

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

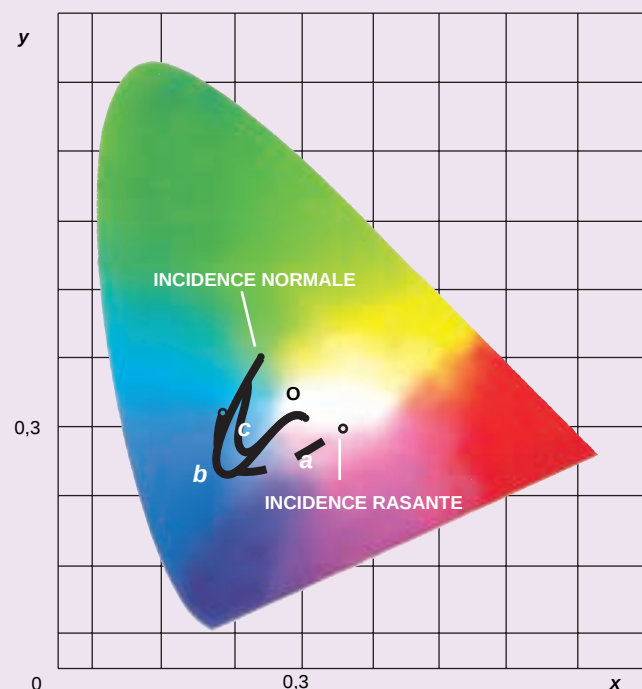
Pour prévoir l'aspect d'un tissu fabriqué avec des brins recouverts d'une tel revêtement, nous l'avons modélisé. On commence par étudier le problème sur une structure simplifiée qui se prête assez facilement à un calcul exact : on utilise une couche mince, à faces planes et parallèles, dont l'épaisseur 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,

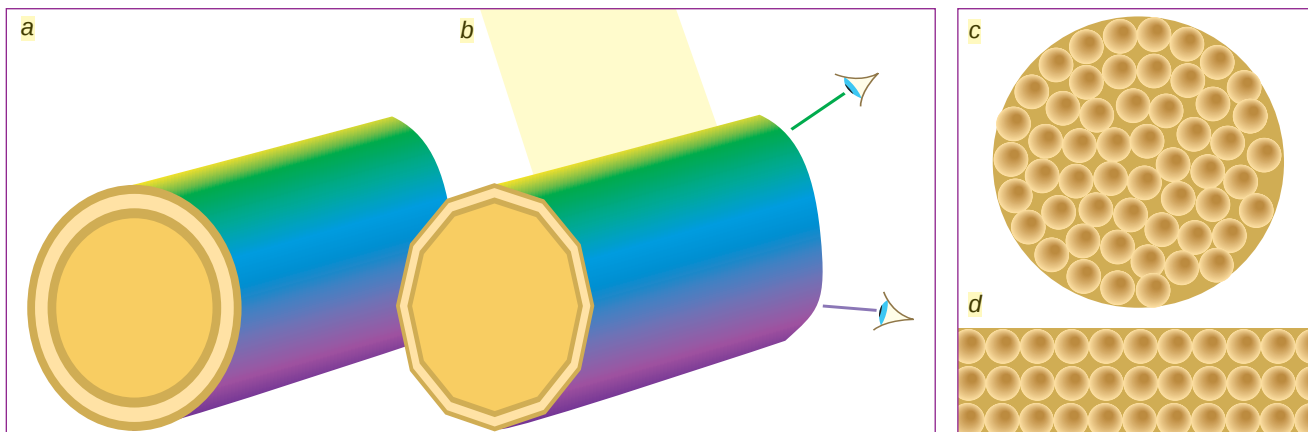
pour un matériau donné, ayant une texture donnée, cette qualification par trois variables est généralement suffisante pour assurer la reproductibilité industrielle d'une teinte.



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.