

En observant la surface du lac, on peut voir en superposition un caillou posé sur le fond du lac et un oiseau dans le ciel. L'eau transmet la lumière issue du caillou jusqu'à la surface, et l'air achève la propagation jusqu'à l'œil. En revanche, pour l'image de l'oiseau, la surface du lac agit comme un miroir (voir la figure 1). Ainsi, au passage entre deux milieux transparents, la lumière se scinde en deux composantes, l'une transmise, l'autre réfléchie. La transparence d'un matériau n'est qu'une illusion, car, quelles que soient ses qualités de transparence, le matériau est observé au travers d'une interface qui altère toujours la transmission.

Ce phénomène résulte d'une réalité physique : la lumière ne se propage pas à la même vitesse dans tous les diélectriques transparents. Dans l'air comme dans le vide, la lumière se déplace à environ 300 000 kilomètres par seconde. Dans l'eau, dans le verre et dans un semi-conducteur, elle se propage respectivement 1,33 fois, 1,5 fois

et 3 à 4 fois moins vite. C'est d'ailleurs une manière de caractériser un milieu diélectrique : son indice optique, ou indice de réfraction, est le quotient de la vitesse de la lumière dans le vide et de la vitesse de la lumière dans le milieu (l'indice de l'eau est de 1,33, celui du verre est égal à 1,5, etc.). Nous verrons que nous pouvons mettre à profit ces différences d'indice pour construire un système où la réflexion est considérablement augmentée, notamment à l'aide de couches minces.

De la couche mince au cristal unidimensionnel

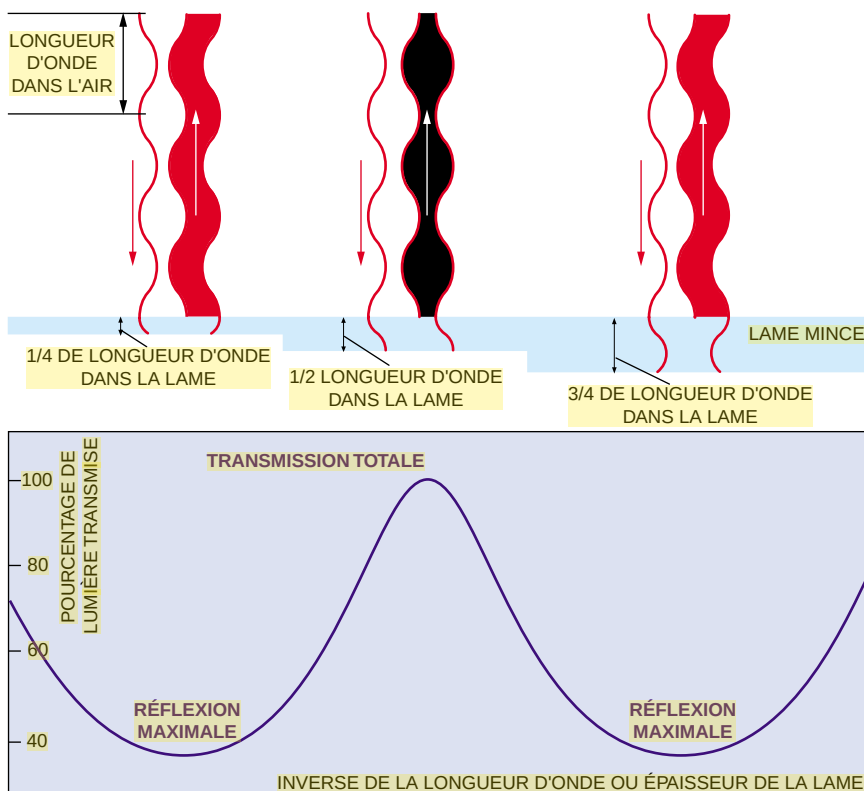
Une couche mince est une tranche de matériau diélectrique délimitée par deux plans parallèles qui la séparent de l'air. Éclairons une couche mince par une lumière d'incidence perpendiculaire à la surface de la couche. À l'interface supérieure, la lumière se scinde en deux composantes : une partie réfléchie et une autre transmise, qui

pénètre dans la couche. La composante transmise se sépare à nouveau à la frontière inférieure, et la nouvelle fraction réfléchie subit elle-même une réflexion et une transmission à son retour sur le plan supérieur. Le phénomène se poursuit indéfiniment, de sorte que la lumière initiale est séparée en une infinité de composantes.

Comme les vaguelettes à la surface de l'eau, la lumière est de nature ondulatoire. Poursuivons cette analogie par quelques observations. D'abord, quand on regarde un point à la surface de l'eau, on constate que le niveau en ce point oscille à une fréquence donnée. Ensuite, on note que les sommets (ou les creux) des vaguelettes sont séparés par une distance constante, la longueur d'onde. Enfin, on remarque que les vaguelettes se déplacent : l'onde se propage à une vitesse donnée. Dans le cas de la lumière, ces caractéristiques s'appliquent, même si l'onde ne se manifeste pas par une oscillation mécanique, mais par une vibration simultanée et coordonnée du champ électrique et du champ magnétique. La longueur d'onde λ est le quotient de la vitesse de propagation v et de la fréquence f .

Au changement de milieu diélectrique, la lumière conserve sa fréquence, mais, puisque sa vitesse est modifiée, sa longueur d'onde l'est également (la longueur d'onde dans le milieu est le quotient de la longueur d'onde dans le vide et de l'indice du milieu). Dans la lame diélectrique, quand les maximums des ondes coïncident, leur amplitude s'ajoute et l'interférence est constructive ; s'ils sont décalés, l'interférence est destructive. En choisissant l'épaisseur de la lame par rapport à la longueur d'onde utilisée, on obtient une interférence constructive ou destructive.

L'accord ou l'opposition de phase tient compte du changement de phase de la lumière lors du passage du milieu d'indice le plus faible vers le milieu d'indice le plus élevé : ceci correspond à un trajet virtuel de la lumière d'une demi-longueur d'onde. À l'inverse, quand la propagation se fait du milieu d'indice élevé vers celui d'indice faible, il n'y a pas de changement de phase. Remarquons maintenant qu'une onde qui pénètre perpendiculairement à la lame revient à l'interface supérieure après avoir parcouru une distance de deux fois l'épaisseur de la lame. Si cette distance est un multiple impair de la demi-longueur d'onde (autrement dit,



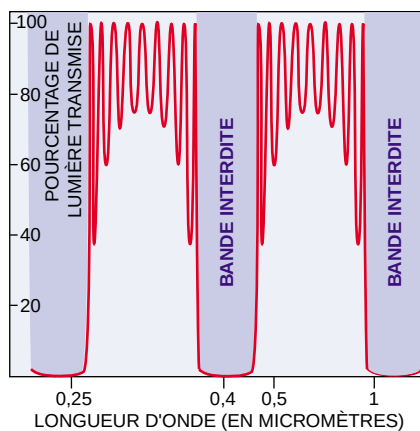
3. LA LUMIÈRE QUI ENTRE DANS UNE LAME MINCE subit des réflexions multiples. Les composantes ainsi créées interfèrent. La composante qui est réfléchie par la face inférieure parcourt une distance supplémentaire par rapport à la composante réfléchie par la face supérieure, égale à deux fois l'épaisseur de la lame. Lorsque cette dernière est un multiple impair du quart de la longueur d'onde, ces deux ondes réfléchies, qui sont en phase, interfèrent constructivement à l'extérieur et la réflexion est maximale (la transmission est minimale). À l'inverse, lorsque l'épaisseur de la lame est un multiple pair du quart de la longueur d'onde, les deux composantes sont déphasées et la réflexion est minimale (la transmission est maximale), comme l'atteste la courbe de transmission en fonction de l'épaisseur de la lame ou, ce qui revient au même, en fonction de l'inverse de la longueur d'onde à épaisseur fixée (en bas).

si l'épaisseur de lame est un multiple impair du quart de la longueur d'onde), il y aura accord de phase entre l'onde retour et la première onde réfléchie. L'interférence sera donc constructive et la réflexion de la lame sera maximale (voir la figure 3).

Ainsi, avec une seule lame diélectrique d'indice optique égal à trois, et aux longueurs d'onde où l'interférence est constructive, on obtient une réflexion de 60 pour cent de la lumière incidente, soit une transmission de 40 pour cent. Cette valeur est supérieure à celle de la réflexion par une seule interface air-diélectrique (environ 25 pour cent), mais elle ne permet pas de classer la lame comme un bon réflecteur. Comment augmenter encore la réflexion et réduire la transmission ? En empilant des couches minces à des distances régulières.

En première analyse, la transmission de deux couches sera égale au carré de la transmission d'une couche unique, puisque l'onde qui arrive sur la première couche subit deux transmissions successives avant de sortir de la seconde couche. La transmission avec deux couches devrait être égale à 16 pour cent ($0,4 \times 0,4$), à 6,4 pour cent avec trois couches et, finalement, à un pour cent avec cinq couches superposées.

En fait, cette analyse néglige les réflexions dans l'air qui sépare les couches. Ces réflexions sont profitables : il se crée dans les couches d'air un système de réflexions multiples, semblable à celui qui existe dans les couches de diélectrique. Lorsque l'épaisseur des couches d'air est aussi un multiple impair du quart de la longueur d'onde, les maximums de réflexion de ces couches coïncident avec ceux des couches diélectriques. Or, pour une lumière incidente donnée, la longueur d'onde dans l'air sera trois fois supérieure à celle dans le diélectrique (si l'indice optique est égal à trois). L'épaisseur des couches d'air devra, pour un effet optimal, être trois fois celle des couches diélectriques. Avec un empilement de cinq couches diélectriques séparées par quatre couches d'air d'épaisseur adéquate, on obtient un véritable dispositif réflecteur, puisque le coefficient de réflexion maximal atteint 99,99 pour cent dans une gamme de longueur d'onde où les interférences sont constructives en réflexion, ce qui correspond à des bandes interdites.



4. UN EMPILEMENT de cinq couches minces, d'indice $n = 3$ et d'épaisseur égale à un micromètre, séparées par de l'air, est un excellent réflecteur, puisque la transmission minimale est inférieure à 1 pour 10 000. La totalité de ce qui est perdu en transmission est réfléchi, de sorte que l'on obtient 99,99 pour cent de réflexion dans les bandes interdites.

Un tel empilement de couches diélectriques est nommé miroir de Bragg, en référence aux premières expériences sur la diffraction de rayons X menées au début du XX^e siècle. Les miroirs de Bragg sont vraiment efficaces lorsque l'éclairage est perpendiculaire aux couches, mais, pour une incidence oblique, les bandes interdites (en transmission) deviennent plus étroites et se décalent en longueur d'onde.

Les dimensions supérieures

En deux dimensions, on obtient une structure périodique aux propriétés équivalentes à celles des superpositions de couches en répartissant des tiges sur un plan selon un motif triangulaire. Comme dans le miroir de Bragg, cette structure est un assemblage périodique de deux diélectriques d'indices optiques différents : le matériau d'indice le plus faible est l'air et celui d'indice le plus élevé est un diélectrique agencé en cylindres parallèles de longueur supposée infinie. Cette structure a une symétrie hexagonale (voir la figure 5).

On peut aussi concevoir cette structure comme un empilement de grilles ou de rangées de tiges diélectriques, séparées par des couches d'air. On a ainsi «troué» les lames diélectriques de l'empilement de Bragg. L'analogie va plus loin : lorsque l'empilement de grilles est éclairé perpendiculairement par une onde lumineuse, les conditions de réflexion maximales sont obtenues lorsque les épaisseurs des grilles

et des couches d'air sont voisines du quart de la longueur d'onde.

En raison de la symétrie hexagonale de cette structure, la lumière se propage de manière identique dans les six directions hexagonales. Ainsi, lorsque la transmission est empêchée dans l'une des six directions, elle l'est suivant les autres. Le cristal bidimensionnel n'est pas encore une structure qui réfléchit la lumière dans toutes les directions, mais il s'en rapproche. Quelques remarques tempèrent pourtant cet optimisme. D'abord, les six directions équivalentes sont dans le plan orthogonal aux tiges : suivant les directions de propagation extérieures à ce plan, le cristal bidimensionnel ne présentera pas le même intérêt. Ensuite, la transmission dépend aussi ici d'une caractéristique de la lumière que nous n'avons pas encore mentionnée, la polarisation.

Comme l'onde à la surface de l'eau qui s'accompagne de déplacements verticaux du niveau de l'eau, l'onde de lumière est une onde transversale : les oscillations du champ électrique et celles du champ magnétique sont perpendiculaires à la direction de propagation de l'onde. Dans ce plan perpendiculaire, toutes les directions d'oscillation sont autorisées, mais, comme les oscillations des deux champs sont liées, l'oscillation d'un champ définit l'oscillation de l'autre. La direction d'oscillation du champ électrique est nommée direction de polarisation. Si cette direction est fixée, l'onde est polarisée de manière rectiligne. Deux ondes qui se propagent dans la même direction et à la même fréquence peuvent différer par la polarisation, et une bande de transmission interdite d'un cristal photonique pour une polarisation donnée ne sera pas forcément une bande interdite pour une autre polarisation. Dès que l'incidence est oblique, ou dès que le cristal est bidimensionnel, la polarisation joue un rôle, apportant une contrainte supplémentaire.

Au final, le cristal photonique bidimensionnel n'est pas encore le réflecteur parfait, efficace dans toutes les directions de propagation et quelle que soit la polarisation, mais c'est une étape importante pour toutes les applications à l'optique guidée (voir la figure 2). Dans ce domaine, qui est celui des diodes lasers et des autres composants utilisés aux extrémités des fibres optiques, la lumière est déjà guidée suivant un plan