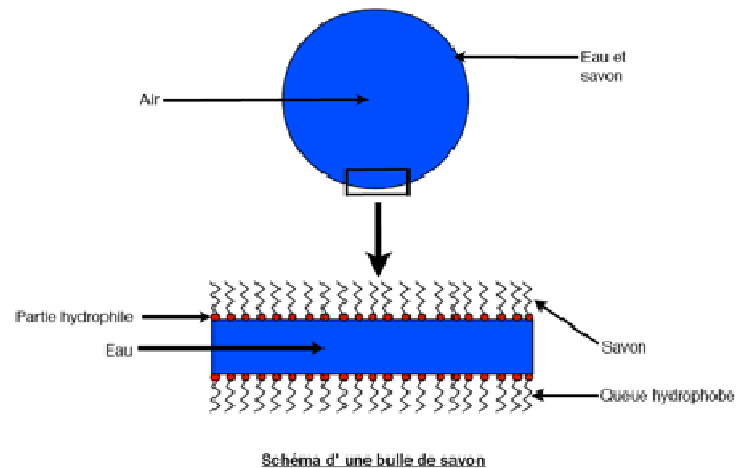


## Ondes et particules

### Les irisations dans les bulles de savon

Observez les belles couleurs d'une mousse de savon éclairée en lumière blanche...

Pour comprendre d'où elles proviennent, il faut d'abord préciser que la paroi d'une bulle de cette mousse est constituée d'un film d'eau emprisonné entre deux couches de molécules de savon. Les ondes lumineuses résultant de la réflexion de la lumière sur la face externe et sur la face interne du film interfèrent les unes avec les autres. Ce mécanisme produit des couleurs qualifiées de couleurs interférentielles ou *iridescence*. Un film d'huile sur l'eau donne lieu au même phénomène.



Regardons de plus près une couche mince d'eau dont l'épaisseur est de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde de la lumière (la centaine de nanomètres). En arrivant à sa surface, un faisceau de lumière blanche se divise en deux parties : l'une est réfléchiée, l'autre pénètre à l'intérieur du film. Or, ce second pinceau lumineux subit lui aussi une réflexion sur la face arrière du film, de sorte qu'après avoir retraversé l'eau en sens inverse, il rejoint avec un léger retard la première partie qui avait été réfléchiée. Les deux ondes lumineuses provenant d'une même onde initiale et ayant des intensités similaires, elles interfèrent alors, c'est-à-dire que semblables à des vagues qui se superposent, elles sont susceptibles de se renforcer ou de s'annihiler : elles se renforcent si leurs maxima se confondent (on parle d'interférences constructives) ou au contraire s'annihilent si un maximum de l'une correspond au minimum de l'autre (interférences destructives).

Le même phénomène de renforcement ou d'extinction touche toutes les ondes incidentes, quelle que soit leur provenance. Comme le montre la figure, le renforcement ou l'annihilation dans une direction donnée dépend de la longueur d'onde. Cette propriété explique pourquoi le film d'eau se pare de teintes bigarrées.

Isaac Newton avait remarqué un fait étrange : juste avant d'éclater, une bulle devient subitement noire l'espace d'un instant. Voyons pourquoi.

Une bulle éclate parce que ses parois se sont amincies par drainage de l'eau sous l'effet de la pesanteur. Lorsque l'épaisseur du film est très petite par rapport aux longueurs d'onde de la lumière visible, l'onde lumineuse réfléchiée par la face avant et celle réfléchiée par la face arrière s'annihilent par interférences destructives. En effet, la première se réfléchit sur une interface air-eau et la seconde sur une interface eau-air.



Or, la théorie des ondes électromagnétiques – auxquelles appartient la lumière – prévoit que ces ondes sont en opposition de phase : le maximum d'amplitude de l'une correspond au minimum d'amplitude de l'autre. Elles s'annulent donc mutuellement. Ce mécanisme est indépendant de la longueur d'onde, d'où la partie centrale noire des bulles observées sur la figure.

Il est important de retenir que les couleurs observées dépendent de l'angle d'observation et de l'orientation du film par rapport à la source de la lumière. C'est une caractéristique essentielle des couleurs interférentielles. Notons aussi que dans le cas d'une seule couche comme ici, la fraction de lumière réfléchiée donnant lieu à des interférences est faible (inférieure à 10 %). En revanche, le facteur de réflexion est considérablement augmenté lorsque plusieurs couches sont empilées.

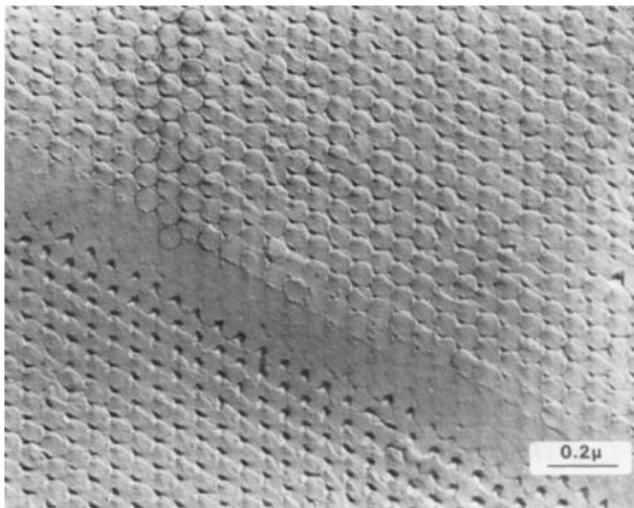
### Les couleurs des perles

Les « perles noires » sont des perles aux couleurs irisées provenant des lagunes de la Polynésie française. Malgré leur appellation, elles se parent de couleurs diverses, comme le vert bronze ou le violet aubergine. Selon une légende polynésienne, l'huître perlière dont elle est issue fut offerte à l'Homme par le dieu de la paix et de la fertilité, qui descendit sur Terre en chevauchant l'arc-en-ciel. Leur rareté (moins d'une huître perlière sur 15 000 contient une perle noire), et donc leur coût, a conduit à les qualifier de « perles des reines » et « reine des perles », car nombre de parures royales et impériales leur font une place de choix. Les coquilles qui les renferment offrent également de belles couleurs et étaient très recherchées au XIX<sup>ème</sup> siècle pour la fabrication de boutons et de montures d'éventails, par exemple.

Quel phénomène engendre ces couleurs irisées ? Un indice : elles changent selon l'angle d'observation. Elles sont donc d'origine interférentielle. En fait, elles proviennent de la structure spécifique du matériau dont sont faites les perles, la nacre. De nombreux mollusques produisent de la nacre qui recouvre l'intérieur de leur coquille. La nacre est une succession de couches très fines dont la nature est alternativement minérale et organique. Les couches minérales sont constituées d'aragonite ou de calcite (deux formes cristallines du carbonate de calcium), tandis que les couches organiques contiennent des protéines. L'épaisseur des couches est de 0,3 à 0,5  $\mu\text{m}$ , c'est-à-dire du même ordre de grandeur que les longueurs d'onde de la lumière. Celle-ci, en pénétrant successivement dans les diverses couches, subit des réflexions partielles sur les interfaces. Une partie des rayons réfléchis émergent de la surface et interfèrent,

produisant ces couleurs interférentielles. Comme pour les teintes créées par une structure en une couche, on emploie souvent les termes d'iridescence ou d'irisation pour désigner de telles couleurs.

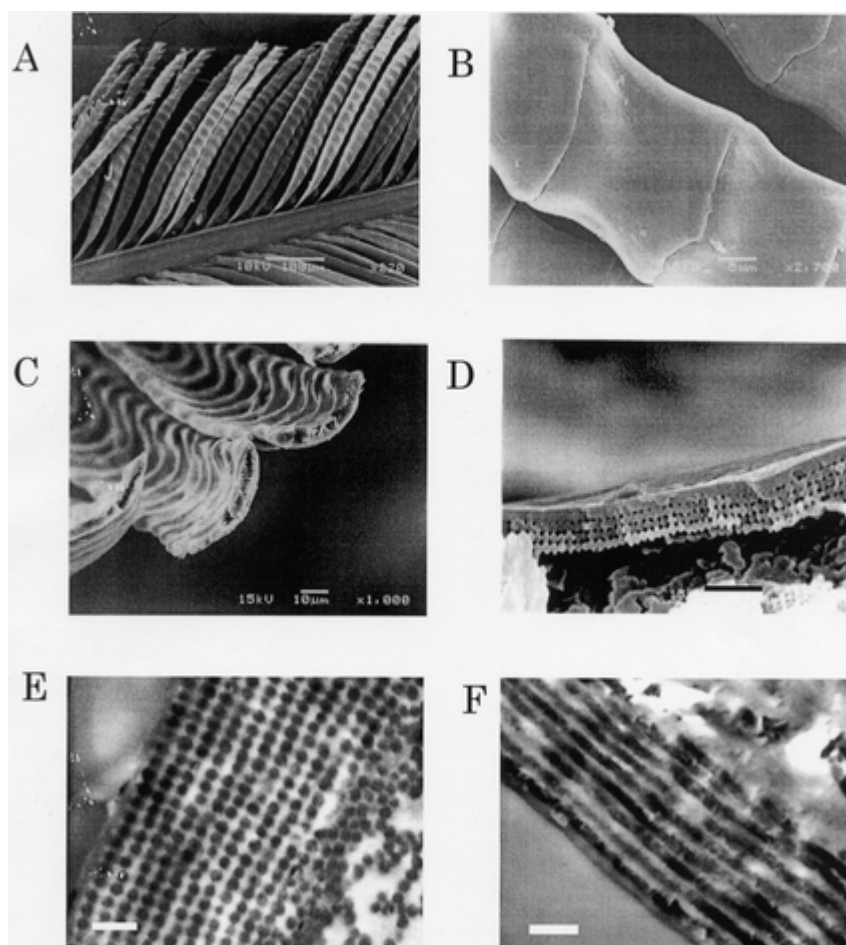
D'une façon très générale, lorsque la matière a une structure périodique avec une périodicité spatiale de l'ordre de grandeur des longueurs d'onde de la lumière, chaque élément de la microstructure renvoie séparément une onde lumineuse et les ondes issues des divers éléments interfèrent en produisant des couleurs interférentielles. La nacre a une structure périodique à une dimension, comme le mica. Il existe également des structures périodiques à deux ou trois dimensions, donnant lieu à des couleurs interférentielles impliquant le phénomène de diffraction - déviation des rayons lumineux qui survient notamment quand la lumière se fraie un chemin à travers des trous plus petits que sa longueur d'onde. Dans le cas à deux dimensions, on parle de réseaux de diffraction, car les ondes lumineuses diffractées par les éléments de la microstructure interfèrent entre elles. Il en est de même des structures à trois dimensions, appelées cristaux photoniques. Les ailes du papillon morpho et les plumes de paon sont de magnifiques exemples de microstructures à deux dimensions, alors que les opales ont une microstructure à trois dimensions.



Opale au microscope électronique (J.V. Sanders, Nature, 1964)

Si la nature produit des exemples variés de couleurs interférentielles, celles-ci se retrouvent également dans des objets du quotidien. Les irisations dont se couvrent les traitements antireflets des lunettes, certaines peintures automobiles ou certains tissus aux couleurs changeantes nous en donnent des exemples. Elles ne font alors qu'imiter ce qui se passe dans la nacre naturelle et sont dues à l'existence de plusieurs couches de matière qui créent des interférences lumineuses.

Enfin, les disques compacts exhibent également des couleurs irisées, mais les doivent à une microstructure périodique différente. Plus précisément, un CD est constitué d'une surface réfléchissante (en polycarbonate) gravée en spirale ; l'espacement - constant - entre les pistes de la spirale est de l'ordre du micromètre : il s'agit donc bien d'une structure périodique le long d'un rayon du disque, ce qui donne lieu à des phénomènes de diffraction et d'interférences.



Images de microscopie électronique à balayage et à transmission de plumes iridescentes de paon.

- A) Une barbe aux nombreuses barbules d'une plume bleue,
- B) plusieurs blocs de barbules au sein d'une plume bleue,
- C) section de coupe transverse d'une barbule de plume bleue,
- D) section de coupe transverse d'une barbule de plume jaune observée sous un plus fort grossissement,
- E) section de coupe transverse d'une barbule de plume bleue (transmission),
- F) section de coupe longitudinale d'une barbule de plume bleue.

La barre d'échelle est de 1 micron pour D et de 400nm pour E et F.

Source : Yoshioka, S. and Kinoshita, S., *Effect of macroscopic structure in iridescent color of the peacock feathers*, *Forma*, 17, 169–181, 2002.