longueurs d'onde inférieures, de sorte que la lumière diffusée est à peu près blanche (c'est, par exemple, pourquoi la fumée de cigarette est blanchâtre). Au contraire,

les petites particules ne diffusent pas les grandes longueurs d'onde, mais les bleus (de l'ordre de 0,4 micromètre). C'est pourquoi les couleurs obtenues par diffusion sont situées à l'extrémité bleue du spectre (et que le ciel est bleu). Sauf cas particulier, la diffusion, peu sensible à l'incidence, ne donne pas lieu à un phénomène d'iridescence.

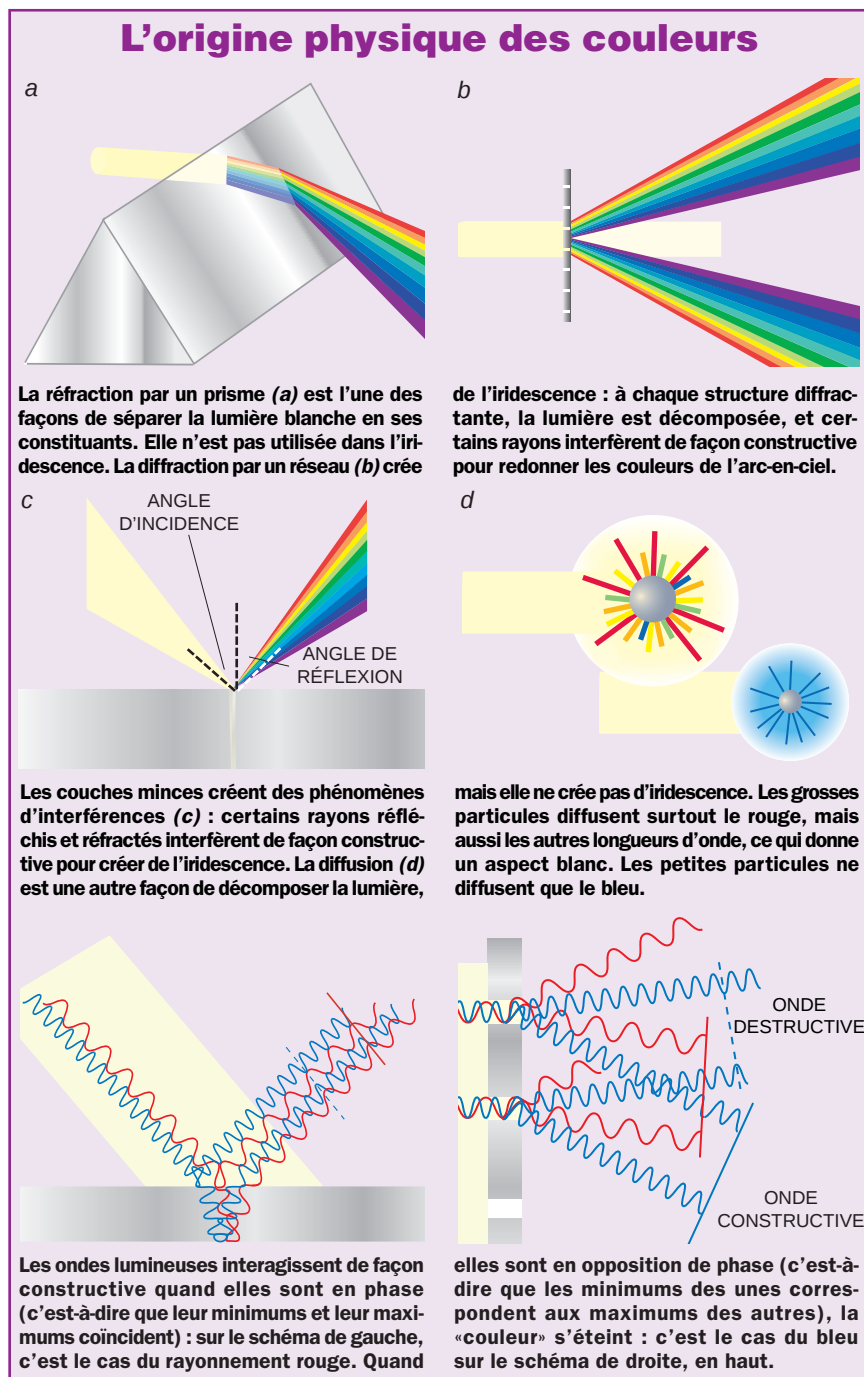
Telles sont les sources physiques des couleurs. Toutes sont liées à la structure des matériaux «colorés» tout autant qu'à leur nature. Aussi, dans cet examen des phénomènes, nous n'avons pas considéré les pigments qui absorbent une longueur d'onde donnée et qui n'interviennent dans l'iridescence que dans des conditions très particulières.

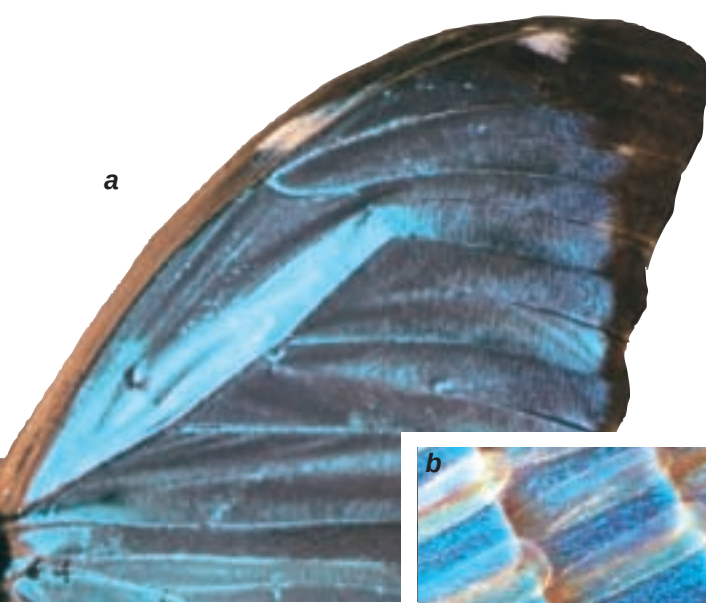
La structure des ailes de papillon

Les papillons de la famille des *Morphidae* et ceux de la famille des *Uraniidae* ont été étudiés pour les effets d'iridescence de leurs ailes. L'observation de ces ailes à cinq grossissements différents illustre le phénomène et révèle les structures nécessaires à son élaboration. Nous avons observé l'aile entière, à l'œil nu, les écailles (dont la longueur est de l'ordre de 100 micromètres, ou millièmes de mètre), leur stries (1 micromètre environ) et les structures des stries, dont la taille varie de 50 à 100 nanomètres ; enfin, nous avons analysé les molécules qui les constituent. L'étude d'éléments de plus en plus petits a suivi le cheminement historique, lié aux progrès de l'imagerie.

L'aile est constituée de deux membranes, qui se développent indépendamment et s'accolent en fin de développement. Progressivement, cette double membrane s'organise autour d'un réseau de nervures caractéristique de chaque espèce ; ces nervures délimitent des portions d'aile, nommées cellules alaires, dont la surface est relativement plane et homogène. L'aile est recouverte d'écailles sur ses deux faces.

Les écailles, formées de deux feuillets de chitine (un constituant des carapaces des crustacés, par exemple), ont plusieurs rôles, mais nous aborderons seulement celui de support de la couleur et des motifs chromatiques. La forme des écailles, leur taille et leur implantation sont variées et influent sur le rendu des couleurs. Le feuillet





inférieur des écailles, face à la membrane alaire, est généralement lisse, ou un peu ondulé, tandis que le feuillet supérieur, plus épais, a un relief plus marqué.

Les écailles de la face dorsale, qui nous intéressent ici, sont disposées sur deux épaisseurs : les écailles de fond sont en contact direct avec la membrane alaire ; les écailles de recouvrement, disposées en quinconce sur les précédentes, les recouvrent plus ou moins selon les espèces (voir la figure 2).

La couleur des écailles résulte soit des pigments qu'elles contiennent, soit de leur structure. Chez les papillons de la famille des *Uraniidae*, les écailles de fond contiennent des pigments et forment un écran noir, quasi continu, sur lequel se détachent les écailles de recouvrement, dites structurales (leur structure impose la couleur). Au contraire, chez les papillons de la famille des *Morphidae*, les écailles de fond sont structurales, et les écailles de recouvrement laissent passer la lumière : ou bien elles sont transparentes, ou bien elles sont atrophiées.

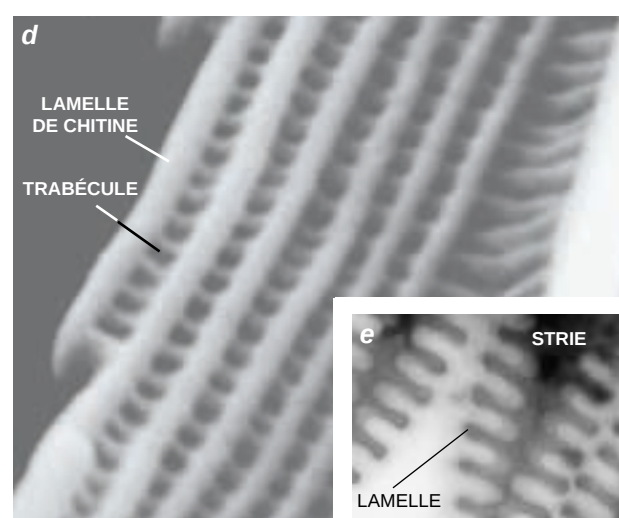
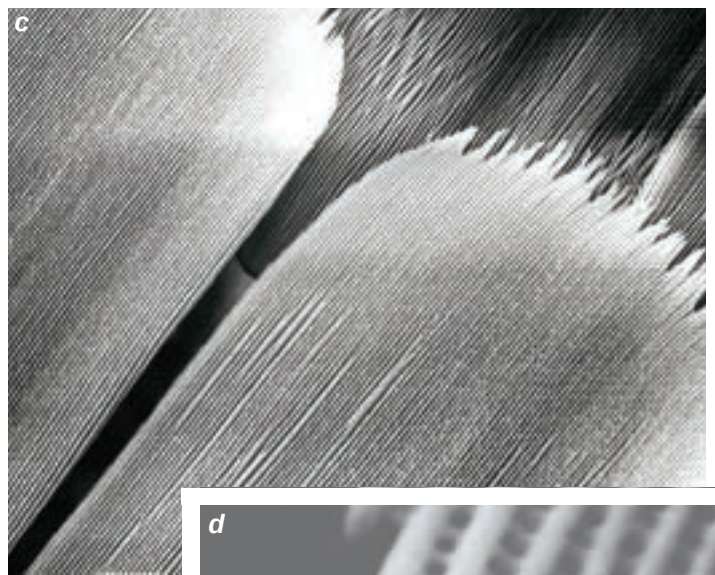
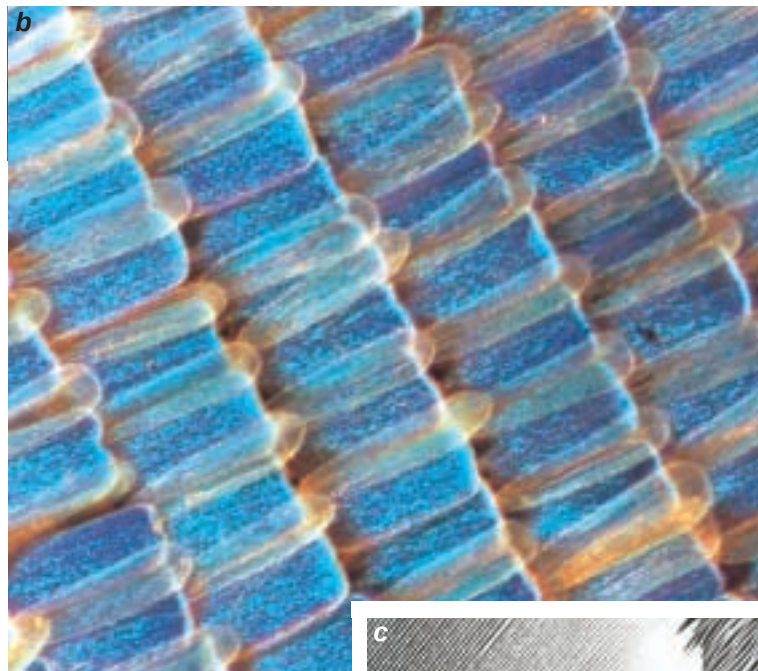
Les écailles structurales présentent, sur leur face supérieure, un réseau de stries longitudinales, parallèles à l'axe de l'écaille. La distance entre les stries est variable : de 500 nanomètres sur les écailles structurales de certains *Morphidae* (soit plus de 2 000 traits par millimètre) à plus de 4 micromètres sur celles des *Uraniidae*. Sur les écailles pigmentaires, la distance moyenne des stries est de l'ordre de deux micromètres. La hauteur des stries varie également d'une centaine de nanomètres à un micromètre.

Ces stries sont constituées d'un empilement de 6 à 12 lamelles de chitine, aplaties et légèrement arrondies à leur extrémité, et d'une épaisseur de l'ordre de 90 à 100 nanomètres. Les lamelles sont maintenues à distance constante les unes des autres par un réseau de microscopiques trabécules : chaque strie se comporte comme un ensemble de couches alternées d'air et de chitine, régulièrement espacées.

Reste le dernier échelon – moléculaire – de l'échelle : les longues chaînes de chitine assurant la rigidité de l'ensemble des structures et, parfois, les pigments qui, selon les espèces, sont répartis de façon homogène au sein même des structures ou agglomérés sous forme de petites granules ovoïdes, entre les stries.

2. UNE AILE de papillon *Morpho menelaus*, observée à différents grossissements, révèle l'origine du phénomène d'iridescence. À l'œil nu (a), sous une incidence donnée, l'aile apparaît bleue. Si l'on observe au microscope (b, le grossissement est égal à 100), on constate que la face dorsale des ailes est tapissée d'écailles iridescentes, qui forment un fond continu. Elles sont couvertes d'écailles de recouvrement transparentes, placées aux joints des précédentes. Observée au microscope électronique, une écaille présente des stries (1 800 stries par millimètre), qui forment un réseau régulier (c, le grossissement est égal à 1 000). L'observation de ces stries, au microscope électronique à balayage montre qu'elles sont constituées d'un empilement

de lamelles de chitine séparées par de l'air et soutenues par des trabécules (trabécules) microscopiques. Une strie contient en moyenne six lamelles (vue de profil, d, x 50 000). Une écaille entière se comporte comme un empilement régulier de couches de chitine (deux stries vues en coupe, e, x 30 000) : c'est la source principale de l'iridescence. À une échelle supérieure, les stries créent aussi un effet d'iridescence par diffraction, mais il est moins important que le précédent, car toutes les écailles ne sont pas rigoureusement identiques, et l'intensité du rayonnement réfléchi diminue.



Structure et couleur

Remontons maintenant un à un les barreaux de l'échelle en observant comment ils agissent sur la couleur. Dans le cas des écailles pigmentaires, la couleur est imposée par les pigments et elle est peu modifiée par les structures des autres échelons et par la disposition des écailles. Généralement, les pigments ne donnent guère d'effets d'iridescence.

Les couleurs structurales naissent à l'échelon des empilements de lamelles, qui forment une multicouche, où naissent des interférences. C'est la source principale de l'iridescence. Chez certaines espèces, comme les *Morpho*, les stries constituent aussi un réseau de diffraction par réflexion, qui donne lieu également à un effet d'iridescence, moins important que le précédent. Dans les deux cas, les épaisseurs

optiques des couches (de l'ordre de 100 nanomètres) ou le nombre de stries (de 1 500 à 2 000 par nanomètre) sont tels que les teintes obtenues sont à dominante bleue, avec des variations allant du pourpre au vert.

À chaque passage d'un échelon à l'échelon supérieur (les stries, les écailles, puis les ailes) l'intensité et la pureté du rayonnement réémis diminuent, parce que la lumière rencontre des écailles d'un autre type, ou que la structure des écailles change, ou enfin que leur arrangement sur l'aile varie.

Chez les *Morphidae*, les écailles structurales, généralement plates et constituant d'excellents miroirs, alternent avec des écailles de recouvrement, qui diffusent la lumière. Parfois, ces écailles sont atrophiées et ne diminuent pas l'éclat des écailles structurales. Au contraire, chez certaines espèces, les écailles de recouvrement cachent plus

de 80 pour cent de la surface des écailles structurales : l'ensemble a un aspect terne. Ainsi, le mieux étant parfois l'ennemi du bien, l'accumulation de structures susceptibles de donner naissance à un phénomène d'iridescence risque de brouiller l'effet et de donner un aspect mat à la structure.

Les mesures spectrales effectuées à l'échelle macroscopique sur des *Morphidae* et des *Uraniidae* révèlent d'importants effets d'iridescence, du pourpre au bleu-vert chez les premiers, du violet au vert-jaune chez les seconds. Toutefois, la pureté des rayonnements iridescents est faible. Ces deux familles de papillons comptent pourtant parmi les plus éclatantes, ce qui laisse bien augurer de l'aspect de tissus iridescents : la pureté des couleurs serait comparable à celle des papillons. Examinons maintenant quelles structures confèreraient l'iridescence à des fibres textiles.

La quantification des couleurs et de l'iridescence

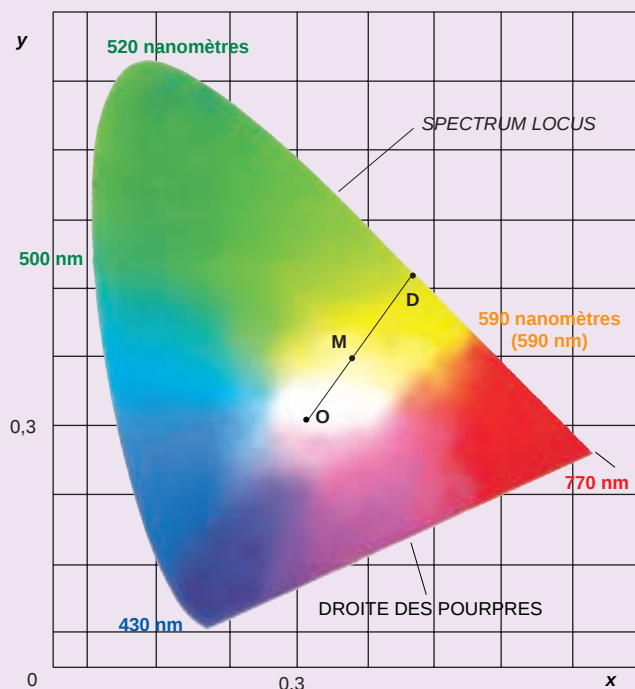
Pour définir le phénomène d'iridescence, on doit d'abord étalonner les couleurs de façon quantitative et objective, indépendamment de l'appréciation subjective d'un observateur. Les recherches en optique physiologique sur l'œil de l'observateur humain ont montré que la rétine contient trois types de cônes sensibles à la couleur, et que chaque type réagit à une gamme de longueurs d'onde particulière ; ils ont des spectres d'absorption spécifiques, qui engendrent trois types de réactions physiologiques différentes, mais simultanées.

Le modèle trichromatique qui en découle rend compte de la perception visuelle de la couleur grâce à trois grandeurs qui dérivent des réactions de ces trois types de cônes à une lumière donnée. Une table standard a été établie : elle met en relation chaque longueur d'onde monochromatique du spectre visible avec trois grandeurs qui caractérisent les réactions de l'œil d'un observateur «moyen» à ce rayonnement. Ces trois grandeurs peuvent être combinées de différentes façons.

Les coloristes des tissus et de l'industrie utilisent souvent l'ensemble x, y, Y , où x et y caractérisent la couleur, et Y sa luminosité. Dans cette représentation, le diagramme chromatique est l'ensemble des points de coordonnées x, y associés à une couleur visible par l'œil humain «moyen» avec une intensité Y donnée. Ce diagramme est délimité par une courbe nommée *spectrum locus*, qui est la représentation de la table standard établie pour les couleurs pures monochromatiques. Le point de coordonnées $(1/3 ; 1/3)$, au centre du diagramme, correspond au blanc. La dominante d'une teinte associée au point M de coordonnées x et y est donnée par la longueur d'onde du point situé à l'intersection de la droite OM avec la courbe du *spectrum locus*. La pureté de cette teinte est définie par le rapport des segments OM/OD . Ainsi le blanc est associé à une pureté nulle et la pureté 1 est obtenue pour les points situés sur le *spectrum locus*, c'est-à-dire pour les couleurs monochromatiques. Plus le point M se rapproche de O , plus

la pureté de la teinte associée est faible et plus la couleur paraît délavée.

La définition d'une couleur par ses coordonnées trichromatiques est très réductionniste et ne rend pas compte de tout ce



Le diagramme chromatique est l'ensemble des couleurs, d'intensité donnée, visibles par l'œil humain. Il est délimité par le *spectrum locus*, lieu des teintes pures monochromatiques. Le point $O (1/3 ; 1/3)$ correspond au blanc. La pureté de tout point M de ce diagramme est définie par le rapport des segments OM sur OD , où D est l'intersection de OM

La hiérarchie des structures évoquée pour les ailes d'un papillon existe également dans les tissus, pratiquement aux mêmes échelles : un tissu « standard » est composé de fils entrelacés à l'échelle millimétrique, et chaque fil, en général cylindrique, d'un diamètre de l'ordre d'une centaine de micromètres, résulte du filage d'une soixantaine de brins, eux aussi cylindriques et d'un diamètre de l'ordre de 10 micromètres. Ainsi existe-t-il des analogies entre les brins et les stries, les fils et les écailles, le tissu et les ailes. Or, nous avons montré que, chez les papillons, l'iridescence naît dans la structure en couches régulières des stries. Par conséquent, c'est sur le brin cylindrique d'un tissu que l'on a imaginé de créer un effet d'iridescence : on enrobe les brins d'une structure interférentielle, composée de couches minces dont l'épaisseur et l'indice optique sont appropriés. Cette

solution, fondée sur le phénomène d'interférences, semble aujourd'hui plus facilement réalisable qu'une solution qui reposerait sur le phénomène de diffraction.

Du brin au tissu

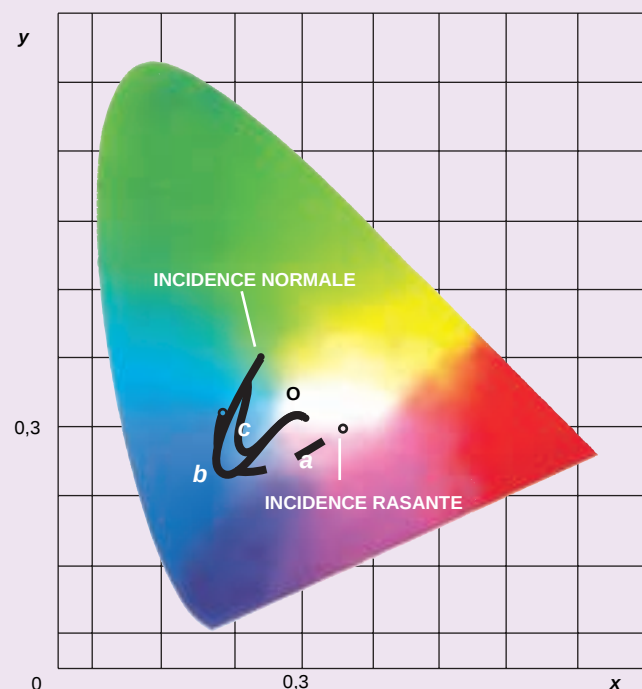
Pour prévoir l'aspect d'un tissu fabriqué avec des brins recouverts d'une tel revêtement, nous l'avons modélisé. On commence par étudier le problème sur une structure simplifiée qui se prête assez facilement à un calcul exact : on utilise une couche mince, à faces planes et parallèles, dont l'épaisseur est égale à 10 micromètres et qui joue le rôle du brin textile (voir la figure 3). On utilise alors des lois de l'optique des couches minces, comme on le fait pour la conception des traitements multicouches des lentilles des objectifs photographiques ou des lunettes, par exemple. Ici, nous

cherchons, avec un nombre minimal de couches minces, à obtenir un effet d'iridescence maximal, c'est-à-dire une variation de couleurs dans un domaine spectral aussi large que possible, lorsque l'angle d'observation varie de 0 degré (c'est l'incidence normale) à 90 degrés (c'est l'incidence rasante).

Les procédés de fabrication imposent une épaisseur minimale pour les dépôts (de l'ordre de 100 nanomètres) et la nature des matériaux utilisables, c'est-à-dire des indices optiques compris entre 1,4 et 1,7. On sait définir, par le calcul, les paramètres expérimentaux, tels l'épaisseur et l'indice optique des couches, qui donneront une iridescence centrée sur une couleur donnée. En jouant sur ces paramètres et sur le nombre de couches, on augmente ou on diminue à volonté la pureté de la teinte (son aspect « délavé »), ainsi que l'intensité de l'effet (la luminosité de la

qui fait la subtilité de la perception visuelle d'un effet coloré. Le paramètre principal, qui n'est pas pris en compte dans cette quantification, est la texture du matériau coloré qui peut modifier la perception de la couleur. Les caractéristiques psycho-sensorielles de l'observateur, sa culture, son éducation, certaines maladies, par exemple, modifient aussi la perception. Toutefois,

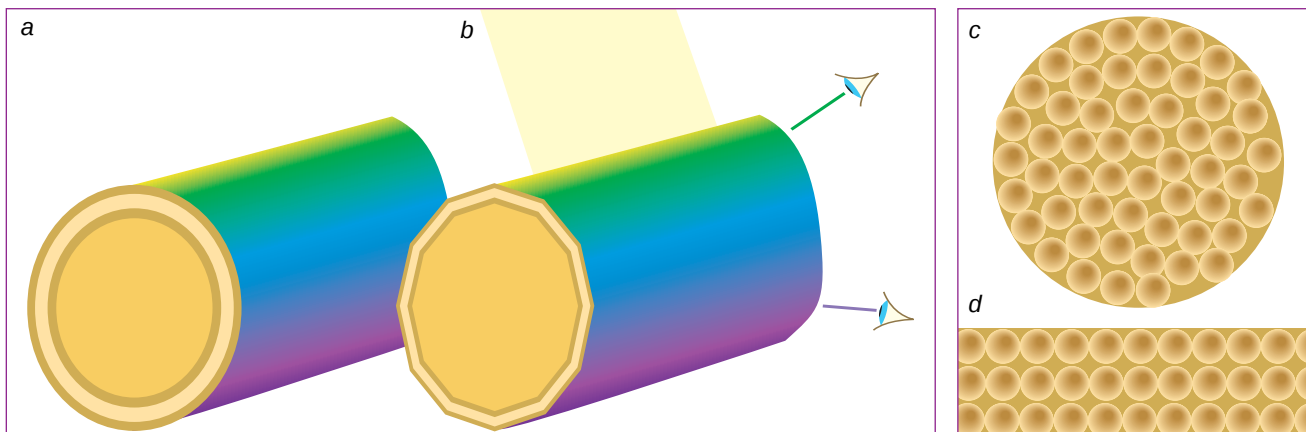
pour un matériau donné, ayant une texture donnée, cette qualification par trois variables est généralement suffisante pour assurer la reproductibilité industrielle d'une teinte.



avec le *spectrum locus*. À chaque point de la courbe d'iridescence d'une aile de papillon *Morpho menelaus* (a) correspond un angle d'incidence particulier, de l'incidence normale à l'incidence rasante. La courbe d'iridescence d'un modèle de tissu simplifié (b) et celle d'un modèle plus élaboré (c) sont proches de la courbe d'iridescence du papillon.

Les trois grandeurs colorimétriques x , y , z associées à chaque point du diagramme chromatique portent, de manière intégrée, l'information sur la répartition spectrale de la lumière qui a pénétré dans l'œil. Cette répartition est celle de la lumière qui a servi à éclairer le tissu étudié, modifiée par le spectre de réflexion du tissu : la couleur d'un tissu dépend de l'éclairage sous lequel on l'observe (lumière du jour ou lumière artificielle). Ainsi, le spectre de réflexion du tissu dépend de l'angle sous lequel il est éclairé ou observé. La variation de couleur qui en résulte constitue le phénomène d'iridescence que l'on peut ainsi étudier de façon quantitative. La courbe d'iridescence d'un objet est l'ensemble des couleurs de cet objet observé sous des incidences variables, de l'incidence normale à l'incidence rasante. Pour prévoir l'aspect d'un tissu dont la structure microscopique a été conçue pour ressembler à celle des ailes de papillons, on calcule sa courbe d'iridescence. Lorsque la structure est très simplifiée (b), le calcul prédit un effet d'iridescence qui s'étend du vert au bleu, de l'incidence normale à l'incidence rasante. La pureté de la teinte se dégrade aux angles d'observation élevés, pour tendre vers le blanc sous une incidence rasante. Toutefois, la luminosité des teintes observées reste satisfaisante, puisque l'intensité de la lumière réfléchie reste comprise entre 7 et 20 pour cent de l'intensité de lumière incidente.

Quand on considère une structure de tissu plus complexe, et plus proche de la réalité, on obtient une courbe d'iridescence (c) un peu plus réduite vers les grandes longueurs d'onde. Elle s'étend maintenant du vert-bleu au bleu. La pureté des teintes diminue un peu, notamment aux incidences moyennes, vers 45 degrés. En revanche, la luminosité du phénomène n'est pratiquement pas modifiée. Les courbes d'iridescence obtenues avec un tissu simplifié et avec un tissu plus proche de la réalité ressemblent à la courbe d'iridescence d'une aile de papillon *Morpho menelaus* (a) : la gamme des teintes et les puretés sont comparables.



3. LA MODÉLISATION des brins et des fils d'un tissu permet aux physiciens de prévoir quel traitement rend des fibres iridescentes. Dans le modèle le plus simple, le brin cylindrique est assimilé à une couche plane recouverte d'un empilement de couches minces planes et parallèles, qui constituent une structure interférentielle. On montre que l'on obtient un effet d'iridescence notable avec deux à trois couches d'indices de réfraction différents (a). On améliore ensuite le modèle en simulant le brin par un cylindre dont la section est un polygone de 72 côtés

recouverts des couches minces interférentielles. Le calcul montre que l'iridescence persiste : la couleur change en fonction de l'angle d'observation (b). Les fils tissés sont composés d'environ 64 brins analogues au précédent (c) ; la modélisation est alors reprise à l'échelle du fil pour s'assurer que la superposition des effets de plusieurs brins ne brouille pas l'iridescence. Une simplification consiste à assimiler chaque couche de brins à une lame à faces parallèles séparée de la suivante par une mince couche d'air (d). Les couleurs iridescentes persistent.

teinte). Étant donné les contraintes théoriques et les contraintes industrielles, on montre qu'une seule couche mince ne suffit pas à réaliser un effet d'iridescence notable, mais que l'empilement de deux ou trois couches, faisant alterner des indices faibles et élevés, donne l'effet recherché.

La modélisation des tissus iridescents

Ensuite, nous avons fait un calcul plus réaliste sur un brin cylindrique. Pour simplifier le calcul, la section du cylindre est assimilée à une section polygonale régulière de 72 côtés. Le calcul d'interférences des couches multiples est fait sur chacune de ces faces. Les faisceaux lumineux réfléchis par toutes les faces du brin sont ensuite sommés dans toutes les directions de réflexion (on suppose que l'éclairage du tissu est diffus et isotrope, c'est-à-dire qu'il est uniformément réparti en intensité dans toutes les directions de l'espace).

Ce calcul montre que l'effet d'iridescence persiste, même si la gamme spectrale se réduit un peu du côté des grandes longueurs d'onde et qu'elle s'étend plutôt du vert-bleu au violet. De surcroît, la pureté des teintes diminue aux incidences moyennes. En revanche, la luminosité du phénomène n'est quasiment pas modifiée par ce calcul plus conforme à la réalité.

Encore convient-il ensuite d'évaluer l'évolution du phénomène quand on passe de l'échelle du brin à celle du

fil, ce qui correspond – pour poursuivre notre analogie avec les papillons – au passage des stries aux écailles. À nouveau, on introduit des simplifications : on assimile le fil à un empilement régulier de huit couches de huit brins alignés. Ensuite, on assimile chaque couche de brins à une lame à faces parallèles, séparée de la suivante par une mince couche d'air, et l'on calcule l'intensité de tous les faisceaux lumineux réfléchis dans cet ensemble de huit couches. Cette simplification drastique sert à prévoir qualitativement le sens de l'évolution de la pureté et de la luminosité des couleurs, sachant que la gamme spectrale de l'iridescence est fixée par les propriétés du revêtement appliqué sur chaque brin. Dans cette configuration, la luminosité quadruple, mais la pureté est dégradée.

Se parera-t-on, un jour, de tissus qui ressembleraient aux ailes des papillons les plus chatoyants ? Le calcul prévoit que l'on obtiendrait un large domaine spectral d'iridescence, avec des teintes un peu « délavées », mais très lumineuses (l'intensité de la lumière réémise serait comprise entre 20 et 70 pour cent de celle de la lumière incidente). C'est bien ce que l'on observe sur les papillons quand on effectue des mesures optiques à l'échelle de l'aile, assemblage d'écailles. La dégradation de la pureté de la couleur quand on passe d'un brin cylindrique à une fibre, puis au tissu, serait comparable à celle que l'on obtient sur l'aile de papillon quand on passe de la strie à l'écaille, puis à l'aile.

La réalisation de fibres textiles iridescentes passe donc par le dépôt de deux ou trois couches minces interférentielles de matériaux adaptés sur les brins composant les fils. La souplesse de la technique interférentielle fournit diverses gammes de couleurs du vert au violet ou de l'orange au vert. L'obtention, par la technique interférentielle, d'une gamme d'iridescence dans le rouge semble plus difficile, et les papillons eux-mêmes ne présentent pas d'effets d'iridescence dans le rouge. Doit-on chercher à faire mieux que la nature ? Ce n'est peut-être pas nécessaire, puisque la sensibilité de l'œil humain dans le domaine spectral du rouge est inférieure à sa sensibilité aux couleurs du reste du spectre.

Serge BERTHIER est professeur de physique à l'Université Paris 7-Denis Diderot. Il mène ses recherches avec Jacques LAFAIT, directeur de recherches au CNRS, dans le Laboratoire d'optique des solides de l'Université Paris 6-Pierre et Marie Curie.

M. MAY et A.-M. CAZABAT, *Optique*, éditions Dunod, 1996.

R. SEVE, *Physique de la couleur*, éditions Masson, 1996.

P. CALLET, *Couleur-lumière, Couleur-matière*, éditions Diderot Multimedia, 1998.

S. BERTHIER, *La couleur des papillons*, éditions Springer France, 1999.

