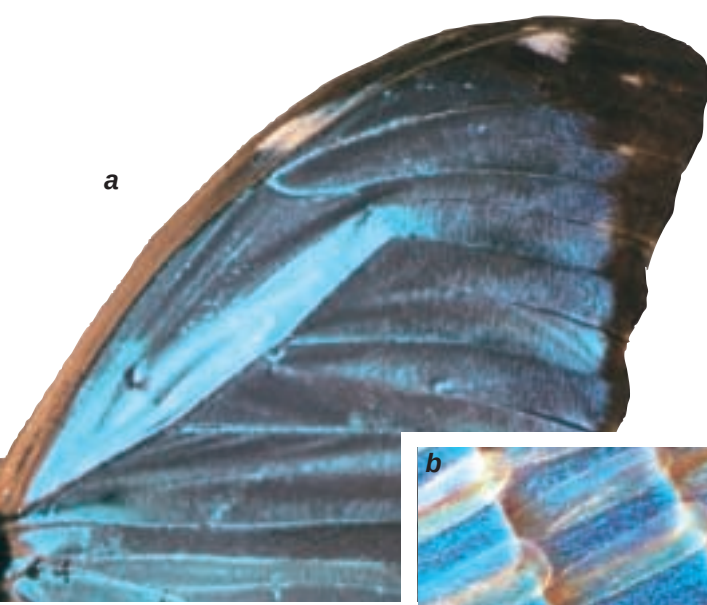




inférieur des écailles, face à la membrane alaire, est généralement lisse, ou un peu ondulé, tandis que le feuillet supérieur, plus épais, a un relief plus marqué.

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).

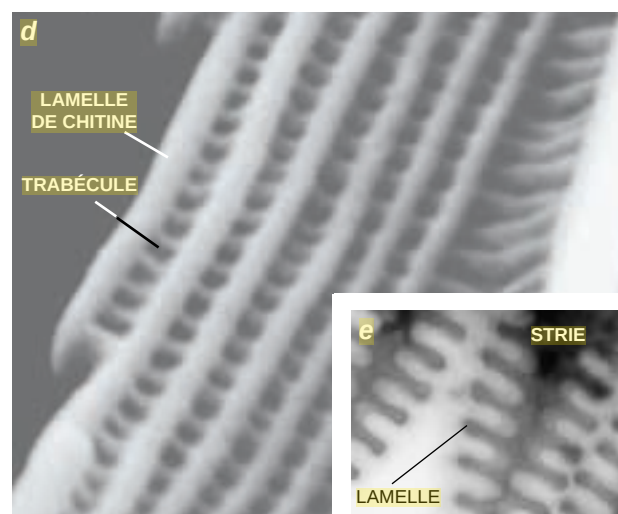
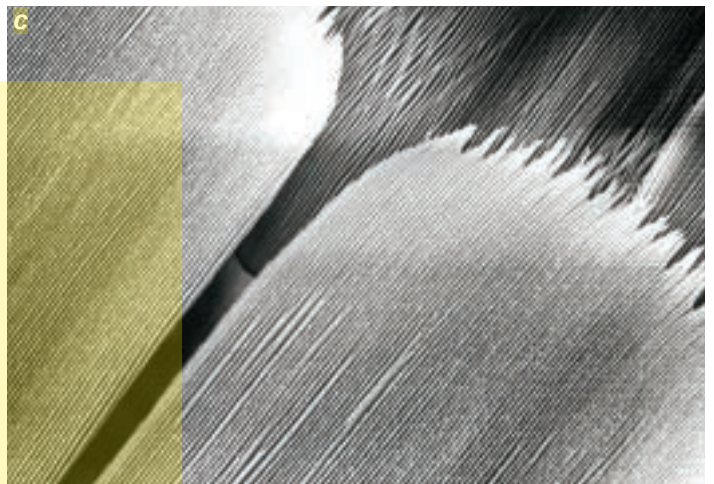
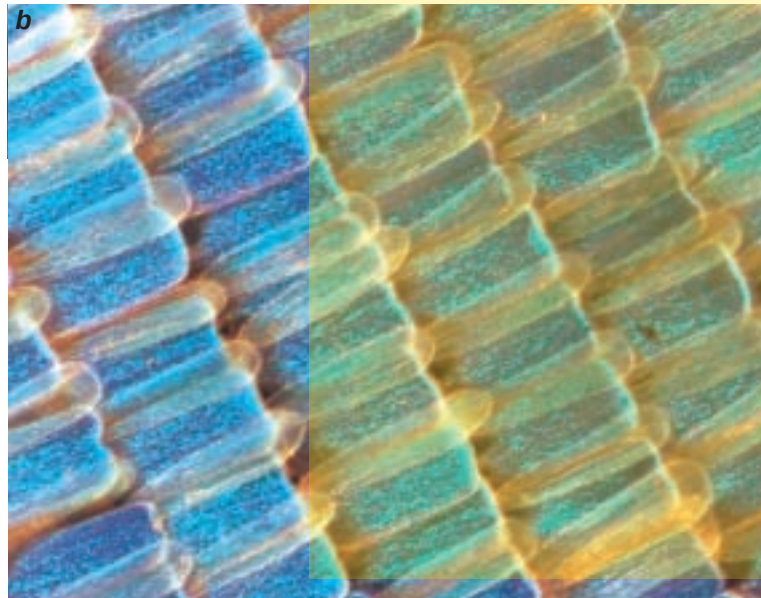
La couleur des écailles résulte soit des pigments qu'elles contiennent, soit de leur structure. Chez les papillons de la famille des *Uraniidae*, les écailles de fond contiennent des pigments et forment un écran noir, quasi continu, sur lequel se détachent les écailles de recouvrement, dites structurales (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

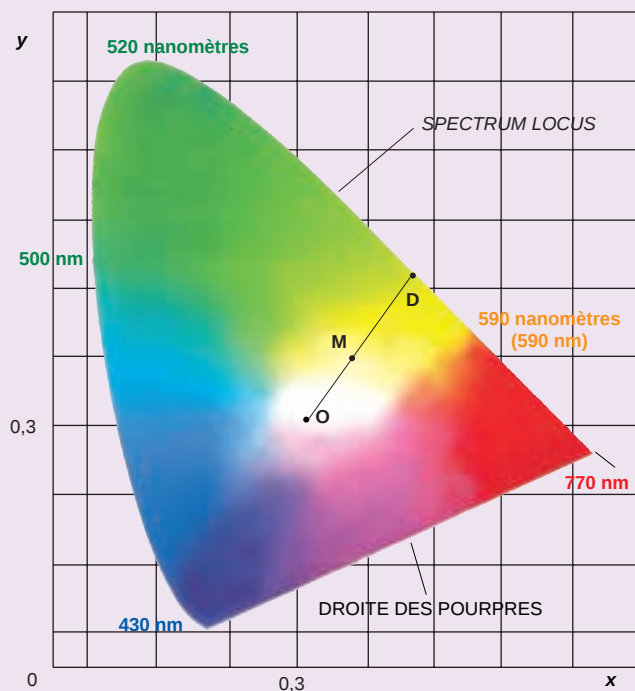
Pour définir le phénomène d'iridescence, on doit d'abord étalonner les couleurs de façon quantitative et objective, indépendamment de l'appréciation subjective d'un observateur. Les recherches en optique physiologique sur l'œil de l'observateur humain ont montré que la rétine contient trois types de 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