

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.

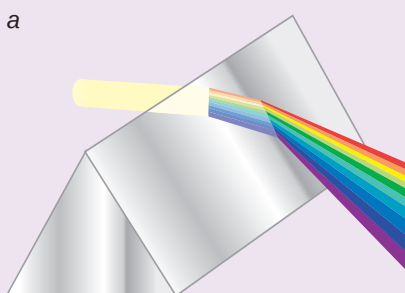
Quelles en sont les conséquences pour l'effet coloré? Quand une particule de taille donnée diffuse avec une efficacité maximale une longueur d'onde de même taille, elle diffuse aussi

(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,

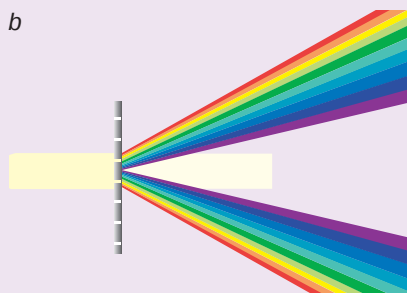
les petites particules ne diffusent pas les grandes longueurs d'onde, mais les bleus (de l'ordre de 0,4 micromètre). C'est pourquoi les couleurs obtenues par diffusion sont situées à l'extrémité bleue du spectre (et que le ciel est bleu). Sauf cas particulier, la diffusion, peu sensible à l'incidence,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

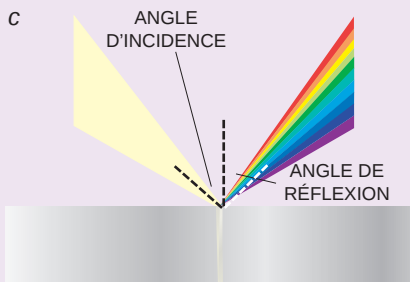
L'origine physique des couleurs



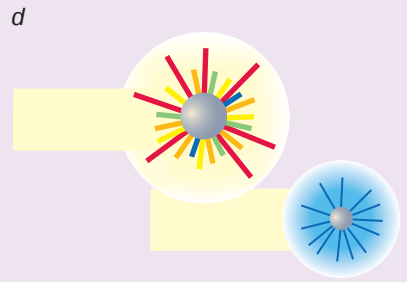
La réfraction par un prisme (a) est l'une des façons de séparer la lumière blanche en ses constituants. Elle n'est pas utilisée dans l'iridescence. La diffraction par un réseau (b) crée



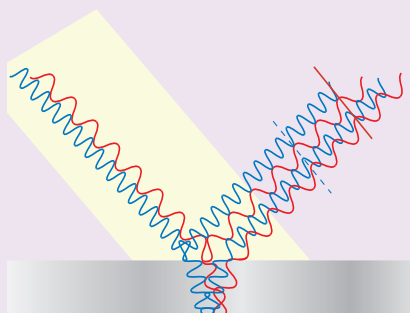
de l'iridescence : à chaque structure diffractante, la lumière est décomposée, et certains rayons interfèrent de façon constructive pour redonner les couleurs de l'arc-en-ciel.



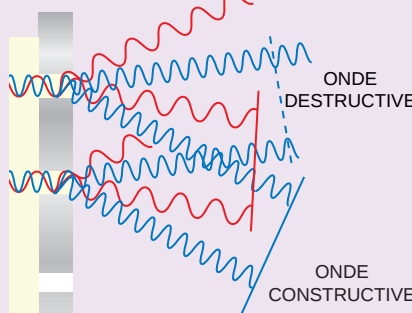
Les couches minces créent des phénomènes d'interférences (c) : certains rayons réfléchis et réfractés interfèrent de façon constructive pour créer de l'iridescence. La diffusion (d) est une autre façon de décomposer la lumière,



mais elle ne crée pas d'iridescence. Les grosses particules diffusent surtout le rouge, mais aussi les autres longueurs d'onde, ce qui donne un aspect blanc. Les petites particules ne diffusent que le bleu.



Les ondes lumineuses interagissent de façon constructive quand elles sont en phase (c'est-à-dire que leur minimums et leur maximums coïncident) : sur le schéma de gauche, c'est le cas du rayonnement rouge. Quand



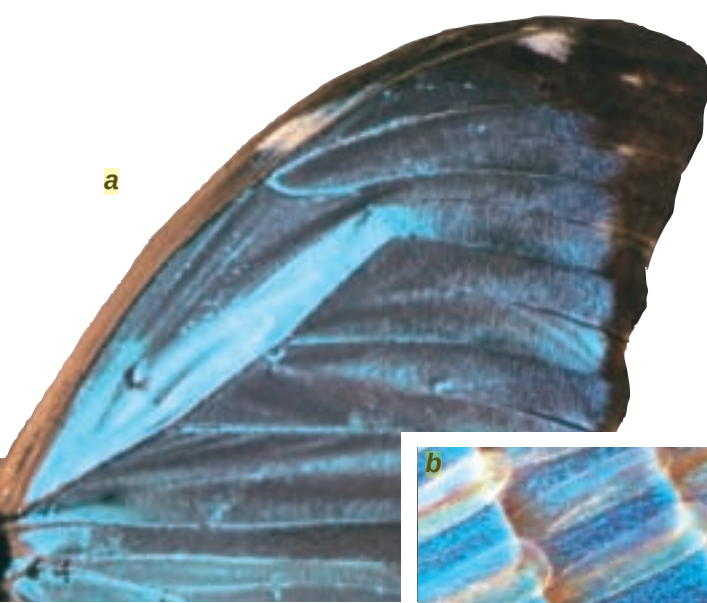
elles sont en opposition de phase (c'est-à-dire que les minimums des unes correspondent aux maximums des autres), la «couleur» s'éteint : c'est le cas du bleu sur le schéma de droite, en haut.

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

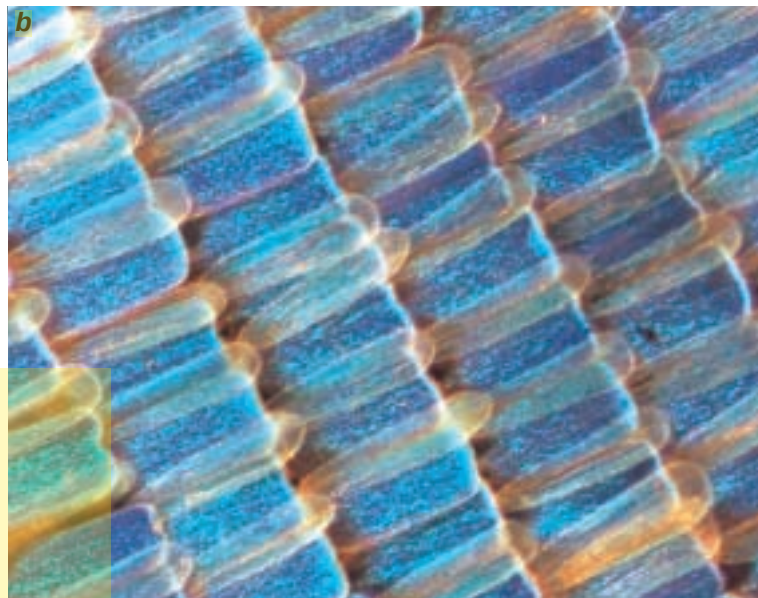


inférieur des écailles, face à la membrane alaire, est généralement lisse, ou un peu ondulé, tandis que le feuillet supérieur, plus épais, a un relief plus marqué.

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.

