



HAL
open science

La théorie ondulatoire de Fresnel et la dualité onde-corpuscule

Alexandre Gondran, Michel Gondran

► **To cite this version:**

Alexandre Gondran, Michel Gondran. La théorie ondulatoire de Fresnel et la dualité onde-corpuscule. La Revue de l'électricité et de l'électronique, 2018, 2018 (5). hal-01971578

HAL Id: hal-01971578

<https://enac.hal.science/hal-01971578v1>

Submitted on 25 Jan 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

La théorie ondulatoire de Fresnel et la dualité onde-corpuscule

par Michel et Alexandre Gondran

article publié dans la **Revue de l'Electricité et de l'Electronique (REE)** de 2018, n°5

Résumé

La réponse de Fresnel à la question sur le phénomène de diffraction posée en 1818 par l'Académie des sciences et la controverse sur le point lumineux de Poisson-Arago marquent le début de la réfutation de la théorie corpusculaire de Newton et la réhabilitation de la théorie ondulatoire de Huygens. Après avoir rappelé ce moment historique, nous montrons théoriquement et par simulation comment les lignes de flux d'énergie permettent de compléter la réponse de Fresnel et d'expliquer le point lumineux de Poisson-Arago et de ne pas rejeter la théorie corpusculaire de Newton. Pour une onde monochromatique dans le vide, ces lignes de flux d'énergie correspondent aux rayons diffractés de l'*Optique* de Newton et peuvent être considérées comme les rayons de l'optique ondulatoire. On terminera par l'actualité des applications du point de Poisson-Arago avec aussi des particules massives.

Abstract

Fresnel's response to the Academy of Sciences' contest in 1818 on the subject of diffraction phenomena and the controversy over the Poisson-Arago bright spot mark the beginning of the refutation of Newton's corpuscular theory and the rehabilitation of Huygens' wave theory. After recalling this historical moment, we demonstrate theoretically and by simulation how energy flow lines make it possible to complete the Fresnel response and explain the Poisson-Arago bright spot while not invalidating Newton's corpuscular theory. For a monochromatic wave in a vacuum, these energy flow lines correspond to the diffracted rays of Newton's Optics and can be considered as the rays of wave optics. We will conclude by considering current applications of the Poisson-Arago bright spot to massive particles

1 Introduction

Il y a deux cents ans, la majorité des savants adhérait à la théorie corpusculaire de la lumière de René Descartes et d'Isaac Newton. En 1802, Thomas Young publie son première expérience sur les interférences entre deux fentes [15]. En 1818, Augustin Fresnel publie son premier mémoire, nommé *Réveries*, sur la diffraction de la lumière où il s'oppose à la théorie corpusculaire de la lumière de Newton. Mais c'est sa réponse en 1818 au concours de l'Académie des sciences de Paris qui marque la condamnation de la théorie corpusculaire de Newton et la réhabilitation de la théorie ondulatoire de Huygens. La question du concours concernait les propriétés paradoxales de la lumière ; en particulier l'explication du phénomène de la diffraction était posée sous la forme suivante :

« Les phénomènes de diffraction ont été ces derniers temps l'objet de recherches de nombreux physiciens [...], mais on n'a pas encore déterminé suffisamment le mouvement des rayons à proximité des corps où se produit l'inflexion. [...] Il importe [...] d'approfondir [...] la manière physique avec laquelle les rayons sont infléchis et séparés en diverses bandes. [...] Ceci a conduit l'Académie à proposer cette recherche [...] en la présentant de la manière suivante : 1. Déterminer [...] tous les effets de la diffraction des rayons directs et réfléchis quand ils passent près des extrémités d'un corps. 2. Dédire de ces expériences, au moyen de l'induction mathématique, les mouvements des rayons dans leur passage près des corps. » [4] (tome1, p.254-255)

C'est un sujet exprimé en langage newtonien par un jury composé de savants de premier plan : Pierre Simon Laplace, Jean-Baptiste Biot, Siméon Denis Poisson, Louis Joseph Gay-Lussac - tous newtoniens - et Dominique Arago qui est le seul à croire à la théorie ondulatoire.

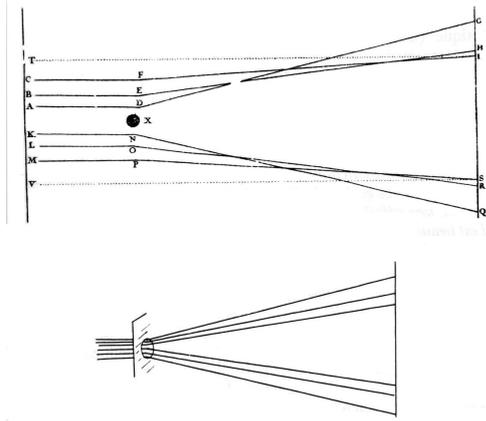


FIGURE 1 – Rayons diffractés de Newton (livre III du *Traité d’Optique* de 1704) par un cheveu (haut) et par une ouverture circulaire (bas).



FIGURE 2 – Augustin Fresnel (1788-1827).

Ils ont tous en mémoire les rayons proposés par Newton dans le livre III de son *Traité d’Optique* (figure 1) pour les cas de diffraction par un cheveu et par une ouverture circulaire.

Un jeune polytechnicien, ingénieur des Ponts et Chaussées, Augustin Fresnel (figure 2), encouragé par Arago, prit part au concours et soumit un mémoire fondé sur la théorie ondulatoire de la lumière [4]. Le mémoire de Fresnel développe une théorie ondulatoire mathématique qui paraît contradictoire avec la thèse corpusculaire. Il décrit un nombre impressionnant d’expériences de diffraction toutes expliquées par un même principe : les franges sont dues aux interférences des ondelettes émises par chaque point de l’écran diffractant. C’est le principe de Fresnel qui précise et généralise le principe de Huygens appelé aujourd’hui *principe de Huygens-Fresnel*.

En étudiant attentivement le mémoire, Poisson déduit de la théorie de Fresnel "*que le centre de l’ombre d’un écran circulaire opaque...[doit]...être aussi éclairé que si l’écran n’existait pas*" [4]; ce point lumineux au centre de l’ombre est pour lui une preuve de l’impossibilité de la théorie de Fresnel car contraire aux ombres de la vie quotidienne.

Mais le président de la commission, François Arago décida de réaliser l’expérience. Il fit monter un disque métallique de 2 mm sur une plaque de verre avec de la cire et parvint à reproduire la tache de diffraction, ce qui acheva de convaincre la plupart des savants de la nature ondulatoire de la lumière; ils attribuèrent le prix à Fresnel au mois de novembre 1819 Cette découverte marque le début de l’acceptation de la thèse ondulatoire et du rejet de la thèse corpusculaire. C’est l’exemple même d’une *experimentum crucis*. Ce point lumineux, que l’on appelle aujourd’hui le point de Poisson ou point d’Arago, avait en fait été observé bien des années auparavant (1723) par Maraldi, qui n’avait pas publié ses travaux.

L’objet de cet article est de montrer qu’il est maintenant possible de compléter la réponse de Fresnel et de montrer que les lignes de flux d’énergie sont, dans le cas d’une onde monochromatique dans le vide, la réponse à la question de l’Académie des sciences :« *déduire au moyen de l’induction mathématique, les mouvements des rayons dans leur passage près des corps* ». Nous étudions d’abord par simulation le cas de la diffraction par une ouverture circulaire ainsi que celui de la diffraction par un disque opaque de façon à retrouver le point de Poisson-Arago, ce qui est aujourd’hui un exercice des cours de physique [12]. Puis, nous montrons sur ces deux cas que les lignes de flux d’énergie moyenne correspondent aux rayons de Newton [6]. Nous discutons ensuite l’interprétation de ces lignes de flux d’énergie comme les rayons lumineux de l’optique ondulatoire ou même comme des trajectoires de photons. En conclusion, nous évoquerons l’actualité de Fresnel et des applications du point de Poisson-Arago avec des particules massives.

2 Les densités de probabilité calculées par le principe de Fresnel

2.1 La densité de probabilité derrière une ouverture circulaire

Considérons une onde plane monochromatique arrivant perpendiculairement à une ouverture circulaire (respectivement un disque opaque) placée dans le plan xy , avec un écran placé plus loin, parallèlement au plan diffractant, à la distance z . Le calcul de la densité après l'ouverture circulaire est calculée à partir du principe de Fresnel.

Soient (X, Y) les coordonnées d'un point M dans le plan diffractant et (x, y) celles d'un point P d'observation sur l'écran. Si on ne tient pas compte de la polarisation et que l'on suppose que l'onde incidente est de la forme Ae^{ikz} sur l'ouverture, l'amplitude $A(P)$ pour $z > 0$ est donnée par la formule de Rayleigh-Sommerfeld basée sur le principe de Fresnel :

$$A(P) = \frac{-iA_0}{\lambda} \int_S \frac{e^{ikr}}{r} \left(1 - \frac{1}{ikr}\right) \frac{z}{r} dXdY$$

avec $k = 2\pi/\lambda$, r égal à la distance MP et où l'intégration est prise sur la surface S de l'ouverture, cf. le cours d'*Optique physique* de Taillet [12]. La figure 3 représente, dans un plan (z, x) contenant l'axe optique, le calcul de l'intensité à la sortie d'un trou circulaire de rayon $R = 5 \mu m$ d'une lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda = R/10 = 0.5 \mu m$ (couleur bleu-vert).

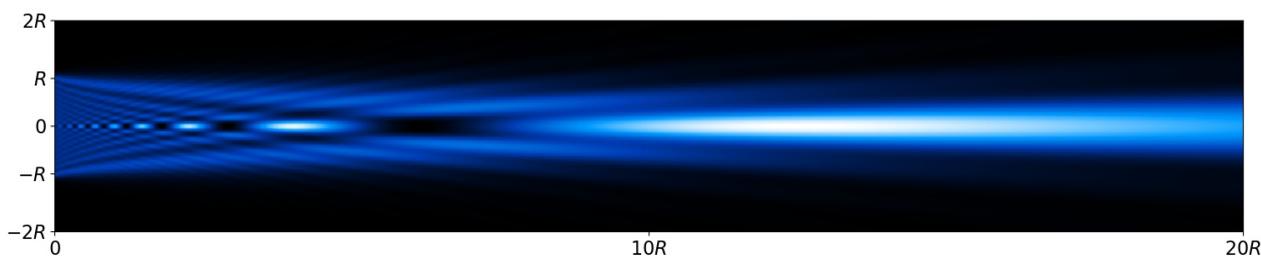


FIGURE 3 – Distribution de l'intensité à la sortie du trou circulaire dans le plan (z, x) .

Loin de l'ouverture, on obtient la diffraction classique de Fraunhofer, et le faisceau émergent possède une dispersion angulaire bien définie, de l'ordre de $\Delta\theta \approx \lambda/R$; c'est la tache d'Airy [12]. Près de l'ouverture, on obtient la diffraction de Fresnel. On y voit sur l'axe une succession de zones brillantes et de zones sombres.

2.2 La densité de probabilité derrière un disque opaque

L'expérience de Poisson correspond à un disque opaque. La figure 4 représente le calcul de l'intensité derrière un disque opaque de rayon $R = 5 \mu m$ d'une lumière monochromatique de longueur d'onde $\lambda = R/10 = 0.5 \mu m$.

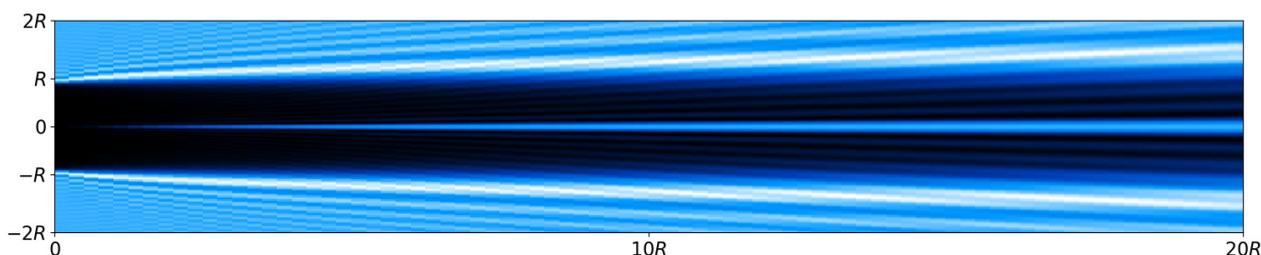


FIGURE 4 – Distribution de l'intensité derrière le disque opaque dans le plan (z, x) .

Comme l'avait trouvé Poisson par le calcul en utilisant le principe de Fresnel, on distingue nettement la zone correspondant à l'ombre géométrique, mais aussi l'existence du point lumineux de Poisson-Arago au centre de l'ombre; avec le choix de $\lambda = R/10$, ce point lumineux prend même une grande importance.

Newton, qui a réalisé l'expérience du disque opaque avec une pièce de monnaie, ne fait pas mention dans son *Optique* du point lumineux au centre de l'ombre. C'est un oubli qu'on lui a souvent reproché. Avec $\lambda = 0.5 \mu m$ et une pièce de rayon $R = 1 cm$, il est presque impossible de voir le point lumineux d'Arago sur un écran placé à 5 mètres si on ne le cherche pas. Le rayon du point lumineux est de $0.1 mm$ et est juste visible à l'œil nu comme le montre la figure 5.

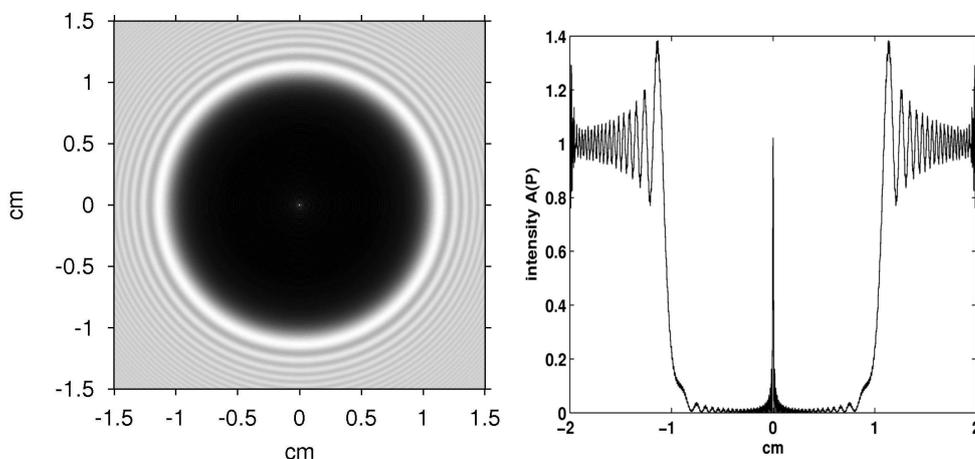


FIGURE 5 – Point de Poisson-Arago : distribution de l'intensité derrière une pièce de 1 cm de rayon sur un détecteur placé à 5 mètres (simulation avec les valeurs numériques de l'expérience réalisée par Newton)

3 Les lignes de flux d'énergie pour une onde monochromatique

Considérons un champ électromagnétique monochromatique (de fréquence ω). En un point donné de l'espace le flux instantané d'énergie S passant par unité de surface est appelé vecteur de Pointing, et on note u la densité d'énergie électromagnétique instantanée en ce point à cet instant. Comme en mécanique des fluides, S et u vérifient la loi de conservation de l'énergie $\frac{\partial u}{\partial t} + \nabla S = 0$. Puisque les fréquences optiques sont très grandes (ω est de l'ordre de $10^{15} s^{-1}$), on ne peut observer les valeurs instantanées de chacune de ces quantités qui peuvent osciller rapidement, mais seulement leur moyenne temporelle prise sur un intervalle qui est grand par rapport à la période fondamentale $T = 2\pi/\omega$ [1, 8]. Par analogie avec les lignes de courant en mécanique des fluides, on appelle lignes de flux d'énergie moyennes les lignes obtenues par l'équation :

$$dr/dt = \langle S \rangle / \langle u \rangle$$

où $\langle S \rangle$ est la moyenne temporelle du flux d'énergie et où $\langle u \rangle$ est la moyenne temporelle de la densité d'énergie. Pour les problèmes de diffraction, ces lignes de flux d'énergie ont été discutées depuis longtemps. En 1952, elles ont été calculées numériquement pour la diffraction à deux dimensions sur un demi-plan par Braunbeck et Laukien et rappelées dans le livre de Born et Wolf [1]. En 1976, Prosser [11] propose une interprétation de la diffraction et des interférences en termes de lignes de transport d'énergie.

3.1 Lignes de flux d'énergie derrière l'ouverture circulaire

La figure 6 présente la simulation de 40 lignes de flux d'énergie dont les positions initiales sont réparties uniformément dans l'ouverture circulaire. On remarque qu'après une perturbation dans la zone de Fresnel (près de l'ouverture), les lignes redeviennent progressivement rectilignes dans la zone de Fraunhofer (loin de l'ouverture), en accord avec les rayons diffractés proposés par Newton dans la figure 1 pour une ouverture circulaire.

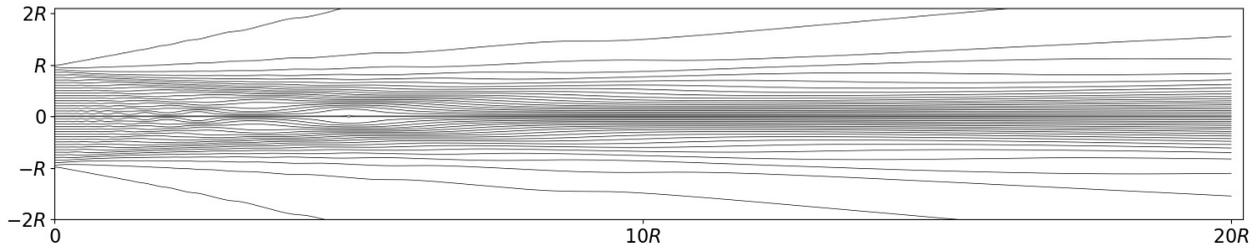


FIGURE 6 – 40 lignes de flux d'énergie à la sortie de l'ouverture circulaire.

3.2 Point de Poisson-Arago et lignes de flux d'énergie derrière le disque opaque

La figure 7 présente la simulation des lignes de flux d'énergie dont les positions initiales sont réparties en dehors du disque opaque. On remarque que les lignes frôlant le bord du disque opaque contournent ce disque et se rassemblent le long de son axe.

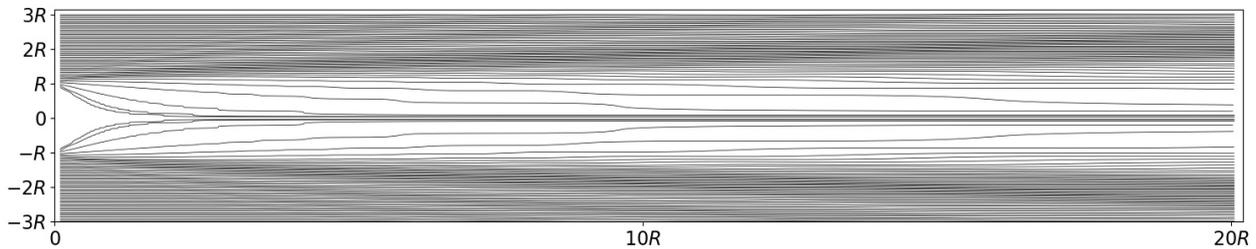


FIGURE 7 – Lignes de flux d'énergie à la sortie du disque opaque.

Ainsi la présence des lignes de flux d'énergie derrière le disque opaque donne une explication réaliste des points lumineux de Poisson-Arago.

3.3 Lignes de flux d'énergie pour l'expérience des fentes de Young

Complétons ces simulations numériques par la détermination des lignes de flux d'énergie pour l'expérience des fentes de Young. Réalisée en 1802 par Thomas Young, quelques années avant la théorie de Fresnel, cette expérience est la première montrant la nature ondulatoire de la lumière [15].

Considérons une onde plane monochromatique de lumière ($\lambda = 0.5 \mu\text{m}$) perpendiculaire à deux fentes placées dans le plan xy , et un détecteur dans un plan parallèle à la distance z . Les fentes ont une largeur $d = 5 \mu\text{m}$ le long de x et infini le long de y ; $2d$ est la distance entre les fentes, centre à centre. La figure 8 montre la simulation de 20 lignes de flux d'énergie dont les positions initiales ont été tirées au hasard sur les deux fentes.

Très récemment, Kocsis et ses collègues [9] ont reconstitué des trajectoires telles celles de la figure 8 à partir d'un champ de vitesse obtenu par des mesures appelées mesures faibles.

4 Les rayons lumineux de l'optique ondulatoire dans le vide et la dualité onde-corpuscule

Pour des ondes monochromatiques dans le vide, ces lignes de flux d'énergie correspondent aux rayons diffractés proposés par Newton dans les Principia de 1687 :

« Et les rayons en passant près des angles des corps opaques ou transparents tels que l'extrémité d'une lame de couteau, d'une pièce de monnaie, d'un morceau de verre, ou de pierre, etc.,

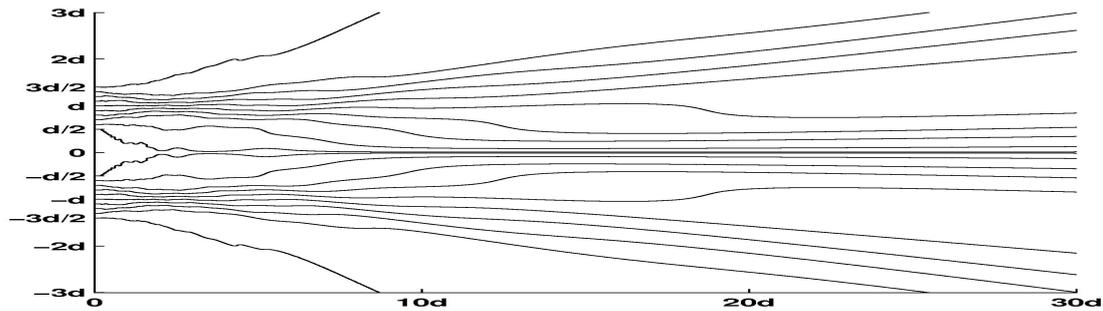


FIGURE 8 – 20 lignes de flux d'énergie derrière les deux fentes de Young.

s'infléchissent autour de ces corps comme s'ils en étaient attirés : c'est ce qu'a découvert Grimaldi il y a longtemps en faisant entrer un rayon de lumière par un trou dans une chambre obscure, et ce que j'ai vérifié. » (Livre I, section XIV).

Ces lignes de flux d'énergie peuvent-elles être interprétées comme des rayons de lumière? Quand la lumière est incohérente, nous devons rejeter cette interprétation. En effet, quand la lumière n'est pas monochromatique, elle doit être considérée comme un mélange d'ondes monochromatiques comme Newton l'a montré dans ses fameuses expériences de décomposition de la lumière de l'Optique (1704). Chaque onde monochromatique de la lumière blanche donne des lignes de flux d'énergie qui dépendent de la longueur d'onde.

La réponse est différente pour une onde monochromatique dans le vide. Ces lignes de flux d'énergie sont alors une généralisation des rayons de l'optique géométrique. En effet, si nous accroissons la fréquence de l'onde lumineuse vers l'infini (ce qui est équivalent à décroître la longueur d'onde vers zéro), les lignes de flux d'énergie convergent vers les rayons rectilignes de l'optique géométrique; C'est ce que montre la figure 9 pour l'expérience des fentes de Young.

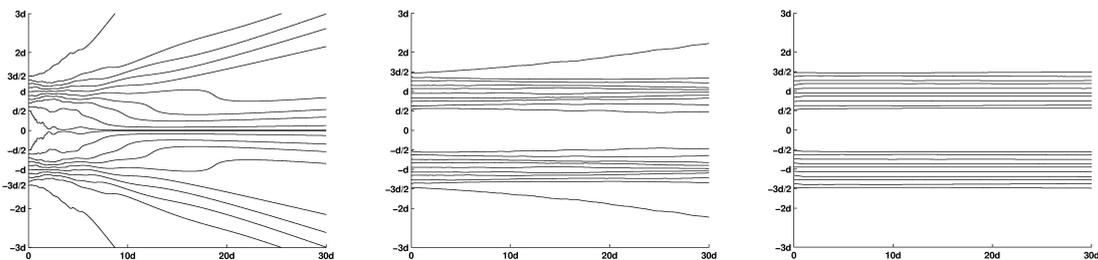


FIGURE 9 – Evolution des lignes de flux d'énergie lorsque la longueur d'onde décroît : $\lambda = 0.5\mu m$; $\lambda = 50nm$; $\lambda = 5nm$.

Puisqu'en optique géométrique on parle de rayons lumineux, les lignes de flux d'énergie pour une onde monochromatique dans le vide peuvent être appelées par analogie, les rayons lumineux de l'optique ondulatoire comme cela a été accepté dans American Journal of Physics [2]. Ces lignes de flux d'énergie correspondent bien à la définition des rayons de lumière donnée par Newton au début de son Optique : « *Par rayons de lumière, j'entends ses moindres parties, tant celles qui sont successives dans les mêmes lignes, que celles qui sont contemporaines en différentes lignes.* »

Ces rayons lumineux de l'optique ondulatoire peuvent-ils être interprétés comme des trajectoires de photons? La majorité de la communauté scientifique dit non car ils correspondent à des lignes de flux d'énergie moyenne et que seules les valeurs moyennes sur un temps grand par rapport à la période T du champ électromagnétique et sur un volume donné sont interprétables [5,6]. Nous pensons le contraire car nous avons montré que ces lignes de flux d'énergie moyenne peuvent être considérées comme des lignes de flux d'éner-

gie instantanée si le champ électromagnétique est à valeur complexe. A la suite de nombreux auteurs comme Silberstein dès 1907, nous considérons en effet que le photon admet dans le vide une fonction à trois composantes, $\mathbf{E} + i\mathbf{cB}$, le vecteur de Riemann-Silberstein. Expérimentalement, on ne peut faire actuellement de différences entre ces deux interprétations car les variations temporelles en sont très rapides et les détecteurs dont on dispose ne permettent pas de les suivre. On mesure seulement l'éclairement énergétique, c'est-à-dire la puissance que transporte l'onde par unité de surface.

Ces trajectoires de photons alors sont analogues aux trajectoires des particules massives de l'interprétation de Broglie-Bohm, cf. par exemple [5, 7].

Ces trajectoires de photons sont compatibles avec l'hypothèse d'Einstein de 1905 au moment où il postule l'existence de photons ayant une position et une trajectoire pilotée par le champ électromagnétique [3] :

« Selon l'hypothèse envisagée ici, lors de la propagation d'un rayon lumineux émis par une source ponctuelle, l'énergie n'est pas distribuée de façon continue sur des espaces de plus en plus grands, mais est constituée d'un nombre fini de quanta d'énergie localisés en des points de l'espace, chacun se déplaçant sans se diviser et ne pouvant être absorbé ou produit que d'un bloc. »

C'est même ce que semble dire Dirac en 1931 dans le premier chapitre de ces Principes de la mécanique quantique [2] :

« Pour obtenir une théorie cohérente de la lumière, qui englobe également l'explication des phénomènes d'interférence et de diffraction, nous devons nous imaginer que les ondes dirigent les photons d'une manière incompréhensible du point de vue de la mécanique habituelle. Dans la nouvelle mécanique quantique, cette liaison intime entre ondes et particules est extrêmement générale. Elle n'apparaît pas seulement dans le cas de la lumière. Toutes les particules sont reliées de cette façon à des ondes qui les dirigent et qui donnent lieu, dans des conditions appropriées, à des phénomènes d'interférence et de diffraction. »

Aujourd'hui encore, l'interprétation de cette dualité onde-corpuscule reste un problème ouvert depuis Newton. En effet, l'histoire des sciences a oublié le fait que, comme le rappelle en 1955 Louis de Broglie dans *Le dualisme des ondes et des particules dans l'oeuvre d'Albert Einstein*, le premier inventeur du dualisme onde-particule serait Isaac Newton dans son *Traité d'optique* de 1704 qui suit de près le *Traité de la lumière* de Christian Huygens de 1690 :

*« Contenant de pénétrantes et minutieuses analyses des découvertes expérimentales de son auteur, il ne se prononce pas très nettement sur la nature de la lumière, mais on sent cependant, en le lisant, que Newton penche vers la conception granulaire de la lumière et que pour lui un rayon lumineux est essentiellement la trajectoire d'un corpuscule. Mais l'esprit puissant de Newton ne pouvait pas ne pas apercevoir que le phénomène de la coloration des lames minces qu'il avait découvert et qui porte son nom (les anneaux de Newton) impliquait l'existence dans la lumière d'un élément de périodicité dont l'image simpliste des corpuscules de lumière indépendants ne pouvait rendre compte. C'est pourquoi, dans son *Traité d'optique*, Newton a esquissé cette remarquable **théorie des accès** d'après laquelle les corpuscules de lumière seraient accompagnés, au moins dans leur passage à travers la matière, par des ondulations qui réagiraient sur leur mouvement et les feraient passer périodiquement par des accès de facile transmission et des accès de facile réflexion : l'espace parcouru par le corpuscule entre deux accès de même nature permettait à Newton de définir **une longueur d'accès** qui était étroitement apparentée à ce que Fresnel devait plus tard appeler **la longueur d'onde** d'une lumière monochromatique. Ainsi le savant génial qui avait découvert l'analyse infinitésimale et la gravitation universelle était parvenu à concevoir une théorie mixte de la lumière où, tout en conservant l'idée de grains de lumière décrivant des trajectoires, on lui associait l'idée d'une onde en propagation qui accompagnerait le mouvement des corpuscules et serait susceptible de réagir sur lui. Admirable idée, véritable préfiguration de la future mécanique ondulatoire, mais qui, venue prématurément dans l'histoire de la science, ne fut pas développée et tomba dans l'oubli. »*

On ne retient souvent du *Traité d'optique* de Newton que le livre I où il fonde la décomposition de la lumière en rayons lumineux monochromatiques. Et on oublie que l'expérience des anneaux de Newton (et de

Hooke) correspond à la première expérience d'interférences de la lumière. Ces interférences sont étudiées dans le livre II. Enfin le livre III est consacré à l'étude détaillée, à la suite de Grimaldi, du problème de la diffraction. On comprend que ce *Traité d'optique* qui a été une source d'inspiration d'Einstein pour l'introduction des photons, ait été aussi une source d'inspiration de Young pour son expérience des deux fentes et de Broglie pour l'introduction de sa fonction d'onde. On est loin des seuls corpuscules retenus par la petite histoire et de certains élèves de Newton !

5 Actualité de Fresnel et du point de Poisson-Arago

5.1 Fresnel [14]

Après le coup d'éclat de son mémoire de l'Académie des Sciences de 1818, Augustin Fresnel confirme la théorie ondulatoire de la lumière en prouvant le premier que deux faisceaux de lumière polarisés dans des plans différents n'ont aucun effet d'interférence et en déduisant en 1821 de cette expérience que le mouvement ondulatoire de la lumière polarisée est transversal et non longitudinal (comme celui du son), ainsi qu'on le croyait avant lui.

Il est le premier à produire une lumière polarisée circulaire. Ses formules, dites de Fresnel, sur la réfraction sont toujours utilisées.

Dans le domaine de l'optique géométrique, Fresnel invente la lentille à échelon (dite lentille de Fresnel) utilisée pour accroître la puissance de l'éclairage des phares. Elle est encore utilisée dans les phares maritimes, mais aussi dans les phares automobiles et les projecteurs de cinéma. Des modèles souples bon marché permettant une vision grand angle sont réalisés aujourd'hui à partir de la lentille de Fresnel, ou les lentilles aux caisses de supermarché pour vérifier le contenu du chariot.

Il meurt de la tuberculose en 1827 à l'âge de 39 ans.

5.2 Actualité du point de Poisson-Arago [13]

L'expérience du « spot d'Arago » a été observée avec des électrons dans les microscopes électroniques à transmission lors de l'examen de structures circulaires d'une certaine taille et a été réalisée récemment (2009) avec d'autres particules massives comme les molécules de deutérium.

Jusqu'à présent la tache d'Arago, qui constitue un point lumineux au centre de l'ombre géométrique d'une obstruction circulaire, a entraîné des difficultés dans diverses applications laser à haute énergie et a été considérée comme une nuisance.

Aujourd'hui, il est envisagé d'utiliser la taille et la forme du point d'Arago qui sont caractéristiques des aberrations du front incident d'un faisceau d'onde pour des applications.

Ainsi, il est envisagé de sonder les aberrations dans les faisceaux laser en utilisant la sensibilité du spot aux aberrations des faisceaux. Enfin, l'aragoscope, une nouvelle architecture pour les télescopes spatiaux peut être utilisée pour atteindre la limite de diffraction basée sur la taille du disque à faible coût, plutôt que sur le miroir d'un télescope coûteux. On peut imaginer des télescopes abordables pouvant fournir une résolution du sol de 7 cm à partir d'une orbite géostationnaire ou des images du ciel avec une résolution mille fois supérieure à celle du télescope spatial Hubble [14].

5.3 La lumière au prisme d'Augustin Fresnel

Dans le livre *L'impressionnisme entre art et science : la lumière au prisme d'Augustin Fresnel* [10] de 2018, Gérard Mourou, prix Nobel de physique 2018, écrit :

« Fresnel a découvert la nature de la lumière et ses propriétés, à savoir une onde dont la couleur est fixée par la fréquence de ses ondulations. Cette nature ondulatoire lui confère des propriétés particulières. Elle lui interdit par exemple de décrire des arêtes de façon précise, du fait du phénomène d'inflexion ou de diffraction. A la même époque, la peinture amorce une transformation profonde. Le dessin devient moins représentatif de la réalité et ne prime plus sur la couleur. Le détail devient moins important et surtout, la lumière vibre, devient reine et annonce l'impressionnisme ».

C'est la coïncidence entre ces deux révolutions scientifique et picturale qui est analysée dans ce beau livre.

Enfin, une des plus belles applications de la théorie ondulatoire de Fresnel et de ses réseaux de diffraction est l'utilisation qui en est faite par Gérard Mourou et Danna Strickland pour réaliser la technique d'amplification par dérive de fréquence (CPA) permettant de créer des impulsions ultracourtes de très haute puissance dans les lasers à impulsions : elle élève la puissance du laser d'un facteur compris entre 1 000 et 100 000.

Références

- [1] M. Born and E. Wolf. *Principles of Optics : Electromagnetic Theory of Propagation, Interference and Diffraction of Light (7th Edition)*.
- [2] P. A. M. Dirac. *Les principes de la mécanique quantique*. Les Presses Universitaires de France, 1931.
- [3] A. Einstein. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 322(6) :132–148, 1905.
- [4] A. Fresnel. *Œuvres complètes*. Imprimerie impériale, 1866.
- [5] M. Gondran and A. Gondran. Mécanique quantique : Particules indiscernables et interprétation statistique. *REE*, 2, Feb. 2006.
- [6] M. Gondran and A. Gondran. Energy flow lines and the spot of Poisson–Arago. *American Journal of Physics*, 78(6) :598–602, 2010.
- [7] M. Gondran and A. Gondran. *Mécanique Quantique : Et si Einstein et de Broglie avaient aussi raison ?* Editions Matériologiques, 2014.
- [8] J. D. Jackson. *Classical electrodynamics*. Wiley, New York, NY, 3rd ed. edition, 1999.
- [9] S. Kocsis, B. Braverman, S. Ravets, M. J. Stevens, R. P. Mirin, L. K. Shalm, and A. M. Steinberg. Observing the Average Trajectories of Single Photons in a Two-Slit Interferometer. *Science*, 332(6034) :1170–1173, 2011.
- [10] G. Mourou, M. Menu, and M. Preti. *L'impressionnisme entre art et science : La lumière au prisme d'Augustin Fresnel (de 1790 à 1900)*. Hermann, 2018.
- [11] R. D. Prosser. The interpretation of diffraction and interference in terms of energy flow. *International Journal of Theoretical Physics*, 15(3) :169–180, Mar 1976.
- [12] R. Taillet. *Optique physique*. de Boeck Université, 2006.
- [13] Wikipedia. Arago spot.
- [14] Wikipedia. Augustin Fresnel.
- [15] T. Young. The Bakerian Lecture. On the Theory of Light and Colors. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 92 :12–48, 1802.

Les auteurs

Michel Gondran a fait toute sa carrière à EDF R&D en tant qu'ingénieur-chercheur et conseiller scientifique. Ses recherches pluridisciplinaires l'ont amené à enseigner dans de nombreuses écoles et à l'Université (École Polytechnique, ENSAE, Ponts et Chaussées, ENSTA, Université Paris-Dauphine). Il est membre de l'Académie européenne interdisciplinaire des sciences (président 2005-2010). Il est lauréat de l'Académie des sciences et de l'Académie des inscriptions et belles-lettres.

Alexandre Gondran est enseignant-chercheur en informatique et mathématiques à l'École nationale de l'aviation civile (ENAC) à Toulouse. Il est ingénieur de Télécom Paris (2001) et docteur en informatique de l'Université technologique de Belfort-Montbéliard (2008). Il a animé des expériences de physique au Palais de la découverte et enseigné en secondaire la physique/chimie.