

I. Prologue

On avait cru longtemps que la mécanique pourrait fournir l'explication ultime de tous les phénomènes physiques et servir de modèle à toutes les autres connaissances. Au cours du XIX^e siècle cependant, avec le développement rapide de l'électromagnétisme et de la thermodynamique, le doute s'installe sur sa capacité à expliquer la propagation de la lumière et l'irréversibilité des processus usuels de la vie courante¹. À la fin du siècle, il faut même se résoudre à admettre son impuissance à résoudre certains de ses propres problèmes tels celui « des trois corps » et celui du mouvement de Mercure². Avec Kirchhoff, Hertz, Mach ou Boltzmann, le recul de deux siècles permet une critique stimulante de ses fondements.

Les interférences lumineuses

Dans son *Traité de la lumière*, publié en 1690, donc trois ans après les *Principes Mathématiques de la Philosophie Naturelle* de Newton,

-
1. « L'opinion qui fait de la mécanique la base fondamentale de toutes les autres branches de la physique et suivant laquelle tous les phénomènes physiques doivent recevoir une explication mécanique est selon moi un préjugé. » (E. Mach, *La mécanique, exposé historique et critique de son développement*, Hermann, 1904, p. 465) ; sur le doute envers la croyance du « tout mécanique » : « [Nous sommes maintenant conduits à intégrer] au domaine de la mécanique non seulement nos organes corporels, mais encore notre vie spirituelle, l'art, la science, nos perceptions, nos sentiments. Mais la mécanique n'est-elle pas trop mécanique pour traduire toutes ces choses ? » (Boltzmann, conférence prononcée à Munich en 1899, in Dugas, *La théorie physique au sens de Boltzmann*, éd. de Griffon, Neuchâtel, 1959, p. 117).
 2. Voir : J.-M. Vigoureux, *La quête d'Einstein*, Ellipses, 2005.

Christian Huygens considérait la lumière comme une onde : « *La lumière, écrivait-il, consiste dans le mouvement d'une certaine matière qui se trouve entre nous et les corps lumineux... Le mouvement successif de la lumière s'étend par des ondes sphériques dans l'éther ainsi que le mouvement du son dans l'air.* » Étouffée dans l'œuf par la gloire de Newton qui estimait au contraire que la lumière était constituée de corpuscules, cette première « théorie des ondulations » trouve un regain inattendu au début du XIX^e siècle : cent ans après Huygens, les expériences de Thomas Young et d'Augustin Fresnel sur les interférences lumineuses démontrent en effet le caractère ondulatoire de la lumière et portent le coup de grâce à la théorie de Newton.

Ces expériences utilisent une source lumineuse éclairant une plaque percée de deux trous assez proches l'un de l'autre, derrière lesquels est placé un écran.

– Dans un premier temps, bouchons l'un des trous et repérons la zone de l'écran éclairée par la lumière qui passe par l'autre trou ; elle correspond en gros à une tache lumineuse circulaire si ce dernier est lui-même circulaire.

– Re commençons maintenant la même expérience en intervertissant le rôle des deux trous. Fermons celui qui était ouvert et ouvrons celui qui était fermé : comme précédemment, la zone éclairée de l'écran est une tache lumineuse circulaire, analogue à la précédente, mais légèrement décalée par rapport à elle puisque le second trou qui lui donne naissance est lui-même décalé par rapport au premier. Point tout à fait essentiel : parce que les trous sont assez rapprochés l'un de l'autre, *les deux zones de l'écran éclairées par chacun d'eux se recouvrent partiellement.*

– Re commençons enfin l'expérience en laissant cette fois les deux trous ouverts : des zones alternativement noires et lumineuses apparaissent dans la région commune aux deux taches précédemment éclairées. Ce résultat fondamental montre que *l'on trouve maintenant de l'obscurité à certains endroits de l'écran où chacun des deux trous envoyait séparément de la lumière.* Ce fait est tout à fait surprenant puisqu'il signifie que, par endroits, la lumière envoyée par le premier trou et celle envoyée par le second se « détruisent » totalement. En d'autres termes : *de la lumière additionnée à de la lumière peut donner de l'obscurité.*

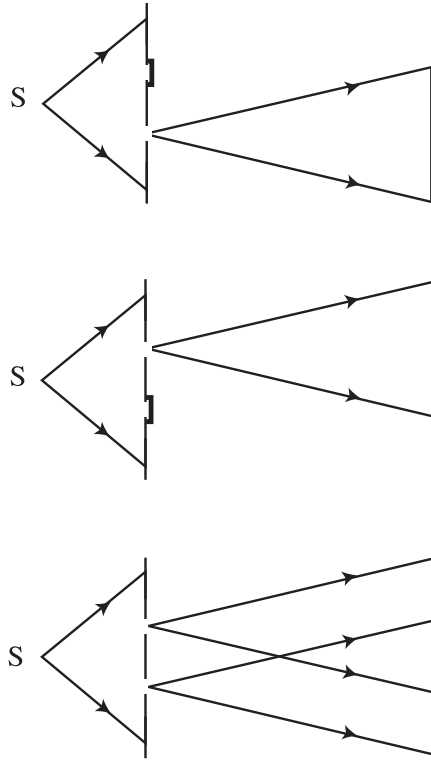


Figure I-1. Interférences lumineuses

Une plaque percée de deux trous est interposée entre une source lumineuse S et un écran. a) quand seul le trou du bas est ouvert, on observe sur l'écran une zone circulaire éclairée ; b) quand seul celui du haut est ouvert on y observe une zone circulaire identique mais décalée vers le haut. Si les deux trous sont assez proches ces deux zones ont une partie commune. c) quand les deux trous sont ouverts, cette zone commune qui reçoit pourtant de la lumière de chacun des trous présente des franges obscures : de la lumière ajoutée à de la lumière peut donner de l'obscurité.

Un tel résultat est évidemment inexplicable si on décrit la lumière en termes de corpuscules puisqu'aucune addition d'objets ne peut conduire à une absence d'objets. Il porte ainsi un coup fatal à l'interprétation corpusculaire de Newton : si de la lumière additionnée à de la lumière peut donner de l'obscurité c'est que la lumière n'est pas constituée de corpuscules matériels.

Avec Thomas Young et Augustin Fresnel, un raisonnement simple nous ouvre la voie d'une interprétation possible de cette expérience étonnante. L'énigme à résoudre peut s'énoncer dans une devinette :

– *Je suis quelque chose tel que ce quelque chose ajouté à lui-même puisse donner rien du tout. Qui suis-je ?*

Pour qu'une telle « devinette algébrique » puisse avoir une solution, il faut nécessairement que ce « quelque chose » soit représentable par une grandeur qui puisse être indifféremment positive ou négative.

– Le nombre de corpuscules matériels envoyés sur un écran ne peut pas être négatif ; l'expérience d'interférence n'est donc pas interprétable en termes de corpuscules matériels. Par contre,

– un changement d'altitude ou de niveau peut être aussi bien positif que négatif. Le phénomène lumineux peut donc s'interpréter en termes de « changement de niveau ». L'image que proposait Christian Huygens un siècle plus tôt vient alors à l'esprit de Thomas Young et d'Augustin Fresnel : la lumière pourrait ressembler aux ondulations de la surface de l'eau qui, successivement, monte et descend. Si, sur un lac, une onde ayant pris naissance en un endroit particulier (correspondant à l'un des trous de l'expérience décrite) a tendance à faire monter le bouchon qui flotte sur sa surface exactement au moment où une autre onde venant d'un autre point du lac (assimilable au second trou) a tendance à le faire descendre, le bouchon restera immobile. Si « des objets + des objets » ne peuvent jamais donner une « absence d'objets », « une sollicitation vers le haut » superposée à « une sollicitation vers le bas » peut entraîner l'immobilité. Ainsi les expériences de Young et Fresnel établissent-elles le caractère ondulatoire de la lumière.

Pendant que l'optique développe cette nouvelle interprétation, James Clerk Maxwell réussit à faire la synthèse des expériences de Michael Faraday et d'André-Marie Ampère sur l'électricité et le magnétisme : ses équations prévoient l'existence d'ondes inconnues qui se propagent à la vitesse de la lumière. Leur existence, démontrée en 1888, donc 25 ans plus tard, par Heinrich Hertz, conduit à identifier la lumière « visible » à une toute petite partie de la grande famille des « ondes électromagnétiques » : si l'on a cru longtemps que seules existaient les ondes lumineuses, c'est tout simplement parce que l'œil est insensible aux autres ondes électromagnétiques, mais ces dernières existent bien et ne diffèrent de la lumière que par leur longueur d'onde¹.

Notons qu'il n'y a dans tous ces développements aucune contradiction entre la théorie de la lumière et la mécanique puisque celle-ci sait traiter aussi bien des ondes que des particules. La première théorie électromagnétique est d'ailleurs une théorie mécaniste : pour rendre compte de la propagation des effets électriques et magnétiques, Maxwell imagine en effet l'espace rempli de tourbillons fluides et de « rouleaux de friction » se mouvant à l'intérieur de cellules aux parois élastiques. Pour lui, cette représentation mécanique n'est pourtant pas essentielle à la théorie. Elle n'est là que pour servir de support à l'imagination et aider le lecteur à pénétrer un formalisme mathématique difficile. Maxwell s'en dégage d'ailleurs très vite : dès la seconde édition de son *Traité d'électricité et de magnétisme* il s'affranchit de tout « mécanisme » au grand regret de nombre de ses contemporains². Comme autrefois Newton devant

-
1. En les classant par ordre de longueurs d'ondes décroissantes, les principales sont les ondes hertziennes, les ondes centimétriques utilisées par exemple dans le radar, les ondes infrarouges (qui nous réchauffent et dont certains rapaces ont une perception visuelle leur permettant de repérer les courants chauds ascendants), les ondes visibles, les ultraviolets, les rayons X et, au delà encore, les rayons gamma.
 2. Helmholtz soutenait par exemple qu'une explication ne pouvait être satisfaisante que si elle utilisait des modèles mécaniques. William Thomson, écrit de même en 1884 (*Kelvin's Baltimore Lectures on Modern Theoretical Physics*, éditées par R. Kargon and P. Achinstein, MIT, Cambridge, 1987, p. 206) : « Je ne suis jamais satisfait tant que je n'ai pas le modèle mécanique d'une chose. Si je peux m'en faire un modèle mécanique, je comprends. Tant que je ne peux pas me faire de modèle mécanique, je ne comprends

les questions posées par l'attraction des masses à distance et à travers le vide, il ne cherche plus à expliquer comment se transmettent les effets électriques et magnétiques. Comme lui, il pourrait dire : vous pensez que je n'explique rien, c'est vrai, je ne sais pas comment les choses se passent et je ne feins pas de le savoir ; je vous dis seulement ce qui se passe en vous permettant de prévoir et de calculer ce qui se passera, c'est tout.

La lumière échappe à la mécanique

L'incompatibilité de la mécanique et de l'électromagnétisme n'apparaît donc pas directement dans les travaux de Young, de Fresnel ou de Maxwell. Elle va se faire jour au fur et à mesure des recherches entreprises pour identifier le milieu de propagation des ondes lumineuses : une particule peut se déplacer dans le vide (l'interprétation corpusculaire de la lumière défendue par Newton était donc bien en accord avec sa mécanique) mais une onde ne le peut pas : par définition, une onde est en effet *l'oscillation d'un milieu matériel*.

L'onde sonore, par exemple, correspond à l'oscillation des molécules d'air : lorsque je parle, mes cordes vocales vibrent et transmettent leurs vibrations à l'air autour moi. De proche en proche, celles-ci finissent par atteindre le tympan de mon interlocuteur qui se met à vibrer lui aussi. Ainsi, le signal sonore se propage-t-il, *grâce à l'air*, de ma gorge jusqu'à son oreille. Plaçons entre lui et moi un double vitrage dans lequel on a préalablement fait le vide : le son ne se propage plus jusqu'à lui. L'onde sonore fait bien vibrer la première paroi du vitrage mais, le milieu de propagation ayant disparu, plus rien ne peut communiquer cette vibration à la seconde. La propagation du son se trouve donc interrompue et mon interlocu-

pas ; et c'est pour cela que je n'arrive pas à comprendre la théorie électromagnétique. Je crois tout à fait à la théorie électromagnétique ; je crois aussi que lorsque nous comprendrons l'électricité, le magnétisme et la lumière, nous les comprendrons chacun comme une partie d'un grand tout. Mais je veux comprendre la lumière autant que je le peux, sans introduire d'autres concepts que nous comprenons encore moins... »

teur ne m'entend plus. L'onde sonore est ainsi une vibration de l'air. De même, l'onde qui se déplace sur la surface de l'eau correspond à l'oscillation des molécules d'eau et nécessite leur présence. D'où la question posée par l'interprétation ondulatoire de la lumière : dans quel milieu se propage la lumière ou, de façon plus précise, *de quel milieu les ondes électromagnétiques sont-elles l'oscillation ?* L'existence nécessaire d'un milieu de propagation pour pouvoir parler d'onde fait ainsi renaître la notion d'éther en lui donnant un statut physique qu'elle n'a encore jamais eu. Comme l'écrivait Henri Poincaré « l'onde électromagnétique est une vibration de l'éther ; puisque la lumière nous parvient des plus lointaines étoiles, cet éther emplit nécessairement tout l'espace et constitue donc le milieu ultime de l'univers. »

Le problème de la compatibilité de l'électromagnétisme et de la mécanique se pose ainsi lorsqu'il s'agit d'identifier les propriétés mécaniques de ce milieu de propagation des ondes lumineuses :

– puisque les planètes s'y déplacent sans rencontrer de résistance notable, il s'agit nécessairement d'un milieu très peu dense. C'est ce que démontre William Thomson, anobli plus tard sous le nom de Lord Kelvin, qui estime sa densité entre un million et un milliard de fois plus faible que celle de l'air¹.

– puisque la lumière est une onde transversale qui se propage à très grande vitesse, il faut admettre aussi qu'il s'agit d'un milieu plus rigide que l'acier² (Pour transmettre rapidement une telle vibration, les particules d'un milieu matériel doivent en effet se trouver forte-

1. Lord Kelvin estime que la densité de l'éther doit se situer entre 10^{-6} et 10^{-9} kg/m³ (*Sur le mouvement d'un solide élastique traversé par un corps agissant sur lui par attraction ou répulsion*, Rapports présentés au congrès international de physique de 1900, Gauthier-Villars, 1900, Tome II, p. 22).

2. Une onde est dite transversale si elle vibre perpendiculairement à sa direction de propagation. Une telle onde ne peut se propager que dans un milieu solide. Sachant que la rigidité d'un solide peut s'exprimer par le produit de sa masse volumique et du carré de la vitesse des ondes qu'il propage, on obtient pour l'éther (en utilisant la valeur de la vitesse de la lumière et en attribuant à l'éther une masse volumique de l'ordre de 10^{-6} kg/m³ pour permettre aux planètes de se déplacer sans trop de frottements), une rigidité de 9×10^{10} N/m² supérieure à celle de l'acier (Lord Kelvin, ref. ci-dessus). Avec un tel résultat, le problème rebondit car tout milieu rigide est également le siège d'ondes longitudinales, ce qui n'est pas le cas pour l'éther.

ment couplées afin de pouvoir réagir très vite aux déplacements de leurs voisines. Leur réaction est alors d'autant plus rapide que le milieu est plus rigide).

L'éther apparaît ainsi comme un milieu à la fois très peu dense et très rigide. Avec des propriétés aussi contradictoires, il faut bien vite se rendre à l'évidence qu'il échappe aux descriptions usuelles de la mécanique et la question se complique encore lorsque l'on s'aperçoit qu'il n'obéit pas au principe des actions réciproques¹ et que la théorie de Maxwell ne satisfait pas au principe de relativité de Galilée !

Ce premier conflit entre l'électromagnétisme et la mécanique est d'autant plus difficile à analyser qu'à l'époque, suivant les propres termes d'Hermann von Helmholtz, la théorie de Maxwell apparaît, même aux meilleurs scientifiques, comme « une forêt vierge inextricable dont il est bien difficile d'appréhender le sens physique. » La situation est d'ailleurs compliquée par l'existence de deux autres théories, proposées 30 ans plus tôt, l'une par Franz Ernst Neumann et l'autre par Wilhelm Weber, qui pourraient peut-être supplanter celle de Maxwell. Si dans ce contexte, les expériences de Heinrich Hertz vérifiant l'existence des ondes électromagnétiques prévues par Maxwell permettent de trancher le débat, elles ne font que reposer avec plus d'acuité encore la question de cet éther dont on ne comprend décidément pas les propriétés.

Avec le temps, et devant les échecs répétés de toutes les tentatives réalisées pour décrire ce mystérieux milieu matériel, la mécanique va devoir renoncer à expliquer la propagation des ondes électromagnétiques.

Né en 1879, donc à l'époque de tous ces débats, Einstein se passionne très tôt pour toutes ces questions :

– Entre 15 et 16 ans, il rédige un essai scientifique *Sur l'examen de l'état de l'éther dans un champ magnétique*, qu'il envoie en Belgique à son oncle Cæsar Koch.

1. Une difficulté essentielle provient de l'existence en électromagnétisme de forces non centrales découvertes par Faraday.