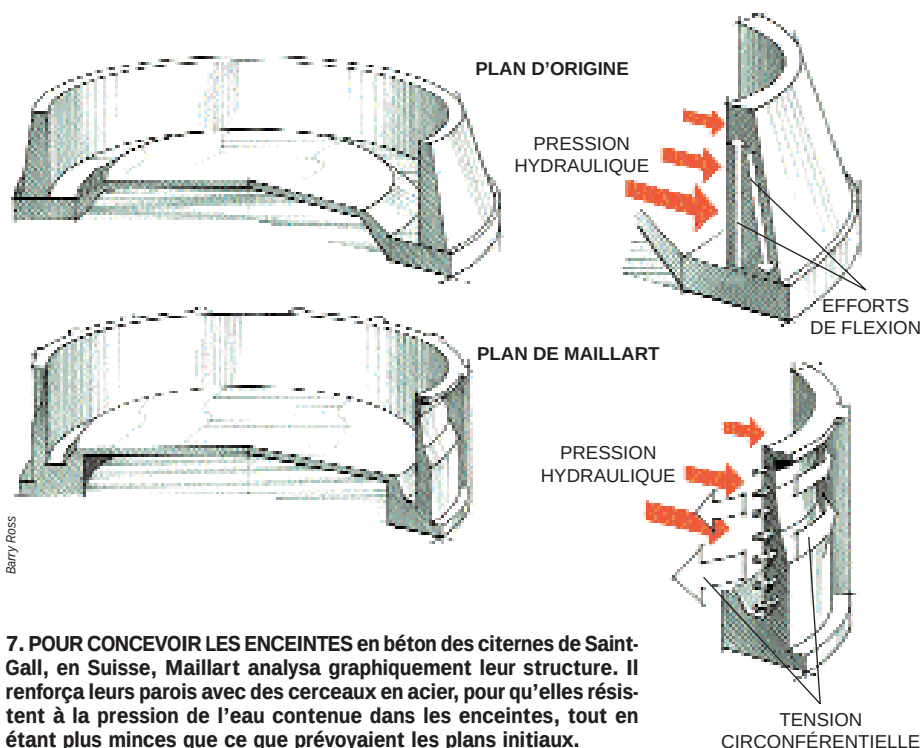


tablier. En effet, les moments de flexion sont importants en haut et en bas des parois transversales, mais presque nuls à mi-hauteur. Les traits horizontaux que présentent ces parois sont produits par les coffrages en bois qui ont servi à les fabriquer. L'ensemble du pont, avec ses traits et sa forme en X, rappelle le tableau de Paul Klee (un compatriote et contemporain de Maillart), intitulé *Doppelzelt* (double tente).

Les ingénieurs utilisent souvent les coffrages pour créer des motifs ou des textures sur les surfaces visibles des ouvrages. En 1939, Maillart reprend ce système pour le pont de Lachen, au bord du lac de Zurich : la surface de l'arc et les parois verticales des caissons qui le surmontent sont striées de traits horizontaux (voir la figure 6). Ces traits soulignent à la fois la finesse de l'arc et son épaississement près des articulations des culées.

Maillart meurt en 1940, après une vie indépendante. Pendant toute sa vie, il s'est préoccupé d'esthétique, sans jamais faire appel à un architecte, sauf au début de sa carrière, lorsqu'on l'y contraignait, afin de satisfaire les autorités communales. D'après lui, celles-ci avaient une «antipathie atavique» pour ses innovations. Il conçut seul tous ses grands ouvrages, méprisant les architectes qui voulaient donner aux ponts une allure «monumentale». En revanche, il partageait avec eux et avec quelques journalistes spécialisés un goût pour l'analyse esthétique des ouvrages d'art. D'ailleurs, les architectes furent les premiers à reconnaître l'intérêt des structures de Maillart, bien avant les ingénieurs en génie civil. En 1947, la galerie architecturale du Musée d'art moderne de New York consacra une grande exposition à ses travaux, alors que la plupart des ingénieurs américains n'avaient jamais entendu parler de lui.

Quelques années plus tard, les experts en génie civil comprirent enfin que les ponts de Maillart étaient des merveilles techniques. Aux États-Unis, après la Seconde Guerre mondiale, l'arc à caisson s'imposa pour les ponts en béton à moyenne ou longue portée. En Suisse, les professeurs de l'École polytechnique finirent par enseigner les concepts de Maillart. L'un des plus éminents adeptes de Maillart est l'ingénieur suisse Christian Men, qui a conçu plusieurs ponts arc raidi par le tablier, dès la fin des années 1950. Les ingé-



7. POUR CONCEVOIR LES ENCEINTES en béton des citernes de Saint-Gall, en Suisse, Maillart analysa graphiquement leur structure. Il renforça leurs parois avec des cerceaux en acier, pour qu'elles résistent à la pression de l'eau contenue dans les enceintes, tout en étant plus minces que ce que prévoyaient les plans initiaux.



8. LES COLONNES ÉVASÉES de l'immeuble Filter (construit par Maillart en 1912, à Rorschach, en Suisse), se fondent dans le plafond, c'est-à-dire dans les dalles de l'étage supérieur, qu'elles soutiennent à elles seules, sans poutres horizontales.

nieurs américains ne construisirent ce type de ponts qu'après 1970.

Avec du recul, on comprend que Maillart appartient à l'école de John Roebling, qui conçut le pont de Brooklyn, et de Gustave Eiffel, qui construisit également de nombreux ponts et

viaducs. La préoccupation première de ces trois hommes était l'esthétique : ils commençaient par dessiner la silhouette de leur ouvrage et, ensuite seulement, ils utilisaient des techniques d'analyse simples pour les rendre viables.

David BILLINGTON est professeur en ingénierie à l'Université de Princeton.

Sigfried GIEDION, *Space, Time and Architecture : The Growth of a New Tradition*, Harvard University Press, 1963.

Max BILL, *Robert Maillart : Bridges and*

Constructions, Artemis, 1969.

Elizabeth B. MOCK, *The Architecture of Bridges*, Ayer, 1972.

David P. BILLINGTON, *Robert Maillart : Builder, Designer and Artist*, Cambridge University Press, 1997.

La lumière en cage



JEAN-MICHEL LOURTIOZ • DANIEL MAYSTRE

Par une analogie entre la physique du solide et l'optique, les physiciens contrôlent la lumière en construisant des cristaux photoniques qui piègent, filtrent et véhiculent les photons. Ces cristaux serviront dans les communications optiques de demain.

Le miroir est le moyen le plus connu de contrôler la lumière : il réfléchit et donc réoriente les rayons lumineux issus d'une source ou d'un objet situé devant lui. Tous les rayons ? Non, car les objets rayonnent dans toutes les directions de l'espace, et seule une petite partie des rayons arrive sur le miroir. De surcroît, une fraction de la lumière incidente est absorbée et transformée en chaleur dans le miroir. Cette faible absorption n'affecte pas notre perception visuelle, mais elle diminue le rendement des dispositifs optiques. Les cristaux photoniques qui sont, comme nous le verrons, des miroirs particuliers, sont nés du besoin de mieux contrôler la lumière dans toutes les directions de l'espace : comment pouvons-nous optimiser les perfor-

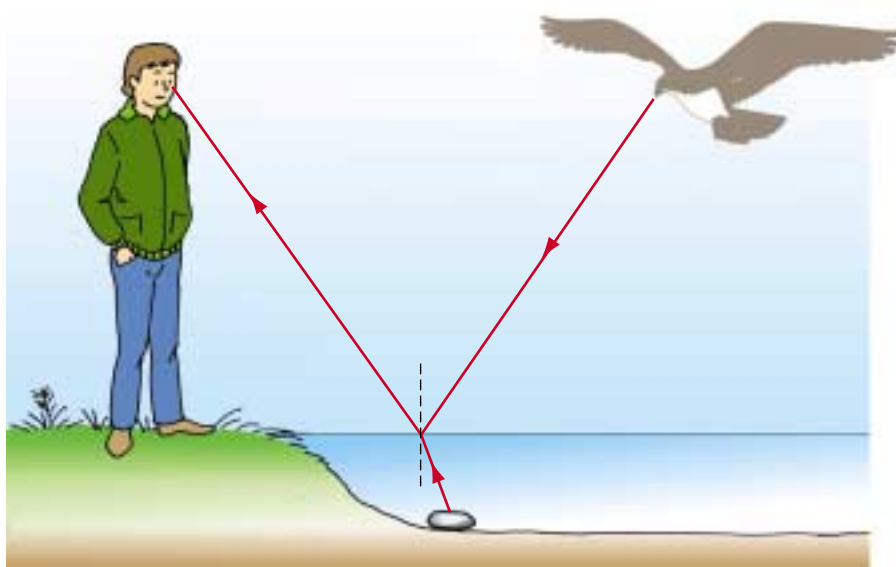
mances des sources optiques à l'état solide, telles les diodes lumineuses ? Comment pouvons-nous récupérer tous les photons issus d'un émetteur ?

Après la fabrication du premier cristal photonique, en 1991, cette motivation a perduré, mais ce n'est plus la seule. L'avènement des cristaux photoniques s'inscrit dans le processus plus général de la miniaturisation des composants optoélectroniques. Cette nouvelle manière de domestiquer la lumière permettrait de la guider sans perte le long de guides d'ondes orientables dans l'espace. Le physicien se prend alors à rêver de « processeurs » photoniques, où les électrons seraient remplacés par des photons, beaucoup plus rapides que les processeurs actuels.

Avant d'arriver à cette commande ultime de la lumière, notons l'analogie entre la propagation de la lumière et la propagation des électrons dans un cristal solide. Un cristal est un assemblage périodique d'atomes dans les trois dimensions. Dans un cristal de silicium pur, les quatre électrons de valence (ou de liaison) sont utilisés pour former les quatre liaisons covalentes du cristal périodique. Ainsi, il ne reste plus d'électrons pour la conduction. Pour obtenir un électron conducteur, il faut casser des liaisons, ce qui requiert de l'énergie. La bande de valence (les électrons sont liés aux atomes) et la bande de conduction sont séparées par cette énergie, qui définit une bande interdite. Un électron ne pourra pas se propager dans le cristal si son énergie est dans cette bande.

Existe-t-il pour les photons des bandes interdites du même type qui permettraient d'en contrôler la progression ? Considérons un assemblage tridimensionnel de matériaux transparents dont les caractéristiques optiques diffèrent. Les caractéristiques optiques, notamment l'indice optique qui détermine la vitesse de la lumière dans le milieu, jouent un rôle analogue pour les photons à celui du potentiel atomique pour les électrons, et l'on voit apparaître ces bandes interdites pour les photons, c'est-à-dire des gammes d'énergie où les photons ne peuvent pas se propager. N'étant pas non plus absorbée, puisque ces matériaux sont transparents, la lumière émise dans ces assemblages est réfléchie, quelle que soit sa direction d'incidence.

Cet assemblage est un cristal photonique, aussi nommé matériau à bande interdite photonique. Le lien entre cristal solide et cristal photonique résulte de l'analogie formelle



1. UNE SURFACE D'EAU, comme la surface d'un lac, altère le trajet des rayonnements lumineux. Un observateur peut voir en même temps un caillou dans l'eau et un oiseau dans le ciel. L'interface entre l'eau et l'air réfléchit l'image de l'oiseau et transmet celle du caillou. Les propriétés simultanées de réflexion et de transmission des interfaces permettent des interférences.

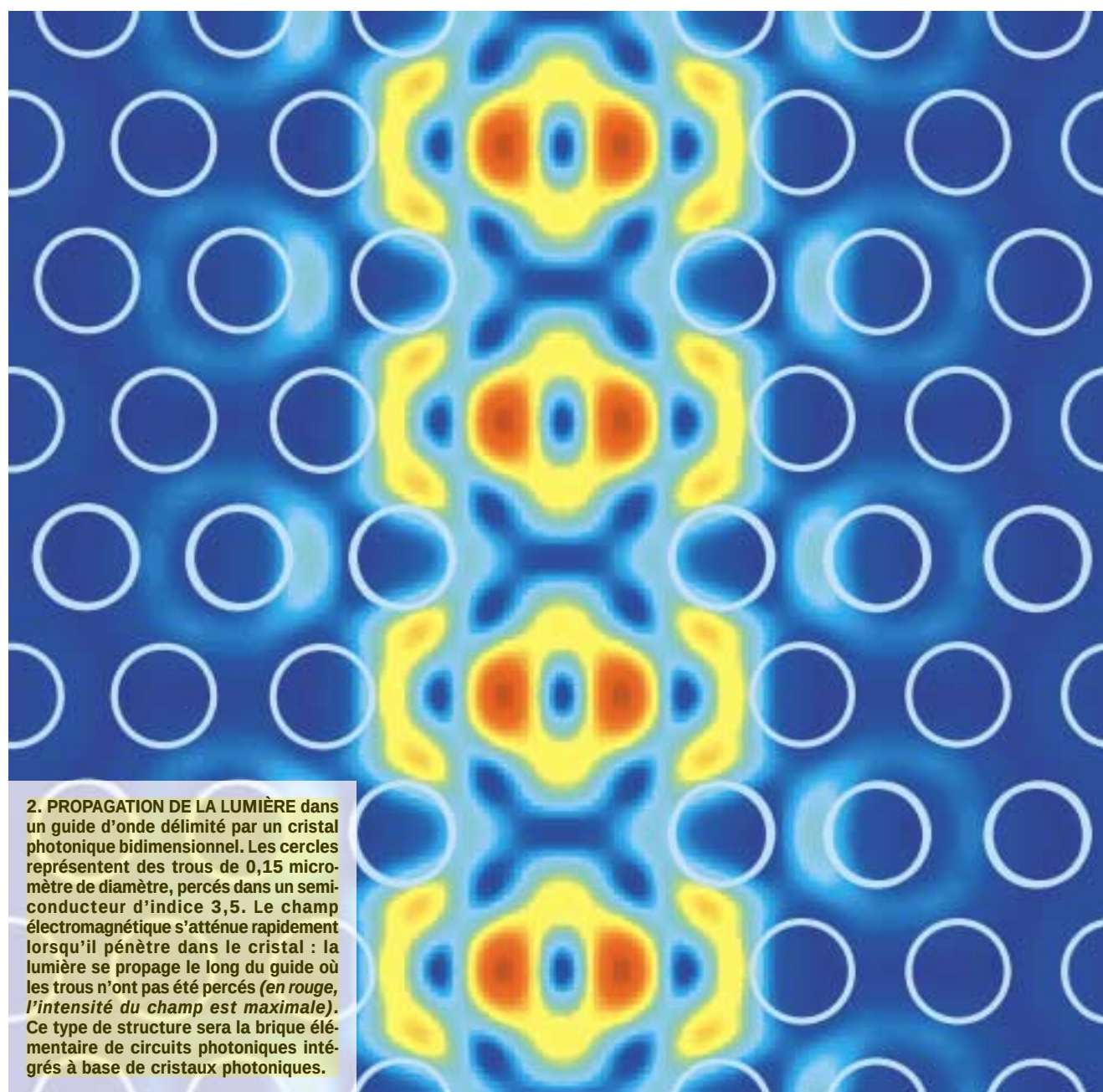
qui existe entre l'équation qui régit le comportement des électrons (l'équation de Schrödinger) et les équations de propagation de la lumière (les équations de Maxwell) : si l'on compare ces équations terme à terme, elles ont la même forme. À l'aube du XX^e siècle, les pionniers de la mécanique quantique cultivaient l'analogie inverse, montrant pour chaque particule la dualité de sa représentation corpusculaire et de son caractère ondulatoire. C'est sans doute un juste retour des choses si, à l'aube du XXI^e siècle, le savoir accumulé en physique du solide sert à contrôler le flux des ondes lumineuses.

De la transparence à l'opacité

Poursuivant l'analogie entre électrons et photons, nous examinerons comment un empilement de lames transparentes permet d'obtenir, à une dimension, un système à bande photonique interdite. Nous verrons ensuite que le cas unidimensionnel peut être étendu en deux et en trois dimensions. L'exemple de quelques cristaux photoniques nous permettra de mesurer la distance qui reste à franchir avant l'intégration de ces structures novatrices dans les outils de télécommunication.

Qu'est-ce qu'un matériau transparent ? La question peut paraître saugrenue, tant ces objets sont familiers : les lunettes sont d'usage courant. Les fibres de silice, qui transportent la lumière sur plusieurs kilomètres sans atténuation sont au cœur des télécommunications optiques.

Les matériaux transparents, l'eau, l'air, le verre ou les films en plastique, sont des diélectriques. En apparence, la lumière traverse ces matériaux sans rencontrer d'obstacles. Pourtant, il suffit de se placer sur la berge d'un lac calme pour constater que la présence d'un matériau diélectrique agit sur la propagation de la lumière.



Henri Benisty/École polytechnique

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

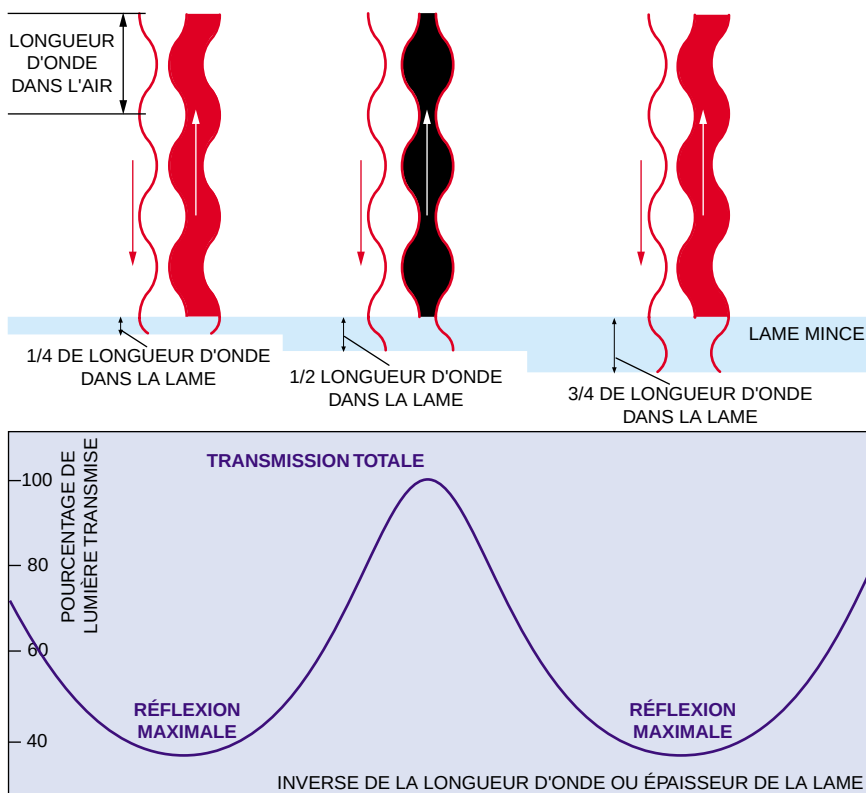
Une couche mince est une tranche de matériau diélectrique délimitée par deux plans parallèles qui la séparent de l'air. Éclairons une couche mince par une lumière d'incidence perpendiculaire à la surface de la couche. À l'interface supérieure, la lumière se scinde en deux composantes : une partie réfléchie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