

Onde et/ou particule, quelle est la nature de la lumière ?

Claude Fabre

Professeur
Université Pierre et Marie Curie - Laboratoire Kastler Brossel

La lumière se manifeste dans une grande quantité de phénomènes que l'homme a cherché depuis toujours à comprendre, c'est-à-dire à insérer dans un cadre rationnel et unifié. Ceux-ci sont multiformes et souvent complexes, et en déduire des informations sur la nature exacte de la lumière n'est pas une tâche aisée. Dans ce bref exposé, nous illustrerons notre propos à l'aide de deux phénomènes simples et familiers :

– lorsqu'on envoie un faisceau lumineux sur une surface de verre (figure 1), on observe qu'il se divise en un faisceau réfléchi **R** et un faisceau transmis **T**;

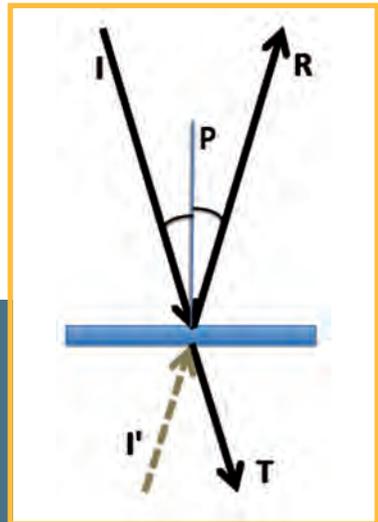
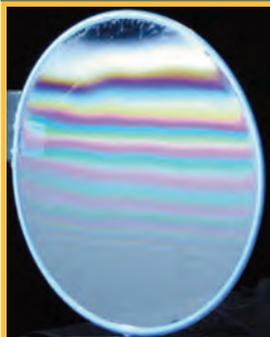


Figure 1

Faisceaux incident **I**, réfléchi **R** et transmis **T** par une surface de verre (on remarque que le faisceau incident selon **I'** aboutit aussi par réflexion au même faisceau **T** et par transmission au même faisceau **R**).



– lorsqu'on observe un film d'eau savonneuse éclairé en lumière blanche (figure 2), on voit sur la lumière réfléchie des bandes multicolores, appelées *irisations*.

Figure 2

Irisations apparaissant dans la lumière réfléchie par un film d'eau savonneuse (l'épaisseur du film est plus faible en haut de l'image).

Pour mieux caractériser ces phénomènes, il faut faire des mesures précises et dans des conditions bien contrôlées :

– dans le premier cas, on constate que le faisceau **I**, perpendiculaire **P** à la surface, et le faisceau réfléchi **R** sont dans un même plan et que **P** est la bissectrice de l'angle entre les faisceaux **I** et **R**. Cette loi mathématique de la réflexion est connue depuis l'Antiquité.

– dans le second cas, on remplace d'abord la surface de verre avec ses deux parois qui réfléchissent la lumière, peu contrôlable, par le film d'eau savonneuse (figure 3a). On observe des anneaux irisés, dont on peut mesurer les diamètres. C'est ce qu'a fait Newton au XVII^e siècle. Il en a déduit que quelque chose variait de manière périodique dans la propagation de la lumière, avec une période de 0,28 micromètre pour la lumière jaune.

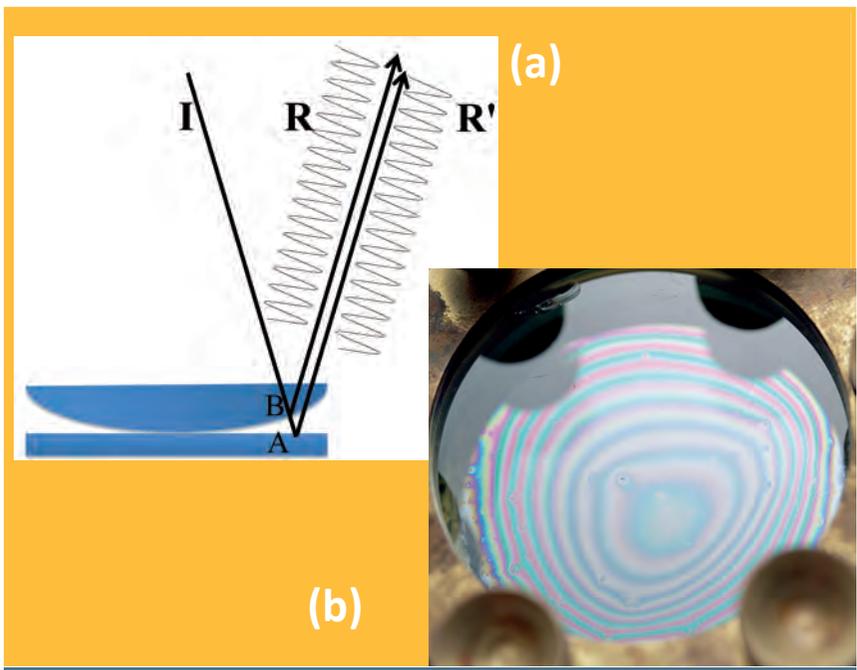


Figure 3

- (a) Un rayon lumineux incident **I** sur l'assemblage d'une lame de verre et d'une lentille convexe, en se réfléchissant en **A** et **B**, produit deux faisceaux **R** et **R'** dont les ondes interfèrent constructivement ou destructivement selon la position relative des sommets et des creux des deux ondes ;
- (b) lorsque la lumière incidente est blanche, on observe des anneaux irisés centrés sur le point de contact entre la lentille et la lame.

Cette phase de *mathématisation* des observations est essentielle pour le physicien : elle lui permet d'obtenir des lois physiques sous une forme mathématique à partir de laquelle il fera des prédictions et imaginera des applications. Mais bien souvent il cherche à aller au-delà des équations, et à imaginer des *images physiques* simples de ce qui se passe, basées sur des analogies avec d'autres phénomènes physiques :

– Ainsi, la réflexion d'une balle qui rebondit sur une surface dure, ou bien celle des vagues de la mer qui arrivent obliquement sur une jetée, obéissent à la même loi que la lumière. C'est ce qui a amené les physiciens au XVIII^e siècle à considérer la lumière soit comme un flux de petites particules se propageant dans le vide, soit comme une onde d'un milieu occupant tout l'espace. Newton conjecturait par exemple que la lumière était formée de petites particules qui excitent des ondes dans la matière, un peu à la manière d'un caillou lancé dans une mare.

– Les irisations observées sur la figure 3a peuvent s'expliquer par une image ondulatoire de la lumière : l'onde lumineuse incidente, en se réfléchissant en A et B sur les deux surfaces de verre, donne naissance à deux ondes réfléchies dont les ondulations sont décalées l'une par rapport à l'autre. Ces ondes se renforcent quand les sommets de leurs ondulations coïncident, et s'annulent quand le sommet de l'une tombe dans le creux de l'autre. Le caractère constructif ou destructif de ce phénomène d'interférence dépend de la longueur d'onde de l'ondulation, c'est-à-dire de la couleur de la lumière, d'où les irisations. Par contre, il n'y a pas d'explication *corpusculaire* de ce phénomène d'interférence. C'est une des raisons pour lesquelles la conception ondulatoire de la lumière a fini par s'imposer.

Au XIX^e siècle, la lumière apparaît incontestablement comme une onde, mais une onde de quoi ? La réponse à cette question est venue d'un tout autre domaine de la physique, celui des phénomènes électriques et magnétiques, où s'accumulaient observations expérimentales et lois physiques mathématiques empiriques. Peu à peu émerge un concept révolutionnaire permettant de se faire des images simples et claires de ces phénomènes : celui de champ, grandeur physique qui existe en tout point de l'espace en dehors de tout support matériel et qui caractérise en ce point l'effet électrique ou magnétique. James Clerk Maxwell parvient à déterminer les équations à laquelle obéissent ces champs. Il trouve comme solution à ses équations des ondes de champ électrique et magnétique, dont la vitesse de propagation s'avère très proche de celle de la lumière, ce qui le conduit à affirmer, avec une modestie très anglo-saxonne : « *Nous pouvons difficilement éviter l'inférence que la lumière consiste en des ondulations transverses du même milieu qui est la cause des phénomènes électriques et magnétiques.* »

À la fin du XIX^e siècle, l'hypothèse que la lumière est une onde électromagnétique est solidement étayée, car elle permet d'expliquer un nombre extrêmement grand de phénomènes lumineux. Quelques phénomènes peinent cependant à rentrer dans ce cadre : c'est le cas en particulier de la détermination de la couleur de la lumière émise par les corps chauffés. Pour rendre compte de la loi empirique donnant cette couleur, Max Planck est amené à supposer que les échanges d'énergie entre le corps chauffé et la lumière se font par paquets élémentaires, qu'il appelle *quanta*. Einstein va plus loin et montre que la lumière émise par le corps chauffé se comporte comme un ensemble de particules ponctuelles, appelées plus tard *photons*. Il émet l'hypothèse que *« l'énergie de la lumière émise par une source ponctuelle n'est pas continûment distribuée dans l'espace, mais consiste en un nombre fini de quanta d'énergie qui sont localisés en des points de l'espace, qui se déplacent sans se diviser, et qui ne peuvent être produits et absorbés qu'en unités complètes »*.

Comment rendre cette nouvelle conception corpusculaire de la lumière compatible avec les phénomènes d'interférences lumineuses, qui sont en revanche parfaitement explicables en termes d'ondes électromagnétiques ? Il faut pour cela faire coexister images corpusculaire et ondulatoire : on montre que le lien qui existe entre le photon et l'onde électromagnétique est en fait un lien probabiliste :

– Revenons à l'expérience simple de la figure 1 où le faisceau incident se divise en un faisceau réfléchi et un faisceau transmis et baissions fortement l'intensité incidente, à un point tel que les photons arrivent dans le faisceau **I** un par un sur la surface : le photon, qui ne peut pas se diviser, ne peut à la fois être partiellement réfléchi et partiellement transmis. Il *choisit* aléatoirement entre ces deux possibilités exclusives, et la physique est impuissante à prédire pour un photon donné s'il va être transmis ou réfléchi. Par contre les physiciens peuvent déterminer la probabilité de transmission ou de réflexion pour le photon : elle coïncide avec les coefficients de réflexion et de transmission calculés grâce aux équations de Maxwell pour une onde électromagnétique incidente. En outre, les directions de réflexion et de transmission du photon sont celles des ondes réfléchie (**faisceau R**) et transmise (**faisceau T**) : l'onde *guide* en quelque sorte le photon.

– Considérons à nouveau les expériences d'interférence de la figure 3, et envoyons un photon incident unique sur les deux surfaces de verre : on constate que lorsque le photon arrive à certain endroits du dispositif (là où se produit une interférence destructive entre les deux ondes réfléchies), il a une probabilité pratiquement nulle d'être réfléchi, alors qu'on sait qu'il a une forte probabilité d'être réfléchi par une seule des surfaces :

on est amené à penser que, si le photon unique est sensible au phénomène d'interférence, c'est parce qu'il est réfléchi à la fois par les deux surfaces, et que les probabilités d'être réfléchi par chacune d'elles interfèrent destructivement. Si on répète une expérience d'interférence avec un photon unique un grand nombre de fois, on verra les photons réfléchis s'accumuler dans les parties brillantes des franges d'interférence, alors qu'ils seront rares dans les parties sombres (figure 4).

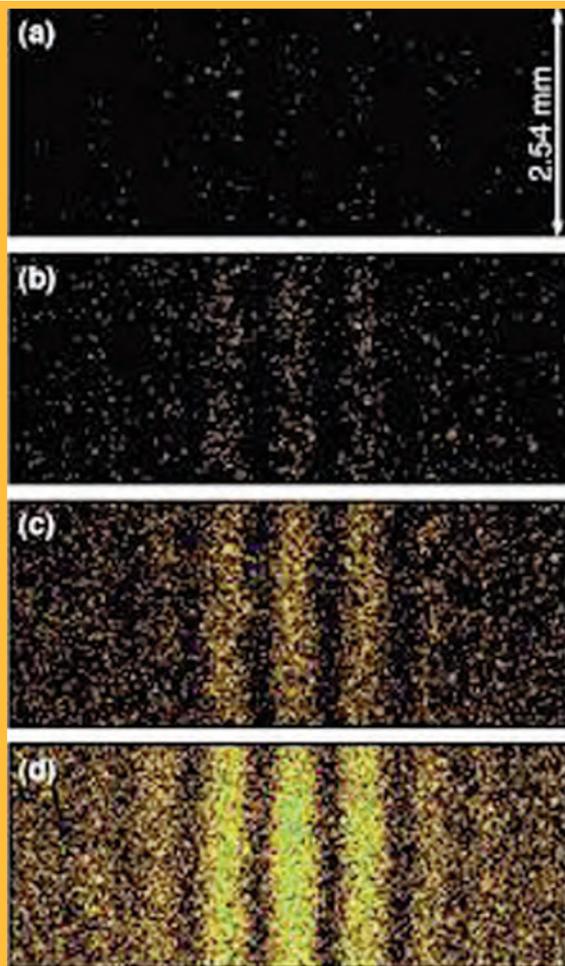


Figure 4

Si on utilise des photons arrivant un par un dans un dispositif interférentiel, on retrouve les franges d'interférence par accumulation progressive des photons – temps de pose de (a) à (d): 10 s, 100 s, 500 s et 2000 s.

© LPQM ENS Cachan

Revenons maintenant à la figure 1. Il existe en fait une autre direction **I'** pour la lumière incidente qui aboutit par réflexion et transmission aux mêmes faisceaux **T** et **R** que ceux que nous avons déjà considérés. Envoyons simultanément un photon isolé dans la direction **I** et un photon isolé dans la direction **I'** : si les photons se comportent comme des particules classiques ils ont une probabilité non nulle d'être tous deux transmis ou bien tous deux réfléchis par la surface et donc de sortir l'un sur **R** et l'autre sur **T**. Or l'expérience réalisée en 1985 par Hong, Ou et Mandel montre que les deux photons se regroupent et se retrouvent tous les deux soit sur **R** soit sur **T**. Il faut donc admettre que la lumière ne se comporte pas dans ce dispositif comme une assemblée de particules classiques guidées par l'onde électromagnétique et qu'elle n'est ni onde classique, ni particule classique, mais un objet quantique à part entière, sans équivalent dans la physique classique.

Les physiciens du XXI^e siècle étudient des phénomènes lumineux de plus en plus *non classiques*, que les équations mathématiques de la théorie quantique de la lumière permettent de prédire avec une grande précision. À la question *Quelle est la nature de la lumière ?* on peut donc faire la réponse *mathématique* suivante : *c'est un objet physique qui obéit aux équations de la théorie quantique des champs*. Mais, nous l'avons vu, au delà des équations, il y a les représentations physiques que les physiciens élaborent sur la nature de la lumière. Elles sont souvent simplificatrices, mais elles leur servent d'aide intuitive pour imaginer des phénomènes lumineux quantiques toujours plus étranges.

C. F.

Pour en savoir plus :

Sous la direction de Gilbert PIETRYK, *Panorama de la physique*, Belin (2007)

Claude FABRE, Charles ANTOINE, Nicolas TREPS, *Introduction à la physique moderne : relativité et physique quantique*, Dunod (2015)

La lumière dans tous ses états, Dossier Pour La Science (octobre/décembre 2006)